

中国・日本科学最前線

— 研究の現場から —

2010年版

独立行政法人 科学技術振興機構 (JST)
中国総合研究センター



巻頭言

独立行政法人 科学技術振興機構 中国総合研究センター長

藤嶋 昭

一衣帯水の間にある日本と中国の両国の親密な交流と相互理解は両国の発展と平和のために不可欠であることはいまさら述べる必要もないことであります。科学技術分野における緊密な交流と相互理解はその中核であり、それを通しての日中両国の科学技術の発展は、両国の発展のみならず、現下の世界経済の危機的状況の緩和や地球環境問題の解消にも資するものです。

中国総合研究センターでは、日中両国の科学技術分野での交流の重要性に鑑み、数年来、その交流および相互理解の促進を目的として活動してまいりました。ホームページ (<http://www.spc.jst.go.jp/>) を通じての日中科学技術関連情報の発信もその活動の一環です。また、毎月1回、中国科学技術月報をメールマガジンとして発行し、日中両国の科学技術分野の動向や交流の最前線における生の声を取り上げて紹介してきました。去年の6月号からは毎号テーマを絞った特集を組み、発行してまいりました。今年は12期が発刊いたしました。どの号でも日中両国の多くの研究者のご寄稿をいただき、時を得た研究成果についてのレポートを読者の皆様にお届けすることができました。幸いにも日中両国の多くの読者の方々より大変ご好評をいただいております。

このたび今年度の「特集記事」にご寄稿いただきました貴重なレポートを、メールマガジンの形のみならず、「中国・日本科学最前線：研究の現場から」2010年度集の冊子としても纏め、さらに多くの方々にお届けすることにいたしました。

このような運びになりましたのは、ひとえにご寄稿いただいた多くの著者の方々の当センターへのご理解、ご協力の賜物と、ここから厚く御礼申し上げます。

また、今後とも当センターへの御支援をよろしくお願い致します。



卷首语

独立行政法人 科学技术振兴机构 中国综合研究中心主任

藤岛 昭

日本与中国一衣带水，两国的密切交流与相互理解对两国的发展与和平而言不可或缺，这点毋庸置疑。而在科学技术领域中的紧密交流与相互理解正是其核心，通过科技交流而带来中日两国科学技术的发展，这不仅对两国的发展起到促进作用，也能为缓解目前世界经济危机及解决地球环境问题起到一臂之力。

中国综合研究中心有鉴于中日两国在科学技术领域进行交流的重要性，数年来一直以促进交流及相互理解为目的，持续开展活动。通过网站（<http://www.spc.jst.go.jp/>）发布中日科学技术相关信息的举措也是该活动中的一环。此外，以每个月1次的电子杂志形式发行中国科学技术月报，将中日两国科学技术领域的动向及交流最前沿的研究成果介绍给读者。今年一共发行了12回，每份月刊都围绕着一个主题制作特辑并发行。无论哪一份月刊，均得到了中日两国研究学者的踊跃投稿，从而得以为读者奉上极具时效性的研究成果报告。而令人颇感欣慰的是，该月刊在中日两国的众多读者当中备获好评。

本次，我们不仅局限于电子邮件的形式，特将本年度投稿于“特辑报道”的贵重报告汇总成一本小册子——《中国·日本科学最前沿：来自研究室的报告》2010年度集，谨以此呈奉给更多的读者。

该书得以付梓，全赖众多踊跃投稿的作者对本中心工作给予的理解和支持，在此衷心表示谢意。

期望各界今后一如既往对本中心给予大力支持！

目次

再生可能エネルギー

- はじめに…………… 2
- 中国の再生可能エネルギー研究の現状と動向…………… 3
陳 軍（中国教育省科学技術委員会学部委員 南開大学 新エネルギー 材料化学研究所 教授）
- 中国の太陽光発電産業の現状およびその発展…………… 13
翟佐緒（全国太陽光発電エネルギーシステム標準化技術委員会委員長）
- 中国における風力発電技術とその市場…………… 19
姚興佳（風力エネルギー技術研究所 所長）
- 2008年中国水素エネルギーの発展…………… 25
毛 宗強（清華大学 教授 中国再生可能エネルギー学会副理事長）
- リチウムイオン電池およびそのキーとなる材料…………… 29
黄学傑（中国科学院物理研究所 クリーンエネルギーセンター常務副主任）
- 日本の再生可能エネルギーの動向…………… 33
柏木 孝夫（東京工業大学統合研究院 教授）
- 次世代燃料電池のための材料開発…………… 37
渡辺 政廣（山梨大学クリーンエネルギー研究センター・センター長）
- 実用化バイオマス転換プロセスの研究開発…………… 43
坂西 欣也（（独）産業技術総合研究所・バイオマス研究センター長）
- 日中太陽電池産業の現状および展望…………… 47
丸川 知雄（東京大学社会科学研究所 教授）

原子力の開発及び利用

- はじめに…………… 52
- 世界各国における原子力発電の開発戦略の歩みと中国における原子力発電の開発…………… 53
歐陽予（中国原子力工業集団会社総設計師 中国科学院院士）

●核エネルギーは中国将来のエネルギー供給に対する重要性……………	65
呉 宗鑫（中国国家原子力安全専門家委員会委員 清華大学核エネルギーと新エネルギー技術研究院学術委员会主任）	
●中国の先進原子力技術開発に力を注ぐ-中国原子能科学研究院の紹介……………	53
柳 衛平（中国原子能科学研究院 副院長）	
●中国原子力エネルギーの開発動向及び先進原子炉評価法……………	73
周 志偉（清華大学原子力及び新エネルギー技術研究院原子炉工程研究所副所長）	
●高速炉技術の開発と原子力の持続可能な成長の促進……………	79
周 培徳（中国原子能科学研究院高速炉工程部副総工程師）	
●原子力利用の展望と課題……………	83
近藤 駿介（原子力委員会委員長）	
●革新的原子炉CANDUの研究……………	89
関本 博（東京工業大学原子炉工学研究所教授、革新的原子力研究センター長）	
●原子力プラントの安全性を向上させるための研究……………	93
若林 利男（●東北大学大学院工学研究科 教授）	
●中国原子力の概況……………	97
窪田 秀雄（日本テピア㈱ テピア総合研究所・副所長）	

食糧の持続的生産に関する研究

●はじめに……………	104
●中国の食糧安全保障戦略……………	105
万 建民（中国農業科学院作物科学研究所所長）	
●主要農作物の品種選抜育種の現状および課題……………	109
袁 奎明（山東省農業持続発展研究所 農業遠隔計測研究室主任）	
●中国の主要食糧資源の持続生産と高度利用技術の開発……………	115
劉 建学（河南科技大学食品生物工程学院副院長）	
●産業の発展を猛スピードで推し進めた中国の淡水魚業……………	123
郝 旭文（中国水産科学院淡水漁業研究センター副主任）	
●日本における食料・農業問題……………	129
鈴木 宣弘（東京大学大学院農学国際専攻 教授）	
●食料の持続的生産のための日中農業研究協力……………	133
小山 修（(独)国際農林水産業研究センター研究戦略調査室長）	
●日本における稲作及び品種改良……………	137
岩永 勝（農業・食品産業技術総合研究機構 （農研機構） 作物研究所 所長）	

- 効率的な家畜繁殖技術の開発……………141
渡辺 伸也（独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 畜産草地研究所 高度繁殖技術研究チーム 上席研究員）
- 日本における海水魚養殖の来歴と現状……………147
村田 修（近畿大学水産研究所所長）

水資源

- はじめに……………152
- 中国における飲用水処理の応用の現状と発展……………153
劉 文君（清華大学飲用水安全研究所所長）
- 中国の流域汚染と水体浄化……………161
付 徳剛（東南大学生物科学医学工学部 生物電子学国家重点実験室 教授）
- 有害藻類ブルーム処理の原理、方法と応用……………165
俞 志明（中国科学院海洋生態・環境科学重点実験室主任）
- 中国汚水処理技術の研究と発展……………169
施 漢昌（清華大学 環境科学工学部教授 環境シミュレーション汚染制御国家重点聯合実験室主任）
- 銀川平原における主な水環境問題およびその原因と対策……………173
銭 会（長安大学水文学・水資源工学部主任）
- 中国における海水淡水化の進展……………179
馬 敬環（天津工業大学環境化学工学部教授）
- 日本の水資源の現状と課題……………183
国土交通省水資源部総合水資源管理戦略室
- 海水淡水化技術の普及状況と課題……………189
平井 光芳（財団法人造水促進センター淡水化技術部部長）
- 水不足問題の解決に貢献する膜技術……………195
松山 秀人（神戸大学大学院工学研究科 教授 先端膜工学センター センター長）
- 20年後に生き残る水資源開発を……………199
矢部 孝（東京工業大学教授 株式会社エレクトラ 代表取締役）

大気汚染対策

- はじめに……………202
- 自動車排気ガス制御技術の進歩……………203
李 俊華（清華大学環境科学・工学部 教授）

●東アジア地域における汚染物排出量が地上オゾンに及ぼす効果……………	207
安俊嶺（中国科学院大気物理研究所 研究員）	
●中国大気汚染物質排出リストの発展と挑戦……………	213
王書肖（清華大学環境科学工学部 大気汚染抑制研究所副所長）	
●中国の大気中低分子有機酸研究及び大気汚染防止におけるその役割……………	217
李 心清（中国科学院地球化学研究所研究員）	
●日本におけるCO ₂ 地中貯留技術開発の取り組み……………	221
薛 自求（（財）地球環境産業技術研究機構 CO ₂ 貯留研究グループ 主任研究員）	
●東アジアにおける越境大気汚染と観測……………	225
高見 昭憲（国立環境研究所 アジア自然共生研究グループ アジア広域大気研究室 室長）	
●大気環境診断・予測技術の開発……………	229
田口 彰一（産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門 地球環境評価研究グループ グループ長）	
●発展途上国における硫黄酸化物の排出抑制とゼロエミッションサイクルの構築……………	233
坂本 和彦（埼玉大学大学院理工学研究科教授、環境科学研究センター長）	

生態系保全技術

●はじめに……………	242
●植物の侵入が生態系の炭素・窒素循環に対する影響……………	243
李 博（復旦大学特別招聘教授、生物多様性科学研究所所長）	
●中国の水土流失及び水土保持の研究と実践……………	249
雷 廷武（中国科学院水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵食・乾燥地農業国家重点実験室主任）	
●中国の土砂河川における生態環境水要求の特徴……………	255
倪 晋仁（北京大学環境工学研究所 所長）	
●窒素沈着が森林生態系の土壌含有炭素に与える影響……………	261
韓士杰（中国科学院瀋陽生態研究所 研究員）	
●日本における外来植物の実態とそのリスク評価……………	265
藤井 義晴（（独）農業環境技術研究所生物多様性研究領域 外来生物生態影響リサーチプロジェクトリーダー）	
●野生生物管理と自然再生……………	269
松田 裕之（横浜国立大学大学院教授）	
●生物多様性と生態系サービスに関する研究……………	271
中静 透（東北大学生命科学研究科教授）	
●生物多様性を育む生態系ネットワーク：安定同位体分析を用いた評価手法の開発……………	275
奥田 昇（京都市立生態学研究センター 准教授）	

資源循環利用技術

- はじめに……………280
- 循環型経済―中国における持続可能な発展の実践……………281
畢軍（南京大学環境学院院长）
- 炭素資源循環技術―水熱によるバイオマスとCO₂の資源への転化……………285
金 放鳴（同済大学環境科学工程学院 炭素資源循環研究所所長）
- ごみ資源化利用技術の研究……………289
李 海濱（中国科学院広州エネルギー研究所バイオマスエネルギー研究センター長）
- 中国海洋生物資源の持続利用に関する研究……………295
李 新正（中国科学院海洋研究所 研究員）
- 循環型社会の構築における日中協力の可能性……………301
吉田 綾（国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究センター 研究員）
- 都市廃水・廃棄物からの資源・エネルギー回収システム……………303
津野 洋（京都大学大学院工学研究科 教授）
- 日本の一般廃棄物の処理・リサイクルの動向……………307
占部 武生（龍谷大学理工学部環境ソリューション工学科教授）
- 垂臨界・超臨界水によるバイオマス廃棄物の有効利用技術の開発……………309
佐古 猛（静岡大学大学院創造科学技術研究部 教授）
- 資源循環型社会の展望……………315
細田 衛士（慶應義塾大学経済学部 教授）

資源探査技術

- はじめに……………320
- 南海北部大陸棚における天然ガスハイドレートの生成・集積体系に関する基本的研究……………321
呉 時国（中国科学院海洋研究所海洋地質・環境重点实验室主任）
- 深海自律型水中ロボットの開発及び大洋資源調査におけるその応用……………327
王 越超（中国科学院瀋陽自動化研究所所長）
- 中国海洋における鉱物資源およびその探査・開発の展望……………331
莫 傑（中国国土资源部青島海洋地質研究所科学技術諮問委員会弁公室主任）
- 塔河地区西南部の古生界碎屑岩油ガス集積評価法……………339
周 文（成都理工大学エネルギー学院 副院長）
- 中国の海底資源調査・研究の進展……………349
初鳳友（国家海洋局第二海洋研究所 国家海洋局海底科学重点实验室 首席研究員）

●衛星リモートセンシング観測技術の利用……………	355
張 良培（武漢大学測量製図リモートセンシング情報工学国家重点実験室特別招聘教授）	
●衛星レーザー通信端末機の追跡・照準精度測定装置の研究……………	359
王 建民（北京大学情報科学技術学院 量子情報・測量教育部重点実験室 准教授）	
●海底資源探査機の開発と応用……………	365
三輪 哲也（独立行政法人海洋研究開発機構 海洋工学センター 先端技術研究プログラム基盤技術研究グループリーダー）	
●電磁波による海底資源の新しい探査法の開発……………	369
後藤 忠徳（京都大学大学院工学研究科 准教授）	
●資源探査における衛星リモートセンシング技術の進歩……………	373
三箇 智二（日鉱探開(株) 地質部勤務情報地質担当部長）	
●日中資源探査用ロボット機器の研究の進展……………	379
鄧 明聡（岡山大学工学部システム工学科 准教授）	

環境・エネルギー Part 1 ― 低炭素社会づくりを目指す

●はじめに……………	384
●持続可能な発展と日中の役割……………	385
小宮山 宏（株式会社三菱総合研究所理事長）	
●低炭素社会実現のためのエネルギーシステムの構築……………	389
山地 憲治（東京大学・工学系研究科 教授）	
●地球温暖化の対応策について……………	393
秋元 圭吾（（財）地球環境産業技術研究機構（RITE） システム研究グループリーダー）	
●何故ソフトエネルギーへの移行と省エネか……………	397
藤井 石根（明治大学名誉教授）	
●「一石多鳥」を目指す中国版グリーンニューディール政策―中国の低炭素経済政策……………	401
周 璋生（立命館大学政策科学部教授 立命館サステナビリティ学研究センター長 立命館孔子学院学院長）	
●中国のクリーンエネルギー技術の研究進展……………	405
黄 偉光（中国科学院クリーンエネルギー技術発展センター主任）	
●中国における太陽エネルギー利用技術の開発および産業の現状……………	411
苗 蕾（中国科学院・広州エネルギー研究所太陽エネルギー研究室 主任）	
●中国における低炭素社会づくりの取り組み……………	417
大野木 昇司（日中環境協力支援センター有限会社 取締役社長）	

環境・エネルギー Part 2 ― 低炭素社会実現に向けた新技術の開発

- はじめに.....422
- バイオマス発電システムのエネルギー貢献度.....423
趙 黛青（中国科学院广州エネルギー研究所エネルギー戦略センター主任/教授）
- CCS発展の現状と冶金化工における省エネ・排出削減技術.....429
袁章福（北京大学工学院教授）
- O₂/CO₂燃焼方式における煤塵生成および制御に関する研究の進展 433
姚 洪（華中科技大学・石炭燃焼国家重点実験室教授/博士課程教員）
- 高効率クリーン燃料エンジンの開発.....439
黄 佐華（中国西安交通大学教授）
- グリーン石炭発電とCO₂回収技術 445
鄭 丹星（北京化工大学化学工程学院 教授）
- 水素エネルギー社会の構築を目指して―低炭素社会実現のために―.....451
勝田 正文（早稲田大学理工学術院環境・エネルギー研究科教授）
- 次世代高効率太陽電池の開発と展望.....457
中野 義昭（東京大学先端科学技術研究センター 副所長）
- 低炭素社会実現のための自動車新燃料技術―ジメチルエーテル（DME）の再考― 461
小熊 光晴（独立行政法人 産業技術総合研究所 新燃料自動車技術研究センター 新燃料燃焼チーム主任研究員）



再生可能エネルギー

はじめに

地球のエネルギー資源は限られている。資源を枯渇させずに効率よく利用することが社会の持続的発展には不可欠である。近年、中国は、経済の高度成長に伴ってエネルギー消費が急増し、世界第二位の石油消費国になった。エネルギー資源の開拓は中国经济発展の重要な要素である。日本も、エネルギー資源のほとんどを輸入に依存しており、エネルギー自給率の向上は長年の懸案である。原油高や地球温暖化の問題を論ずるまでもなく、再生可能エネルギーの利用拡大やクリーンエネルギーの開発はまさに人類に課せられた今世紀最大の課題の一つである。

再生可能エネルギーは太陽光発電、風力発電のような自然エネルギー、バイオマス発電、水素燃料製造のようなリサイクルエネルギー、クリーン燃料電池のような従来型エネルギーの新利用形態などを含む。今年1月、太陽光や風力などの再生可能エネルギーの利用拡大、促進を目指す国際再生可能エネルギー機関（IRENA）が75ヶ国の署名によって発足した。欧州太陽エネルギー協会のヘルマン・シェア会長はこの会議で「IRENAは、先進国と発展途上国の双方に、再生可能エネルギーの早期導入を助言し、支援する。IRENAは、IAEA（国際原

子力機関）やIEA（国際エネルギー機関）と同等の役割を果たすだろう。」と述べた。今後、地球温暖化や化石燃料の枯渇に対応するため、再生可能エネルギーに関する技術移転や資金調達、情報交換はさらに活発になるだろう。

このような状況の下、今月号（第30号）の中国科学技術月報では、中国と日本の資源エネルギー研究の専門家、とりわけ再生可能エネルギーの利用やクリーンエネルギーの開発に携わっている先生方に、日中におけるエネルギー問題への取り組みの最前線をご紹介いただいた。この特集では、両国の再生可能エネルギー利用の状況を俯瞰するほか、中国の太陽光発電、風力発電研究および水素エネルギーの利用拡大の実状および動向、日本のバイオマスエネルギーの開発状況や両国の次世代燃料電池など従来型エネルギーの新利用形態などの研究、および日中太陽光発電産業界の実態などさまざまな記事をまとめてお届けすることにした。

本特集が日中両国のエネルギー資源についての研究交流の更なる発展のきっかけとなり、再生可能エネルギー開発、利用の緊急性に関する読者の皆様のご理解を深める一助となれば幸いである。

中国総合研究センター

中国の再生可能エネルギー研究の現状と動向

•Profile•



陳 軍 Chen Jun ● 中国教育部科学技術委員会学術委員 南開大学 新エネルギー 材料化学研究所 教授

1967年9月生まれ、博士、教授。1999年オーストラリアWollongong大学で材料を専攻、博士号を取得。2002年日本の独立行政法人産業技術総合研究所関西センター（AIST Kansai Center）のNEDO研究員に就任。2002年南開大学特別招聘教授に就任するとともに、教育省の世紀を跨ぐ優秀な人材に選ばれ、2003年国家傑出青年科学基金を獲得、2005年教育省長江学者特別招聘教授に選ばれる。現在、国家863計画先進エネルギー技術分野専門家、教育部科学技術委員会学術委員、南開大学高効率エネルギー貯蔵教育部プロジェクト研究センター主任、天津市エネルギー材料化学重点実験室主任。エネルギー材料の研究と開発に継続的に従事し、新エネルギー材料、高エネルギー化学電池等の面において成果を収得。すでにAcc. Chem. Res., J. Am. Chem. Soc., Angew. Chem. Int. Ed., Adv. Matter等の国際的に著名である定期刊行物にSCI収録論文100余篇を発表、他人による引用は2000余回。中国、米国、欧州の発明特許の権利20件を獲得。「新エネルギー材料」、「エネルギー化学」、「化学電池：原理、技術と応用」及び「ニッケル水素二次電池」を編集・執筆。2002年Wicke国際学術賞（国際金属水素委員会、2年ごとに1名選出）、2006年度天津市自然科学一等賞（第一完成者）、2007年第一回中国電気化学青年賞、2008年柳大綱優秀青年科学技術賞、2009年ゼネラルモーターズ中国大学自動車分野創新人材賞一等賞等の奨励を獲得。

中国経済・社会の持続的かつ急速な発展は、膨大なエネルギーの確保と切り離すことはできない。エネルギー確保は中国経済・社会発展の重要な鍵であり、経済の安定と国家の安全につながっている。今後数十年は中国経済・社会の全面的発展、中華民族の復興実現のカギとなる時期であり、エネルギー体系構築の任務は重大である。ゆとりある社会（小康社会）を目指す過程において、十数億人民の日増しに増大するエネルギー消費のニーズを満たすために、中国は今後の十年から二十年の間に世界最大のエネルギー消費と供給の体系を完成させることにしている。中国特有のエネルギー資源と環境の下において、社会・経済発展のニーズを満たすことができるだけでなく、環境にやさしいことを如何にして最大限に実現することができるかが、我々が直面している極めて困難な課題である。このために、中国独自の新しいタイプのエネルギー資源体系開発の道を歩み、これによって比較的小さなエネルギー資源と環境への代価で現代化を構築する戦略的目標を実現することが差し迫って必要となっている。その必要条件は、

1. 低消費・高効率で、多元的に発展し、クリーンな環境保護を可能とし、
2. 科学技術先行で、国際協力を堅持し、利用効率が高く、先進的な技術レベルであり、
3. 汚染排出が少なく、生態環境に対する影響が小さく、供給が安定してかつ安全な、エネルギー生産流通消費体系の構築に努めることである。

人類のエネルギー利用はたきぎの時代から石炭の時代、さらに石油・ガスの時代への変遷を経てきたが、エネルギー利用の総量が増加するにつれ、エネルギー資源構造も絶えず変化している。いずれの利用エネルギーの変遷も、生産力の巨大な飛躍をとまっておらず、人類経済・社会の発展を大きく推進した。同時に、人類がエネルギー、特に化石エネルギーを使用する量がますます多くなるにつれ、エネルギーの人類経済・社会発展に対する

制約と資源環境に対する影響もますます重要な問題となつて来ている。今後、中国はエネルギー資源多元化の道を歩む必要がある。即ち、エネルギー資源構造の確立を加速化させ、石油供給を増やす一方、エネルギー生産と消費における天然ガス、原子力エネルギー、再生可能エネルギーの比率を大いに高め、さらに新たに増えるエネルギー需要に対する供給は、効率の高いエネルギーで、クリーンエネルギー、新しい再生可能なエネルギー等の、低炭素または無炭素高品質エネルギーを主とする方向で努めなければならない。

国連開発計画（UNDP）は新エネルギーを、第1に大型・中型水力発電、小型水力発電、第2に太陽エネルギー、風力エネルギー、現代的バイオマスエネルギー、地熱エネルギー、海洋エネルギーを含む新しい再生可能エネルギー、第3に従来型バイオマスエネルギーの3つのタイプに分けている。国際エネルギー機関（IEA）は、再生可能エネルギーは持続的補給が可能な自然のプロセスに起因するエネルギーであると定義している。そのそれぞれの表現はいずれも太陽または地球内部の深いところから直接的または間接的に発生する熱エネルギーである。これには太陽エネルギー、風力エネルギー、バイオマスエネルギー、地熱エネルギー、水力エネルギーと海洋エネルギー、及び再生可能な資源から派生するバイオ燃料と水素によって発生する熱エネルギーが含まれる。2005年に採択された「中華人民共和国再生可能エネルギー法」は、再生可能エネルギーとは風力エネルギー、太陽エネルギー、水力エネルギー、バイオマスエネルギー、地熱エネルギー、海洋エネルギー等の非化石エネルギーを指すと規定している。2006年1月1日の「再生可能エネルギー法」の実施は、中国の新エネルギーと再生可能エネルギーが新しい歴史の段階に入ったことを示している。本論文では主として太陽エネルギー、水力エネルギー、バイオマスエネルギー、水素エネルギーと燃料電池について紹介する。

1. 太陽エネルギー

太陽エネルギーは地球外の最大のエネルギー供給源であり、地球上のほとんどすべてのエネルギーはいずれも直接的または間接的に太陽エネルギーから来ている。中国は国土が広大であり、太陽エネルギー資源は豊富であり、しかも開発の潜在力を最も有している再生可能エネルギーの一つである。試算によると、中国の陸地表面が毎年受ける太陽輻射は約 $50 \times 10^{18} \text{kJ}$ であり、全国各地の太陽年間輻射総量は毎年 $335 \sim 837 \text{kJ/cm}^2$ に達し、平均値は毎年 586kJ/cm^2 であり、全国太陽年間輻射総量の分布（図1）から見てみると、チベット、青海、新疆、内蒙古南部、山西、陝西北部、河北、山東、遼寧、吉林西部と西南部、広東東南部福建東南部、海南島東部と西部及び台湾省の西南部等の広大な地区の太陽輻射の総量は極めて大きい。

エネルギー変換方式の観点からは、太陽エネルギー利用技術は光熱変換、光電変換と光化学変換に分けられる。その内、応用が最も広範なのは光熱変換技術で、これは太陽輻射エネルギーを熱エネルギーに変換して利用する技術である。

（1）光熱利用

光熱利用の種類は多く、使用する温度の高低に基づいて次の三種類に分けられる。第1は低温（ 200°C 以下）利用であり、主な応用形式にはソーラー温水器、ソーラー乾燥、ソーラーハウス、ソーラーエネルギー空調冷却システム等がある。第2は中温（ $200 \sim 800^\circ\text{C}$ ）利用であり、主な応用形式にはソーラーファーン、太陽熱発電、集光集熱装置等がある。第3は高温（ 800°C 以上）利用であり、主な応用形式には高温ソーラーファーン、ソーラーエネルギー溶接機等がある。現在、低温熱利用の発展が最も速く、応用の面が最も広く、際立った省エネと環境効果もあり、すでに一定の規模を形成していて、中国の太陽エネルギー光熱産業はすでに世界で最大の太陽エネルギー光熱利用市場となっている。

太陽エネルギー火力発電は太陽輻射エネルギーを熱エネルギーに変換し、さらに各種発電装置を通じて熱エネルギーを電気エネルギーに変換するシステムで、一般的

には太陽エネルギー集熱システム、蓄熱と変換システム及び蒸気タービン発電システムによって構成される。中国西部地区は、太陽エネルギー資源が豊富で、大規模な太陽エネルギー火力発電を発展させるのに十分な地理的条件を有している。太陽エネルギーを重点とする再生可能エネルギーの開発は、西部のエネルギー供給と環境改善を確保することになる。現在中国科学院電工研究所－皇明太陽能集団連合実験室（CHSEL）はすでに中国国内で一流の太陽エネルギー技術研究センターとなっており、タンク式、パタフライ式システムの研究において豊かな成果を上げている。連合実験室は北京通県の高温実験場に位置し、太陽エネルギー集光火力発電の実験を成功裏に実現し、国家科学技術省863プロジェクトによる検査に合格しており、1MW級の太陽エネルギー火力発電所は2010年に電力網に組み入れられ発電を行うことが見込まれている。

太陽エネルギー光熱利用として技術が最も成熟し、応用規模が最大である太陽エネルギー温水器産業は、これまでに20年近くの成功の歴史があり、中国の再生可能エネルギー産業において商業化を最初に実現した産業である。企業の数から見て、現在中国には大小さまざまな太陽エネルギー温水器企業（太陽エネルギー温水器部品製造企業を含む）は10,000余社を数える。地域的分布から見ると、太陽エネルギー温水器企業は主として北京、河北、山東、江蘇、浙江を結ぶラインに分布し、太陽エネルギー産業はすでにガラス原材料加工、全ガラス集熱管と温水器加工、市場営業販売サービス、機械加工サービス、部品生産等の関連する企業との産業チェーンを形成するとともに、ブランド市場は強力なものとなっている。

太陽エネルギー温水器は省エネと環境保護の面において優れており、さらに政府が環境保護産業を守り立てようとしているところから、大きく発展する潜在力がある。中国の太陽エネルギー温水器業界の将来の発展の方向は次のとおりである。

1. 科学技術による進歩を保ち、太陽エネルギーの集積技術を高め、新型集熱、蓄熱技術、機械電気材料技術、補助エネルギー技術、建築と結合した技術、制御技術等を研究開発する。
2. 二次回路スプリット型太陽エネルギー温水システムを開発普及する。現在、中国の太陽エネルギー温水器製品は絶対多数がコンパクト型直接差し込み式の製品で、一次循環型で、非耐圧であり、建築への組み込みは容易ではない。スプリット型システムは都市建築において、特に寒冷地区の建築物への利用において明らかに優れている。二次循環システムを開発することは当面の急務であり、また発展のための方向でもある。
3. 高効率平板型ソーラー集熱器技術の開発と生産。平板型ソーラー温水システムは国外では依然として主



◎図1 中国の太陽エネルギー資源区域分布図

流の製品となっている。これは耐圧性であり、長寿命で、建築物への組み込みが容易であり、大面積での利用に適している等の長所がある。ただし中国の平板型ソーラー集熱器技術が国外と比べてまだすこし開きがあることを考慮すると、高効率の平板型ソーラー集熱器の研究開発と生産を急ぐことが、太陽エネルギー熱利用の範囲を拡大する上で重要な意義を有している。

4. 太陽エネルギー温水暖房技術を開発する。これには太陽エネルギー暖房工事ソフトウェア設計、床及び壁給熱技術等がある。
5. 太陽エネルギー中温集熱技術を開発する。これには中温集熱器、耐中高温コーティング技術、光反射技術等がある。

(2) 光発電利用

光発電利用の基本的原理は太陽電池を通じて太陽エネルギーを電気エネルギーに変換し、制御、変換システムを経て、電力網に送られて利用されるか、またはバッテリー内に蓄えられる。光から電力を発電する太陽エネルギーを最も直接的、効果的に電気エネルギーに転化する方式である。

現在太陽電池は、結晶シリコン電池（単結晶及び多結晶を含む）、非晶／微結晶シリコン薄膜太陽電池、銅-インジウム-ガリウム-セレン（CIGS、Cu(InGa)Se₂）太陽電池、ガリウムヒ素（GaAs）及びテルル化カドミウム（CdTe）太陽電池等の幾つかのタイプがあり、研究が行われているものにさらに有機薄膜太陽電池、色素増感型太陽電池等がある。しかし実際に応用されているのは主としてやはりシリコン系太陽電池で、単結晶、多結晶及び非晶シリコン太陽電池がある。

結晶系シリコン電池は現在市場シェアの90%を占めており、その変換効率がよく（量産型の変換効率は16～

18%に達することが可能である）、相対的に安定し（20年使用後の変換効率は依然として出荷時の80%に達することが可能である）、生産技術が成熟し、生産拡大速度が比較的速いことから、これからの5～10年、太陽電池製品は引き続き結晶シリコン材料を主とすることが見込まれる。

太陽光発電産業の急速な発展により、結晶シリコン原材料の逼迫状況はますます深刻なものとなっており、シリコン材料の価格は持続的に上昇し、シリコン材料は結晶シリコン太陽電池コスト全体の60%前後を占めている。2001～2003年、世界の太陽エネルギー変換用クラスの高純度シリコン原材料の販売価格はほぼ25ドル／キロの水準で、2004年以降、価格は絶えず高騰し、2005年に世界市場で50ドル／キロを超え、2006年には100ドル／キロを超え、2007年の価格は220～300ドル／キロで、2008年初頭、市場価格は最高で400ドル／キロ以上に達した。多結晶シリコン製造産業の粗利益は70～90%に達したことがあり、国内外の多くのプロジェクトの操業開始を促した。予備的な統計によると、現在中国国内で建設中の中国の多結晶シリコンプロジェクトは数十件あり、2009年の中国の多結晶シリコン原料の生産量は10,000トン以上となり、国際的大型工場の多結晶シリコン原料の生産量は50,000トン以上となるであろう。一部プロジェクトの生産能力は2008年初頭から少しずつ発揮され始め、多結晶シリコンの需給関係を徐々に改善することになるであろう。

現在、金融危機の影響を受け、多結晶シリコン材料の価格はすでに元に戻り始めており、市場は基本的に需給のバランスを保持するであろう。表1は中国国内部分の多結晶シリコン企業の生産能力・生産量予測表である。

近年、シリコン材料の不足は薄膜太陽電池産業の成長を促している。シリコン系薄膜太陽電池とは主として非晶シリコン（a-Si）電池、微結晶シリコン（μc-Si）電池

	2008		2009		2010		2011		2012	
	生産能力	生産量	生産能力	生産量	生産能力	生産量	生産能力	生産量	生産能力	生産量
新光硅業	1260	1000	4260	1260	7260	2600	7260	4300	7260	6000
洛陽中硅	3000	1600	3000	2500	7000	4500	7000	6000	7000	6800
東汽峨眉	700	350	700	600	2200	1200	2200	2000	3700	2800
江蘇中能	1500	800	3000	1800	3000	2300	4500	3500	4500	4000
深圳南玻	1500	300	1500	800	1500	1000	1500	1300	3000	1800
寧夏陽光	1000	100	1000	700	1000	900	2500	1200	2500	1500
永祥多晶硅	1000	300	4000	2000	7000	5000	10000	7500	10000	9000
亞洲硅業	2000	500	4000	2000	6000	4000	6000	5200	6000	5700
特電工	0	0	1500	0	1500	500	1500	1000	1500	1200
江蘇順大	1500	200	1500	500	1500	1000	1500	1200	1500	1500
神州硅業	1500	0	1500	400	1500	800	1500	1200	1500	1500
総計	14960	5150	25960	12560	39460	23800	45460	34400	48460	41800

◎表1 中国国内一部多結晶シリコン企業の生産能力、生産量予測表、単位：トン

資料出所：宏源証券研究所レポート

及び微結晶非晶積層 (α -Si/ μ c-Si) 電池を指す。これらは薄膜太陽電池の主流で、2007年に薄膜太陽電池の全体の77.14%を占めている。すでに市場に進出している別の2種類の薄膜太陽電池はCdTe太陽電池とCIGS太陽電池で、2007年にそれぞれ薄膜太陽電池の21.14%と1.72%を占めている。

2004年以前の中国の薄膜太陽電池産業は単接合非晶シリコン電池を主としており、2004年に天津津能会社が2.5MWp 2接合型非晶シリコン電池を導入してから、非晶シリコン2接合型電池産業はより速い発展を遂げている。2007年末現在、薄膜太陽電池の生産に従事している中国の企業は20社近くとなっており、総生産能力は80MWpに達している。現在技術レベルがさらに高い微結晶非晶積層 (α -Si/ μ c-Si) 型電池生産ラインの建設を多くの企業が進めている。例えば尚徳電力(上海)と河北新奥の両社はそれぞれ50MWpの2接合型微結晶非晶シリコン電池(一期)を導入、福建金太陽は南開大学等の機関と協力して技術研究開発センターを建設し、設備を自主的に製造して生産能力を拡大している。これらの電池生産ラインが完成するとともに生産能力を形成した場合、中国の薄膜太陽電池産業は新たな技術レベルに引き上げられることになるであろう。

現在、非晶シリコン電池はそのコストが低く、外観がきれいで、弱光性能がすこし良好であることから重視されている。しかし非晶シリコン電池はまた幾つかの課題、例えば効率がすこし低くかつ減衰があり、結晶シリコン電池より使用寿命が短い、市場の認知度がまだ低い等の問題がある。この他、薄膜太陽電池産業はまだ絶えず改良が行われている過程にあり、技術の更新が速く、設備が定まらず、設備初期投資が高く、従って投資のリスクは結晶シリコン電池より高い。

太陽光発電産業は世界で発展が最も速いエネルギー産業の1つであり、世界の光発電市場の強い力に引っ張られ、中国の太陽電池製造業は技術を導入し、そのノウハウを吸収し、さらにイノベーションを通じて、長足の進歩を手にした。中国太陽エネルギー協会提供のデータによると、2006年の中国全国の太陽電池生産量は438MW、2007年の中国全国の太陽電池生産量は1188MWで、前年同期と比べて293%増となり、同年の中国の太陽電池生産量は世界の29%を占めた。中国はすでに欧州、日本を追い越して、世界の太陽電池生産の第一の大国となっている。国内の将来の光起電力市場は主として次の幾つかの面によって構成される。

1. 辺境の電力網未カバー地区の電力網から離れた給電。政府の「電気を村に送り届ける」プロジェクトにおいて、光起電力発電システムは主導的役割を発揮するであろう。光起電力発電の農村辺境地区における普及は依然として短期の中国における光起電力発展の主な成長ポイントである。

2. 大規模荒野・砂漠発電所。大規模な電力網に組み入れる光起電力発電システムの構築は太陽エネルギー資源の戦略的開発が必ず経なければならない道である。中国には108万平方キロの広大な荒野・砂漠資源があり、日照資源はきわめて豊富であり、大型の電力網に組み入れる光起電力発電プロジェクトの実施により廃物を宝に変えることが可能となり、同時にまた発電所周辺の自然環境を一步一步改善し、地域経済の発展を促し、さまざまな効果を同時に上げるという目的を達することができる。

3. 分散電源、即ち屋上電力網併入システムと建物一体型太陽光発電(BIPV)である。分散電源の利用はドイツ等の国の政府の奨励政策運用に見られるように、さまざまな面の投資を動員してエネルギーと環境の問題を解決する有効な手段であり、効果はきわめて顕著である。

この他、産業の光起電力発電技術を都市道路、小エリア照明に用いる技術はすでに多く利用されており、巨大な市場の潜在力がある。

現在太陽エネルギー発電産業を悩ませている主な問題は新型光起電力電池及び光起電力電池材料であり、コストの大幅引き下げ、効率向上、大量の光起電力電池国産化、低コスト化、大規模化をできるだけ速やかに実現することが必要とされていることである。同時に、大型太陽エネルギー基地を完成させ、大型太陽エネルギー発電所が電力系統、エネルギー貯蔵と送電に効果的に溶け込む上での関連する技術的難題を解決することが必要である。

光起電力発電のコストが比較的高く、平均コストが人民元2元/kWh以上であり、通常の火力発電の価格より高く、市場競争力に欠けており、環境保護とその他社会的効果が現在の市場条件の下においてまだ実現が困難であるため、現在の太陽光発電産業の発展は主として政府の補助金に依存しており、光起電力市場は依然として政策的な市場となっている。中国の太陽光発電産業を強力に発展させ、中国のエネルギー問題と環境問題を改善しようとする場合、太陽光発電産業自身の努力だけに頼るだけではまだほど遠く、政府の強力な支持と正確な先導がなお必要である。

太陽エネルギーは黄金産業であり、躍進産業であり、現在毎年20～30%の速度で急速に成長しており、太陽エネルギーを重点とする再生可能エネルギーは強力な資源的基礎を有している。中国の太陽エネルギー産業は必ず長足の進歩を手にし、持続可能な発展でのエネルギーに対するニーズに堪えることができるであろう。

2. 風力エネルギー

風力エネルギーはクリーンな永続的エネルギーであり、伝統的なエネルギーと比べて、風力発電は鉱物資源



◎図2 中国の風力エネルギー資源区域分布図

に頼ることはなく、燃料価格のリスクはなく、発電コストは安定し、炭素排出等の環境コストもない。風力発電は現在の新エネルギー発電の中で技術が最も成熟した、大規模開発の条件と商業化の前途を最も備えた発電方式で、短期計画の重点である。図2は中国の風力エネルギー資源区域分布図で、風力エネルギーは主として2つの大きな風が強く吹く地区に分布しており、沿海の風が強く吹く地区は主として東南沿海及び島嶼、遼寧と山東半島にあり、年間有効風力エネルギー出力密度は $200\text{W}/\text{m}^2$ 以上で、北部の風が強く吹く地区は主として新疆から甘粛を経て内蒙古高原に至る一帯で、風力エネルギー出力密度は $200 \sim 300\text{W}/\text{m}^2$ 以上である。別に一部内陸地区にも比較的豊富な風力エネルギー資源があるが、風力エネルギー出力密度は一般に $100\text{W}/\text{m}^2$ 以下である。中国の風力エネルギー資源は豊富で、大まかな見積もりによると、中国の陸上風力発電技術の開発可能な総量は10億kWクラスに達し、開発・利用の潜在力は極めて大きい。

2007年、中国は（台湾省を除く）風力発電ユニット6469台、ユニット総量6050MW、風力発電所158ヵ所を設置し、国の「再生可能エネルギー中長期計画」における2010年に風力発電ユニット容量5000MWを達成させる目標を3年繰り上げて実現し、中国は世界で第5位の風力発電国となった。

大規模化への発展と国産化率の向上にともない、風力発電のコストは明らかに低下しており、経済競争力を徐々に有するようになっており、全力を挙げて発展させることが可能である。風力発電を発展させることは1つのシステム工学であり、風力エネルギー資源、風力発電設備製造、風力発電所運転、電力網構築等の様々な分野に波及する。風力発電製造業は風力発電産業の中核であり、比較的完備した風力発電設備製造産業体系を確立し、風力発電設備自主化の水準を引き上げ、風力発電の独自構築を実現させることは、中国が風力発電を発展させる上での基礎である。

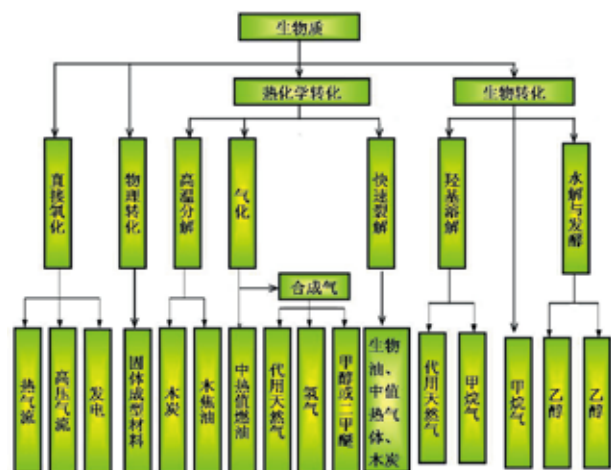
風力発電産業のスタート段階においては、政策的支援と市場の育成が必要で、企業と科学研究単位（機関、部門、企業）の技術イノベーションに対して支持を与え、MWクラス以上の風力発電ユニットの全体的設計能力を高めることを含めて、ブレード、ギヤボックス、軸受、計器用変流器及び制御システム等のカギとなる部品の設計、製造の難題を解決することが必要である。中国は風力発電設備国産化の関連政策を制定するとともに、「風力発電特許権募集」等の措置を補助として、技術イノベーション、市場育成及び産業化発展を推進している。2005年の「京都議定書」発効後、発展途上国のクリーンエネルギーに属する風力エネルギー業種は、国際CDM項目認証を行うことを通じて、評定された省エネ排出削減指標を先進国と取り引きし、これによって特別の収益を獲得することが可能となっている。一種のクリーンエネルギーとして、現在中国においては、風力発電は引き続き $0.24\text{元}/\text{kWh}$ の補助を受けるとともに、CDM認証の風力発電プロジェクトを通じて $0.07 \sim 0.10\text{元}/\text{kWh}$ の特別な収入を得ることが可能である。2008年10月現在、すでに国際CDMプロジェクト執行理事会の認証に合格している風力CDMプロジェクトは合計538件を数え、その内254件が中国に属しており、総規模は13,072MWに達している（資料出所：UNEP Risoe Centre）。

中国の風力資源は豊富で、利用技術も基本的に成熟しており、現在の規模を備えた開発における1つの重点とし、実際の供給能力を形成することが可能である。努力の結果、より完備した国際的競争力を有する風力発電産業体系を確立しており、中国の風力発電を世界の上位に進出させている。

3. バイオマスエネルギー

バイオマスとは植物または動物の生物体から派生して得た物質の総称を指すもので、主として有機物によって構成される。これには世界のすべての動物、植物と微生物及びこれらの生物によって生じた排泄物と代謝物が含まれる。バイオマスエネルギーは重要な再生可能エネルギーである。バイオマス利用技術は2つのタイプに分けられる。1つは熱化学法を通じてバイオマスに対して変換を行うもので、もう1つは生物化学法による転化である。バイオマス転化により熱、電気、ガス、液体燃料及び化工製品を手に入れることができる。バイオマス利用技術の研究は資源研究、転化技術研究、利用技術研究、利用システムの最適化と評価の4つの部分に分けられ、資源供給が基礎で、転化と利用が中核で、環境にやさしいことが目標である。その他の再生可能エネルギーと比べて、バイオマスエネルギーは唯一の液体燃料に転化が可能な再生可能エネルギーで、独特の優れた特徴がある。

中国は人口の多い農業国であり、バイオマス資源はきわめて豊富で、毎年少なくとも7億トンの廃棄農作物（標



◎図3 バイオマスエネルギー変換技術概念図

準石炭3.5億トンに相当)が生産される。バイオマスエネルギーは中国のエネルギー構造においてかなり重要な地位を占めており、特に広大な農村地区においては、バイオマスはかつて最も重要なエネルギーであった。しかし、長期にわたって、大多数のバイオマスエネルギーの利用は直接燃焼することを主としており、大量の煙塵と残灰の排出を伴うだけでなく、農村経済と社会の進歩を妨げる重要な理由の一つとなっていた。バイオマスエネルギーの開発と利用はエネルギー源である植物と農業廃棄物等のバイオマス原料を化学的または生物学的技術を利用して高付加価値のバイオマスエネルギー、生物材料、石油製品代替品及び副産物等の環境にやさしい製品に転化する全プロセスである。現在、中国のバイオマス開発と利用は主としてバイオマス炉の開発、バイオマスガス化技術、バイオマス液化技術、バイオマスエネルギーメタンガス開発、バイオマス発電技術(直噴燃焼式発電、ガス化発電、熱電併給)及びバイオマス成型燃料及び木炭利用技術等である。研究されているバイオマスエネルギー変換技術及び製品は図3を参照。その内の産業技術は主として直接酸化(燃焼)、物理的変換、化学的変換及び生物学的変換である。

バイオマス発電の面において、中国はすでに一定の成果を収めている。例えば中国科学院広州エネルギー研究所が受け持った国家863プロジェクト「バイオマスガス化発電最適化システム及びそのモデル工事」は研究開発に成功して以来、中国と東南アジア諸国において普及しており、すでに国際的に採用が最も多い中小型バイオマスガス化発電方式となっている。バイオマスわら（茎）直燃発電は現在中国で発展が最も急速で、新たなユニット設置件数が最も多い発電方式であるが、直燃発電は比較的多くのバイオマスわら（茎）資源を消費し、かつバイオマスわら（茎）直燃発電の効率は20～25%であり、小型バイオマスわら（茎）ガス化発電の効率は20%に満たず、これによってバイオマス直燃発電のコストを比較的高くし、運転管理費用を比較的大きくしているが、キー

ポイントとなるのは発電効率を向上させることである。石炭ガス化複合発電（IGCC）システムのシステム効率は40%以上にすることが可能で、中国はすでにIGCC技術を有しており、この技術の研究と開発はバイオマス発電の主な研究の方向であり、中国のバイオマスガス化発電の発展をさらに大きく推進することになるであろう。

バイオマス液化技術はセルロース起源燃料エタノール、バイオマス分解起源燃料油、バイオディーゼル燃料等の幾つかのタイプに分けられ、直接液化技術と間接液化技術がある。バイオマスからアルコール類を製造する技術はすでに基本的に完成しており、商業用モデルの段階に入っているが、生産コストが高いため、市場競争力はまだ備えていない。バイオマス直接液化により液体燃料を調製する技術は現在小規模テストと中規模テストの段階にあり、その製品はまだ実際の意義を有してはいないものの、その展望は極めて良好である。バイオマス間接液化によるメタノール及びジメチルエーテル製造の面においては、中国はまだ実験室研究の段階にある。バイオディーゼル燃料の研究と開発はスタートが比較的遅かったものの、発展の速度は極めて速く、国の科学技術部門の支持と863計画の支持を得ており、一部の科学技術研究の成果はすでに国際的にも先進的水準に達している。バイオマスが石炭よりさらに多くの水素を含有しているため、バイオマスによる水素の製造はさらに合理的で経済的であり、持続的発展が可能な水素取得の方途である。水素エネルギーの発展にともない、バイオマスによる水素製造の研究を推進しているが、現在この技術は依然として試験研究の段階にある。

国際的にはバイオマスエネルギーの開発・利用が大変重視されており、一部の国ではすでにバイオマスエネルギーを代替エネルギーの重要な発展の方向としている。例えば米国はトウモロコシを原料とする燃料エタノールを大量に製造させており、ブラジルはサトウキビを原料とする燃料エタノールを重点的に製造させている。農作物を大規模に利用して燃料を生産することは、世界的な食料供給不足をもたらすのではないかという問題がすでに国際的な論争を引き起こしている。各国の状況は異なっており、バイオマスエネルギーの開発、利用は具体的な状況を考慮する必要がある。中国は国土が広大であるが、耕作が可能である面積が相対的に小さく、人口がとても多いため、食糧安全が第一位であり、バイオマスエネルギーの発展では主として非食糧植物のバイオマス資源を利用すべきで、利用が可能であるものは主として農林牧畜業、工業及び都市生活の廃棄物で、一部の農作物もある。大規模なバイオマス資源を提供するためには、食糧安全生産の用地を保証することを基礎として、辺境の土地に生態系構築と砂漠化防止整備とを結合した、安定したバイオマスエネルギー生産基地を建設する。これと同時に、エネルギー植物の選別改良を鋭意行い、科学研究

の投資を大きくし、高度な、新しい技術を研究開発し、バイオマス転化の効率と科学技術のレベルを高めることにより、エネルギー植物の植付を重大な産業として推進し、発展させることが可能である。

バイオマスエネルギーの開発と利用は、持続可能な発展の実現、国家のエネルギー安全の保障、生存環境改善とCO2減少にとって、いずれも重要な役割と実際の意義を有している。バイオマスエネルギーの開発と利用にはバイオマス原料の生産・加工、製品転化と利用の一体化された産業チェーンと技術体系があり、また政策、法規、市場と流通等の保障体系もある。科学技術の発展と進歩にともない、バイオマスはさまざまな変換技術を通じて高い効率で利用され、石炭、石油と天然ガス等の鉱物燃料に取って代わることができる。

4. 水素エネルギーと燃料電池

水素エネルギーと燃料電池はエネルギーの安全と環境問題を解決する最も期待される手段の一つである。さまざまな方式で製造された水素ガスは、燃料電池を通じて電力に直接変換され、自動車、鉄道等の交通手段に用い、末端汚染物のゼロエミッションを実現することが可能で、また工業、商用及び建築等の固定式発電給熱施設に用いることも可能である。ひとたび非化石エネルギーの廉価な水素製造、安全な水素貯蔵・水素輸送、高効率の耐久性のある燃料電池等のかぎとなる技術が解決され、特に太陽エネルギー、原子力エネルギー、バイオマスエネルギーにより水素を大規模に製造する技術が課題を乗り越えることができれば、水素エネルギーは有効に利用できるであろう。将来の発展が期待される新型エネルギーの一つとして、水素エネルギーは一種の非常にクリーンな新型燃料となる可能性がある。現段階においては、水素製造、水素貯蔵の技術は水素エネルギーの最も主要な研究の方向で、燃料電池は水素の理想的な転化装置であり、水素エネルギー利用のかぎとなる技術である。

水素ガスの供給源はきわめて多くあり、技術もさまざまあり、化学、生物、電解、光分解等の処理プロセスがあり、その内の一部の技術、例えば水を電気分解して水素を製造する技術はすでに商業化が実現している。各種技術の発展の段階が異なるため、それぞれの技術にはいずれもその独特の将来性、経済効果と課題がある。原料の使用可能性、技術の成熟度、市場の応用とニーズ、政策とコストの問題はいずれも各種水素製造技術の選択と発展に影響するであろう。表2は幾つかの主な水素製造技術を比較している。

現在、石油・天然ガス等の化石エネルギーが水素製造における主な供給源であり、世界の水素生産量の約78%を占めている。再生可能エネルギーによる水素製造は将来の発展性があり、コストが比較的高い等の理由によって短期的には商業化の前途を見つけ出すことは困難ではあるが、この面についての研究はまだ継続中である。水素製造技術の面において、中国では一部の研究分野（生物による水素製造、硫化水素による水素製造、メタノール改質による水素製造等）が一定の成果を上げている。中国科学院大連化学物理研究所、石油大学、中国科学院理化技術研究所、ハルビン工業大学等の機関が水素製造の面においていずれも研究を行っているが、全体的に見てみると、中国国内の水素製造技術と国外技術とではまだやや大きな隔りがある。化石燃料による水素製造、バイオマスによる水素製造であろうと、あるいは水分解による水素製造であろうとも、すべての水素製造技術について述べるといずれもさらに生産効率を引き上げ、生産コストを引き下げ、運転の信頼性と融通性を強化することが必要である。

水素エネルギーシステム全体において、水素貯蔵は比較的にかぎとなる工程である。水素エネルギーの広範な利用、特に燃料電池車の商業化を実現しようとするなら、必ず水素貯蔵システムのエネルギー密度を高めるとともにコストを引き下げなければならない。水素貯蔵時の状

主な方式	技術	原料	エネルギー	排出
熱処理法	蒸気改質	天然ガス	高温蒸気	有
	熱化学水解	水	改良型原子炉高温熱	無
	ガス化	石炭、バイオマス	高温高压蒸気と酸素	有
	高温分解	バイオマス	高温蒸気	有
電気化学法	電解	水	再生可能エネルギー発電、水力発電と原子力発電	無
	電解	水	石炭または天然ガス発電	有
	光発電化学	水	直接太陽光照射	無
	光生物	水と藻類	直接太陽光照射	無
生物法	嫌気性消化	バイオマス	高温熱	有
	微生物発酵	バイオマス	高温熱	有

◎表2 主な水素製造工程・技術

水素貯蔵方法	技術の状態	最良の貯蔵方法の選択	研究開発する問題
気体水素ガス貯蔵	市場で得られるが、費用は高い	C-繊維複合材料タンク（圧力350-700barのとき水素貯蔵圧力は6-10wt%）	破断力学、安全性、エネルギー圧縮と体積減少
液体水素ガス貯蔵	市場で得られるが、費用は高い	超低温断熱真空ボンベ（1bar、-253℃のときの水素貯蔵能力は20wt%）	高液化エネルギー、放置期間のガス化損失と安全性
固体水素ガス貯蔵	発展途上（多くの研究開発問題がある）	まだ確定できない 現在最も良好と思われる選択は金属水素化物である（10 ⁶ barのとき>8wt%、貯蔵能力は>90kg/m ³ ）	重量、比較的低い脱着温度、比較的高い脱着動力学、充填時間と圧力、加熱処理、コスト、自己燃焼性、生命周期、容器両用性と最適化

◎表3 気体、液体及び固体水素ガス貯蔵技術の比較

態に従って区分すると、現在の主な水素貯蔵方式には主として金属水素化合物水素貯蔵、液化水素貯蔵、圧縮水素貯蔵等がある。表3は気体、液体及び固体水素ガスの貯蔵技術の比較を示す。

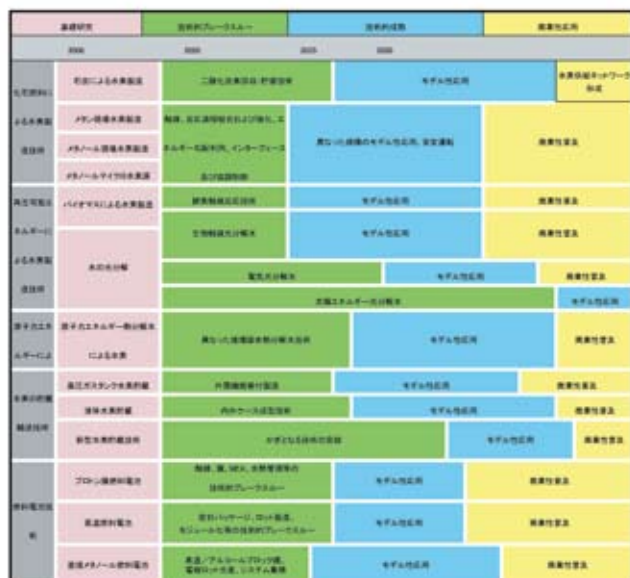
現在最も常用されている気体水素貯蔵タンクはスチールタンクであり、今後の研究の重点は耐高圧軽質複合材料タンクとガラスミクロスフィア水素貯蔵である。液体水素の最もよく見られる貯蔵方法は水素ガスを超低温（-253℃）まで冷却するものである。固体材料水素貯蔵は固定式と移動式水素貯蔵への適用の上で最も安全で効果的な方法となる可能性がある。高表面積材料、水素化物、水素反応化学水素化物、熱化学水素化物等の材料は固体の水素貯蔵に用いることが可能で、複合水素化物水素貯蔵技術が現在関心と呼ぶ重点となっている。特に非遷移金属類、例えば硼素水素化物、アルミ水素化物、アミノ化合物等である。中国の水素貯蔵技術と国外との隔たりは比較的小さく、金属水素化合物水素貯蔵とナノ複合化合物水素貯蔵材料等の研究は比較的活発で、浙江大学、南開大学、中国科学院金属研究所、中国科学院上海マイクロシステム及び情報技術研究所、北京非鉄金属研究院等の機関がいずれもこの面の研究を展開している。

燃料電池は新しい世代のエネルギー変換装置として、そのエネルギー変換効率が高く、汚染がないことから、さまざまな分野において利用されている。しかしそれぞれの分野での異なった条件の影響を受けて、燃料電池の異なった分野における利用の前途もそれぞれ異なっている。燃料電池は中国で比較的人気のある研究であり、科学研究機構以外に、ハイテク企業の参入の度合いも比較的大きい。中国のプロトン交換膜燃料電池の進歩は最も顕著で、中国科学院大連化学物理研究所、清華大学、北京理工大学、同済大学以外に、北京世紀富原燃料電池有限公司、北京飛馳緑能電源技術有限責任公司、上海神力科技有限公司、大連新源動力公司がいずれも数十ワットから数千ワットクラスのセルスタックの開発に従事しており、一部の製品はすでに燃料電池車のモデルに応用されている。この他、中国の溶融炭酸塩燃料電池と固体酸化物燃料電池に対する研究はまだスタートの段階にあり、国外との隔たりは比較的大きい。アルカリ型燃料電池、りん酸型燃料電池と特殊燃料電池等の面においても

いくつかの作業が行われている。現在燃料電池の商業化が主に挑戦しているのはコストと耐久性である。

技術の進歩が進展するのにともない、水素燃料電池は発電と交通の分野に応用されており、中国では北京、上海にすでに燃料電池商業化モデルプロジェクトがある。全体的に見て、中国の水素エネルギーと燃料電池の産業化の程度はまだかなり低く、企業は主として国の科学研究資金による開発支援に依拠しており、自主開発の能力が一般的に欠けている。今後の燃料電池の発展は主として技術の絶え間のない進歩、コストの持続的低下と国、地方の関連政策の奨励と支持に依拠することになる。

水素エネルギーシステムは極めて大きな複雑なエネルギーシステムであり、その中で水素製造技術は根幹となるもので、水素貯蔵技術は物と物を結びつける役割を果たし、燃料電池は中核であり、この3つの段階の技術の成熟度は水素エネルギーと燃料電池応用の前途を決定する。低コストで、環境にやさしい、高効率・集積の現場水素製造技術は問題解決が早急に待たれており、高容量の水素貯蔵技術の研究開発はオリジナルのイノベーション及び新しい理論的サポートが必要であり、燃料電池はコスト引き下げ、安定性向上が必要で、水素エネルギーシステムのユニット技術は集積度の向上が必要である。水素エネルギー体系発展の初期段階においては、天然ガスを過渡的な水素供給源とし、天然ガスを「現地で製造し、現場で利用する」ことを指導原則とし、中期的には石炭を主な水素源とし、石炭の高効率、大規模な水素製造を実現するとともに、CO₂回収・貯留の問題を解決する。これによって化石エネルギーのフレームの下における持続可能な発展を実現し、石炭を「現地である程度の規模をもって生産し、付近で利用する」ことを指導原則とし、長期的には非化石エネルギー（原子力エネルギー、再生可能エネルギー）を主とする一次エネルギーの水素エネルギー体系に一步一步移行するとともに、水素エネルギー管理網体系を実現する。短期的には石炭の大規模の水素製造とゼロに近い排出技術、非化石エネルギー水素製造技術、高効率分散式水素製造、水素貯蔵・輸送、燃料電池車の技術と分散式水素エネルギー利用技術等の面で重点的な段取りを取る必要がある。図4は中国の水素エネルギー科学技術発展の路線図である。



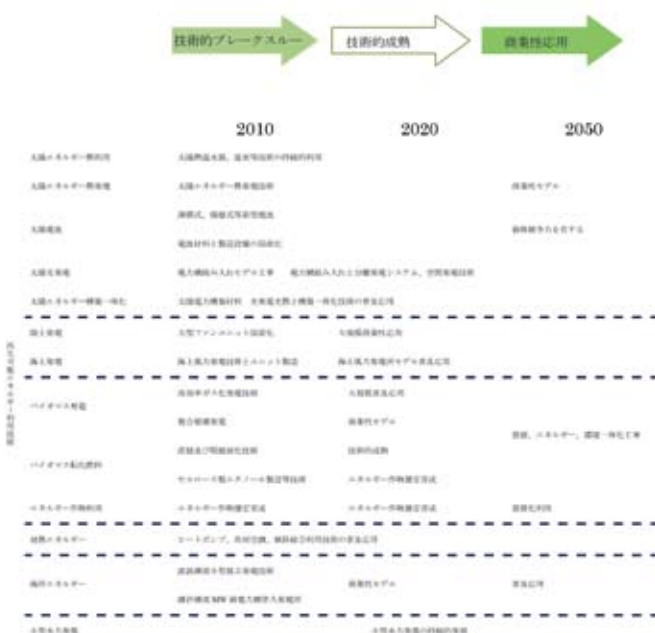
●図4 水素エネルギー技術路線図

5. まとめ

中国はすでに立法を通じて、再生可能エネルギーの開発・利用をエネルギー発展の優先分野に挙げるとともに、再生可能エネルギー中長期計画を制定しており、太陽エネルギー、風力エネルギー、バイオマスエネルギー、水素エネルギーと燃料電池等の無炭素及び低炭素エネルギーを今後の発展の重点と定めている。図5は中国の再生可能エネルギー技術中長期計画のタイムテーブルである。太陽エネルギー、風力エネルギー、バイオマスエネルギー、水素エネルギーと燃料電池等の新しいエネルギーと再生可能エネルギーの発展は、技術的要素の影響を受ける以外に、その経済性も一つの制約的要素となっており、非化石エネルギーが大きな規模で化石エネルギーに

取って代わる道のりはまだ極めて長いものであるが、温室ガス排出削減の重要性に対する国際社会の認識が絶えず進化するのにともない、エネルギー技術が低炭素、無炭素化の方向に向かって発展する趨勢は日増しに強まるであろう。

エネルギーは現代の経済社会発展の基礎と重要な制約的要素であり、エネルギーの安全は経済の安全と国の安全に関わる。エネルギー発展戦略を立派に実施し、エネルギー政策をいっそう完備したものにし、体制のメカニズムを健全化し、マクロ管理を強化し、市場の資源配置の基礎的役割をさらに明確に設定すれば、新エネルギーと再生可能エネルギーは経済社会の発展のためにさらに強力なエネルギーの保障を提供できることになる。



●図5 中国の再生可能エネルギー技術における中長期計画タイムテーブル

参考文献

- 1 中国のエネルギー問題に対する考え、江沢民、上海交通大学学報、2008、42；345～359
- 2 「中国のエネルギーの持続可能な発展戦略特別テーマ研究」、中国科学院エネルギー戦略研究組編、北京、化学出版社、2006年
- 3 「2008年中国の新エネルギーと再生可能エネルギー産業発展報告」、中国再生可能エネルギー学会、中国科学院広州エネルギー研究所
- 4 「中国の再生可能エネルギーと新エネルギー産業化ハイエンドフォーラム」、馮之浚主編、北京、中国経済出版社、2007年
- 5 「国際エネルギー戦略と新エネルギー技術の進展」、張軍、李小春等編著、北京、科学出版社、2008年
- 6 「新エネルギーと再生可能エネルギーの利用」、吳治堅主編、北京、機械工業出版社、2006年

中国の太陽光発電産業の現状およびその発展

•Profile•



翟佐緒 Zhai Zuoxu ●全国太陽光発電エネルギーシステム標準化技術委員会委員長

1965年生まれ。全国太陽光発電エネルギーシステム標準化技術委員会委員長、研究員。長く太陽光発電、モジュール、システムおよび関連試験設備の研究と開発、プロジェクト管理などに従事。現在は中米合資会社にて技術管理を担当、天津市科学技術協会太陽エネルギー技術研究会委員。全国太陽光発電エネルギーシステム標準化技術委員会副秘書長、主任委員を歴任し、現在IEC(国際電気標準会議)のTC82技術委員会専門委員。

1. はじめに

太陽光発電とは、半導体を用いた光起電力効果を利用し、太陽の放射エネルギーを直接電力に変換する発電方式である。発電のしくみは単純で無騒音無汚染であり、燃料の消費がなく温室効果ガスを含む物質を放出しないといったように、化石エネルギー、風力エネルギー、バイオマスエネルギーなどの発電技術と比べ、太陽光発電は最も理想的な再生可能エネルギーであるといえる。全世界でエネルギー資源の不足と環境の悪化が進む中、ここ10年間で太陽電池の生産量は1997年の125.8MWから2007年の4000.5MWに増加し、年平均41.3%の伸び率を見せた。最近5年間の年平均成長率は49.5%であり、太陽電池が深刻に不足した2006年と2007年も太陽電池生産量の年間成長率はそれぞれ42.9%と56.2%を記録したのである。また、多くの専門機関は今後50年間で太陽光発電産業の複合的成長率は依然30%以上であると予測している。1つの産業がこれほどまでに急速かつ持続的に成長するという現象は、極めてめずらしい。地球が温暖化していること、人類の生態環境が悪化していること、従来の各種エネルギー資源がしだいに枯渇し環境汚染などの問題を引き起こしていることなどから各国政府は再生可能エネルギーを重視するようになったのであるが、そのなかでも太陽光発電技術は独自の優位性を維持している。

太陽光の放射は無尽蔵で地球上に広く分布し、地域的な影響が比較的小さい。太陽光発電は温室効果ガスや他の廃ガス等の物質を全く排出せず、環境にもよい。太陽光発電は直接光子を電子に転換し、エネルギー転換の効率が非常に高く、技術開発に大きな潜在力がある。太陽光発電の主要な原材料であるシリコンは地球上に非常に豊富に存在し、原材料の枯渇の心配がない。太陽光発電は建築一体化の実現が非常に容易であり、貴重な土地資源が節約できる。太陽光発電システムはモジュールインテグレーション的性質を備えており、解体や移動、容量の増強が容易である。太陽光発電は太陽以外の資源が必要なく、無人のゴビ砂漠なども大型発電所を作るのに理想的な場所となる。太陽光発電は無人監視システムが可能であるので維持コストが低い。太陽光発電システムの

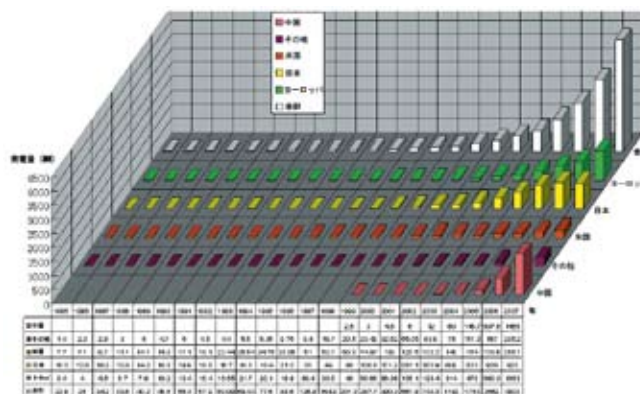


図1 1985-2007年の世界の太陽電池の生産量

作業性能は安定しており信頼性が高く、使用可能年限が長い（30年以上）。

図1は、1985年から2007年までに世界の太陽電池の生産量が急速に発展する状況を示したものである。中国もこの世界的発展の中で大きく発展し、太陽光発電産業における世界的な地位を確立した。

2. 中国の太陽光発電産業の状況

2.1 中国の太陽光発電の市場への応用と発展のあゆみ

中国の太陽光発電市場は、宇宙での利用と地上での利用の2つに大別される。

中国は1958年に太陽電池の研究開発を始め、1959年に中国科学院半導体研究所が初めて実用価値のあるシリコン太陽電池の開発に成功した。1971年に打ち上げられた科学衛星実践1号に、初めて天津エネルギー研究所の開発した変換効率約7%の太陽電池が使用され、太陽電池の宇宙利用の幕開けとなった。その後、宇宙エネルギーシステムに使用される太陽電池の技術レベルは絶えず向上してきた。1980年代初めには変換効率8-10%の一般太陽電池であったものが、80年代末には変換効率12%で高軌道の耐放射性背反射器装備のBSR型シリコン太陽電池となり、90年代中ごろには変換効率約15%で中・低衛星軌道での利用に適した背場背反射器装備のBSFR型シリコン太陽電池に、そして2000年代初めには、変換効率18%

－20%の単結晶ゲルマニウム基板のガリウムヒ素太陽電池となり、そして現在の変換効率26%－29%のガリウムインジウムリン／ガリウムヒ素／ゲルマニウムの3層構造の太陽電池に至っている。中国の太陽電池の宇宙利用は世界でも常に先進的であり、トップレベルの水準である。例えば2008年に打ち上げられた有人宇宙船、神舟7号では、高性能BSFRシリコン太陽電池の変換効率は16%に達している。宇宙利用の市場規模は小さく、毎年百、千ワットのレベルだが、その影響力は非常に大きい。

1973年から天津港の灯台において太陽電池、蓄電池、制御装置からなる独立型太陽光発電の電力供給システムにより初めて光がともされ、地上利用も開始された。その後徐々に気象観測台、マイクロ波中継局、ソーラーカーなどといった電力のない地域あるいは特殊利用に使用されるようになった。80年代には地上利用は宇宙利用の副産物として伸展し、海外の太陽電池の主要設備や生産ライン、技術を導入して、専門的に地上用シリコン電池を生産する生産ラインが作られた。80年代の後期には、年間4.5MWの生産能力に達し、中国における太陽電池産業の初期段階を形成した。1994年、中国の太陽電池生産量は初めて1 MWを超え、2002年の世界的な太陽光発電市場の急速な拡大に伴い、中国の太陽光発電産業は急成長の時代を迎えた。太陽電池の生産量は無錫尚徳などの大手企業がモデルとなり、2002年の6 MWから2007年には1456MW**に急激に増大して世界第1位となった（図2参照）。太陽光発電産業の発展の新しい1 ページが開かれたのである。

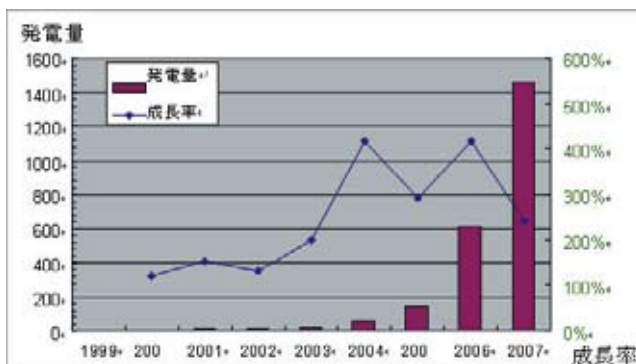
2.2 中国の太陽光発電産業の特徴

宇宙利用においては、材料がシリコンであれゲルマニウムであれ年間消費量はおよそ100KWの水準でしかない。要求される技術水準も価格も高いが、その利用環境が非常に特殊であるために、原材料が深刻に不足した2006、2007年においても材料供給は問題とならなかった。20世紀中国での太陽電池宇宙利用の初期においては、単結晶シリコンウエハー生産は需要を満たしていた。ゲルマニウム基板材料は、当初中国製品は材料の組み合わせ

や成分、表面処理などの面で海外製品と比べ大きく劣っていたため海外から輸入していたが、中国のゲルマニウム材料工場や研究所の加工技術が進歩するに従い、宇宙用ゲルマニウム基板材料の中国国内での買い付けが可能となり、中国内外の宇宙太陽電池の需要を満たすようになった。よって、太陽電池の発展について言及する場合を除いて、宇宙利用については以下の考察では触れないこととする。

●超急成長の状況

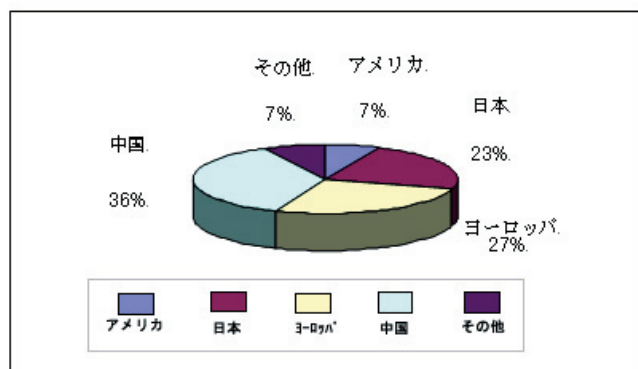
2008年に各専門機関のまとめたデータでは、世界の太陽電池の生産量第1位の栄冠は例外なく中国に与えられている。2007年の中国の太陽電池の生産量は1456MWに達している（台湾の368MWを含む）。初めて日本（920MW）とヨーロッパ（1062.8MW）を追い越し、2006年の世界第3位から1位に躍進したのである。また、全世界の生産量の36.5%を占め、太陽光発電産業の発展スピードの最も速い国となった（図3参照）。中国の太陽電池の生産量のデータは表1を参照されたい。2003年からの5年間、中国の太陽電池の生産量は、毎年平均192%以上の成長率で急速に伸びている。一方、同時期の全世界の年平均成長率は52%である。



◎図3 1999－2007 中国の太陽電池の生産量の推移

◎表1 2001－2007 中国の太陽電池の生産量*

年次	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
発電 MW	4.6	6	12	50	145.7	607.5	1456



◎図2 世界各国・地域の太陽電池の生産量の占有率

この主な原因は、市場の需要と莫大な産業利潤が増大し続けたからである。安定していた日本の太陽光発電市場を除き、2003年以降、まずドイツ政府による「フィードインタリフ法」政策の推進のもと、ドイツの太陽光発電市場で一気に需要が高まった。その後、イタリア、スペイン、アメリカなどの市場でも需要は拡大し、既存の太陽光発電企業は新進中国の太陽光発電企業も含めて発電能力の限りを尽くしたが、巨大な市場の要求にこたえることはできなかった。そこで、自らの生産能力を拡大することが企業にとって当然の選択となった。この選択こそが企

業の生存と発展という要求を充たし、更なる利益を得るための機会を提供してくれるものであったのである。尚徳太陽電力有限公司を例にとると、2002年にはわずか10MWであった生産能力が2008年末には100倍の1000MWにまで達している。2007年の太陽電池の生産量は363MWでQ-CELLとSHARPについて世界第3位であり、2008年の太陽電池の生産量は497.5MWに達している。

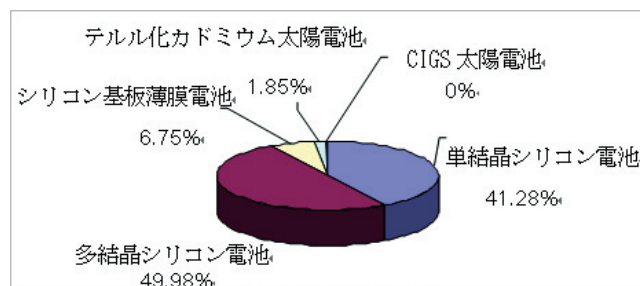
太陽光発電産業が急速に発展し始めた初期段階において粗利益率が70%を越えたため、他業種が次々と太陽光発電に注目するようになった。太陽光発電企業が急速に増加し競争が激化した2007年でも、粗利益率と純利益率はそれぞれ20%と15%以上であり、従来の業種が10%以下の利益率であるのに比べて太陽光発電産業で得られる利益は莫大なものであった。また、太陽光発電産業には高技術、高成長、高利益という特徴があり、その他の産業から参入すれば企業の構造改革や産業調整もできることになり、これが太陽光発電という新しいエネルギー産業に参入する最大の理由となった。こうして参入企業も急速に増加した。

太陽電池のモジュール製造、太陽電池生産、シリコンインゴット/シリコンウエハーの産業規模は絶えず増大し、原材料の多結晶シリコンへの需要も急速に増加した。多結晶シリコン材料は本質的に化学工業プロジェクトであり、投資額は大きく、投資周期も長く、技術要求が高いという特徴がある。よって、多結晶シリコン材料の生産拡大の速度は太陽電池の生産速度と比べられるものではない。にもかかわらず太陽光発電産業チェーンにおいて多結晶シリコン材料への需要が増大したため、深刻な材料不足となった。材料の価格は2003年の25ドル/1000グラムから、30ドル/1000グラムへと年々高騰し、2006年の長期契約価格は、50ドル/1000グラムを超え、現物市場では200ドル/1000グラムを超えた。更に2007年12月には、現物市場で350-400ドル/1000グラムに達した。このため多くの企業が高純度多結晶シリコン材料を生産し始めた。

確実なデータではないが*、2008年6月までに中国の多結晶シリコン材料企業は50社余りであり、シリコンインゴット/シリコンウエハー企業は70社余り、電池生産企業は40社余り、モジュールおよび応用企業は500社余りとなっている。

●不均衡な産業チェーンと市場構造

地上太陽光発電産業チェーンは、主に太陽電池の原材料の生産、太陽電池(モジュール)の製造、太陽光発電システムの利用から成る。2007年4GWの太陽電池生産量の大多数は結晶シリコン電池であり、全体の91.3%を占める。これにシリコン基板非晶・微結晶薄膜電池、シリコン太陽電池が加わり、98%以上を占める(図4参照)。このように、現在の太陽光発電産業チェーンは依然高純度多結晶シリコン、シリコンインゴット/シリコンウエハー、



◎図4 各種太陽電池の比率

シリコン太陽電池、モジュール、太陽光発電システムの構築など、多くの産業の連結によって構成されている。

中国の地上太陽光発電の初期の産業チェーンモデルは紡錘形構造をしているが、これはすなわち原材料(シリコン)と市場を海外に頼っていたことを表している。

まず、シリコン材料についてである。2003年から2006年は、中国国内の高純度多結晶シリコン材料の年間生産量は60-70トンを持っていたが、世界の多結晶シリコン生産量の0.3%に満たず、太陽光発電に使われる多結晶シリコンはほとんど海外からの輸入に頼っていた。しかし、2006年には多結晶シリコンの生産量は290トンに増加し、2007年には1000トンの大台を突破、1130トンにまで達した。また、同時期の中国の太陽電池生産量は2003年の6MWから2005年末の145.7MWにまで増加、2006、2007年にはそれぞれ438MWと1088MW(中国大陸)にまで急速に増加し、多結晶シリコン材料の輸入率は98%から90%へと減少した。

次に、太陽光発電の市場についてである。中国の太陽光発電市場は、2002年に政府が「電気を農村まで」プロジェクトを指導した結果、太陽光発電システムの設置量が20.3MWとなった以外は、2008年まで一貫して5MW-20MWの間を行き来している。ゆえに、世界の太陽光発電市場と中国の巨大な生産量を相対的に見ると中国の市場占有率は低く、中国の太陽電池とモジュールの98%以上が海外に輸出されて世界最大の太陽光発電製品輸出国となっている。中国国内市場は、現在のところ主に辺境の電気の無い地域、街灯や庭の電灯、家庭用、公用および商業施設のシステム連係型太陽光発電所モデル、MW級以上の太陽光モデル発電所に集中しており、2008年の中国太陽光発電市場の実際の発電量は50MW強であると推測される。

このように原材料と市場を海外に頼っているという産業構造は、業界の発展にとって深刻な問題である。市場と原材料の供給が二重に他に依存している状態では、どちらか一方にでも問題が生じれば産業に大きなリスクと損失をもたらすことになるからである。市場と原材料の供給が二重に他に依存しているという問題は、多結晶シリコン材料においては中国国内での量産化を実現したこ

とである程度の改善は見られた。しかし、技術とコストが海外に比べて依然大きく劣っていることから、多結晶シリコン材料が供給不足どころが供給過剰な状況にあって、国内の多結晶シリコン生産企業は新たな危機に直面している。この産業構造による弊害は、世界的な金融危機の衝撃の中ですでに現れ始めている。

中国太陽光発電の注目点

●産業チェーンの完全な確立

中国の太陽光発電産業は、ここ数年の急速な発展を経て、多結晶シリコン材料、シリコンインゴット/シリコンウエハー、太陽電池、モジュールと太陽光発電システムの構築などからなる産業チェーンをすでに確立した。また国際的な先進水準と比較してもその差は縮小しつつある。これは多結晶シリコン材料生産における産廃ガスの回収循環利用技術の解決、多結晶シリコン鑄造炉の中国国産化、太陽電池生産の鍵となるPECVD装置の中国国産化、全自動電池モジュール生産ラインの開発成功など一連の進歩にはっきり見て取ることができる。

●産業の構造矛盾はしだいに解消へ

まず、前述の多結晶シリコン材料が輸入に頼っているという問題はすでに解決済みである。2007年の生産量はすでに1000トンを超え、生産企業は6社に達している。またデータによると、2008年4月に発足した多結晶シリコン材料の生産プロジェクトは37あり、総生産量は6.8万トンに達するという。第1期の建設は2006—2009年の間に行われ、生産開始は2008—2010年である。各プロジェクトが順調に生産までたどり着けば、太陽エネルギーの多結晶シリコン供給問題は根本的に解決されるだろう。

また、市場問題については、2007—2008年から中国の太陽光発電市場形成の兆候が多方面で見られている。

中国科学技術部は2007年にMW級システム連係型発電所モデル、MW級分散式連係型モデル、MW級連係型技術設備などの開発プロジェクトを提案し、中国での大型システム連係型太陽光発電、住居用連係型発電などの確立を図った。この科学技術部が提案した技術開発は現在すでに基本的に達成されている。

敦煌の10メガワットシステム連係型太陽光発電プロジェクトの入札が正式に開始された。特別許可入札方式を採用して建設され、特別許可経営期は25年間である。この事例は大型太陽光発電所の運営モデルがすでに樹立されたことを示している。

単一の屋根では中国最大の太陽光発電所、浙江省義烏国際颯城1.295MW太陽光発電所がすでに建設され発電を開始している。この事例は商業用太陽光発電建築がすでに市場に参入し始めたことを示している。

尚徳電力会社は新しい自社ビルとして、世界最大、PV壁面積6900平方メートル、設計容量1MWの低エネルギー消費エコロジービルを建設した。低エネルギー消費、

機能性、エコロジー化の概念を建築の領域に取り入れ、企業のエコ建築新時代を切り開いたのである。

プロジェクトの計画発電容量は1GWであり、初期投資は10億元の中国最大級の混合式（非晶シリコン薄膜、結晶シリコン）のシステム連係型太陽光発電所がまもなくツァイダム盆地に建設される。

2008年12月6日、雲南省の昆明石林に総発電容量166MWの国内最大のシステム連係型太陽光発電所の建設工事が開始された。この発電所は66MWの科学普及地区と100MWのモデル地区に分けられ、それぞれ雲南電投新エネルギー開発有限公司と和華能瀾滄江水力発電有限公司が、18、22ヶ月内に投資し建設を完成させる。この事例は一般発電システムが太陽光発電を認識し受容し始めたことを示すものである。

上海万博会場の総容量はおよそ2.91MWとなる予定であり、現在のところ中国最大の太陽光発電建築一体化のプロジェクトである。

国家の関係機関委員は太陽光発電フィードインタリフ制度の実施の下準備を行っており、太陽光エネルギー発電を広めるため財政的補助を与えているとしている。

中国の太陽光発電市場がいったん形成されると、中国は世界最大の太陽光発電輸出国から最大の消費国に変貌を遂げるであろう。

3. 経済危機の下での中国太陽光発電の発展

世界的な金融危機の影響が各業種へ及んでいるが、太陽光発電産業も例外ではない。太陽光発電産業に関しては、原材料と市場の問題のため、特に市場の外国への高い依存度のため、中国は最も深刻な影響を受けている国の1つとなっている。2008年の第4四半期、その影響は拡大し始めた。製品価格は平均3.4ドル/1ワットから3.1ドル/1ワットに下がり、中には2.6ドル/1ワットにまで下がったものもある。また企業の出荷量も大幅に減少し、各社企業のデータによると平均出荷量は30—40%減少しており、第4四半期の収益は急速に減少して多くの企業が損失を出すことになった。

経済危機により企業の融資は更に困難になり、危機意識が薄く過度に規模を拡大した企業は特に大きな打撃を受けることになった。どれだけ資金の安全を保証できるかが企業が最初に考えるべき問題となったのである。景気の回復時期を考えて、太陽光発電産業は2009年の経済目標を調整し、放漫な産業拡張の歩みを緩め、内外共に調整するよう力を尽くしている。海外に対しては販売を増やして市場での占有を拡大し、中国国内に対しては効果的な管理で企業の運営コストと製品コストを下げるというのである。

また、経済危機は業界の再編成を促し、その日は早晚到来するであろう。太陽電池産業に携わる企業のレベルはさまざまであり、多くの企業は技術の何たるかも知ら

ず、「turn key」にのみ依拠してこの業界に参入してきたのである。危機が迫ったとき、もし業界に融け込めないままであれば、生き残ることはできない。

さらに、経済危機の到来により多結晶シリコン材料の暴利時代は終結し、企業は再び技術、コスト、サービスを重視して優位を争う健全な道へと回帰することとなるであろう。製品価格は大幅に値下がりし、技術が低く、コストが高く、質の悪い製品は市場を失い淘汰される。原材料価格の大幅な下落は太陽光発電のコストを次第に下げ、政府による政策以外に市場の門を開くもう一つのカギとなるであろう。

最後に、経済危機は優秀な太陽光発電企業に製品製造の構造調整を行わせ、新しい技術を試みさせる重要な契機にもなるであろう。例えば、尚徳公司是2009年に1億ドルの投資を計画しているが、これは生産能力を拡大するのではない。60MWの薄膜電池を完成させ、既存の結晶シリコン電池の生産ラインの技術を改造し、高効率のPLUTO製品を生産するのである。そして、その生産量を2008年の497.5MWから800MWに引き上げ、60%の増産を予定している。

太陽光発電産業が、最も前途のある業種であることは周知の通りである。経済危機もこの産業の長期的な発展に影響を与えることは無いだろう。逆にこれを機会として太陽光発電産業におけるバブルが排除され、完全な業界の整合と産業チェーン構造の合理化が進み、健全なさらなる発展が促されることであろう。太陽光発電産業は真っ先に経済危機の暗雲の中から抜け出る業種の1つとなるであろう。

4. 中国太陽光発電産業技術の発展の趨勢

●宇宙太陽電池技術の発展と目標

宇宙太陽電池は引き続き、薄型、高効率へと発展を続けるであろう。具体的には；

大面積高効率の薄型シリコン電池が採用、開発されるであろう。電池の厚さ80-120マイクロメートルで、電池変換効率は17%以上で、面積は24平方メートル以上である。

フレキシブルな薄型シリコン電池が応用、開発されるであろう。基板材料は金属薄膜かポリイミドで、電池変換効率は10%以上、仕事率は1200W/m²である。

高効率の多結晶化合物が採用されるであろう。電池変換効率は30%以上に達する。

また、宇宙電池技術の地上利用についても実験が試みられるであろう。特に行われる研究は、多結晶化合物太陽電池の高倍率集光下での構造、材料の適応性についての研究である。500倍の集光条件のもとでは変換効率は35%以上に達する。

●地上太陽光発電技術の発展と目標

2009年2月5日、無錫尚徳、賽維LDK、常州天合、林洋

新能源、CSI阿特斯、南京冠亜などの中国有名太陽光発電企業は、合同編集により『2012年太陽光発電一元一度電』という科学研究専門報告を科学技術部に提出した。その論旨は同業界企業の技術と市場との連携を進め、「これを契機に、2つの重要課題を完成させる。すなわち、太陽エネルギーを含む新エネルギーを国家のエネルギー戦略に引き上げ、中国太陽光発電産業を最大限に発展させる。」というものである。

ここに地上太陽光発電技術の研究と発展の目標が非常に明確に示されている。核心となる目標は太陽光発電製品の技術と変換効率のレベルを上げること、また製品の寿命を延ばすこと、製品の発電コストを下げることである。この目標の実現をめざして太陽光発電の技術は革命的な変革を成し遂げるであろう。

新技術、新工程は電池の発電コスト引き下げに最も有効で基本的な手段である。

安価なシリコン材料に適する電池製造工程は電池の変換効率を高めるであろう。CSI阿特斯など中国国内の多くの企業と研究機構は低効率問題の解決に努力している。

新構造太陽電池、例えばN型太陽電池は次のような特徴を持っている。すなわち200度以下で生産可能であり、大規模生産に適し、生産工程のコストは低く、生産量は高く、電池変換効率も高いという特徴を持っている。

成功が近い試験中の技術は適宜大規模生産に組み入れる。例えば、南開大学情報技術科学学院は有効面積804cm²のガラス基板CIGS太陽電池モジュールの研究開発に成功した。これは光電変換効率は7%で、すでに基本的な産業化の条件は備えている。しかし、時期が遅れば産業化の可能性も永遠に機会を失ってしまい、同様の技術が知られて中国国外で進歩する可能性もある。

集光技術などはコストを下げて技術を向上するのに適した技術である。例えば、常孚能源科技有限公司の第2代高倍率(1000倍)透射式集光モジュールシステムは、モジュールの材料コストは約1ワットあたり0.92ドルであり、追尾機システムのコストを加えると1ワットあたり1.53ドルである。

フレキシブル基板の三結非晶シリコン製品、フレキシブルCIGS薄膜太陽電池が中国太陽光発電産業に登場するであろう。

(2) 生産ライン工程の技術を革新し、既存の製品の変換効率レベルを引き上げる。

・現在工程が成熟しているP型シリコン太陽電池について、通過合理化電池の構造、局部拡散技術、精密グリッドライン合理化設計技術、新型減反射技術、引流接触などの技術を、合理的に生産工程に加えて、工程コストの利用効率を上げる。例えば、無錫尚徳はPLUTOの高効率技術のモジュールを採用したことで、変換効率は多結晶シリコン電池では17%、単結晶シリコン電池では19%に達し、一般のスクリーン印刷型太陽電池の輸出は12%増加

した。また、南京中電の一般太陽電池の変換効率は17%だったが、高効率のSE太陽電池の技術を採用した後は、変換効率の17.5%–17.8%への引き上げが可能となった。

作業工程のレベルを上げ、電池の厚さを180マイクロメートルから150マイクロメートルまで薄くし、電池材料の利用効率を上げ、ワット毎のシリコン材料の消費を抑える。

生産オートメーション化のレベルを引き上げ、製品の合格率を上げる。

2009年2月24日、First Solar社は太陽電池モジュールの製造コストを1W当たり0.98米ドルまで低減することに成功したと発表した。初めて1 W 1 ドルの壁が打ち破られたわけである。この挑戦に対して中国の太陽光発電産業がどう出るか、刮目して待ちたい。

中国における風力発電技術とその市場

•Profile•



姚興佳 Yao xingjia ●風力エネルギー技術研究所 所長

1948年生まれ。1982年瀋陽工業大学電機学部卒業。現在、風力エネルギー技術研究所所長・教授。中国風力エネルギー協会副主任、遼寧省太陽エネルギー学会副理事長などの職務を兼任。国家「863計画（ハイテク技術研究発展計画）」専門家グループ首席専門家。プロジェクト責任者として、国家「863計画」のプロジェクトを3件、国家科学技術重要問題プロジェクトを2件、省・市の重要問題および産業化プロジェクトを多数担当。風力発電国家標準を4冊編集。科学技術分野での成果物は34件に及び、13の政府科学技術進歩賞を受賞。中国で初めて独自の知的財産権を有する大型風力発電ユニットを研究開発し産業化。

中国は広大な国土と長い海岸線を持つため、比較的豊富な風力エネルギー資源を擁している。中国気象局風力・太陽エネルギー資源評価センターは最近コンピュータシミュレーションを採用し次のような結果を明らかにした。それによると、中国の地上から高度50m上空における風力エネルギー密度が $300\text{W}/\text{m}^2$ に達する面積は、およそ54万平方キロメートルにのぼり、1平方キロメートルあたり5MWの設備容量で見積もった場合、風力エネルギー資源の技術的開発可能量はおよそ26.8億kWにのぼり、また、海岸から20Kmの海域内における技術的開発可能面積はおよそ3.7万 km^2 で、海面から高度50m上空の大気層における風力エネルギー資源の技術的開発可能量はおよそ1.8億kWにのぼると推測している。中国における風力エネルギー資源の技術的開発可能量は総計で28.6億kWにのぼり、近海に比べ陸地での開発可能量が大きい。風力発電は将来的なエネルギー構造において重要な構成部分となる資源ソースを有しており、中国の豊富な風力エネルギー資源は風力発電産業の発展を支えるのに十分な条件を備えている。

2006年《中華人民共和国再生可能エネルギー法》実施以来、中国の再生可能エネルギー、特に風力エネルギーの開発利用が急速に高度成長期に入った。設置量は毎年倍増する。風力発電市場の発展は電機ユニット製造業の発展をもたらした。2008年12月末まで70社近くの企業が発電用電機ユニットの製造業界に入った。その中、国有および国有の持株会社は29社、民営製造企業は23社、合弁企業は8社、外資企業は10社である。

1. 中国における風力発電の技術的特徴

現在中国で製造および生産が進められている風力発電ユニットの主な技術は、概ね次の3タイプである。

(1) ストール（失速）式固定ピッチ定速タイプ。ブレード自体の失速特性を利用したもので、風速が定格以上になった場合に、気流に対するブレードの迎え角を失速条件まで増して、ブレード表面に渦巻きを発生させ、効率を低下させることで、出力パワーを抑制するというものである。長所としては調節精度が高く、制御が簡便であ

ることが挙げられるが、欠点としてはブレードなどの主要部品が受ける力が大きいこと、出力パワーが風速の変化を受けやすいことである。この種の技術は主に数百キロワットの中小型風力発電ユニットに採用されているものであり、現在の市場において主流となる技術ではないが、技術が成熟すれば、運用・メンテナンスにおける実績が相対的に豊富になるため、設備性能や生産能力が比較的安定する。例として金風科技と浙江運達（ユンダ）の600kWユニットと750kWユニット、浙江華儀（フア儀）の780kWユニット、保定恵徳（ヘイデ）の1MW風力発電ユニットなどが挙げられる。



新疆金風科技の750kWユニット



保定恵徳の1.0MWユニット

(2) 二重給電式可変ピッチ可変速タイプ。変速運転する風力発電ユニットであり一般的に二重非同期発電機あるいは多極同期発電機が採用されている。二重給電式発電機の回転子側がパワーコンバータ（一般的にはデュアルPWM AC/DCコンバータ）を通じて電力網へ接続される。このパワーコンバータの容量は発電機容量のわずか1/3に過ぎず、エネルギーが双方向に流動するという点がこのタイプの長所である。可変ピッチの変位はピッチ調節装置で調節を行い、風車ブレードの取り付けピッチ角を風速の変化に応じて変位させることで、風力エネルギーの吸収を制御することが可能である。定格風速以下の場合、ブレードのピッチ角を風力エネルギー利用係数が最大になる位置に調整し、定格風速以上の場合、可変ピッチのメカニズムによりブレードの迎え角を発電機の出力

パワーが許容範囲以内に収まるよう調節する。可変ピッチ式風力発電機の起動風速は固定ピッチ式風力発電機に比べて低いため、停止時に伝わる衝撃応力が相対的に緩和される。このため、二重給電式可変ピッチ可変速型ユニットは現在、大半の企業が採用する風力発電技術となっており、技術が成熟していることから、風力発電業界において主流な技術となっている。

GE、ガメサ、ヴェスタス、スズロン、シノベル、東方汽輪機、上海電気、北重、沈陽華創などの企業もこのタイプの技術を採用している。



東方汽輪機の二重給電式発電機



シノベルの二重給電式発電機

(3) 直接駆動式永久磁石可変ピッチ可変速タイプ。このシステムは主に風力機、発電機、コンバータと制御器の4つから構成されている。非直接駆動式と比較すると、直接駆動式風力発電機タイプはギヤボックス（増速機）を省いているため、メンテナンスが容易で、風力発電機のノイズが軽減されるうえ、運転時の信頼性と発電効率が高くなっている。この数年で発展し、すでに成熟期に入っている。金風科技や湘電風能、江蘇新譽、上海万徳的、中鋼西重、広西銀河、江西麦徳などの企業が採用しているのはこのタイプの技術である。



金風科技の1.5MW直接駆動式発電機



中鋼西重の1.5MW直接駆動式発電機

2. 中国における風力発電産業パターン

現在中国で製造および生産が進められている風力発電ユニットについての調査分析によると、その主な産業パターンは概ね次の4種類である。

(1) 海外から設計図と技術を導入する方法、または海外の設計技術企業と共同で設計し、中国で製造と生産を行う方法。金風科技の導入した1.2MW、1.5MW直接駆動式ユニットの例では、現在すでに中国での量産と供給が行われている。さらに、浙江華儀や広東明陽、国動聯合動力の1.5MW二重給電式風力発電ユニット、重慶海装、上海電気の2MW二重給電式風力発電ユニットなどはいずれもこの方法で導入されている。現在これらの企業では製品のプロトタイプが完成しており、すでに量産に入っているものもある。

(2) 海外から成熟した風力発電技術を購入し、中国でライセンス生産する方法。金風科技の600kW・750kW、浙江運達の750kW、シノベル風電と東方汽輪機の1.5MW二重給電式風力発電ユニットは、いずれも中国での生産に成功して産業化を果たしており、これらのユニットが中国における主力タイプになっている。さらに重慶海装の850kW、保定恵徳や武漢国測、呉忠儀表の1MW、上海電気の1.25MW、北重の2MWなど、いずれもこの方法で導入しており、現在これらの企業ではすでに量産に入っている。このうち保定恵徳ではすでに1MWの固定ピッチ式風力発電ユニットを小量生産しており、アメリカに10基を輸出している。

(3) 海外企業との共同出資により、海外の成熟技術を導入して中国で生産を行う方法。航天安迅能と恩徳風電の1.5MWは、中国ですでに生産化に成功し産業化を果たしている。また、湖南電風能と瑞能北方の2MWなどはいずれもこの方法により導入したもので、プロトタイプの試作を完成させ、現在すでに量産に入っている。

(4) 海外の風力発電ユニットメーカーが中国で独自資本による企業を立ち上げ、その成熟した設計・製造技術により中国で生産を行う方法。ガメサの850kWや、スズロンの1.25MW、GEの1.5MW、ヴェスタスの850kW、2MWユニットはいずれもこの方法を採用して生産を行っており、現在では徐々に量産が始まっている。

(5) 中国の大学と科学技術企業が独自に開発した設計・製造技術を採用して、中国で風力発電ユニットを生産する方法。例えば、沈陽華創および大慶漢維、江蘇新譽、浙江運達、三一重工が開発した1.5MWユニット、および上海万徳の1.2MWユニット、無錫宝南などはいずれもこの方法により生産を行っている。現在、沈陽華創および大慶漢維、江蘇新譽、浙江運達が開発した1.5MWの二重給電式風力発電ユニットはすでに小量生産に入っており、風力発電所で試運転が行なわれている。

3. 中国における風力発電技術の動向

風力発電産業の持続的な発展に伴い、その技術もシステムも着実に発展し続けており、技術基準を満たして、風速の変化やコスト、環境、安定的な運転など様々な要求に 대응している。中国における風力発電技術には主に次のような傾向がある。

(1) 主流は水平軸型風力発電ユニット

水平軸型風力発電ユニット技術は、風力エネルギー転換効率がよく、回転軸が比較的短いため、大型風力発電ユニット上で経済性などの利点がより高く発揮される。このため、水平軸型風力発電ユニットは世界の風力発電の発展において主流タイプとなっており、95%以上の市場シェアを占めている。同時期に発展した垂直軸型風力発電ユニットは回転軸が長過ぎるため、風力エネルギー転換効率が低く、起動や停止、ピッチ角の調節が難しいなどの問題がある。このため現在の市場シェアは非常に低く、利用数もわずかでしかないが、全ての風向に対応できるうえ、変速装置と発電機を風車の下方ないし地上に設置できるなどの利点があるため依然として使用されている。

(2) 風力発電ユニットの1台当たり容量の連続的な増加

ここ数年、風力発電市場における風力発電ユニットの1台当たり容量は連続的に増加しており、現在ではMW級の風力発電ユニットが中国内外の風力発電市場における主流タイプになっている。MW級風力発電ユニットの市場シェアは1997年以前は10%にも及ばなかったが、2001年に50%を超過し、2005、2006、2007年にはそれぞれ81%、87.5%、95.7%とシェアを伸ばしてきた。ここ数年、洋上風力発電所の開発により大容量風力発電ユニットが一層加速して発展している。これにより、風力発電ユニットの1台当たり容量は増加し続けており、中国内外の風力発電技術の進展の1つの流れになっている。

(3) 可変ピッチ可変速パワー調節技術と二重給電式発電機技術の広範な採用

可変ピッチパワー調節方式は負荷制御が安定しており、安全かつ高効率などの利点を備えているため、近年大型風力発電ユニットに広範に採用されている。可変ピッチ技術を採用した電子技術の発展により、大多数の風力発電ユニットメーカーで可変速定周波技術が用いられるようになった。さらに、可変ピッチ可変速風力発電ユニットの開発により、風力エネルギーの転換がより一層改善され機能が向上している。中国で2007年に設置されたMW級の風力発電ユニットは、いずれも可変ピッチ式ユニットである。2MW以上の風力発電ユニットのうち大多数が3つの独立したピッチ角電動制御メカニズムを採用しており、3組の可変速発電機とギヤボックス（減速機）によりブレードに対してそれぞれ閉ループ制御を行うものである。

(4) 直接駆動式、フルパワー変換技術の急速な発展

ギヤレス型の直接駆動式はギヤボックスがもたらすユニット故障を効果的に低減することができ、システムの運転の信頼性と寿命を効果的に高められ、メンテナンスコストを削減できるため、市場で高い支持を得ている。中国の新疆金風科技有限公司とドイツのヴェンシス社との共同開発による1.5MW直接駆動式風力発電ユニットは、これまでに100基近くが風力発電所に設置されている。2008年に新規に設置された風力発電ユニットのうち、直接駆動式風力発電ユニットが占める割合は15%にのぼっている。直接駆動式風力発電システムの登場により、フルパワー変換技術が発展し応用されている。フルパワー変換の関連技術により、風車と発電機の手速度調節範囲が0～150%までの定格回転速度に広げられ、風力エネルギーの利用範囲が高まった。フルパワー変換技術は低電圧ライドスルー(LVRT)特性に対し、良好かつ簡便な解決方法であることから、今後の発展で優位である。

(5) インテリジェント制御技術の応用による風力発電ユニットの信頼性と寿命の急速な向上

風力発電ユニットの極限負荷と疲労負荷は風力発電ユニットおよび部品の信頼性と寿命に影響を及ぼす主因の1つである。ここ数年、風力発電ユニットメーカーと関連研究機関が風力発電ユニットの最適な運転と制御ルールについて積極的に研究を進めており、インテリジェント制御技術を採用して、ユニットの技術と結び付けることで、風力発電ユニットを極限負荷あるいは疲労負荷のかかった状況下での運転をできる限り回避しているが、これがしだいに風力発電の制御技術の主要な方向となっている。

(6) 近海の風力発電の重要性の向上

洋上風力発電の発展は静かに進んでおり今後の重要なエネルギーとなる見通しである。海上には豊富な風力エネルギー資源が存在し広大で平坦であることから、洋上風力発電技術は最近の研究の焦点となっている。中国の海上における風力エネルギー資源は陸地における風力エネルギー資源を遥かに上回っており、風力発電が発展する一方、陸地における風力発電機の総数は飽和状態に近づいている。このため新たなエネルギー資源を開発する必要から、洋上風力発電所は重要なエネルギー開発のプロジェクトとなり、風力発電の開発重点項目となったのは自然の成り行きといえよう。この傾向は近年中国ばかりではなく、世界の風力発電産業においても新たな分野となっている。現在、中国最初の洋上風力発電所は上海東海大橋で建設を始めて、3MWのユニットはすでに着工し始まっている。

4. 風力発電所の建設状況

2008年までに、中国（台湾を除く）における風力発電ユニットは累計で11600基あまりにのぼり、設備容量はおよそ1215.3万kWにのぼる。24の省（市、区）に分布して

番号	省（区、市）	新規設置(kW)	累計(kW)	番号	省（区、市）	新規設置(kW)	累計(kW)
1	内モンゴル	2172250	3735440	13	浙江	147280	194630
2	遼寧	734450	1249760	14	山西	122500	127500
3	河北	619250	1110700	15	雲南	78750	78750
4	吉林	457200	1069460	16	北京	15000	64500
5	黒龍江	428050	836300	17	海南	49500	58200
6	江蘇	354500	648250	18	河南	47250	50250
7	甘肅	298650	636950	19	江西	42000	42000
8	新疆	277500	576810	20	上海	15000	39400
9	山東	222100	572300	21	湖北	0	13600
10	寧夏	38000	393200	22	重慶	1700	1700
11	広東	79500	366890	23	湖南	0	1650
12	福建	46	283	24	香港	0	800
中国全土合計（台湾を除く）						6246430	12152790

◎表1 2008年における省別に見た風力発電設備の新規設置状況および累計

注）本統計は当時の設置記録にのみ基づくもので、現在の買収合併後の状況ではない。

資料出典：施肥飛、中国風力発電設備容量統計、2009年3月7日

おり、前年と比較すると重慶と江西、雲南の3つの省・市で増加が見られ、設備容量が100万kWを上回るユニットは内モンゴルや遼寧、河北、吉林の4つの省・区で増加が見られる。2007年における累計設備容量の590.6万kWと比較すると、2008年の増加率は106%にのぼる。2008年における風力発電の電力網への送電量は推定でおよそ120億kW・hにのぼる。2008年における省別に見た風力発電設備の新規設置状況および累計については表1を参照されたい。

2008年に中国（台湾を除く）で新規に設置された風力発電ユニットは5130基あまりで、設備容量はおよそ624.6万kWにのぼる。2007年に新規に設置された設備容量は330.4万kWで、これと比較すると2008年の新規設置容量の増加率は89%にのぼる。

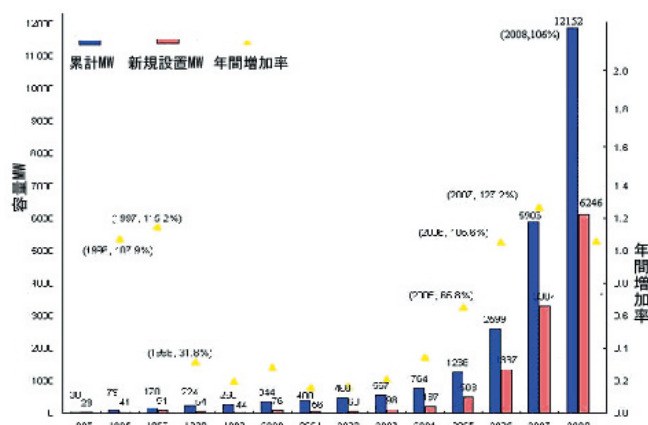
2008年の新設市場シェアのうち、中国資本と合併企業の製品が占める割合は75.6%にのぼる。このうち、シノベル風電のシェアが最大で、新規設置総設備容量のうち

22.5%を、中国資本と合併企業の製品のうち29.7%を占めている。2008年における中国資本と合併メーカーの新設市場シェアについては表2を参照されたい。また、外資企業製品のシェアは24.4%にのぼり、このうちデンマークのVestas社が最大シェアで、新規設置総設備容量のうち9.6%を、外資企業製品のうち39.3%を占めている。2008年における中国の外資メーカーの新設市場シェアについては表3を参照されたい。

2008年の累計市場シェアのうち、中国資本と合併企業の製品が61.8%を占め、初めて外資企業のシェアを上回った。このうち金風科技のシェアが最大で、累計総設備容量のうち21.6%を、中国資本と合併企業の製品のうち35.0%を占めている。2008年における累計中国資本と合併メーカーの市場シェアについては表4を参照されたい。また、外資企業の製品は38.2%を占めており、このうちスペインのGamesaのシェアが最大で、累計総設備容量のうち12.8%を、外資企業の製品のうち33.4%を占めている。2008年における累計外資メーカーの市場シェアについては表5を参照されたい。

現在中国で風力発電を開発している省は24省にまで拡大したが、主な風力発電はやはり資源が豊富な「東北・西北・華北」地区や沿海、干潟の地域に集中している。特に100万キロワットの超大型風力発電所や風力発電基地の計画がある内モンゴルや吉林、甘肅、新疆、江蘇などの省に集中している。

近年中国の風力発電建設は陸地に大・中型風力発電所の建設が集中し近海における風力発電の開発も急速に進んでいる。2007年には上海市近海にある東海大橋洋上風力発電プロジェクトの入札募集が終了し、事前準備作業が開始された。さらに、2009年1月15日にはプロトタイプ



◎図1 中国における風力発電設備容量の増加状況

メーカー (製造元)	容量(kW)	当該年の中国資本と合併メーカーに占める割合	当該年の新規設置総設備容量に占める割合
華鋭 Sinovel	1402500	29.71%	22.45%
金風 Goldwind	1131750	23.98%	18.12%
東方汽輪機 DEC	1053000	22.31%	16.86%
運達 Windey	233250	4.94%	3.73%
上海電気 Sewind	178750	3.79%	2.86%
明陽 Mingyang	174000	3.69%	2.79%
航天-安迅能 CASC-Acciona	150000	3.18%	2.40%
湘電 XEMC	120000	2.54%	1.92%
新誉 New Unite	73500	1.56%	1.18%
北重 BEIZHONG	60000	1.27%	0.96%
その他 Others	143680	3.04%	2.30%
合計 Total	4720430	100.00%	75.57%

◎表2 2008年における中国資本と合併メーカーの新設市場シェア

メーカー (製造元)	容量(kW)	当該年の外資メーカーに占める割合	当該年の新規設置総設備容量に占める割合
Vestas	599700	39.30%	9.60%
Gamesa	508300	33.31%	8.14%
GE	145500	9.53%	2.33%
Nordex	144000	9.44%	2.31%
Suzlon	128500	8.42%	2.06%
合計 Total	1526000	100.00%	24.43%

◎表3 2008年における中国の外資メーカーの新設市場シェア

メーカー (製造元)	容量(kW)	中国資本と合併メーカーに占める割合	総設備容量に占める割合
金風 Goldwind	2629050	35.02%	21.63%
華鋭 Sinovel	2157000	28.74%	17.75%
東方汽輪機 DEC	1290000	17.19%	10.61%
運達 Windey	330250	4.40%	2.72%
航天安迅能 CASC-Acciona	250500	3.34%	2.06%
上海電気 Sewind	201250	2.68%	1.66%
明陽 Mingyang	175500	2.34%	1.44%
湘電 XEMC	128000	1.71%	1.05%
新誉 New Unite	82500	1.10%	0.68%
北重 BEIZHONG	60000	0.80%	0.49%
その他 Others	202170	2.69%	1.66%
合計 Total	7506220	100.00%	61.76%

◎表4 2008年における中国資本と合併メーカーの市場シェア

メーカー (製造元)	容量(kW)	外資メーカーに占める割合	総設備容量に占める割合	付注
Gamesa	1552500	33.41%	12.77%	
Vestas	1455200	31.32%	11.97%	契約データ Contract record
GE	637500	13.72%	5.25%	契約データ Contract record
Suzlon	347250	7.47%	2.86%	
Nordex	328750	7.08%	2.71%	
その他 Others	325370	7.00%	2.68%	
合計 Total	4646570	100.00%	38.23%	

◎5 2008年における外資メーカーの市場シェア

注：当時の設備の履歴に基づくもので、買収合併または再編後の現在のメーカーの状況によるものではない。

の試験段階に入っている。東海大橋風力発電プロジェクトなど近海の風力発電プロジェクトが始動したことは、中国における洋上風力発電の発展の幕開けを意味する。

現在の中国における風力発電の動向を見ると、政府の掲げる2010年までに500万kWを達成するという目標は2007年末にすでに達成している。風力発電への積極的な支援政策を継続的に整備し、風力発電設備の生産能力と技術・品質レベルが着実に向上した場合、中国では今後数年間にわたり毎年およそ400万kWの設備容量を新規に増設し続けられる見通しで、2010年には風力発電の累計設備容量を1400～1500万kWまで達成できると予測される。また、2010年以降に毎年700～800万kWを新規に増設し続けた場合、現在のヨーロッパ並みのレベルに達成することができ、2020年には最低でも8000万～1億kWの設備容量を達成できると予測する。強力な政策支援があれば、風力発電は2015年以降、毎年新規に増設される設備容量の中でも重要な構成部分の一部となり、20%～30%の規模にまで達成すると見られ、2020年までに風力エネルギーは1.2～1.5億kWの設備容量を達成することが予想される。2020年以降、中国の風力発電は原子力発電を上回り、発電電源構成において3番目に大きな主要電源になる見通しで、2050年には水力発電をも上回り、2番目に大きな主要電源になる見通しである。将来的に、風力発電は中国の主要な戦略エネルギーの1つになると思われる。つまり、中国の風力発電は大いに発展する見通しである。

5. 政府による風力発電への政策支援

ここ数年で、中国における風力発電の設備製造業はすでに産業化の初期段階に入った。中国における風力発電の製造業が急速な発展を遂げ多大な恩恵に与ってきたのは政府の風力発電関連の政策支援によるものである。

中国では2005年に「再生可能エネルギー法」が公布されて以降、風力発電を含めた「再生可能エネルギー発電に関する管理規定」や「電力網企業の再生可能エネルギー電力量全額買取監督管理規則」、「再生可能エネルギー電力価格付加収入配分暫定規則」、「再生可能エネルギー特定項目資金管理暫定規則」、「風力発電の建設管理関連要求に関する通知」、「風力発電産業発展促進の実施意見」などの法規や法令が次々に公布、制定された。風力発電などの再生可能エネルギーの電力網への援助や、競争によらない固定電力価格、費用分担、風力発電の割当額制度を早急に確立させ、風力発電コンセッションプロジェクトについては引き続き実施し改善を図ることで、中国における風力発電の建設と技術産業の発展の推進に向け積極的に政策環境が整えられている。

2007年9月に、中国は「再生可能エネルギー中長期計画」を公布した。これにより、風力発電などの再生可能エネルギー発電産業の発展を早急に推進し、良質でクリーン

な再生可能エネルギーの占める割合を徐々に高める。また、「ハイテク産業発展『第11次5ヶ年計画』」では、先進的な大型風力発電ユニットおよびそのキーとなる部品の開発と産業化、大型風力発電ユニットのビジネスモデルの展開を積極的に推進することを明確化している。「当面優先的に発展させるハイテク産業化の重点分野に関するガイドライン（2007年度）」では風力発電を重点分野に組み入れ、1MW級以上の風力発電ユニットおよびキーとなる部品の研究開発を支援する。

2003年以降、風力発電コンセッションプロジェクトの入札募集が5回にわたって実施された。第1期プロジェクトは広東恵来と江蘇如東第1期の2つのプロジェクトで、総設備容量は20万キロワットである。第2期プロジェクトは江蘇如東第2期と吉林通榆と内モンゴル輝騰錫勒の3つのプロジェクトで、総設備容量は40万kWである。第3期風力発電コンセッションプロジェクトは江蘇東台と山東即墨、甘肅安西の3つのプロジェクトがあり、総設備容量は45万kWである。第4期風力発電コンセッションプロジェクトは内モンゴル錫盟輝騰梁の300MW風力発電所、内モンゴル包頭巴音の200 MW風力発電所および河北省張北單晶河の200 MW風力発電所の3つのプロジェクトがあり、総設備容量は700 MWである。第5期風力発電コンセッションプロジェクトは4つで、これには内モンゴル通遼市北清河の30万kW風力発電所、内モンゴル古巴彦淖爾烏蘭伊力更の30万kW風力発電所、河北省承德パドックの15万kW風力発電所、甘肅省酒泉玉門(昌馬)の20万kWの風力発電所がある。

国家發展改革委員会は第1期および第2期の風力発電コンセッションプロジェクトの入札において、電力価格の最安値を提示した業者を選定する旨を明言したが、第3期では電力価格の重み付けを40%に引き下げ、第4期では価格以外の要素をより一層勘案して、電力価格の重み付けを25%まで引き下げた。さらに、第5期風力発電コンセッションの入札では入札基準の大幅な改正を行い、風力発電卸売価格の合理化を推進した。国家發展改革委員会などの関連機関では風力発電資源の全面調査とプロジェクト計画、風力発電機の研究開発と技術プラットフォームの建設、風力発電所の建設と電力網による風力発電の吸収などの問題についての研究を支援する意見などを打ち出しており、政府支援と企業投資または経済刺激要因と市場牽引要因、風力発電所の建設と風力発電設備の製造とを連携させ、風力発電産業の一層の健全な発展を希望している。

まとめていえば、中国政府は再生可能エネルギー、特に風力発電技術の発展に対し多大な政策支援をしており、風力発電は再生可能エネルギー発展の中でも短・中期的に政府が早急に推進する最も重要な分野の1つであるといえる。

2008年中国水素エネルギーの発展

•Profile•



毛 宗強 Mao Zongqiang ●清華大学 教授 中国再生可能エネルギー学会副理事長

1947年生まれ。清華大学教授。中国政府973水素エネルギープロジェクト首席科学者。中国再生可能エネルギー学会副理事長、中国水素エネルギー学会(CAHE)主席。国際水素エネルギー協会(IAHE)理事会メンバー。中国の「電源技術」「太陽エネルギー学報」「太陽エネルギー」編集副主任、国際水素エネルギー学会誌(JIHE)編集委員、「水素経済のための国際パートナーシップ(IPHE)」水素エネルギー教育専門スタッフ。2007年国連工業開発機関(UNIDO)水素エネルギー技術国際センター(ICHET)の科学顧問委員会委員、中国政府科学技術部973計画第3期エネルギー分野審査委員会顧問。1993年より水素エネルギーを研究し、160編余りの論文を発表、出版。2006年に国際水素エネルギー協会からJules Verne賞、中国石油・化学工業協会から科技進歩準優秀賞を受賞。

2008年は中国にとって悲喜こもごもの1年だった。年初の中国南部での雪害と、5月12日の四川大地震は中国に未曾有の忍耐と試練を与えた。8月には全世界の注目を集めた北京オリンピックで中国は名声を博したが、直後に発生したメラミンミルク事件では、中国全土の親達に不安を抱かせ、全世界にも衝撃が走った。年末には、金融危機が到来した。とはいえ、起伏の激しかった2008年にも、中国の水素エネルギー生産は成果をあげ、発展し、新たな技術も生まれた。

水素ガスの工業生産

水素ガスの工業生産では、中国神華グループが、水素ガスの生産量が18万t/年に達する世界最大規模の石炭からの水素製造工場を建設し、試作化に成功した。2008年5月5日、神華は石炭直接液化による石炭からの水素製造ユニットの全過程を通した試運転に成功し、規格に適合する水素ガスを生産した。試運転は数ヶ月連続して行われ、神華グループはシェルブランドの石炭ガス化作業の技術を基本的に把握したことを示した。

中国は石炭地下ガス化による水素製造にも着手している。石炭地下ガス化とは、地下にある石炭を制御しながら燃焼し、熱および化学反応により可燃ガスまたは水素ガスを発生させるもので、坑井建設・石炭採掘・変成技術を一体化した複数の分野の技術によるクリーンエネルギーと化学工業原料についての新たな技術である。2007年1月、中国の新奥グループは2億元強を投資して、ウランチャブ市摸新奥ガス化石炭採掘技術有限公司を設立し、中国鉱業大学と共同で「無坑道方式石炭地下ガス化試験プロジェクト」を展開している。同年10月24日、中国初となる日産15万m³の石炭ガスの無坑道方式石炭地下ガス化試験システムと生産システムの最初の点火に成功した。これまでに、現場での試験運転は400日を超え、熱供給・発電・化学工業原料生産能力を備えており、一連の独創的な技術による成果をあげ、9件の特許を申請した。

水素ガスの工業的精製

中国は世界最大の圧力スイング吸着による純水素製造

装置を完成し、中国の水素エネルギー産業の基盤を確立した。2008年8月13日、西南化工研究設計院を主な発起人として設立された四川天一科技株式有限公司が技術・工事設計を担当した、圧力スイング吸着でガスから分離(PSA)する340,000Nm³/hの水素製造装置は神華グループによる第1次試運転に成功し、各種技術指標はすべて設計における基準を満足した。この装置は世界最大のPSA水素生産装置であり、中国のPSA技術がすでに世界先進レベルに達していることを示すものである。

大規模な水素ガスの貯蔵

北京市中関村の永豊高新技術開発区にある中国初の水素生産供給ステーションは、浙江大学化工機械研究所が研究・開発に成功した「世界初のタンク」であり、世界最大の金属材料による定置型水素貯蔵タンクとして設置されている。タンクの内径は800mm、高さは5,800mm、容量は2.5m³あり、圧力は70MPaに達し、米国で製造された単一の高圧水素貯蔵タンクとしてのこれまでの記録(直径600mm、容量0.411m³、30MPa)を凌駕しており、中国製の45MPaの金属製水素ガス貯蔵タンクも内径1,000mm、高さ5,500mm、体積5.0m³に達していて、中国の水素ガス貯蔵技術が世界をリードしていることがわかる。

中国は世界最大の水素貯蔵合金の生産国である。2007年における水素貯蔵合金LaNi₅の全世界での生産能力は約3万tとなっているが、主に中国と日本に集中している。2007年の中国における生産能力は2万t近くに達し、1万tが販売されているが、日本の生産能力は1万t、販売は6,000tである。中国の水素貯蔵合金の生産量と使用量はいずれも世界第1位である。

水素エネルギー自動車

2008年の北京オリンピック期間において、595台の各種新エネルギーによる電動自動車の総運行距離は371万4,000km、乗客数はのべ441万7,000人にのぼったが、うち燃料電池バス3台と燃料電池自動車20台をオリンピックの全日程でのサービスに投入したことが、報告されている。北京オリンピック・パラリンピックのマラソン競技では、

燃料電池車が選手収容車として、無事に任務を果たした。オリンピック以降も燃料電池バスは引き続き路線バスのモデルとして、中国科学技術部(MOST)・UNDP/GEFの「中国燃料電池路線バス商業化モデルプロジェクト」の一部として、2009年7月まで北京市営バス801系統として運行する。

「中国燃料電池路線バス商業化モデルプロジェクト」の第2段階は上海で展開する。現在モデルプロジェクトの準備作業が進んでおり、中国企業が燃料電池バス6台の落札に成功した。

上海復星集団と子会社である上海神力科技有限公司は2008年4月7日～11日にデンマークを訪問し、2009年にデンマークで神力の燃料電池バスをモデルとする計画について討論した。これは、中国の水素燃料電池および燃料電池エンジン業界・技術研究開発・産業化が世界進出を目指していることの表われである。

北京理工大学・北京飛馳グリーンエネルギー社・長安自動車が共同で研究し製造した、中国初の水素による内燃機関の自動車が北京理工大学のキャンパスに出現した。これは40MPaの中国製車載用高圧水素タンクを採用している。

水素ガス/天然ガスハイブリッド燃料車の普及を引き続き計画しているが、一部の企業がすでに立候補することを表明しており、今後の展望に期待が持てる。

水素自動車用ステーション

2008年までに、北京2箇所、上海1箇所と中国には計3箇所の定置型水素供給ステーションが設置されている。北京の水素供給ステーションの水素ガスの生産方法としては、それぞれの水素供給ステーションで電解水により水素・天然ガスを改質して水素を製造している。特に北京の飛馳競力水素供給ステーションは、独創的なものである。重要な部品がすべて中国製の設備であり、中国で生産した35MPa・45MPa・70MPaの定置型水素ガス貯蔵タンクおよび75MPaの水素ガス圧縮機が水素供給ステーションに設置済みであり、150m³/hの水素ガスを製造する電解水設備2台も正常に運転されているが、まさに中国の水素供給ステーションの技術がすでに世界先進レベルに達していることがわかる。オリンピック期間中に水素ガス供給ステーションでは燃料電池自動車・バスに累計で409回、1,286.8kgの水素ガスを供給した。

水素エネルギーの科学的研究

水素エネルギーと燃料電池の化学的研究はさらなる支援を受けており、中国政府の基本研究開発計画(973計画)では、再生可能エネルギーによる水素製造を重視している。2008年中国政府科学技術部は江蘇省が担当している風力エネルギーのオフグリッドの応用というテーマと、上海交通大学が担当している車載型エネルギー貯蔵・水

素貯蔵のテーマについて、中間審査を行った。化学技術部はそれぞれの担当グループの進捗状況に満足していて、両プロジェクトについて、それぞれ風力のオフグリッド発電による水素の製造、高圧容器と水素貯蔵合金を組み合わせた水素貯蔵技術面にとくに今後努力するよう要求した。科学技術部は、西安交通大学が対応する太陽エネルギーからの水素製造というプロジェクトについても最終審査を行い、科学技術部はこのプロジェクトの研究を継続して支援していく必要があるとし、今後1回限りながら5年間資金を再度援助することを決定するとともに、中国科学院大連化学物理研究所が展開する太陽エネルギーからの水素製造の研究にも資金を援助することにした。

科学技術部は応用研究(863計画)を非常に重視している。「天然ガス・液体燃料による分散型の小型水素製造技術」を整備し、燃料電池発電・燃料電池自動車の水素供給ステーションに効率よく集積する水素ガス製造技術の向上のため、天然ガスと液体燃料から効率よく集積する小型の分散型水素製造システムを開発する計画である。具体的には触媒変成率 $\geq 98\%$ 、触媒寿命 $\geq 1000\text{hr}$ 、水素製造規模5-50m³/h、製品であるガスのCO $\leq 30\text{ppm}$ 、システムのエネルギー転換効率 $\geq 75\%$ を要求している。「超臨界におけるバイオマスと太陽エネルギーとの結合による水素製造技術」を開発し、バイオマスの超臨界水によるガス化と太陽エネルギーの集光による熱供給システムを結合させた水素製造システムの研究開発を計画しており、超臨界におけるバイオマスと太陽エネルギーによる水素製造を結合して研究開発する基盤とする。連続して多相流で混合輸送するバイオマスの質量濃度は15%に達し、完全にガス化された気体の生成物における水素ガスの体積濃度は55-60%に達し、CO₂を有効に濃縮し分離することが可能であり、バイオマス超臨界水の多相流での混合物処理量は1t/hに達し、ガス化システムの総エネルギー利用効率が70%以上に達するよう要求している。「太陽光によって直接水を分解する水素製造用触媒およびシステム集積技術」を開発し、効率よい光触媒および製造プロセス・太陽光により水分解する水素製造用反応炉の研究開発を計画するとともに、光による水分解で製造した水素と集光した太陽エネルギーとを結合して、効率よくかつ安定して連続的に集光する太陽エネルギーの光触媒による水素製造モデル装置を研究開発した。光で直接水分解した水素エネルギーの利用効率は4%以上、触媒の寿命は200h以上、リアクターの総採光面積は25m²以上、総容量200L超、集光装置の集光効率50%超、連続的に集光した太陽エネルギーの光触媒反応による水素製造装置システムを200h以上安定して運転し、反応液の体積による水素製造は400L/d・m²を達成するよう要求している。

事実上、科学技術部の863プロジェクトの「第11次5ヶ年計画」期間における水素エネルギーの特定テーマの系

統的研究には再生可能エネルギーによる水素製造の新技术・化石エネルギーによる水素製造(副産物としての水素の精製を含む)・小型非常定化石燃料の高効率な水素製造技術・化学的水素化合物の水分解による水素製造技術・水素の製造/貯蔵一体化技術・低コストの太陽エネルギーによる水素製造技術・マイクロ燃料電池の水素エネルギー技術・水素製造と燃料電池システムを統合する重要技術・光電気化学による新たな水素製造技術・費用対効果の高い水素製造触媒などその他の新しい水素製造技術がある。こうした研究は2008年に様々な進捗を遂げた。

水素エネルギーの科学研究は政府以外からのルートでも支援を受けている。シュル・ハイドロジェンの資金援助により、清華大学原子力・新エネルギー技術研究院は中国初の太陽光発電による電池-水素エネルギー-燃料電池システムを試験運転した。システムは2000Wの太陽電池・0.5m³/hの水素を発生する水電解装置・水素ガス10m³の水素貯蔵合金装置・5000WのPEMFC燃料電池スタックから成る。担当者は大量の試験を実施して、Hyforum2008(湖南省長沙市で2008年8月に開催)の会議で結果を報告した。

水素エネルギーへの新たな政策

2008年11月27日に重慶市で開催された「都市の発展と自動車の省エネルギーと排出削減についてのハイレベル・フォーラム」において、中国政府財政部の官僚は、財政部は新エネルギー車輛を購入する消費者に補助金を講じる措置を採り、第1段階として2012年に新エネルギー車輛の使用の普及に対して財政部が200億元強を投入することを表明した。2ヶ月後の2009年1月23日に財政部と科学技術部は共同で「省エネルギー・新エネルギー車輛のモデルと普及の試験的事例に関する通知」(財建[2009]6号)を北京市・遼寧省・吉林省・上海市・浙江省・安徽省・江西省・山東省・湖北省・湖南省・広東省・重慶市・雲南省の計13の省・市の行政部門の関連部門に発行し、燃料電池自動車1台あたりの補助金が人民元25万元であることを明記した。2009年2月17日には、財政部、科学技術部、発展・改革委員会、工業・情報化部などの4部門の委員が共同で北京において省エネルギー・新エネルギー自動車のモデル普及の試験的事例についての会議を招集した。会議では、長さ10m以上の都市部の燃料電池バスに対する補助金の金額を人民元60万元とすることを決定した。これは新エネルギー自動車購入へ補助金のうち最高額となる補助である。現時点では水素燃料電池車は中国では商業化されていないものの、中国政府の決定により中国政府が水素燃料電池車を支援する立場にあることが明確かつ確実に伝わり、投資の動向にも影響することは間違いなく、中国における水素燃料電池車の開発に有利となる。

水素エネルギーの標準

2008年、中国で「全国水素エネルギー標準化技術委員

会」と「全国燃料電池標準化技術委員会」が相次いで正式に設立されたのは、中国の水素エネルギーについての基準策定が正式な段階に入ったことを示している。当初は、中国の水素エネルギー基準策定はその他の専門標準化委員会が代行していた。2007年6月に中国標準化研究院が中国政府標準化管理委員会に全国水素エネルギー標準化技術委員会の設立を諮問した。2008年3月には中国政府標準化委員会の回答を受け、全国水素エネルギー標準化技術委員会(コードはSAC/TC309)が正委員26名により成立した。しばらくして、全国燃料電池標準化技術委員会(コードはSAC/TC342)も正委員46名により正式に成立する許可を受けた。2008年に水素エネルギー標準化委員会(コードはSAC/TC309)は「水素エネルギー標準体系」の研究・確立・改善を組織化するとともに、この体系を基礎として中国における水素エネルギーの国家基準を制定・改訂する中長期計画と年度計画の提案を提出し、中国における水素エネルギー基準策定の戦略・政策・関連措置への提案を提出し、水素エネルギー普及事業が安定してかつ急速に健全に発展するよう指導している。2008年には水素エネルギー基準である「水素ガス・水素エネルギー・水素システム用語」と「水素ガス・水素供給ステーション技術規範」の2項目を中国国家基準として完成した。中国政府標準化委員会の「2008-2010年における資源の節約と综合利用についての標準発展計画」への組み入れを申請した。立案を準備している基準の項目は7項目である。燃料電池標準化委員会(SAC/TC342)は2008年に「固定型燃料電池発電システム—安全」など18項目の基準を完成するとともに、「燃料電池応急電源」などの新たな項目を報告した。

水素エネルギーの展示会と会議

2008国際水素エネルギーフォーラム(Hyforum2008)と第9回中国再生可能エネルギー学術会議が2008年8月3日～6日に長沙市で開催された。このイベントは中国再生可能エネルギー学会水素エネルギー専門委員会(CAHE)が主催した。同イベントは中国科学技術部(MOST)・国際水素エネルギー協会(IAHE)・EU・国連工業開発機構水素エネルギー技術国際センター(UNIDO-ICHET)などから大きな支援を受けた。国際水素エネルギー協会主席で米国マイアミ大学教授のT.ネジャット・ヴェズィログル氏は、このイベントのために長沙を訪問した。同氏は1974年に国際水素エネルギー協会を創設し、これまで34年、水素エネルギーの商業化に向けて努力を続けてきた。80歳の高齢であるヴェズィログル教授は中国の水素エネルギーは非常に将来性があると見ており、今回の会議では、「水素エネルギーと中国経済の発展」というタイトルで40分の長きに渡る講演を行い、中国における水素エネルギー発展の理由と実行可能性について明言した。世界の14の国・地域から300名強の代表が同イベントに出席し、水素エネ

ルギーの構想と成果について交流した。

2008年11月18日～20日に第2回上海国際水素エネルギー・燃料電池展示会(HFCE2008)が上海市の上海光大展示センターで開催され、引き続き参加したBMW、シェル・ハイドロジェンのほか、Linde・UTC・Ballardなどの国際的な先進企業や、国際水素エネルギー協会(IAHE)・全米水素協会(NHA)・カナダ水素燃料電池委員会(H2FCC)・カナダ水素エネルギー協会(CHA)・米国燃料電池協議会(US Fuel Cell Council)・国連工業開発機構水素エネルギー技術国際センター(UNIDO-ICHET)などが参加し展示し展示した。この展示会は中国内外の水素エネルギー・燃料電池における交流の舞台となった。展示期間中、20余りの国・地域の水素エネルギー学会の責任者が上海に集まり、第5回水素エネルギーの国際協力に向けた実行委員会の会議に参加し、世界における水素エネルギーの発展を推進するよう共同で協力することについて討論した。展示期間中には「水素・燃料電池による予備電源」フォーラムも開催され、中国内外の産業界・学術界から60名余りがフォーラムに参加した。

2008年6月3日にCAHEと湖南省婁底市行政部門などの部門が共催した「2008中国水素エネルギー経済フォーラム・産業技術成果普及会」が広州で開催された。同会では、政府高官と財界が水素エネルギーを切り口とした広大な市場について踏み込んだ討論を行った。メーカーも多くの設備を展示するとともに現場でデモンストレーションを行った。

水素エネルギーの奨励

中国科学技術部の万剛大臣が中国で燃料電池車の発展を推進したことを表彰して、2008年5月15-19日にオーストラリアのブリスベンで開催された第17回世界国際水素エネルギー会議で、国際水素エネルギー協会(IAHE)が万剛氏に2008年度のIAHEグローブ・アワードを授与した。グローブ・アワードは国際水素エネルギー協会が、燃料電池・電解およびその他の水素に関する電気化学を含む水素エネルギーに関する電気化学分野での成功者を特別に表彰するものである。在オーストラリア中国大使館の馮演・科学技術参事官が万剛大臣の代理として受賞した。馮参事官は授賞式で万剛大臣の親書を読み上げ、国際水

素エネルギー協会への感謝の意を示すとともに、北京オリンピックを参観し、みずから中国における水素エネルギーの科学技術的成果を体験してもらうよう代表を招請した。万剛大臣の謝辞は全代表から拍手を受けた。全世界から来訪した350名余りの著名な科学者・企業家・政府代表が受賞の祝宴に出席した。

中国再生可能エネルギー学会水素エネルギー専門委員会の動向

CAHEは中国で唯一中国政府に登録し、承認を受けた非営利の水素エネルギー学術組織であり、一貫して中国における水素エネルギーの技術開発を積極的に推進し、外国との水素エネルギー分野での提携と交流を推進してきた。2008年10月25日には委員改選のための大会を開催した。大会では主任委員の毛宗強らを、任期を5年とする新たな任期の理事会のメンバーとして選出した。CAHEは水素エネルギーを推進する方向性を明確にし、企業との提携とくに力を入れて、着実に水素エネルギーを推進していかなければならない。CAHEはより多くの人に水素エネルギーを認識し受け入れてもらうよう、水素エネルギー教育を強化する。国際交流を推進するため、CAHEは2013年の国際水素技術大会(WHTE2013)の開催を申請することを決定し、2008年11月にCAHEは正式に申請し、国際的な水素エネルギーの推進団体であるPartnership for Advancing the Transition to Hydrogen (PATH) への参加を準備している。今後、世界の水素エネルギー発展を推進するため、CAHEは貢献する。

中国については、2008年は平穏な1年ではなかったが、中国の水素エネルギー分野は安定して発展した。2009年には、CAHEと中国の水素エネルギー分野が世界的な金融危機に打ち勝つために貢献できることを期待している。

注：学会の中国語・英語表記が異なることに注意されたい。

学会の中国語名：中国再生可能エネルギー学会水素エネルギー専門委員会

学会の英語名 China Association for Hydrogen Energy (CAHE)

リチウムイオン電池およびそのキーとなる材料

•Profile•



黄学傑 Huang Xuejie ●中国科学院物理研究所 クリーンエネルギーセンター常務副主任

1966年生まれ。中国科学院物理研究所研究員、クリーンエネルギーセンター常務副主任。1993年 オランダのデルフト工科大学工学博士取得、専門は無機材料。デルフト工科大学卒業後、1994～1995年ドイツのキール大学博士課程修了。現在、中国科学院物理研究所研究員、博士課程学生の指導教官、クリーンエネルギーセンター常務副主任を兼任。固体イオン学専門家会議議長、蘇州星恒首席科学者。1996年から物理研究所にてリチウムイオン電池およびキー材料の研究・開発と産業化事業を担当。中国科学院科学技術進歩2等賞および求是傑出青年賞を受賞。この数年間で国際学術定期刊行物に発表した学術論文数は100件余り、特許取得数は27件にのぼる。中国ハイテク技術研究発展計画の「863計画」や「973計画」におけるリチウムイオン電池材料および自動車用ハイパワーリチウムイオン電池に関する多くの課題に取り組み、自動車用リチウムイオン電池および一部のキー材料の産業化を果たしている。

1. 序

電気自動車とハイブリッドカーの発達は、現在、全世界の自動車産業に大きな変革をもたらしている。電池は電気自動車のコア部品であり、自動車用リチウムイオン電池はこれまでの数年間で比エネルギーは100Wh/Kg以上になり、比出力は最高で3000W/Kgを達成することができた。今後数年間で性能はさらに高まり、コストも徐々に下がる見通しである。2020年までに全世界で多くの自動車にリチウムイオン電池が搭載され、ハイブリッドカーまたは電気自動車になると予想される。

リチウムイオン電池は負極にグラファイトなどのリチウム貯蔵材料を、正極にリチウムを含む遷移金属化合物の LiMn_2O_4 、 LiFePO_4 などを使用し、電解質は通常リチウム塩の有機溶媒を用いる。充電時には、リチウムイオンが正極材料から分離し、電解質を通して負極に取込まれ、放電時にはこれと逆の作用となる。他の電池と比較すると、リチウムイオン電池は電圧やエネルギーが高く、メモリー効果もない上、自己放電率が低いなどの長所がある。1990年代初めにソニーが世界に先駆けて産業化に成功した後、急速に発達して、情報化時代を迎えた現在では電子製品や小型製品に広く応用されるようになり、近い将来、電気自動車分野に広く普及するだろう。

日本はリチウムイオン電池の分野で首位に立っており、三洋やソニー、パナソニック、NECなどの有名企業はいずれも大規模なリチウムイオン電池の製造ラインを立ち上げている。マンガン酸リチウムを正極材料に用いたリチウムイオン電池はすでに「R1e」や「MiEV」などの電気自動車やハイブリッドカーに大量に応用されている。アメリカではこれに追いつくべく、オバマ政府が先週成立させた経済刺激策に20億米ドルを盛り込み、米自動車用リチウムイオン電池産業の発展を支援している。

中国のリチウムイオン電池研究開発プロジェクトは一貫して「863計画（中国ハイテク技術研究発展計画）」の重点プロジェクトであるが、現在モバイル電子機器用リチウムイオン電池はすでに年産10億個以上の製造能力を

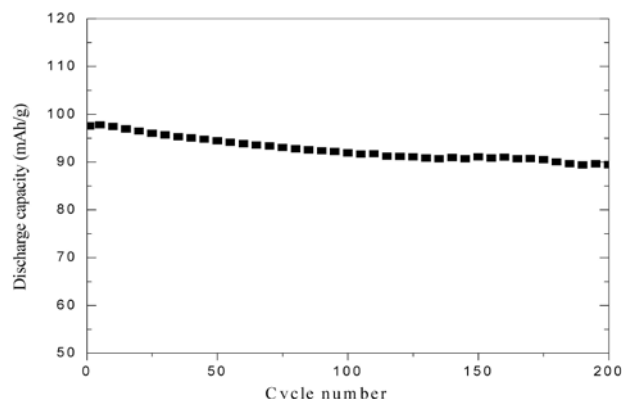
確立し、材料の大半が中国産で、市場競争で善戦している。動力用電池の研究ではやや遅れを取っていたものの、現在では著しく進展している。

2. マンガン酸リチウムおよびリン酸鉄リチウムの正極材料の研究

動力用電池および二次電池は単体の電池セルもバッテリーパックも、携帯電話やノートパソコンの電池をはるかに上回る容量があるため、安全性にはより高い要求が出されている。一般に、同一材料体系のリチウムイオン電池の安全性は貯蔵するエネルギー総量と反比例しているが、一部の携帯電話に用いるリチウムイオンバッテリーの重量は約20グラムなのに対し、電動自転車用のリチウムイオンバッテリーパックの重量は3～4キログラムと、携帯電話用電池の百数十倍～二百倍にもなる。ハイブリッドでない電気乗用車には300～400キログラムのバッテリーが用いられるが、電動式大型バスあるいは電動式大型トラックでは電池の重量は1500～2000キログラムであり、携帯電話用電池のさらに1万倍近くにもなる。自動車用電池の安全性の問題については、「第10次5カ年計画」の期間において十分な解決策が得られている。

マンガン酸リチウムは製造方法が単純で、製造コストも安く、従来の材料であるコバルト酸リチウムに比べて環境にやさしく、より安全性が高いため、今なお動力リチウムイオン電池の正極材料の第一候補である。マンガン酸リチウム材料の欠点としては、高温における反復特性が劣ることと、高温下では劣化が特に著しいことが挙げられる。1998年にリチウムイオン電池の自動車用への展開を決定した際、直ちにマンガン酸リチウム材料の基礎研究が強化された。まず、クロムドーブとフッ素ドーブしたマンガン酸リチウムの正極材料についての研究を行い[1、2、3]、ドーブにより反復特性について一定の改善を得ることができたが、自動車用電池の必要条件を満たすことはできず、クロムドーブでは電池充電時に六価クロムをより多く発生させた。アルミドーブの正極材

料の研究により、我々は非常に早い段階でコバルト酸リチウムの表面を被覆するナノ酸化アルミニウム層を発見し、広い電圧領域で材料の反復特性を大幅に向上させることができた。2001年、豪ケアンズで開かれた固体イオンクス国際学会において、この研究成果[4]を発表して、高い注目を集めた。その後、米ブルックヘブン国立研究所の楊曉青博士の協力を得て、In-situシンクロトン放射光XRDの酸化アルミニウム被膜コバルト酸リチウム材料に対する作用のメカニズムについて研究を行い、酸化アルミニウム被膜材料では、高電圧条件下で優れた充電反復特性を維持することが明らかになった。これは、充放電過程における材料の可逆的な相転移特性の保持に基づくもので、従来一般的に必要と考えられていた充電過程における構造変化の抑制ではない。一連の基礎研究を通じて我々は、マンガン酸リチウム材料の表面改良により材料の反復特性を高める方法を発見した[5、6]。



◎図1 表面改質を行ったスピネル型マンガン酸リチウムの55℃条件下における反復特性曲線

我々はナノ酸化アルミニウムを用いてスピネル型マンガン酸リチウム材料に対し表面改良を行い、55℃の条件下で汎用のLiPF₆/EC:EMC:DMC電解液で200回の充放電を行ったところ、容量維持率はなお90%近くを保った(図1)。中国初のハイブリッドカー用電池として、2004にハイパワーリチウムイオン電池を開発したことは1つの難題を克服し、また自動車用のマンガン酸リチウムイオン電池の産業化を果たす礎となる材料を獲得したといえる。

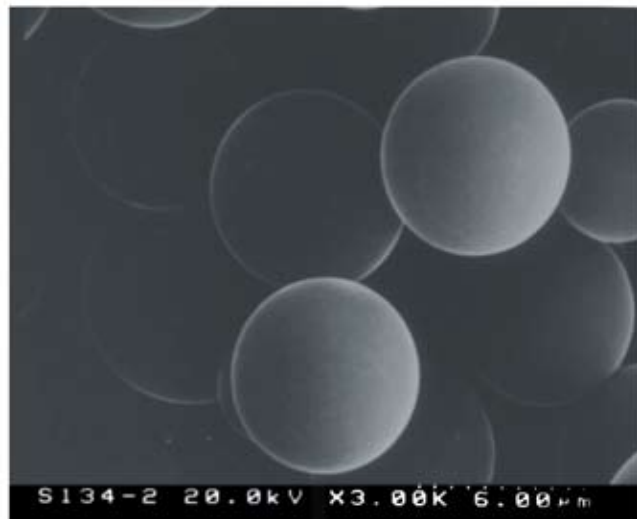
リン酸鉄リチウムの正極材料の熱安定性はマンガン酸リチウムに比べ一段と優れており、将来的にはリチウムイオン電池と二次電池のキー材料となるものである。我々は2000年にこの研究に着手し、2001年に「863」計画の新材料分野における重点課題へ支援申請して、問題なく承認された。理論計算による予測と実験を組み合わせで研究し、リチウムサイトでドーピングした高原子価陽イオンクロムがリン酸鉄リチウム材料の電子コンダクタンスを明らかに高めることを発見した[7]。しかし理論計算では[8]、

オリビン型リン酸鉄のリチウム材料ではリチウムイオンが拡散する経路は1次元であり、コバルト酸リチウム中の2次元経路あるいはマンガン酸リチウム中の3次元経路と異なり、リチウムサイトの高原子価陽イオンはイオン経路が塞がれることが明らかとなった。後に我々は、鉄サイトのアルカリ金属ドーピングおよび酸素サイトの窒素ドーピング材料について重点的に研究し、これらに関する特許を出願した[9、10、11]。アルカリ金属ドーピングのリン酸塩正極材料についての基礎研究と応用研究は現在も進めており、材料性能がより一層改善される見通しである。

3. ナノ負極材料の研究

現在は、商品電池の負極材料にはグラファイトを用いるのが主流であるが、ハードカーボンを負極に用いる電池のほうがハイブリッドカーにはより一層適している。そこで我々は非常に簡便な水熱法を用いて、ショ糖をハードカーボン球に転換した[12]。製造方法は簡便で、かつ原料価格が抑えられる。これにより得られた材料は独特な球形構造を有し(図2)、外観の直径が5～10ミクロンのカーボン球である。球内は単層のグラファイトで構成された孔径0.5～3nmのホールまたはチューブで、高容量のナノホールリチウム貯蔵特性を有しており(図3)[13]、これがカーボンナノチューブ材料の高容量リチウム貯蔵特性と球形炭素材料の優れた加工特性を結び付けている。

ノーカーボン負極の研究は1996年に富士フィルム社が酸化スズ負極のリチウムイオン電池についての開発を発表した後、研究の焦点となり、10数年にわたる研究を経て一連の成果を挙げ、このうち一部はほぼ実用化レベルに達している。1996年、我々は中国で初めて酸化スズ負極材料の研究に着手し、1996～1997年の研究によりその本質はリチウムとの合金化反応であることが明らかとなった[14]。1998年には酸化スズのリチウム貯蔵過程にお



◎図2 ハードカーボン球材料の形復特性曲線

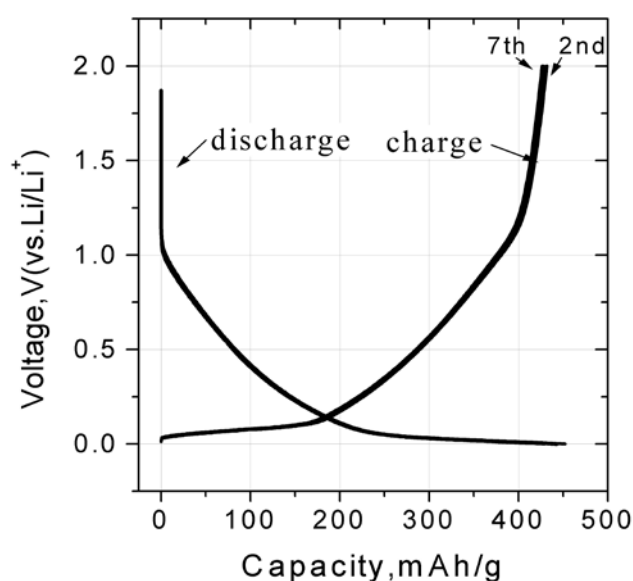


図3 ハードカーボン球材料の充放電曲線

けるナノ構造化現象を発見した[15]。酸化物が可逆的にリチウムを貯蔵するのを記録したミクロ画像ではナノサイズのリチウムスズ合金が無定形酸化リチウムの媒質中に分散していた。この研究によって、ナノサイズの合金が媒質において分散するのは、この種の材料のリチウムインサージョン反応であること、およびこの種の材料が比較的優れた反復特性を備えていることが明らかになった。これが後のナノ合金類リチウム貯蔵材料の構造設計に明瞭な道筋を示したのである。したがってその後の研究では、ナノ金属や合金、酸化物などに多くの関心を注ぐようになった。リチウム合金を形成する材料は大量のリチウムを貯蓄でき、グラファイト材料を大きく上回るリチウム貯蔵容量を有する。1999年に我々は分散部分のナノケイ素の負極材料が粉末材料に比べリチウムイオンの挿入・離脱過程において体積変化に対してより優れた耐性を有し、比較的優れた反復特性と1700mAh/gに達する比容量を有することを発表した[16、17]（グラファイト類材料の5倍）。この結果を発表したことで、リチウム電池で用いられた素材のサイズ効果の優れた特徴が世間から新たに認められるようになったが、リチウムイオン電池の負極材料としての金属およびその合金材料は非常に大きな難題にぶつかることとなった。主な問題点は、これに大量のリチウムが貯蔵された際に体積がもとの何倍にも膨張することである。ナノ材料の利点は比較的大きな体積変化に耐えられることであるが、反復過程において、化合物が発生しやすく、ナノ材料の優れた性質が喪失するため、反復特性は大きく劣化する。このため、ナノ材料をその他の材料と組み合わせて、実用の際の反復特性劣化の問題を解決する必要がある。

4. 自動車用リチウムイオン電池

リチウムイオン電池業界ではこれまでに重大な構造変化があり、現在もなお続いている。自動車工業界ではリチウムイオン電池に対し、小型電池の2倍以上の寿命とコスト半減を求めているほか、電池容量に対する要求も数倍から数十倍に、また製造規模を数十倍から数千倍にまで引き上げている。動力用電池の産業化は材料および技術、設備の絶え間ない技術革新につれ、従来型のコバルト酸化物の正極材料はマンガン酸化物およびその他のリン酸塩材料に代わり、電池の安全性を大幅に向上させたほか、新たな負極材料を用いた電池も商品化の方向にあり、リチウムイオン電池も寿命延長およびコストダウンの方向に向かっている。小型電池に用いられる製造技術も、徐々に高効率かつ低エネルギー消費で環境に負担の少ない新技術へと代わっている。例えば、動力用電池の放熱性やハイパワー入出力に対する要求は、電池セルの設計モデルを今日の巻き付け式（円筒）から平板式に向かわせており、これにより相応しい材料の製造技術および電池の製造技術、設備に対する要求も絶えず刷新され、より向上している。大規模な産業発展は資源や環境に影響をもたらすため、これと同時に電池の回収処理技術を高め、材料のリサイクル化を図る必要がある。

高コストがリチウムイオン電池の弱点であることは周知の事実であるが、製造規模が大きくなれば、製品の成熟度も上がり、コストも下がらないため、製品は売れず、十分な投資もなされず、自動車用リチウムイオン電池産業の規模は拡大できないという悪循環に陥ってしまう。だが、電動自転車産業の発展がこの悪循環を断ち切るものと見られる。中国における電動自転車の所有台数は1億台近くにのぼるが、これに用いられる電池のうち圧倒的多数が依然として鉛蓄電池である。しかし同業界では、持続可能な発展に向けて環境にやさしいリチウムイオン電池に期待を寄せている。電動自転車のリチウムイオン電池に対する需要が高まるにつれ、自動車用電池の製造・技術レベルもより一層高まっており、産業規模が拡大すればコストも急速に下がるものと見られる。中国の電動自転車産業の発展が電気自動車の発展を強力に支える礎となっている。現在リチウムイオン電池も急速な成熟化に向かっており、徐々にハイブリッドカーやハイブリッドでない電気自動車に大規模に応用されている。電気自動車の発展に向けて、2輪の電動自転車が4輪の電気自動車の礎となっている状態にある。最近、科学技術部等の省庁が「10大都市に1000台の電気自動車を普及する計画」をスタートしているが、これが自動車用リチウムイオン電池産業の急速な発展に向けて有利に働くものと思われる。

参考文献

1. Spectroscopic studies on cation-doped spinel LiMn_2O_4 for lithium ion batteries Wu C, Wang ZX, Wu F, et al.
SOLID STATE IONICS 第144巻 第3～4号 pp.277～285 DEC 2001
2. X-ray diffraction and X-ray photoelectron spectroscopy analysis Cr-doped spinel LiMn_2O_4 for lithium ion batteries
Wu C, Wu F, Chen LQ, et al.
International Conference on Solid State Ionics, JUL 08-13, 2001 CAIRNS, AUSTRALIA
SOLID STATE IONICS 第152巻 特別号:Part A Sp. Iss. SI pp.335～339 Part A Sp. Iss. SI DEC 2002
3. Fabrications and electrochemical properties of fluorine-modified spinel LiMn_2O_4 for lithium ion batteries
Wu C, Wu F, Chen LQ, et al.
International Conference on Solid State Ionics, JUL 08-13, 2001 CAIRNS, AUSTRALIA
SOLID STATE IONICS 第152巻 特別号:Part A Sp. Iss. SI pp.327～334 Part A Sp. Iss. SI DEC 2002
4. Al_2O_3 -coated LiCoO_2 as cathode material for lithium ion batteries
Liu LJ, Wang ZX, Li H, et al.
International Conference on Solid State Ionics, JUL 08-13, 2001 CAIRNS, AUSTRALIA
SOLID STATE IONICS 第152巻 特別号:Part A Sp. Iss. SI pp.341～346 Part A Sp. Iss. SI DEC 2002.
5. Electrochemical and in situ synchrotron XRD studies on Al_2O_3 -coated LiCoO_2 cathode material
Liu LJ, Chen LQ, Huang XJ, et al.
JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY 第151巻 第9号 pp.A1344～A1351 2004
6. Improved electrochemical performances of surface-modified spinel LiMn_2O_4 for long cycle life lithium-ion batteries
Sun YC, Wang ZX, Chen LQ, et al.
JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY 第150巻 第10号 pp.A1294～A1298 OCT 2003
7. Enhancement of electronic conductivity of LiFePO_4 by Cr doping and its identification by first-principles calculations
Shi SQ, Liu LJ, Ouyang CY, et al.
PHYSICAL REVIEW B 第68巻 第19号 文献No.195108 OV 2003
8. First-principles study of Li ion diffusion in LiFePO_4
Ouyang CY, Shi SQ, Wang ZX, et al. PHYSICAL REVIEW B 第69巻 第10号 文献No.104303 MAR 2004
9. リチウムイオン電池に用いるリン酸塩の正極材料の製造方法200410003477.1
10. 二次リチウム電池に用いる窒素含有リン酸塩の正極材料およびその用途200410037502.8
11. 二次リチウム電池に用いる酸素空間含有のリン酸鉄リチウムの正極材料およびその用途200410101618.3
12. Monodispersed hard carbon spherules with uniform nanopores
Wang Q, Li H, Chen LQ, Huang XJ
CARBON 第39巻 第14号 pp.2211～2214 2001
13. Novel spherical microporous carbon as anode material for Li-ion batteries,
Wang Q, Li H, Chen LQ, Huang XJ
SOLIDSTATE IONICS 第152巻 特別号:Part A Sp. Iss. SI pp.43～50 Part A Sp. Iss. SI DEC 2002
14. Studies of stannic oxide as an anode material for lithium-ion batteries
Liu WF, Huang XJ, Wang ZX, et al.
JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY 第145巻 第1号 pp.59～62 JAN1998)
15. Direct imaging of the passivating film and microstructure of nanometer-scale SnO anodes in lithium rechargeable batteries
Li H, Huang XJ, Chen LQ
ELECTROCHEMICAL AND SOLID STATE LETTERS 第1巻 第6号 pp.241～243 DEC 1998
16. A high capacity nano-Si composite anode material for lithium rechargeable batteries,
Li H, Huang XJ, Chen LQ, et al.
ELECTROCHEMICAL AND SOLID STATE LETTERS 第2巻 第11号 pp.547～549 NOV 1999
17. Controlled Li doping of Si nanowires by electrochemical insertion method
Zhou GW, Li H, Sun HP, Huang XJ et al.
APPLIED PHYSICS LETTERS 第75巻 第16号 pp.2447～2449 OCT 18 1999

日本の再生可能エネルギーの動向

•Profile•



柏木 孝夫 かしわぎ・たかお ●東京工業大学統合研究院 教授

1966年生まれ。中国科学院物理研究所研究員、クリーンエネルギーセンター常務副主任。1993年オランダのデルフト工科大学工学博士取得、専門は無機材料。デルフト工科大学卒業後、1994～1995年ドイツのキール大学博士課程修了。現在、中国科学院物理研究所研究員、博士課程学生の指導教官、クリーンエネルギーセンター常務副主任を兼任。固体イオン学専門家会議議長、蘇州星恒首席科学者。1996年から物理研究所にてリチウムイオン電池およびキー材料の研究・開発と産業化事業を担当。中国科学院科学技術進歩2等賞および求是傑出青年賞を受賞。この数年間で国際学術定期刊行物に発表した学術論文数は100件余り、特許取得数は27件にのぼる。中国ハイテク技術研究発展計画の「863計画」や「973計画」におけるリチウムイオン電池材料および自動車用ハイパワーリチウムイオン電池に関する多くの課題に取り組み、自動車用リチウムイオン電池および一部のキー材料の産業化を果たしている。

1. 低炭素社会の実現に向けた世界の潮流

21世紀における日本の成長エンジンは低炭素型の経済モデルを逸早く構築することである。科学的、分析的に理論武装された国際世論が必ず低炭素社会の実現を力強く牽引する。この世論はこれまで米国に向けられていたが、オバマ政権誕生に伴い、中国、インド等に向けられ始めた。低炭素社会の実現は加速度的に早まる。

ポスト京都に対する中期目標に対し活発な議論が成されているが、各国は地球益を全面に出しながら国益をかけた戦略を国情に応じて激しく展開しているのが現状である。地域エネルギー計画を考える際、特に、自然エネルギーの導入目標は地域特性に大きく左右され国家戦略そのものであるため、我国としては省エネルギー、原子力を全国の基盤として最適な新エネルギーをうまくバランスさせた戦略を持ちつつ粘り強い交渉を続けるべきである。

2. 政治決断された「新エネ・モデル国家日本」

我国は国際的に「Cool Earth 50」を提唱し、2050年までに二酸化炭素の排出を全世界で現状の半分に低減させようとしている。ここで、重要なことはこれを達成するために、次の3原則を主張していることである。まず、①主要排出国が全て参加し、京都議定書を超え、世界全体での排出削減につながる。②各国の事情に配慮した柔軟かつ多様性のある枠組みとすること。③省エネ・新エネなどの技術を活かし、環境保全と経済発展とを両立すること、である。

さて、地球環境問題の理念とは何であろうか？私は「公平性」であると考えている。IPCCでは「DES、Development, Equity, Sustainability」問題について記述されている。すなわち地球環境問題は、人類みな公平性を保ちながら持続可能な開発・発展をするためには、どのような課題と解決しなければならないか、という難問に取り組んでいることになる。国連加盟国192ヶ国が皆手をつなぎ、192人193脚で走れるような環境をどう作るか問わ

れている。

低炭素型エネルギーシステムに対し、我国では当初、強力で省エネルギーを推進し、供給サイドは原子力のシェア拡大で対応することが、工業国という我国の特性や国民経済上好ましいと考えていた。しかし、現状で着工している新設原子炉が3基であることなどを考えると、再生可能エネルギーを含め低炭素社会が必要とする供給サイドでのエネルギー選択や技術開発など総合的な戦略が極めて重要となっている。

特に太陽光発電などの新エネルギーをエネルギー政策上明確に位置づけるべき大きな決断の時期であり、私は昨年6月9日に発表された福田ビジョンで新エネルギーに対する政治的決断が成され、麻生政権に引き継がれていると確信している。環境モデル都市の選定をはじめ、今後は新しい技術革新を通して省エネルギー・新エネルギーの一体化政策を強力で推進することがCO2原単位の大幅な低減をもたらす、世界的にみて経済への貢献も極めて大きい。まさに、新しいグリーン公共事業の誕生といっても過言ではない。

福田ビジョンによる新エネルギー国家としての首相決断を受け、新エネルギー部会では中間とりまとめを緊急提言という形で公表した。以下にその概要を示すが、地域、都市エネルギー計画についても触れられている。

新エネルギー部会緊急提言

国土が狭く、資源の少ない我が国は、ハイテクやものづくりといった我が国の強みを活かして新エネルギーの導入拡大を図るべきであり、太陽光社会を世界に先駆けて構築し、新エネルギーが生活の中でごくふつうに使われる新エネ生活（新エネ・ライフ）を実現し、新エネ・モデル国家へと変貌を遂げることが低炭素社会構築のための有力な手段である。これらの新エネ技術、新エネ・ライフ等の新エネ文明を日本から世界に向けて提唱し、国際貢献を果たすことが、我が国の産業競争力を維持することになり、産業政策上も大きな意義がある。

低炭素社会の実現は、省エネルギーの着実な推進とともに、原子力、新エネルギーの導入拡大が期待されているが、国土が狭い我が国においては、新エネルギーの導入には様々な制約がある。例えば風力やバイオマスは、北欧や北米では新エネルギーの主役になりつつあるが、日本の風況や国土（面積）では適地に限界がある。

そこで、我が国としては、水力、地熱、風力、バイオマス等による発電や熱利用に今後とも最大限取り組みつつ、我が国の強みである太陽電池、蓄電池、燃料電池等に関する材料開発から製品開発まで一貫した高度な技術やものづくりの技術を活かして新エネルギーの導入拡大を図るべきであろう。そのためには、太陽電池、蓄電池、燃料電池等の高度な技術を活かし、世界に先駆けて太陽光社会を実現し、水素社会の構築を目指すべきであろう。

例えば、太陽光発電は、「低炭素社会・日本」をめざしてと題する6月9日の福田ビジョンにもあるように、2020年に現状の約10倍、2030年には約40倍を目標とする。これは、2020年において新築持家の約7割、2030年には新築戸建4住宅の約8割、産業用・公共用施設全体の約8割に太陽光発電が設置されている状態に相当する。

「省エネ」は広く国民生活に定着しつつあるが、「新エネ」は生活に定着したとまでは言えない。省エネ・ライフは、燃料費の節約など個人の利益になる面もあるが、新エネは、コストが高い等のハードルが無視できない。新エネ・ライフ定着のためには、コストがかかっても未来の地球のために投資するという国民の意識改革と、産学官の力を結集した技術開発、市場拡大等によって新エネルギーのコストを下げる必要がある。

このような取組みによって、我が国は新エネ・モデル国家へと変貌を遂げる。そして、これらの新エネ技術、新エネ・ライフ等の新エネ文明を世界に向けて提唱・発信していくことが、我が国の国際貢献、国際競争力の維持の両面から重要である。

国際貢献に関しては、例えば、太陽光発電をはじめとする新エネルギーは、分散型電源として諸外国の無電化村等におけるエネルギーアクセス向上等に貢献できる。また、今後これらの国で電化が進展し、生活の質が改善することが、電力消費を増大させ、気候変動問題に対する新たな課題となりかねないが、これを防ぐためにも温室効果ガス排出量を抑えられる新エネルギーによる電化が有効である。

さらに、新エネルギー関連産業は、エネルギーと環境を巡る諸課題の解決に資する産業であり、素材産業から加工組立産業まで産業全体への波及効果も大きく、国際的にも今後高い成長が期待されるため、

産学官の力を結集して、この産業を競争力のある日本の基幹産業へと大きく育てていくことが重要である。

また、電力、ガス、石油等のエネルギー産業において

は、エネルギーの安定的な供給を堅持しつつ、これまで培ってきた技術やネットワーク等を活かしながら新エネルギーの導入を最大限推進し、エネルギーの供給構造を低炭素型へと変革させていく必要がある。そのためにも新エネに対し我が国が挑戦しうる高い導入目標を設定し、その目標を適切な手段を用いて確実に達成することが重要であると結んだ。まさに、新エネルギーモデル国家日本の幕明けを意味し、新しい時代の始まりである。

3. エネルギー供給構造高度化に向けた新法案と石油プラントの位置付け

我が国が新エネルギー国家としての政治決断を受け現在新しいエネルギー法案が検討されている。この新法では低炭素社会の早期の実現を期し、化石燃料等から非化石系へ、さらに化石燃料の高度利用を含めた包括的な法案となるであろう。太陽電池・燃料電池・高性能蓄電池などの新エネルギー技術には勿論重点が当てられるが、化石燃料の高度利用のポイントとして石油プラントが大きく注目されることになる。

私は過去10年近く、石油精製の最大の課題の一つである残渣問題に取り組んできたが、今後この問題が更に深刻になり、加速されることが予想される。そこで石油に課された長期的な課題の本質と解決方向について考えてみたい。端的に言えば石油に関わる需要サイドの変化と供給サイドの変化によるギャップの拡大である。

需要サイドの変化とは白油化・軽質化であり、その中でも揮発油とナフサが増大し、一方重油が大幅に減退している。但し、絶対量で考えると、従来石油のみに限定されていた自動車燃料の多様化により、バイオ燃料、クリーン・ディーゼル、電気、水素などの代替燃料が今後増え、また、自動車燃費の一層の改善により揮発油の需要も鈍化する可能性もある。

供給サイドの変化は重質化・非在来型石油資源の増加である。ピーク・オイルの議論は直ちに枯渇すると言う“量”の問題ではなく、経済性に基づく“質”の問題であると考えられる。使い易い軽質の油、いわゆる“Easy Oil”は先に利用され、これからは経済性が低く重質の原油が多くなる。

これらの背景を踏まえると、低炭素社会での石油プラントは残渣がすべてガス化され、精製用水素とIGCC, IGFCの燃料になり、国家としてボトムレス型の製油所になければならない。さらに、これからはバイオマスをはじめ、石炭など固形燃料の多目的エネルギー変換拠点として機能する事になり、これまでの石油プラントがグリーン精製プラントとして我が国の基盤エネルギーインフラとして位置付けられることになる。現在検討中の新しいエネルギー法案で、このコンセプトが明らかになる。

4. 低炭素エネルギーシステムのグランドデザイン

我国はこれまでの経緯から省エネ性、自律性、環境性に富んだエネルギー需給構造のグランドデザインを明確に示す責務がある。地球環境問題はエネルギーと一体化して解くべき国際政治課題であり、技術立国日本として、絶好の機会が与えられたと言える。特にポスト京都議定書の枠組みは世界が共有する明確な中長期ビジョンと新しい技術開発無しに、大きな進展はない。

私は科学的検証から、電力に関して言えば、原子力・石炭・天然ガスなどが全体のベースを担い、そのメガインフラ基盤の上に燃料電池、ヒートポンプなど、省エネルギー性に富んだトッランナー機器群や自立性の高い地域共生型の新エネルギーが適切な規模でクラスターを形成してゆくことになることを確信している。

低炭素社会に向けた都市エネルギーシステムのグランドデザインには、例えば都市内の商業施設などを良質な拠点インフラとして捉え、エネルギーマネジメントシステムなどの導入により、新たな省エネルギーをネットワーク的に達成してゆくことが必要となる。今後、太陽光発電や燃料電池などの分散型電源が住宅内や建築物の屋根などに大量導入されてくると、これらのマネジメントシステムは需要地に導入された分散型発電システムと電力系統内に形成されたスマートグリッドやマイクログリッドと一体化してCO₂を削減するアドバンスドシステムへと発展させるための基礎となり、低炭素社会の実現には欠かせないものとなる。特に、住宅分野に対しては、将来的に太陽電池・燃料電池あるいはプラグインハイブリッド車や電気自動車等が住宅とセットで導入され、それらのシステム化により、運輸エネルギーも含めゼロエネルギーハウスも夢ではない。また、燃料電池を見据えた水素社会の到来も電力化傾向の高まりと共に必ず訪れる。

私は運輸エネルギーを考慮に入れた都市や地域エネルギーの全体最適解を解いてみた。発電効率が45%以上の分散型電源が都市内に導入され、排熱を無駄なく使いつづけることができるようになると、PHVやEVの導入が都市への投入エネルギーを最小とする解が得られた。全体最適化の理論的妥当性を実証したことになる。そのためには、コミュニティ内での電力の面的融通や二次電池による選択貯蔵など車輦に搭載された二次電池との双方向の充放電システムがキーテクノロジーとなる。

将来的には需要地に知能を備えた各種分散型システム群が大規模送電系統の一端にループ状のネットワークを形成し、系統との調和を図りつつ、既存の空間インフラを高度に活用しながら、電力だけでなく熱や物質（例えば水素）までも併給する統合型インフラ構造を構築することが、究極の省エネルギーを実現すると共に、再生可能エネルギーを最大限とり込める低炭素社会のグランドデザインそのものとなる。我国は愛知万博をはじめとし、

すでにマイクログリッドという型で2030年の低炭素社会の姿を世界に先駆け発信している。

また、熱エネルギーの合理的な需給構造も見逃してはならない。高効率ヒートポンプ、太陽熱・ソーラークーリング、下水、廃棄物などの未利用エネルギーの民生用への高度利用も、都市エネルギー全体最適のための新しいインフラとして必要になるであろう。

都市エネルギー全体最適化の一環として全国147ヶ所で展開している地域冷暖房システムにおける電源立地の制度化など都市全体の最適化に対するグランドデザインは、インフラも含め新しいコンセプトが必要不可欠となる時代の幕明けであることを強調したい。

5. 低炭素型産業都市構造と新たなインフラ整備

産業部門に目を向けると低炭素型産業エネルギーシステムは化石燃料から非化石系へ、さらに化石燃料の高度利用を可能にする産業基盤が必要となる。太陽電池・燃料電池・高性能蓄電池などの新エネルギー技術は産業政策上現在大きな注目を集めているが、化石燃料の高度利用に対する革新技術も併せて重要となり、工業国家として産民複合型地域エネルギー計画にも目を転ずべきである。例えば、低炭素社会での石油プラントの将来を考えると、残渣がすべてガス化され、精製用水素とIGCC、IGFCの燃料供給拠点にすべきである。そのためには国策としてボトムレス型の製油所として生まれかわる必要があり、これからはバイオマスをはじめ、石炭など固形燃料の多目的エネルギー変換拠点として機能する事になる。これまでの石油プラントがグリーン精製プラントとして我国の基盤エネルギーインフラとして産民複合型地域エネルギーの拠点となる可能性もある。

一方、低炭素型エネルギー源多様化の一環として非食糧系バイオ燃料の優位性も見逃せない。バイオマス利用は燃料化、ガス化などにより地産地消を促進し、地域の活性化、国土の充実に加え、農林水産のような一次産業の構造改革も可能となるため、期待度は極めて大きい。バイオマス利用施設は低炭素社会における新しい地域エネルギーインフラとして位置づけられるべきであり、法整備を含め新たな局面を迎えたと言える。さらに、沿岸地域では、200カイリ経済水域を考えると我国は世界6位である利点を生かし、産業排ガス中のCO₂を海洋バイオマスにより資源として回収し工業化する新産業の創成計画も重要である。

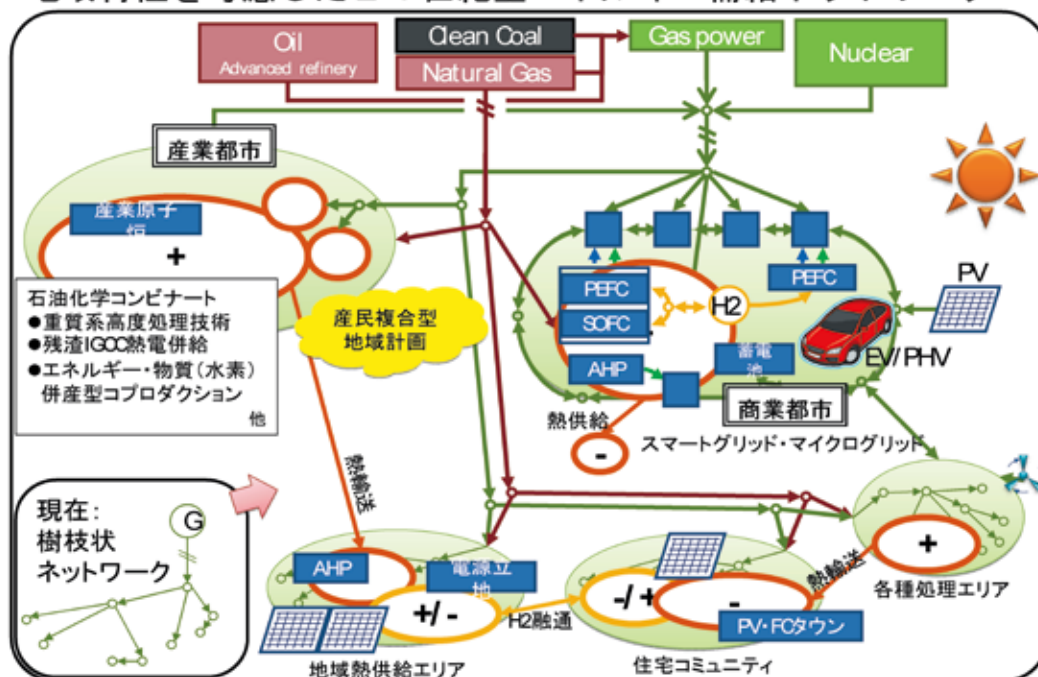
最後に、我国は工業国家として、低炭素型産業構造のモデルを世界に示す責務もある。先日、周南コンビナートを視察する機会を得た。日本の産業の基礎となる重化学を主体とする世界有数の生産拠点であり、コンビナート内の企業群の電力需要だけで140万kW以上にも及び、主に石炭火力で対応しているが、低炭素型産業構造への風が強まり木材バイオマスを混焼させるなど最大限の努

力を払っており、その精力に対して頭が下がる思いであった。

今後我国が率先して低炭素産業構造のモデルを世界に

示そうとするならば、コンビナート内に国策として産業用原子力発電を立地するくらいの覚悟が必要である。

地域特性を考慮した21世紀型エネルギー需給ネットワーク



住宅コミュニティにおける再生可能エネルギーとPHV/EV



次世代燃料電池のための材料開発

•Profile•



渡辺 政廣 わたなべ・まさひろ ●山梨大学クリーンエネルギー研究センター・センター長

1943年 5月生まれ。1968年 3月山梨大学大学院修士課程応用科学専攻修了。1976年 9月工学博士（東京大学）。1968年3月～1989年5月山梨大学工学部助手、講師、助教授。1979年8月～1980年10月フロリダ大学博士研究員。1989年 6月山梨大学工学部教授。2001年 4月山梨大学クリーンエネルギー研究センター・センター長 現在に至る。

論文

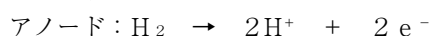
・燃料電池関連研究を中心に約200報（<http://www.clean.yamanashi.ac.jp>参照）全論文の年間引用回数500回以上、平均引用度が20回/報、多い論文は約500回/報と高い評価。学会及び社会における主な現在の活動・国際燃料電池ワークショップ:第1回~4回（1989,1997,2001, 2005）主催、実行委員長・国際電気化学会（ISE）:副会長（2006-2008）・その他、国の各種の燃料電池/水素エネルギー関係の委員会の委員/委員長

受賞抜粋

・電気化学協会学術賞1992年4月・電気化学会賞・武井賞2005年4月・触媒学会賞(学術賞)2006年3月・2007 IPHE Technical Achievement Award, International Partnership for the H2 Economy, 2007.11・文部科学大臣賞科学技術賞(開発部門)2008年4月

1. 緒言

毎日のようにマスコミを騒がしている原油価格の変動や地球温暖化の例を見るまでもなく、エネルギー資源の効率的利用と地球環境保全は、人類に課せられた今世紀最大の緊要課題である。この課題解決の切り札として、“燃料電池”に大きな期待が寄せられている。燃料電池は物質が持つ化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換する発電装置であり、火力発電などの熱機関に比べて効率がよく環境にも優しい。燃料電池は用いられる電解質によって幾つかの種類に分類されるが、特に最近注目を集めているのが、固体高分子形燃料電池 (Polymer Electrolyte Fuel Cells: PEFC) である。燃料に水素、酸化剤に空気中の酸素を各電極（アノード、カソード）に供給して、化学反応により直接電気エネルギーを得る(図1)。



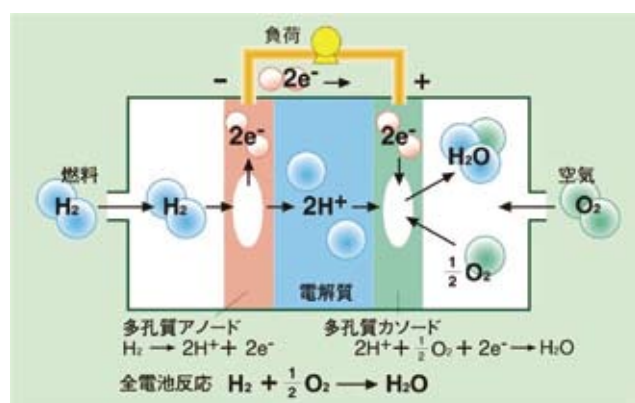
PEFCは小型軽量で原理的に高出力密度化や低コスト化が可能であるため、電気自動車や携帯機器用の電源、電気と熱を併給(コジェネレーション)する家庭用据え置き用途などへの応用に向けて、世界的な開発競争が繰り広げ

られている。すでに燃料電池自動車は、実用条件での性能評価や課題抽出を目的としたフィールドテストが日米欧韓などで進められている。他方、家庭用燃料電池に関しては、我が国では、本年度までの大規模な実用化実証試験を経て、いよいよ次年度より政府助成金（約半額）制度の下に商用化が始まる。しかし、自動車用、家庭用の燃料電池がエネルギー・環境問題の真の救世主となるには広範な普及が必須であり、そのためには一層の高性能化、高耐久化、低コスト化が達成されなければならない。既存材料やシステムの改良や量産化によって初期導入を図りつつ、将来の本格普及に向けた電極触媒、電解質膜、および周辺部材の“革新的な新材料”を開発しなければならない。本稿では、環境・エネルギー問題の解決に於ける燃料電池の役割と、次世代型燃料電池の実現を目指した最近の研究開発状況について、我々の試みを中心に紹介する。

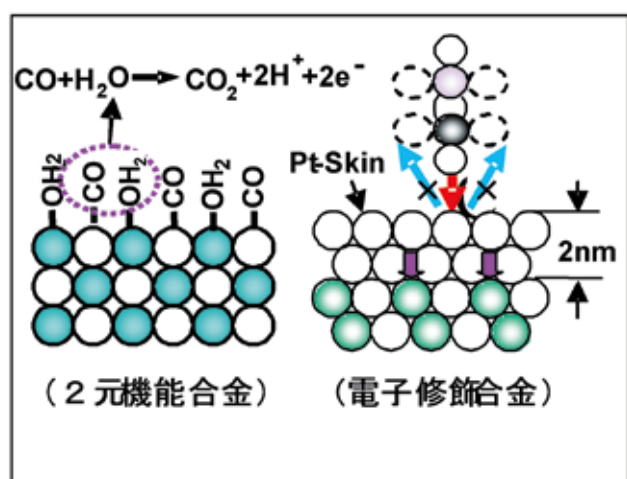
2. 電極触媒

2.1 アノード触媒

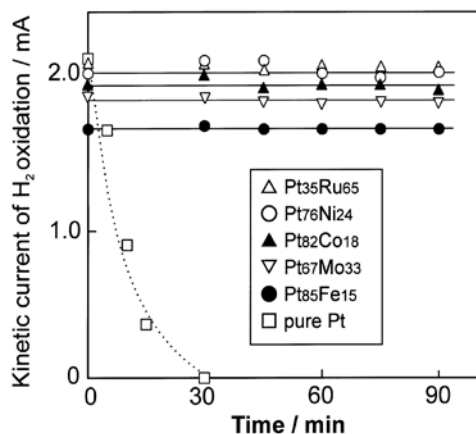
純水素のアノードでの酸化反応(HOR)は、カソードでの酸素還元反応 (ORR) に比べて十分に速く電圧損失は小さい。一方で天然ガスやメタノールなどを水蒸気改質(下記項目4参照)して得られる水素を用いる場合、通常0.5～1.0%程度のCOが含まれる。この改質燃料ガスをアノードに供給すると白金触媒がCOで被覆され、電池電圧・電流いずれもが1/5以下に低下してしまう。渡辺らは以前に、耐CO被毒アノード触媒としてPt-Ru合金が優れていることを見出し、Ru上に吸着した酸素種がCO酸化を促進する“二元機能触媒機構”を提案した(図2左)¹⁾。更に、Pt-Ni, Pt-Co, Pt-Fe, Pt-Moなどの合金も耐CO被毒アノード特性に優れていることが発見された(図3)²⁾。これら合金上でのCO被覆率は0.5以下と低く、水素の解離吸着・酸化に必要なサイトが十分存在する。これら卑金属とPtと



◎図1 燃料電池の作動原理



◎図2 耐CO被毒Pt合金触媒設計



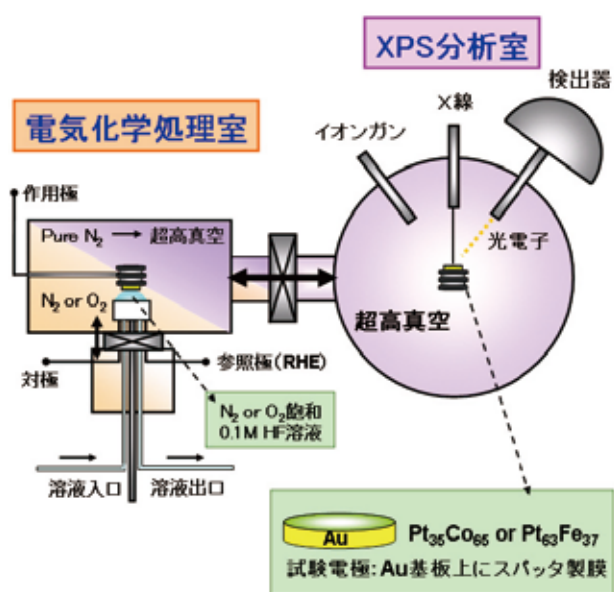
◎図3 白金-卑金属合金触媒の耐CO被毒水素酸化活性 (100ppmCO存在下)

の合金では、ごく表層の卑金属が溶出し、残ったPtが再配列して合金表面に1-2nm厚の(111)面配向した緻密なPtスキン層を形成していることを電気化学QCNや電気化学STMで明らかにした^{3,4)}。耐CO被毒性を示すこのような合金表面のPtはバルクPtの内核電子の結合エネルギーが正にシフトし、耐CO被毒性のない合金では負にシフトしていることが判った。このPtスキン上では、下地合金の影響を受けPt5d電子欠損が増大し、このため、白金からCOへの5d電子バックドネーションが減少し、被覆率の低下(耐CO被毒性の向上)に繋がるものと考えられた(図2右)^{2b,2c)}。

これを実験的に検証するために、図4に示す電気化学-光電子複合解析装置を構築した。始め電解液中で電位走引により合金表面へのPtスキン層形成で安定化後、超高真空下のXPS分析室でPt(4f^{7/2})のコアレベル(CL)及びサーフェスコアレベル(SCL)を測定した。また、このSCLのCO吸着に伴うシフト(サーフェスコアレベルシフト: ΔSCL)を測定した。PtをCoやRuと合金化すると、前述のようにCLは正にシフトするが、図5に示すように、このコアレベルシフト(ΔCL)とCO吸着に伴う ΔSCL の間には綺麗な直線関係が見いだされた⁵⁾。ところで、単味Ptを用いた気相CO吸着の研究で、 $\Delta SCL = E_{ads}(CO-Pt) + \text{常数}$ であることが報告されている⁶⁾。本研究で得られた単味Pt上のCO結合エネルギーもよく一致することから、PtCo上のPtスキン、Pt-Ru表面のPtへのCO結合エネルギーも同様に求められた。図5に示す結果は、 ΔCL が正の大きな値を示すPt合金を探せば、CO吸着エネルギーが小さく、H₂酸化に於ける耐CO被毒性の向上が見込めることを示している。このようにPtと卑金属との合金化による新触媒の設計指針を得ることが出来た。

2.2 カソード触媒

PEFCは作動温度が低く(60 ~ 80℃)酸素還元反応(ORR)が遅いため、カソードでの電圧損失が大きく、電池効率損失全体の約80%を占める。したがって現在では、比較的高い触媒活性を示す白金が、高価であるにもかかわらず多量(2 ~ 4g/kW)に用いられており、より高活性なカソード触媒の開発が強く望まれている。我々は、単独では不活性で耐食性もない卑金属と白金を合金化して白金の電子状態を修飾することにより、そのいずれにも優る新たな触媒機能を発現させる独自の触媒設計概念を確立した⁸⁾。組成と結晶構造が厳密に規制された白金-卑金属から成る平板な合金電極(Pt-Ni, Pt-Co, Pt-Feなど)を調製し、その酸素還元特性を評価した。電位掃引を繰り返して電気化学的に安定化処理を行うと、前述の如く、合金触媒から卑金属が溶解して表面に数nmの安定な白金皮膜を形成することを見出した^{3,7c)}。このように白金皮膜が形成した合金は、優れたORR触媒活性を示した^{7a-7c)}。図6(アレニウスプロット)に示すように、室温から60℃までの



◎図4 EC-XPS 複合解析装置

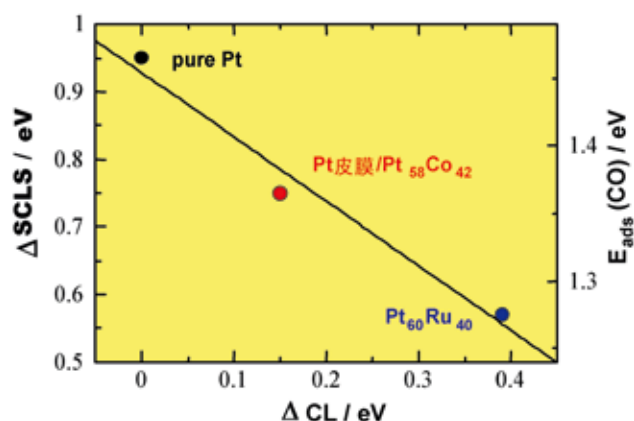


図5 CO吸着エネルギーとCLシフトの関係

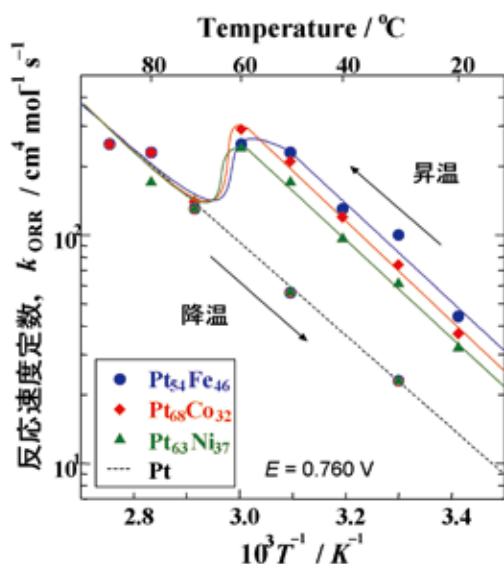


図6 白金合金上のORRの温度依存性

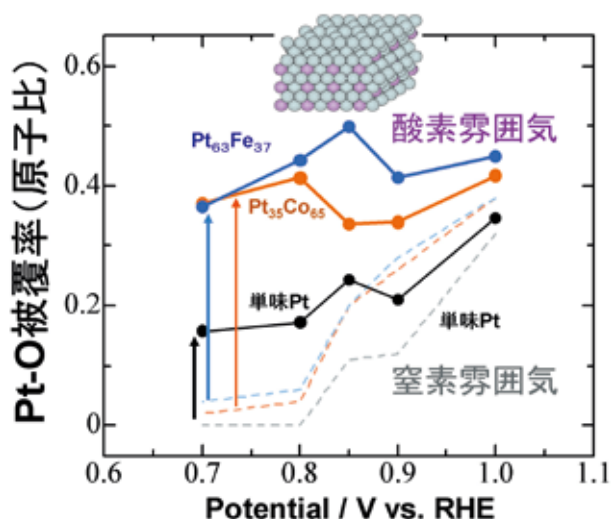


図7 解離O原子被覆率の電位依存性

温度範囲でPt-Fe, Pt-Co, Pt-Ni合金のORR活性は単体白金よりも2～4倍も高く、しかも、に示すように、合金触媒に関する直線の傾き（活性化エネルギー E_a ）が単体白金と同等であり、この活性増大が頻度因子Zの増大によることを明らかにした⁸⁾。更に、このZ値の増大が、卑金属による白金の電子構造修飾により引き起こされることを、以下に述べる如く電気化学－光電子分光複合(XPS, UPS)計測から明らかにしてきた。

図4の装置を用いて、チッ素雰囲気下で各種電位に保持したPt-Fe, Pt-Co 及び単体Pt表面に吸着する酸素種の存在を調べた。その結果、電位依存して表面第一層に吸着する H_2O 分子と少量の第二層 H_2O 分子、および H_2O が酸化されてPt酸化物として吸着していると判断されるOH及びOが同定、定量された⁹⁾。図7の破線は、各電極上でのO原子被覆率を示す。両合金上のPtスキンは酸素吸着性が高いことが明かである。酸素雰囲気下では、このO被覆率が何れの電極上でもチッ素雰囲気下と比べて顕著に増大する。この増大分は、電解液中の酸素が解離して吸着したことは明らかである。Pt-Fe, Pt-Co合金表面のPtスキン上の被覆率は、特に電池反応で重要な0.7-0.8V付近で、単体Ptのそれに比べ2倍以上となる。前述の頻度因子Zの増大は、予期した如く、この解離吸着O原子の被覆率増大と関係付けられた⁹⁾。Yeagerらは、単体Pt上に於けるORR反応機構として、吸着 O_2 分子への最初の電子異動が律速であると提案している¹⁰⁾。筆者らは、単体Pt、Ptスキン上の何れに於いても、定常ORRに対するTafelプロットの0.7Vの領域での勾配が約120mV/decadeと一致し、また活性化エネルギーも殆ど変わらないことを見いだした⁸⁾。したがって、Ptスキン上の反応の律速段階は単体Ptと同様に、最初の1電子異動反応が律速と考えることが出来る。そこで、ORRの律速段階には、限定反応種として解離吸着O原子が係わり、この被覆率が合金表面のPtスキン上では増大することで反応が加速されるという、新しい触媒機構を実験的裏付けの下に提案することが出来た⁹⁾。勿論、この被覆率増加は、前節のアノード触媒の項で述べた下地合金によるPtスキンの電子構造修飾によりもたらされるものである。



白金-卑金属合金が、電子構造修飾によりアノード、カソードいずれにも有効に機能することは大変興味深い。

2.3 高分散実用触媒の合成と評価

このような新概念触媒を実用化へ結びつけるためには、任意組成の合金をカーボン担体に高分散担持させる方法を確立しなければならない。我々は最近、ナノカプセル中で合金担持触媒を調製する新規な方法を開発した(図8)¹¹⁾。界面活性剤が形成する逆ミセル(ナノ空間)内で

原料金属イオンが還元されるため、組成と粒径が制御された合金をカーボン担体上に均一かつ高分散担持することができる(図9)¹²⁾。この手法は任意の多成分合金ナノ触媒・微粒子の合成に適用でき、その応用範囲は広い。高分散担持触媒においても、平板電極と同様に合金化によ

るORR活性の向上、耐CO被毒効果が認められた。また、本法で合成した高分散触媒は、従来法の触媒に比較して、より高い耐食性を示すことが認められる¹³⁾。均一粒径、均一組成であることが、この特徴に繋がっていると思われる。今後更に安定な組み合わせの合金を探索し、高温まで使用可能な実用触媒に関する設計指針を明らかにしたいと考えている。

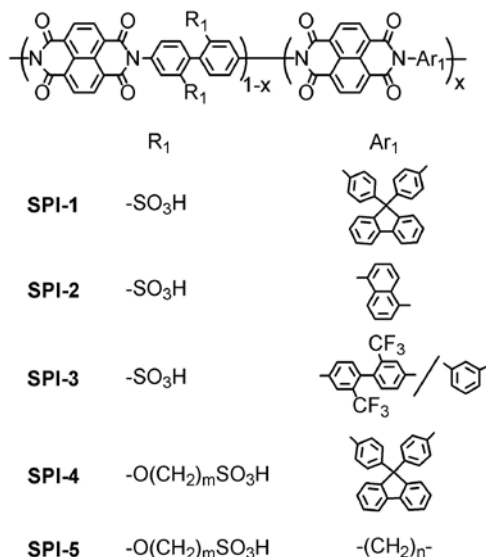


図8 ポリイミド系電解質(SPI-1～5)の分子構造

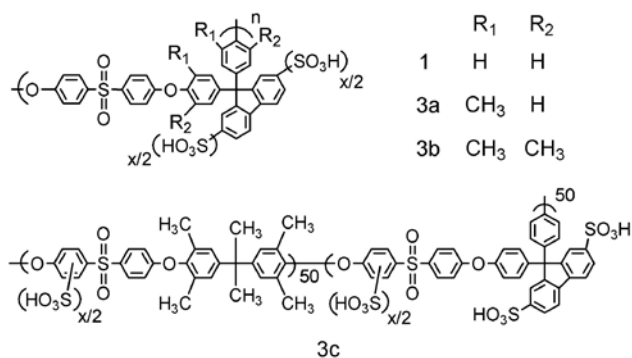


図9 ポリエーテル系電解質の分子構造

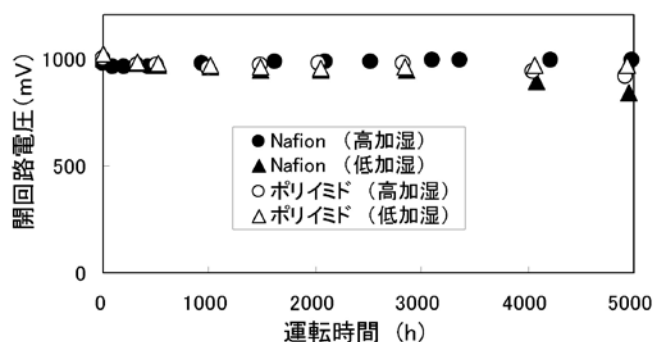


図10 SPI-1～5およびNafion 112膜を使ったPEFC長期運転試験

3. 電解質膜

PEFCに用いられる高分子電解質膜には、プロトン導電性(0.01S cm⁻¹以上)、化学・熱・機械安定性(分解や破断が起こらないこと)、燃料・酸化剤不透過性(水素、酸素およびメタノール水溶液の透過が少ないこと)、を満たすことが要求される。さらに実用化の観点からは、リサイクル性(または環境調和性)、低コスト(3000円/m²以下)、も重要な要求項目として挙げられる。しかし、これら全てを満足に満たす膜材料はない。現在、食塩電解用隔膜として開発されたパーフルオロスルホン酸高分子電解質膜(デュポン社のNafionなど)が最も一般的に用いられているが、フッ素を含まない代替膜に対して大きな期待が寄せられている。我々は芳香族炭化水素系高分子(ポリイミド^{14f,15)}、ポリエーテル^{14c,14h)}を主骨格に用い、疎水基の立体・電子効果を制御することにより、導電性と安定性を併せ持つ代替膜の開発に成功した(図8, 9)^{14a-14i)}。例えば、フルオレニル基を導入したポリイミド(SPI-1)では100℃以上でも膜中に水分子を保持することができ、高分子電解質膜におけるプロトン導電率の世界最高値(1.7 S cm⁻¹)を達成した。炭化水素系電解質の欠点とされてきた耐久性や低湿度での性能も、大幅に改善できる分子構造(SPI-5, SPE-3)が明らかとなってきた。これら新型膜を用いた燃料電池試験では5000時間に亘る安定な連続運転に成功し(図10)^{15,16)}、また高温低加湿下で作動可能な電解質の可能性を示した¹⁷⁾。非フッ素系代替膜の実用可能性を示せたものと考えている。

4. 水素製造・精製触媒

PEFCへ供給する水素を製造する方法は幾つかあるが、我が国の現状や技術完成度の点から天然ガスの水蒸気改質が最も現実的である。これは、メタンと水蒸気から、水素とCO、CO₂を生成させる反応である。触媒として主にニッケルが用いられるが、炭素析出を抑制するために過剰の水蒸気(S/C(水蒸気/メタン比)>3.5)を必要とする。

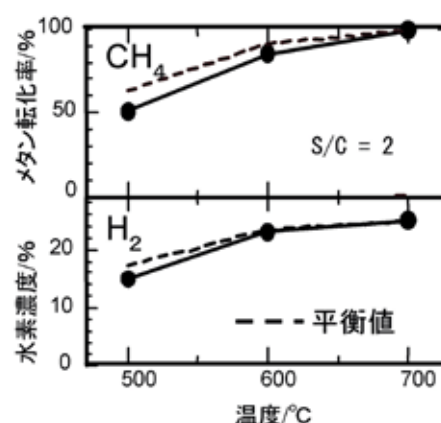
我々は、水素製造触媒の新規な製造法として噴霧常圧プラズマ合成法を開発した¹⁸⁾。触媒原料を分子レベルで混合した微細液滴を、プラズマで瞬時に熱分解して微粒子を得る方法であり、均一な組成と粒径を持つ触媒を短時間で定量的に合成することができる。この方法で得られたニッケル/アルミナ触媒のメタン水蒸気改質活性を図11に示す。S/C=2、反応温度600℃ではほぼ平衡値に達し

ており、従来触媒に比べ低S/C化かつ約100℃の低温化が達成できた。炭素析出も認められず、極めて高活性であることが示された。

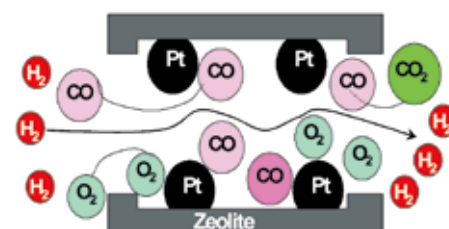
改質水素中に含まれるCOを除去する水素精製触媒として、ゼオライト担体に担持した新規な触媒を開発した(図12)¹⁹⁾。1ナノメートルレベルの規則細孔中に活性成分が担持されており、この細孔中にCOと酸素が濃縮される。このため、水素は酸化されずにCOのみが選択的に酸化される画期的な触媒活性が認められた²⁰⁾。上記アノード触媒で得られた知見を応用してPt-Fe合金を担持すると、ほぼ100%の選択性と反応性を達成できた²¹⁾。更に、実用化を考慮してハニカム担体にコートした触媒を用いた連続運転試験では、出口CO濃度を10ppm以下に低減できることを実証した(図13)²²⁾。現在、関連企業とも連携しながら、容積出力特性が世界最高的小型改質器を試作し、その性能を評価している。

5. おわりに

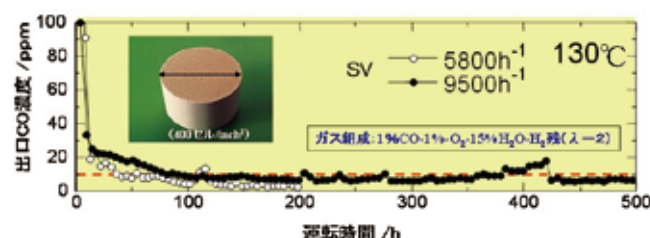
以上、燃料電池の原理と、新材料の可能性例について簡単に述べた。全体的解説としては、文献欄のによる解説(23-26)を参照いただきたい。紙面の都合上割愛したが、この他にも、セパレータ、電解質膜とガス拡散電極の接合体、各種構成部材のシステム化、電池の積層(スタック)化、などにおいて本格的実用化に向けた次世代燃料電池の課題が少なからず残されている。将来の地球環境を守るためには、2050年時点で全世界のCO₂排出量を1990年のそれから半減する事が必須となった。燃料電池自動車や家庭用燃料電池コジェネレーションシステムは、この課題解決の重要手段の一つである。後世の子孫のためにも、中国やインドなどのアジア諸国の将来の経済発展を引き続き可能とするためにも、これらの広汎な普及に向け、今後、国際的協力の下に研究開発を加速させなければならない。



◎図11 プラズマ合成触媒の水蒸気改質活



◎図12 CO選択酸化触媒の設計概念



◎図13 ハニカム担持Pt-Fe/ゼオライト触媒のCO選択酸化特性

参考文献

- (a) 渡辺政広, 鈴木 喬, 本尾 哲, 電気化学, 38, 927-932(1970); (b) M. Watanabe, and S. Motoo *J. Electroanal. Chem.*, 60, 267-273(1975); *ibid.* 60, 275-283(1975); (c) 渡辺政広, 本尾 哲, 電気化学, 44, 602-607(1976); (d) M. Watanabe, M. Uchida, and S. Motoo, *J. Electroanal. Chem.*, 229, 395-406 (1987).
- (a) M. Watanabe, H. Igarashi, and T. Fujino, *Electrochemistry*, 67, 1194-1196 (1999), (b) M. Watanabe, Y. Zhu, H. Igarashi, and H. Uchida, *Electrochemistry*, 68, 244-251 (2000), (c) H. Igarashi, T. Fujino, Y. Zhu, H. Uchida, and M. Watanabe, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 3, 306-314 (2001).
- H. Uchida, H. Ozuka, and M. Watanabe, *Electrochim. Acta*, 47, 3629-3636 (2002).
- L. Wan, T. Moriyama, M. Ito, H. Uchida, and M. Watanabe, *Chem. Commun.*, 2002, 58-59 (2002).
- M. Wakisaka, S. Mitsui, Y. Hirose, K. Kawashima, H. Uchida, and M. Watanabe, *J. Phys. Chem. B*, 110, 23489-23496 (2006).
- (a) G. F. Cabeza, P. Légaré, and N. J. Castellani, *Surf. Sci.*, 465, 286 (2000); (b) M. L. Shek, P. M. Stefan, C. Binns, I. Lindau, and W. E. Spicer, *Surf. Sci.*, 115, L81 (1982); (c) K. Dücker, H. P. Bonzel, and D. A. Wesner, *Surf. Sci.*, 166, 141 (1986).
- (a) T. Toda, H. Igarashi, and M. Watanabe, *J. Electrochem. Soc.*, 145, 4185 (1998); (b) T. Toda, H. Igarashi, and M. Watanabe, *J. Electroanal. Chem.*, 460, 258 (1999); (c) T. Toda, H. Igarashi, H. Uchida, and M. Watanabe, *J. Electrochem. Soc.* 146, 3750 (1999).
- N. Wakabayashi, M. Takeichi, H. Uchida, and M. Watanabe, *J. Phys. Chem. B*, 109, 5836-5841 (2005).
- M. Wakisaka, H. Suzuki, S. Mitsui, H. Uchida, M. Watanabe, *J. Phys. Chem. C*, 112, 2750-2755 (2008).
- E. Yeager, M. Razaq, D. Gervasio, A. Razaq, and D. Tryk, "Structural Effects in Electrocatalysis and Oxygen Electrochemistry", D. Scherson, D. Tryk, M. Darou, and X. Xing, ed., PV 92-11, p 440, The Electrochemical Society: Pennington, NJ, 1992.

11. H. Yano, E. Higuchi, H. Uchida, and M. Watanabe, *J. Phys. Chem. B*, **110**, 16544-16549 (2006).
12. H. Yano, M. Kataoka, H. Yamashita, H. Uchida, and M. Watanabe, *Langmuir*, **23**, 6438-6445 (2007).
13. H. Yano, J. M. Song, H. Uchida, and M. Watanabe, *J. Phys. Chem. C*, **112**, 8372-8380 (2008).
14. (a) K. Miyatake, H. Zhou, H. Uchida, and M. Watanabe, *Chem. Commun.*, 2003 (No.3), 368-369 (2003); (b) K. Miyatake, N. Asano, and M. Watanabe, *Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry*, **41**, 3901-3907 (2003); (c) K. Miyatake, Y. Chikashige, and M. Watanabe, *Macromolecules*, **36**, 9691-9693 (2003); (d) K. Miyatake, H. Zhou, and M. Watanabe, *Macromolecules*, **37**, 4956-4960 (2004); (e) K. Miyatake, H. Zhou, T. Matsuo, H. Uchida, and M. Watanabe, *Macromolecules*, **37**, 4961-4966 (2004); (f) N. Asano, K. Miyatake, and M. Watanabe, *Chem. Mater.*, **16**, 2841-2843 (2004); (g) K. Miyatake and M. Watanabe, *Electrochemistry*, **73**, 12-19 (2005); (h) Y. Chikashige, Y. Chikyu, K. Miyatake and M. Watanabe, *Macromolecules*, **38**, 7121-7126 (2005); (i) K. Miyatake, and M. Watanabe, *J. Mater. Chem.*, **16**, 4465-4467 (2006).
15. N. Asano, M. Aoki, S. Suzuki, K. Miyatake, H. Uchida, and M. Watanabe, *J. Am. Chem. Soc.*, **128**, 1762-1769 (2006).
16. K. Miyatake, Y. Chikashige, E. Higuchi, and M. Watanabe, *J. Am. Chem. Soc.*, **129**, 3879-3887 (2007).
17. K. Miyatake, T. Tombe, Y. Chikashige, H. Uchida, and M. Watanabe, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **46**, 6646-6649 (2007).
18. M. Watanabe, H. Yamashita, X. Chen, J. Yamanaka, M. Kotobuki, H. Suzuki, and H. Uchida, *Appl. Catal.*, **B**, **71**, 237-245 (2007).
19. (a) H. Igarashi, H. Uchida, M. Suzuki, Y. Sasaki, and M. Watanabe, *Applied Catalysis A*, **159**, 159-169 (1997); M. Watanabe, H. Uchida, K. Ohkubo, and H. Igarashi, *Applied Catalysis B: Environmental*, **46**, 595-600 (2003).
20. (a) M. Kotobuki, A. Watanabe, H. Uchida, Hisao Yamashita, and M. Watanabe, *J. Catal.*, **236**, 262-269 (2005); (b) M. Kotobuki, T. Shido, M. Tada, H. Uchida, H. Yamashita, Y. Iwasawa, and M. Watanabe, *Catalysis Letters*, **103**, 263-269 (2005).
21. (a) M. Kotobuki, A. Watanabe, H. Uchida, H. Yamashita, M. Watanabe, *Appl. Catal. A*, **307**, 275-283 (2006); (b) M. Watanabe, H. Yamashita, X. Chen, J. Yamanaka, M. Kotobuki, H. Suzuki, and H. Uchida, *Appl. Catal.*, **B**, **71**, 237-245 (2007).
22. N. Maeda, T. Matsushima, H. Uchida, H. Yamashita, and M. Watanabe, *Appl. Catal. A, General.*, **341**, 93-97 (2008).
23. 渡辺政廣、燃料電池、丸善、2005.
24. 渡辺政廣、燃料電池と高分子、共立出版、2005.
25. *Fuel Cell Handbook*, W. Vielstich, A. Lamm, H. A. Gasteiger, ed., Wiley-VCH (2003).
26. *Catalysis and Electrocatalysis of Nanoparticle Surfaces*, A. Wieckowski, E. R. Savinova, C. G. Vayenas, ed., Marcel Dekker (2003).

実用化バイオマス転換プロセスの研究開発

●Profile●



坂西 欣也 さかにし・きんや ●(独)産業技術総合研究所・バイオマス研究センター長

最終学歴：九州大学総合理工学研究科分子工学専攻修士課程修了（1985年）。1985年九州大学助手、工学博士取得（1989年九州大学）。1999年資源環境技術総合研究所・主任研究官。2001年産業技術総合研究所・エネルギー利用研究部門・主任研究員。2005年6月循環バイオマスラボ長、2005年10月バイオマス研究センター長。2007年4月アジアバイオマスエネルギー研究コア代表併任。広島大学客員教授兼務。現在に至る。専門分野 バイオマス転換化学、石油精製化学、石炭転換化学、炭素材料化学、触媒化学。主な著書：「トコトンやさしいバイオエタノールの本」日刊工業新聞社（2008）ほか。1993年5月 石油学会奨励賞受賞、1998年2月 日本エネルギー学会進歩賞受賞

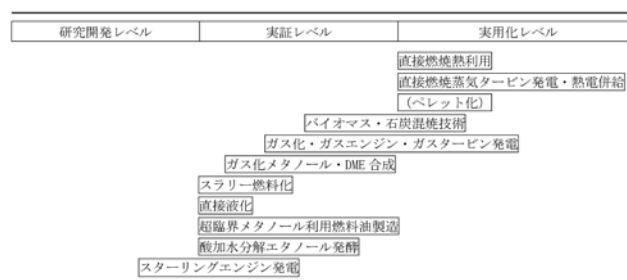
1. はじめに

バイオマスのエネルギー利用については、第一に石炭、石油、天然ガス等を代替することによって化石資源の使用量を削減し、炭酸ガス排出量を低減することで地球温暖化防止に貢献することが重要である。バイオマス資源は、カーボンニュートラルであるものの、無制約で使用できる量がある訳ではなく、あくまでも未利用のエネルギー源としての用途開発により化石資源の節約を図るべきである。

大量の炭酸ガスを排出する石炭火力発電所において木質バイオマスを混焼する場合、木質バイオマスのエネルギー利用のメリットを最大限に発揮し、デメリットを最小限にとどめるためのビジョンを策定することが、最も重要であると考えられる。大規模火力発電所で主として用いられている石炭は、燃料としての価格は安いものの、化石資源の中で最もCO₂排出量が多く、しかもSO_x、NO_xのみならず、煤塵、微量有害金属の排出が危惧されていることから、その低環境負荷利用法の開発が進められており、既に石炭税が導入され、その利用に関わる環境コストが上昇している。

また、オンサイト型エネルギー変換利用する場合は、バイオマス発生量が10dry-t/d前後であることから、この規模のエネルギー変換方式として現時点で有力視されているのは、1) 木質バイオマスの直接燃焼による熱供給、2) 木質バイオマスの直接燃焼による蒸気タービン発電と熱供給、3) 固定床ガス化炉とガスエンジンによる発電と熱供給である。これらのうち、1) および2) については既に技術開発が終わっており、導入・普及レベルにあり、③については国内外でさまざまな技術開発が進められつつあり、実証レベルにあると考えられる。これらの技術を含め、木質バイオマスのエネルギー変換技術について、現状を図1に整理している¹⁾。

大規模集中型の利用促進には、国家的コンセンサス、あるいは世界情勢に基づいた日本としての戦略的導入シナリオ、ならびに変換プロセス開発が不可欠である。これは、決して短期的なビジョンにとどまらず、日本におけるエネルギー需要見通しと地球環境保全（温暖化対策



◎図1 木質バイオマスのエネルギー変換プロセス

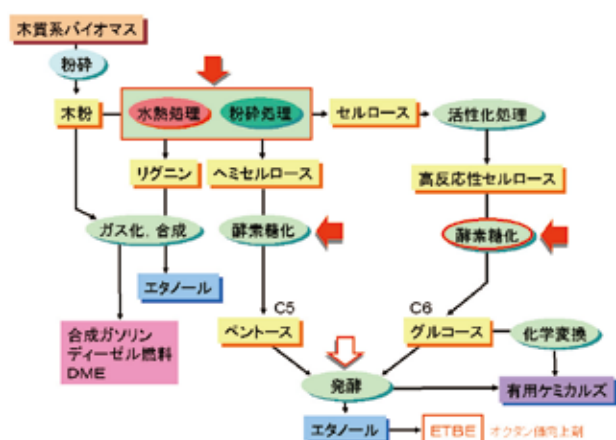
を含む) 目標に基づいた、21世紀の炭化水素系エネルギー資源の安定供給を可能にするバイオマス全体の高効率利用プログラムを策定し、今後の研究開発の優先順位を決定しておく必要があることを意味する。長期ビジョン（2050年頃を目標とする。例えば、海外、特に東南アジア地域からのバイオマス輸入も含めたトータルシステムの提案）を念頭に置いたバイオマス利用の促進シナリオも想定しておく必要があろう。

また、バイオマスエタノールやバイオディーゼル燃料(BDF)に代表されるバイオマス由来の液体燃料の製造技術は、世界のエネルギー消費の大部を占め、かつ日本は政治・経済的に不安定な中東地域への依存度が90%近くあることから、石油代替エネルギー開発の観点からも非常に重要である。特に、自動車燃料の大半を賄っているガソリン燃料へのエタノール添加、いわゆるE10、E5、あるいはE3（それぞれエタノール10、5、3%添加）によって、輸送用燃料から排出されるCO₂の削減に大きく貢献できると期待される。例えば、日本で年間約6000万kl／年消費されているガソリンにE10を実施すると仮定すると、日本のCO₂排出量が1%低減できると試算されている。BDFについても、日本で回収される廃食用油のみならず、植物由来の菜種油やパーム油、Jatropha油等の利用によりその生産量を確保することによって、B5（5%）のディーゼル燃料を代替する見通しが示されている。

2. 産総研のバイオマスエネルギー研究開発

産総研・バイオマス研究センターでは、バイオマス

資源の中で最も炭酸ガス固定化能の高い木質系バイオマスからのエタノール・ETBE(Ethyl Tertiary-Butyl Ether)製造、ならびにガス化・ホットガスクリーニング・FT(Fischer-Tropsch)合成・水素化分解からなるBTL(Biomass To Liquids)トータルシステム開発によるBTL-FTディーゼル燃料製造技術の開発を重点課題(図3参照)とし、さらにバイオマスからのクリーン燃料製造プロセスのシミュレーションによるシステム評価を行うことにより、石油を中心とする化石資源代替を促進し、かつ循環型エネルギー社会の構築に貢献できるバイオマス転換プロセスの実証を目指している。



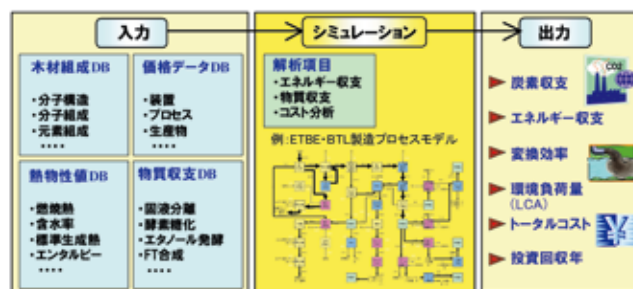
◎図2 産総研・バイオマス研究センターの研究概略スキーム

木質系バイオマスの主要な構成成分はセルロース、ヘミセルロース及びリグニンである。木質系バイオマスからエタノール等液体燃料を製造するためには、セルロースやヘミセルロースを構成単糖にまで加水分解（糖化）し、発酵によってエタノールに変換する必要がある。従来、木質の糖化では硫酸法が用いられていたが、環境負荷が高く収率が向上しないという課題があり、低環境負荷・高収率が期待できる酵素糖化法によるエタノール製造技術の確立を目指している。木質系バイオマスを酵素糖化するためには、木質の前処理技術が重要で、100℃以上の加圧熱水を用いた水熱処理およびメカノケミカル処理を複合化することにより、木質構成成分を分離して、低コスト・高効率での木質の活性化技術について研究開発を行っている。メカノケミカル処理した木質では、酵素糖化性が大きく向上する。酵素糖化法で得られた単糖は、セルロース由来のグルコースおよびヘミセルロース由来のキシロース等から構成されるが、エタノール発酵に用いられる微生物は通常キシロースをエタノールに変換できない。木質系バイオマスからのエタノール製造の高収率化を目指し、酵素糖化に最適な条件下、木質前処理物の糖化および生成したキシロースとグルコースの発酵が同一槽内で行える高温エタノール発酵微生物の育種

を行い、さらにエタノール吸着剤を用いて発酵中のエタノールを連続的に回収する、産総研独自の発酵リアクターの研究開発を行っている。また、海外バイオマスの日本への輸送を目指し、嵩高いバイオマス原料を産地で輸送用燃料に製造するBTLプロセス研究開発を行っている。

関連する技術開発として、バイオマスのガス化により得られた合成ガスからのメタノールやジメチルエーテル製造についての検証がなされてきている。

さらに、種々のバイオマス資源の導入・普及には、経済的に成り立つトータルシステムの構築が重要である。従って、種々のバイオマス資源をデータベース化し、バイオマスシステムのプロセスシミュレーション技術を開発するとともに、シミュレータを用いた最適化と経済性・環境適合性評価を行うことにより実用化可能なバイオマストータルシステムを提案している（図3参照）。



◎図3 バイオマスシステム評価シミュレーション技術

また、国内の地産地消型およびバイオマスアジア国際展開を含む循環型新産業のためのバイオマス全利用システムを図4に示している。このような国内外のバイオマスのトータルシステムの構築は、国産のバイオマス資源の高度有効利用を可能にし、農工連携に基づいた自然との共生とともに、日本の化石資源への依存度を低減しながら、アジアのエネルギー安定供給と地球環境保全を実現するための方策を提供すると期待される。



◎図4 循環型新産業のためのバイオマス全利用システム

終わりに

京都議定書の発効を受けて、より一層の炭酸ガス削減が求められており、カーボンニュートラルのバイオマス由来の新燃料を導入することによって石油、石炭、天然ガス等の化石資源を代替する要請が高まっている。バイオマス資源は、未利用の木質系を中心に草本系の天然バイオマスや、農産廃棄物系、古紙、生ごみ、汚泥等の廃棄物系バイオマスに大別され、各地域で分散して存在するため、その効率の良い収集・運搬システムの構築も重

要である。

このようなバイオマス資源をエタノールやBDF、DME等の輸送用燃料に変換して利用することは、山間部を含む地域分散型のエネルギー供給システムを確立する上でも非常に重要である。また、このような取り組みは、単に日本だけの問題ではなく、アジア諸国や世界に共通する地球規模の重要な課題であることから、日本のバイオ燃料製造技術に関する研究開発や技術援助を通じて、このような地球環境問題の解決に資することが期待される。

引用文献

-
- 1) 吉岡拓如、平田悟史、松村幸彦、坂西欣也、エネルギー学会誌、81(4), 241 (2002).
-

日中太陽電池産業の現状および展望

•Profile•



丸川 知雄 まるかわ・ともお ●東京大学社会科学研究所 教授

1964年生まれ。東京大学社会科学研究所教授

1987年東京大学経済学部卒業 1987～2001年アジア経済研究所勤務 2001年～現在 東京大学社会科学研究所勤務

著書：『現代中国の産業』（中公新書、2007年）、『労働市場の地殻変動』（名古屋大学出版会、2002年）、『市場発生ダイナミクス』（アジア経済研究所、1999年）、編著として『中国発・多国籍企業』（同友館、2008年）などがある。

1. 太陽電池産業における日中逆転

アメリカのオバマ政権は今後太陽光や風力など再生可能なエネルギーに集中投資することによって将来500万人の雇用を生み出す方針を打ち出し、今回の景気対策のなかにも環境関連の投資が盛り込まれた。日本政府も環境省が「日本版グリーン・ニューディール」を提唱し、経済産業省は太陽光発電への補助を再開するなど太陽電池の普及に再び力を入れる姿勢を見せている。ヨーロッパではドイツやスペインで太陽光発電によって発生した電力を電力会社が高価で買い取る制度によって急速な勢いで太陽電池が普及している。先進各国で太陽光発電装置を普及させるための政策が強力に推進されようという動きが広まるなか、これまで太陽電池の生産と開発で世界をリードしてきた日本の電機メーカーのビジネスチャンスは大きく広がるはず、であった。

ところが、チャンスを前に大きくアクセルを踏み込んだのは日本のメーカーではなくて中国のメーカーだった。表1に見るように、2006年まで世界の太陽電池生産のトップを走ってきたのは日本で、中国との差は大きいように思われたが、2007年に中国が一気に生産量を2.5倍に拡大して日本を抜き去り、世界最大の太陽電池生産国になったのである。一方、日本は主要生産国のなかで唯一減産している。中国はなぜ急成長し、日本はなぜチャンスを前に減産してしまったのだろうか。

(単位：MW)

	2006	2007
日本	926.9	920.0
ドイツ	508.0	810.0
中国	438.0	1088.0
アメリカ	179.6	266.1
台湾	169.5	368.0
その他	339.2	548.0
合計	2561.2	4000.1

◎表1 世界の主要な太陽電池生産国

(出所) 中国可再生能源発展項目弁公室(2008)

2. 日中の太陽電池メーカーの比較

日中逆転の理由を解くカギは日中の太陽電池メーカーの構造にある。日本の太陽電池メーカーは表2に見るとおり、シャープ、京セラ、三洋電機、三菱電機の4社で、この他にカネカ、三菱重工業、昭和シェル石油などの新規参入組がある。日本の大手4社に共通しているのは、いずれも1960～70年代からの長い研究開発と生産の歴史を有すること、また新規参入組も含め、日本の場合どの会社も太陽電池を多角的な事業の一つとして取り組んでいる。一方、中国のメーカーは、2008年にシャープを抜いて世界第2位になったと見られる尚徳電力（サンテック）をはじめ、どの会社も2000年以降に設立された新興メーカーであり、どの会社も太陽電池専業である。ちなみに2007年にシャープを抜いて世界1位になったドイツのQセルズも新興の太陽電池専業メーカーである。

専業であるという点が、実は日中の逆転を可能にした一つの条件であった。中国のメーカーは表2に登場する尚徳電力や保定英利をはじめ、全部で10社がアメリカのNASDAQなどに株を上場しており、太陽電池産業の将来に対する投資家の期待を集めて多額の資金を調達することに成功した。最近の太陽電池生産は技術の勝負というよりも、投資額と原料調達の勝負になっている。かつて世界を圧倒していた日本の半導体産業は、韓国企業との規模拡大競争に敗れて総崩れとなったが、いま日本と中国の間で起きていることもその経験を思い出させる。ただ、財閥の総力を挙げて日本に挑んできたかつての韓国半導体産業と異なり、中国メーカーやQセルズはグローバルな投資家たちの期待を追い風に規模を拡大している。

それに対して、日本の各メーカーは太陽電池を一事業部として営んでいるので、投資家の目から見れば総合電機メーカーが抱える他の成熟分野と一緒にになってしまい、たとえ太陽電池への期待だけからこれらの企業の株を買うわけにはいかない。表2を見ても、毎年一定の予算を獲得して等差数列的に生産を拡張していく日本メーカーと、利益や新株発行で獲得した資金を拡大投資に注ぐことで毎年2倍といった等比数列的の拡大をする中国や

◎表2 世界の太陽電池メーカーの生産国

	(単位: MW)							
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Q-Cells(独)		9	28	76	166	253	389	570
シャープ(日)	75	123	198	324	428	434	363	
尚徳電力(中)		1	6	29	68	153	327	498
京セラ(日)	54		72	105	142	180	207	
Firstsolar(米独)						60	207	
Motech(台)					60	110	196	
三洋電機(日)			35	65	125	155	165	
SunPower(米)						62.7	150	
保定英利(中)						35	143	
三菱電機(日)			40	75	100	111	121	
Isofoton(西)					53		85	
SchottSolar(米独)					82	96	80	
計	0		742	1194	1727	2561	4000	

(出所)『日経ビジネス』2008年2月18日、『太陽電池産業総覧2007』、『朝日新聞』2007年9月1日、Q-Cellsホームページ、Suntechホームページなど

その他のメーカーとの対比が鮮明である。

特に2007年に太陽電池需要がドイツやスペインで盛り上がるなか、シャープがひとり減産してしまったのは太陽電池の原料となる多結晶シリコンの確保に失敗したからだと言われている。太陽電池は、製法はICとほぼ同じで、高純度の多結晶シリコンに少量の不純物を入れて作る。ただ、シリコンの純度はICほど高くなくてよいので、従来はIC用に作られた多結晶シリコンの不良品を回してもらっていたが、太陽電池の需要が急増したためそれだけでは足りなくなり、最初から太陽電池用に多結晶シリコンを作る必要が出てきた。ところが、多結晶シリコンを作る工場を建てるには巨額の投資が必要なのですぐには増産できず、多結晶シリコンの品薄状態が起こった。尚徳電力などは資金力を生かして10年先まで予約してしまうなどシリコンの確保に急ぐ一方、シャープなど日本メーカーの動きは鈍かったため、2007年は原料不足で工場を十分に稼働できなくなってしまった。

3. 厚みを増す中国の太陽電池産業

新興の中国メーカーが台頭したもう一つの背景は、太陽電池の生産技術が設備に一体化されるようになり、設備メーカーからひと揃いの製造ラインを買えば比較的簡単に生産できるようになったことである。それゆえに設立されて数年の新興メーカーが、30～40年の研究開発の歴史を持つ日本勢にいと簡単に追いつくことができた。

だが、中国の太陽電池産業が侮れないのは、産業の上流から下流までが中国国内に整いつつあることである。表2に示した尚徳電力や保定英利は、結晶シリコンの円盤(ウエハー)に不純物を入れることで光が当たると発電する「セル」を作る「セル工程」を担う企業である。これを担う企業が中国にはすでに50社以上ある。セルにラミネート加工を施したり、アルミのフレームをつけて屋根などに設置可能な形にする工程が「モジュール工程」であるが、この工程を担う企業は中国に200社以上と推定され、2007年には1717MWの太陽電池を生産した。表1に示したセルの生産量よりだいぶ多く、これは中国にセ

ルを輸入してモジュールを組み立てている企業がかなり多いことを意味している。

さらにシリコンの多結晶から円盤を作る工程には70社以上の企業が参入し、中国国内で必要な量を賄える。中国が弱いのは多結晶シリコンを作る工程で、この工程を持っているのは世界でも日本やアメリカなど10社程度に限られている。だが、この分野へもすでに50社以上の中国企業が参入を表明している。これらが生産を開始すれば、中国の世界最大の太陽電池生産国としての地位は盤石のものとなるだろう。

また、以上からわかるように、中国の太陽電池産業には各工程にきわめて多数の企業が参入しており、4社の寡占になっている日本と好対照を見せている。中国では、メーカーの多くが民間資本によって設立された新興企業で、何人もの「太陽電池富豪」が生まれている。大企業のサラリーマンによって担われている日本とは違って、中国の太陽電池産業は若き企業家たちの利潤動機に突き動かされて発展している。

4. 太陽電池の将来

今後、日中の太陽電池産業はどのような経路で発展していくだろうか。まず、現在の技術を所与とすれば、グローバルな資金を動員する力や、企業家たちの意気込みなどから見て、日本が太陽電池の生産規模で中国を再逆転する可能性はほとんどないといってよい。ただ、太陽電池にはまだまだ技術進歩の余地が大きく、その趨勢によっては日本の再逆転の可能性も残っている。

そもそも現在の太陽電池は10～20年間発電を続けることによってはじめて初期投資が回収できるというものであるが、果たしてそれだけの期間、発電効率を落とさずに稼働し続けることができるかどうかはその時が来てみなければわからないのである。日本側からは、中国メーカー製太陽電池にそれほどの耐久性はないだろう、という声も聞かれるし、そう言っている日本メーカーの製品だって保証期間は10年しかない。

さらに、日本メーカーの多くが開発に取り組んでいる薄膜型太陽電池や有機化合物を用いた太陽電池などの変換効率が向上すれば、中国メーカーのように大量の多結晶シリコンを確保しなくても太陽電池が作れるようになる。そうすると競争の焦点は、資金にものを言わせた原料確保の勝負から、再び技術開発力の勝負になり、日本企業の強みを発揮しやすくなるかもしれない。

さらに、各国政府が今後どのような太陽光発電振興策を打ち出すかによっても勝敗の帰趨は左右されるだろう。例えばアメリカのオバマ政権は太陽光発電の推進による雇用創出を目指しており、そうするとアメリカ企業か、少なくともアメリカに工場を持つ企業が有利になるような政策が打ち出されるはずである。

一方、日本政府は露骨に日本企業を優遇するような政

策は採らないだろうが、もともと日本市場では日本の大手4社が販売の99%を占めるなど、日本企業にとっては盤石のホームグラウンドなので、日本市場が再び拡大に転ずれば日本企業に有利に働くだろう。もっとも、尚徳電力は2006年に日本の中小太陽電池メーカー、MSKを買収したのを手がかりとして、最近日本での販売拡大策を発表しており、日本市場への攻勢を強めようとしている。そうした競争圧力が日本でのいっそうの価格低下と普及拡大につながる事が期待される。

中国国内での太陽電池導入量は2007年にわずか20MWにとどまっており、1088MW生産した太陽電池の大半を

ヨーロッパなどに輸出している。中国はエネルギー利用効率が低く、太陽光発電などの自然エネルギーに投資するよりも、当面は省エネ投資を進めたほうがはるかに効率的に二酸化炭素排出を削減できるため、当面は先進国のような大市場になることはないだろうが、将来大市場になる可能性は高い。

世界的に太陽電池需要が拡大するなか、日本の技術力を生かせるチャンスは大きいはずだが、日本では太陽電池生産が大企業の一事業部として行われているため成長速度が鈍い。世界の投資家たちの期待の風を帆に受けられるような態勢を日本も作る必要がある。

参考文献

産業タイムズ社(2007)『太陽電池産業総覧2007』産業タイムズ社
日経マイクロデバイス／日経エレクトロニクス編『太陽電池2008/2009 急拡大する市場と新技術』日経BP社、2008年
中国可再生能源発展項目弁公室(2008)『中国光伏産業発展研究報告(2006-2007)』中国可再生能源発展項目



原子力の開発及び利用

はじめに

現在の中国は、地球温暖化防止のために二酸化炭素排出量を削減することと経済成長を持続的に達成するというベクトルの異なる困難な課題に直面しています。2006年の段階で中国における二酸化炭素の排出量は60億トン、世界全体の総排出量の20パーセント強を占め、すでに世界最大の二酸化炭素排出国となりました。一方、中国自身の技術革新の取り組みによって、二酸化炭素排出の削減量が2006年ではアメリカを抑えて世界最大となっているとの報道もあります。そうした状況を踏まえ、07年10月15日に開催された中国共産党第17回全国代表大会では「生態文明」という観点が打ち出されました。

「生態文明を建設し、省エネと環境にやさしい産業構造、発展パターン、消費モデルを基本的に形成すること」、というのがその趣旨です。このため、二酸化炭素の排出量を抑えつつ経済発展を持続的に成長させる「低炭経済」

(Low Carbon Economy) の建設が非常に重要な課題として検討され、とりわけ科学技術の果たす役割には大きな注目が寄せられているのが現状です。

中国を取り組む上記のような状況を踏まえ、前号では新しい技術革新の様子を「再生可能エネルギー」として

特集いたしました。ひきつづき今号ではエネルギー問題を取り上げますが、従来型の技術の革新として大きな注目を集めている「原子力の開発および利用」についての特集を組むことにいたしました。

原子力の重要性については、たとえば2007年11月15日、「中国政府は、二酸化炭素の排出削減を目指し、原子力発電やクリーンエネルギー産業の発展を積極的に推進している」と、中国核工業集团公司の責任者・康日新氏が、ローマで開催中の第20回世界エネルギー会議(WEC)で述べています。([「チャイナネット」2007年11月16日])。中国政府は、二酸化炭素の排出量削減のため、原子力発電の発展を重要視しています。こうした中国の原子力発電の現況と技術力に関する最新動向について、本号収録の中国人研究者の各論文でお読みいただければと思います。また、日本人研究者の各論文では、日本及び世界の原子力発電をめぐる状況や最新技術の動向などが紹介されています。あわせてお読みいただけましたら幸いです。

中国総合研究センター

世界各国における原子力発電の開発戦略の歩みと 中国における原子力発電の開発

•Profile•



欧陽予 Ouyang Yu ●中国原子力工業集団会社総設計師 中国科学院院士

原子炉と原子力発電の専門家。現在、中国原子力工業集団会社科学技術委員会と中国広東原子力発電集団会社科学技術委員会の高級顧問、原子力工業第二設計研究院と上海原子力工程研究設計院の高級顧問、国務院原子力発電自主開発事業指導小委員会の専門家チームリーダー、および国家環境保護部原子力安全・環境専門家委員会の副主席を務めている。1927年7月26日に四川省楽山で出生。1957年にソ連モスクワ動力学院研究生部を卒業、技術科学準博士の学位を取得。1991年、中国科学院の院士に選出。2001年、ロシア技術院の外国籍院士に選出。原子力工業第二研究設計院の副技師長、上海原子力工程研究設計院の技師長、秦山原子力発電有限公司の第一副社長、江蘇原子力発電有限公司の技師長、および中国原子力工業総会科学技術委員会の副主任を歴任。原子炉、原子力利用、原子力発電、原子力の安全などに関する論文50編余りを発表。専門的な著作としては、『原子炉と原子力発電』、『秦山原子力発電所』、『秦山原子力発電プロジェクト』、『原子力利用の意義と展望』、『原子力——無窮のエネルギー』、『技師の鍛練と成長を語る』など。

概要：

本稿では次の事項について概要を述べる。

- ・ 原子力発電の開発を図る世界主要国の技術路線、開発戦略の歩み、経験および教訓。
- ・ 現在の世界における原子力発電の開発動向と展望。
- ・ 中国の原子力発電中長期計画の目標と任務。
- ・ 中国の原子力発電自主開発で得られた成果。
- ・ 中国の現在の能力、および世界の先進的水準に迫り着くための取り組み。
- ・ 中国における原子力開発の展望。

1 各国による原子力発電開発戦略の歩み、経験および教訓

原子力発電は、すでに世界で50年余り利用されてきた。1950年代、アメリカや旧ソ連といった核保有国は、核軍備競争と同時に原子力発電の開発も競い合っていた。1954年に旧ソ連が電気出力5,000kWの実験用原子力発電施設を建設したが、その原子炉は黒鉛減速加圧水型(黒鉛の減速剤を用い、加圧水を熱媒体、低濃縮ウランを燃料とする)であり、核兵器用プルトニウムを生産する黒鉛減速加圧水型原子炉の技術を基礎にして開発された。1957年にはアメリカが電気出力9万kWの原型炉で原子力発電施設を建設したが、その原子炉は加圧水型(加圧水を減速剤および熱媒体として兼用し、低濃縮ウランを燃料とする)であり、原子力潜水艦で用いる加圧水型原子炉の技術を基礎にして開発された。イギリスも黒鉛減速ガス冷却炉(黒鉛を減速剤、二酸化炭素を熱媒体、天然ウランを燃料とする)を利用して軍用プルトニウムの生産と発電を同時に行うべく、1956年に単機出力4万6,000kWの軍民両用原子力発電ユニット2基を建設している。これらの成果により、原子力を利用した発電は技術的に可能であることが示された。こうした実験用および原型としての原子力発電ユニットは、国際的に第一世代の原子力発電ユニット

と呼ばれている。

1950年代、各国の原子力技術界では、「どのような原子炉が発電に適しているか」という点につき、技術の実行可能性、安全性、経済性などの面から、こぞって研究や選別が行われていた。

アメリカでは、50年代に各種小型実験炉による研究、実験、比較などを行った結果、原子力発電を開発させるための主力炉として、次第に加圧水型および沸騰水型という2種類の軽水炉が選定されてきた。軽水炉は構造がコンパクトで経済性や安全性に優れているうえ、水の技術的特性も熟知されているため、軽水炉の産業化を実現する技術的難易度は高くない。軽水炉では天然ウランを使わず、低濃縮ウランを用いる必要があるが、当時のアメリカは低濃縮ウランに関する技術力があり、その点は問題にならなかった。そして、長年の実践により、アメリカの選択の正しさが証明された。現在のアメリカは原子力発電ユニット104基(加圧水型69基、沸騰水型35基)を運転しており、世界で原子力発電ユニットが最も多い国となっている。

旧ソ連は、1954年に実験用として5,000kWの原子力発電ユニットを建設し、引き続き黒鉛減速加圧水型原子炉の改良と性能向上に取り組んだ。単機出力の向上を図る一方、システムを簡素化して熱媒体も加圧水から沸騰水に転換し、炉心配管内で水の吸熱や沸騰により発生した蒸気でタービンを動かして発電しようとした。旧ソ連は、この技術路線に沿って単機出力100万kWの黒鉛減速沸騰水冷却圧力管型(RBMK)原子力発電ユニットを開発し、国内で計20基を建設している。チェルノブイリ原子力発電所で使っていたものこそ、この種の原子炉である。この種の原子炉は巨大な体積になり、格納容器で原子炉を密閉できない。そのうえに安全設計上の重大な欠陥と誤った運転操作が重なったため、原子炉の爆発と環境への大量の放射性物質放出という1986年のチェルノブイリ事故

が発生し、原子力発電を世界的に発展させるうえで大きな打撃となった。旧ソ連が開発を図っていたもう一つの炉型であるロシア型加圧水型原子炉(旧ソ連では「VVER」と呼ばれていた)は、基本的に欧米で発展を遂げた加圧水型原子炉に似ている。単機出力44万kWのVVER-440に格納容器がないのは安全設計上の欠陥と言えるが、フィンランドへ輸出された2基には格納容器が増設され、今に至るまで問題なく運転されてきた。単機出力100万kWのVVER-1000はすべてに格納容器が設置されており、20基のユニットがロシア、ウクライナ、東ヨーロッパなどで問題なく運転され、かなり成功している。中国の田湾原子力発電所に設置されているのは、VVER-1000の改良型(91型)としてロシアから導入された原子力発電ユニットである。

1950年代初め頃のイギリスは、核大国になることを迫られて軍用プルトニウム生産用の原子炉を急いで建設した。それは天然ウランを燃料として、黒鉛を減速剤とした直接空気冷却の黒鉛減速ガス冷却炉で、ウィンズケールに設置されている。これは非常に粗末なもので、炉心を冷却した空気が直接に大気中へ排出される。また、燃料棒が破損して炉心の冷却空気とともに放射性物質が漏れ、広大な牧草地が汚染される事故を起こしたこともある。それから改良を進めたイギリスは、二酸化炭素ガスで冷却し、マグネシウム合金(Magnox)の燃料被覆管や天然ウランを用いる黒鉛炉を開発し、プルトニウムの生産と原子力発電を同時に行えるようにした(軍民両用炉)。そして、1956年に建設された2基の「コールダーホール型」原子力発電ユニットを基礎にしつつ、60年代から70年代にかけて相次いで同種の原子力発電ユニット26基を建設している。それらの単機出力は最大で60万kWに達する。しかし、イギリスは、軍用プルトニウムが十分に備蓄されたとき、次のことに気付いた。すなわち、その種の原子炉を発電だけのために使うと、発電の熱効率が低くて経済性が劣り、発電コストの面で軽水炉と競争できないうえ、二酸化炭素の漏洩率も大きい。そのため、80年代から今までに18基が次々と運転を停止して閉鎖された。原子力発電の継続的な発展を図るため、イギリスが次に選択したのは「改良型黒鉛減速ガス冷却炉(AGR)」である。これは黒鉛の減速剤、低濃縮ウラン燃料、ステンレス製燃料被覆管および二酸化炭素の熱媒体を用いるもので、70年代から80年代にかけて単機出力約60万kWの14基が相次いで建設された。しかし、長年の運転経験により、この種の原子炉は設備利用率(負荷因子)が通常で60%と著しく低く、経済性の面で劣ることが分かった。そこで、80年代の後半からは再び考え方を変え、アメリカのウェスチングハウス社から電気出力120万kWの加圧水型原子力発電ユニットを導入し、1994年に発電所を完成させて運転してきた。イギリス政府は、それを契機に原子力発電の復興を図ろうとしているが、国内では原子力発電反

対の声も上がっている。その動向は今なお不明確だが、原子力発電を発展させるためイギリスが選んだ技術路線は、決して成功したとは言えない。

1950年代初期のフランスは、イギリスと同じく、核兵器用プルトニウムを生産する必要に迫られて、黒鉛の減速剤、天然ウラン燃料および空気冷却方式を用いる黒鉛減速ガス冷却炉を建設した。さらにプルトニウム生産と発電を同時に行えるユニットも建設したが、その発電量は自らの所内電力すら賄えず、原子力発電施設と呼べるものではない。それに続いて同種の軍民両用原子力発電ユニット4基が建設されている。フランスは、そうした実践を経て、天然ウランを用いる黒鉛減速ガス冷却炉が優れた原子力発電ユニットになり得ないことを悟った。そこで、60年代の末頃にはアメリカのウェスチングハウス社から単機出力90万kW級の加圧水型原子力発電ユニットを導入するよう決定して「高い出発点」を実現し、大量化、標準化および自主開発へ向けた発展の道を歩み始めた。この種のユニットは、フランス国内で34基が稼働中のうえ、8基が海外へ輸出されている。その後、フランスは、原子力発電の経済性を向上させるため、再びアメリカのウェスチングハウス社から単機出力130万kWの原子力発電ユニットを導入することにした(単機出力が大きくなると経済性が良くなる)。フランスでは、現在そのユニット20基が稼働している。また、90万kWユニットと130万kWユニットの自主開発が実現したことを基礎にして、新たな145万kWのN4ユニット4基も独自に設計して完成させた。今のところ、フランスでは原子力による発電量が全国総発電量の76%を占めている。近年、さらにドイツ・シーメンス社との共同で単機出力160万kWの第三世代原子力発電ユニットEPRが設計され、その第1号機がフィンランドに建設された。フランスが選択した原子力発電の技術路線は成功したと言える。

ウラン資源が豊富なカナダは、1950年代から原子力発電の開発に取り組んできた。当時のカナダにはウラン濃縮の技術がなかったため、天然ウランを燃料として重水を減速剤や熱媒体とすることにし、天然ウランを用いるカナダ型重水炉(CANDU)の原子力発電ユニットが建設された。このユニットは、90年代までにカナダ国内で26基が建設され、単機出力が12万5千kWから90万kWに向上したうえ、インド、パキスタン、韓国、ルーマニアおよび中国へ輸出もされている。カナダが自国の状況に合わせて選択した技術路線の方針には見るべきものがあり、CANDUによる原子力発電は経済性に関してもなんとか許容できる。しかし、天然ウランの燃焼率には限度があり、使用済燃料の量が大きいといううえ、重水漏れを防止するには複雑なシステムが必要になるため、CANDUによる原子力発電の将来性は限定的である。カナダでは、新型重水炉による原子力発電プランの研究が進められている。

資源が乏しい日本では、早くも60年頃から原子力発電

に着手したが、当初は少し回り道もしている。ウラン濃縮の問題を回避しようと考え、天然ウランによるコールドホール型黒鉛減速ガス冷却炉の原子力発電ユニットをイギリスから導入した。しかし、完成後に発電を始めてから、この種の原子炉を発電に用いると技術・経済いずれの面でも難があることに気付いた。そこで、ただちに技術路線を変更して、アメリカから沸騰水型原子炉と加圧水型原子炉を導入し、それら2種類を並行して開発することとした。現在は沸騰水型ユニット30基余りと加圧水型ユニット20基余りが稼働しており、その単機出力は30万kWから130万kWである。日本が導入を通じてアメリカの技術を消化吸収し、次第に原子力発電の自主開発を実現してきたことは一応の成功と言えるが、その自主開発の歩みは速くない。

韓国では1970年代から原子力発電の発展を図ってきた。当初は輸入が中心で、カナダから重水型原子炉、アメリカやフランスから加圧水型原子炉をそれぞれ輸入したが、すべて元請の外国メーカーに設計を任せ、韓国自体は一部部品の製造を請負う(図面の提供を受けた加工)だけであった。こうして80年代中頃までに10基のユニットを稼働させてきたが、自主開発の能力はなかった。その点をふまえ韓国政府はフランスのモデルを踏襲しようと決め、国内の設計業者、研究機関、製造業者などを組織して自主開発の戦略を展開した。そして、単機出力100万kWのシステム80加圧水型原子力発電ユニットを導入し、ユニット4基の設計と建設を外国との共同で進めながら技術移転を図り、設計の自主開発と設備の国産化を実現している。現在も新型ユニットの自主開発を進めている。

以上の状況を見ると、原子力発電の発展を図るとき、いずれの国でも、安全性、経済性、高品質および迅速性を確保すべきことが分かる。そして、戦略面では以下のような重要問題に注意する必要がある。

- (1) 技術路線の選択(特に炉型およびその主な特性の選択)が正しいか。
- (2) 標準化、大量化、産業規模の拡大に向けた設計の自主開発と設備の国産化を実現できるか、および絶えまない改良と向上を図る能力のあるか。
- (3) 技術導入と自主開発の関係を正しく処理できるか。
- (4) 着実に実行できる計画と実施措置を定め、統一された目標の下で各方面の力を結集して調和が取れた発展を図れるか。

2 現在の世界における原子力発電の開発動向

1970年代には、石油高騰によるエネルギー危機が原子力発電の開発を促進した。現在、世界で商用運転されている原子力発電ユニット400基余りの大部分は、この時期に建設されたものであり、第二世代の原子力発電ユニットと呼ばれている。

1979年にスリーマイル島事故が起こるまでは、多くの

人々が「原子力は安全でクリーンなエネルギーだ」と考えていた。1979年のスリーマイル島原子力発電所と1986年のチェルノブイリ原子力発電所で重大な事故が起こると、原子力発電事業の進展は低調期に入り、幅広い市民が原子力発電の安全性に疑問を呈して、電力業への投資のペースも落ちた。しかし、中国、フランス、日本、韓国などは、原子力発電事業を発展させる方針を依然として改めず、「いかにして安全性と経済性を高めるか」という角度から問題を考え、「小さな失敗を恐れて大事を失う」事態を避けた。1980年代にスリーマイル島事故が起こってから、アメリカでは運転中および建設中の原子力発電ユニットに様々な安全措置が追加されたため、その建設コストが著しく増大した。それにより多くの原子力発電プロジェクトが中止されたが、原子力発電の実用性に関する研究は真剣に続けられた。エネルギー省と電力研究所の研究結果に基づき、アメリカは「これまでの経験と技術水準を基礎にすれば、市民や電力資本から受け入れられる安全性をもち、市場で競争できる経済性を備えた新世代の原子力発電ユニットを設計することができる」と判断した。そして、アメリカの電力研究所は、90年代に「改良型軽水炉使用者への要求」を記載した文書、すなわちURD文書(Utility Requirements Document)¹⁾を発行し、一連の定量指標で原子力発電所の安全性と経済性を標準化した。ヨーロッパでは「ヨーロッパにおける軽水炉発電所使用者への要求」、すなわちEUR文書(European Utility Requirements)²⁾が発行され、URD文書と同じか類似した考え方が提示されている。国際原子力機関も、自ら推奨している原子力安全基準(NUSSシリーズ)の改訂・補充を行い、重大事故の防止と被害軽減、安全性と信頼性の向上、人的要因の改善などに関する要求をさらに明確化した。

すでにチェルノブイリ事故から20年余り経ったが、その間に世界の原子力発電ユニット約400基では、さらに約8,000炉年の運転経験が積まれたうえ、重大事故も発生していない。この事実は、原子力発電所の改善措置が成果を上げ、原子力発電の安全性と経済性がいずれも向上したことを示している。しかし、市民や使用者は、依然として原子力発電事業の発展に対し若干の懸念を抱いているため、以下の問題を重点的に解決する必要がある。

- (1) 炉心溶融や環境中への大量な放射性物質放出のリスクをさらに低減させ、重大事故の発生確率を最低限まで抑えることにより、市民の懸念を解消する。
- (2) 放射性廃棄物(特に、放射性が強く長寿命の放射性廃棄物)の発生量をさらに少なくし、より優れた処理方法を研究して、人員や環境に対する放射線の影響を低減させる。
- (3) 原子力発電所のkW当たりの建設コストを低減させて建設期間を短縮し、ユニットの熱効率、設備利用率および寿命の向上を図ることにより、その経済性

をさらに改善する。

アメリカのURD文書、ヨーロッパのEUR文書、および国際原子力機関が提案しているNUSS基準の第2版は、上記の目標に基づいて提出されたものである。通常、URD文書またはEUR文書に適合した原子力発電ユニットは、国際的に第三世代の原子力発電ユニットと呼ばれている。2010年までには、商用の第三世代原子力発電ユニットが建設および普及される見込みである。

それと同時に、原子力利用の必要性、実用性および持続可能性に関する問題を根本的に解決するため、アメリカを初めとする一部の先進国は、安全性と経済性が極めて高い第四世代原子力利用システムの概念設計や研究開発を共同で進めつつ、2030年頃に商用施設を建設すべく努力している。

3 第二世代原子力発電ユニットの改良

1980年代および90年代以来、各国では、運転中の第二世代原子力発電所に対して安全性と経済性を高めるための技術改良を進め、大きな成果を上げている。アメリカを例にとると、新型原子力発電ユニットを研究開発すると同時に、それに少しも甘んじることなく、運転中の第二世代原子力発電ユニットの改良と効率向上を進めて顕著な業績を残した。そうしたユニットの改良は、以下のような面から着手されている。

1) ユニット運転性能の改良：安全システムの改良、運転管理の強化、安全意識の向上などを通じて、原子炉の停止回数や異常事象の発生回数を低減させる。また、「リスクインフォームド供用期間中検査技術(Risk informed in-service inspection)」などを用いて原子力発電の整備技術を完全なものにする。そうした改良により、70年代に約60%であった原子力発電ユニットの設備利用率が、今では約90%に向上した。実践を通じて、ユニットの安全性向上と経済性向上は相関関係にあることが証明されている。つまり、安全システムの改善と人員の安全意識向上によりユニットの安定した連続運転が必然的に促進されるため、有効利用率が向上して経済的なメリットも得られるのである。

2) ユニット設計許容量の活用と定格出力の引き上げ：原子力発電ユニットを設計するときには、若干の不確定性を考慮し、いずれでも適切な許容量を残してある。過去の運転データを詳細に分析すれば、それらの不確定性を相対的に確定できるので、許容量の活用を図れる。アメリカでは、そうした改良を既存のユニット50基余りに施し、様々な程度で定格出力を引き上げている。

3) ユニットの寿命延長：通常、原子力発電ユニットの設計寿命は40年だが、現在、各国では寿命を延長できると考えられており、いずれも寿命の延長に関する問題を研究している。すでにアメリカ原子力規制委員会は、それに関する管理ガイドラインを制定するとともに、原子

力発電ユニット40基余りを審査し、寿命を40年から60年に延長することを許可した。現在も延長の申請が相次いでいるが、それは寿命延長のメリットが非常に大きいからである。試算によると、ユニットの寿命延長に伴うkW当たりコストは250ドルから750ドルだが、現在のユニット新設コストはkW当たり1,500ドルから2,000ドルにもなる。ましてや、もしユニットの寿命を延長しなければ、寿命が尽きたとき退役させることになり、その撤去コストとしてkW当たり400ドル以上かかる。また、寿命を延長すれば発電コストが1.88セント/kWhまで下がる、とのことである。

4 第三世代原子力発電ユニットの研究開発

第三世代の原子力発電ユニットについては、2010年までに商用施設を建設することが求められており、その設計原則は次のとおりである。すなわち、第二世代の原子力発電ユニットで蓄積した技術と運転経験を基礎にしつつ、その欠点に対して開発と検証を経た実行可能な新技術を用い、安全性と経済性を大幅に改善して、URD文書またはEUR文書やNUSS提案基準の要求を満たす。

各国で提出された設計プランをまとめると、以下のような指標や特長が示されている。

1) 安全性の指標

安全性の面では、重大事故の予防および被害軽減が図れる施設を設けて、下記の指標要求を満たさなければならない。

- (1) 炉心溶融事故の確率 $\leq 1.0 \times 10^{-5}$ 炉・年(すなわち、各原子炉を1年間運転して当該事故が発生する確率を10万分の1以下にする)
- (2) 環境中へ放射性物質が大量放出される事故の確率 $\leq 1.0 \times 10^{-6}$ 炉・年(すなわち、各原子炉を1年間運転して当該事故が発生する確率を100万分の1以下にする)
- (3) 核燃料の熱工学的な安全許容量 $\geq 15\%$

2) 経済性の指標

経済性の面では、コンバインドサイクルの天然ガス発電所と競争できることが要求される(中国では「脱硫石炭発電所と競争できることが要求される」と提示している)。その具体的な指標は以下のとおりである。

- (1) ユニットの設備利用率 $\geq 87\%$
- (2) 設計寿命60年
- (3) 建設期間54カ月以下

3) 受動的安全システムの採用

「受動的安全システムの採用」とは、物質固有の重力、流体の対流、蒸発拡散といった自然の原理を利用して、専用電源またはその他の動力源による駆動を必要としない安全システムを設計し、緊急時に原子炉の自然冷却や炉心余熱の除去を図ることである。そうすれば、設備が減ってシステムが簡素化されるとともに、安全性、信頼

性、経済性なども向上する。これは革新的かつ重大な改良と言えるが、この面ではアメリカのAP-1000型加圧水型原子炉がリードしている。

4) 単機容量のさらなる大型化

研究と建設工事の経験によると、軽水炉原子力発電所のkW当たり投資額は、単機容量(kW数)が大きくなるほど低くなる(単機容量が150万～170万kWに達するまでは、いずれも同様)。そのため、ヨーロッパでフラマトム社とクラフトヴェルクウニオン社が共同設計したEPRユニットの定格電気出力は約160万kWとされ、アメリカのウェスチングハウス社と燃焼社も単機容量65万kWだったAP-600型ユニットを経済性の理由から約120万kWのAP-1000型ユニットに発展させた。日本の三菱が出したNP21加圧水型原子力発電ユニットでは電気出力が170万kWとされ、ロシアでもVVER型第三世代原子力発電ユニットの出力が150万kWになった。また、日本の東芝と日立は、単機出力170万kWの沸騰水型原子炉で原子力発電ユニットを建設する概念設計を提示している。

5) 総合デジタル制御システムの採用

フランスのN4、イギリスのサイズウェル、チェコのテメリン、日本のABWRなど、近年の海外で稼働している新しい原子力発電ユニットは、いずれもデジタル計装制御システムを採用している。デジタル計装制御システムを採用すると信頼性が著しく向上し、人的要因も改善されて誤操作を避けられることは、経験により証明されている。原子力発電の設計やユニット供給を行う世界各国の業者が提示している第三世代の原子力発電ユニットは、例外なく総合デジタル計装制御システムを採用したものである。中国においては、10MW高温ガス冷却型実験炉と田湾原子力発電所のいずれでも総合デジタル制御システムを採用している。

6) 建設工事のモジュール化による工期短縮

原子力発電所を建設する工期の長さは、その経済性に大きな影響を及ぼす。工期を短縮する有効な方法の一つは、設備を個別に工事現場へ運んで据え付ける従来の方法を改め、モジュール化に向けて開発することである。設計を標準化して設備製造をモジュール化する方法により可能な限り製造工場内(工事現場より条件が良い)で組み立てを行い、現場での施工量を減らして工期を短縮する。アメリカと日本が共同で建設したABWRユニットでは、この技術の採用に成功している。アメリカのAP-1000でも設計や建設技術のモジュール化を採用しており、その工期は48カ月に短縮され得る。また、ドイツ、アメリカおよび南アフリカが研究・設計している高温ガス冷却型原子炉でも、モジュール化に向けた開発が図られている。

現在、世界で開発されている第三世代の原子炉は、すべて加圧水型、沸騰水型、高温ガス冷却型といった熱中性子炉であり、高速増殖炉はない。これは、今のところ近い将来に商用化され得るのが熱中性子炉しかないから

である。中国でも、第三世代原子力発電の炉型を出力100万kW以上の加圧水型とすることが明確に定められている。

世界の加圧水型原子炉を見ると、成熟した第三世代の大型原子力発電ユニットとしてはAP-1000、EPRおよびシステム80+の3タイプがある。システム80+は、すでにアメリカ原子力規制委員会の許可を受けているものの、受動的な安全システムの採用が極めて不十分なため、アメリカでは使用が断念されている。

アメリカ・ウェスチングハウス社のAP-1000とフランス・フラマトム社のEPRは、いずれも第三世代原子力発電ユニットの設計要求を満たしている。EPRは単機出力(約160万kW)がAP-1000(約120万kW)より大きいですが、その安全システムは能動的なものであり、第二世代の従来型安全システムより複雑になっていて、AP-1000の進んだ受動的な安全システムに及ばない。

5 第四世代原子力利用システムに関する研究の進展

近年、世界各国で原子炉設計プランや核燃料サイクルプランの新たな概念が数多く提示されている。2000年1月、アメリカエネルギー省の提唱を受けて、アメリカ、イギリス、スイス、南アフリカ、日本、フランス、カナダ、ブラジル、韓国、アルゼンチンなど、原子力利用の発展を図っている10カ国の専門家が「第四世代原子力システムに関する国際フォーラム(Generation IV Nuclear Energy International Forum、「GIF」と略称)に参加した。そして、第四世代原子力システム(Gen IV)の研究開発を共同で行う憲章(Charter)が2001年7月に調印されている。

第四世代原子力システムの開発目標は次のとおりである。すなわち、2030年までに革新的な新世代の原子力システムを開発し、その安全性、経済性、発展の持続可能性、核拡散防止、テロ攻撃防止といった面で大幅な向上を図る。また、その研究開発には、発電や水素製造などに用いる原子炉だけでなく核燃料サイクルも含まれ、それにより「完全な原子力利用システムを構成する」という目標の達成を目指す。

GIFの組織は、主に各国政府から支援を受けた科学技術研究機関、高等教育機関および工業界の専門家で構成される。2000年から2002年にかけて、100名余りの専門家が8回のシンポジウムを相次いで開催し、第四世代原子力システムの具体的な技術目標を提示した。その主な内容は次のとおりである。(1)原子力発電ユニットの投資額をkW当たり1,000ドル以下、発電コストをkWh当たり3セント以下、建設期間を3年以下とする。(2)炉心溶融の確率と燃料破損率を極めて低く抑え、人為ミスにより重大事故が起こらないようにして、施設外から緊急措置を講じる必要もなくす。(3)従業員が作業時に被爆する放射線量と放射性廃棄物の発生量を可能な限り低減させ、完全な放射性廃棄物の処理・処分プランを定めて、市民に受け入れら

れる安全性能とする。(4)原子力発電所自体に強い核拡散防止能力をもたせ、原子力発電や核燃料の技術がテロ組織に利用されないようにする。(5)全寿命期間および全過程にわたる管理システムを設ける。(6)開発の国際協力体制を整える^{[3][4]}。

2002年5月にパリで行われたGIFのシンポジウムにおいて優先的に開発すべき第四世代原子力システムの6種類が選出されたが、そのうち3種類は熱中性子炉、3種類は高速増殖炉である。3種類の熱中性子炉とは超臨界圧水冷却炉(SCWR, Supercritical water-cooled Reactor)、超高温ガス炉(VHTR, Very-high-temperature gas-cooled reactor)および溶融塩原子炉(MSR, Molten salt reactor)、3種類の高速増殖炉とは先進的な燃料サイクルを伴うナトリウム冷却高速原子炉(SFR, Sodium-cooled fast reactor)、鉛合金冷却高速炉(LFR, Lead-cooled fast reactor)およびガス冷却高速炉(GFR, Gas-cooled fast reactor)である。

GIFに参加した専門家は、上記6種類の原子力利用システムを研究開発する道筋について検討し、国際的な分業や協力に関する協議を行ったうえで、初歩的な事業の「ロードマップ(Roadmap)」を提示している。現在の概念から商用運転(産業化)を実現するまでには、以下の4段階を要すると考えられる。

第1段階－実行可能性(Viability)の研究：そのプランを着実に実行するうえでの重要な点を明確にしたうえで、それが基本的に実行可能であることを証明する。

第2段階－性能の研究：技術の規模に関する研究開発と最適化を行い、その性能を所期の水準に到達させる。

第3段階－システムのデモンストレーション：中規模または大規模なデモンストレーションシステムを建設し、その設計を検証する。

第4段階－商用運転の実施

現在はGIFに参加した関係機関が第1段階と第2段階の初歩的な手配や分業を行っているだけであり、第3段階や第4段階には着手していない。最終的にどの炉型のシステムで産業化を実現できるか、という点はまだ定かでないが、GIFの第四世代開発計画によると、2020年までに一つまたは複数の炉型が選定され、2025年までに新たな原型ユニットのデモンストレーションシステムが建設される。その原型ユニットにより、新技術の安全面や経済面における優越性が実証され、他のエネルギーを用いる発電ユニットと競争できることが確認されたら、2030年頃から第四世代原子力発電ユニットのシステムが幅広く採用できるようになる。その頃には、現在運転中の第二世代原子力発電ユニットがいずれも60年(寿命延長が許可された場合)の寿命期間を終えて退役する。

国際原子力機関は、GIFによる第四世代原子力システム(Gen IV)の提唱に賛同するだけでなく、2001年から「INPRO」という国際プロジェクト(International Project On Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles－革新的

原子炉および燃料サイクルに関する国際プロジェクト)を提唱して実施に移した。現在、中国、フランス、ロシア、欧州連合、インド、スペイン、カナダ、オランダ、トルコなどがINPROプロジェクトに参加している。INPROの事業は、具体的に何らかの型式で原子炉や燃料システムを設計するものではなく、以下のような事項を主な任務とする。

1)21世紀の経済発展に伴う電力需要を満たすため、原子力発電の発展が必要なことを論証および説明する。

2)世界および各国で設計業者、製造業者および発電事業者の協力を促進して、固有の安全性をもち、核拡散や核材料の遺失を防止できるうえ、競争力もある革新的な原子炉や核燃料システムを設計・建設する。

中国は、すでにGIFへの参加を決定して歓迎されている。

6 立ち上げ段階から発展段階へ入った中国の原子力発電

原子力発電を重視してきた中国は、早くも1956年に国家原子力発展12カ年計画大綱を制定し、「原子力発電の使用はエネルギー開発の時代を画するものであり、それには遠大な前途が広がっている」、「条件付きで原子力発電を用い、総合的なエネルギーシステムを形成する」と明確に指摘していた。しかし、文化大革命によって妨げられ、中国では原子力発電の立ち上げが遅れてしまった。1974年3月31日、周恩来総理に主宰された中央専門委員会で30万kW級の加圧水型原子炉による原子力発電計画が承認され、科学技術開発プロジェクトとして国家計画に組み入れられて、ようやく原子力発電の事業が開始された。これこそ728プロジェクト(秦山原子力発電所)の始まりである。728プロジェクトは、中国が初めて独自に建設した原子力発電プロジェクトであり、1983年に研究開発と工事設計がほぼ終わり、1985年3月20日から正式に着工された。そして、1991年12月15日には電力網への送電を行い、原子力発電がなかった中国の歴史を変えて、中国の原子力発電技術に大きな飛躍をもたらした。中国は、90万kW級の原子力発電プラント2基もフランスから輸入し、1987年に広東省の大亜湾で着工させた。それら2基のユニットは、それぞれ1993年と1994年から電力網へ送電している。秦山原子力発電所と大亜湾原子力発電所の稼働により、中国は原子力発電の発展を図るための良好な基礎を固めることができた。

現在、中国では総設備容量911万kWになる原子力発電ユニット11基が稼働しており(表1)、それは台湾の総容量(ユニット6基、514万kW)を超えている。

国務院は、2007年3月に原則承認した『原子力発電中長期計画(2005～2020年)』の中で、「2020年までに、中国における原子力発電の設備容量を4,000万kW、建設中設備の容量を1,800万kWとする」ことを定めた。それに含まれる16～18基のユニットは「第10次5カ年計画」期間の末頃に着工されたか、「第11次5カ年計画」期間中に着工され

発電所名	定格電気出力(kW)	炉型
秦山第1期	31万	加圧水型原子炉
秦山第2期	2×65万	加圧水型原子炉
秦山第3期	2×72万	重水炉
大亜湾	2×98万	加圧水型原子炉
嶺澳第1期	2×99万	加圧水型原子炉
田湾	2×106万	加圧水型原子炉
合計	911万	

◎表1 中国で商用運転している原子力発電ユニット

るものであり、浙江省、広東省、遼寧省、山東省、福建省などに分布している。建設中の広東省嶺澳第2期と拡張される浙江省秦山第2期は、「第11次5カ年計画」期間中に稼働を開始する。その他のユニットは「第12次5カ年計画」期間中に相次いで稼働を開始する予定である。これらのユニットはすべて沿海地方に所在しているが、「第12次5カ年計画」期間中には、沿海地方で引き続き原子力発電所を建設していく以外に、湖北省、湖南省、江西省といった内陸地方でも原子力発電所の建設を始める。中国の原子力発電は、すでに立ち上げ段階から発展段階に入っている。現在の進展状況から見て、上記の計画目標は達成可能と言える。

7 中国が持つに至った第二世代原子力発電施設の建設能力

中国が初めて独自に新規建設する30万kW級加圧水型原子炉での原子力発電計画(秦山第1期)を承認したとき、周総理は「この原子力発電所を建設する目的は発電だけでなく、その研究、設計、建設、運転などを通じて、技術の習得、経験の蓄積および人員の訓練を図り、中国がこれから原子力発電を発展させていくための良好な基礎を固めることも重要である」と語った。今、我々は「その目的は達成された」と言うことができる^⑩。

16年余りにわたり安全に運転されてきた秦山第1期原子力発電ユニットでは、優秀な技術チームや管理チームが育成されており、他の原子力発電プロジェクトへも多くの中核的な人材を送り出している。発電所全体で安全意識の絶えざる向上が見られ、技術改良によってユニットの性能や信頼性が大幅に高くなって、448日にわたり安全に連続運転するという優れた業績を残し、貴重な技術や経験を蓄積してきた^⑪。

30万kWの秦山原子力発電ユニットを基礎にしつつ改良・向上させたハシマ原子力発電所は、中国が元請する方式で援助しながらパキスタンに建設された高度科学技術輸出プロジェクトであり、2000年に完成して良好に運転されている。引き続きパキスタンは、技術、安全、経済などの指標をさらに向上させた第2号ユニットの建設援助も中国に求めてきた。その契約は2004年3月に締結さ

れ、現在実施中である。また、さらなる原子力発電ユニット4基の建設援助に関する意向書も2007年に双方で調印された。中国の高度先端技術は海外への輸出が可能なおうえ、高く評価されている。これは国の誇りと言えよう。

秦山第2期の原子力発電プロジェクトは電気出力65万kWのユニット2基で構成されており、やはり中国が独自に新規建設したものである。そこでは、秦山第1期の技術と経験を取り入れるとともに、フランスから輸入した大亜湾原子力発電所を参考にし、その技術や経験を消化吸収したうえで一部を導入した。そして、中国は「中国が中心となる海外との協力」という方式をとり、独自の設計と建設を成功させている。これは、中国が独自に原子力発電所を建設していくうえで、秦山第1期に続くマイルストーンとなった^⑫。

秦山第3期のプロジェクトでは、カナダ型重水炉の原子力発電ユニットを採用している。しかし、それを我々が迅速に消化吸収および理解し、建設期間における品質、進捗、投資という三大管理を適切に行ったため、そのユニット2基はともに2003年10月から正式な商用運転を開始し、総投資額と建設期間がいずれも計画指標より優れていた。

中国がフランスから導入して大亜湾に建設した2基の大型原子力発電ユニット(単機出力98万kW)は、稼働開始から問題なく運転されている^⑬。大亜湾原子力発電所を基礎にしつつ改良された嶺澳原子力発電所のユニット2基は、それぞれ2002年と2003年から商用運転を開始した。嶺澳原子力発電所の建設費決算額は予算額より10%低く、工期も計画より2カ月短縮されたうえ、その工物品質も優れていた。我々が秦山と嶺澳で原子力発電ユニット4基を建設および運転してきたことにより、大型ユニットの技術や管理経験が蓄積され、中国が原子力発電を自主開発する能力も強化されている。そして、大規模な商用原子力発電所の設計自主開発と設備国産化を全面的に実現していくための良い基礎が固まった。

以上のような事実は、中国が主に自らの力で開発を行いつつ導入技術も組み合わせれば、原子力発電所を設計・建設できるだけでなく、原子力発電所の運転や管理も適切に行えることを示している。このことは、中国が高度科学技術を身に付ける自信を深めるうえでも、民族精神を喚起するうえでも深い意義をもっている。

これらをまとめると、中国は、長年の努力を経て、第二世代原子力発電ユニットの設計と建設を独自に行う能力を持つに至ったうえ、それを改良することもできると言えるだろう。

8 原子力発電の発展の積極的な遂行、自主開発の強化

党中央と国務院の指導者は、各関係部門や専門家の意見を幾度も幅広く聴取したうえで、中国で原子力発電を積極的に発展させていくべきことを決めたが、それは非

常に見識あるかつ正しい方針決定であった。なぜなら、原子力は次のような代え難い優位点をもっているからである。

- ・ 原子力発電は、クリーンかつ安全で、技術が成熟しており、供給能力が大きい。大規模にできる発電方式である。
- ・ 原子力発電所の建設を加速させ、電力供給における原子力の比率を高めれば、電力の増加、環境保護および発電用石炭の輸送に伴う問題を緩和させ得る。
- ・ 原子力を発展させれば、高度技術産業や設備製造業の発展も促され、経済成長の促進、エネルギー構造の調整、エネルギー安全保障、持続可能な発展戦略の実施といった面で重要な意義がある。

国務院の指導者は、すでに次のとおり決定している。すなわち、今後中国が原子力発電を発展させるうえでは、大型ユニットの自主開発と国産化を速やかに実現する。また、「先進技術を採用して技術路線を統一する」という方針を貫徹しながら、中国の具体的な状況も考え合わせ、原子力発電の発展を積極的に図って自主開発を強化しなければならない。

中国の原子力発電チームは、30万kW級や60万kW級の原子力発電ユニットを独自に設計する能力を有しており、100万kW級の原子力発電ユニットを設計する能力もほぼ備わっている。しかし、我々の技術を世界的に見ると、まだ第二世代加圧水型原子炉の水準である。我々は、原子力発電発展の歩みを止めないため、改良型第二世代ユニットの建設へ引き続き取り組むと同時に、原子力発電の安全性と経済性の向上を根本目標に据えつつ、中国における原子力発電の世代交代、すなわち第二世代から第三世代への発展を一日も早く実現しなければならない。自主開発と技術導入を組み合わせながら、第三世代・100万kW級という大型で先進的な加圧水型原子力発電ユニットを独自に設計・建設するという目標を達成して、先進的で標準化されたうえで大量建設が可能な産業規模を形成し、原子力発電の発展を加速させる。さらに、それを基礎にして絶えざる改良と革新を図り、中国独自の知的財産権を有する中国ブランドの先進的な原子力発電ユニットを開発すべきである⁹⁾。そのため、国務院の指導者は、すでに次の事項を決定している。すなわち、第三世代原子力発電の自主開発を図っていくうえで浙江省三門と山東省海陽の原子力発電プロジェクトを中心に据え、アメリカ・ウェスチングハウス社のAP-1000型という先進的な加圧水型原子炉施設を導入して、4基の原子力発電ユニットを共同で設計・建設する。そのユニット4基を共同で設計・建設し、導入技術を消化・吸収することにより、中国が独自に第三世代の100万kW級原子力発電ユニットを設計・建設および大量開発できるようにする。そして、さらなる研究開発や革新を図り、中国独自の知的財産権を有する中国ブランドの先進的な第三世代原子力発電ユ

ニットを一定期間内に設計するとともに、そうした1基目の商用デモンストレーションユニット建設に着手し、それを成功させたうえで段階的に普及させていく。それを全力で確保するため、国家中長期科学技術発展計画綱領では、すでに『大型で先進的な加圧水型原子炉および高温ガス冷却炉の原子力発電所』が重要特別項目^[10]として組み入れられている。ここで、原子力発電の発展を図るうえでは、一貫して自主開発を原動力とすべきことを強調しておかなければならない。それは、第二世代を改良・向上させるためだけでなく、さらに第三世代や第四世代へと発展させていくためなのである。

9 原子力開発の展望

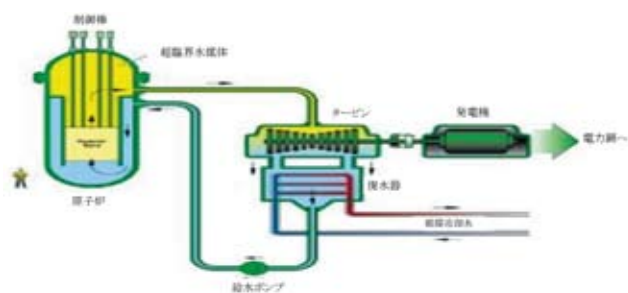
原子力利用はエネルギー問題を解決するために避けて通れない道であり、それが全エネルギーに占める割合は必ず次第に大きくなる。そして、エネルギー構造が改善されるとともに、将来的には人類のエネルギー需要に伴う問題の根本的な解決も望める。しかし、原子力の開発・利用は、順を追って段階的に進めるべき長期的な取り組みである。それは、技術的な難易度と産業化の実現に向けた展望に基づき、概ね三段階に分けられる。第1段階は熱中性子炉、第2段階は高速増殖炉、第3段階は核融合制御炉となる。これら三つの段階を互いに繋げながら段階的に実用化し、その産業化を実現する必要がある。中国における原子力の開発・利用は、これら三つの段階を追って推進していかなければならない。

9.1 熱中性子炉の段階

現在、世界では447基の原子力発電ユニットが稼働しており、その総設備容量は約3億8,800万kWとなり、4基の高速増殖炉以外はすべて熱中性子炉である。したがって、原子力の産業化や利用は、今なお第1段階にあると言える。熱中性子炉による原子力発電ユニットの中では、268基の加圧水型原子炉が多数を占める。中国で稼働しているユニット11基の内訳は加圧水型原子炉9基、重水炉2基(秦山第3期)となっており、やはりすべてが熱中性子炉である。中国の政府は、原子力発電を発展させるため加圧水型が主力炉となることを1983年に決定したが、20数年の経験により、その決定の正しさが証明された。加圧水型原子炉は、「成熟した技術」、「コンパクトな構造」、「高い安全性」、「運転や整備のしやすさ」といった優位性があり、今後相当な長期間にわたり中国原子力発電の主力炉であり続けるだろう。しかし、加圧水型、沸騰水型、重水型といった原子力発電ユニットのいずれでもタービンの作動媒体が飽和蒸気であり、その温度は280℃を超えないため、それらの発電熱効率率は約36%にしか達しない。熱効率を向上させる見地から、加圧水型や沸騰水型を超臨界圧水冷却炉(SCWR, Supercritical Water-Cooled Reactor)へと発展させていくべきである。超臨界圧水冷却炉の原子力発電ユニット(図1)ではタービンの作動媒体が

超臨界水であり、直接原子炉から送られてくる。それは同時に原子炉の炉心冷却剤でもあり、その原子炉出口(タービン入口)における圧力は約25MPa、温度は510～550℃になる。そして、ユニットの熱効率は44～45%にも達し、水媒体の性質も変わらないため、「加圧水型原子炉」や「沸騰水型原子炉」の出る幕はなくなる。加圧水型原子炉に比べて、超臨界圧水冷却炉は蒸気発生器が必要なく、沸騰水型原子炉に比べると気水分離器が必要ないので、付帯システムや施設を大幅に簡素化できる。試算によると、超臨界圧水冷却炉では、大幅にシステムが簡素化されて熱効率も向上するため、発電所建設コストや発電コストが顕著に低減される。超臨界圧水冷却炉の開発や設計には、蓄積された加圧水型原子炉や沸騰水型原子炉の技術、および超臨界圧火力発電所の技術を数多く応用できる。しかし、その設計を着実に進めるためには、やはり多くの研究開発業務をこなす必要があり、特に炉心の性能や構造材料の研究開発が重要となってくる。

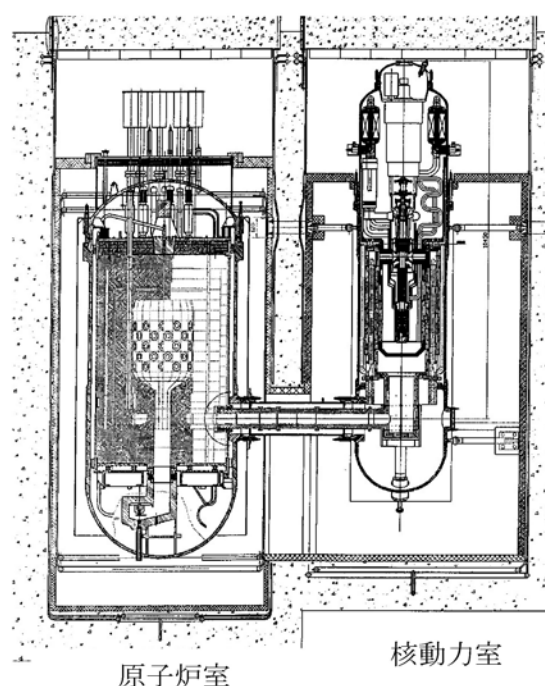
中国の973計画では、すでに超臨界圧水冷却炉が基礎研究項目として組み入れられている。



◎図1 超臨界圧水冷却炉による原子力発電ユニットの原理図

発展の可能性が高いもう一つの熱中性子炉は高温ガス冷却炉である。1970年代のアメリカとドイツでは、電気出力200～300MWの高温ガス冷却炉による原子力発電所が建設された。しかし、経済性が加圧水型原子炉や沸騰水型原子炉に及ばない、技術が成熟していない、といった理由により、それらは商用化に至らなかった。80年代になると、ドイツからモジュール式高温ガス冷却炉の設計概念が打ち出されたが、小型化可能で固有の安全性があることを特徴とするモジュール式は、高温ガス冷却炉の技術に関する国際的な流れとなっている。それをアメリカ、ドイツ、ロシア、日本、南アフリカなどが積極的に研究しており、中国では「863」計画の重点項目として「10MWモジュール式高温ガス冷却型実験炉」(図3)が組み込まれ、2002年に清華大学原子力設計研究院内で建設された。それは技術的に世界の先端を行くものである。中国では、それを受けた中長期科学技術発展綱領の重要特別項目『大型で先進的な加圧水型原子炉および高温ガス冷却炉の原子力発電所』において、電気出力20万kWの

モジュール式高温ガス冷却炉によるデモンストレーション発電ユニットを建設し、高温ガス冷却炉の商用化を推進することが規定された。そして、超高温ガス炉(VHTR, Very High Temperature Reactor)を指向し、VHTR冷却炉心のヘリウムガス出口における温度を1,000℃まで高めて、水素の製造にも、石油工業、化学工業、製鋼といった産業への熱供給にも使用できるようにし、発電に用いるときの熱効率を50%まで上げる。しかし、高性能な燃料エレメント、直接サイクル・ヘリウムガス・タービン発電、高温炉の熱による水素製造などに伴う技術的な問題を解決しなければならない。



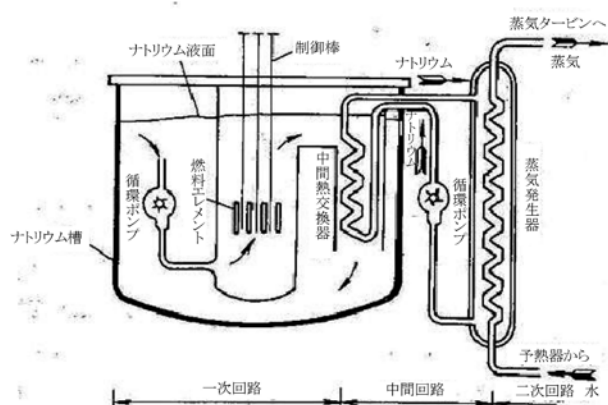
◎図2 高温ガス冷却炉による原子力発電ユニットの概略図

9.2 高速増殖炉の段階

熱中性子炉の主な欠点は、核燃料の利用率が低いことである。つまり、採掘および精錬されたウランの1～2%に当たる燃料のみが熱中性子炉の中で原子力を生み出して、それを除く98～99%のウラン238は、すべてそのまま変化せず、高速増殖炉でしか利用できないのである。

高速増殖炉がもつ最大の特長は、核燃料を有効利用できることである。高速増殖炉は核分裂燃料を消費して原子力を生み出しながら消費量の1.2～1.6倍に当たる核分裂燃料を生産することもでき、高温原子炉に滞留したウラン238の60～70%を高速増殖炉内で利用できる。この点に鑑み、中国の863高度科学技術計画では、熱出力65MWで電気出力25MWの高速増殖炉による実験用原子力発電ユニット(図3)を中国原子力研究院に建設することが決定された。現在、このプロジェクトは調整試験の段階にあ

り、2009年の完成が見込まれる。中国の中長期科学技術発展計画綱領では、すでに高速増殖炉が先端技術項目として組み込まれている。65MWの実験用高速増殖炉の建設や試験運転および関連事項の研究を通じて、高速増殖炉の設計、炉心技術、燃料や構造材料に関する技術を把握し、ナトリウム循環といった重要な技術的問題を克服することにより、モデルとなる高速増殖炉の商用原子力発電所を建設するための基礎を固める。また、高速増殖炉のもう一つの用途は、長寿命で放射性が強い核分裂産物やアクチニウム系元素を焼却し、高レベル放射性廃棄物を処分することである。



◎図3 ナトリウム冷却高速増殖炉による原子力システムの概略図

現在、世界では、フランスのフェニックスやスーパーフェニックス、ロシアのBN-600といった高速増殖炉が運転されており、それらのいずれでも金属ナトリウムが冷却剤である。これは、ナトリウム冷却高速増殖炉が技術的に実行可能なことを示している。そして、中国の実験用高速増殖炉でもナトリウム冷却を用いる。しかし、ナトリウムは化学的に極めて活発であり、酸素や水と激しい化学反応を起こしやすい。そこで、システムや設備に厳密なナトリウム漏れ防止措置を施し、ナトリウムと水や空気との接触を防ぐ必要があるため、システムや設備が大幅に複雑なものとなる。ヘリウムガス、金属鉛、ビスマスなどを冷却剤にすることを試みる専門家もいるが、それぞれに難しさがある(ヘリウムの熱伝導能力が液体金属にはるかに及ばない、鉛やビスマスは融点が高く他の金属製構造材料との相容性が劣る、といった欠点)。その結果、現在のナトリウム冷却高速増殖炉のシステムは非常に複雑で、投資額も巨額になるため、それが燃料面でもつ優越性を相殺してしまう。また、その発電コストについても、まだ加圧水型原子炉などと競争できない。世界では第四世代ナトリウム冷却高速増殖炉に先進的な燃料循環システムを取り付けることが求められているが、そうならば経済性や安全性が高まり、核拡散も防止

できる。その他類型の高速増殖炉は技術的に未成熟であるため、いかにして技術を成熟させて工程の簡素化とコスト低減を図るかが、21世紀における高速増殖炉研究の主要な任務となる。高速増殖炉については、「2030年頃になれば、商業利用できるまで経済性が高まり、その優位性が発揮される」と予測されている。

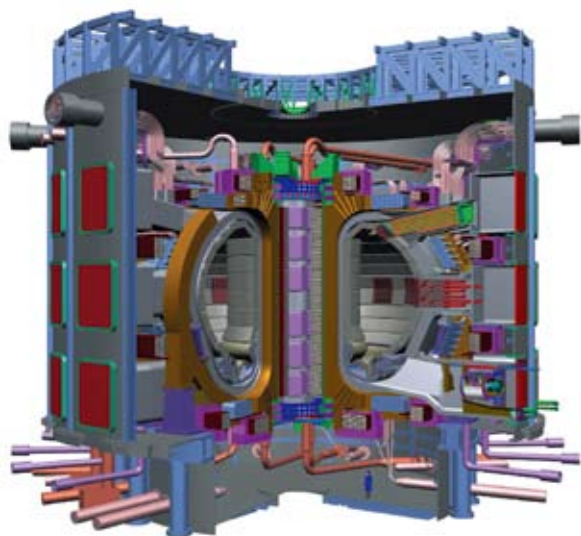
ここで特に注意を要するのは、「高速増殖炉による核燃料の有効利用は“閉じた燃料サイクル”の採用が前提となる」という点である。高速増殖炉にとって最も合理的な燃料は産業用プルトニウムだが、高速増殖炉が自らの燃料サイクルを実現する前に、高温原子炉(中国では加圧水型原子炉)から産業用プルトニウムの供給を受ける必要がある。したがって、「産業用プルトニウムを高速増殖炉での使用に供するため、いかにして加圧水型原子炉から取り出した使用済燃料の再処理を大規模に行うか」や「その放射性が強い核分裂産物や長寿命のマイナーアクチニドをいかに変異、処理および処分して環境を保護するか」という点が解決すべき重要な問題となる。中国が建設しつつある実験用の使用済燃料再処理工場は、それらの研究を進めるうえで重要な役割を果たすだろう。

ここで次のことも指摘しておく必要がある。すなわち、上述した超臨界圧水冷却炉、超高温ガス炉および先進的な燃料サイクルを伴うナトリウム冷却高速増殖原子炉の3種類は、まさに第四世代原子力システムに関する国際フォーラム(GIF)で重点的に開発すべきものとして選定された6種類の第四世代炉型に含まれており、すでに国際的な共同開発が行われている。GIFに参加している中国も、一定の研究開発任務を分担し、その成果や知的財産権とともに享受できるよう努力しなければならない。

9.3 核融合制御炉の段階

核融合炉とは、水素の同位体であるトリチウムを利用し、トリチウムなどの融合によりヘリウムを生成するとき核エネルギーを放出させる原子炉を指す。このトリチウムは重水中の「重水素」であり、地球上の水には1/7,000の割合で重水が含まれていて、含まれるトリチウムの総量は40兆tにもなる。そのため、核融合炉が成功すれば、数十億年分にも当たる人類のエネルギー需要を水中のトリチウムでまかなえる。しかし、持続的な核融合制御を実現するのは非常に難しい。最も重要な問題は、トリチウムとその原子核を少なくとも数千万から億℃まで加熱したうえで(プラズマになる)、それらを安定して閉じ込めておくことである。現在は、磁気閉じ込め、レーザー慣性閉じ込め、 μ 粒子の触媒といった方法による核融合制御の実現が主に研究されている。各国では約200台もの様々な試験装置を建設して核融合制御を模索しつつあり、すでに成功の曙光が見え始めた。中国でも新世代の核融合制御研究装置であるHL-2Aや低温超伝導閉じ込め核融合装置EASTが建設された。これは、中国の核融合研究が大規模装置による試験段階に入り、高いレベルで国

際協力に参加するための基盤ができたことを象徴している。世界の磁気閉じ込め核融合試験装置では、すでに出力を入力より大きくするという成果が上がっており、核融合制御の科学的な実行可能性が基本的に実証された。そのため、アメリカ、ロシア、日本、欧州連合などは、共同開発した国際熱核融合実験炉(ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor、図4)の設計を完了させ、2015年前後の完成を目指してフランスのカタラッシュ(Catalanche)に建設することを決定した。専門家は、「人類は2050年頃までに原型モデルの核融合制御発電所による発電を実現する可能性がある」と予測している。核融合炉を経済的に実用できる段階まで発展させるには、まだ相当に長く苦しい道程があるが、その将来は非常に明るい。中国の中長期科学技術発展計画では、すでに磁気閉じ込め核融合が先端技術項目として組み入れられたうえ、ITERプロジェクトの建設や運転に参加することも決定されている。そして、先端科学技術の面で世界と協力し合い、国内の核融合制御研究者とも緊密に連携しながら、中国における核融合エネルギー利用の発展を推進していくのである。



◎図4 ITERの概略図

10 結論

世界の原子力発電は、1980年代から90年代の低迷期を経て、まさに復興しつつある。現在、原子力発電の発展を呼びかける国がますます増えている。科学の発展に伴う環境保護(二酸化炭素や二酸化硫黄などの排出削減)や資

源有効利用の要求が原子力発電発展の主要な推進力となり、安全性と経済性は、原子力発電の大規模な発展を図るための前提およびキーポイントと言える。

中国の原子力発電は発展の絶好機を迎えており、国の『原子力発電中長期計画(2005～2020年)』では、原子力発電に関する2020年までの目標および必要な措置^[1]が明確にされている。また、国の『中長期科学技術発展計画綱領』では「大型で先進的な加圧水型原子炉および高温ガス冷却炉の原子力発電所」を重要特別項目として組み入れており、国務院も当該重要特別項目の全体的な実施プランを原則承認している。国の関係部門や関係機関は、計画の要求に基づき、中国で蓄積された原子力発電の技術や経験を十分に活用しながら世界の先進的な技術や経験も数多く取り入れて、一定数の第二世代改良型原子力発電ユニットを独自に設計・建設するとともに、一日も早く第三世代の先進的な原子力発電ユニットの開発段階へと進んで、独自の知的財産権を有する大型で先進的な加圧水型や高温ガス冷却型の原子力発電ユニットを自主開発し、より安全、経済的かつ高品質な原子力発電の開発を加速させるよう図っているところである。2020年頃には、中国の原子力発電開発に関する成果は、中国がイノベーションを持つ国であることを象徴するものとなるだろう。

中国では、建設済みの実験用高温ガス冷却炉、建設中の実験用高速増殖炉発電施設、およびクローズド核燃料サイクルシステムを実現するための研究開発活動により、原子力利用がさらに高い水準へと推進されつつある。また、核融合制御の面で得られた研究成果や国際協力への積極的な参加も鼓舞している。

上記のように、中国における原子力利用の前途はますます広がっている。しかし、これは何と言っても長期的、大規模かつ体系的なプロジェクトであり、近い将来に国民経済に貢献するための技術的課題を数多く解決し、次の段階に向けた長期的な発展のためにも体系的な予備研究を行いながら、基礎研究と応用研究を展開していく必要がある。それに関係する研究分野は非常に広範で互いに重なり合っている。そのため、短期と長期を組み合わせつつ遠大で総合的な見地に立ち、統一したかつ着実に実施して、可能な限り早く世界の先進的な水準に迫り着き、それを追い抜けるよう努力しなければならない。我々は、鄧小平理論や「三つの代表」という重要な思想および科学の発展による指導の下、国の統一した計画に基づく努力を経て、中国における原子力の開発・利用が必ず大きな実を結ぶことを確信して止まない。

参考文献

1. Advanced Light Water Reactor Utility Requirements, Prepared for Electric Power Research Institute US, Issued 12/93.
2. European Utility Requirements For LWR Nuclear Power Plants, 1955 DTN, Electricity de France, ENEL SPA, KEMA Netherland., B.V. Etc. Revision B, November 95.
3. USDOE. Discussion on Goals for Generation IV Nuclear Power Systems, Report from a workshop held May 1 ~ 3,2000, Bethesda, Maryland, <http://gen-iv.ne.doe.gov/>
4. USDOE. Final Final Generation IV Goals, prepared by the Nuclear Energy Research Advisory Committee (NERAC) and the Generation IV International Forum (GIF), May 2001, <http://gen-iv.ne.doe.gov/>
5. 欧陽予,杜聖華、秦山原子力発電プロジェクト、原子力出版社、2000年
6. 劉伝徳,謝筱瑩、中国の原子力発電のhatten において秦山原子力発電所が果たすモデルとしての役割
7. 康日新、イノベーションを堅持しつつ早く良好かつ安全に中国原子力工業の発展を図る、中国原子力工業2006年第5期・総合第69期
8. 潘俊雄(主幹)、大亜湾原子力発電所での経験(6)、原子力出版社、1996年7月
9. 欧陽予、大型原子力発電ユニット自主開発の積極的な推進、2004中国原子力フォーラム編纂、中国原子力学会核エネルギー動力分会、2004年9月、広西
10. 国家中長期科学技術発展綱領(2006 ~ 2020年)、科学時報2006年2月10日A5 ~ A8版
11. 『原子力発電中長期計画(2005 ~ 2020年)』が国务院の審議を原則通過したことに関する報道、人民日報2007年3月24日第1版

核エネルギーは中国将来のエネルギー供給に対する重要性

•Profile•



呉 宗鑫 Wu Zongxin ●中国国家原子力安全専門委員会委員 清華大学核エネルギーと新エネルギー技術研究院学術委员会主任

1937年12月21生まれ。1956～1962年、清華大学工学物理学部原子炉工学専攻、卒業後清華大学に残り就任。1982～1983年、英国サレー大学でエネルギー経済学を研修。1987年、清華大学教授に招聘され、1994年から2001年まで清華大学核エネルギー技術設計研究院院長就任。2001年以降現在まで、清華大学核エネルギーと新エネルギー技術研究院学術委员会主任就任。1995年以降現在まで、国家原子力安全専門委員会委員に就任。高温ガス冷却型原子炉の研究と設計の業務及び国家エネルギー政策と気候変動政策の研究に長期従事。これまでに発表された主な著作：清華出版社出版「石炭を主とした多元化クリーンエネルギー戦略」、「改良型核エネルギーシステムと高温ガス冷却型原子炉」。

1 中国のエネルギーの現状

中国の2007年の一次エネルギー総消費量は26.5億トン（標準石炭換算）であり、その内、石炭消費量は18.4億トン（標準石炭換算）で、一次エネルギー総消費量の69.5%、石油消費量は4.86億トン（標準石炭換算）で、18.3%、天然ガス消費量は673億立方メートルで、3.37%である。

中国の2007年の一次エネルギー総消費量はすでに世界の一次エネルギー消費量の16.8%を占めているが、中国人一人当たり平均のエネルギー消費量はまだ2.0トン（標準石炭換算）にすぎず、世界の一人当たり平均の消費水準である2.5トン（標準石炭換算）を下回っており、OECD諸国の一人当たり平均の消費水準である6.85トン（標準石炭換算）のわずか29%である。

中国のエネルギー消費構造は石炭を主としており、石炭の消費量は一次エネルギー総消費量の69.5%、世界の大多数の国の一次エネルギー消費構造との差異は極めて大きい。世界の平均的一次エネルギー消費構造において、石炭はわずか28.6%であり、クリーンなエネルギー、例えば天然ガスは23.8%、石油は35.6%である。中国の石炭を主とするエネルギー構造が中国の高い汚染物排出量をもたらしている重要な原因である。

中国のエネルギー利用効率是比较的低く、国内総生産（GDP）100万ドル当たりのエネルギー消費率は520トンオイル当量で、世界の平均水準である280トンオイル当量の1.86倍で、OECD諸国の平均水準である199トンオイル当量の2.6倍に相当し、日本との差はさらに大きく、日本の108トンオイル当量の4.8倍である。中国のエネルギー消費率が高い原因には技術面の問題もあるが、主要なものではない。主として産業構造が原因であり、マクロ的産業構造から考慮して見ると、エネルギー消費が多い工業分野のGDP総量の中に占める比率はやや高いが、エネルギー消費が少ないサービス業分野のGDP総量の中に占める比率は比較的低い。各産業部門で考慮して見ると、低

付加価値製品の比率はやや高いが、高付加価値製品の比率はやや低い。高付加価値製品または低付加価値製品のエネルギー消費量はその差が極めて小さい可能性があるが、単位当たり付加価値のエネルギー消費率は差が数倍となる可能性がある。これが中国の高いGDPエネルギー消費率をもたらしている主な原因であり、また発展途上国の特色でもあり、低付加価値を主とする発展途上国の産業構造から高付加価値を主とする産業構造へのタイプ転換は、かなり長い過程を経ることが必要であり、その後初めて実現が可能となる。

1980年以降長期にわたり、中国のGDPのエネルギー消費率はずっと低下の傾向を呈しており、1980～2000年の平均GDPエネルギー消費成長弾性係数は0.5を下回っている。即ちエネルギー消費の平均成長率はGDP平均成長率の半分を下回る。しかし近年、中国のエネルギー消費の伸びは極めて速く、2002年から2005年にかけて、エネルギー消費の伸び率は連続3年国内総生産GDPの成長率を上回り、単位当たりGDPのエネルギー消費率は低下することなく反対に上昇した。エネルギー問題はすでに中国経済社会の持続可能な発展が直面する重大な課題となっており、中国政府はすでに省エネを優先的な政策に掲げるとともに、2010年のGDPエネルギー消費率を2005年と比べて20%引き下げるという目標を提出している。

中国の交通運輸が急速に発展しているため、特に家用車の保有量が急速に増加しているため、中国の石油消費は急速に増加し、2000年から2007年にかけての中国の石油消費量は2.24億トンから3.68億トンに増加している。しかし生産量は1.63億トンからわずか1.87億トンに増えただけで、石油の輸入量は0.61億トンから1.81億トンに増加し、石油の対外依存度は27%から49%に増加している。これは中国のエネルギー確保の安定性における重大な課題である。

現在、中国はすでに米国を超えて世界のCO₂排出の第一の大国となっている。2007年、中国のCO₂排出量は59.4

億トンで、米国は58.6億トンであった。中国の一人当たり平均のCO₂排出量は4.5トンで、世界の一人当たり平均の排出水準に相当する。中国はCO₂排出削減の巨大な国際的圧力に直面している。

2 安定供給と気候変化の厳しい課題に直面している中国のエネルギー開発

中国はまさに工業化と都市化の進展過程にあり、現在都市人口の比率はわずか45%であるが、今後毎年、大量の人口が農村から都市に入ってくるであろう。これにともない、工業施設、都市と交通運輸インフラストラクチャーの建設はいずれも大量の鉄鋼、セメント、非鉄金属の投入が必要となり、これらの材料はいずれも高エネルギー消費の製品であり、大量のエネルギーを消費する必要がある。例えば、米国の工業化及び都市化の実現において、累計の一人当たり平均の鉄鋼消費量は21トンで、日本は17トンであるが、現在までの中国の累計の一人当たり平均の鉄鋼消費量はわずか3トン前後でしかない。

世界の大多数の先進国の発展の経験に基づくと、工業化と都市化発展の過程においていずれもエネルギー消費の急速な増加の段階を経ている。一人当たり平均のGDPが1万ドルに達した後、エネルギー消費はさらに増加しているが、増加の速度は比較的緩慢なものとなっている。米国は1960年前後に一人当たり平均のGDPが1万ドルに達し、その一人当たり平均の一次エネルギー消費量は約8トン（標準石炭換算）で、日本は1980年前後に一人当たり平均のGDPが1万ドルに達し、その一人当たり平均の一次エネルギー消費量は約4.25トン（標準石炭換算）で、韓国は1997年に一人当たり平均のGDPが1万ドルに達し、その一人当たり平均の一次エネルギー消費量は約4.07トン（標準石炭換算）であった。この後、これらの国のエネルギー量は引き続き増加している。現在、日本の一人当たり平均のエネルギー消費量はすでに5.78トン（標準石炭換算）に達しており、米国は11.4トン（標準石炭換算）に達している。

現在中国人一人当たり平均のエネルギー消費量はわずか約2トン（標準石炭換算）で、今後工業化と都市化の進展にともない、中国の一人当たり平均のエネルギー消費量はいっそう増加するであろうし、また人口の増加を考慮すると、中国の現在の人口は13.2億人で、予測では中国の人口は15～16億人に増加する。従って、中国のエネルギー消費量は今後一定期間その勢いからして必ず引き続き増加するであろう。

中国の将来のエネルギー消費の増加を考慮すると、中国の国土が広大であることがもたらす交通運輸のエネルギー消費の影響の要因も考慮が必要となる。米国の一人当たり平均のエネルギー消費量は日本のおよそ2倍で、その内の一つの重要な要因は米国の国土が広大なために大きな交通運輸のエネルギー消費をもたらす、米国交通

運輸のエネルギー消費量は米国エネルギー総消費量の三分の一を占めるが、日本はわずか四分の一を占めるだけである。比較に基づくと、中国、米国、カナダ、オーストラリア等の国土が広大な国のその単位当たりGDPの貨物交通運輸回転量（トン・キロ）に対する必要量はとても高く、日本、欧州等の国の約3～4倍で、これによって大きな交通運輸エネルギー消費量をもたらしており、この要因も勢いからして必ず中国の将来のエネルギー需要に対して影響をもたらすであろう。

我々は次のような将来分析を行った。2030年前後に、中国人の一人当たり平均のGDPが1万ドルに達し、その一人当たり平均のエネルギー消費量が、先進国が1万ドルに達したときの4トン（標準石炭換算）の水準に達したと仮定すると、そのとき中国の人口は15億に達しており、そうすると中国の一次エネルギー消費総量は60億トン（標準石炭換算）に達することになり、これはかなり大きなエネルギー消費量である。現在全世界の一次エネルギー消費総量は160億トン（標準石炭換算）に達していないのである。

中国のエネルギー資源の総量はある程度豊富であるが、中国は人口が多いため、一人当たり平均のエネルギー資源保有量は世界の平均水準をはるかに下回っている。しかも、中国のエネルギー資源は石炭を主としており、石炭を主とするエネルギー生産と消費の構造はかなり長い期間根本的な変化は生じないであろう。石炭を主とする構造は中国のエネルギー効率の向上、汚染物排出の低下及び気候変化への対応に対し、厳しい課題に直面することになる。同じ発熱量を発生するには、石炭を消費して発生する二酸化炭素の排出量は石油より20%高く、天然ガスより40%以上も高い。

この他、中国の石油埋蔵量の制限から中国の石油生産のピークはおおよそ2億トンの水準であるが、将来交通運輸量の増加にともない、中国の交通運輸燃料に対するニーズは連続的に増加し、石油輸入の依存度はいっそう高まり、石油安定供給に対する課題はさらに大きくなるであろう。

要するに、将来の中国エネルギーの発展はエネルギー安定供給と気候変動に対する厳しい課題に直面する。中国は新しいタイプの工業化の道を歩み、節約を優先する政策を維持して、あまり高くないエネルギーの伸びで、経済社会発展の需要を満たすであろう。現在及び今後のかかなり長い期間、中国のエネルギー供給は依然として石炭を主とすることになり、石炭のクリーン技術の開発・応用を第一に置かなければならない。中国の将来のさらに長期のエネルギー需要を考慮すると、多元化の戦略を遂行すべきであり、エネルギーの増加分は主として核エネルギーと再生可能エネルギーによるようにすべきである。

3 核エネルギーの役割と地位

エネルギー多元化、クリーン化遂行の戦略において、核エネルギーは極めて重要な役割を果たす。核エネルギーは現在、化石エネルギーを大規模に代替できる最も希望の持てる一次エネルギーであり、中国のエネルギー供給の安定を保障する有効な方法である。

核エネルギーがクリーンなエネルギーであることは共通の認識となっており、原子力発電所はSO₂、NO_x、煙塵を発生することがなく、またCO₂も発生することがなく、都市の大気環境に有利である。特に、地球の気候変動への対応はすでに世界が直面する重大な課題となっており、核エネルギーはCO₂排出減少に対して重大な貢献を果たすことができる。

現在世界全体で30カ国が442基の原子力発電所を擁しており、原子力発電のユニット容量は367GWで、原子力発電のユニット容量は発電総容量の11%を占め、世界の原子力発電量は総発電量の17%を占める。

原子力発電はすでに安全で、信頼のできる成熟した発電技術となっている。過去数十年来、原子力発電所はすでに膨大な運転の経験を積み重ねており、原子力安全の啓蒙と重大事故に対応する防御体系確立の面ではいずれも極めて大きく改善されている。過去の十数年、原子力発電所の運転率の向上は著しく、約30%向上しており、多くの国の運転率はすでに90%以上に達し、全世界の原子力発電所の運転率はすでに82%前後に達している。

原子力発電は経済的競争力を有している。2000年の米国原子力発電の平均発電コストはわずか1.74セント/kWhで、すべての発電技術の中で最低のコストであり、英国、フランスの状況も同程度である。これは大多数の運転中の原子力発電所が元金返済利息支払期をすでに過ぎており、この部分のコストが原子力発電所初期発電コストのおよそ60%前後を占めるためである。即ち、現在の原子力発電所のコストは初期のわずか40%前後だけである。

ウラン資源は国際的に一種の準国内資源であり、国のエネルギー安定供給を保障する有効な方法であると見なされている。原子力発電のコストにおいて天然ウラン燃料の発電コストにおける比率は小さく、価格の影響は小さい。天然ウランはエネルギー密度が高く、100万kW原子力発電所1基の毎年の天然ウラン必要量はわずか180トンであるが、同様規模の石炭燃焼発電所では、石炭の消費量は300万トンである。輸送と貯蔵のための施設の費用と貯蔵管理の費用も極めて低く、国際市場が有利な状況の下においては、天然ウランを大量に購入し、戦略的備蓄に用いることも可能であり、突発事件に対応することも可能である。

2001年5月にブッシュ米大統領が発表したエネルギー政策、2000年11月にEU委員会が発表したエネルギー安定供給の緑書及び2001年欧州議会の決議は、いずれも核エ

ネルギーの温室効果ガス排出減少、及び国のエネルギー安全保障での重要性を強調している。米国、EU、日本などはいずれも核エネルギーをエネルギー安全保障と温室効果ガス排出減少の重要な選択としている。

4 中国核エネルギー開発の現状と展望

中国の2007年の電力総ユニット容量は7.13億kW、電力総消費量は32632億kW時、一人当たり平均の電力消費量は2472kW時で、世界の平均水準である3100kW時を下回っており、OECD諸国の平均水準である9400kW時のわずか26%にすぎない。中国の電力生産の一次エネルギー供給源は同じように石炭を主としており、その内、石炭燃焼発電は82.9%を占め、水力発電は15%を占め、原子力発電はわずか1.9%でしかない。これはその他の国と比べて比較的大きな差がある。世界の平均水準では、石炭が46%を占め、石油が7%、天然ガスが20.1%、水力が6.2%、核エネルギーが17%を占めている。

現在、中国ではすでに11基の原子力発電所が運転に投入されており、総ユニット容量は910万kWで、主として広東、浙江、江蘇等の東部沿海地区に位置し、経済的競争力を有しているが、中国の原子力発電量は全国総発電量のわずか約1.9%を占めるだけで、世界の17%という平均水準と比べてその差は極めて大きい。この他、現在中国には複数の自主設計、自主建造の原子力発電所が建設中である。中国は100万kW原子力発電所を設計、建造する能力をすでに有しており、また核燃料サイクルの整った工業体系も初歩的には確立しており、核エネルギーを大規模に発展させる基礎を有している。同時に、中国はまた米国ウェスティングハウス社が研究開発した非能動安全特性を備えた改良型加圧水型原子炉AP-1000及びフランスAREVA社が研究開発した欧州改良型加圧水型原子炉EPRを含む国外の先進的な第三世代の原子力発電技術を導入し、建造している。AP1000は第三世代の原子力発電技術であり、第三世代の原子力発電技術は第二世代の原子力発電運転の経験と成熟した技術を吸収し、数十年来の科学技術の進歩の成果を十分に採用し、現在の新しい安全法規に従って設計したものである。安全性を高めるため、第三世代の原子力発電技術は重大事故の予防と緩和を設計基準とするとともに、重大事故に対する格納容器を備えている。非能動安全設計の理念を採用し、原子力発電所の安全設計に革命的な変化をもたらしており、さらに安全に、さらに簡略化され、さらに経済的になっている。

中国政府はかつて、中国の原子力発電所ユニットを2020年までに4000万kWに達するようにする、その時点において、原子力発電は全国電力量の4%を占めるようにするという計画を提出している。しかしここ数年の中国の電力需要増加はかなり急速で、2007年末、中国の電力量はすでに7.13億kWに達しており、2010年には10億kW

に達する可能性が極めて大きい。中国は原子力発電所の建設を加速させており、2020年までに中国が完成させる原子力発電所ユニットはそれまでに提出した4000万kWの目標を大きく上回るであろう。もし核エネルギーが中国のエネルギー構成の中で比較的大きな役割を果たすよう我々が希望するのなら、中国は原子力発電開発の規模を大きくすべきで、2050年までに原子力発電量が総発電量の30%以上を占めるようにするよう努力すべきである。原子力発電を増加分に当てるとすると、相当する原子力発電は4億kWを超えることになるが、これは現在の全世界の原子力発電量を超えることになる。

中国の原子力発電開発の技術は、導入、消化、吸収と新たなイノベーションという発展の過程を歩んでおり、国際的な先進技術を導入し、自主的技術革新を奨励し、原子力発電所の自主設計と自主建造を実現していて、大部分の設備は国産である。現在中国は目下世界で第三世代の原子力発電となっているAP1000技術を導入しているところであり、自主的知的財産権を有する原子力発電技術を最終的に保持しようとしている。

中国の2020年国家科学技術発展要綱は、「大型の改良型加圧水型原子炉と高温ガス冷却型原子炉」を16項目の重大特別項目の一つに挙げるとともに、実施のための組織作りを開始した。中国はAP1000原子力発電技術の導入と

その先進技術を完全に手にすることを基礎として、国家研究開発計画を実施し、次世代の改良型原子炉タイプの自主的技術革新を推進し、出力がさらに大きい大型非能动安全技術を採用して原子力発電所設置技術を改善及び開発し、中国が知的財産権を持つようにしようとする。

この重大特別項目において、中国はモジュール型高温ガス冷却型原子炉を自主的に研究開発することになっている。モジュール型高温ガス冷却型原子炉は一種の固有の安全特性を有する改良型原子炉タイプで、先進的な被覆顆粒燃料を採用し、優れた高温特性を有し、第四世代超高温ガス冷却型原子炉の基本的特性と技術的基礎を有しており、高い効率で発電できるだけでなく、熱分解で水素を製造することが可能である。

中国はモジュール型高温ガス冷却型実験原子炉1基の建造に成功しており、モジュール型高温ガス冷却型原子炉のかぎとなる技術をマスターしており、これを基礎としてモジュール型高温ガス冷却型原子炉モデル発電所を自主的に研究開発及び設計することにしており、計画では2013年に建造が完成する。

要するに、中国が将来核エネルギーを大規模に発展させ、それがエネルギー構成で重要な役割を占めるようにすることが、中国のエネルギーの持続可能な発展の重要な礎石となる。

中国の先進原子力技術開発に力を注ぐ -中国原子能科学研究院の紹介

•Profile•



柳 衛平 Liu Weiping ●中国原子能科学研究院 副院長

1962年生まれ、1983年北京大學技術物理系本科卒業、1998年中国原子能科学研究院博士卒業。現在は中国原子能科学研究院副院長、研究員、博士候補指導教員を担任。1987年～1989年日本理化学研究所滞在。1989年～1996年中国原子能科学研究院副研（1992年）、研究員（1996年）。1996年～1998年ドイツGSI重イオン研究センター滞在。1998年～2005年中国原子能科学研究院博士候補指導教員（1999年）、所長（2000年）。2000年～2006年北京タンデム加速器核物理国家実験室副主任。2005年～現在 中国原子能科学研究院副院長

中国初の二次イオンビーム実験装置を完成し、中国において放射性イオンビームを利用し宇宙核物理研究の新たな分野を開拓発展させ、総合レベルを当時の世界の同類装置レベルにまで達成。その装置と国際協力を結び合わせ、システムを宇宙核物理と放射性イオンビーム物理研究作業に展開させることで、実験方法と理論分析において独特な研究路線を形成。

カナダと日本の宇宙核物理国際協力実験のスポンサー、中国核物理学会副主任委員、日本理化学研究所核物理学会委員と国際純粋・応用物理学連合専門委員会委員を担当。国際会議諮問委員会委員を多く歴任。

SCI論文を30編ほど発表、8編の代表的な論文は80回余り被引用。1996年に香港にて傑出青年学者賞、1996年国家科技进步二等賞を受賞。国家傑出青年基金資金援助を取得。

一、原子能院の基本情况

中国原子能科学研究院（以下、「原子能院」と略称）は1950年に創立された。これまで中国科学院、第二機械工業部、核工業部の下部組織であったが、現在は中国核工業集团公司の管轄下にある。

原子能院は中国核科学技術の発祥地であり、先導性、基礎性、先見性のある核科学技術の総合研究基地でもある。現在、従業員は約3200人おり、その内両院院士（中国工程院および中国科学院に選ばれた院士）4人、博士候補指導教員約80人、高級科学研究・エンジニア約900人である。呉有訓、銭三強、王淦昌、戴傳曾、孫祖訓、樊明武など著名な科学者が院長を歴任しており、現在は趙志祥研究員が院長に任命されている。原子能院は中国核科学技術工業システム確立に対して歴史的に貢献をし、科学技術分野の中核人材を数千名送り出しており、中国科学院と工程院院士のうち、約60人が原子能院の経歴がある。

また、原子能院は核物理研究所、原子炉工学研究設計所、放射化学研究所、同位体研究所、核技術応用研究所など5つの研究所がある。その下部組織としてタンデム加速器改良工務部、タンデム加速器改良工務技術部、中国高速実験炉工務部、中国先進研究炉工務部、核燃料後処理放射化学実験施設工務部、放射線計測測定部、放射線安全研究部など工務部と研究部を設置している。原子能院の民間産業には原子高科股份有限公司などの実体産業がある。

原子能院は1958年に中国初の原子炉と加速器を建設した。二十世紀70-80年代に入り、原子能院は国家原子力および産業応用発展の必要に応じ、重水炉の大改修を実施し、タンデム加速器を取り入れ、放射性同位体生産ラインを建設し、30 MeV大強度陽子加速器を開発した。ま

た、中国核データバンク、北京タンデム加速器核物理国家実験室、核工業核保障重点実験室、中国国家原子能機構(CAEA)放射線一級測定拠点、国家同位体工学技術研究センター、高速炉技術研究センターなど重点実験室を組織した。核データ測定と評価、重イオン核物理実験、保障措置、後処理先進技術、放射性廃棄物処理処置、熱・高速炉原子力発電技術、放射線測定など新たな重要科学研究の分野を開拓し、重要な原子力科学研究を遂行した。同位体と放射線技術を中心とする核技術応用作業を展開し、民間用製品プロジェクトの開発により、大規模な民間用製品の生産を始め、原子力発電の順調なスタートと中国核科学技術の全面的な発展推進のために重要な役割を果たした。現在、中国高速実験炉(CEFR)、中国先進研究炉(CARR)、核燃料後処理放射化実験施設、タンデム加速器改良工事(BRIF)など四大科学プラットフォームを建設している。

二、原子能院の先進原子力技術の研究開発状況

1. 中国原子力開発における立場

中国政府は原子力開発を、今後のエネルギー源構成を改善する重要手段と見なしており、2020年前後に原子力発電の最大出力を4000万キロワットにする計画を打ち出している。近いうちに原子力発電の最大出力をより大規模なものに調整する。これは中国政府が原子力発電の政策を「適度な成長」から「強大な成長」に移行したことを示している。中国の原子力は自主開発と外国との協力を共存させる技術路線を歩んでいる。

中国の原子力は加圧水炉 - 高速炉 - 核融合炉の三段階戦略である。原子能院の自主研究開発と導入・消化・吸収・再創造により、上述の戦略に先進の高速炉技術と中国国情に合った核燃料サイクルの技術サポートを提供し、中

国の原子力科学技術を徐々に世界トップレベルに押し上げている。

2. 核燃料サイクル技術

原子能院の核燃料サイクル技術は主に、核化学と放射化学、原子炉使用済み核燃料後処理技術、放射性廃棄物処理処置、分析化学、保障措置技術の5つの研究分野に分かれている。また、核燃料サイクルと原子力発電サービスの基礎研究と応用研究、保障措置技術研究、院内廃棄物処理技術サービス、民間技術開発と民間用製品生産などの任務を担っている。さらに、核燃料後処理プラットフォームである、放射性廃棄物処理処置研究センター、放射分析化学センター、保障措置検証技術CAEA-IAEA共同研究センター、核化学と放射化学研究センターを持っている。2011年完成予定の核燃料後処理放射化実験施設はより完備された後処理技術研究条件を提供している。

核廃棄物処理処置研究分野において、原子能院が展開する作業には、高レベル放射性廃棄物処理処置、低中レベル放射性廃棄物処理と核施設閉鎖などの分野の研究がある。ガラス固体化、人工岩石固体化冷却台などの装置を順に建設し、核種遷移と鍵となる核種の化学変化研究と後処理設備の高効率な除去剤の調剤研究を展開した。現在、主に廃棄物深地層処理水溶液化と高レベル放射性廃棄物深地層処理界面化学などの研究を行っている。

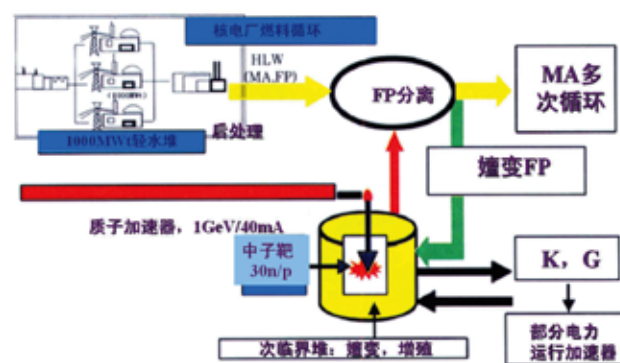
保障措置技術試験室を通し、政府の核原料規制の法律法規及び国際核拡散防止と保障措置に関する合意履行要求に基づいた核原料規制技術研究を展開している。主な内容として、核原料バランスと制御技術、非破壊分析技術、実物保護技術と関連する環境モニタリング技術がある。

3. 先進の放射性廃棄物核変換技術「ADS」の研究開発

加速器駆動核変換システム（以下、「ADS」と略称）は放射性廃棄物を核変換するのに最も潜在力のあるツールである。ADSの研究開発は加速器、原子炉物理、核物理、材料科学、核化学など多くの学科を集つめ1つとした総合的なシステム作業といえる。原子能院は中国科学院高エネルギー物理研究所と協力し、ADSのコンセプト研究と基礎研究を完成させており、現在すでにキーテクノロジーを取得している。加速器と原子炉を組み合わせたADS未臨界実験装置「啓明星一号」を世界に向けて提案し完成させた。自主設計で完成させた中国初の高周波四重極加速器(RFQ)は世界トップレベルにある。さらに、中国初のADS中性子学研究専用コンピュータソフトウェアシステムを確立し組み合わせることで、ADS工学コンセプトの最適化計算プログラムを展開した。

4. 原子炉工学技術

原子能院は中国の原子炉建設事業のスタートと発展に重要な貢献を果たした。軽水、重水、高速中性子、固体ゼロ出力炉と49-2プール型原子炉を自己開発し順に完成させた。また、重水研究炉を大改修し、その効率を倍に向



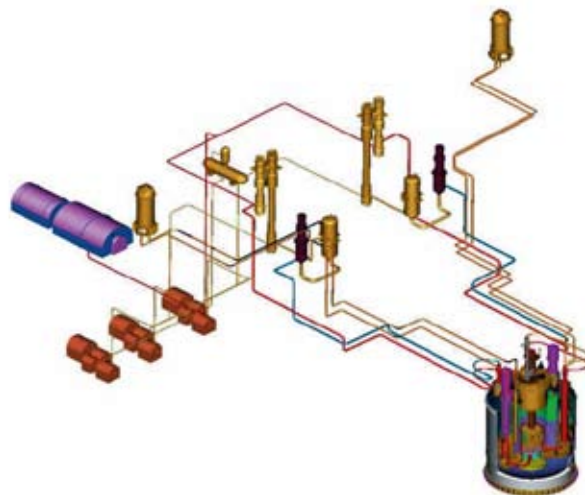
◎図1 加速器駆動核変換システム(ADS)の説明図

上させ、さらに超小型中性子源原子炉を自己開発した。中国の原子力発電所の自主設計建造と運営のために自主技術に基づく科学研究作業を数多く完成させた。

現在、原子能院には大型研究炉2基、超小型炉1基、各種炉内試験回路と炉外総合実験台、大型ホットセル、各種核原料試験、検査装置がある。さらに、完備された原子炉物理計算、原子炉熱流動分析計算、構造力学計算および核安全と事故分析プログラムを持っている。それ以外に、現在建設している中国先進研究炉(CARR)には中性子散乱と中性子活性化回析装置、炉内試験回路、多機能ホットセルグループなどが配備される。これは原子能院にとって最新で、さらに多機能な原子炉建設の総合的な研究実験プラットフォームとなる。

5. 高速炉技術

原子能院は中国唯一の高速炉技術開発機構である。建設中の中国高速実験炉(CEFR)建設は中国科技部「863」ハイテク開発計画エネルギー源分野で最大の科学建設プロジェクトであり、その熱出力は65MW、電気出力は20MWである。CEFRはナトリウム-ナトリウム-水(蒸気)の三回路システムがあり、その内の1つは一体型プール構造、その他二つは2ループ並列で運転している。その各ル-



◎図2 中国高速実験炉(CEFR)核心部分の説明図

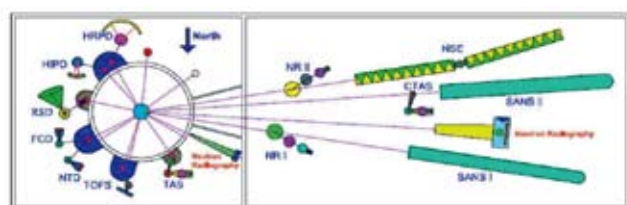
プにそれぞれ一次回路用主循環ポンプ1台、二次回路用主循環ポンプ1台、中間熱交換機2台、蒸気発生器1台が設置されている。また、CEFRには蒸気タービン発電機1台設置されており、最大出力は25MWとなっている。高速炉原子力発電システムにより、ウラン資源の利用度を加圧水炉発電所の約1%から60%-70%まで向上させることができる。これは中国の原子力の持続的成長のための基礎を築くことになる。2009年9月に臨界状態が実現する。

6. 中国先進研究炉および研究プラットフォーム

中国先進研究炉(CARR)は重水減速軽水冷却の原子炉、関連する補助システムと実験施設が組み合わさった大型原子炉システムである。CARRの推進効率は60MW、中性子束は 8×10^{14} n/cm²/sである。これはアジアで最も先進的で、安全・信頼性が高く、ハイテク性能を備えた多用途な研究炉であり、完全な自主的知的財産権を持っている。CARRは中国の核科学研究に重要な科学実験プラットフォームを提供し、中国の核科学技術全体の实力とレベルの重要な里程標といえることができる。その運転開始は必ず中国の核科学技術分野の基礎研究能力および原子炉工程試験技術の総合力を最大限強化し、中国の原子力と核技術開発と応用を推進・促進するものとなるであろう。2009年5月に臨界状態が実現する。

原子炉炉心と重水反射層内に、異なる用途の垂直管と水平管およびそれに組み合わせる中性子束応用設備計器を設置することで、原子炉が発生する強い中性子束の流れを十分に利用し、中性子散乱実験、放射性核種放射生産、イオン化放射線計測標準、原子力開発研究および中性子活性化分析など行うことができる。同時に、各類核燃料素子、原料および同位体輻射試験と生産を展開することができる。

その中でも、中性子実験室はすでに中国科学院およびスウェーデン、ドイツと米国など多くの科学研究機関と密接な協力関係を確立している。さらに、高分解能粉末中性子回折装置(HRPD)、高強度粉末中性子回折装置(HIPD)、残留応力回折装置(RSD)、中性子4軸回折装置(FCD)、中性子構造回折装置(NTD)、中性子3軸回折装置(TAS)、中性子小角散乱回折装置(SANS)、中性子反射回折装置(NR)、冷中性子ラジオグラフィーと熱中性子のラジオグラフィー (Neutron Radiography)など回折装置10台を製作する。これらの回折装置はナノ材料の構造分析と材料工学の応力分析の重要な道具となるであろう。



◎図3 中国先進研究炉(CARR)中性子回折装置の配置図

7. 核技術の応用

原子能院は中国の重要な核技術応用研究開発基地である。加速器の開発、高出力レーザーの応用、核探索技術の開発、ネットワークと観測制御工学などの分野で中国をリードするレベルに達しており、大強度陽子加速器、大出力の照射用電子加速器、工業用探傷検査電子加速器、コンテナ検査電子加速器、爆発物検査システムなどの大型装置を設計開発してきた。さらに、焼却灰分析、厚度測定など工業転用可能な核計器と電力電気部品、恒温箱、使い捨て電気針などの製品を開発し、科学研究、開発、生産とサービスを一体化した。

核四重極共鳴技術を利用し、中国で初めてのゲート式爆発物検査システムのサンプル機や郵便物爆発物検査システムの開発に成功した。車載爆発物検査システム、郵便物爆発物検査システムと放射性物質検査システムなどのテロ対策設備は2008年北京オリンピックの際に大いに貢献できた。



◎図4 爆発物検査システム

原子能院の関係会社である原子高科公司是、核应用技术の産業化に力を注いでいる。放射性同位体技術応用分野で、現在中国最大規模であり、製品範囲が最も広範である放射性同位体総合開発能力を持つ生産基地は、体内診断と治療用放射性医薬品、体外免疫分析試薬セット、各種放射源などの製品を大量生産することができる。放射線技術応用分野で、自己遮蔽型電子滅菌加速器システム、高エネルギー大出力の照射用加速器、非破壊検査用の電子直線加速器、コバルト60線源照射用装置およびコンテナ検査システムの核心技術と専門設計と製造能力を持っている。

8. タンデム加速器実験室と核物理研究

北京タンデム加速器核物理国家実験室は中国の主要な低エネルギー核物理研究基地である。ここは主に核データ測定、核反応応用と核構造の基礎研究、核技術応用基礎研究と学際的研究を展開している。実験室は一般開放モデルとして運営と管理を行っている。

実験室の主要設備には、大型静電式タンデム加速器1台と実験端末設備13台ある。この加速器はイオン交換が迅速かつ容易に行え、エネルギー流束が正確で信頼でき、

連続的な調整ができるなど数多くの優位点があり、現在中国において核物理基礎研究、核データ測定と電子部品の抗放射線補強模擬試験など核技術応用に最も適している大型加速器といえる。2012年に完成するタンデム加速器改良工事はこの基礎の上にさらに高エネルギーの陽子と中性子流束および多核種のイオンビームを提供することができる。

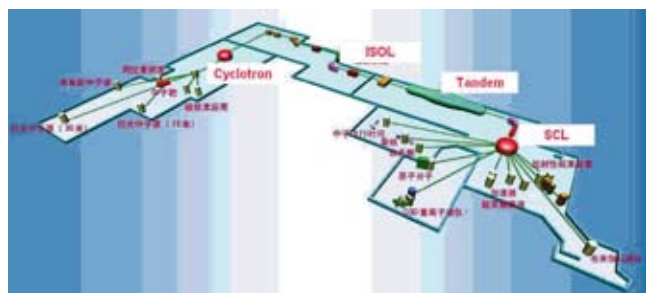


図5 タンデム加速器改良工事の説明図

この20年、タンデム加速器は約50の研究機構、約300の課題に対し60種類もの重イオン流束を提供し、その流束時間は合計6万時間にも上り、重大な科学研究成果を得ることができた。実験室は核データ測定と評価、核技術の応用、放射束物理と核天体物理などの分野において、システム研究作業と国際協力を結び合わせることで、中国において低エネルギーで安定したイオンビームと放射性イオンビームを利用し、核物理および学際的研究の新たな分野を開拓し発展させ、実験方法と理論分析において独特な研究路線を形作ることで、国際的に一定の地位を占めることができた。

中国原子力エネルギーの開発動向及び先進原子炉評価法

•Profile•



周 志偉 ZHOU Zhiwei ●清華大学原子力及び新エネルギー技術研究院原子炉工程研究所副所長

清華大学原子力エネルギー及び新エネルギー技術研究院原子炉工学研究所副所長、教授。中国国家磁場閉じ込め核融合専門委員会委員；中国教育部磁場閉じ込め核融合研究センター学術委員会委員；《原子エネルギー科学技術》期刊編集委員；中国全国原子炉熱流体専門委員会委員。1957年中国重慶市に生まれ。1996年、チューリッヒスイス連邦理工大学(EHTZ), 機械学院にて技術科学博士学位取得 (D.Sc.Tech)。1989年、清華大学、核反応炉工程及び安全コースにて工学博士学位取得。近年主な研究：融合炉ヘリウム冷固体産ヘリウムコーティング及び融合核分裂混合炉コーティング物理熱工概念設計；加圧水型炉原子力発電所における重大事故と水素の危険性分析；先進原子炉評価方法；高温気冷却炉模擬機の中性子動力学および熱工流体のリアルタイム模擬方法。

要約：

近年の中国原子力発電の急速な市場ニーズ拡大に基づき、中国原子力発電の持続的成長のための方向性及び技術開発の動向について議論した。まず、中国原子力発電業界の主要な専門家に幅広く意見を聴取し、中国原子力発電の成長のために最も関心を寄せるべき問題への見解を総合して、独自の評価基準を打ち立てた。また、階層分析ファジー総合評価法、ボルダールール法などの総合評価法を採用し、中国の原子力発電工業が採用することのできる先進原子炉について詳細な研究及びシステム評価を行った。その評価結果に基づき、各種先進原子炉の具体的特性について分析、比較、総括を行った。その結果、中国が原子力発電を積極的に成長させる必要性、長期的に持続可能な成長戦略、現在の課題と展望が明らかになった。

1. 概要

21世紀がに入りグローバル化が日々進展していく中、持続可能な成長を追及することはすでに人類の共通認識となった。世界経済の持続可能な繁栄および成長には、廉価で環境に優しく、規模が大きくエネルギー密度の高い一次エネルギーが長期的に供給されることが必要である。原子力工業は半世紀余りの成長の歴史の中で、無から有に至り、繁栄から衰退に及ぶという世の変転を経験している。しかし、人類が化石資源に過度に依存した結果今まさに地球環境を決定的に破壊してしまうかもしれないという未曾有の危機のもとで、原子力エネルギーはその優れた技術と良好な運用経験によって再生の機会を得た。世界原子力エネルギー工業の全面的な復興は今中国から全世界に静かに広がり始めている。

中国経済は1978年の改革開放以来、すでに30年にわたり急速な成長を続けている。おそらく2008年末までに中国経済総生産量は、ドイツを抜き世界第三位となるであろう。その中国経済の急速な成長は中国エネルギー工業の空前の成長に強力に支えられてきた。2004年から中国は世界第二の大エネルギー生産国となり、同時に第二の

大エネルギー消費国となっているのである。

2007年中国は23.7億トン（標準炭換算）の一次エネルギーを生産し26.5億トン（標準炭換算）を消費して、ともに世界第2位となった。そのうち石炭の生産量は18.2億トン標準炭(25.5億トン原炭換算)以上、消費量は17.89億トン標準炭以上であり、すでに長年連続して世界第1位で全世界石炭消費総量の27%を占めている。原油の生産量は約1.84億トン、消費量は約3.50億トンでそれぞれ世界第2位と第5位である。発電設備容量はすでに700GWeを超え、発電量は32777.2億kW/hで、世界第2位で安定している。そのうち水力発電設備容量は148GWeで世界第1位であり、原子力発電設備容量は9.08GWeに達し、総設備容量の約1.27%、発電量約1.9%を占めている。2008年末までに中国の発電設備容量はすでに800GWeに達しているだろう。中国の個人平均エネルギー消費量（1.85トン標準炭/人）は依然世界平均（2.33トン標準炭/人）よりも低いが、中国のエネルギー消費総量と石炭を主とする一次エネルギー構造（60%～70%）は間違いなく主な地球温暖化ガス放出源の一つである。そこで、中国のエネルギー構造の改善に対して中国政府は強い関心を寄せている。すでに中国は原子力発電及び再生可能エネルギーの成長に力を入れ、風力発電および太陽エネルギーなどの新エネルギーを早急に成長させることを、中国が今後数十年間にわたり温暖化ガス放出を減らしエネルギーの持続的な供給を可能とするための重要国策としている。中国は十数年という年月をかけて多くの千万キロワット級の風力発電所を建設してきたが、これによって2020年には風力発電設備規模約1億kW^[1]が達成されるであろう。また、あわせて原子力発電設備容量約60GWeも達成されるであろう。

中国の『863エネルギー技術領域研究作業の進展』^[2]のエネルギー予測によると、中国原子力エネルギーの発電容量は2050年には今までのおよそ9GWeから240GWeにまで成長する可能性があるという。このことから、今後50年間中国は非常に大きな原子力発電の潜在市場であることが分かる。1986年から中国は863ハイテクノロジー研究成長計画を開始し、徐々に下記のような中国特有の原子

力エネルギー技術路線のアウトラインを形成してきた。すなわち、短期的には主に加圧水型炉原子力発電所を成長させ、総発電容量に対して原子力発電が占める割合を急速に拡大させる。中長期的には高速炉及び超高温炉を主とする第四世代原子力エネルギーシステムを成長させる。長期的には核融合炉及び加速器駆動という次世代臨界炉技術に基づく新型原子力エネルギーシステムを成長させるというものである。

現在の商用原子力発電技術の成熟性の分析によると、中国でこれから2020年まで、ひいては2035年までの間に建設される原子力発電所は主に加圧水型炉原子力発電所であるとされている。2015年以降生産を開始する原子力発電は技術が成熟しており、経済性、安全性が良好であり、放射性物質も少なく、拡散防止能力の高い新世代の先進加圧水型炉を主に採用するであろう。従って、中国の国情に基づき客観的全面的に現在の原子力発電新技術を評価することは、将来の原子力発電原子炉の科学政策体系を選択確立することにおいて特別重要な意義を持つものであるといえる。ただし、本文は筆者が2002年から2004年の間に完成させた先進原子炉評価に関する独自の研究を記したものであり、当時中国政府組織によって開始されたばかりの第三世代先進加圧水型炉原子力発電所の技術評価作業とは関連しない。

2. 評価方法

先進核反応炉評価を行うために、まず簡単、明確、独立、操作可能という原則に基づき先進核反応炉評価指標を選出した。それから一定数の中国原子力エネルギー界の専門家の意見を聴取して分析し、安定した評価基準^[3]を創出して専門家評価分析表を作成した。その後専門家評価分析表の採点により統計処理を行って各指標の重要因子を確定した。それから選択的方策評価方法を採用し必要な演算処理を行い、数量化された評価結果を得た。評価方法の固有特性は評価結果に影響を及ぼすため、不確実性総合評価法および不確実性Borda数評価法を取り入れて比較研究を行った。

2.1 階層分析 (AHP Analytical Hierach Process) 法による各指標加重値設定

AHP法を採用し問題を2つの階層と若干の指標に分け、各階層で一定の準則にのっとり該当階層要素に対して2つずつ比較を行う。それから標準度定量化に基づき判断マトリックスを形成する^[4]。その後判断マトリックスの最大特性値と対応する直交化特性ベクトルを計算し、該当要素の該当準則に対する加重値を導き出す。階層分析法の主な階層は下記の通りである。

(1) 構造判断マトリックス。同一段階の各指標の相対重要性の判断値を用いた構造判断マトリックスである。各指標の相対重要性は専門家による評価分析の平均値に

より確定し、9つの相対重要比例標準度(9, 7, 5, 3, 1, 1/3, 1/5, 1/7, 1/9)、及び表示(きわめて重要、大変重要、重要、やや重要、普通、あまり重要でない、重要でない、ほとんど重要でない、全く重要でない)を採用する。隣接する評価の中間値は8,6,4,2,1/2,1/4,1/6,1/8を取り、相互反判断マトリックス $\mathbf{B}$ を構成する。

$$\mathbf{B}=(b_{ij}) \quad (1)$$

マトリックス中の要素 b_{ij} は指標 i と指標 j の比較の重要性を示しており、かつ以下の通りである $b_{ij}>0$, $b_{ij}=1$, $b_{ij}=1/b_{ji}$

(2) 単一準則下での相対加重を計算し、 n 個の要素 $\mathbf{B}_i$ ($i=1, 2, \dots, n$) 加重ソートを確定して、 n をマトリックス段階数とする。それから判断マトリックス $\mathbf{B}$ 対応の特性方程式で解を求め、最大特性根を $\lambda_{\max}$ 、その特性ベクトル $\mathbf{W}$ とする。すなわち、以下の通りである

$$\mathbf{B}\mathbf{W}=\lambda_{\max}\mathbf{W} \quad (2)$$

これによって得た $\mathbf{W}$ を正規化し、同一段階の相応の指標の該当準則の下での加重ベクトルとする^[5]

(3) 判断マトリックスに対し一致性検査を行い、判断マトリックスの不一致程度の指標 CI を下記の通りとする

$$CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1) \quad (3)$$

CI の値が小さいほど、判断マトリックス $\mathbf{B}$ の一致性は良好である。一致性を保証するためにランダム一致性パラメーター RI を導入し、ランダムにサンプル値を抽出して算出したいいくつかの判断マトリックスの一致性指標平均値を得る。判断マトリックス $\mathbf{B}$ の備える十分な一致性参考準則比例値は下記の通りである

$$CR=CI/RI<0.10 \quad (4)$$

ランダム一致性指標の値については、専門の表で調べることができる^[6]

2.2 ファジー総合評価法

ファジー総合評価法はメンバ関数を最大の仲立ちとし、不確定性の形式を転化して確定性とし、あいまいさを定量化して従来の数学の方法で分析、処理を行えるようにするものである。直接観察のため本研究ではファジー総合評価法を最終単純値化し、評価集合を割り当てる。不確実性総合評価法の基本計算工程は下記の通りである。

(1) 評価集合の設定： $V = \{\text{よくない, 普通, 比較的良好, 良好, 非常に良好}\} = \{V_i\} \rightarrow (60, 70, 80, 90, 100)$ 、原子力発電原子炉の最終評価結果は評価集合に対する各評価要素の従属度を表す。

(2) 評価指標集合の設定： $U = \{U_i\}$ 、AHP法及び専門家の

評価分析表の結果を用いて評価指標集合の各指標の加重分配ベクトルAを確定する。

(3)単要素不確実性評価マトリックスの計算： $R = (R_{ij})$, R_{ij} は評価対象の第技術指標 U_i が評価集合の第j属性 V_j の従属度で現され正規化されたものである。先進核原子炉の指標の複雑性から具体的な不確実性分布を確定することが難しいため、専門家の評価判断法を採用することが比較的適している。それから有効な独立コンサルティング次数をkとし、 y_{ij} を U_i のために評価される V_j の次数とする。すなわち、 $R_{ij} = y_{ij}/k$ であり、専門家の評価分析表の結果を用いて統計を得ることができる。

(4)内積合成により $B=AR$ と結果Bの正規化 $\bar{B}_j = B_j / \sum_k B_k$ を演算して不確実性総合評価の結果を得ることができる。そして、評価集合設定の分数を用いてすべての評価対象の総合評価ブランチ値Mを計算する。それから総合ブランチ値Mの大きさによりソートを行い、総合性能の最も良好な先進原子力発電原子炉を選出する。

2.3 ボルダールール法

ボルダールール法は、従来のボルダー方式に評価値を基礎とする委託群体効用関数分析方法を採用したものをベースに成長させた新しい方法である。この方法は評価対象における各準則の評価の優劣序列関係を強調したものであり、評価中の突出した強項要素の地位に有利となる^[6]。その方法工程は下記の通りである。

(1)第2級指標において、すべての評価対象 x_j ($j=1,2,\dots,N$)を求め、「優」の従属度に属する

$$u_y = G_i(x_j) / \max \{G_i(x_j)\} \quad (5)$$

(2)下記数式でファジー頻数統計表を形成する

$$f_{hj} = \sum_{i=1}^m \sigma_i^h(x_j) u_{ij} w_i \quad (6)$$

その中で $R_j = \sum_{h=1}^N f_{hj}$ 、かつ x_i が第i指標評価測定結果により優劣順序が第h位ならば、 $a_i^h(x_i)=1$ もしくは $a_i^h(x_i)=0$ である

(3) ファジー・ボルダ数 $FB(x_i)$ を計算し、その大きさから評価対象の優劣順序関係を導き出すことができる

$$FB(x_j) = \sum_{h=1}^N \frac{f_{hj}}{R_j} Q_h \quad (7)$$

ただし $Q_h=(N-h)(N-h+1)/2$ である。ファジー・ボルダ数 $FB(x_i)$ の大きさのソートを通して、最良の先進原子力発電原子炉を選出することができる。

3. 評価結果および分析

ここまで述べてきたとおり、近年の中国原子力発電は

加圧水型炉原子力発電所の成長を主体としている。そこで、現有の採用可能な加圧水型炉技術に対する全面的な評価を通して、中国のために優先的に成長した加圧水型炉原子力発電ユニットの方策を選択し、独立した技術評価を提供するということが本研究の課題である。分析結果はすでに以前発表した論文に詳細に述べており^[7]、本文では異なる規格の先進加圧水型炉原子力発電ユニットを評価するミクロの評価効能モジュールが与える専門家の評価結果について述べるにとどめる。評価の対象は以下の通りである。すなわち、中国百万キロワット加圧水型原子炉CPR1000、西屋/日立的非能動安全百万キロワット加圧水型原子炉AP1000、そして阿海法の160万キロワット欧州加圧水型原子炉EPRの3種の炉型である。

表1は、システム加重の計算結果（AHP法）であり、表2および表3は2種類の異なる評価計算方法の実際評価結果である。評価結果から、2種類の評価方法が異なるにもかかわらず、評価の結論は同様であることがわかる。すなわち、AP1000型原子炉が第1位、EPRは第2位、CPRは最下位なのである。具体的な指標から見ると、CPR1000型原子炉は総合順位は第3位だが、技術成熟性と自主化および国産化の二方面では第1位となっており明らかに優勢である。このほかにも経済競争性で第2位であり、EPRよりも優れている。この結果は近い将来自主化成熟技術の採用が求められれば中国において原子力発電が大規模に成長するであろうことを物語っており、このことからCPR1000を採用するのが最も現実的であると言える。AP1000は、技術成熟性と独自開発化および国内適応化の両指標で第3位であり、その他の指標の性能はすべて第1位である。少しずつ独自開発化および国内適応化を実現しているという観点から分析するならば、AP1000は最も成長の潜在能力を有している。2種類の評価方法から得た評価結果が一致していることは、専門家の異なる原子力発電炉に対する集体評価の意見を各方面から総合的に反映したものである。

4. 結論

いくつかの評価方法の詳細な紹介と比較を通して「先進核反応炉の評価」問題について多角的に観察することができたわけであるが、この結果先進原子力発電所の評価問題を解決する方法がより全面的、客観的および公正かつ有効なものとなった。このような方法は最新コンピューターソフトウェア技術とデータシステムによる先進核反応炉評価システムの重要理論の基礎に基づいて開発されたものである。依然詳細な研究が必要な以上の数種の評価方法は、中国の原子力発電市場及び環境が絶えず成長を続けるという特殊状況下での適用性と合理性を有するに過ぎないが、初歩分析の結果は相当合理的であり、政府専門機関及び原子力発電事業経営者が進める原子力発電プロジェクト政策の独立技術の参考になるであ

一級性能	一級指標加重	評価指数	二級指標加重
総体特性	0.151599	基本規格 配電需要充足能力 ユニット利用可能率 正常運行システムの信頼性	0.089795 0.084784 0.423918 0.401504
安全信頼性	0.322417	事故抑制能力 炉心損壊の防止 重大事故の予防 重大事故の緩解 特設安全システムの信頼性	0.279163 0.225921 0.198293 0.070702 0.225921
経済競争性	0.186952	基本建設投資 基本配電価	0.5 0.5
建設可能性	0.07119	建設周期 建設質量の保証 先進建設技術 モジュール化建設 工場用地適応性	0.341226 0.341226 0.108155 0.084475 0.124917
人間機械関係	0.066078	人間機械インターフェイス デジタル化コントロールと通信 運行改善、維持性能の措置	0.571429 0.285714 0.142857
技術成熟性	0.12205	不要な原型モデル発電所 成功技術の応用 既存の運行業績	0.121957 0.558425 0.319618
環境優越性	0.040433	中低放射線廃棄物処理能力 高放射性廃棄物処理能力 職業放射性照射 気体排出 液体排出 工場外排出	0.123038 0.123038 0.238288 0.238288 0.230501 0.046846
独自開発化および国内適応化	0.03928	技術の譲渡範囲、深度および合作方式 設計独自開発化の程度 設備製造の国内適応化の程度	0.285714 0.571429 0.142857

◎表1 システム評価指標集合および加重計算の結果

原子炉の類型	総体性能	安全信頼性	経済競争性	建設可能性	人間機械関係	技術成熟性	環境優越性	自主化国産化	総合得点
CPR1000	86.77	79.70	81.159	81.057	80.285	91.281	82.629	84.938	82.920
AP1000	88.95	90.49	82.297	86.361	89.847	76.978	85.774	77.460	86.033
EPR	88.91	88.12	80.000	84.311	88.571	83.620	85.643	80.079	85.525

◎表2 不確実性総合法の評価結果

原子炉ユニット類型	CPR1000	AP1000	EPR
評価点数	70.66	100	74.99
ソート	3	1	2

◎表3 不確実性ボルダー法の評価結果

ろう。中国の現在の原子力発電プロジェクトの加速度的成長動向と、我々の評価結果はかなり一致している。中国が現在建設中の商用原子力発電所プロジェクトの設備容量規模はすでに25GWeに達しており、そのうち24GWe設計ではCPR1000加圧水型炉ユニットを採用している。このほかに、中国はすでに世界一のAP1000原子力発電ユニットを導入しており、2009年から4台のAP1000ユニットの建設段階に入るであろう。2015年以後にはAP1000の運用が、このような先進原子力発電ユニットがすでに商業発電の技術的成熟性を満たしていることを証明してい

るであろう。そして独自開発化能力を打ち立てた後には中国の原子力発電所新規建設プロジェクト、特に内陸部の原子力発電所プロジェクトは、主にAP1000ユニットを選択するであろう。中国原子力発電のさらなる成長は原子力燃料の市場価格を引き上げ原子力発電の大規模で急速な成長を抑制するであろうが、その時に原子力エネルギーが急速に成長するかどうかは核の増殖分裂が容易な第4世代先進原子力エネルギーシステムの商業化成功のタイムテーブル如何であろう。

参考文献

- [1] 「我国始動の6個の千万キロワット級風力発電基地計画」、市場報（編集責任：魏敏）、2009年02月23日。
- [2] 《863エネルギー技術領域研究の進展》超仁愷 原子能出版社、2000。
- [3] Yang M., Ren J., Zhou Z. and Zhu S., "The Role of Expert Evaluation System for Deploying Advanced NPPs in China," GENES4/ANP2003, Sept. 15-19, 2003, Kyoto, Japan, paper 1180.
- [4] 楊孟嘉. 先進原子力発電所評価システムの研究と開発[J]. 原子力発電, 2005, 卷(1): 2~7.
- [5] 《総合評価理論と方法》, 郭重軍 科学出版社。
- [6] 《原子力発電所操作員の能力評価研究》, 韋力博士論文 清華大学原子力および新エネルギー研究院
- [7] 高斌, 任俊生, 周志偉, 楊孟嘉, 顧軍揚, "先進核反応炉専門家評価システム構築の設計と実現", 原子能科学技術[J], 2007, Vol. 41, No.3, p.301-308.
- [8] 張奇, 朱書堂, 周志偉, 高姗姗, 花俊, "不確実性段階分析法に基づいた先進原子炉評価システムの研究", 核動力工程[J], vol.26, no.1, 2005, pp. 91-95.

高速炉技術の開発と原子力の持続可能な成長の促進

•Profile•



周 培德 ZHOU Peide ●中国原子能科学研究院高速炉工程部副総工師

中国原子能科学研究院高速炉工程部副総工師、研究員。1968年生まれ。2001年中国原子能科学研究院卒業、原子力科学・工学専攻、工学博士。

発表論文：1) MOX燃料モジュール高速炉の変異特性、「核科学と工程」、2002年。2) モンテカルロ法に基づく三次元燃料消費計算の研究、「核科学と工程」、2004年。3) 中国の高速実験炉応用方法の研究、新炉と研究炉に関する第6回学術報告会特集、2006年。4) 「空冷式高速炉」、「中国電気工程大典」第8巻第6編第4章、2007年。5) 「鉛冷却高速炉」、「中国電気工程大典」第8巻第6編第6章、2007年。6) 高速炉技術の発展と原子力発電の持続可能な発展の促進、第三世代原子力発電技術報告会文集、2007年

概要：

高速炉技術は第4世代原子力システムの開発目標に合致しており、原子力の持続可能な成長を促進するための重要な技術である。中国の高速炉事業は3段階の成長方法をとることが予定されている。これにより、2030年頃には高速炉を第4世代原子力発電の中心として商業利用を拡大するという目標の実現を図る。中国の高速実験炉はすでに調整段階に入っており、2009年9月には臨界に達する計画である。中国の関係部門は現在、高速炉事業技術の次の開発目標について検討を進めており、成長を加速するための手段を研究し、高速炉による原子力システムの技術研究及び開発に対する投資を増大するよう提案している。

1 第4世代原子力システムの開発目標に合致した高速炉技術

中国にとって原子力発電産業を積極的に成長させることは、エネルギー資源を多様化し、エネルギー構造を最適化し、環境保護を進め、さらにエネルギーの安全保障するための現実的で実行可能な手段である。2008年末までのデータによると、中国が稼働している原子力発電所の出力は約9.1GWe、すでに建設を始めている原発の出力は約11.3GWe、建設を承認されている原発の出力は約23.9GWe、初段階の業務開始を承認されている原発の出力は約19.3GWeで、合計約63.6GWeになる。現在の成長状況から見ると、中国における原子力発電の中長期発展計画に提示された、2020年時点での建設済み原発出力40GWe、建設中の原発出力18GWeという目標は必ず上回って達成されよう。中国工程院が2005年に出した予測では、2050年の中国の発電総出力は約1650GWeになり、原子力発電による出力は250GWeで、原子力発電は約16%を占めるようになる。中国の原子力発電には大きな将来性がある。原子力発電の大規模な成長には、ウラン資源の確保と長寿命の放射性廃棄物の安全な処理といった問題が生じるが、高速炉技術とクローズド核燃料サイクル技術は、この2つの主要問題を解決するために最も現実的で実行可能な手段である。

中国のウラン資源の探査と開発を強化し、外国からの一部ウラン資源輸入を補助手段とし、加圧水型原子炉と高速炉を組み合わせることで発展させたクローズド核燃料サイクル方式を採用することにより、中国は原発の出力規模を2050年には250GWeに到達させるという目標を実現できるだろう。したがって、高速炉技術の開発は、原子力の持続可能な成長にとって非常に重要な戦略的意義をもつ。

現在、国際的に高速炉の開発は先進的原子力システムに組み入れられている。第4世代原子力システム（Generation IV Nuclear Energy Systems、略称Gen-IV）の概念は、1999年6月に開催されたアメリカ原子力学会年会で初めて提出されたものである。またアメリカ、フランス、日本、イギリス等各国は、2000年に第4世代原子力システムに関する国際フォーラム（Generation IV Nuclear Energy Systems International Forum、略称GIF）を設立している。第4世代原子力システムの研究開発における総目標は、経済性と安全性に優れ、廃棄物の管理と処理がしやすく、核拡散防止の特性を持つ先進的な原子力システムを2030年以降に市場に提供することである。2000年5月に、第4世代原子力システム国際フォーラムの加盟国は、第4世代原子力システムの目標に基づき、さらなる研究・開発の候補として6つのシステムを対象として選んだ。システムの種類についていうと、これらに用いられている基本技術はそれぞれ異なり、うち最も技術が成熟しているのはナトリウム冷却高速炉(SFR)である。アメリカ、ロシア、イギリス、フランス、日本、ドイツ、インド等の国ではすでに出力10MWt-1200MWeのものを建設しており、実験炉、原型炉、商用実証炉など合わせて18基のナトリウム高速冷却炉があり、約300炉/年の運転実績がある。またBN-350、フェニックス、PFR、BN-600等の原型炉と実証炉スーパーフェニックスは、商用試運転を始めている。

革新的原子炉・核燃料サイクルに関する国際プロジェクト(INPRO)は、国際原子力機関(IAEA)により2000年に発足したもので、次世代の先進的原子力システムに関するもう1つの国際的研究開発プロジェクトである。これまでに20ヶ国以上が加盟しており、中国もその一員である。

このプロジェクトは、現段階では高速炉とそのクローズド核燃料サイクルの結合に基づく評価・研究を主にしており、特に高速炉と高速炉に基づく燃料サイクルが、原子力の持続可能な成長に対して及ぼす作用と効能について評価している。さらに今後は、高速炉技術を主とした研究協力を行う予定である。

30近くの国がINPROとGIFの協力プロジェクトの枠組みの下で、次世代の原子力システムについて数年間を費やして共同研究を進めているが、これまでに第4世代原子炉の完全な設計は実現していない。しかし、第4世代に対する比較的明確な目標設定、開発すべき技術内容、枠組みの下での研究開発提案等はされている。先進的原子力システムについて、持続可能性、経済性、安全性、信頼性、核拡散抑制と防護システム等の面で、GIFは具体的な目標8ヶ条を提示している。

中国は現在、ナトリウム冷却高速炉の技術を開発中である。中国のナトリウム冷却高速炉という技術選択と戦略目標は、第4世代の先進的原子力システムについての目標と一致するものである。

2 成長戦略の策定と次期事業目標の明確化

技術面から見ると、世界の高速炉はすでに実験炉、原型炉、実証炉という全ステップを経てきている。初期段階で求められた高速炉技術の開発目標は、高速炉の増殖能力、システム技術の実施可能性、運転の確実性、安全性や競争力など、主に検証面であった。1990年代中期までに、国際的に見て高速炉と燃料サイクル設備の発展と運転結果は、十分満足のいくものであった。つまり高速炉の技術開発は、初期段階で求められた目標をすでに大幅に達成している。

国際的には、高速炉技術はすでにほぼ成熟しており、今後の技術開発の目標は、第4世代原子力システムの条件を満たし、原子力の持続可能な成長を実現することである。高速炉は、先進的原子力システムの中で主要な原子力発電所として、2035年前後に一定規模での応用を開始する予定である。

中国の高速炉の開発戦略と技術に関する研究は、1970年代以降数多く行われてきた。1985年8月には「1985－2000年と第7次五ヵ年計画における高速炉発展計画」を策定し、1986年7月には元の原子力工業部計画司の指導の下、「高速中性子増殖炉2000年計画の制定」を完成し、

1989年6月には国家863高技術計画のエネルギー分野専門家委員会の指導の下、「中国の高速炉発展戦略と技術路線」を編成した。近年、関係部門と専門家は、国外の高速炉技術の開発動向に非常に注目しており、中国の高速炉開発戦略と技術に対して、いっそうの研究と修正を進めている。国外の高速炉開発戦略と技術を参考にしながら、現在、中国の高速炉事業の発展には、下の表2のとおり3段階の戦略を採用している。

2006年に発表された中国工程院の調査プロジェクト「先進的大型加圧水型原子炉と先進的原子力システムの戦略研究報告」の中では、高速炉技術の開発について以下のように開発の加速が提案されている。「…高速実験炉の運転と研究に基づき、長年国際的に蓄積されてきた高速炉の技術研究開発と商用炉建設の成功例を十分に参考にし、広範な国際協力を展開し、必要な技術と設備を導入し、それによって、中国が高速炉商用化実現に必要とする期間を短縮する。」中国国内の研究開発条件、技術レベル、経験の蓄積等の各要素、また中国の高速炉について各段階で選択される主要技術の適合性、特に中国の高速実験炉とロシアのBN-600原型炉との技術的適合性を考慮すると、中国の高速炉事業の第2段階では、直接実証炉を建設するという実行可能性もある。

国際的な開発の趨勢から見ると、高速炉技術に関する国際交流が増えていることと、高速炉技術に対する認識の向上と経験の蓄積によって、国際的には高速原型炉と高速実証炉の境界線が徐々に薄れてきている、あるいは原型炉の機能と実証炉の機能が1つの炉によって実現可能といえる。例えば、インドが現在建設中の50万kWの高速原型炉は、完成後には実証炉として直接普及・応用されることになる。

中国が次の段階として原型炉と実証炉のどちらを建設するのかについては、全面的論証が必要である。技術面から簡単に分析すると、中国の高速実験炉の建造後に直接実証炉を建設することには実行可能性がある。熱効率65MW、実験発電効率20MWの中国の高速実験炉は、技術パラメータと方法選択の時点で、次段階の高速炉発電所への移行もすでに考慮されている。その主な技術である原子炉本体の構造、燃料操作システム、メインとなる熱伝導システム技術、重要な補助システム技術、主要設備と原子炉建屋構造等はすべて、20年以上の運転実績をもつロシアの高速原型炉(BN-600)に近いもので、中国の高速

段階	炉名	出力(MWe)	完成予定時期
第一段階	中国の高速実験炉(CEFR)	20	2009
第二段階	中国の高速原型炉(CPFR)、 中国の高速実証炉(CDFR)	600～900	2020
第三段階	中国の高速商用炉(CCFR)	≥900	2030年ころ

◎表2 中国高速炉事業技術の三段階戦略

実験炉のメインとなる熱伝導システムの熱効率パラメータは、すでに実証炉原発のレベルにも近い。中国の高速実験炉はBN-600原型炉の縮小版で、CEFRは一定程度において原型炉の特性を備えている。

中国には、高速炉技術の成長を加速させるという切迫した必要性がある。この必要性は、中国原子力発電の成長のため、ウラン資源の総合的需要・供給の条件によって、またクローズド核燃料サイクルシステムの協調的成長の要求などによって決まる。中国の加圧水型原子炉から出る、使用済原子燃料の商用再処理工場は2025年ごろ完成予定で、これによって中国では、加圧水型原発—加圧水型原子炉の使用済原子燃料商用再処理工場—MOX燃料工場—高速炉原発等により構成される、一定の工業規模を持つ燃料サイクルシステムが、2020年から2030年の間に構築されることになり、工業規模のクローズド核燃料サイクルシステムがまずは形成されることになる。

3 高速炉原子力システム研究の強化

高速炉の事業技術を全面的かつ自主的に掌握するため、中国では、中国の高速実験炉の設計、建造、運転、メンテナンスの経験を少しずつまとめ、中国の高速実験炉というプラットフォームを活用して、高速炉の安全研究、物理、熱工学・水力研究、運転稼動状況研究、燃料・材料と設備の検証等を幅広く展開する。

中国では飛躍的發展方法を採用し、高速炉技術の研究開発についての国際協力という趨勢と背景の下、外国とも協力し、高速炉の技術開発での次期の目標を実現し、工業規模のクローズド核燃料サイクルシステムを建設していく。

中国の高速炉技術の開発目標に基づき、中国の高速炉事業の開発計画を実現するために、投資を増大し、各方面にわたる技術の研究開発を進める必要がある。

高速炉事業技術の研究開発を進めるには、ソフト面、

ハード面のさまざまな設備が必要である。中国はすでに、高速炉技術の基礎研究、設計、高速炉重要設備の設計と検証、高速炉設計の実験検証等については、一定の条件を備えている。高速炉の運転、メンテナンス条件、実験炉応用研究条件などを完備させていく計画である。

高速炉のクローズド核燃料サイクルには、熱中性子炉の使用済燃料の処理、高速炉の燃料製造と高速炉使用済燃料の処理等の技術部分が含まれる。燃料サイクルに関する技術には、加圧水型原子炉の使用済み燃料処理技術、MOX燃料製造技術、高速炉使用済燃料の処理技術、アクチニウム系放射性核種と長寿命核分裂物質の分離と核変換技術、高レベル放射性廃棄物の処分技術がある。すでに展開されている研究開発プロジェクトに対しては投資が増大される予定で、高速炉の使用済燃料の処理技術、アクチニウム系放射性核種と長寿命核分裂物質の分離と核変換技術等の研究開発はできるだけ早期に開始する。

高速炉原発の基準規格、高速炉運転データベース、運転・メンテナンス技術、設計ソフトと検証、熱工学・水力と安全、炉心組み立て、高速炉先進構造の材料、先進的探査・制御技術、ナトリウム利用の先進的技術、ナトリウム燃焼と高速炉重要設備等についての研究投資が増大される予定である。

各国が高速炉を發展させる目的と高速炉に対する需要は必ずしも一致せず、そのことが技術路線、用途設定、開発予定規模等の違いとして現れる。中国は自国の必要性と利用目標に基づいて高速炉技術を發展させ、高速炉の中長期的開発計画と高速炉技術の研究開発計画を策定、強化していく。中国は既定の發展路線を堅持すると同時にINPRO、GIF等の国際協力プロジェクトにも積極的に参加し、ナトリウム冷却高速炉を開発している他国とも、互いに参考にし合い共同研究をすることで、2030年ころまでには、高速炉を第4世代原発の重要なタイプとして応用するという目標が実現可能となろう。



中国の高速実験炉

原子力利用の展望と課題

•Profile•



近藤 駿介 こんどう・しゅんすけ ●原子力委員会委員長

昭和17年生まれ。東京大学大学院工学系研究科博士課程（原子力工学専攻）修了。工学博士。東京大学工学部助教授、教授、東京大学大学院工学系研究科教授を経て平成16年より原子力委員会委員長に就任。専門は原子炉システム工学、原子力安全工学、ヒューマンインターフェース工学、脳工学、原子力研究開発利用政策、国際協力政策評価などに関する政策科学。

主な著書：「人はなぜ失敗するのか」、「原子力発電所で働く人々」、「私はなぜ原子力を選択するのか」、「エネルギー」、「やさしい原子力教室Q&A」、「原子力の安全性」、「やさしい原子力Q&A」、「巨大技術の安全性」。

所属学会：米国原子力学会、日本原子力学会。

1. はじめに

世界の原子力発電規模は、1970年代に入って年間18GW程度のペースで急速に増大したが、1980年代の末に330GWを超えたところで変曲点を迎えた。1979年に米国で発生したスリーマイルアイランド原子力発電所の事故の前後から米国において安全性、経済性の面から原子力発電に対する興味が失われて新規の建設計画がなくなり、1986年に当時のソ連邦ウクライナにあるチェルノブイリ原子力発電所で大きな事故が発生して、欧州でも人々の原子力に対する不安感が著しく増大し、さらに、石油危機によって活発化した資源開発活動の結果、石炭・天然ガス価格が低下し、多くの国において火力発電所に対する原子力発電の経済的競争力が失われたためである。

しかしながら、人口あたりの化石燃料資源の賦存量が小さく経済成長が続くアジアではその後も原子力発電所の建設が継続した。その結果、2007年末には世界の31ヶ国で合計435基、392GWの原子力発電所が運転中であり、これが世界の電力の約15%、一次エネルギーの6%を供給している。そして、これがLNG火力を置換しているとして計算すれば、二酸化炭素排出量を約11億トン（全世界の排出量の4%）削減するのに貢献している。

日本は、1960年代後半に原子力発電を開始して以来、着実にその規模を増大させてきて、2007年末には55基、49GWの設備が稼働中で、総発電電力量の約1/3を分担し、海外情勢に左右されずに発電を継続できることからこれを国産エネルギーにカウントすると、エネルギー自給率を4%から18%に引き上げ、火力を置換しているとして計算すれば、年間の二酸化炭素排出量を2億トン、約15%削減するのに貢献している。

本稿では、このような原子力発電の展望とこれの実現を目指すために取り組むべき課題について概観する。なお、以下に言及する見解は原子力委員会としてのものではなく、著者個人のものであることをお断りする。

2. 我々は今後何をしなければならないか

最近、インド、中国、ロシア等で原子力発電所の建設活動が活発化してきている。また、現在、約12の国が新しく原子力発電を導入する計画に取組んでいる。国際原子力機関（IAEA）の最近の展望では、この状況を踏まえて、2030年の世界の原子力発電設備規模を高位推定で748GW程度とし、世界の総発電量に占める割合も現状の14%を維持しているとしている。

こうした原子力発電所建設意欲は次の3点に起因する。第1は、経済成長が高い各国でエネルギー需要、とりわけ電力需要が高まり、エネルギー安全保障が重視されるようになってきたこと、第2は、エネルギー資源価格が上昇して、原子力発電の経済性が高まったこと、そして、第3は、大気中温室効果ガス濃度を現在よりあまり高くない水準に安定化させるべきとの国際世論に 대응して、温室効果ガスの排出量が小さい低炭素エネルギー源の採用が求められているところ、大規模な供給力を確保できる低炭素エネルギー源としてすでに実績のある原子力発電が高く評価されるようになってきたことである。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、増大しつつある温室効果ガス濃度を将来において気候変動の影響が小さく止まる水準に安定化するためには、2050年の温室効果ガス排出量を2000年の半分以上にすることが必要とした。これを受けて、これを実現する経済的に合理的な方策を検討した国際エネルギー機関（IEA）のエネルギー技術展望2008は、同年の世界の電力の46%を再生可能エネルギー、25%を原子力発電により供給することを目指す案を掲げている。これは、この年に現在の3倍強の1400GWの原子力発電所が運転していること、あるいは、今後40年間にわたって、毎年25-35基のプラントを新たに運転開始させることを意味する。過去、世界はピーク時にはこの程度の規模の原子力発電所の着工に着手したことがあるから、この数字の実現は不可能ではないが、容易なことではないとされている。

もとより、世界がどのような温室効果ガス濃度の安定化シナリオを選択するかは今後の議論にゆだねられてお

り、したがって、上のシナリオが唯一の選択肢ではない。しかしながら、志のある国の原子力発電技術の供給者・利用者は、このような規模の原子力発電に対する需要が国際社会にあり得ることを認識して、原子力発電技術が市場において他のエネルギー供給技術に競争し続けることができるように絶えず性能を向上させ、優れた運転実績を維持することに努力する一方、原子力発電の恩恵を享受したいとする国に対して、国際社会の福祉向上を支援する観点から、それが確実に実現できるように協力していくべきである。

日本においては、低炭素社会の実現を目指すシナリオを探索した総合資源エネルギー調査会が2008年に公表した超長期エネルギー需給見通しにおいて、2030年の原子力発電の設備容量が現在規模の9基増にあたる約62GWであっても、エネルギー利用効率の改善努力が大胆に行なわれるならば、発電量の40%以上を原子力発電が供給していることになるとしている。

このこともあわせ考えれば、我が国における原子力政策の主要課題は、第1に、既存の原子力発電所を、現在低迷している原子力発電所の稼働率を国際水準にまで回復させて、安全・安定に運転し、これに必要な放射性廃棄物の処理処分の取組を含む核燃料サイクルの取組を着実に前進させること、第2に、2030年頃から多数のプラントが寿命の到来により引退していくとしても発電設備規模が漸増を継続していくよう、原子力発電所の新設を着実に推進していくこと、そして、第3に、原子力先進国として、国際社会の原子力発電のもたらす利益を享受したいとしている国を応援する国際社会の取組に積極的に参加し、我が国の蓄積した知見・経験をこれらの国との密接なコミュニケーションを通じて生かしていくことである。

3. 原子力発電の推進に必要な機能、制度等からなる基盤

原子力発電の推進には、エネルギー行政および原子力安全・放射線防護・保障措置・原子力防護・環境保護などに関する規制行政、これらに係る意思決定への国民・施設立地地域等の利害関係者の参加の仕組み、原子力発電事業推進のための適切な経営能力、大規模発電施設である原子力発電所のもたらす利益を享受するのに適した電力系統、回収に長い期間を要する大規模な投資を可能にする資金調達メカニズム、核燃料を供給し、使用済燃料や放射性廃棄物の安全管理を行う活動を含む核燃料サイクル事業、これらに機器・サービスを提供する機器製造業を含むサプライチェーン、これらの機能を維持・充実していくのに必要な人材の育成、これらの活動の基本となる技術を生み出し、それを利用する知識を創造・管理する組織とその活動が必要である。原子力発電のもたらす利益を享受していくためには、原子力インフラストラクチャと総称されるこのような機能・制度等からな

る基盤を整備し、それを健全に維持していく必要がある。以下では、そのうち最も重要ないくつかについて、関係者が心すべきことを述べる。

3.1 安全確保の取組

原子力施設の操業は、その存在により公衆及び従業員が放射線・放射性物質による災害に遭遇する可能性を十分に小さくして行われるべきである。このため原子力施設の設計、建設、運転に当たっては、1) 通常操業時の原子力施設内での放射線被ばく及び施設から放出される放射性物質による放射線被ばくを、定められた制限値以下にすることは勿論、合理的に達成可能な限り低くすること、2) 自然現象、人の過誤、機械の故障による異常の発生を防止する工夫を行う一方、「人は誤り、機械は故障することあるべし」として、それにより発生する異常・事故のもたらす放射線影響が重大なものにならないよう、影響緩和の工夫もあらかじめ行うこと、3) こうした機能の信頼性を高く維持するために、保守的な設計を行い、人の過誤をふせぐためのヒューマンファクターへの適切な配慮を行うと共に、施設の安定した運転の継続を可能にする保全活動、これらの取組に間違いのないことを確かにする品質マネジメント活動、そして、安全をすべてに優先させ、事ごとにその安全に対する重要度に応じた気配りを行う安全文化を運転管理組織に醸成する活動を行い、さらに、実効性ある事故管理策及び防災対策を整備すること、4) こうして設計され、維持管理される事故防止策、事故影響緩和策等の存在により、深刻な放射線影響を伴う事態の発生可能性が極めて小さくなっていることを、最新の知見を反映した確率論的リスク評価を実施して定期的に確認し、この結果が安全目標を満足していないときには直ちに改善することが肝要とされている。

こうした取組を行う第一義的責任は原子力施設の設置者にあり、政府はそうした能力のある者が上に述べた性能を満足する可能性が十分に高い設備を用いてこれを行うとする場合に限って例外的にこの取組の実施を許可するのである。そして、取組の許可申請者が上の考え方から適切と判断できる技術的要件を満足する設備を用いていること、その保全活動の行い方を含む操業規定（保安規定）がこれによる災害リスクが十分小さくなるように定めてあることを事前評価・審査により確認した後に、活動を許可する。さらに、操業段階においては、この操業規定の遵守状況を“trust but verify”の考え方に立って、随時の立ち入りを含む検査によって確認する。

ところで、こうした判断に政府が使用する技術要件は最新の知見を反映したものに維持しなければならない。実際、最高裁は、規制行政当局がこの取組を怠っているときにはそれに基づく行政処分は無効と判示している。この点に係る最近の主な取組は耐震安全性の見なおしで

ある。

原子力施設には、自然現象である地震の発生を考慮しても周辺公衆に過大なリスクを与えないこと、つまり安全目標を満足することが求められている。このため、原子力施設の建設に当たっては、立地地域周辺の活断層調査を行い、それぞれの断層で周期的に地震が発生するとしてその周期やそれにより立地施設が経験する地震動を予測し、敷地においてまれに経験するとしか考えられない大きな地震動を求める。その上で、念のため、施設の直下に見つかっていないが $M=6.5$ の地震を発生する断層があると想定してそれによる地震動も算定し、それらの総合的な評価に基づき設計基準地震動を決定し、これが発生しても止める、冷やす、閉じ込めるといった原子力施設の安全確保に重要な機能が損なわれないように設計することにしてきている。

しかしながら、1995年に兵庫県南部地震を経験して地震学の研究に大きな資源が投じられた結果、地震に関する知見が急速に増大し、各地における大きな地震の発生頻度が見直され、また、調査を行っても見いだされない活断層を震源として $M=6.8$ 程度の地震が起きる可能性も指摘されるようになった。そこで、国は、これらの新知見を評価して2006年に新しい耐震安全設計審査指針を定め、各原子力施設に対してこれに基づく耐震安全性の確認を求めた。2007年に新潟県中越沖地震が発生し、柏崎・刈羽原子力発電所で設計基準地震動を超える地震動を経験してこの確認作業は急務となり、現在、すべての原子力施設において、周辺の活断層の調査をより念入りに行い、新指針に適合させて施設敷地の地下特性も考慮に入れて新しい設計基準地震動を定め、これに基づき耐震安全性の再評価を実施し、必要に応じて補強工事を実施している。

3.2 核不拡散の取組

世界は、核兵器のない世界の実現を目指して、1968年に、当時核兵器を保有していた5カ国以外の国には原子力の平和利用の権利を認める一方、核兵器を持つことを禁じ、核兵器保有国には核軍縮に誠実に取り組むことを求めることを主な内容とする核兵器不拡散条約(NPT)を成立させた。原子力発電に使われる核燃料や核燃料を生産、処理する技術は核兵器の材料になる高濃縮ウランやプルトニウムを生み出すことができることから、この条約は、各国に対してIAEAと包括的保障措置協定を締結して、全ての機微な物質等をIAEAの保障措置活動、すなわち、それらの在庫量の計量管理活動及び封じ込め状態の確認等の査察によって核兵器の製造活動に転用されている可能性がないことをIAEAが検認する活動の下におく義務を課している。また、核物質や原子力技術をIAEA保障措置を受けない場所に移転することも制限している。

さらに、1997年からは、IAEAに対して原子力活動以外の関連活動についても情報を提供するとともに、それらに対する臨機の立ち入り検査や任意の場所におけるサンプリング検査をも認める「追加議定書」をIAEAと締結することを各国に推奨している。しかしながら、これを締結しているのは190のNPT締約国のうち90（及び1国際機関（ユーラトム））に過ぎない。

なお、核兵器保有国に対しては、核軍縮に対する誠実な取組以外にも、国防に係る原子力活動以外については非核兵器保有国における活動と同等の保障措置活動の下におくことが公平性の観点から求められている。日本は二国間協定の交渉の場をはじめとしていろいろなところでこのことの重要性を強く指摘してきたが、最近に至り、核兵器国は全てこれを受け入れ、追加議定書も含めてIAEAと協定を締結する運びになっている。

3.3 核セキュリティ確保の取組

核拡散の観点から対処するべきもう一つの可能性は、非国家主体によって核物質や機微な情報が盗取されるなどにより核拡散に至る可能性である。これに対しては、原子力施設において核物質に対する防護を強化すること、機微な物質の貿易を制限することである。原子力施設の防護に関しては、IAEAにより各国が遵守すべき取組の勧告が1974年に発表されて、各国の尊重するところとなっている。なお、この勧告は、以来、4回にわたって改定されてきており、現在も改定作業が実施中である。

核物質防護条約は、国際間の核物質の輸送時における防護に係る各国の義務を定めたものであるが、その内容は最近の改正により、国内における核物質も対象にして、その防護のあり方を定めたものに拡張されている。

貿易制限については、その内容についてのコンセンサスを形成する場として核供給国グループ(NSG)が設立され、NPT加盟国以外への核物質等の受け入れ国の条件をガイドラインとして定め、これを各国が尊重してきている。1992年以降、このガイドラインはNPTを超える条件を受け入れ国に求めるようになってきている。

3.4 核燃料サイクルに係る取組

原子力発電所を運転するためには、ウラン資源を入手し、精錬した天然ウランを濃縮し、燃料に成形加工する核燃料サイクルの上流部門の取組と、原子炉の炉心で数年間使用された後に取り出された燃料（使用済燃料）を高レベル放射性廃棄物として管理貯蔵後、深地層に処分する直接処分方式か、それを再処理工場で再処理して、ウラン・プルトニウムを回収し、これを燃料に加工して再び原子力発電所で利用する一方、この工程の廃棄物を高レベル放射性廃棄物として地層処分するリサイクル利

用方式のいずれかに依拠する下流部門の取組を整備する必要がある。

ウラン資源は米国、カナダ、オーストラリア、アフリカ諸国、ロシア及びその周辺諸国で産出するので、これを産しない国は、これをこれらから輸入するのが基本である。また、下流部門における使用済燃料の取り扱いについては、フランス、イギリスにある商業用の再処理工場を利用する国もあるが、多くの国では方針を定めず、とりあえず貯蔵している状況にある。ただし、フィンランドやスウェーデン、米国等は使用済燃料を直接地層処分することにして、そのための取組を行っている。

日本は、当初、使用済燃料の再処理を欧州の再処理業者に委託しつつ、東海再処理試験施設を建設運転し、続いて六ヶ所村に非核兵器国では唯一の商業用再処理工場を建設してきた。現在この工場は、建設の最終段階である使用前検査を受検中であり、高レベル廃液のガラス固化装置の運転習熟に時間が掛かっている。当面の課題は、1) この取組を着実に進めて本格操業に移行させること、2) この工場の製品であるプルトニウム・ウラン混合物を原料に軽水炉の燃料を製造する、MOX燃料工場の建設を進めること、3) 我が国で発生する使用済燃料の量はこの工場の再処理能力を上回るので、このはみ出し分を次に建設すべき再処理工場が稼働して処理できるようになるまでの間、一時貯蔵しておく施設（中間貯蔵施設）の整備を進めることである。

一方、再処理工程で発生する高レベル放射性廃棄物はガラス固化し、この固化体を発熱量が地層処分に適した水準になるまで地上で保管した後に、地下300メートルより深いところに地層処分する。我が国では、2001年に、この処分は安全に実施可能であることがこれまでの研究開発で示されたので、この処分の実施主体として原子力発電環境整備機構(NUMO)を整備した。現在は、このNUMOを中心に、この処分の安全性及びこの処分施設の立地は全国民に利益をもたらすので、利益の衡平の観点からこれを立地する地域の持続的発展に対して全国民の協力が得られることを全国の自治体に伝えて、本施設の立地を受け入れる自治体を公募している。

この取組は順調に進捗しているとはいえないが、廃棄物処分は現世代が実施の道筋を確立すべき課題であるから、国、NUMO及び電気事業者には、処分の安全確保の仕組み、処分場立地の公益性、立地を受け入れた自治体の持続的発展に対する国民の協力等に関する各自自治体や国民各層との相互理解活動を格段に強化するべきである。

3.5 研究開発の取組

中期的視点から重要なのは、現在建設運転されている軽水炉に代わって20-30年後の世界市場に登場すべき優れた特性を有する次世代軽水炉を開発すること

であり、長期的視点から重要なのは、燃料の利用効率を軽水炉に比べてはるかに高くでき、高レベル放射性廃棄物の性状を改善できる可能性のある高速増殖炉とその燃料サイクル技術システムの研究開発を、これを2050年ごろから導入することを可能にするよう、着実に推進することである。

原子炉熱により高温のガスを作り、これを使用して水を熱分解して水素を得ると、電気分解を用いるより高い効率で原子炉を利用しての水素製造を行える可能性がある。すでにそうした方法が見いだされ、実験室規模で水素の連続生成に成功しているもので、現在は、このプロセスの工業プロセス化を目指した研究開発が推進されている。

また、核融合反応を利用したエネルギー生産を行う核融合炉の研究開発も進められている。これはなお、使える原理の実証過程にあり、実用化までには長い時間が掛かりそうなので、磁場閉じ込め方式についての大型施設の建設運転は国際社会が共同して一つのプロジェクトとして推進していくことが合意され、現在そのためのITERプロジェクトが推進されている。他方、レーザーを用いる方式についてはなお各国が独自の計画を推進している。

4. 原子力インフラの整備・維持

以上に述べた取組を推進していくためには、この分野に関する健全な科学技術基盤と人材育成機能の存在が不可欠である。このため、これらの取組に関連する分野の科学技術の知見を生み出すのに必要な研究開発施設群とこれを用いて基礎・基盤的な知識創造活動に取組む組織が整備・維持されるべきである。また、人材を供給する大学等の原子力科学技術教育機能も整備・維持されてきている。現在は、これらを将来にわたってどの程度の規模で維持していくべきかについて議論が続けられているところである。

新興国が原子力発電に着手するためには、計画的に原子力インフラを整備していくことが不可欠である。IAEAは、これから原子力発電を行う国が原子力インフラの整備を行う手順の基本を示したマイルストーン文書を発行し、そうした国々がこれに則ってこれを整備していくことを推奨している。

一方、2008年に日本で開催された洞爺湖G8サミットは、原子力発電が地球温暖化対策の一つの重要な手段であることを踏まえ、こうした国々における原子力安全、核セキュリティ及び核不拡散の確保の仕組みをはじめ、所要の人材育成に至るまでの原子力インフラの整備に向けた活動を国際的に推進すること、IAEAはこれに重要な役割を果たすべきとした。日本は、このことを踏まえ、原子力を化石燃料への依存を減らし、温室効果ガスの排出量を減少させる手段としたいとする原子力新興国

に対して、今後とも I A E A やアジア原子力協力フォーラム（F N C A）を通じて積極的に協力するとともに、留学生受け入れ環境の整備、世銀等に原子力発電やこれに基づく安全な水を確保する取組に対する投資枠を設けることを促すこと、燃料供給保証システムの構築の議論等に積極的に参加していくことに取り組むべきである。なお、規制行政実務者やプラントの建設・運転担当者の育成への協力等の個別具体的な取組については、二国間の担当者間のコミュニケーションを良くしての共同作業として実施していくことが適切であるから、このための二国間協力の枠組みの整備も促進するべきである。

5. 終わりに

原子力は、その生い立ちの歴史から、社会との関わり合いが深い技術であり、国民の信頼なくてはならない。そこで、取組の公開性・透明性を確保し、広聴に基づく国民との相互理解活動を絶えず推進し、様々な取組の決定や決定した政策の実施に係る評

価の過程への国民の参加を求めていくべきである。

世界における原子力利用の推進は 100 年の計に係る課題である。人口の減少という未踏領域に入り込みつつある日本は、世界で有数の原子力大国として、引き続きこれの利用を通じて公益を確保していくのみならず、国際社会とも共同してこの技術を持続可能なものにしていくことによって、国際社会の持続的発展に貢献していくことが大切である。

世界が現在陥っている経済不況は、人類がエネルギー・環境制約に直面して方向感覚を失ったが故に発生したとの意見があるが、これが正鵠を得ているかどうかは措くとしても、経済社会の運営にパラダイムシフトが求められていること、これを克服するためにはイノベーションが必要であることは確かである。この要請は原子力利用の部門においても例外ではない。今後政府と民間が如何なる役割分担でそのための取組を進めていくべきか、真剣な検討がなされねばならない。

革新的原子炉 CANDLE の研究

•Profile•



関本 博 せきもと・ひろし ●東京工業大学原子炉工学研究所教授、革新的原子力研究センター長

1945年生まれ。東京工業大学原子炉工学研究所教授。1974年カリフォルニア大学バークレー校原子核工学専攻Ph.D。ゼネラルアトミック社（米国）上級エンジニア、東工大助手、助教授を経、1990年東京工業大学原子炉工学研究所教授、2006年より東京工業大学革新的原子力研究センターセンター長を兼任。専門は革新的原子炉と革新的原子力システムの概念構築。学術雑誌や国際会議に約350編の論文を発表。

1. エネルギー問題と原子力

地球温暖化問題は世界の主要問題となっており、その原因と考えられている温室ガス特に炭酸ガス排出を抑えることが喫緊の課題となっている。再生可能エネルギー開発が活発に行われているが、これらの多くはコストだけでなく、時間的に変動したり、薄く広がったエネルギーであったり、環境問題を引き起こしたりして、基幹エネルギーとしての利用が困難である。

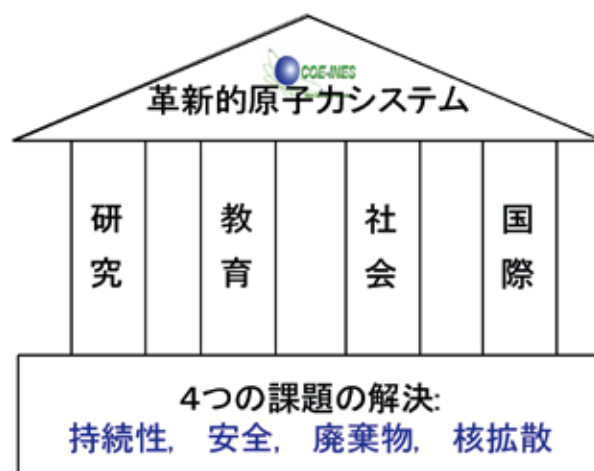
原子力は既にいくつかの国で基幹エネルギーとしての役割を果たしてきているが、その殆どは軽水炉（水で冷却している原子炉。PWRとBWRがある）であり、このような原子炉では資源枯渇により、今後40～80年しか持たないと考えられている。また多くの原子炉が運転されているにもかかわらず、原子力固有の問題である安全性、廃棄物、核拡散の問題は困難で重要な課題として残っている。

2. 21世紀COEプログラム：世界の持続的発展を支える革新的原子力

文部科学省は優れた大学の研究機関を選抜して国際競争力のある研究拠点を形成するため、「21世紀COEプログラム」を2003年度より開始したが、東工大から提案した「世界の持続的発展を支える革新的原子力（略称COE-INES）」は原子力でただ一つのCOEとして採択された^{1,2)}。ここでは図1に示すように、研究、教育、社会、国際の4つの柱を立て、先に述べた持続性、安全、廃棄物、核拡散の4つの課題を同時に解決することを目指した。

COE-INESは2008年3月に無事終了したが、この有意義な活動を終了後も継続するようということで、東工大の中に「革新的原子力研究センター（略称CRINES）」が設立され、革新的原子力の研究が続けられている。

この中で展開され、現在も積極的に推進されている研究のひとつが、革新的原子炉CANDLEの研究であり、4つの課題の同時解決を目指している。COE-INESでは課題は既に述べた4つであったが、CRINESでは経済性も含め、5つの課題の同時解決を目指している。

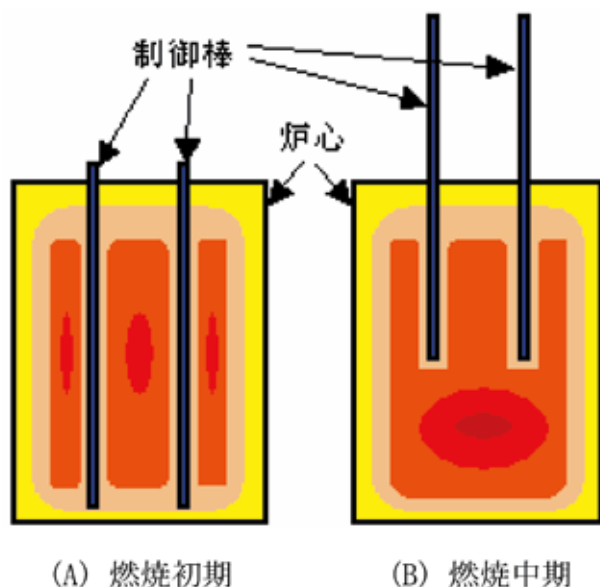


◎図1 COE-INES

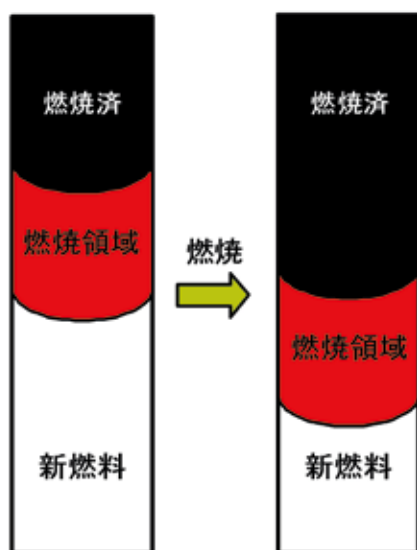
3. CANDLE燃焼とは

一般の原子炉では、図2に示すように、最初に炉心（原子炉内の燃料のある部分：図では長方形の領域でこれを表わしている）に臨界（核分裂の割合が時間とともに変化しないような状態）量以上の核分裂性物質（核分裂する物質で、U-235やPu-239等が代表的）を入れておき、これを丁度臨界にするように制御棒（中性子をよく吸収する棒）を入れておく。原子炉燃料の燃焼（核分裂してエネルギーを発生しながら燃料を消費していくこと）に伴い、核分裂性物質が減少し、核分裂生成物（核分裂がおけるとほぼ同じ大きさの2つの核分裂生成物が生成される。FPと書く）が蓄積すると、制御棒を炉心から徐々に引き抜いていくことにより、原子炉が常に臨界になるように運転している。このため核種（原子核の種類）や中性子束（中性子の密度に速さを掛けた量で、これに比例して反応がおこる）や出力（熱発生）の空間分布は燃焼時間とともに常に変化していく。

これに対しCANDLE炉では、このような制御棒は不要である。図3に示すように、燃焼に伴い燃焼領域（核分裂が活発に起こっている領域）は、核種や中性子束や出力の空間分布が形を変えることなく、軸方向に出力と



◎図2 一般の原子炉の燃焼に伴う制御棒操作



◎図3 CANDLE燃焼

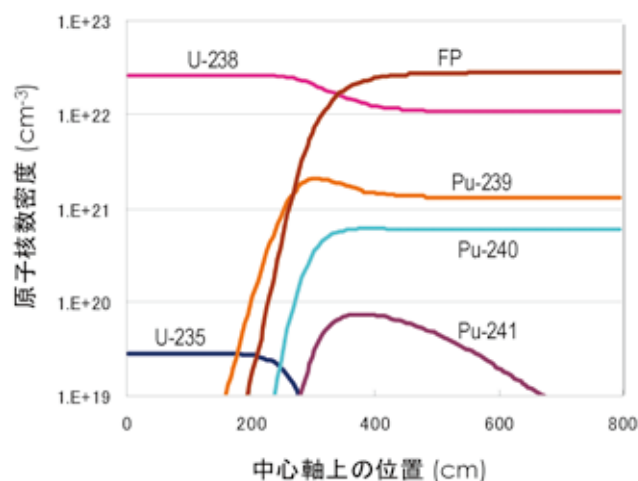
比例した速さで自然に移動していく^{3,4)}。ここで重要なことは、燃料は固体で炉心に固定されていることであり、何ら特殊な制御装置を必要としないことである。

4. CANDLE燃焼の原理

CANDLE燃焼は高温ガス炉（高温ガスを作ることができ、これを水素製造や製鉄等色々な分野で利用することが考えられている）といった原子炉でも実現できることを示しているが^{5,6)}、ここでは、その効果が極めて大きい高速炉について解説する。但し、現在高速炉の主流にある氧化物燃料を使用する高速炉では実現が困難であり、金属燃料が窒化物燃料を用いる必要があることが分かっている⁷⁾。冷却材については鉛系冷却材（液体金属）

やガス冷却材が優れているがナトリウムでも良いことが分っている。ここで紹介する具体例は最近安全性の高い高速炉として注目されるようになった鉛ビスマス冷却窒化物燃料高速炉を用いたものである。

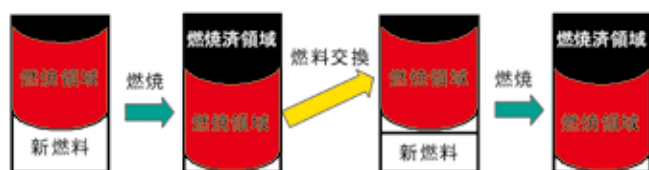
CANDLE炉の中心軸上の原子核数密度を図4に示す。左が新燃料で右が燃焼済領域になっており、それに挟まれて燃焼領域がある⁸⁾。新燃料としては天然ウランや劣化ウラン（天然ウランから濃縮ウランを作ったとき、余分のものとして残される殆どがU-238からなる部分）を利用できるが、図では劣化ウランの場合について示している。燃焼領域ではPu-239が主要な核分裂性物質として燃焼している。新燃料と燃焼領域の境界では燃焼領域から漏れてきた中性子をU-238が吸収しPu-239になる。これにより境界は左にシフトする。燃焼領域と燃焼済領域の境界ではFPが蓄積し、この境界も左にシフトする。このような仕組みにより、CANDLE燃焼が実現される。



◎図4 それぞれの核種に対する炉心中心軸上の数密度

ここで示したのは平衡状態にあるCANDLE炉についてである。一番最初の炉心はどのようにすればよいか。平衡状態での燃焼領域には天然には存在しない放射性物質が多数存在している。このような炉心を模擬するのに、濃縮ウランを用いることができる。その濃縮度を炉心軸方向にうまく変化させることにより、最初から平衡時の出力分布で燃焼を開始させることができることを示した⁹⁾。プルトニウムでも同様のことは可能であるが、手に入れやすさ等を考えると濃縮ウランの方が容易であると考えられる。

燃焼が進んで、燃焼領域が炉心の端まできた場合は、図5に示すように燃焼済領域を取り除き、燃焼の進行方向に新燃料を加える。こうするとCANDLE燃焼を再開できる。



◎図5 CANDLE燃焼における燃料交換

5. CANDLE炉の性能

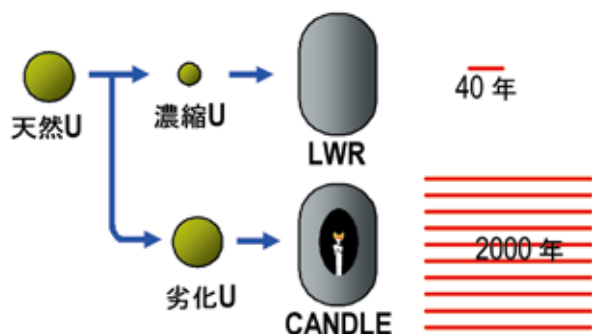
CANDLE炉は天然ウランや劣化ウランを装荷燃料として利用するにもかかわらず、その40%を燃焼することができる。軽水炉では例え使用済燃料を再処理してプルトニウムの再利用を行ったとしても元の天然ウランの1%程度しか利用できない。これに対し、CANDLE炉は再処理せずに40倍の利用ができることになる。但し、これだけ燃焼するためには材料の問題が発生する。また燃焼領域の移動速度は通常出力密度で運転したとき、4cm/年という極めて遅いスピードになっている。このため優れた長寿命炉の設計が可能である。

これらの性質から、2節で述べた持続性、安全、廃棄物、核拡散及び経済性の5つの課題に関してCANDLE炉はどのような性能を発揮するか以下に示すことにする。

(1) 持続性：燃料の有効利用ができる

天然ウランや劣化ウランを使用し、その40%を利用できる。これは軽水炉の50倍以上の利用効率である¹⁰⁾。

現在の日本の原子力発電所は軽水炉を運転している。このシステムでは天然ウラン（U-235の割合0.7%）を濃縮しこの濃縮ウラン（U-235の割合3～5%）を燃料としている。この時、残リカスとして大量の劣化ウランが発生する。軽水炉を40年運転したとき発生する劣化ウランを使って、濃縮や再処理なしに、CANDLE炉は約2000年もの間同量のエネルギーを発生し続けるポテンシャルを有する¹¹⁾。（図6）



◎図6 軽水炉後のCANDLE炉利用シナリオ

(2) 安全：簡単で安全

運転中に制御棒を間違っ引き抜くような事故は起こ

りえない。

出力分布も原子炉特性も燃焼に伴って変化しないので、運転はとても簡単で、信頼性が高い。

想定される事故に対してその応答が解析されているが、従来の高速炉に比べて飛躍的に安全な振る舞いをする事が判っている¹²⁾。

一般に高速炉は燃料が溶けて原子炉のどこかに集まった場合、再臨界事故（一般的に核分裂数が爆発的に多くなり極めて危険）になり易い。CANDLE炉は炉心に制御棒は無く、冷却材の割合も少ないので、再臨界事故は起こり難く、また起こったとしてもその規模は極めて小さくなる。

取替新燃料は天然ウランか劣化ウランなので、臨界事故や核ジャックの心配がなく、輸送や貯蔵が安全で簡単である。

(3) 廃棄物：廃棄物の体積が少ない

軽水炉の10倍燃焼するので、発生エネルギー当たりの廃棄物体積は1/10になる。また廃棄物中のマイナーアクチノイド（ウランやプルトニウム以外のアクチノイドで現在は放射性廃棄物として扱われている）の量も原子炉中に長く入れておくことで核分裂して少なくなる。

(4) 核拡散：核拡散抵抗性が極めて高い

核拡散抵抗性を考えるとき、燃料サイクル全体を考える必要がある¹³⁾。この場合、最も問題となるのは濃縮施設や再処理施設であり、プルトニウム燃料の輸送である。また施設そのもののだけでなく、濃縮や再処理の技術そのものが、核拡散で重要となる。CANDLE炉では濃縮ウランもプルトニウムも必要としないので、核拡散抵抗性が飛躍的に高くなる。

(5) 経済性

いっきに40%燃焼した場合、一般に使用されている材料では持たない。材料を変更し、温度を下げることでよりこの燃焼度を達成することも可能であるが、温度を下げることは原子炉の性能を落とすことに繋がることから、ここでは、被覆材への高速中性子の照射量が限界になる前に被覆材を交換する方法を採用する。この作業は高い放射線レベルで行なうことになるが、再処理と比べると液体を扱わないので、操作も単純で2次的な廃棄物も少なくなる。

原子炉（の構造や出力分布）は簡単なので、運転管理維持費を低く抑えることができる。

燃料サイクル（ウラン採鉱から廃棄物の最終処分までの燃料の流れ、将来的には核分裂性物質が何度も原子炉に装荷されるのが理想と考えられたためこのような呼び名がついている）に関しても、極めて簡便になり、燃料サイクルコストが低くなる。

従来のCANDLE炉では炉心高さが大きかったので、経済性を損ねていたが、現在の設計では従来の設計と比べて、十分小さくなっている^{14,15)}。

中性子を有効に利用するため、冷却材の割合を少なくしなければならないので、出力密度が小さくなる傾向があるが、半径方向の出力密度を一般的な高速炉より飛躍的に平坦化できるので、最終的にどのような結果となるかはこれからの研究次第である。

6. これから

CANDLE炉は筆者のオリジナルのアイデアであるが、偶然にもその原理は筆者が提案する少し前に何人か

の研究者によって発表されていた。その中には水爆の父と言われているテラー博士も含まれており、何人かの研究者が新奇な原子炉の提案に使っている。筆者の研究は実現可能な5つの課題を満足する革新的原子炉の提案ということで進めてきており、世界の多くのこの分野の専門家の注目を得る研究となってきた。今後は更に、工学的な検討を詰めて、CANDLE炉の実現に一步でも近づきたいと考えている。

参考文献

1. H. Sekimoto, Prog. Nucl. Energy, 47, 9-15(2005).
2. H. Sekimoto, Prog. Nucl. Energy, 50, 71-74(2008).
3. H. Sekimoto and K. Ryu, Trans. Amer. Nucl. Society, 82, 207-208 (2000).
4. H. Sekimoto, et al., Nucl. Sci. Engin., 139, 306-317 (2001).
5. Y. Ohoka and H. Sekimoto, Nucl. Engin. Design, 229, 15-23 (2004).
6. Y. Ohoka, et al., Prog. Nucl. Energy, 47, 292-299(2005).
7. H. Sekimoto and K. Ryu, Trans. Amer. Nucl. Society, 83, 45 (2000).
8. H. Sekimoto and Y. Udagawa, J. Nucl. Sci. Technol., 43, 189-197 (2006)
9. H. Sekimoto and S. Miyashita, Energy Conv. Manag., 47, 2772-2780 (2006).
10. H. Sekimoto, Prog. Nucl. Energy, 47, 91-98(2005).
11. H. Sekimoto and A. Nagata, Prog. Nucl. Energy, 50, 109-113(2008).
12. M. Yan and H. Sekimoto, Ann. Nucl. Energy, 35, 813-828(2008).
13. N. Takaki and H. Sekimoto, Prog. Nucl. Energy, 50, 114-118(2008).
14. M. Yan and H. Sekimoto, Ann. Nucl. Energy, 35, 18-36(2008).
15. A. Nagata, et al., Ann. Nucl. Energy (to be published).

原子力プラントの安全性を向上させるための研究

•Profile•



若林 利男 わかばやし・としお ●東北大学大学院工学研究科 教授

1947年生まれ。東北大学大学院工学研究科教授。1973年東北大学工学研究科原子核工学専攻修士課程修了工学博士。1973年4月動力炉・核燃料開発事業団入社。2001年4月核燃料サイクル開発機構 国際・核物質管理部長。2005年4月現職
原子力分野では、熱中性子炉から高速炉まで幅広い原子炉に関する研究、核燃料サイクル全体の研究、核不拡散、保障措置の研究等に従事。原子力分野以外では、大規模システム（医療、交通等）のリスク評価・管理に関する研究に従事。
2009年1月まで原子力安全委員会原子炉安全審査会委員

1. はじめに

日本に原子力発電が導入されてから約40年が経過し、現在、55基（4958万KW）の軽水炉が稼働している。これまで、原子力の安全研究、国内外の原子力プラントの事故・トラブル等の経験を踏まえ、原子力プラントに対して多くの改善が行われてきた。

今まで、原子力プラントに係る安全研究としては、軽水炉で想定される事故の発生防止と拡大防止のための、あるいは万一の事故が発生した際の影響緩和のための安全研究として、冷却材喪失事故の研究や反応度事故の安全研究等が実施されてきた。

さらに、近年、軽水炉の長期利用・高度利用や核燃料サイクルの進展等に対応した研究、国内外の原子力プラントの運転経験を踏まえた原子力施設の確率論的安全評価（PSA：Probabilistic Safety Assessment）技術やその他のリスク情報の活用に関する研究、運転経験に基づく情報を活用した施設・設備の安全基準等の充実・強化のために必要な研究、様々な事故・故障に潜む人間・組織要因の解析評価技術の研究等が進められてきている。

今回は、日本の原子力プラントの安全研究の概要と、トピックスとして、近年注目されている原子力プラントの保守技術の高度化のための研究について紹介する。

2. 日本の原子力プラント安全研究の概要⁽¹⁾

日本では、現在、原子力プラントの安全研究として、（1）リスク情報の活用、（2）事故・故障要因等の解析評価技術、（3）軽水炉の安全評価技術、（4）軽水炉の材料劣化・高経年化対策技術、（5）耐震安全性技術等、が重点的に実施されている。それぞれの概要を以下に示す。

2.1 リスク情報の活用

リスク情報の活用に関しては、①原子力施設毎の性能目標の策定・検証・安全規制への適用等に向けた研究、②リスク情報を活用した安全規制の運転管理への適用に関する研究、③PSA手法の高度化やデータの整備、適用範囲の拡大等に関する研究が進められている。これらの成果は、軽水炉を対象とした性能目標の策定や新たな検

査制度の検討等に活用されており、着実に研究が進められている。

2.2 事故・故障要因等の解析評価技術

事故・故障要因等の解析評価技術に関しては、①運転経験に基づく事故・故障に関する情報の収集・分析整備、②トラブル事象等に係る人間・組織要因の調査分析に基づく知見・教訓の蓄積等の研究が進められている。具体的には、国内外で発生した原子力事故・故障等に係る情報の収集・分析を行い、インターネットで公開が行われている。また、運転管理、保守保全等における人間・組織的な要因を分析し、安全規制の高度化に反映させるため、ヒューマンエラーに関連する国内外のトラブル事例についての知見・教訓に関するデータの蓄積や人間信頼性データ等の整備が行われている。

2.3 軽水炉の安全評価技術

軽水炉の安全評価技術に関しては、①軽水炉の事故事象をできるだけ忠実に解析するための最適安全評価手法の開発、②ウラン燃料・MOX燃料の高い燃焼度範囲における事故時挙動を高い精度で評価する技術の開発等が重要であるとして、これを踏まえた研究が進められている。

軽水炉の高度利用に関しては、高精度な最適評価（BE）手法の開発に必要な熱水力詳細実験データを得るため、OECD／NEA／ROSA計画のもとで、大型非定常試験装置（LSTF: Large Scale Transient Facility）を用いた実験を行い、得られたLSTF実験データとBE解析コード（RELAP5等）を用いて、解析上・実機の原子炉適用上の課題を抽出している。また、3次元二相流コード（ACE-3D）をRELAP5と熱的に結合したコードを用いて、PWR蒸気発生器の二次冷却水側で生じる3次元の沸騰流動を解析・評価するとともに、3次元解析モデルの整備を進めている。これらの実験等に基づく軽水炉の熱力学的な最適安全評価手法の開発は、今後の安全審査への活用や安全審査指針類への反映が期待されている。

反応度事故時燃料挙動を確認するため、Zr-Nb二元系合金を被覆管材料として用いた高燃焼度燃料を対象とする水冷却条件下での実験、商用炉照射済MOX燃料を対象とした水冷却条件下での実験等を原子炉安全性研究炉

(NSRR : Nuclear Safety Research Reactor)で行い、燃料破損しきい値に関するデータの範囲を燃焼度61MWd/kgから77 MWd/kgまで拡大し、高燃焼度化に向けた安全審査のためのデータを蓄積している。

2.4 軽水炉の材料劣化・高経年化対策技術

材料劣化・高経年化対策技術に関して、①き裂進展評価法やき裂のサイジング技術等に関する最新の知見の整備、②経年変化現象の解明とその予測評価手法の整備、③き裂や劣化の検出・測定法の開発整備、④構造信頼性評価手法の整備等の研究が進められている。

原子炉機器・配管等の材料の炉水環境中における加速疲労試験を実施し、炉水環境中での疲労強度データを体系的に取得しデータベース化しており、これらのデータは日本機械学会の発電用原子力設備規格「環境疲労評価手法」の策定に活用されている。

低炭素ステンレス鋼 (SUS316L系) を用いた炉心シュラウド及び原子炉再循環系 (PLR) 配管に発生した応力腐食割れに着目して、超音波探傷試験及び渦電流探傷試験を実施し、これらの探傷試験による検出性及びサイジング精度に関するデータを収集している。この研究では各種非破壊検査技術の精度の確認、適用性等の実証が進められており、これらの成果は、日本電気協会の各種探傷試験の技術指針へ反映されている。非破壊検査による欠陥の検出精度やサイジング技術の高度化は、き裂の進展を高い精度で予測し維持基準の適確な運用を図る上で重要であり、合理的な保全に資するものである。

2.5 耐震安全性技術

耐震安全技術に関しては、①耐震安全解析コードの改良に関する研究、②耐震信頼性の実証に関する研究、③原子力プラントの安全設計上考慮する地震について、最新の科学的知見に基づき想定すべき地震動特性に関する研究、④様々な地震動による原子力プラントの健全性に関する研究 (安全機能の健全性・反応特性、システムとしての健全性等) 等が進められている。具体的な研究としては、活断層調査手法の整備、地震動特性の検討、耐震解析手法の高度化やコードの整備等が実施されている。これらの成果は、耐震設計審査指針の改訂検討に活用されている。

3. 保守技術の高度化のための研究⁽²⁾ (トピックス)

3.1 背景、目的

保守保全活動は、原子力プラントの安全性を維持するために重要な役割を担っている。しかしながら、機器トラブルや事故の中で、その根本原因が保守保全にかかわっていると推測される割合は、他の作業すなわち設計や運転などに関連する根本原因より明らかに多いことが認められている。特に、ヒューマンエラーが根本原因であったものは、原子力プラントで起こった事故やトラブルのうち60%が保守保全作業に関するものという報告がな

されている。

保守保全活動に携わる保守作業員のニーズ、行動分析の結果、「現場での情報提供」、「因果関係に基づく異常原因の推定に対する支援」、「過去の事例の参照する支援」が、保守作業員の負担を軽減し、安全な保守保全活動が行えるようにするために効果的であることが分かってきた。本研究では、これらの検討結果を基にプラント保守支援システムの構築を目的とした。

3.2 プラント保守支援システム

保守作業員の情報獲得活動を効率的に行うためには、現場における情報提供が重要である。現場において詳細な保守保全関連の情報(過去のパラメータの履歴、過去のトラブル事例等)を参照したい場合、現在では管理棟までとりに行かなくてはならない。現場においてプラントパラメータや事例に関する情報にアクセスできると同時に、現場で機器の状態を把握し、異常原因の推定を行いたいとニーズがある。そこで、携帯型情報端末による現場での保守作業員への関連情報の提供が有効である。

このため、図1に示すようなプラント保守支援システムを構築した。本システムは、複数のプラントがネットワークを介して互いに接続され、分散データベースによって情報が分散して蓄積されている状況を想定している。保守作業員は携帯型の情報端末を携行して、情報の取得や入力を行う。携帯型情報端末には持ち運び可能なモバイルセンサを装着することで現場での情報収集が可能となる。各監視対象機器は、計測用のUCD(Ubiquitous Computing Device)により監視を行う。UCDで計測された情報はLDB(Local Database)へ保存される。LDBはUCDとネットワークで接続されUCDで計測された情報の蓄積を行う。MDB(Main Database)はプラント全体を統括するデータベースサーバであるが、必ずしもプラント全ての計測情報を保持している訳ではなく、主要なパラメータ以外の計測データは、現場に設置されているLDBが保持することとしている。MDBはどのLDBに何の情報が存在するかという情報を保持している。

因果関係に基づく異常原因の推定に対する支援のためには、プラント診断手法としてベイジアンネットワーク(Bayesian Network: BNN)を採用した。ベイジアンネットワークは観測値(結果)、異常仮説(原因)間の因果関係を条件付確率によって記述したネットワークで、ベイズの定理により入力された情報に応じて異常仮説の確率の評価を行うことができる手法である。

過去事例の参照に対する支援のためには、過去の類似事例の検索手法として、指数分布に基づく類似度検索定義(Exponential Distribution-based Similarity : EDS)を用いた。この手法は、沸騰水型原子力発電所において実際に計測されたAPRM信号などを用いて、その基本的な有効性を検証している。

本システムの基本的な有効性は確認されたが、今後、

実際の原子力プラントに適用するためには、保守作業員による使用実績の積み重ねと評価を加え、さらなるプラント保守支援システムの改良を図っていく必要がある。

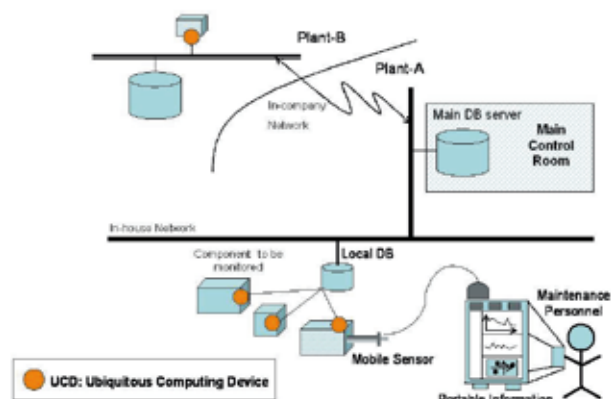


図1 プラント保守支援システムの概要

4. まとめ

日本では、軽水炉の安全研究については、軽水炉が導入された時代に必要とされた安全性を確保するための安全研究から、既存の軽水炉の安全性をより高いレベルで維持・向上するための安全研究へとシフトしてきている。一方、新型炉分野では、高速増殖炉の安全評価技術に関する研究も積極的に進められてきている。

日本の安全研究に関する国際協力は、二国間協力の枠組みや、国際原子力機関（IAEA）や経済協力開発機構／原子力機関（OECD／NEA）、国連科学委員会（UNSCEAR）、国際放射線防護委員会（ICRP）、世界保健機関（WHO）等における多国間の協力により実施してきている。日本は原子力先進国として国際的な貢献が求められているところであり、今後とも、二国間協力の枠組みに基づく安全研究や、国際機関が実施する安全研究について積極的に参画することが重要である。

参考文献

- (1) 平成18年度版「原子力安全白書」、平成19年7月、原子力安全委員会
- (2) 佐藤寿、伊藤洋、高橋信、北村正晴、大井忠、Wu Wei、「携帯端末とモバイルエージェントによる保守支援システムに関する研究」、保全学、3(3)、(2004)、11-19。

中国原子力の概況

•Profile•



窪田 秀雄 くぼた・ひでお ●日本テピア(株) テピア総合研究所・副所長

1964年生まれ。東京大学社会科学研究所教授

1987年東京大学経済学部卒業 1987～2001年アジア経済研究所勤務 2001年～現在 東京大学社会科学研究所勤務

著書：『現代中国の産業』（中公新書、2007年）、『労働市場の地殻変動』（名古屋大学出版会、2002年）、『市場発生ダイナミクス』（アジア経済研究所、1999年）、編著として『中国発・多国籍企業』（同友館、2008年）などがある。

中国の原子力発電開発が加速度を増してきた。中国では2008年末現在、11基、合計設備容量では906万8000kWの原子力発電所が稼働している。世界的に見れば、スウェーデンに次いで11位に過ぎないが、建設中、計画中は他の国を圧倒しており、過熱状態とも言える原子力発電開発のスピードに警鐘を鳴らす向きもある。一方で、原子力発電の一層の拡大に向けて、これまでの開発体制の変革を求める声もあがるなど、中国の原子力界は大きな転換期にさしかかっている。

2008年の原子力発電シェアは1.99%

中国電力企業連合会によると、中国では2008年に新たに9051万kWの発電所が運転を開始したことから総発電設備容量は7億9253万kWに達した。中国では、2006年、2007年と2年続けて1億kWを超える発電所が新規に運転を開始していたが、2008年は1億kW台には届かなかった。なお、中国政府の方針に従い、2008年には老朽化した小型石炭火力発電所が合計で1669万kW閉鎖されている。

2008年末時点の火力発電所の合計設備容量は6億132万kWに達し、総発電設備容量に占める割合は75.87%となり、前年の77.73%からわずかながら低下した。火力発電のうち、石油火力と天然ガス火力の占める割合は合計しても数%であり、ほとんどを石炭火力が占めている。水力発電は1億7152万kWで、総発電設備容量に占める割合は前年の20.36%から21.64%に上昇した。とくに伸びが大きかったのは風力発電で、466万kWが新たに運転を開始したことから設備容量は894万kWに達した。

2008年の総発電電力量は3兆4334億kWhを記録し、前年に比べ5.18%増加した。内訳は、火力発電が2兆7793億kWhとなり全体の80.95%を占め、前年の82.86%から1.91ポイント低下した。火力以外では、水力発電5663億kWh（16.41%）、原子力発電684億kWh（1.99%）、風力発電128億kWh（0.37%）となった。このうち原子力発電は、前年実績と比べると、発電電力量では9.3%増加したものの、総発電電力量に占める割合（シェア）では0.07ポイントの上昇にとどまった。

2009年に建設中の原発規模が2000万kWへ

中国政府は、こうした石炭への過剰依存を是正し電源のベストミックスをめざす一方で、供給能力を拡大する方針を打ち出している。その柱として位置付けられているのが原子力発電と再生可能エネルギーである。

このうち再生可能エネルギーについては、2007年8月に公布された「再生可能エネルギー中長期発展計画」の中で、全体の電力消費に占める再生可能エネルギーの割合を2010年までに10%、2020年までに15%に高めるとの目標を掲げている。

原子力発電開発の拠り所となっているのは、国務院が2006年3月に原則的に承認し、国家发展改革委員会が2007年11月に正式に公表した「原子力発電中長期発展計画（2006～2020年）」である。同計画は、「第11次5ヵ年」期間（2006～2010年）、「第12次5ヵ年」期間（2011～2015年）、「第13次5ヵ年」期間（2016～2020年）の3期にわたる原子力開発の方向を示している。

具体的には、2020年までに稼働中の原子力発電所の設備容量を4000万kWに拡大するとともに、建設段階にある原子力発電所の設備容量を2020年時点で1800万kWにするとの目標を掲げている。同計画によると、建設が終了した分と建設中のユニットを除いて、着工前のすべての作業が含まれる前期作業が開始された原子力発電所の立地点は沿海部だけで5000万kWに達する。

国家发展改革委員会は、こうした進捗状況を踏まえ、2020年までに運転中4000万kW、建設中1800万kWの目標を達成できると自信を示していたが、「原子力発電中長期発展計画」公表後、中国政府の予想を上回るスピードで計画が進んだ。

中国政府として、まだ正式に原子力発電目標の（上方）修正を明らかにしていないものの、7000万kWという新たな目標が浮上してきている。国家エネルギー局省エネ・科技装備司の黄鵬・副司長は2008年11月、当初の目標である4000万kWを7000万kWに引き上げる見通しを示した。

一方、原子力発電推進の中心人物と見られ、国家エネルギー局長を務める張国宝・国家发展改革委員会副主任は今のところ、（2020年時点の）総発電設備容量の5%以

上の原子力発電所を稼働させることが可能と述べるにと
どめ、具体的な目標を明らかにしていないが、上方修正
された目標の公表は時間の問題となってきた。

そうした強気の発言が出るほど、原子力発電所の建設計画は順調に進んでいる。2月18日の福建省・寧徳Ⅰ期原子力発電所1号機（加圧水型炉＝PWR、111万kW）の着工を皮切りに、2008年には遼寧省・紅沿河Ⅰ期・2号機（同、3月）、寧徳Ⅰ期・2号機（同、11月）、福建省・福清Ⅰ期・1号機（100万kW、11月）、広東省・陽江Ⅰ期・1号機（同、12月）、方家山1号機（秦山Ⅰ期拡張、同、12月）の6基が正式に着工した。

11月から12月にかけての2ヵ月間で4基の原子力発電所が着工した背景には、もちろん時期的なこともあったが、中国政府が国際的な金融危機に対応するための内需拡大・経済安定促進策の一環として原子力発電プロジェクトを位置付けたことを内外に示すねらいがあった。

2009年に入っても、勢いは衰えを見せていない。3月7日、遼寧省の紅沿河Ⅰ期・3号機が正式に着工したことによって、中国国内で建設中の原子力発電所は12基、合計設備容量は1201万kWとなった。

2009年には、米国ウェスチングハウス社が開発した第3世代炉「AP1000型炉」を世界で初めて採用する浙江省の三門原子力発電所のほか、同じく「AP1000型炉」を採用する山東省の海陽、中国初の高温ガス炉（HTGR）実証炉である華能山東石島湾（栄成）I期（20万kW）、フランスAreva社の第3世代炉である「EPR」を採用する台山I期、海南省の海南昌江、湖南省の桃花江など、840万kWが新たに着工すると見られている。2009年2月に開催された全国エネルギー工作会議では、これから毎年、平均して7～9基の原子力発電所が着工される見通しが明らかにされた。

計画通りに進めば、2009年末時点において中国で建設中の原子力発電所の設備容量は2000万kWを超す。これ以外にも、紅沿河Ⅰ期・4号機のように、国家核安全局から建設許可の発給を受け、まもなく着工するユニットもあることから、建設中の基数はさらに増加する。

計画中ユニットは169基・1億7400万kWに

国際原子力機関（IAEA）によると、2008年末時点で建設中の原子力発電所は中国の10基も含めて世界全体で44基となっている。“原子力ルネサンス”と称されるほど、世界的な原子力発電回帰が鮮明になっているが、中国において2008年から2009年にかけて着工される基数・規模だけを見ても、中国の計画は突出している。

しかし、これは中国の原子力発電計画のほんの一端に過ぎない。筆者の調査によると、中国では169基、合計設備容量では1億7442万kWの原子力発電所が計画されている。現在、運転中と建設中のユニットを合計すると、192基、1億9549万8000kWに達する。図に原子力発電所の主



な立地点を示す。

各プロジェクトにも、それぞれ温度差があり、現在計画されている原子力発電所がすべて建設されるということではないが、まだ出力規模が決まっていないプロジェクトも続々と発表されており、計画がさらに拡大することは間違いない情勢となっている。

そうした背景には、地元政府による積極的な原子力発電所の誘致がある。中央政府が原子力発電開発に強力に肩入れしていることもあり、地方政府も省や市、県といったレベルで原子力発電事業者に立地を働きかけている。

遼寧省の紅沿河原子力発電所は、I期プロジェクトで100万kW級のユニットが4基建設されることになっており、総投資額は500億元に達すると見積られている。すべてが地元に落ちる訳ではないが、雇用や税金も含めて、建設期間だけでなく40年以上の運転期間にわたって地元には相当の経済効果をもたらされる。

もちろん、事業者側にとっても原子力発電所は有利な資産であることは間違いない。中国産業の利潤率が平均で10%程度であるのに対して、原子力発電産業の利潤率は30%を超えている。中国の原子力発電プロジェクトが地元政府と事業者の二人三脚で行われている理由もこんなところにある。

原子力発電投資主体の多元化

こうした中国国内での原子力発電開発において1つの大きな特徴がある。すべてのプロジェクトに、中国核工業集团公司、中国広東核電集团有限公司、中国電力投資集团公司の3社のうち必ず1社が50%を超えて出資していることである。この3社以外に、50%を超えて出資している事業者は1社もない。

具体的に規定されている訳ではないが、“原子力発電投資主体資格”という指針がある。中国政府は、原子力発電プロジェクトの重要性を踏まえ、当初、実績のある事業者だけが原子力発電所の投資主体になることを認め、これ以外の事業者が投資主体となることを認めなかっ

た。現在も、そうした方針は変わっていない。

中国電力投資集团公司以外の5大発電事業者も例外ではなかった。5大発電所事業者の1つ、中国華電集团公司は河南省の洛陽市に100万kW級のユニットを4基建設することを計画し、2008年1月3日、洛陽市政府との間で合意に達した。市政府側も原子力発電所建設に向けて最大限の努力を払う意向を表明したが、河南省・発展改革委員会は中央政府の方針にならない、中国華電集团公司の実績不足を理由に同プロジェクトを支持しない考えを示した。仮に、このプロジェクトを進めるということであれば、中国華電集团公司としては、“原子力発電投資主体主格”を持つ3事業者のいずれかと組むしか方法はない。

そうしたなかで、投資主体として3社以外にも原子力発電プロジェクトに参入させる必要があるとの論調が現れてきた。全国政治協商会議の委員を務める邵秉仁・元国家電監会副主席は、2009年3月の「两会」（全人代と全国政協会議）で、3社以外が投資主体となることは、市場の要求と一致しているとしたうえで、投資の多元化によって市場の独占が阻止されると発言した。

同氏は、原子力発電プロジェクトは投資主体が必ず建設して経営しなければならないということではないと指摘するとともに、投資・建設と経営管理を分けることも可能であるとの見解を示した。

同じく全国政治協商会議の委員を務める5大発電事業者の1つ、中国大唐集团公司の翟若愚・総経理も2009年3月、中国の原子力発電の発展を制約している要因の1つとして投資主体の制限をあげ、投資主体の多元化を実現する必要性に言及した。

PWR－高速炉路線を堅持

中国は、「原子力発電中長期発展計画」の中で、原子力発電開発を進めるにあたっての技術路線を明確にしている。具体的には、「熱中性子炉（PWR）－高速中性子炉－制御核融合炉」である。

一方で、「数十年先の原子力の発展に着目すれば、沸騰水型炉（BWR）を視野の外に追いやることはできない」（「2007年中国核電行業分析及投資諮詢報告」、中国投資諮詢網）といった指摘もある。しかし、BWRの採用については今のところ、公式の発表は全くない。

中国で稼働中、建設中、計画中の商用原子力発電所で採用、あるいは採用が予定されている炉型は、秦山Ⅲ期で採用されているCANDU炉（カナダ型重水炉）を除いてすべてPWRであるが、フランス製、ロシア製、米国製、そしてフランスの技術をベースに独自に設計した中国製（CNP600型炉、CPR1000型炉）が混在している。

中国政府は、同じPWRでも基準や規格の異なった炉が採用されていることを問題視している。国防科学技術工業委員会（当時）は2007年9月、原子力発電基準・規格が原子力安全を確保するための有効な手段であると同時に

に、原子力発電技術の進歩と原子力産業の健全な発展を導くための重要な基礎であると位置付け、「加圧水型原子力発電所の基準体系構築に関する『第11次5ヵ年』計画」を公布した。

同計画は、現行の基準・規格が系統的でない実態を明らかにした。また、原子力安全面での重要な設備の設計・製造基準や規格、原子力発電プロジェクトの経済基準などで不足している部分があるとの見方も示した。

そのうえで同計画は、「第11次5ヵ年」期（2006～2010年）の目標について、原子力発電基準・規格体系構築の全体設計作業を完了するとともに、さらに完璧で詳細な基準・規格体系の構築プランおよび路線を確定するとの方針を打ち出した。

なお、中国政府が現在のPWRに次ぐ重要な炉として位置付けている高速炉の研究開発を担当している中国原子能科学研究院は2009年2月27日、熱出力65MW（電気出力20MW）の高速炉実験炉「CEFR」が9月に初臨界を達し、2010年には発電を開始する見通しであることを明らかにした。

内陸原子力発電所に「AP1000型炉」採用

中国で稼働中、建設中の原子力発電所はすべて沿海部に立地しており、内陸部には1基もない。そうしたなかで、技術路線統一の新しい方向性が示された。

国務院はすでに内陸部に建設する原子力発電所において採用する炉型を「AP1000型炉」に決めていたが、建設の前提となる内陸向けの標準化設計が完成していなかった。このため、内陸部での計画も進展していなかった。しかし、2008年末、「AP1000型炉」を内陸部に建設する際の全体設計、中核系統ならびに設備の全体設計が完了した。

同型炉をはじめとした第3世代炉の国産化の任務を負っている国家核電技術公司是、2009年末までには「AP1000型炉」を採用する内陸原子力発電所の初期安全分析報告を完成させるとしている。

江西省に建設が計画されている彭澤原子力発電所は、内陸初となる原子力発電所の参考プラントの有力候補にあげられている。同発電所では125万kWの「AP1000型炉」が4基建設されることになっており、1期工事として2基が建設される。国家核電技術公司是、沿海部の原子力発電所にはない冷却塔の研究開発に関して国際協力を進める意向を示している。

中国では2008年1月の大雪・寒波によって、石炭火力発電所に過度に依存する体質の脆弱さが浮き彫りになった。鉄道による石炭輸送が寸断されたことが最大の理由だが、通常、年1回の定期点検時に炉心燃料の一部を交換するだけで済む原子力発電所に対するニーズはむしろ内陸部で強まってきている。

なお、国家エネルギー局の孫勤・副局長は2009年3月、

「AP1000型炉」の国産化・自主化という方針に従い、今後新規に着工される原子力発電所は内陸部だけでなく沿海部も含めて「AP1000型炉」が主流になるとの考えを明らかにした。

国産化の成果採り入れに問題も

中国政府は「原子力発電中長期発展計画」の中で、技術路線を統一するとともに、原子力発電の安全性と経済性を重視したうえで「中国を主体として外国と協力することを堅持し、海外の先進的な技術を導入し、国内の組織を統一して消化・吸収する」という自主化の原則を示した。

そうした一環として進められているのが“自主化依託”（自主化の拠り所となる）プロジェクトで、「AP1000型炉」を採用する三門Ⅰ期・1号機と海陽Ⅰ期・1号機、「EPR」を採用する台山Ⅰ期・1号機が対象となっている。

同プロジェクトでは具体的に、設計作業は外国との共同設計からスタートし、国内企業による自主的な設計が完了するまで段階的に進め、中国独自の先進的なPWRのブランドと設計能力を確立することを目指している。

中国が自主化にこだわる大きな理由は建設コストの削減にある。国家核電技術公司の王炳華・董事長は2009年3月5日、三門Ⅰ期原子力発電所の2基の平均建設単価についてkWあたり1940米ドルになるとしたうえで、後続の2基については自主化・国産化によって1650米ドル程度まで引き下げることができるとの見通しを示した。

現在、建設中の各原子力発電所で採用されている100万kW級の「CPR1000型炉」については、1kWあたりの建設単価を1300米ドル以下に抑えることができると見込まれている。同型炉を採用する紅沿河発電所は、中国政府が掲げる「自主設計、自主製造、自主建設」という3つの原則を具体化する初の原子力発電所と位置付けられており、国産化率は1号機と2号機が70%、3号機と4号機が80%に達すると見られている。また、このうちの重要設備については85%の国産化を達成することが期待されている。

国家エネルギー局の李治・省エネ科技装備司長は、建設中の原子力発電所に関して総合国産化率が福清75%、方家山80%、陽江83%になるとの見通しを示している。また同氏は、kWあたりで見た建設単価が嶺澳の1700～1800米ドルから、紅沿河1500米ドル、寧徳1450米ドル、福清1400米ドル、陽江1300米ドルへと着実に低下していることを明らかにした。

張国宝・国家エネルギー局長は2009年3月3日、国産設備は外国の設備と比べて3分の1以上低いとしたうえで、原子力発電所の建設を制約している最大の要因が設備の供給能力にあることを認めた。同局長は、外国からの調達の可能性に言及しながらも、世界的に見ても供給能力に制約があるため、国内において供給体制を確立するこ

とが重要であるとの認識を示した。

国家エネルギー局が2009年2月に主催した「原子力発電技術装備自主化会議」では、主要設備の国産化が順調に進んでいる状況が紹介された。それによると、原子炉圧力容器と蒸気発生器の要（かなめ）となる鍛造品についてはすべて国産化が実現している。また主蒸気隔離弁についても、福清と方家山発電所向けでは国産化を達成することが有望としている。

一方で、同会議では問題点も指摘された。中国広東核電集団有限公司の鄭東山・副総経理は、こうした国産化の成果を有効に実施することが難しい状況にあると指摘するとともに、原子力設備と原材料の設計、設計検証、モデル部品を鑑定・評価する基準体系が確立されていない現状を問題視した。

また、中国機械工業連合会を代表して出席した隋永濱氏は、原子力発電技術設備の研究開発・製造を制約している最大の問題は資金不足にあると強調し、政府が一定の資金援助をするよう求めた。

過熱気味の開発と人材不足に警鐘

過熱気味の原子力発電開発に警鐘を鳴らす向きもある。中国の原子力規制当局である国家核安全局の李干傑・局長は2008年6月、内外の原子力関係者が一堂に会した中国原子力産業協会の年次会合で、野放図の原子力発電拡大は人材の確保や国産化戦略の推進、原子力安全管理といった点で深刻な矛盾を引き起こし、原子力発電所の建設における品質保証や運転面での安全確保にとって大きな脅威になるとの懸念を表明した。

また李局長は、原子力発電所の建設要員が不足しているだけでなく、研究開発や設計能力も十分とは言えない状況にあるとしたうえで、原子力設備の製造・据付や原子力安全面での監督・管理能力にも問題があると指摘した。

全国政治協商会議の委員を務める元国家環境保護総局副局長の王玉慶氏も2009年3月、中国電力新聞網のインタビューに答え、原子力発電開発に過熱現象が起きているため安全リスクが高まっているとの見方を示し、まず安全面での監督・管理を強化する必要があると強調した。

同氏はさらに、急速な発展によって多くの問題が露呈してきていると述べ、具体的には人材の不足や技術の未成熟、設備製造技術の低下、原子力安全の監督・管理の弱体化をあげた。中国大唐集团公司の翟若愚・総経理も人材が不足していることを認めている。

中国科学院院士で全国政治協商会議委員を務める何祚麻氏は、現在、中国が確保している天然ウランは2500万kW相当の原子力発電所を40年間運転する量しかないとしたうえで、さらに2500万kW分については国内で供給が可能なものの、輸入では1000万kW程度をまかなうのが現実的なことから、原子力発電開発規模としては6000万kW程

度が上限ではないかとの見方を示した。また、現在の原子力発電計画において、放射性廃棄物の処分が具体的に検討されていないことも問題点であると指摘した。

市場拡大見据え新規参入の動き

そうした一方で、原子力発電市場の拡大をにらみ、新たに市場参入をはかる動きも出てきている。中国の大手重機械メーカーである三一重工股份有限公司の向文波・総裁は2009年3月、原子力発電事業への参入を検討していることを明らかにした。同社は最近、風力発電事業にも参入しており、向総裁は、原子力発電市場への参入は戦略計画の一環だと説明している。

中国政府は、原子力発電事業をはじめとした中核事業への民間企業の参入を許可していないが、向総裁は政府に対して参入の許可を働きかける意向を表明しており、将来的には“中国のゼネラル・エレクトリック（GE）”をめざす考えを示した。重機械メーカーは、世界的な金融危機の影響を受けている。同社も例外ではない。このため、今後、大幅な拡大が見込める国内の原子力発電市場に照準をあてたとの見方が強まっている。

現在、1億kWの原子力発電所が稼働中のほか、30基を超える新規ユニットが計画中の米国さえも近い将来には迫り越すほどの勢いを見せている中国の原子力発電市場に外国企業も高い関心を寄せている。

国家核安全局は2009年3月3日までに、日本の4社を含む11カ国・66社が申請していた中国国内での原子力事業登記を承認した。外国企業の原子力事業登記は、国务院が2007年7月に公布した「民用核安全設備監督管理条例」と、同条例をもとに国家環境保護総局（当時）が同年12月に公布（施行はいずれも2008年1月）した「輸入民用核安全設備監督管理規定」が根拠になっている。

このうち「民用核安全設備監督管理条例」は、「中国国内の民生用原子力施設に対して原子力安全設備の設計、製造、据付、非破壊検査活動を行う外国企業は、事前に原子力安全監督管理部門に対して登記手続をしなければならない」と規定している。

これまでに登記した企業数が最も多いのはフランスで28社、以下、ドイツ10社、米国9社、日本4社と続いている。日本の4社は、日本製鋼所、三菱重工業、三菱電機、富士電機システムズである。

外国への原子力輸出も視野に

中国は、外国の原子力発電市場参入でも積極的な動きを展開している。パキスタンに対してはすでに30万kWユニットを1基輸出しており、2基目のチャシュマ原子力発電所2号機向けの蒸気発生器（SG）がハルビン・ボイラで2008年6月に製造が完了している。また、国家核電技術公司是2009年3月、傘下の上海核工程研究設計院がチャシュマ原子力発電所3・4号機の設計作業を開始したことを明

らかにした。

プラントメーカーではないが、中国を代表する原子力発電事業者である中国広東核電集团有限公司は2009年2月、ハノイでベトナム電力公社と原子力分野での協力意向書に調印したと発表した。また、ベトナムが計画している同国初の原子力発電所の協力についても協議したことを明らかにした。ベトナムは、2021年頃までに400万kW程度の原子力発電所を建設する計画を持っており、すでに初期実行可能性調査が終了し、近く国の承認を得る手はずになっている。

中国広東核電集团有限公司は、ベラルーシが計画している同国初の原子力発電所の建設に参加する意向も表明している。ベラルーシのミハジュク・エネルギー副大臣が明らかにしたもので、機器や役務の提供だけでなく、中国側からの融資も話題にのぼっているという。

原子力発電事業だけでなく核燃料サイクル事業を手がける中国核工業集团公司の康日新・総経理とヨルダン原子力委員会のトゥカン委員長は2008年9月、胡錦濤・中国国家主席とアブドラ・ヨルダン国王出席のもと、原子力平和利用協力議定書に調印した。議定書によると、中国核工業集团公司とヨルダン原子力委員会は、ウラン資源開発や原子力研究設備、人材養成、原子力発電所の建設等で協力する。

燃料サイクル開発にも積極姿勢

中国は原子力開発の早い段階から、将来の原子力発電の拡大を見据え、使用済み燃料を再処理してプルトニウムをリサイクルすることを決めた。この方針にブレはなく、「原子力発電中長期発展計画」でも、リサイクル路線を堅持することが改めて確認された。

リサイクルの要（かなめ）である再処理パイロットプラントについては、甘粛省の蘭州で1998年に着工し、すでに試験・調整段階に入っている。同プラントの処理能力は年間50トンHM（重金属）でスタートし、次のステップとして100トンHMまで拡張されることになっている。パイロットプラントに続く商業用再処理プラント（800トンHM）については、まもなく立地点の準備作業が開始されると見られている。

また、核電秦山聯営公司の杜銘海氏が2009年3月に明らかにしたところによると、MOX（混合酸化物）燃料については、ベレット製造技術を初歩的に掌握した段階に達しており、年間0.5トンの製造能力を持つ燃料要素試験生産施設の建設が行われている。

中国では、原子力発電の拡大に向けて、濃縮能力の拡大も計画されている。現在、1000トンSWU（分離作業単位）規模の濃縮プラントが稼働中のほか、ロシアの協力を得てさらに500トンSWU規模の濃縮プラントの建設が計画されている。

中国核工業集团公司の邱建剛・副総経理は、2010年か

ら2020年にかけて新規の濃縮プラントを続々と建設・操業させ、国内の濃縮能力を飛躍的に拡大したうえで、余剰能力を外国のユーザーに対して提供し、中国がアジアのウラン濃縮センターをめざす考えを明らかにしている。

中国は、先進的核燃料サイクル研究も積極的に取り組む姿勢を示している。科学技術部が2008年12月に公表した「核燃料サイクルと原子力安全技術」に関する重点プロジェクトの公募申請案内によると、4つの目標と6件の課題をあげ、それぞれ3～4年をかけて実施するとしている。

具体的には、「先進的核燃料サイクル技術モデル研究」については、核燃料サイクル技術のモデル研究を推進し、「PWR－高速炉」路線と整合性をはかる技術プランを提示するとともに、「分離－消滅処理」技術路線を確定することを目標として掲げている。

2番目の目標は、「先進的使用済み燃料再処理プロセスと分離設備の中核技術の研究」で、このうちの「高速炉使用済み燃料再処理の中核工程技術研究」と題する課題

には、高速炉使用済み燃料の溶解技術、PUREXプロセスのU、Pu共除染技術の改良等が盛り込まれている。もう1つの課題である「高効率の廃液分離、処理プロセスと中核設備の技術研究」では、動力炉の高放射性廃液の分離、固化処理および原子力用遠心抽出器等の先進的な再処理中核プロセスや設備の技術研究が盛り込まれた。

3番目の目標は、「長寿命核種の消滅処理研究」で、「高速炉を利用した長寿命核種の消滅処理技術研究」と「熱中性子炉を利用した長寿命核種の消滅処理技術研究」が課題としてあげられている。最後の目標は、「核燃料サイクルの安全技術研究」で、臨界事故分析と測定技術、放射線防護・モニタリング等の技術研究を推進し、核燃料サイクルの安全を確保するとしている。

広東の大亜湾原子力発電所と浙江省の秦山原子力発電所が商業運転を開始してから15年が経った。中国の原子力開発は、揺籃期を過ぎ、試行錯誤を重ねながら、独自の路線を踏み出そうとしている。

参考文献

1. 「中国原子力ハンドブック2008」(テピア総合研究所、2008年1月)
2. 「国家核電發展前景与安全文化」(杜銘海、核電秦山聯營公司、2009年3月4日)

関連ウェブサイト

1. 国家原子能機構 (<http://www.caea.gov.cn>)
2. 中国広東核電集团有限公司 (<http://www.cgnpc.com.cn>)
3. 国家核安全局 (<http://www.sepa.gov.cn/info/gw/haqwj>)
4. 中国科学院 (<http://www.cas.cn>)
5. 中央人民政府 (<http://www.gov.cn>)
6. 環境保護部 (<http://www.sepa.gov.cn>)
7. 国家發展改革委員会 (<http://www.ndrc.gov.cn>)
8. 国家エネルギー(能源)局 (<http://nyj.ndrc.gov.cn>)
9. 中国電力企業連合会 (<http://www.cec.org.cn>)
10. 中国核工業集团公司 (<http://www.cnnc.com.cn>)
11. 国家核電技術公司 (<http://www.snptc.com.cn>)
12. 中国核能行業協会 (<http://www.china-nea.cn>)
13. 中国原子能科学研究所 (<http://www.ciae.ac.cn>)
14. 中国核学会 (<http://www.ns.org.cn>)
15. 中国国電集团公司 (<http://www.chinapower.com.cn>)
16. 中国華能集团公司 (<http://www.chng.com.cn>)
17. 中国華電集团公司 (<http://www.chd.com.cn>)
18. 中国電力投資集团公司 (<http://www.zdt.com.cn>)
19. 中国大唐集团公司 (<http://www.china-cdt.com.cn>)
20. 中国能源網 (<http://www.china5e.com>)

A stylized map of East Asia, including the Korean Peninsula, Japan, and the surrounding seas, is rendered in a light blue color against a darker blue background. A bright, glowing light source, possibly representing the sun or a star, is positioned in the upper left quadrant, casting a strong beam of light across the map and creating a lens flare effect. The overall aesthetic is clean and modern, with a focus on the geographical context of the research.

食糧の持続的生産に関する研究

食糧の持続的生産に関する研究

はじめに

人間の生命と幸福な生活を維持するために、食料は一日も欠かせないものです。しかし急増する世界人口や環境破壊によって優良な耕作地は減少を続けています。また近年世界各地で頻発する天候不順や大規模な自然災害などによっても食料の供給は脅かされています。特に、改革開放による経済成長とそれに伴う都市化の進展が著しい中国においては、食料需要、とくに肉類の消費が増大したため、それに伴って飼料用穀物の消費量も大幅に上昇し、改革開放以前の穀物輸出国から輸入国へ転じつつあります。これによって中国が世界全体の穀物需要を左右する可能性についてもすでに広く知られている通りです。

日本の場合、平成19年度の食料自給率は、カロリーベー

スは前年度から1ポイント増加し40%、生産額ベースは前年度から2ポイント低下し66%（農林水産省HP/「日本の食料自給率」より）と、依然として低い食料自給率のままで推移しており、ここにいわゆる「食の安全問題」も重ねられてさまざまな議論の対象となっています。

今回は、こうした状況を鑑みて、東アジアの食料問題の要である中国と日本の「食料の持続的生産」について特集を組みました。中国、そして日本の第一線の論者によって、食料をめぐる諸問題が最新の情報に基づいて多角的に検討されております。このたびの特集が読者の皆様にとって幅の広い興味と関心を引きましたら誠に幸いです。

中国総合研究センター

中国の食糧安全保障戦略

●Profile●



万 建民 Wan Jianmin ●中国農業科学院作物科学研究所所長

1960年6月生まれ。現在中国農業科学院作物科学研究所所長。中国で初めての“若手学者奨励計画”特別招聘教授。1985年南京農業大学講師、1991年日本に留学、1995年京都大学農学博士の学位を取得、1996年京都大学JSPS博士研究員採用、1997-2001年日本の農林水産省農業研究センター研究員。2001年南京農業大学生命科学及び技術学院院長、農学院院長着任。2002年中国農業科学院の一般の優秀な人才に選ばれ、2003年から中国農業科学院作物科学研究所所長、中国農業科学院学術委員会委員、中国作物学会常務副理事長、中国農業生物技術学会副理事長を併任。主に水稻分子遺伝、遺伝子ポジショニング、遺伝子クローンと品種選択栽培などの研究に従事。水稻広親和性遺伝子6個、水稻休眠性遺伝子4個、新しい穀物蛋白遺伝子6個、品質と関係のある遺伝子12個を発見し、細かくポジショニング。栽培した生育の早い寧粳1号は2008年44.0万ha余りに普及、全国で第二位。発表論文は186篇、うちSCI論文66篇、特許は12件獲得。

一、中国食糧安全保障の現状と傾向

国連食糧農業機関の定義に基づけば、食糧安全保障とは、すべての人が、常に活動的・健康な生活を営むために必要となる、必要十分で安全で栄養価に富む食料を得ることができることを指す。これには3つの意味が含まれる。第一に食糧供給量が保証されていること、第二に購入能力があること、第三に購入した食糧が食品衛生上の要求に合うことである。

中国は発展途上の農業大国であり、耕地面積は世界の7%にすぎないのに人口は世界の22%を占める。13億人余りの食糧問題は、常に最重要事項である。中国自らの力で食糧自給を基本的の実現し、食糧の供給と需要の基本的なバランスを確保することは、中国政府の食糧安全保障問題解決の基本方針である。

(一) 食糧安全保障の現状

ここ60年近く、中国の食糧生産は三つの段階を経験した。1952年から1965年は、単位面積当たりの生産量に大きな変化がなかったため、総生産量は主に播種面積により決まった。1966年から1998年は、単位面積当たりの生産量が急速に増加するにつれ、中国の食糧総生産量も増加した。しかしその後、単位面積当たりの生産量の伸びが再び鈍化したため、中国の食糧総生産は再度播種面積に更に依存するようになった。2003年中国の食糧播種面積は一度約0.99億haにまで減り、税金や費用面の政策の調整及び国の農業への投資の増大に伴い、2008年播種面積は1.06億haにまで増加したが、それでも1998年の1.13億haの播種面積には遥かに及ばなかった。実際、2008年になってようやく、中国の食糧総生産は1998年のレベルに戻った。

食糧総生産がどうにも前進しない一方で、中国の一人当たりの食糧消費は近年増加の一途をたどっている。1990年から1992年、中国人の一人当たりの食糧消費はまだ370kg以下であった。1993年から2002年に一人当たりの平均収入は急速に増加したが、それでも食糧消費は375kg前後で落ち着いていた。しかしその後、一人当たりの食糧消費は増加を続けることになる。2003年から2007年、

中国人の一人当たりの食糧消費量はそれぞれ380.65kg、382.05kg、384kg、386.25kg、388.05kgであった。総生産量の引き上げに限界があったが、一人当たりの消費は急速に増加を続けたため、2000年からこれまで、中国は八年連続食糧需要が供給を上回っており、中国の食糧安全保障に再度警鐘を鳴らしている。

世界的に言うと、食糧生産は既に生産過剰から非常に不足している段階に入っており、中国が輸入によって供給を確保しようとしても、世界全体の環境は楽観できない。アメリカの農業省と国連食糧農業機関の統計によると、1999年からこれまで、世界の食糧生産量は2004年だけ消費量を越えた。2007年まで、世界の食糧備蓄は既に1986年の130日から54日に急速に減少した。中国の人口はまだ増加し続けているため、一人当たりの食糧消費増加の傾向が反転をすることは難しく、輸入に頼って中国の食糧安全問題を解決するのは、基本的に既に不可能である。そのため、国内食糧市場の需給バランスを維持するにせよ、国際食糧市場を安定させるにせよ、中国の食糧安全は国内資源に基礎を置き、基本的に自給を実現しなければならない。

(二) 食糧安全保障情勢の予測

中国農業科学院中長期食糧開発研究チーム（1993）の予測によると、2010年中国の食糧総需要量は5.6-5.9億トンに達し、2020年には6.6-6.45億トン、2030年に6.5-7.2億トンに達する。そのうち食糧は2.24億トン、飼料は3.60億トン、その他の用途に使用される穀物（種まき用の穀物、工業用穀物と損耗穀物）は1.36億トンである。2020年中国の一人当たりの主要な食用消費穀物は現在の日本の消費水準に近づくであろう。

国家食物及び栄養諮問委員会は2003年に中国の食糧開発の段階的目標をさらに提出し、2010年までに基本的にややゆとりのある社会となり、一人当たりの食糧占有量は391 kgとなり、食糧需給がバランスを欠くという矛盾はある程度緩和できると予測している。2020年に全面的にややゆとりのある社会になり、一人当たりの食糧占有量は437 kgになる。2030年に豊かな段階への過渡期のレ

ベルになり、一人当たりの食糧占有量は472 kgになり、食物の質と安全は市民の健康的な生活をしたいというニーズを保証することができる。

しかし、中国の食糧安全保障の新時代は、新たな厳しい試練に直面している。第一に人口が2030年前後に16億のピークに達することである。第二に都市化と工業化により耕地資源が少しずつ減少していることである。もし全国の耕地面積を1985～1999年の平均である毎年34.9万ha減少すると計算すると、全国の耕地は1999年の13004万haから2030年には11996万haに減少することになる。一人当たりの耕地面積は0.075 haにまで減少し、国連食糧農業機関が確定した0.05haの警戒ラインに近づく。第三は、水資源の不足という脅威と耕地の土壌肥沃度の低下が食糧生産に重大な影響を及ぼすことである。水資源の不足は、農地の灌漑の危機的状況を頻繁に引き起こし、全国で通年約3000億m³の水が不足し、ひでりの影響を受ける面積は0.13億～0.20億haになる。食糧生産と密接に関係のある生態環境も日に日に悪化しており、土地の砂漠化、アルカリ化、土壌浸食、気候温暖化及び排ガス排水や固形廃棄物の汚染拡散のすべてが食糧生産に影響を与える非常に大きな隠れた問題となっている。第四は、農業労働力の他産業への流出が不可逆的傾向になっている事であり、第五は国民の食物購買力が着実に上がってきているが、食糧総量のバランス、地域のバランス、品種のバランスと毎年の収穫量のバランスをとることがますます難しくなっていることである。

そのため、人口増加を厳しくコントロールし、全国の耕地が1.2億haを下らない、食糧播種面積は1.07億haの禁止ラインを下回らせないことを、守ることを前提とすれば、中国は食糧総生産の年1%増加を保持しなければならない。そうすることによって、食糧の安全を確保できる。

二、科学技術の食糧安全を保障する役割

(一) 主な成果

中国農業科学院の試算によれば、1978—1996年中国の各主要な技術の単位面積当たりの穀物生産量増加に対する貢献度の割合は、優良品種が33.8%、先進的な栽培技術が34.1%、植物保護技術が14.2%、土壌改良が17.9%となっている。各技術の総合的な運用を通して、農業の科学技術進歩は既に食糧安全を保障する第一の推進力となっており、中国の農業が新たな段階に入るのに歴史的な貢献をしている。それは主に以下の方面に現れている。

(1) 作物の新品種の栽培。中国は、系統選抜育種、交雑選抜育種、物理的・化学的な遺伝子操作、雑種強勢の活用など食糧作物育種面での基礎研究を相次いで行っており、食糧作物の矮性化と雑種交配化という技術的に大きな進歩を二度果たした。細胞工学、染色体工学、分子マーカー選択、遺伝子工学などの現代バイオテクノロジーの飛躍的な発展に伴い、食糧作物の育種は既にバイ

オテクノロジーと通常の技術を有機的に結合させる第三の発展段階に入った。五十年来、中国は既に40種余りの農作物、6000近くの高生産、良質、抵抗力の強い新種の組み合わせを育て、主要農作物は4-6回大規模な品種交配を行ない、毎回品種更新で10%～30%増産している。1950年以来、食糧作物の単位面積当たりの生産量は3倍前後増加し、食糧作物の優良品種のカバー率は次第に上昇し、現在優良品種のカバー率は既に95%に達している。

(2) 作物の生産技術。中国の作物栽培、科学的施肥、節水灌漑、植物保護と耕作の機械化など関連分野で大きく進歩した。多毛作栽培理論と技術の研究と普及に力を入れることを通して、中国の耕地多毛作指数は160%前後にまで増加した。食料作物の施肥を必要性を研究した上で、積極的な生産と化学肥料と有機肥料使用の普及を行ない、窒素肥料の施肥及び調合施肥、養分バランス施肥を主として作物施肥の技術を広く普及させてきた。節水灌漑技術面では、スプリンクラー灌漑、ドリップ灌漑、ミニスプリンクラーなどの技術を発展させた。近年日照りに強い作物や乾燥に強い品種と土壌水分の保持、堆肥の増加と雨水を集め灌漑に利用するなどの実用的な技術を集成し、食糧作物を日照りに負けず豊作にする栽培技術体系の第一歩を踏み出した。植物に有害な生物を抑える面について、有害生物が害を及ぼすしくみと植物の防衛メカニズムの研究を行ない、植物の病気を監視する技術が進歩し、予報や早期警戒モデルの開発及び地域的なIPM技術体系が打ち立てられ、応用されたため、病虫害の発生と被害のレベルを効果的に抑えることができ、毎年百億元もの経済損失を取り戻している。小麦、とうもろこし、水稻などの食糧作物を重点として、土壌工作機械、田植え機、種まき機、大型連合刈り取り機、脱穀機などの機械化された農具を研究開発し、農業機械の総動力は世界平均レベルの2倍になった。

(3) 作物の種質資源の研究。中国は世界主要作物の起源の中心の一つであり、豊富で多様な作物の種質資源を有する。50年余りの間、中国は二度の全国規模の農作物品種資源の調査と収集を行ない、現在すでに長期保存している各種の作物の遺伝資源は39万余りになり、世界第一位である。同時に国内外の種質資源の選別、鑑定と改良を通して、特に優れた性質と形状を持つ各々異なる大量の優良母材を栽培し、中国の作物遺伝資源は非常に豊富になり、大量の優良遺伝子が明らかになり、作物育種のしっかりとした物質面での基礎を固めた。

(二) 主要な問題

中国農業科学技術は大きく進歩したが、全体のレベルは世界の先進レベルよりもまだ10～15年遅れている。それは、次の分野に現れている。

第一に科学技術の貢献度が低い。中国の農業の成長に対する農業科学技術の貢献度は現在既に45%に達しているが、農業先進国の60%～80%の水準と比べると、明ら

かな差がある。もし中国の農業科学技術の貢献率が50%に達すれば、250億kgの食糧を増産できる。

第二は農業の科学技術成果の実用化率が低いことである。中国は毎年約6000項目余りの農業科学技術の成果があるが、実用化率は30%～40%にすぎず、一方農業先進国では実用化率は既に70%～80%に達している。

第三に転化した成果の普及率と定着率が低いことである。現在中国の農業科学技術の成果の実用化後の普及率も30%～40%しかない。これは、既に実用化した成果のうち、2/3が実際に生産に応用されていないことを意味する。

第四に資源の利用率が低いことである。中国は毎年300億～400億m³農業用水が足りないのに、中国の灌漑用水の有効利用率は30%～40%にすぎない。先進国は70%以上である。中国の化学肥料の毎年の利用率は30%～35%で、先進国は60%以上である。

三、中国の食糧安全保障戦略

(一) 成長戦略

中国の食糧安全保障が直面しているそれぞれの試練に対して、食糧安全保障の成長の傾向と科学技術のニーズから発して、各種の食糧総合生産能力を高めるのに有利な政策を打ち立て、健全にする。食糧安全保障にとって有力で要となる技術を重点的に開発し、各種の優良な技術の集成を実現し、食糧の単位面積当たりの生産量と質を大幅に向上させ、食糧生産を制約している大きなネックとなっている問題を解決する。中国の農業科学技術を革新し、成果を実用化する能力を向上させ、中国の食糧安全を技術面から保障する。

2020年までに、食糧作物種質資源の研究、品種選抜育種、農業資源の高効率利用、自然災害予防、バイオテクノロジーなどの重要な分野で大きく成長するよう目指す。食糧ハイテク産業の第一歩を踏み出し、食糧科学技術全体のレベルが、世界の中等レベルの農業先進国の仲間入りをし、食糧科学技術の貢献率も60%前後にすることを目指す。

2030年までに、食糧産業の要となる技術の分野で世界をリードするレベルになり、食糧科学技術全体のレベルは世界の中等農業先進国の中でトップの地位にあり、中国の人口のピーク期の食物の安全と消費とのバランスを、信頼できる技術的に保障する。

(二) 開発の方向と重点項目

(1) 良質で高生産の新品種の栽培と普及

“高生産で質が劣る”、“質はよいが低生産”という技術的な難題を解決し、良質と高生産が緊密に結びついた育種目標を確立し、種質資源研究を重視した上で、バイオテクノロジー、遺伝技術と情報技術など現代の技術の手段を十分に利用し、水稻、小麦、とうもろこしや大豆の育種、新材料の新たな制定と優良で高生産な新種の栽培

を重点的に行ない、広い面積で、単位面積当たりの生産量を引き上げる目標を実現する。

(2) 資源を高効率利用する技術の革新と応用

良質、安全、高効率の農業投入品と高生産で低コスト、効率を高めた新製品を定め、優良栽培に附帯した栽培技術を普及、応用させる。主産地の耕地の質を高めることを目標に、土壌測定をしてバランス施肥を行なうこと、有機肥料資源の総合利用と土地改良の培肥などの重要技術を重点的に研究して実用化し、耕地の肥料バランスと肥料の資源最適化を保障する。農業節水新設備、新製品、新材料を作ってモデル採用し、生物節水、農芸節水と節水工学を組み合わせることを通して、水資源の利用効率を上げる。正確な農業撒布技術と関連製品の研究開発と普及、応用を行ない、農薬使用量を減らし、農薬施用効率を上げる。

(3) 食糧の質の安全の監視測定、検査測定技術の革新と応用

無公害食糧の生産技術、生物有機堆肥、生物農薬などの技術、科学的な肥料の施用と安全な薬品使用技術を開発し普及させ、根源から農産品の質の安全を保証する。食糧産品、農業投入品と農業生態環境の質の安全を検査する技術を研究し、食糧生産の全過程で監視・検査測定体系を作り上げ、監視・検査技術レベルと能力を高め、食糧の品質基準を設定し、質を重視した生産を推し進め、食糧生産過程の生産物の質の安全を保障し、中国農産品の国際競争力を高める。

(4) 農産品の加工貯蔵技術の革新と応用

生物、物理学的に新鮮に保存するための貯蔵技術进行研究し、工業原料型、食用型の食糧加工技術进行研究し、食糧産業チェーンを成長させて拡大発展させ、食糧の総合利用効率を高め、付加価値をつけ、食糧の基礎加工から高度加工への転換、伝統加工から現代加工技術への転換を促進し、食糧生産全般の効果と利益を上げる。

(5) 基礎研究の強化と独自の創造能力の向上

食糧作物の重要な性質と形状の機能についてゲノムの研究を行ない、また、地方品種と中核となる母種の作製、雑種強勢、生物の多様性と遺伝子発掘、成長発育と調節メカニズムなどの科学分野の研究と基礎理論研究を行ない、食糧の優良で高生産、安定生産を基礎から支える。植物種質資源の収集保存を更に強化し、農業生物資源のデータベースを作成する。

(三) 開発すべき重要な核心技术

(1) 作物分子育種技術

種質資源を遺伝子資源に変える研究を強化し、中国での植物の新しい遺伝子発掘の遅滞と、高コストで低効率な状況を根本から変え、国際遺伝子特許の中で中国が有利な地位を占めるようにする。重要な機能を持つ遺伝子の発掘、分子マーカー選択、遺伝子組み換え、分子設計など現代分子育種技術を重点的に大きく成長させ、中国の国情に適した分子育種技術の環境を作り、分子育種と

通常の育種を結合させた技術のネックを解決し、重要な応用価値のある新しい遺伝子、新材料、新品種を栽培し、水稻、小麦、とうもろこしと大豆の品種を一新して、単位面積当たりの生産量を15%以上引き上げ、主な産地の優良品種のカバー率を100%に近づける。

(2) 水肥土を効率よく利用する技術

作物の代謝調節技術や、節水かつ高効率な食糧生産に必要な技術、耕地の質を守るために必要な技術と農地の養分を管理するのに必要な技術を重点的に開発し、資源を持続的に高効率で利用する新製品や新材料の開発や生産面の産業化を実現し、自然降水の利用度を56%から66%に引き上げ、灌漑水の利用度を現在の43%から55%に引き上げ、窒素肥料の当季利用率を現在の35%から45%に引き上げ、主産地の食糧生産コストを15-30%引き下げる。

(3) 正確な農業生産技術

ネットワーク技術、3S技術と農地情報に基づき、技術の精度の高い生産過程、遠距離診断とコンピューター活用環境を構築する。高度に機械化された大規模生産という条件の下で、正確な播種、正確な施肥、正確な灌漑、正確な施薬などの精度の高い生産技術システムを打ち立て、農業の正確な生産環境での情報収集、分析、処理と工学抑制技術の環境を作り、中国の食糧生産の機械化と情報化のレベルを大きく引き上げる。

(4) バイオハザード抑制技術

作物の病虫害、生物の駆除の仕組み、災害や災害で変化した生物の生態学及び調節メカニズムなどを重点的に研究し、重大なバイオハザードに対する監視と事前警報および応用技術において飛躍的な成果を得る。天敵のいない昆虫の繁殖及び利用技術、農作物に有害な生物の農地生態の調査、化学情報調査収集と成長障害を予防治療する技術、環境にやさしい農薬の開発及びその高効率で安全、正確な施薬技術、有害生物の薬への抵抗力の監視及び治療技術などにおいて大きく進展させる。

(5) 食糧の高効率実用化技術

食糧油加工の新技术と重大な装備、食糧油の主食品の工業化生産及び栄養の強化、大豆ととうもろこし資源の利用技術の開発、食糧油加工副産品の総合利用と良質植物蛋白加工の重要な技術などを重点的に開発し、食糧加工の技術水準が低く、加工設備が遅れていて、価値の低い加工製品が多く、付加価値の非常に高い加工品が少ない現状を変革する。

(6) 食糧安全保障管理技術

食糧生産の遠隔測定と地理情報システムの応用技術、食糧情報ネットワークとインテリジェント化した集成技術と食糧安全事前警報予報技術を重点的に成長させる。データベース技術、衛星技術、通信技術、マルチメディア技術を十分に利用し、中国食糧安全保障の情報ネットワーク共有の環境を構築し、全面的な食糧安全保障の監

視コントロール体系を打ち立て、リアルタイムで、動的、全面的、正確、科学的に中国食糧安全保障の動態変化を把握し、中国食糧安全保障のマクロ政策とコントロールの適時性、全面性、科学性を大いに向上させる。

四、食糧科学技術開発強化政策への提言

(一) 農業科学技術、特に食糧科学技術開発への更なる支援

農業科学技術に更に力をいれ、農産品、特に食糧流通部分への財政資金の一定の割合を、農業の公共インフラと農業の科学技術への投入に回す。法律面から農業の科学研究と普及の社会公益性を更に明確にし、国の財政支援を主として、地方と企業が共同で資金投入する多元化された食糧科学技術支援体系とメカニズムを構築する。

(二) 開放的、流動的、競争と協力の科学研究遂行メカニズム

科学研究機関の管理体制の改革を促進し、新しい研究遂行モデルとメカニズムを実行し、職場に応じた報酬、任務に応じた報酬、業績に応じた報酬の分配制度改革を実行し、多くの科学技術者の積極性と創造性を十分に発揮させる。課題の入札制度と仲介評価制度を全面的に実行し、多くの部門、多くの分野が合同で取り組み、開放された科学研究メカニズムを作り、国際間での科学技術交流と協力を強化し、中国独自の技術革新の勢力を少しずつつけていく。

(三) 企業による科学技術の革新と実用化への援助と支持

開発研究に携わる政府の科学研究機関が次第に科学技術型の企業に転換し、農業生産と製品の研究、即ち作物育種と緊密に結びついた新しいメカニズムを構築する。大学や科学院、研究所が外国企業や国際研究開発組織と合同で研究センターを作り、農業ハイテク研究の“特区”を形成して、創造能力を高めることを支援する。各地で既に作られている農業ハイテクモデル地区（園）に対する指導を強化し、真のハイテク技術産業化を促進する。

(四) 新しい科学技術普及体系の構築

科学技術の実用化方式を改革し、研究所、大学、企業を主とする多元化、科学技術の実用化、応用とサービス体系の普及を組織化する。現在の農業技術の普及機関が科学院、研究所、大学、企業などと横断して連合し、協力し、関連した食糧の新種、新技術、新製品の普及を担うことを積極的に支持する。

(五) 食糧の主産地と農民に対する強力な支援

食糧主産地と主な販売地との関係を正しく調整することを主として、食糧主産地に対する財政移転支出制度、及び食糧生産農家に対する直接補助制度を作り、食糧主産地と食糧生産農家が科学技術の普及と応用を重視するよう、生産現場に働きかけ、良質な食糧生産の積極性と主体性を促進させて、食糧安全を保障する。

主要農作物の品種選抜育種の現状および課題

•Profile•



袁 奎明 Yuan Kuiming ●山東省農業持続発展研究所 農業遠隔計測研究室主任

山東省農業持続可能な発展研究所、農業遠隔計測研究室主任、研究員（教授）。山東登録科学技術コンサルタント、国家登録コンサルタントエンジニア（投資）。1966年5月生まれ、1989年7月萊陽農學院牧畜専攻を卒業。1989年8月から山東農業科学院にて科学研究管理とマクロ戦略研究に従事。主催・参加した政府の特別プロジェクト計画と戦略研究は20余り、省の科学技術進歩賞は3つ獲得。

農作物の優良品種は優良な生物学的、遺伝子学的特性を持つだけでなく、優良な生産性と商品特性を持ち、農業生産上特徴があって、他にとって変わることでできない、最も基本的な生産財である。また、農業科学技術と各種の農業生産財は農業の発展にとって重要な役割を果たすものであり、とくに現代バイオテクノロジーは優良品種と植物保護や、除草、肥料用の土などの技術と有効に結びついて、多くの農業技術のうちの有効な技術となっている。世界各国は、優良品種選抜育種の普及を農業技術改造の主な内容としている。優良品種の中国農業成長への貢献度は、既に第八次五カ年計画期末の29%から現在の38%前後に上がり、山東省は1995年に率先して“優良品種プロジェクト”を始め、1996年9月、国も正式に種子プロジェクトを始めた。相次いで22の農作物国家改良センターと69の改良サテライトセンターを建設し、育種理論、技術と方法の研究においてかなりの進展があり、スーパー稲、耐虫性綿花、「矮敗小麦」と交雑したアブラナなど新品種の栽培は、既に世界をリードするレベルになっている。重要な応用価値のある育種母材一万余りを新たに作り、育種効力を増強した。国や省レベルの認定を得た780品種を選抜育種し、うちいくつかは主産地の主な品種となっている。改良センターや改良サテライトセンター、地方育種普及機関が有効に結びついて全国品種改良体系の第一歩となった。

一、中国の主要農産物品種選抜育種政策メカニズムについて

国家「種子法」の施行後、種子法律制度は少しずつ健全になった。国の農業省は相次いで9つの附帯規則を施行し、各省（自治区、直轄市）も「種子法」に則り、一連の地域に合わせた規則を制定し、種子産業の発展を法制面から保証した。2006年5月、国务院弁公庁が「種子管理体制深化改革推進のために市場の管理監督を強化することに関する意見」（国弁〔2006〕40号）を通知し、現在と当面の種子産業発展を指導する綱領的な文獻となっている。最近、農業省が優勢農産品と特色ある農産品に対しての計画を進め、優良品種の選抜育種と技術の普及を保証するため

の重要な措置としている。主な政策メカニズムは以下の通り。

（一）改良センターとサテライトセンターの運営は、“開放式運営”メカニズムを採用する。わが国の農作物育種能力とレベル目標を持続的に高めるため、“開放式運営”の原則に基づき、関連した科学研究機関と育種企業が改良センターとサテライトセンターの施設を使用し、育種の基礎的研究と新品種の選抜育種業務を行なうことを許可する。改良センターとサテライトセンターは、実際の状況に応じて適切な施設使用と消耗費を徴収できるが、営利目的であってはならない。運営管理上、国の科学研究への資金投入増大を積極的に図り、科学研究の力を統合し、規則制度を改善し、基礎および、ハイテク分野の研究プロジェクトや一般の育種活動が順調に行なわれ、成果の公益性と社会性を保証する。また、企業の応用研究開発への資金投入を支持し、経済効果と利益が見込まれる育種プロジェクトに対し、企業の自主開発を主とした状況が少しずつ出来上がってきている。

（二）種子産業の基础性、公益性、ハイテク研究開発プロジェクトに続けて力を入れ、種子産業の科学技術革新と技術の普及を早める。遺伝資源の機能発掘と利用を重視し、種子産業の国際競争力の基礎を固める。ハイテク育種研究を重点的に支持し、わが国の農作物品種の国際競争力を更に高める。種子検査技術の開発を急ぎ、種子貿易のグローバル化のニーズに対応する。新品種の普及を強化し、優良品種の商品率とカバー率を上げる。

（三）優遇政策を実行し、種子企業が育種の科学研究システムを作るのを援助する。種子企業が応用研究開発プロジェクトに資金投入し、改良センターのプロジェクトを利用して育種研究などのプロジェクトを行うことを奨励する。応用技術分野において、企業を主体とする種子科学技術の創造体系を少しずつ作る。市場メカニズムと国の支援措置を利用して、種子産業関連企業の技術改造を奨励し、種子の加工と、貯蔵、保護膜付与包装の新技術の研究、開発、普及を促進する。

（四）優良品種普及補助制度を更に改善し、補助品種と補助範囲を少しずつ拡大し、多く栽培しているのに育

種がうまくいっていない問題を解決して、優勢農産品地域の形成を進める。種子企業に対する政策上の支持を強め、税収減免政策を実行し、種子企業が科学技術の創造体系を発展させることを奨励する。買付資金を適切に管理し、国の備蓄している災害、不作対策の種子に対する貸出利息、消耗と管理費用を補助する。

二、山東省農作物品種選抜育種の現状

山東省は農業の大省で、食糧、綿花、油、野菜を生産している省である。小麦、とうもろこし、綿花、落花生など主要農作物の作付面積と総生産量は、何年も全国で上位にある。2006年小麦、とうもろこし、綿花、落花生の生産量はそれぞれ1889.8、1761.3、102.3、355万トンで、すべて全国第二位であった。山東省は1979年以来、農作物品種の更新と入れ替えを三度行ない、農村経済の安定した成長を強力に推し進めた。20世紀80年代に魯棉1号を育成し普及させ、わが国の綿花生産の更なる発展に重要な役割を果たした。20世紀90年代、掖単号とうもろこし品種は、28の省、市、自治区に広められた。1995年初め、国内投入規模最大の省レベルの農業新品種総合開発プロジェクトが始まった。優良品種プロジェクトの実施以来、選抜育種された小麦、とうもろこし、綿花、落花生、果樹、野菜など取り扱いの多い農作物の新品種（系）は2500余りになった。主要農産品は段階的な更新と入れ替えを行ない、農作物の優良品種の普及率は96%以上、モデル地域の統一品種供給率は99%以上に達した。新たに選抜育種された小麦、とうもろこし、綿花、落花生などの農作物の新品種の単位面積当たりの生産水準は、それぞれ600kg、750kg、150kgと600kgであった。現在、国レベルの作物育種改良サテライトセンターは6カ所、国レベルの農業技術地域の技術創造センターは2カ所、農業省野外科学観測試験ステーション2カ所、国レベルの新品種選抜育種の基礎材料を栽培する植物園1カ所、省レベルの農業生物資源センター1カ所、農業省検測センター13カ所、農業省繁育基地10カ所がある。

（一）とうもろこし

山東省は比較的早くからとうもろこしの交雑育種を行ない、成績も突出した省のうちの一つである。50年余りの間、山東の交雑とうもろこし育種活動は、品種間の交雑育種及び自家受粉の子孫間の二種類の自家受粉交雑育種株を掛け合わせる交雑育種、三種の異なる株を二度交配させる交雑育種、二種類の自家受粉株の交雑育種、二種類の自家受粉株の小型化交雑育種などを経験した。一般の育種以外に、放射線照射育種、バイオテクノロジーによる育種なども行なっている。栽培し、広い面積で普及し採用された80あまりの優良自家受粉の子孫と交雑種は、全省と全国のとうもろこし生産の発展に大きな役割を果たした。山東省でとうもろこし育種に携わる農業科学研究機関は、主に山東省農業科学院など17カ所、市レ

ベルの農業科学研究所、山東大学、山東農業大学、青島農業大学などがある。十年間で認定した品種は82あり、うち農業科学研究機関が育成した品種は39で、すべての品種の46%を占める。掖単号系列の交雑とうもろこし種は、わが国で先頭を切って小型のとうもろこし育種の方角を確立し、採用された小型とうもろこし交雑種がわが国のとうもろこしの単位面積当たりの生産量を高めるのに有効な道を切り開いた。単位面積当たりの生産量が1096.29kgという夏とうもろこしの世界記録を作り、これは国や省レベルの30余りの賞を獲得した。相次いで育成した"掖単系列"、"登海系列"のとうもろこし交雑種は、省レベルの認定を20品種余り、国レベルの認定を6品種が獲得し、作付面積は全国の40%以上で、山東省の80%以上を占める。

（二）小麦

20世紀の6、70年代、山東農業科学院の育成した“泰山号”系列小麦が、黄淮海冬小麦地区の主な栽培品種として、累計で0.23億ha近くの面積に広められ、増産された小麦は88億kgで、“泰山が頭の上にのしかかるほどの大きな影響力のある成果”と言われる名誉に預かった。ここ数年、“済麦”系列の小麦品種が全省の良質小麦の面積の80%をカバーしている。山東は1986年から小麦品質育種研究を始め、相次いで優良品種を育成し、認定、普及させてきた。そのうち、硬質品種は煙農15号、PH82-2-2、済南17号、煙農19号、淄麦12号、済麦20号がある。中間質品種は済麦19号、萊州95021、山農優麦2号、泰山1号などがあり、特に山東小麦品質改良は、1ムー（1/15ha）あたり500kgの高生産レベルで行なわれてきた。山融3号系は、山東大学生命科学院が細胞融合（体細胞交雑）を利用して穂の長いヒメカモジグサの染色体の小片を済南17号系統に入れ、選抜育種してできたもので、この育種手段は山東省が認定した小麦品種のなかで最初のものである。

（三）綿花

20世紀の80年代初め、山東農業科学院が作った綿花品種の“魯棉1号”は、累計0.08億haに広がり、57億元の社会経済効果を生み出し、黄淮海流域の綿花生産の歴史を塗り換えた。建国以来、山東省は六度にわたる綿花品種入れ替えに成功し、そのうち山東省が自ら育てる品種は後の四度の品種入れ替えの中で、主導的、あるいは重要な役割を發揮した。特に魯棉1号、魯棉6号に続き、山東省はここ数年、遺伝子組み換え耐虫綿花育種において、再び輝かしい成果を上げた。山東省は合わせて13の認定を受けた遺伝子組み換え耐虫綿花品種を栽培し、これは同時期に認定された耐虫品種の半分以上を占める。そして、山東省綿花栽培生理重点实验室と国家綿花改良センターを設立した。

（三）落花生

山東の落花生は長期にわたる生産栽培、科学研究の中で、海花系列、魯花系列など二百余りの品種が形成され

た。“第七次五カ年計画”以来、山東が国と省レベルの認定を受けた落花生品種は約23あり、そのうち殻つき落花生は13ある。省の種子管理部門の統計によると、現在山東落花生の播種面積が6.6万haを超えているのは3品種のみであり、それは海花1号、花6号と魯花11号であり、面積はそれぞれ10.08万ha、9.03万haと8.97万haである。山東落花生研究所は現在国内唯一の落花生専門研究機関であり、主に伏花生、白沙1016、徐州684、花37、魯花9号、魯花14号、8130など20余りの落花生新品種を選抜育種し、品質を確認し、普及させている。これらの品種は長江以北の各落花生産地で生産されており、普及した累計面積は、全国の良質品種落花生の普及した面積の45%前後を占める。国内外で落花生の1ムー（1/15ha）あたりの生産量が相次いで500、700kgの高生産記録を突破しており、国内外の単位面積当たりの生産量の最高水準に達している。

三、問題点

世界の育種研究は、既に伝統的な通常育種の技術から、バイオテクノロジーによる育種の段階に入った。世界中で既に6000項目余りの農作物のバイオテクノロジー研究成果が既に農地試験に入っており、一部の新技術は既に国外の数百万ヘクタールの土地で試用されている。国のレベルから見ると、全国で400余りの科学的研究員、研究所が種子研究開発に携わっているが、国の新品種研究開発に対する資金投入は充分ではなく、その上分散使用されているため、それぞれの力を合わせるのが難しい。一部の種子企業は商業化研究開発条件に適合した農作物の育種を手がけ始めているが、資金投入比率は2%-3%に過ぎない。基礎研究から見ると、“短期、安く、速く”を求めるものが多く、新品種選抜育種の基礎材料の利用など公益性基礎研究はひどく遅れている。応用研究から見ると、研究開発への資金投入は少なく、資金は分散され、統一した配分を考えず、まとまりに欠け、そのために多くのプロジェクトが低いレベルのままで重複し、目標がぼやけている。多く育てているが関連性に欠けるために、科学研究成果の実用化効率は低い。山東省の主要な農作物の育種状況から見ると、以下の遅れが見られる。

（一）認定された品種は多いが、抜きこんだ品種は少ない。綿花を例に取ると、これまで国や省レベルの認定は山東省が広めてきた国産耐虫綿品種が9つあるが、栽培面積が3.3万haに達する品種は2種類にすぎず、アメリカの耐虫綿の新綿33Bは2000年から本格的に広められて以来、毎年の栽培面積はずっと省内一位となっている。

（二）とうもろこし品種の多様化に対するニーズと格差がある。とうもろこし生態の区分によると、山東省は黄淮海夏とうもろこし区に属しており、通年でとうもろこしの栽培面積は約246.6万ha、毎年のとうもろこし種子の使用量は約1億kgで、全国とうもろこし種子総量の約

1/10を占めている。現在必要な品種が多様化しており、特に蛋白とうもろこし、高脂肪とうもろこし、飼料兼用とうもろこし、高でんぷん質とうもろこし、青刈りとうもろこし、生食用とうもろこしを含む良質とうもろこし品種が求められている。

（三）小麦育種はまだ一般の育種の段階にあり、交雑育種の技術はまだ不十分である。報道によれば、北京交雑小麦工学技術研究センターが担っている国の863計画“良質で超高生産の農作物新品種選抜育種”重要プロジェクト“小麦雑種強勢利用技術研究と応用”課題は、小麦雑種強勢利用の基礎研究と応用研究において、重要な進展があった。これによって、小麦雑種強勢利用が近い将来広く生産の場に広まるであろうということを示している。

四、目標

高生産で安定に生産でき、良質で、広く採用して効率よく収穫できるスーパー小麦新品種の栽培を重点的に強化する。“単位面積当たりの生産量を増やし、品質を改善して耐性を増強する”ことを目標として、超高生産で、食糧飼料兼用型の、良質の青刈りとうもろこしの新品種選抜育成に特に力を入れる。“高生産かつ良質で、総合的な耐性を高める”という方針を堅持し、良質で中長繊維綿と超高生産で良質な中繊維交雑綿の新品種選抜育種に主に取り組む。良質で高生産で、耐性も高い殻つき落花生、輸出専用型の落花生新品種の栽培など、良質で専用のスーパー高効率新品種の選抜育種をしっかりと行なう。細胞工学、遺伝子工学、分子記号、細胞融合、核技術などのハイテク技術と通常の間雑技術を用いて、新種質を作り、新品種を栽培する。

（一）小麦

生産量、品質、耐性と関係のある機能遺伝子の分子記号の解明と補助育種技術研究を重点的に進め、分子記号での遺伝子系譜を作製する。生産量、品質、耐性に関する機能遺伝子を特定して、優れた性質を持つ種質材料を作り、遺伝力、配合力及び優れた性質の機能遺伝子に関する研究を進める。

第一に灌漑地の新品種中質小麦を選抜育種する。この中質小麦は1ムー（1/15ha）あたり700kgの生産潜在能力があり、省あるいは国の地域試験の中で従来品種に比べ、5%以上増産する。硬質小麦は1ムー（1/15ha）あたり650kgの生産潜在能力があり、省や国の地域試験で、生産量は従来品種を下回らなかった。その品質は、GB/T 17320—1998基準を達成した。

第二に灌漑のできない乾燥地の新品種小麦を選抜育種する。この新品種は1ムー（1/15ha）あたり500kgの生産潜在能力があり、省や国の地域試験で従来品種に比べ5%以上増産する。

第三に耐アルカリ性の小麦の新品種を栽培する。この

新品種は1ムー(1/15ha)あたり450kgの生産潜在能力と、土壌の含塩量3%前後に対する耐塩性があり、省や国の地域試験で対照品種より8%以上増産した。

(二) とうもろこし

良質で、高生産で、高い耐性をもつ飼料専用とうもろこしの新品種選抜育種に重点的に取り組む。良質で、高生産で、高い耐性をもつでんぷん加工専用とうもろこしの新品種選抜育種を強化し、良質で、高生産で、高い耐性をもつ生食専用とうもろこしの新品種選抜育種も同時に行なう。

第一に飼料専用新品種を選抜育種する。新たに育成する品種は、生育期が90～110日、耐倒性や、耐病性もち、悪環境に強く、適応範囲が広く、1ムー(1/15ha)あたりの粒の生産量が対照種よりも10%以上増産し、1ムー(1/15ha)あたりの生産潜在能力は750～900kgで、粒の品質は国際二級以上の基準(容量685g/L、粗たんぱく質9%)を満たす。

第二に専用の青刈りとうもろこし新品種を選抜育種する。新たに育成する品種は、生育期が90～110日で、耐倒性と耐病性もち、悪環境に強く、老化が遅く、耐虫性もよいものとする。適応範囲が広く、粒は良質で、茎汁の含糖量は6%、全株の粗たんぱく質含有量は7%以上、粗繊維素は30%以下、水分を除いたとうもろこしの生産量は1ムー(1/15ha)あたり1000kg以上で、口当たりがよく、消化率が高く、乳牛や肉牛専用の飼料に適しているものとする。

第三は良質のたんぱく質とうもろこしの新品種選抜育種である。新たに育成する品種は、生育期が90～110日で、耐倒性、耐病性、悪環境に強く、適応範囲が広く、1ムー(1/15ha)あたりの生産量が普通のとうもろこしより5%～10%多く、粒は全硬質あるいは半硬質の胚乳で、全粒のアルカリ性必須アミノ酸、トリプトファンの含有量が通常のとうもろこしよりも60%～70%高く、養豚、養鶏専用に適しているものとする。

第四は高脂肪とうもろこし新品種を選抜育種である。新たに育成される品種は、生育期が90～110日で、耐倒性や、耐病性もち、悪環境に強く、適応範囲が広く、1ムー(1/15ha)あたりの生産量が普通のとうもろこしより5%～10%多く、1ムー(1/15ha)あたりの生産潜在能力は750kg以上、粒の脂肪含有量7%以上の高脂肪とうもろこし新品種である。

第五は高でんぷんとうもろこし新品種を選抜育種である。新たに育成される品種は、生育期が90～110日で、耐倒性、耐病性、悪環境に強く、適応範囲が広く、1ムー(1/15ha)あたりの生産量が普通のとうもろこしより5%～10%多く、1ムー(1/15ha)あたりの生産潜在能力は750kg以上、粒のでんぷん含有量72%以上で、でんぷん加工専用に適しているものとする。

第六は生食専用とうもろこしの新品種を選抜育種す

る。新たに育成される、うるちとうもろこしやスイートコーンの新品種は、生育期が85～95日で、耐倒性や、耐病性もち、悪環境に強く、適応範囲が広く、1ムー(1/15ha)あたりの生産量が400～600kgである。品質、味が良く、口当たりも良く、商品性にも優れ、果穂商品率は90%以上で、生食専用に適しているものとする。

(三) 綿花

第一に一般綿花と交雑綿花による、高生産の中繊維綿の新品種を栽培する。一般綿花の生育期は130日前後で、原綿生産量は地域試験で従来品種(99B)よりも10%以上多く、耐枯萎病(病気指数10以下)や、耐黄萎病(病気指数30以下)、耐綿鈴虫(防虫効果80%以上)があるものとする。上半分の繊維の平均長さは28mm以上、強さは29cN/tex以上、マイクロネア(micronaire)の値は3.7～4.9である。交雑綿花の新品種の生育期は130日前後で、原綿の生産量は、地域試験の対照品種(魯棉研15)よりも5%以上多く、育種効率は品種間の交雑種よりも30%以上高いか、あるいは明らかな性質の違いを示す遺伝子特性を持つものとする。耐抗、耐虫や品質の性質は、一般の高生産の中繊維綿の新品種と同等なものとする。

第二に一般中長繊維綿と交雑中長繊維綿による良質中長繊維綿の新品種を栽培する。一般綿新品種では中長繊維綿の生育期は130日前後で、原綿の生産量は中繊維綿の地域試験で従来品種(99B)を下回らないものとする。上半分の繊維の平均長さは31mm以上で、強さは33cN/tex以上で、マイクロネア値は3.7～4.2あり、純紡60本以上の綿糸、あるいは混紡良質補助綿に適しているものとする。耐枯萎病(病気指数10以下)や、耐黄萎病(病気指数30以下)、耐綿鈴虫(防虫効果80%以上)があるものとする。交雑綿新品種では生育期は130日前後で、原綿の生産量は、地域試験で従来の交雑品種(魯棉研15)より高く、耐病、耐虫性もち、品質の性質は、一般の中長繊維綿新品種に相当するものとする。

(四) 落花生

第一に高生産、良質で耐性の高い殻付き落花生の新品種を栽培する。春播きの高生産潜在能力は、1ムー(1/15ha)あたり600kg以上で、夏播きは500kg以上、省の地域試験での対象品種よりも8%以上増産できるものとする。葉斑病や銹病に対する耐性が1～2級上がり、耐瘠節肥があり鉄分不足に強く、耐倒伏性があり、全体的によく実がなるものとする。含脂肪量は50%以上ある。輸出専用の落花生品種(系)を栽培する。輸出する殻付き落花生はO/L比率が1.5～2.2で、伝統的な輸出用殻付き落花生の基準に合い、春播きの高生産潜在能力は、1ムー(1/15ha)あたりの生産量が600kg以上で、夏播きは500kg以上、省の地域試験で対照品種よりも8%以上増産した。輸出用殻無し落花生のO/L比率は1.4前後で、真珠豆型の伝統的な輸出落花生の条件を満たしており、種子の外観と品質は朝日型の基準を満たし、春播きの高生産

潜在能力は1ムー（1/15ha）あたり500kg以上で、夏播きは1ムー（1/15ha）あたり400kg以上、省の地域試験で従来品種よりも8%以上増産できるものとする。

第二は良質専用落花生の新品種（系）を栽培することである。省の地域試験で生産量は従来品種と同等で、農芸的性質と耐性は、現在の同類の主栽培品種に相当する

ものとする。高脂肪類の品種ではO/L比率が7.0以上で、低脂肪品種では脂肪含有量は42%以下、高脂肪品種では脂肪含有量は55%以上で、実の特大品種では実は重さ260g以上あり、耐病品種では耐性の高いレベルに達しているものとする。

中国の主要食糧資源の持続生産と高度利用技術の開発

•Profile•



劉 建学 Liu Jianxue ●河南科技大学食品生物工程学院副院长

河南科技大学食品生物工程学院副院长、教授。1999年江蘇大学農産品加工貯蔵工程学科、工学博士。現 中国農業工程学会高級会員、中国食品科学技術学会高級会員、中国農業工程学会農産品加工貯蔵工程分会第六、七、八回理事会常務理事。河南省高校青年骨幹教師、河南省學術技術先導者、孟津県政府顧問。近年は主に農産品加工貯蔵工程、食品栄養品質安全などの分野で科学研究と技術開発に従事している。省レベルの研究プロジェクト15；出版された著作8部、発表した学術論文52篇、うちEI、SCIに収録されたもの11篇。獲得した賞：河南省政府科技進歩二等賞1項、科技進歩三等賞1項、省教育庁科技賞一等賞1項、二等賞1項、河南省優秀自然科学論文賞二等賞5項、洛陽市政府科技賞二等賞1項、

食糧の深加工技術の研究と応用レベルの向上に力を入れ、食糧の深加工を発展させることは、中国の食糧安全を保障する重要な行動である。世界の先進国の経験が示すとおり、穀物の深加工の発展は穀物構造の調整に影響を及ぼし、それによって穀物資源の利用率と付加価値を高め、農業従事者の収入を向上させるのに有効な方法であることがわかった。深加工技術の分野で、中国の研究は先進諸国に比べ、かなりへだたりがある。このため、第11次5ヵ年計画で、国家は食糧の深加工に対し明確な要求を出した。すなわち、一応の形を作った現代的な食糧加工システムを、加工増値30%前後によって2010年までに深加工を今の8%から15%に高めるという要求である。

1 小麦の深加工

1.1 グルテンパウダー

グルテンパウダーは主に2つのたんぱく質からなる。ひとつは、分子量が比較的小さく、球状で伸縮性があるアルコール可溶たんぱく質、もうひとつは、分子量が大きく、繊維状を呈し、弾性に富む小麦たんぱく質であり、この小麦たんぱく質が全体の80%以上を占める。グルテンパウダーは水を吸うと網状構造のウェットグルテンとなり、粘着性・伸縮性・熱凝固性・乳化性・皮膜形成性に富む。たんぱく質の化学では構造が効能を決めるので、グルテンパウダーの効能特性を高めるためには、たんぱく質の側鎖と主鎖構造を理解する必要がある。現在、植物たんぱく質の改質技術には主に、物理法・酵素法・化学法がある。

1.1.1 物理法

グルテンパウダーの改質に用いられる物理方法は主にたんぱく質高压処理・熱処理・マイクロ波処理・超音波処理などである。

高压処理はたんぱく質の構造に一定の影響を与え、たんぱく質の理化特性（外観の状態やゲル特性、流動特性など）に変化を起こさせる。Apichartsrangkoonら^[1]は高压処理後の水和グルテン(含水量62.5%)の物理化学性質を研究した。研究の結果、温度や圧力、処理時間の増加に伴い、安定小麦タンパク構造のジスルフィド結合数も

増加することがわかった。圧力400～800MPaの条件で、60℃の温度で50分間熱処理を行ったところ、グルテンパウダーの硬度和ジスルフィド結合数も増加したのである。高压処理により、グルテンパウダーの硬度和ジスルフィド結合数も変化する。これにより、グルテンパウダーを用いてユニークな性質と構造を持った製品を生産する可能性が生じたのである。趙冬艶ら^[2]は、原始溶解度7.7%のグルテンパウダーに湿熱処理を施し、溶解度を48.4%にまで高めた。しかも、その乳化性と乳化安定性はともに100%である。超音波の方向性と透過力も強く、液体中に空化作用を起こすこともできるので、超音波処理によりグルテンたんぱく溶液の溶解度を高めることが可能である。

1.1.2 酵素法

酵素法による改質はコントロールしやすく、条件も適当で消耗が少なく、一貫性が強く、副産物も少ないというメリットがあるので、広く注目されている。

グルテンパウダーは制限酵素加水分解作用によって、その効能性質は著しく改善する。Dagoら^[3]は、真菌たんぱく酵素の加水分解熱処理を行ったグルテンパウダーの溶解度は、加水分解度(DH)の増加に伴い増えるが、DHが一定の範囲を超えると発生したバブルが壊れる事を発見した。加水分解度が適切(DH14%)であれば、グルテンパウダーの溶解度が増大するばかりでなく、pH9とpH6.5のときは気泡もかなり多く発生し、グルテンパウダーの応用範囲も広まる。齊軍茹は、中性たんぱく酵素加水分解小麦グルテンたんぱくを用いて、酵素分解物の効能性を研究し、酵素分解に小麦グルテンのたんぱく溶解度と乳化力、起泡性が大いに高まることを発見した。DHが絶え間なく上昇するに伴い、溶解度も増加を続ける。一定のDH値まで高まると、乳化特性と起泡力も高まるが、一定値を越えると、乳化特性と起泡力は下降する。このため、比較的高い効能特性を持つ酵素分解グルテンたんぱくを得るためには、グルテンたんぱくのDHが一定の範囲内にあるようにコントロールする必要がある。

パパインはメルカプトたんぱく酵素の一種であり、その作用は広く応用され、リパーゼを含んでいる。趙冬

艶ら^[4]はパパインを用いてグルテンパウダーの乳化性を改良した結果、グルテンパウダー質量分数11.0%、酵素濃度25 μ L/gグルテンパウダー、pH 7.0、処理時間2.0 h、処理温度55℃のときに、パパインはグルテンパウダーの乳化性を最高の加水分解条件に引き上げることがわかった。このとき、加水分解度3.5%、グルテンパウダーの乳化活性は57.4%から72.4%に、乳化安定性は53.7%から75.5%に、溶解度は7.7%から15.3%に高まる。このことから、パパインたんぱく酵素がグルテンパウダーの溶解度と乳化性を非常に高めることは明らかである。

アルカリ性たんぱく酵素 Alcalaseは一種の非特異性のペプチド結合のdicerであり、主に疏水性芳香族アミノ酸(チロシン・L-Phenylalanine・トリプトファンなど)にその作用が見られるペプチド構造である。趙冬艶ら^[5]はAlcalase酵素を用いてグルテンパウダーの乳化性を改良した結果、Alcalase酵素加水分解はグルテンパウダーの乳化性と乳化安定性の改善に高い効果を持つことが明らかになった。DH2%±の時に最大値を示し、乳化活性77.02%、乳化安定性78.56%になったのである。Blandineはグルテンパウダーを2種類の分子量50 kg/molと150 kg/molの無機超濾膜分離水解産物に分け、トリプシン制限性加水分解を行った。その結果、pH4.0と6.5、及び0.2%と2% NaClのもとで、滞留物はいずれも安定した起泡性を呈し、乳化性はその他の加水分解産物より優れていた。トランスグルタミナーゼは一種の触媒たんぱく分子の架橋酵素であり、たんぱく質の構造・溶解性・起泡性・乳化性・流動性などを改善することができる。たとえわずかの酵素であっても、たんぱく質食品に添加すれば食品のたんぱく構造が受ける影響は大きい。この酵素は一種の単体たんぱく質であり、親水性が非常に高いので、最適なpH値のもとでは中性で、熱に対しても安定している。趙冬艶はトランスグルタミナーゼを用いてグルテンパウダーの乳化性を改良した結果、最適な条件の下でグルテンパウダーの乳化活性は84.9%、乳化安定性は85.7%にまで高まり、酵素分解前に比べ乳化性が非常に高まったことがわかった。

1.1.3 化学法

1) りん酸化改質

たんぱく質のりん酸化改質は、たんぱく質の側鎖活性遺伝子Ser、Thr、Tyrの水酸基、およびLysの ϵ -アミノ基を、それぞれりん酸基のグループに入れ(Ser、Thr)Tyr-PO₂⁻とLys-PO₃⁻を作り、そこから大量のりん酸根群を引き出す。常用の化学りん酸化試薬にはPOCl₃・りん酸・三重合体りん酸ナトリウムなどがある。賈光峰はPOCl₃を用いグルテンパウダーにりん酸化の改質をおこない、りん酸化処理によりグルテンパウダーの粘着性が明らかに高まることを発見した。同時に、三重合体りん酸ナトリウムを用いてりん酸化改質を図っても食品たんぱく質の効能と栄養を改善し、たんぱく質の消化率には影響しない。

李瑜ら^[6]は三重合体りん酸ナトリウムを用いてグルテンたんぱく質のりん酸化改質を図り、その結果、りん酸化改質によってグルテンたんぱく質の効能性質は著しく改善し、乳化性、溶解性、起泡性、安定性のいずれも大幅に向上した。グルテンパウダーはりん酸化改質により、こしが比較的弱いパン粉を強化し、パン生産に用い、内部構造とやわらかさを改善し、内部の気泡がより細かく滑らかで弾力性に富んだふわふわのパンをつくりあげることができる。

2) アシル化作用

たんぱく質のアシル化作用は、たんぱく質の分子求核基群(例、アミノ基や水酸基)とアシル化試薬の親電子基群(例、カルボニル基)が相互に反応し、新効能基を引き入れる過程である。常用のアシル化改質試薬は無水酢酸と無水琥珀酸である。張紅印ら^[7]は無水酢酸と無水琥珀酸を用いてグルテンたんぱくのアシル化改質を研究した。その結果、アシル化改質後のグルテンたんぱくは溶解度、乳化性、起泡性、安定性のいずれも大幅に高まった。同じような反応条件の下では、琥珀アシル化反応のほうがアセチル化反応よりも、グルテンたんぱく質の効能性の改質に効果があることが判明した。アシル化作用とは逆に、消化の過程では脱アシル化作用を経てリジンに復原される。アシル化たんぱく質の栄養価値への人々の関心も倍増した。たんぱく質の琥珀アシル化の程度は高く、たんぱく質利用の生物作用を妨害し、動物の消化吸収に不利だという研究結果もある。アシル化たんぱく質の代謝メカニズムと安全性についての解明をさらに一歩深め、食品として適しているかどうかを討論しなければならない。

3) グリコシル化作用

近年、多くの学者は糖を用いてたんぱく質を改質し、管理条件下で糖とたんぱく質にMaillard反応を起こし、たんぱく質-糖共価化合物を生成している。この化合物の効能特性(溶解性、乳化活性、乳化安定性など)は原始たんぱく質より明らかに改善されている。王亜軍ら^[8]の研究では、管理条件下でグルテンパウダーと乳糖にMaillard反応を起こすことにより、グルテンパウダーの乳化活性は明らかに改善されることがわかった。

1.1.4 遺伝子工学の改質

遺伝子工学法は、たんぱく質の合成遺伝子を組み替えて、たんぱく質の効能特性を変化させる。Mansurは、中国の春小麦のグルテンたんぱくに遺伝子工学を用いて改質を行った。その結果、この種の遺伝子組替小麦は流動性に優れ、製造したパンの体積は大きく、品質も良いことがわかった。しかし、この技術はサイクルが長いので、効果が遅く、現在まだ実験段階にある。

単一の改質技術は往々にして改質目的の達成が困難である。近年、二つ、または二つ以上の方法を用いてたんぱく質に改質を施す技術が数多く出現した。酸法を用いて酸アミドを改質し、酵素分解処理したグルテンパウダー

に結合させれば、グルテンパウダーの乳化性と起泡性は著しく向上するという研究もある。童群義は、無水酢酸と三重合体りん酸ナトリウムを用いてグルテンパウダーに複合改質を行った。その結果、複合改質後のグルテンたんばくは溶解度、乳化性、起泡性、安定性のいずれも、改質前、または単独改質後よりも大幅に改善した。これは、グルテンパウダーがりん酸化やアセチル化の複合改質を経て、一種の高乳化性たんばくになり、グルテンの網状構造に対しても十分な強化作用を持つことを説明している。

1.2 小麦変性でんぷん

1.2.1 小麦ヒドロキシ基でんぷん

ヒドロキシ基でんぷんはアルカリ性の条件の下で、でんぷんとエポキシプロパンが反応し、でんぷんの分子にヒドロキシ基を引き入れて生成した一種のでんぷんエーテル類化合物である。小麦でんぷんはヒドロキシ基化を経ると、多くの性能が明らかに改変する。親水性のヒドロキシ基が入ると、水素結合の作用ででんぷんの分子間が弱まり、水に対するでんぷんの親和力が強化する。このため、でんぷんの膨張性と粘着性が高まり、でんぷん糊の老化の発生を効果的に防止する。ヒドロキシ基はでんぷん糊の透明度・凍解安定性・保水性・貯蔵安定性を大幅に高める。研究結果から、エポキシプロパン量の増加は、反応するエーテル化の程度を明らかに高め、製品の代替度も増加するが、しかし反応効率も下降することがわかった。しかも、エポキシプロパンを大量に加えると、製品の代替度は高くなるが、糊状化温度は下降するため、反応温度下ですでに部分的に糊状化現象が起こり、水洗や遠心脱水が困難になる。このため、反応中のエポキシプロパンの使用量は7.5～12.5 mLにコントロールしなければならない。反応温度が上昇すると、反応程度と反応効率とともに高まる。しかし、比較的高い反応温度ではでんぷんを糊状化しやすく、反応を均一に進行することがむずかしくなるばかりか、製品の洗浄脱水にも適さない。このため、反応温度は40～45℃の間で選択するのが望ましい。

1.2.2 小麦カルボキシメチル基でんぷん

カルボキシメチル基でんぷん(CMS)は変性でんぷんの一種であり、その物理化学性質はカルボキシメチルセルロース(CMC)と似ており、効能も似通っているが、生産コストはCMCより低い。このため、多くの分野でCMSがすでにCMCに取って代わり、医薬・食品・紡績・製紙・石油探査のボーリング・日用化学工業・その他の方面で広範に応用されている。現在、小麦深加工の発展に伴い、小麦でんぷんも日を追って増加している。CMSの研究と生産はすでに70年以上の歴史があるとはいっても、小麦CMSの研究は中国では依然として少ない。林紅秀と陳肇鏞^[10]は小麦でんぷんを原料にして、冷水の中で糊状化し、凝

固性は弱く、凍解安定性は良く、透明度が高い小麦カルボキシメチル基でんぷんを製造した。この研究により、小麦でんぷんから小麦CMSを製造する最適条件は、でんぷんの用量が16.2 gの場合、水酸化ナトリウムは8.8 g、モノカルボン酸8.5g、アルコール濃度60%、アルコール溶液50mL、反応温度35℃、反応時間70分だということがわかった。この研究は小麦CMS研究の理論上の空白を埋めただけではなく、小麦でんぷんの性能を改善し、応用範囲を広め、製品の付加価値を高めることが可能である。

1.2.3 低代替度小麦でんぷんりん酸エステル

でんぷんりん酸エステルは変性でんぷんに属し、一種のマイナスイオン型のでんぷんである。元來のでんぷんに比べ、粘着度と透明性がともに高く、ゴムのような粘性があり、しかも、細菌に対する分解度も安定している。でんぷんりん酸エステルは食品技術で乳化剤・増粘剤・安定剤として使用されているが、良好な凍結溶解安定性があるので、特に冷凍食品に応用されている。製紙工業ではでんぷんりん酸エステルを紙パルプの紙力増強剤として、紡績工業ではでんぷんりん酸エステルを糊付・プリント・織物の整理にそれぞれ使用し、元來のでんぷんに比べ、より高い効果を挙げている。このほかにも、でんぷんりん酸エステルは接着剤・降下剤・薬物充填材・垢取剤などに使用されている。

董彩文と陳肇鏞^[11]は小麦でんぷんりん酸エステルの製造と性質を研究し、その結果を発表した。ピロリン酸ナトリウムを用いて、小麦でんぷんりん酸エステルを製造する最適条件は、でんぷんの重量に対するリン酸塩の割合0.0287、pH値5.9、反応温度150℃、反応時間75分、でんぷんの重量に対する尿素の割合0.0460である。小麦でんぷんりん酸エステルの保水性と増粘性、凍解安定性はいずれも小麦でんぷんより優れ、糊状化温度も明らかに下降した。これにより、小麦でんぷんの性能の改善が可能になるだけでなく、応用範囲は広まり、小麦の深加工中に生産される大量の副産物ののはけ口の問題も解決し、小麦の深加工の経済効益を高めることが可能になった。

1.2.4 小麦架橋エステル化でんぷん

架橋作用はでんぷんの粘着度を大幅に強め、でんぷんのりの熱安定性を高める。エステル化作用はでんぷんの親水性を強化し、糊状化温度を下げる。でんぷんに架橋エステル化二重変性を行えば、架橋でんぷんとエステル化でんぷんの優れた性質を兼ね備えたでんぷん製品を得ることができる。小麦でんぷんはエポキシプロパン架橋と無水酢酸エステル化の修飾処理を経ると、高粘度のでんぷんを得ることができるが、その最適条件は、架橋剤の用量が0.27%、架橋時間3.3時間、架橋pH10、反応温度25℃、エステル化剤の用量6%、エステル化pH8.9である。この条件で作られした小麦架橋エステル化でんぷんの粘着度は元來のでんぷんの5-6倍であり、より優れた安定剤や増粘剤として、その方面に応用されている。

1.3 小麦ふすまの総合利用

1.3.1 小麦ふすまたんぱく

小麦ふすまたんぱくは12%-18%のたんぱく質を含む十分豊富な植物たんぱく質資源の一種であり、人体に必要な各種アミノ酸を含んでいる。ふすまに含まれるたんぱく質の構成は小麦粉のそれとは異なる。小麦粉の主要な構成物であるたんぱくの64%はアルコール可溶たんぱく質であり、24%はグルテンであるが、ふすまに含まれる4種類のたんぱく質は比較的平均に分布し、アルブメン20.1%、グロブリン14.3%、アルコール可溶たんぱく質12.4%、グルテン23.5%である。分離して取り出したふすまたんぱくは高濃縮たんぱくとして、直接たんぱく質の添加剤となり、食品業界で使用されている。たんぱく質の含有量を増やし、食品の栄養価値と構造の特性を高め、また、分離して取り出したふすまたんぱくに改質処理を施すことによりたんぱく質の加水分解液を生産することができる。このため、ふすまたんぱくは栄養強化剤として食品中に添加される。たとえば、パンや菓子類の発泡剤としてふすまたんぱくを使用した場合は食品の老化を防ぎ、肉製品に使用した場合は弾力性や保油性を増強する。

1.3.2 ふすま多糖

小麦ふすまは多くの炭水化合物を含み、ふすま全体の50%前後になる。主に細胞壁多糖である。さらに10%前後のでんぷんを含み、主にふすまに癒着する胚乳からなる。小麦ふすまの細胞壁多糖は非でんぷん多糖とも称され、小麦細胞壁の主な構成成分である。細胞壁多糖には水溶性と非水溶性があり、主に、ペントサン、(1→3,1→4)- β -D-グルコサン、セルロースからなる。一般に細胞壁多糖の抽出溶剤に用いられているのは主に、ペントサンと(1→3,1→4)- β -D-グルコサンだが、そのほかに少量のヘキソース重合体を含んでいる。ふすま多糖は比較的高い粘性を持ち、吸水性や持水性にも優れているので、保湿剤や増粘剤・乳化安定剤などの食品添加剤に使用されている。また、成膜性能にも優れているので、食用膜などに用いることも可能である。

1.3.3 ふすま食物繊維の調製

小麦ふすまは40%の食物繊維を含んでいる。これらの食物繊維は、便秘を予防し、抗癌的作用があり、血清コレステロールを下げ、糖尿病患者の血統レベルを調整し、胆結石を予防するなど、十分に重要な生理効果を持つ。このため、食物繊維とその食品の研究開発は、栄養学会と食品科学の業界から、ますます重要視されている。小麦ふすまの食物繊維は主にパン・餅・菓子類などの高繊維食品に用いられ、食物繊維が持っている吸水・吸油・保水などの性質を利用して、豆乳や豆腐、肉製品に添加し、鮮度を保ち、水の浸透を防ぐ。

1.3.4 小麦ふすまのペントサン

ペントサンは小麦の中の主要な非でんぷん多糖であ

り、穀物食物繊維の主要成分のひとつであり、主に、ヘキソース・キシロース・アラビノース・ガラクトース・マンノース・ブドウ糖などからなる多糖である。多くの研究により、ペントサンは練り粉に対し明らかな作用を持ち、パンの焙った品質を左右することがわかった。小麦中のペントサンは主に小麦ふすまに存在し、小麦ふすまの約20%前後がペントサンである。このため、小麦ふすまを原料にペントサンを調製し、その開発結果をパンの添加剤にすると、将来性は非常に明るい。このほか、ペントサンには高粘度酸化ゲル化などの性質があり、増粘剤と保湿剤として、食品業界に応用することができる。

1.3.5 β -でんぷん酵素の調整

小麦ふすまには大量のでんぷん酵素を含み、なかでも β -でんぷん酵素の含有量は約 $5 \times 10^4 \text{U/g}$ である。ふすまから抽出した β -でんぷん酵素は、部分的に、または全面的に、麦芽の代わりになるので、ビールや飲料などの糖化剤として用い、食糧の節約にもなるし、食糧の副産物の価値を効果的に高めることもできる。

1.3.6 ふすま抗酸化剤の調製

小麦ふすまの主な効能性である抗酸化剤はフェルラ酸・バニリン酸・クマリン酸である。小麦ふすま中の遊離アルカリ基フェルラ酸の含有量は0.5%-0.7%であり、この部分の物質を豊富に調製できれば、天然の抗酸化剤とすることができる。

1.4 小麦胚芽の総合利用

小麦胚芽は小麦粉工場の主要な加工副産物のひとつであり、小麦の重量の1.4%-3.8%を占める。分析の結果、小麦胚芽中のたんぱく質の含有量は約30%以上、人体の必須アミノ酸8種類を含み、特にリジンの含有量は豊富で、米や小麦粉の6-7倍になる。小麦胚芽は約10%の脂肪を含み、そのなかの80%は不飽和脂肪酸である。リノール酸の含有量は60%以上である。小麦胚芽中にはカルシウム・マグネシウム・鉄・亜鉛・カリウム・りん・銅・マンガンなど多くのミネラルが含まれ、特に鉄分と亜鉛の含有量は豊富で、小麦胚芽100gあたりに鉄分9.4mg、亜鉛10.8mgを含んでいる。

1.4.1 小麦胚芽たんぱく

小麦胚芽たんぱく質の含有量は30%前後に達し、不溶性たんぱく質はその中の30.2%を占め、非たんぱく性窒素は11.3-11.5%を占める。小麦胚芽たんぱく質の含有量に勝るのは大豆のみである。大豆たんぱく質の含有量は83%を占め、主食である米と小麦の場合のそれぞれ4.9倍と3.2倍になる。たんぱく質の含有量が比較的大きい動物食品と比べてみると、牛肉・豚肉・鶏肉(すべて脂のない赤みの肉)のそれぞれ1.5倍・1.8倍・2.1倍である。必須アミノ酸の構成は大豆・牛肉・鶏の卵に近く、主食の米よりも明らかに優れている。近年、小麦胚芽たんぱくは栄養が豊富で、生理効能も優れた食品原料であることを、人々が次第に

認識し始めた。小麦胚芽たんぱくの開発を深めることが、当面のたんぱく資源と効能性の研究開発の方向である。

1.4.2 小麦胚芽オイル

小麦胚芽中の脂肪酸は約10%を占め、そのうち80%は不飽和脂肪酸であり、リノール酸が約50%以上を占める。小麦胚芽を原料として調製した胚芽オイルには、小麦の栄養の精髓が集中している。ビタミンE、リノール酸、Octacosanoic Acid (Montanic Acid)などを豊富に含み、まだ未研究ではっきり解明されていない微量の生理活性成分を一部含んでいるが、栄養価は非常に高い。小麦胚芽中のビタミンEの含有量は約0.5%、その中で生物活性が最高のD- α トコフェリルはビタミンE総量の50%前後を占め、さらに一定量のTocotrienolsを含む。小麦胚芽オイルに含まれるビタミンEは大豆油の1倍、コーンオイルの2倍-2.5倍、綿花種油の3倍-4倍、米糠油の3倍-8倍で、最も理想的な天然宝庫だと国際的にも認められている。ビタミンEは若さを保ち、肌を保護する美容効果があるので、一連の老人性疾病を予防し、抗癌や体の衰えを防ぐ作用がある。しかも、血中酸素の利用率を高め、筋肉に持久力をつけ、抗不妊力もある。このほか、小麦胚芽オイルは高不飽和脂肪酸のリノール酸とリノレン酸を含んでいる。

小麦胚芽オイルの錠剤は販売されており、胚芽オイル錠剤の販売価格はキログラムあたりUS\$3000に達する。目下、85%-95%の小麦胚芽オイルと3%-8%のレシチンを混ぜ合わせむらのない液状にし、ゼラチンのカプセルに入れ、一種の高級な栄養食品を形成している。油をとった後の胚芽粕もまた一種の栄養価値が高い食品原料である。

1.4.3 低温脱脂胚芽

小麦胚芽は低温で油を抽出した後、非変性脱脂胚芽粕が得られる。色は白色でたんぱく質にほとんど変化はない。粗たんぱく質の含有量は約33%、アミノ酸の構成は基本的に均衡が取れており、大量の天然ビタミンを含んでいる。このため、小麦胚芽に固有の各種栄養素を用いて、主に次のような粉末状の食品を開発した。(1) 麦胚芽調味品と麦胚芽飲料。単酵素、または二重酵素法で、適当な条件の下で脱脂麦胚芽を分解し、ろ過または濃縮、発泡吹付けなどによって麦胚芽調味品と麦胚芽液体/固体飲料を製造する。(2) 麦胚芽パン。低温脱脂麦胚芽粕は減酵素粉碎を経ると脱脂麦胚芽粉となる。5%のグルテンパウダーと0.5%の複合乳化剤を用い、8%の麦胚芽粉を加えると、できたパンの体積と筋状の構造は比較的良好。パンの風味や表面の色、栄養価値も改善された。(3) 麦胚芽ビスケットと菓子類。焼く製品の中に適量の麦胚芽粉を加えると、製品の外観と食感を改善できるだけでなく、栄養価値を高めることもできる。ビスケットには一般に13%の麦胚芽粉を加え、菓子類には15%の麦胚芽粉を加える。

2 米の深加工

2.1 米の深加工技術

米の深加工の鍵である重要技術を全面的に革新し、“米の深加工の高付加価値製品と重要技術研究の新機軸システム”を創設した。米ぬか押出安定技術は品質保証期間を1年とし、アメリカの先進レベルに追いつき、米ぬか栄養素と米ぬか栄養繊維健康食品を開発した。米ぬか栄養素は米ぬか中の良質なたんぱく質・脂肪・ビタミン・可溶性食物繊維・ミネラルを豊富に含む。米ぬか栄養繊維は米ぬか中の食物繊維を主とし、豊富なたんぱく質などの栄養成分を含んだ栄養繊維食品であり、清潔生産と米ぬか全利用技術を実現した。米ぬか利用率>98%、米ぬかの価値は従来の10倍に高められた。低アレルギー性たんぱくと抗性でんぷんの研究成果は、価値の低い早稲米を高い付加価値ある食品にしたのである。開孔率99%以上、吸油率1.3 mg/gの籼米多孔でんぷんの研究が成功し、国内の空白は埋まり、国外の同種の製品の指標となった。調製技術は国際的な先進レベルにあり、籼米の付加価値は10倍に高まった。中国が開発した米胚芽飲料は、国内のみならず国外の飲料業で始めて開発されたもので、独特の栄養効能と風味を持つ。1トンの米胚芽から8トンの米胚芽飲料ができ、米胚芽の価値は15倍に高まった。現在、国内では米の高付加価値製品の初の生産ライン、ビーフンとインスタントビーフンの生産モデルラインが建設され、製品は遠く欧州連合に輸出されている。酵素法と物理法を組み合わせた方法を用いて、生物改質による良質な米たんぱくと米ぬかたんぱくを得た。応用生物、高効物理分離、超微粉碎などの技術により、米ぬか栄養素の沸騰錠剤、米ぬか降血脂カプセル、米ぬか多糖、 γ -アミノ酪酸、ライスマルクなどが開発され、米ぬか資源の100%利用を実現した。生物酵素法商品開発技術を用いて、米製品の鮮度保全問題を解決し、1年以内なら劣化を防いでビーフンを保存することが可能になった。米の深加工高効増値技術の研究成果は、米の価値を5-8倍に高め、全国の多くのトップ企業に普及している。

2.2 米の深加工の重要な新製品の研究と開発

2.2.1 インスタント栄養ライス、レトルト米、ファーストフードライス加工の重要技術と設備の研究と開発

インスタント主食に対するわが国のニーズについては、栄養豊富で衛生的・安全且つ便利なインスタント栄養ライスシリーズやレトルトライスシリーズの製品を開発した。大量の良質な碎米を用いて、ファーストフード栄養ライスを研究し、大豆粉・アミノ酸・ビタミン・微量のミネラル元素などの栄養素を補い、栄養均衡の理論と粉碎・混合・蒸し煮・圧縮・成型・乾燥などの技術を応用し、消費者によって異なるニーズを満たしたインスタントライス食品やファーストフード栄養ライスシリーズ製品を開発した。

2.2.2 早秈米を蒸谷米(parboiled rice)に加工する循環総合利用生産の重要技術と重大製品の研究と開発

早秈米の工業的な品質と食用品質との隔たりについては、米の加工時にその精米率がわずか50%あまりであることを考えると、資源の利用率は低く、農民の増収などの問題に影響する。行った研究は以下のとおりである。早秈米を蒸谷米(parboiled rice)に加工する栄養品質と食用品質の研究；蒸谷米(parboiled rice)高油米ぬか製油とたんばく質、食物繊維総合深加工などの研究；蒸谷米(parboiled rice)の粃殻(粃殻灰を含む)からシリカ白を生産する総合加工と循環利用する重要技術研究；深加工開発を用いて蒸谷米(parboiled rice)の碎米を総合循環させ、米たんばくや米でんぷん糖など高付加価値製品の重要技術の研究など。早秈米蒸谷米(parboiled rice)の主製品と系列の副製品を開発し、早秈米の循環総合高効利用を実現したのである。

2.2.3 高純度米分離たんばく、米微粒子化でんぷん調製の重要技術研究

米分離たんばくには高生物効価と低アレルギー性の効能がある。このため、世界の児童食品開発企業から高い関心を持たれている。現在、可溶性の米分離たんばくの生産技術はまだ未成熟であるが、米でんぷんと米たんばくの工業化を分離し、米分離たんばくの生産規模を拡大し、米分離たんばくを改質し、米微粒子化でんぷん調製と米微粒子化でんぷん調整脂肪代替物などの技術研究を開発し、シリーズ製品の開発と産業化を行えば、米の高効精深加工は実現する。

3 トウモロコシの深加工

3.1 トウモロコシの深加工技術の進展

トウモロコシの精深加工製品は主にトウモロコシでんぷん・でんぷん糖・変性でんぷん・アルコールなどである。現在国内では、複合酵素改質技術を始め用いて、ろう質トウモロコシでんぷんを利用して食品用の架橋酢酸エステル糊状化でんぷんや架橋ヒドロキシプロピルでんぷんを生産し、輸入品に取って代わっている。高効乾式変性でんぷん生産装置を自ら製造し、2万トンの乾式変性でんぷんモデル生産ラインを建設し、変性でんぷん業界の発展を長期にわたって悩ました環境汚染と節水問題を解決した。

触媒とアルコール分離などの重要技術については、国際的に先駆けて、トウモロコシ加工を用いて有機化工アルコールの産業化を実現し、年産2万トンあまりの多元アルコールモデル生産ラインを建設した。エチレングリコールとグリコールの純度はそれぞれ99.5%と99%に達する。三高酵母菌株を育成し、アルコール度11%-13%(v/v)の濁り酒の発酵に成功し、アルコール発酵の全体サイクルを55

時間に短縮した。これにより、高濃度廃水のゼロ排出は実現し、エネルギーは37.8%、アルコール度生成コストは21%下降した。

3.2 ウモロコシ深加工の重要製品の研究と開発

健康食品の発展傾向についていえば、低血糖指数と肥満疾病を予防する難消化性でんぷんおよびその他の変性でんぷん製品の研究と開発を行った。回生と老化により、新型結晶構造のメカニズムが形成され、それをめぐって、慢消化でんぷん生産の技術と設備の研究、製品の効能と応用研究を行った。反応効率が高まり、製品中の混入物の含有量が低下すると、低汚染複合変性ステアリン酸でんぷんエステルの生産技術の研究、産業化開発と製品応用技術の研究が行われ、マイクロカプセル化油脂と乳化香料エッセンスを開発した。環境保護型建築内の壁塗料に用いられるカルボキシメチル基が研究開発された。酵素法とは合成が異なる糖基分枝環デキストリンの生産技術と産業化の研究がなされ、派生化技術によって環デキストリン派生物の生産に成功し、環デキストリンシリーズの製品が生まれた。

わが国の新エネルギー剤の戦略ニーズについて述べれば、L-乳酸の研究と開発を行った。L-乳酸に対するポリ乳酸(PLA)塩化ビニール製品業界と食品業界のニーズは急激に高まっているが、わが国ではL-乳酸のプラント生産技術がまだ完全ではなく、L-乳酸の生産に鍵となる重要な技術と産業化モデルの研究を行っている。L-乳酸生産菌を選別し、発酵技術を高め、抽出技術を研究し、原料の転化率と製品の品質を高め、生産コストを下げる。

わが国のでんぷん糖は、生産量は大きいですが、全体的な技術レベルは低い。そこで、でんぷん糖の生産に重要な技術と産業化の生産技術を研究し、現代的酵素技術・膜分離・工業スペクトル分離・結晶などの技術を運用して、高純度でんぷん糖生産の技術的なネックを突破し、高品質のぶどう液・結晶果糖・超高麦芽糖・全糖粉などの製品を開発し、中低レベルのでんぷん糖製品しか生産できないというわが国の現状を打破する^[12]。

食糧の深加工は長期間にわたる事業であり、たゆまぬ努力と骨身を惜しまぬ勤勉さが必要であり、数年間励めば完成するというものではない。このため、食糧の深加工は依然として第11次5ヵ年計画における科学技術問題の重要プロジェクトである。食糧深加工の攻略をめぐるプロジェクトの重点は、特に現代食品の転化加工と高付加価値製品の開発に共通の重要技術であり、国内の差し迫った必要性和新技術・新設備・新製品の知的所有権を研究し、産業化に共通の重要技術と重要な新製品開発を目指すものである。

参考文献

- [1] Apichartsrangkoon. Effects of high pressure on rheological properties of soy protein gels(高圧縮下における大豆プロテインジェルのレオロジー上の影響). Food Chemistry, Volume 80, Issue 1, January 2003, Pages 55-60
- [2] 趙冬艷、王金水. 湿熱処理提高谷朥粉乳化性的研究[J](湿熱処理がグルテンパウダーの乳化性を増すという研究).『糧食与飼料工業』,2003(4):45-47
- [3] Dago. Candida albicans cellular internalization: a new pathogenic factor? (カンジタ菌細胞の内面化：新しい病原体か?) International Journal of Antimicrobial Agents, Volume 16, Issue 4, December 2000, Pages 545-547
- [4] 趙冬艷、董海洲. 木瓜蛋白酶提高谷朥粉乳化性的研究[J] (パパインがグルテンパウダーの乳化性を増すという研究).『糧食与飼料工業』,2005(11):23-25
- [5] 趙冬艷、王金水. 碱性蛋白酶水解提高谷朥粉乳化性的研究[J] (アルカリ性たんぱく酵素加水分解がグルテンパウダーの乳化性を増すという研究).『糧食与飼料工業』,2003(8):39-41
- [6] 李瑜、尹春明. 三聚磷酸钠改性小麦面筋蛋白研究[J] (三重合体りん酸ナトリウムの研究).『糧食与油脂』,2002(2):4-5
- [7] 張紅印、王蘭. 小麦面筋蛋白的乙酰化改性[J] (小麦グルテンたんぱく質のアセチル化改質).『無錫輕工大学学報』,2002,21(3):239-243
- [8] 王亞軍、王金水. 乳糖改性提高谷朥粉乳化性研究[J] (乳糖改質がグルテンパウダーの乳化性を増すという研究).『食品工業科技』,2005,26(4):77-80
- [9] 賈光鋒、柳慧花. 微波改善谷朥粉黏性的研究[J] (マイクロ波がグルテンパウダーの粘着性を改善するという研究).『糧食与飼料工業』,2004(3):23-24
- [10] 林紅秀、陳肇鎔. 小麦羧甲基淀粉粉的研究[J] (小麦カルボキシメチル基でんぷんの研究).『鄭州糧食学院学報』,1996,17(2):15-24
- [11] 董彩文、陳肇鎔. 低取代度小麦淀粉磷酸酯的研究[J] (低代替度小麦でんぷんりん酸エステル の研究).『鄭州糧食学院学報』,1995,16(2):1-7
- [12] 姚惠源. 我国“十一五”糧食深加工科技研究的发展趋势[J] (わが国の“十一五”食糧の深加工科学技術研究の發展傾向).『糧食与飼料工業』,2006(4):3-5

産業の発展を猛スピードで推し進めた中国の淡水魚業

•Profile•



邴 旭文 Bing Xuwen ●中国水産科学院淡水漁業研究センター副主任

現在中国水産科学研究院淡水漁業研究センター副主任、研究員。1968年生まれ。2006年12月南京農業大学修士の学位を取得。現在中国水産学会エキスパート会員、中国観賞魚研究会員、中国水産專業標準化技術委員会淡水技術分会員。主に淡水魚類の健康養殖および大規模水域における増養殖技術事業に従事。国家重点科学技術の難題プロジェクト、科学技術部成果転換プロジェクト、省院プロジェクト等20以上のプロジェクトに相次いで主宰もしくは担当する。主宰した『タウナギの養殖集約化および大量繁殖技術のパイロット試験』は2004年江蘇省科学技術2等賞を受賞、2005年農業部豊作3等賞（全てco-first author）、その他省の部科学技術賞7件。『水産学報』『中国水産科学』等主な刊行物に発表した論文は30篇以上。

改革開放以降、中国における淡水漁業は著しい発展を遂げ、淡水水産品の生産量およびその規模は世界第一位となった。2006年の淡水総生産量は2544万トンに達し、その内、養殖生産量は2148万トンを達成、中国漁業総生産量の40.7%を占めた。中国の淡水漁業は世界で非常に重要な地位を占めているだけでなく、農業輸出における外貨獲得の主な産業であり、大口輸出品目の第一位になっている。中国の漁業は改革開放にあって、政府の適切な政策指導により、積極的に農民や漁民を支援し、市場経済を発展させ、都市と農村の水産品需要に対する問題を解決することに成功した。また、食糧の安全保障、水産品の安定供給、水産品貿易の拡大および雇用創出の拡大等の分野で重要な役目を果たし、世界が注目する漁業大国となったのである。

中国の漁業がこのような著しい成功を収めた理由は、改革開放の恩恵を受け適切な漁業発展方針と政策が施行されたためである。主に科学技術面で輝かしい成果を上げたことで漁業が著しく発展し、一連の重要な科学技術的成果が漁業経済を絶えず新しい段階へとリードし続けたためである。

中国科学技術体系の絶え間ない発展と整備に伴い、漁業資源の開発利用と、水産養殖、水産品加工および漁業設備の現代化において一連の重要な成果を上げた。国家レベルの表彰を受けた水産科学技術の成果は合計で100件以上あり、閣僚レベルの表彰を受けた成果は565件、その内、1980年以降、合計で国家自然科学賞5件、国家発明賞8件、国家科学技術進歩賞52件を受賞した。漁業におけるたゆみない科学技術の進歩によって、2001年から2005年までの魚業の増産率は50%を超えた。漁業の際立った発展によって、一部の水産養殖に重要な新しい技術が開発されたため、漁業生産に著しい変化が生まれたのである。

1、淡水優良の育成に大きな飛躍

現在、中国における淡水水産養殖の種類は極めて多く、50種類以上にも上るが、水産養殖で基幹的な役割を果たし、主導的な立場にある淡水養殖品種（主力品種）は実に少なく、わずか10種類以上（即ちエビ類、貝類、シナ

モクズガニ、ティラピア、ソウギョ、ハクレン、コイ、フナ等）しかない。これらの主力品種は養殖が容易で、生産量、普及率とも高く、市場需要も大きい。それらの中には中国の輸出における外貨獲得の優勢製品、例えばバナメイ、貝類、シナモクズガニ、ティラピア、ウナギ等）もあり、一般貿易輸出の約50%を占めている。2004年の統計によると、以上の主力品種の養殖生産量は1633万トンに達し、水産養殖総生産量の51%を占め、既に水産養殖の半分を占めた。主力品種は国内市場の消費需要を安定させただけでなく、中国輸出において外貨獲得の優勢水産品でもある。

（1）淡水養殖の主力品種の遺伝資源研究面において著しい成果を上げた。

国家自然科学技術資源プラットフォーム構築の全体目標に基づき、本研究は2008年までに第一段階の構築目標を達成し、正常に遂行された。現在、省レベルの水産科学研究所26ヶ所と大学等の部門が合意という形で水産遺伝資源共有プラットフォームの構築に参加し、合計で国家レベルの水産原良种場および一部の省に属する水産研究所を含む資源保存に加盟する61部門を整理統合し、全国の主な水産科学研究教育部門のネットワークを網羅する共有サービスプラットフォームの基盤を作った。プロジェクトは各種水産遺伝資源の説明基準および技術規定123項目を制定し、合計で生体資源情報612種、遺伝資源標本情報3377種、DNA430種、精子116種および5314本の細胞系資源情報を標準化し、整理・デジタル化を行うことでバーチャルネットワーク標本館を開発し、情報と実物資源の共有を実現した。『中国水産遺伝資源と利用』第1巻および『長江河口の魚類』等、水産遺伝資源に関する重要な専門書が出版され、『中国水産遺伝資源と利用』第2巻および『水産遺伝資源の説明基準および技術規定』が間もなく出版される。

2007年9月、FishBase Consortiumは中国水産科学研究院を正式に承認し、現在9機関あるメンバーの一つとして受け入れた。これは水産遺伝資源の共有プラットフォーム事業が世界の同業者から認められた証である。

(2) 主力品種の遺伝生化学研究分野では著しい進展が見られたが、分子遺伝学、量的遺伝分野では外国との差は依然大きい。

遺伝生化学研究の分野では、中国は既にアオウオ、ソウギョ、ハクレン、コクレン、団頭魴（ダントウホウ）、コイ、フナ、ティラピア等、数十種類の主な養殖魚類に対して、アイソザイム、タンパク質の電気泳動ザイモグラム分析を行い、更にある魚類の多型マーカーについて対立遺伝子頻度の研究を行った。エステラーゼ・アイソザイムを遺伝マーカーとし、ギンブナと長江ハクレンの生化学的類型および成長の関連性研究をそれぞれ行い、成長が早い生化学的な類型を突き止めた。これは生化学的な遺伝マーカーにおける選抜育成の基盤となった。科学技術の発展に伴い、mtDNAの物理地図の分析技術、ポリメラーゼ連鎖反応法（PCR）、RAPD法は既に中国において魚類の遺伝子鑑定および分子生物学研究で広く応用されている。コイのミトコンドリアURFA6L遺伝子とtRNA^{Lys}遺伝子のDNA配列および構造に対して分析を行った。また、コイ、シロブナ、フナ、カムルチー等、魚のmtDNAに物理地図の分析を行った。そして、アオウオ、ソウギョ、ハクレン、コクレン、コイ、フナ、ヒラウオ等、淡水の主なコイ科の魚類数種類の精子冷凍庫を作った。特にこの2年、mtDNA、RAPDおよびRFLP等、最新の分子生物学技術の応用により、コイ、フナ、ハクレン、コクレン、カラチョウザメ等の魚類の遺伝構造研究を繰り広げ、意義のある重要なデータをかなり得ることができた。但し、研究を行った種類はまだ不足しているので、併行精度は高くなく、研究レベルを更にアップさせる必要がある。

(3) 交雑育種法は中国水産育種において最も早く応用された技術の一つであり、交雑によりかなりの良種を飼育することで、水産養殖の発展を促進した。

中国におけるコイの交雑育種の研究は比較的早くに始まった。70年代末から80年代にかけて、中国における魚類の育種は新段階に入り、全国で40以上の魚類に交雑組合せを行い、魚類の交雑強勢利用および新しい遺伝子の培養を模索する中、コイの種内交雑および新品種の選抜育成に飛躍的な成果が得られた。例えば、興国鯉と散鱗鏡鯉の雑種F1（豊鯉）、荷包紅鯉と元江鯉の雑種F1（荷元鯉）等、コイの雑種組合せ全てに雑種強勢が強く現れており、一般的には10%～30%の増産が可能である。70年代末から90年代にかけて、全国で普及した交雑品種には豊鯉、荷包紅鯉、顚鯉の三種交配コイがあり、地方で普及したものには有岳鯉、芙蓉鯉等がある。交雑の選抜育成技術により、荷包紅鯉と黒竜江野鯉の雑種F2から分離した耐寒能力を有する紅鯉の内、4代にわたって選抜育成を行い、安定した遺伝子の荷包紅鯉耐寒品種を育成した。

(4) 水産における選抜育種技術、雌性発生法の研究分野に特色があり、著しい効果を上げた。

水産における選抜育種技術は、遺伝規則および量的遺伝学の理論に基づき、数百年の実践を経て発展した典型的な新品種育成技術である。その主な目的はある一つの起源材料もしくはある一つの群体から人が必要とする最も優れた固体もしくは類型に合致するものをスクリーニングすることである。興国鯉と荷包紅鯉は中国の民間で選抜育成されたものである。彭沢鯉に対して選抜育成を行い、7年間で6代の系統に選抜育成を行った結果、彭沢鯉の成長速度は選抜育成前より50%以上速くなり、フナの成長より200%以上も速くなった。また、その他の性状にも改善が見られた。

従来の育種と雌性発生を組合せた技術で、コイの新品種建鯉と松浦鯉の2種類を育成した。そして、それら全ての増産率は30%以上ある。建鯉の全国普及面積は100万ムー以上に達し、松浦鯉の北方地区での普及面積は20万ムーに達しており、共に比較的顕著な経済効果をもたらした。中国におけるコイ養殖業の発展を推し進めた。養殖の団頭魴に見られる成長速度の落ち込み、性成熟の早期化、体形が長く薄くなる等の退化現象を対象に系統の選抜育成とバイオテクノロジーを組合せた方法で、団頭魴に選択育種を行った結果、成長速度が淤泥湖原種より30%速く、体長/体高の比率が2.1～2.2という美しい体型の品種である団頭魴浦江1号を育成することができ、全国各地に向けて養殖が普及していった。現在、雌性発生を人工的に誘発させる技術を用いて商品価値が比較的高い全てメスの魚類を既に20種類以上生産している。人工的に誘発させた雄性発生二倍体は雄性のホモ接合体を作るためである。

(5) バイオテクノロジーによる育種は水産育種の新たな道を切り開き、一定の成績を収めたが、先進国と比べてその差は明らかである。

遺伝子工学による育種、細胞工学による育種、染色体操作によって誘発した倍数性育種、性別制御技術と雌性発生法による育種、分子マーカーを利用した育種等を含む、バイオテクノロジーの応用による水産養殖の新品種育成研究が現在世界中で盛んに行われている。遺伝子工学による育種の分野では、中国における魚類の遺伝子組換えの技術研究は世界トップレベルにあり、朱作言氏（中国科学院会員）が育成した遺伝子組換えコイは世界中から大きな関心を集めた。中国の科学研究者は既に遺伝子組換えによるマダイを育成しており、これらの遺伝子を組換えられた魚は成長速度が速く、病気に対する抵抗力が高いという優勢が既に明らかになっている。成長ホルモン遺伝子を組換えたナマズの養殖周期は18ヶ月から12ヶ月まで短縮した。遺伝子工学技術はナマコ、アワビ等の高級海産品の養殖において、その成長速度を高める

重要な作用を発揮することができる。70年代中ごろから、中国は魚類の多倍体を誘発させる技術研究を開始している。1998年に報道された湖南師範大学の湘雲鯉とフナは四倍体と二倍体の交雑により生まれた三倍体である。1999年、中国バイオテクノロジーセンターの検査に合格した。この新品種は成長が早く、性腺が発育せず、食欲が旺盛で、病気に対する抵抗力が高く、低温低酸素にも耐え、体形が美しく、柔らかで円やかな肉質等の特徴を持っており、早くも2000年に国家ハイテク産業パイロットプラントプロジェクトに組み込まれ普及が進められてきた。

2、淡水生態に優しい養殖技術はモデル普及段階

(1) 水産養殖の汚染物質発生と排出係数測定研究において著しい進展を遂げた。

水産養殖における汚染物質の発生と排出係数の測定は中国で初めて組織的に展開された水産養殖の汚染物質発生基本状況調査研究プロジェクトである。プロジェクトチームは検討を通じて『水産養殖における汚染物質の発生と排出係数の測定に特化した技術の規範』を制定した。そして、42のメンバーと部門は共同で農業部漁業生態環境モニタリングセンターを完成させた。養殖により発生した汚染状況の野外システムモニタリングを通して、水質、底泥、生物体および土壌の実測データ3万以上を採取し、中国のさまざまな品種と養殖パターンから水を採取し、水質、養殖水域の水質と廃水を排出した水質の状況および各地に分布する養殖場の水質分布法則の基本的な把握が可能となった。中国の水産養殖におけるさまざまな品種とパターンによる汚染物質の発生（排出）係数を得ることができ、プロジェクトに規定された任務と指標を期日までに完成させることに一定程度成功した。プロジェクトチームはデータベース機能を持つプログラムの作成をするとともに、データ分析計算ソフトを編集することで、データモニタリングのチェック機能および分析作業の効率をアップさせた。

(2) 養殖池におけるバイオレメディエーションおよび水環境保全技術は養殖産業技術を向上させた。

水環境の総合的な保全および原位置バイオレメディエーション分野において、ソウギョおよびティラピアに適した有益菌3種（バチルス属細菌、光合成細菌、乳酸菌）を篩い分け、淡水高密度養殖の微生物固定化による完璧な汚染処理技術を確立したことで、嫌気条件では酸化鉄（Ⅲ）および腐植土にアゾ還元を促進させる作用があることを発見した。このことは水産養殖の底泥汚染処理における嫌気性バイオレメディエーション技術応用の理論的基盤となった。バイオ池の標準化養殖、高密度養殖の微生物固定化による汚染処理、いけすの溶存酸素量管理

等の動的な管理技術を一定程度確立したことで、リサイクル水は『漁業水質基準』の要求を満たし、養殖廃水のゼロ排出をまず実現した。

(3) 水産集約化養殖のデジタル化システムインテグレーション研究は技術の集積とモデル化段階に移行した。

集約化養殖水域の総合水質指数移動勾配および分布法則を把握することで、総合水質指数の三次元分布図を構築、養殖水域におけるトータルなモニタリング方法の確立と合理化を行い、溶存酸素、pH、温度、酸化還元電位、電気伝導、アンモニア態窒素等6つの重要な環境因子ファジー判断および早期警戒研究実験プラットフォームの構築を完成した。CANバスのDCS監視ノードのハードシステム設計およびグレードアップ改造に基づいて水質高度監視システムプラットフォームを完成した。GPRS技術および画像監視技術の応用により水質と養殖状態に対して遠隔監視および施設の自動制御方法を確立した。以上の研究を通して水産集約化養殖におけるデジタル化インテグレーション技術体系を一定程度構築し、水産集約化養殖のより効率の良いデジタル化に向けて、インテリジェントマネジメント推進への技術的根拠と設備のサポートを提供した。

3、環境微量元素“指紋”情報判別法の技術研究は水生生物資源保護評価法を開拓

環境微量元素“指紋”情報判別法の技術研究は、最先端の電子をプローブとする分析技術を利用して、重要な漁業種の環境元素“指紋”情報ファイルの構築を研究し、その生活史を“復元”するとともに、回遊履歴および環境背景の元素情報を追跡し、個体群動態を有効的に評価する新たな根拠となるものである。この技術を利用して太湖および洪澤湖水域にいるオオシラウオの個体群の中から生物蓄積特徴の主要成分12種類の元素に対して分析を行った。両水域にいるオオシラウオの固体群における個体の多元素全体の“指紋”は地理的な差異があるということが明確に認められた。これをベースとして元素“指紋”から両水域の異なった水産品オオシラウオの品質個体の判別関数を導き出すと、正確率は100%に達した。この技術原理および方法を利用して淡水“ドブガイ観察”方法を確立し、自然水域と養殖水域ではドブガイの軟組織の元素蓄積に差異があることを初めて確認した。これは大規模な移植モニタリング研究に理論的根拠を提供することになった。

この研究は有効的な開拓、豊かな生物資源の保護、生態環境評価、研究方法を進展させることになり、資源環境モニタリングおよび評価水準を有効的に向上させ、更には中国の重要な経済である魚類の保護および資源管理事業に技術的なサポートを提供するであろう。

4、水産における重大な病害制御技術の研究に進展

(1) 水産では薬物動態学研究および検出技術方法により系統結果を得て、それを生産に応用することが制限されている。

スズキ、ヒラメ、クロダイ等の水産品の体内におけるノルフロキサシン、複合スルファメトキサゾール、テラマイシンの薬物動態学および残留メカニズムを初めて把握し、魚体内におけるクロロマイセチン、ニトロフラン類、キプロフロキサシン、エンロフロキサシンの代謝、除去メカニズムを得て、除去サイクルを出した。抗菌薬物のテラマイシン、複合スルファメトキサゾール、ノルフロキサシン、オキシリニック酸、フロルフエニコール、ネオマイシン6種類の安全使用技術を確立し、魚とエビ体内のテラマイシン、複合スルファメトキサゾール、ノルフロキサシン、オキシリニック酸、フロルフエニコールの休薬期を確立し、水産品におけるニトロフラン類、ポリ塩化ビフェニル、チアンフェニコール、フロルフエニコール、プラジカンテル、スルファンアミド類およびヒスタミン等の薬物測定方法を確立した。

以上の研究は水産薬物残留検出、主な水産品の品質監督および安全調査、漁業用薬物残留監督、ニトロフラン類等の使用を禁止されている薬物の専門処理等の作業の進展に重要な役割を果たした。

(2) 水産における病害のワクチン研究開発の成果に変化が見られた。

『養殖魚類のビブリオ病に対する遺伝子工学によるワクチン実用化の技術研究』、『ケツギョ、シナモクズガニ等のクリーンな養殖技術の研究』、『スギの抗ビブリオ病サブユニットワクチンの応用』、『魚類のエロモナス・ハイドロフィラに対する浸漬ワクチン産業の基幹技術の研究およびデモンストレーション』等の研究プロジェクトにおいて、スギの粘膜免疫メカニズム等の研究、ビブリオの細胞外産物（タンパク質）を大量に抽出濃縮および腸炎ビブリオの外膜タンパク質の抽出、遺伝子工学菌の大量培養および発現誘導等の技術研究を行い、ある程度のレベルのナノ粒子ワクチンの調整技術を開発した。一連のケツギョワクチン、シナモクズガニと淡水エビの免疫増強剤、生簀の環境改良製剤が研究開発された。良好な生物相容性を持つもの、吸収性および集中性と免疫効果のあるもの、浸漬免疫に使用できるアジュバント材料であるものをスクリーニングし、調製した抗ビブリオ・ハーベイ服用粒子ワクチンの効果は免疫注射とほとんど同じであった。エロモナス・ハイドロフィラ発酵用培養基の合理化と大量培養を実現し、深水網箱で飼育されているスギのビブリオ病に対するワクチンの試験を完成させた。養殖魚類のワクチン実用化において技術研究分野に着実な進展を見せた。

5、ティラピアの高付加価値化を図る加工研究が産業化応用段階に突入

ティラピア切り身への発色技術の導入と開発を行った結果、分子レベルでの切り身のメカニズムおよびその影響要素を解明することができた。ティラピア切り身への発色技術のテスト生産を通じて確立した技術を用い、発色合格率は90%以上に達したことから、生産モデル基地を構築するとともに産業化生産を開始した。ティラピア魚肉のエクストルージョン・クッキング技術の導入と開発を行った結果、ティラピアの利用価値を引き上げることができた。液燻法を用いたティラピア切り身の冷凍過程での組織、微生物、脂肪酸、揮発性成分変化の研究を行い、液燻ティラピア切り身の品質と消費期限を向上させるための理論的な基盤を作った。先進的な技術を用いて酵素加水分解物ペプチドホルモンおよび魚肉タンパク加水分解物氷晶防止剤の生産を行い、ティラピア切り身の氷晶防止機能を高めた。ティラピア養殖製品においてプロセスの調査研究および分析、トレーサビリティ技術のプロセス処理およびデータバンクの構築、ティラピア養殖製品における管理システムの開発および品質追跡システムの開発を繰り返したのである。

この分野の研究システムで開発されたティラピアの高付加価値化を図る加工技術は中国のティラピア加工レベルを大幅に引き上げ、共に開発した加工製品品質管理システムおよび品質追跡システムの技術プランは、中国水産品加工の技術プロセスから品質管理に至るまで、全プロセスを制御し、優れた推進作用を発揮することになるであろう。

6、水産品品質安全追跡システム技術の研究は産業チェーンの全プロセスを網羅するとともに試行段階に移行

追跡システムは水産品品質安全管理と法律を執行する重要な技術サポート体制である。2007年、中国水産科学研究院品質および標準研究センターが既に研究された成果をベースに、業界内で科学的で標準化され、有効且つ実用的な追跡体系の構築を目指し、水産品の全プロセス追跡体系に重要な技術研究を行った。このプロジェクトは水産品サプライチェーンの全プロセスにおける生産、流通、販売のそれぞれ主な部分まで網羅しており、生産企業内部の品質安全管理、サプライチェーンの全プロセスにおける追跡体系のオペレーションとサプライチェーンの全プロセスに対して政府が効果的に監督できるように配慮している。水産養殖製品の全プロセス追跡管理システムにおける共通基盤技術研究を通じて、水産養殖製品の全プロセス追跡体系操作システムおよび関連製品を開発し、体系オペレーションに必要なトレーサビリティ標準モデルを作り、研究を通して水産養殖製品における全プロセスの追跡管理システムオペレーションメカニズ

ムを打ち出した。同時に、農業部漁業局の取り決めに基
づき追跡体系の構築を広東省水産品質安全管理事業計画
に盛り込み、広東省当局および水産技術推進ステーション
と協力を進め、先ず広東省で試験的に検証を行った。
プロジェクトの必要に応じて、試験を行った企業は生産、
経営管理および監視プラットフォームの基礎資料と基礎
データを提出し、特別に調査研究および研修を行った。
初の試験と検証を通して、研究結果の実現可能性を証明
した。よりいっそうの修正と改善を行うことで実用化段
階に向けて確かな礎を築いたのである。

中国における水産科学技術事業は比較的优秀な成績を
収めたが、水産発展の要求と比較すると、依然として相
当大きな格差と問題が存在しており、それによって漁業
生産および経済発展が制限されている。これらの主な問
題は、① 科学技術の導入が不十分なため、科学研究の深
さと広さに大きな影響を与えており、漁業生産において
迅速に解決すべき科学技術問題および漁業における経
済発展の政策決定に対して有効的措置を取るのが難しく
なっている。水産学科学体系が不健全なため、生産量向
上に関する研究はやや飽和状態であるが、一方、生産前
後の技術は遅れており、生産型漁業から品質、高収益型
漁業に際しての技術要求に応えることは容易ではない。
② 科学研究における新旧体制の交替が未だに不完全で、
研究主体の転換にはなお時間が必要である。地方では科
学チームの立ち上げ制度が改正され、科学研究プロジェ
クトへの支援が減らされた結果、科学技術者が流失し、
そのことが科学チームの立ち上げに深刻な影響をもたら
している。③ 科学技術と推進、科学技術と生産、推進と
生産は体制上“ギャップ”がそれぞれに存在しており、
これらの矛盾は抜本的には解決されておらず、それによ
って科学技術成果の転換が遅く、転化率も低いという問題
が存在している。技術推進プロジェクトにおいては、技
術の占める割合は高くない。④ 漁業における基礎研究は
相当薄弱で、生産発展の技術問題に深刻な制約となっ
ており、長い間解決することができず、企業生産の積極性
を萎えさせている。公益性技術研究事業の展開が盛ん
ではないため、多くの一般的かつ基礎的な技術事業が有効
的に展開できず、ソフトサイエンスの研究が極めて立ち
遅れている。⑤ 特に、中小企業では、生産の主体となる
技術水準が低く、技術改良および設備の更新が遅く、品
質も悪いため、効率が高く、安全且つ衛生的で、経済的
な品質要求に対応することが難しい。

⑥ 先進的な技術および高科学技術の蓄積が不足して
おり、ひどい場合は空白になっている。高度先端技術が
不足しているため、従来型漁業の改善に対応することが
難しく、漁業の生産技術および中国における漁業の現代化

を目指してリードして行くことが難しくなっている。7、
農村で漁業に従事する人材の学歴が低いと、生産者の
科学的な質がそれに伴って低下する傾向があり、技術の
推進事業を難しくする要因にもなっている。



◎図1 建鯉（淡水良種育成に重要な躍進を遂げた）



◎図2 生態養殖池（淡水生態に優しい養殖技術はモデル段階の推進へと移った）



◎図3 “夏奥1号”ブルーティラピア（ティラピア高付加価値化を図る加工研究が産業用の応用段階へと移行）

日本における食料・農業問題

•Profile•



鈴木 宣弘 すずき・のぶひろ ●東京大学大学院農学国際専攻 教授

1958年三重県生まれ。1982年東京大学農学部卒業。農林水産省、九州大学教授を経て、2006年より現職。専門は、農業経済学、国際貿易論。食料・農業・農村政策審議会委員(会長代理、企画部会長、畜産部会長、農業共済部会長)。主著に、『現代の食料・農業問題―誤解から打開へ』(創森社、2008年)、『日豪EPAと日本の食料』(筑波書房、2007年)、『食べ方で地球が変わる―フードマイレージと食・農・環境』(共編著、創森社、2007年)、『農のミッショナーWTOを超えて』(全国農業会議所、2006年)、『FTAと日本の食料・農業』(筑波書房、2004年)等。

「食料危機」の教訓

今回の「食料危機」は、我々に大きな教訓を残した。需給が逼迫したら、まず自国優先で、輸出規制という食料の囲い込みが起こり、高くても買えないどころか、お金を出しても買えない事態が起こりうるということが確認された。WTO(世界貿易機関)にしたがい、関税削減を進めたために、小規模ながらコメなどの基礎食料生産を担っていた農家が潰れてしまっていた途上国は、主食が手に入らなくなり、悲鳴を上げた。

輸出規制は、自国民の食料を守る責任から行われる以上、それを完全に規制することは無理だ。しからば、食料を安易な国際分業に頼るルールは見直し、やはり自国での生産を取り戻さねばならないことになる。日本も生産現場の疲弊が進行しており、途上国で起きた混乱は、将来的には他人事ではないと考えるべきであろう。

穀物に対するバイオ燃料需要の拡大は、木くずや雑草を原料とする第二世代の実用化とともに収束していく可能性がある。第二世代が主流となるまでの過渡期をどう乗り切るかという問題と考えたほうがよい。さらには、原油の高騰はバイオ燃料を含む代替燃料の開発・利用を促進するから、エネルギー需給が次第に緩み、原油の高騰も緩和されるであろう。原油価格が落ち着けば、補助金を増額できないかぎり、バイオ燃料用に穀物を使用するのは採算がとれなくなり、バイオ燃料の義務目標の見直しも迫られてくる。新興国の「爆食」や人口爆発に伴う需要増加にも頭打ちがあることも考慮すべきである。一方、生産物価格の高騰によって、長期間の価格低迷で増産型技術開発が停滞していたために鈍化していた単収の伸びが加速される可能性や不耕作地の再利用の動き等も勘案すると、供給増加の制約を強調する見方にも疑問がある。したがって、世界的な食料需給が一方的に逼迫を強めることは考えにくい。この点は冷静に踏まえておく必要があろう。

つまり、一方的に、穀物価格が上がり続けることはないと考えられる。価格の上昇と下落は繰り返すものと思われるが、問題は、WTOにより食料の生産・輸出国の偏在化も進んでいるため、何らかの需給変化の国際価格へ

の影響が大きく、その不安心理による輸出規制、高値期待による投機資金の流入が生じやすく、さらに価格高騰が増幅されやすくなってきていることである。

不測の事態への備え

食料価格は上昇と下降を繰り返していくであろうが、不測の事態になれば、輸出規制も簡単に行われることを前提にして、平時から常に準備しておく必要があるという視点が必要であり、実は、欧米各国は、それを当然のこととして常に国内生産を振興してきた。

米国は、対外的に食料安全保障の話なんか全くしないから、そんなことは考えていないのだというのは間違っている。米国は、100%を大きく上回る十分な自給率を常に維持しているから、対外交渉で自給率低下の懸念を主張する必要がないだけで、実は食料自給率と国家安全保障の関係を非常に重視している。このことを最もよく示すブッシュ前大統領の日本を皮肉るかのような演説を紹介すると、「食料自給は国家安全保障の問題であり、それが常に保証されている米国は有り難い」、「食料自給できない国を想像できるか、それは国際的圧力と危険にさらされている国だ」といった具合である。

戦略的支援により自給率が100%を超える輸出国

米国は競争力があるから輸出国になり自給率が100%を超えているのではなく、食料生産への手厚い支援によって、国内需要を上回る食料生産が常に確保され、かつ、その余剰食料を世界の人々の胃袋を握る武器として戦略的に活用できたのである。それは、農家の手取りは別に補填する一方で、販売価格は低くするという「隠れた」輸出補助金による「攻撃的保護」で達成されてきた。

日本の食料生産が、高関税と過保護な国内支援で守られているというのは、相対的には間違っている。関税が高かったら、我々の体のエネルギーの60%もが輸入に頼るほどに、輸入食品が溢れるわけがないし、関税が低くても、国内補助が十分なら、収入が十分得られるから、担い手も育ったであろう。農業所得に占める政府からの補助金(直接支払い)の割合は、米国で5割前後、フランスで8

割、スイスでは100%近くなのに対して、我が国では16%程度というデータがある。他の先進国が100%前後の自給率を維持しているのは戦略的な手厚い支援の結果であり、日本は保護削減の世界一の優等生であるから、自給率が下がったと整理したほうがわかりやすい。

日本の自給率は40→50%でなく40→30→12%か？

WTOの農業保護削減交渉は、ゼロ関税に向けての単純な国際分業では、食料需給の逼迫で「輸出規制」等が行われる事態に対応できないという問題とともに、輸出国は自らの攻撃的保護は温存したまま輸入国には関税撤廃を迫るという理不尽な要求を突きつけているという問題の二つをかかえている。国益に反するならインドのようにNOという勇気も必要だ。米国は自国の利益に反するなら常にNOを貫いている。いつも最後は押し込まれるだけの日本では国際社会で軽んじられる。

結局、現行のWTOルールは次第にゼロ関税を実現する流れを止める機能を持っていない。それに加えて、二国ないし数カ国間のFTA(自由貿易協定)も、日豪に続いて、日米、日EUの準備が進められている。今回の「食料危機」や、いくつかの安全性の問題の浮上により、国産食料の重要性への認識が高まっているといわれているが、さらなる貿易自由化以前の問題として、生産資材コストの高騰にもかかわらず、十分上がらない生産物価格の下で、酪農の苦境に象徴されるような我が国の食料生産の縮小が進んでいる。それに加えて、ダブルパンチで、貿易自由化の流れが止められないとすれば、世論が追い風だといわれるのは表面だけの話で、それとは裏腹に、我が国の食料生産の縮小は止まらない。

日豪のFTAの成立だけでも、40%の自給率が30%まで下がり、日米、日EUが続くとすると、WTOベースで自由化したのと変わらなくなり、自給率は12%に向けて下がるとの試算がある。かりに輸出産業がさらに発展できたとしても、地域社会が崩壊し、国土が荒れ果てる中、食料は安く買えることを前提にして突き進むのが、日本の将来のあるべき姿なのかどうかは今問われている。これは、農業関係者が決めることでも、経済界が決めることでもなく、消費者を含む国民全体で決定すべき、我が国の国家のあり方に対する重大な選択である。

「農の価値」を共有し、国民が支えてくれるか

スイスの卵は一個60～80円もするが、20円の輸入物に負けていない。ケージ飼いが禁止され、野原で伸び伸び育った鶏の価値を評価する国民が、ケージ飼いの輸入卵は安くても「本物」ではないという気持ちで支えている。また、「これを買うことで農家の皆さんの生活が支えられ、それによって自分たちの生活が支えられているのだから当たり前でしょ」と小学生の女の子が答えたという意識の高さにも驚く。さらに、農産物の価格に反映でき

ない部分は、環境や景観の維持などの多様な側面でお世話になっている対価として市民がお金を集めて別途支払うべきという認識の下に、具体的かつ詳細に理由づけして直接支払いが充実しているのが欧州である。

我が国での従来の、漠然とした「多面的機能」論は保護の言い訳としか認識されなかったきらいがある。我が国でも、例えば、生物多様性(オタマジャクシ、カブトエビの数など)、水田の洪水防止機能・水質浄化機能、バーチャル・ウォーター(輸入農産物をかりに日本で生産したとしたら、どれだけの水が必要か)、カーボン・フットプリント(原料調達・生産・流通・消費・再利用までの全行程でのCO2排出量の表示)、窒素負荷、農村景観といった具体的な指標を共有して、食料の確保と付随して国内の食料生産が果たしている価値を一緒に認識していく必要がある。

価格に反映されない食料生産の様々な価値を理解してもらうために、生産サイドは説明しないといけない。我が国の農業に対する支援がけっして「過保護」なのではないという事実を理解してもらうとともに、「農家が困る」ということではなく、国民全体の失うものを具体的な指標で提示し、支援の根拠を明確にし、生産者と消費者の支え合う信頼関係を強化し、それを国際的な貿易ルールにも反映していく努力を急がなくてはならない。

日本の消費者も、狭い金銭的な側面だけでなく、そうした価値に納得して、バラマキではない支援に理解が深まればと思う。そうすれば、生産者も、自らの社会的使命(ミッション)に誇りを持って、生産に取り組める。そして、生産者と消費者の双方をしっかりとつなぐために、政府が直接支払い等の必要な支援システムを確立し、生産者と消費者の支え合いをサポートしていくことが求められるよう。

農政改革の方向性

農村現場が活気に満ち、できるかぎり安価に、国民に安全・安心な食料を安定的に提供できるようにするには何が必要か。

まず、農業経営者が自らの判断でのびのびと創意工夫し、経営能力を十分に発揮できる環境整備が必要である。政策が農家を縛ってはいけない。農家が自分に必要な施策を選べるようになっていることが理想であろう。

その場合、規模拡大によるコストダウンというのは有力な戦略の一つであることは間違いないが、経営戦略は多様であり、意欲ある経営というのを、一つの指標のみ、例えば、規模のみで判断することは難しいことも認識する必要がある。

さらには、現在、多くの大規模稲作経営から、米価の下落に歯止めがかからないため将来的な経営計画が立てられないという深刻な悩みが聞かれるように、日本の土地条件の不利性等により努力で埋められない生産性格差

等を踏まえて、意欲ある担い手が最低限の所得を得られるセーフティネットをいかに構築するかが問われている。

さらには、担い手を支える産業政策とは別の視点から、中山間地域等を含めて、農業・農村の持つ多様な価値に基づいて、我が国に農業・農村が存続することを国民として支えることに合意が得られれば、こうした社会政策的な支援が真に「車の両輪」といえるような大きな柱になるように、大幅に拡充することが欠かせない。

つまり、経営の自由な創意工夫を高めつつも、しっかりとした下支えをセットにして、農業・農村が全体として活気を保ち、持続的に発展するようにしなければならない。

また、それが消費者、国民全体から見てもメリットがあることなのだということを、明確な根拠と、可能なかぎりの具体的数字に基づいて示し、議論し、納得を得る必要がある。

コメの生産調整については、水田のフル活用というのは、生産で調整せず、販売で調整することにより、まさ

に、現場の自由度を高めようとする流れであることを認識する必要がある。これが進めば、主食用米の過剰圧力が弱まり、結果的には、割当てが必要なくなり、主食用米、米粉用米、飼料米、バイオ燃料米、麦・大豆等、水田に何の用途のコメをつくるか、その他の作物をつくるかで異なる補填体系から、自らの地域や経営に合うものを選び、適地適作が誘導される体系が生まれる。生産調整に関する様々な議論は、対立の構図ではなく、共通の目的を達成するために収斂させることが可能だと思われる。

最後に、政策決定に当たっては、政策を創るのは農村現場であり、消費者であるという視点に立ち、本当に現場に必要なものは何なのか、どうすれば消費者が支持してくれるか、という視点から、シンプルだがポイントを押さえた効率的な対策を早急に詰める必要がある。また、関係団体・組織は、「組織が組織のために働いたら組織は潰れ、抱って立つ人々のために働いてこそ組織は持続できる」という視点を持つ必要がある。

食料の持続的生産のための日中農業研究協力

•Profile•



小山 修 こやま・おさむ ●(独)国際農林水産業研究センター研究戦略調査室長

1954年7月生まれ。1979年東京大学教養学部卒業。農林水産省勤務後、国連食糧農業機関(FAO)で農産物需給予測を担当、その後も継続して世界の食料・農業問題と資源・環境との関連を中心とした計量経済分析研究に従事。東京大学講師、名古屋大学客員教授等歴任。

1. はじめに

中国は、世界最大の食料生産・消費大国であり、2001年の中国のWTO加盟に伴い、食料の貿易も増大し、中国国内の食料需給の変化が国際市場の変動の大きな要素となりつつある。わが国は食料の過半を海外市場に依存し、野菜や加工食品等を直接中国から輸入していることから、中国の食料需給の安定は、わが国にとって重要な関心事となっている。

また、中国の農業は、アジアモンスーンの影響下という類似の気候条件を有し、わが国農業と作目等の共通性が高く、経営規模も総じて小さいことから、わが国との間で農業・食品技術、農業政策における広範な協力分野が存在する。以下、これまで国際農林水産業研究センター

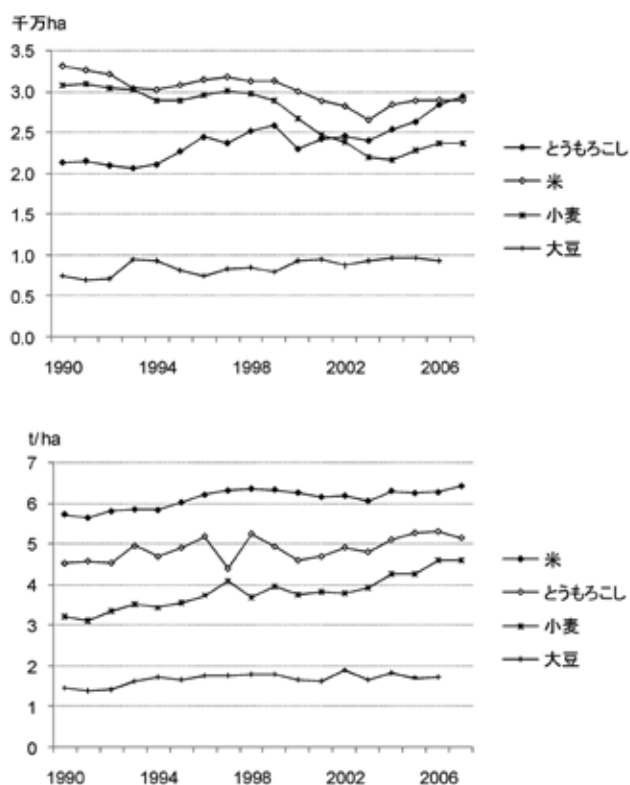
(JIRCAS) が実施してきた協力の成果を簡単にまとめ、今後の研究協力の方向についての私見を示す。

2. 「中国食料資源」プロジェクト(1997～2003年度)

中国における農業分野の共同研究は、1980年の日中科学技術協力協定を受けて設立された日中農業科学技術交流グループ第1回会議(1982年)によって第一歩が踏み出された。当時の農林水産省熱帯農業研究センターと雲南省農業科学院との間で行われた水稻耐冷、耐病、多収品種の育成に関する研究は、1991年まで3期にわたって続けられ大きな成果をあげた。この他、野菜、乾燥限界地、水稻害虫等の研究が行われ、広範な分野で協力が進展していた。

こうした中、1997年の第16回日中農業科学技術交流グループ会議の場で合意された「中国における主要食料資源の持続的生産及び高度利用技術の開発」プロジェクトは、当時大きくクローズアップされていた中国の食糧供給に対する懸念を正面から捉え、広範な分野の研究者を動員し、学際的連携の強化によって問題解決を目指す「総合型プロジェクト」として位置づけられた。中国側においても急速な経済成長のもとで自国の食糧供給能力に対する様々な問題が顕在化しつつある時期であり、強い関心と熱意をもって迎えられた。

プロジェクトは、中国農業の持続性の確保と主要食料需給の安定を図ろうとするものであり、大きく3つの柱から構成された。第一は、社会科学の研究であり、需給構造の変化の把握と効率的生産流通システムの設計を目指した。第二は、持続的高位安定生産技術の開発であり、新品種の育成、環境保全型技術がその中心となった。第三は、従来行われていなかったポストハーベスト分野の研究であり、様々な加工、流通、貯蔵技術が対象とされた。参画研究機関は、研究期間中に日中双方で組織の変更があったが、日本側はJIRCASの他、農業・食品産業技術総合研究機構、農業環境技術研究所、水産総合研究センター、農林水産省農林水産政策研究所、大学等であり、中国側は、中国農業科学院傘下の4つの研究機関、中国科学院南京土壤研究所、中国農業大学、上海海洋大学、吉



◎図1 主要穀類の播種面積(上)と単収(下)の推移

資料：中国統計年鑑(各年)等

林省農業科学院及び農業部農村経済研究センターであった（いずれも、現在の名称）。プロジェクトは、中国農業部と農林水産省技術会議事務局を含めた合意により政府間の共同研究事業として実施された。

本プロジェクトは、特許、新品種、著作、科学論文などの多くの研究成果を生み出したが、特筆すべきことは、共同研究の課題で多くの研究管理者、共同研究者に来日の機会が与えられ、また、現地でも日本側研究者との共同作業の中で中国の若手研究者が研究方法などの経験を積むことができたという人的交流面の成果であり、中国側研究機関からも研究水準の向上という面で高い評価がなされている。以下、実施分野ごとに主要な成果を紹介したい。

（1）食料需給分析、地理情報システム、技術普及制度の研究

東部沿海の比較的経済が発展した山東省と内陸部貧困地帯の貴州省を対象に食料需給予測モデルを構築し、主要穀物と食肉の中短期需給予測を行った。飼料需給の変化や国際価格の動向が地域ごとに異なる影響を及ぼし、将来の需給ギャップの発生とそれに伴う問題点を明示した。

土地利用の経年変化解析のための衛星データを用いた解析を進め、作付面積の変動把握の他、生育状況モニタリングの可能性を示した。山東省の冬小麦地帯を対象に作付面積の広域分布を推定する手法を示すとともに、北京市郊外の土地利用変化の激しい地域を対象として、時系列変化の差異による地域分類を行った。また、観測条件のよい冬小麦の開花期直後の衛星データを用いる手法を検討し、生育状況推定精度を向上させた。

東北地方等の水稻の新興産地を対象に、改革開放政策などの制度変化による増産効果と技術進歩の効果とを比較考量し、技術進歩の効果が持続的であること、技術が労働集約型に特化していること等を示した。また、普及組織や生産者組織の実態を調査し、新技術の受容力や普及制度の効率性が一般に考えられるより高いことなどを明らかにした。

（2）持続的高位安定生産技術の開発

中国及び日本の有用イネ遺伝資源を利用して、交配、選抜、栽培試験を行い、早生、多収、良食味の有望系統を育成した。紋枯病抵抗性に関しては、新たな注射接種法の有効性を確認するなど検査方法を確立した。

華中、華南に広く普及した高収量ハイブリッド水稻に特異的に被害をもたらすウンカの移動シミュレーション等の成果を土台に、ウンカの多発化の機構解析、ウンカ被害に抵抗性を示す品種の抵抗機作の解明等を行い、さらに抵抗遺伝子の分布、特定を行った。これらの研究成果をもとに、セジロウンカが多発する四川省の農家水田を用いた環境保全型水稻害虫管理技術の実証試験を実施し、農家収益を向上させつつ農業使用量を顕著に低減で

きることを証明した。

豊富な遺伝資源と先端技術を活用して安価な輸入大豆に対抗できる低価格で高品質の大豆素材開発を進めた。約3,000点の遺伝資源の一次特性評価を行い、さらに近赤外分光分析計等により、約1,500点のタンパク質・脂肪含量についてのデータベースを作成した。共同研究の成果として、6つの新品種を育成した。

窒素を中心とする主要元素の動態を解明し、施肥条件の違いによる環境負荷を測定した。山東省の畑作地域において、県域の窒素フローを計算するとともに、施肥深度や肥効調節型肥料の利用の違いによるアンモニア揮散、作物収量への影響を測定し、トウモロコシ・小麦への尿素深層施肥等の有効性を確認した。また、江蘇省においては、集落レベルの窒素、リンの年間流出パターンを明らかにするとともに、さらに大きな集水域レベル流出を推計し、水管理の重要性を明らかにした。

（3）ポストハーベスト分野の研究

伝統的技術の底上げ、改善を目的とし、常湿広域流通に適した数多くの高付加価値化食材開発を進めた。大豆では、二段階加熱法等による豆腐加工法の改善、豆乳アイスクリームの製造の他、各種大豆製品の中の機能性成分を測定評価した。米では非発酵型ビーフンの加工条件の最適化、インディカ米の菓子類への適正試験等を行った。

中国の淡水魚は、4,000万トンを超える漁業生産の約4割を占め、動物性タンパク質の主要な供給源でありながら、加工流通体制が遅れていたため、すり身特性の分析を行い、加熱条件、冷凍による変性条件、魚種別の製品歩留まりを検討し、実際に練り製品を製造した場合の食味評価も実施した。貯蔵流通技術については、貯蔵中の脂質の分解、酸化の進行について、そのメカニズム、魚種別の違いを明らかにした。

トウモロコシ茎葉部分をサイレージ調整し、牛等の反芻家畜への飼料として有効利用する方法を検討した。サイレージの品質改善のための乳酸菌、酵素等の添加の効果や調整時期等による発酵条件の違いを明らかにし、改善方等を提示した。この他、吉林省内で収集した牛、綿羊への給与飼料120種類について成分分析を行い、飼料成分表を作成した。

3. 「中国食料変動」プロジェクト(2004～2008年度)

中国では、東部沿海都市部の急速な近代化とは対照的に、内陸中・西部や東北部農村の発展が遅滞し、様々な政策によって農村経済の活性化が図られている。しかし、これら地域は、自然環境の強い影響下にあり、気象変動に伴う冷害や干害等の農業気象災害の多発が、市場経済化に伴う政策の急激な変革とも相まって、食料生産と農家経済の活性化において大きな制約要因となっている。

2004年に開始された「中国食料の生産と市場の変動に

対応する安定供給システムの開発」プロジェクトは、内陸部・東北部を中心に多発する農業気象災害を事前に予測し、リスクを回避・軽減するための研究開発に取り組むとともに、生産と自然災害、経済及び環境変化との相互関係を科学的に分析することによって、中国国内の食料需給の安定化に寄与することを目的にした。また、農業気象災害のリスク評価技術の高度化を図り、食料生産の動向把握や農民の組織化方策等を比較検討しながら、内陸部・東北部を中心とした農家経済の向上策を提示した。

プロジェクトは、「農業資源評価技術の高度化と農業気象災害の早期警戒システムの構築」と「農業生産変動下におけるリスク評価と農村経済安定化システムの構築」という2つの大きな課題から構成され、相互に関連して「農家経営・農村の安定」を探る研究内容となっている。

参画研究機関は、中国側が、中国農業科学院傘下の農業資源和農業区劃研究所、農業環境与可持續發展研究所及び農業経済与發展研究所のほか、黒龍江省農業科学院、国务院發展研究中心農村經濟研究部であり、日本側は、JIRCASが中心となり、農業・食品産業技術総合研究機構、農業環境技術研究所、農林水産省農林水産政策研究所が協力した。以下、主要な成果を示す。

(1) 農業資源評価技術と農業気象災害早期警戒システム

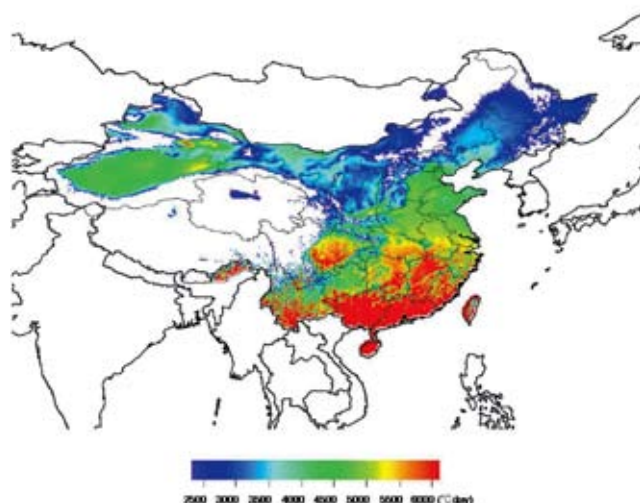
気象災害の予測・被害程度の推定の迅速化を図るため、衛星データを用いた作物モニタリング技術を開発した。毎年の水田分布を迅速に算定する手法を開発し、黒龍江省における水田分布の変動解析を行い、近年の大規模な土地利用の変化を明らかにした。これらは、早期警戒システムにおいて水田マスクデータとして使用されている。

黒龍江省等において、気象等のデータのリアルタイムでの収集・利用を可能にするフィールドサーバー技術を改良するとともに、気温、降水量、日射量に関して中国全土0.1°メッシュ気象値(日値)を作成した。作成したメッシュ気候値の検証と応用として、遅延型と障害型の水稲冷害の発生年を事例に分析した。さらに、黒龍江省の水稲栽培9地点の生育モデルにより、日温度の変化などを用いて、出穂期の変化、冷却量の推計、高温障害の判断などを行った。以上の成果をもとに「黒龍江省水稲冷害早期警戒システム」をインターネット上に構築した。

(2) 生産変動リスクの評価と市場安定化方策

黒龍江省稲作農家の経営安定化に向けた農業生産誘導を可能とするモデルを作成し、シミュレーション結果を提示した。現地調査から、稲作栽培経験が少ない農村ほど、リスク選好型の経営を望んでいることなどを明らかにし、リスク情報の提供方策を示した。

農業社会化服務体系の整備、米等の穀物の広域流通、農業組織化と市場安定化に関する政策的提言を著作にとりまとめた。中国の農業保険、農民專業合作社等の実態を明らかにした。



◎図2 日別気象メッシュデータから計算した有効積算温度の分布

注： $\geq 2200^{\circ}\text{C}$ ・日で水稲栽培が可能

資料：石郷岡ほか(2008)

中国東北部を主要な産地とするジャポニカ米の需給について中国コメ需給モデルを作成して分析し、生産者価格の変動に対する反応などを明らかにするとともに、黒龍江省からのコメの移出量のシミュレーション予測を行った。

5. 今後の展開方向

中国農業は、現在、三農（農業、農村、農民）問題とよばれる基本的な課題を抱えている。これらの問題に対して、中国政府は、政策による解決策のほか、科学技術による解決を重視しており、多くの研究資源が投入されている。農業の生産性に関する研究においては、水や土壌の保全などの生産資源管理と農業が及ぼす環境負荷の軽減が重要なテーマとなりつつあり、特に、脆弱な農業環境をもつ内陸乾燥地などでの持続生産技術の導入、定着が急がれており、将来の気候変動の緩和・適応のための技術も注目されている。今後の科学技術の交流においては、特に、これらの分野での技術開発が重要となろう。農村の活性化や農民の所得改善に関しても、これまでわが国が経済成長の過程で蓄積した技術・制度の経験を土台に、東アジア共通の研究成果を国際的に発信していくことが期待されている。このほか、日中間では、鳥インフルエンザなどの家畜伝染病や食品の安全性確保のための研究も極めて重要であり、さらに、東アジア地域全体の食料安全保障のための共通備蓄制度や情報ネットワークに関する制度的な研究も重要である。

わが国と中国は、農産物の貿易等を通じて関係を緊密化させており、より一層の協力関係が求められている。JIRCASは、これまで築いてきた日中農業科学技術交流の長い歴史と人的ネットワークをさらに発展させ、新たな

日中共同研究プロジェクトを開始し、共同して東アジア
に共通する農業問題を解決し、世界に発信していく。

参考文献

- Koyama, O. (Ed.) (2005) Development of Sustainable Production and Utilization of Major Food Resources in China, JIRCAS Working Report, 42, 1-138
- Uchida, O. and O. Koyama (Ed.) (2006) Development of Early-Warning System for Mitigating the Risk Caused by Climate Disasters through Technological Enhancement of Resource Monitoring and crop-Model Simulation, Proceedings of the Workshop on Japan-China Collaborative Research Project, JIRCAS Working Report, 50, 1-101
- 銭小平編著 (2008) 「黒龍江省における稲作の持続的発展とその課題」, JIRCAS Working Report, 59, 1-121
- 石郷岡康史, 鳥谷均, 許吟隆, 矯江, 許顕濱 (2008) 「メッシュ気候・気象値を用いた農業気象災害評価手法の開発」, 中日合作研究『中国農産品穩定生産与市場變動研究』項目総結会論文集, 99-102

日本における稲作及び品種改良

•Profile•



岩永 勝 いわなが・まさる ●農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）作物研究所 所長

1951年8月生まれ。1980年米国University of Wisconsin-Madison博士課程修了、及び学位授与（Ph.D.植物育種・遺伝学）。30年近く海外で農学研究に従事した。国際イモ類センター（CIP、ペルー在）、国際熱帯農業研究センター（CIAT、コロンビア）、国際植物遺伝資源研究所（IPGRI、イタリア）で遺伝資源の保存、活用を行った。さらに国際トウモロコシ・小麦改良センター（CIMMYT、メキシコ）の所長を務め、2008年4月より現職。2006年には「植物遺伝資源の保全と利用のための遺伝育種学研究と国際貢献」で日本農学賞・読売農学賞受賞。2004年と2006年にはベルギー王室の国際農業研究賞（King Baudouin Award）を受賞。

1. はじめに（稲作・米の重要性について）

米は小麦、トウモロコシと共に世界3大穀類の一つであり、世界人口の半分以上が暮らすアジアでは主食の地位を占めている。さらにアジア・モンスーン地帯では、主食としての重要性に加え、持続可能な農業体系としての水田の果たす多面的機能の役割は非常に大きい。例えば、日本の水田で生産される米の市場価格は年間で2兆円弱であるが、水田が果たす環境保全等の役割はそれを貨幣価値にすると6兆円を越えると試算されている。

稲作は2000年以上前に中国・朝鮮半島を通して日本に導入されたといわれている。稲作導入は日本の食糧生産性向上に圧倒的な影響を与え、その後の日本の社会そして文化的基盤を作っていった。一方、稲作が冷害、干魃等で凶作になると大規模な飢饉が発生したのが19世紀までの日本の実態であった。明治以来、日本政府と国民にとって稲作の安定的生産、高収量化、そして北海道などの冷涼地帯でも生産を拡大していく事は国家的な課題であり、これらの課題を栽培法の改良と品種改良を両輪として克服していった。しかし、1960年代になって、逆に米余りという事態に直面し、日本の米作り、そして農業そのものが大きく変貌している。

2. 米作りの社会的・経済的状況

（1）米の消費量

第2次世界大戦前には国民一人当たりの米の消費量は130kg前後であった（図1）。戦時中は米不足のため消費量は90kg前後まで低下したと推定される。その後は「腹一杯米を食べたい」という国民の米の消費量は120kgまで伸びたが、1960年代半ばから食の多様性が進み、消費量は現在の60kg前後までに急速に低下した。

（2）単位面積当たりの収量（単収）

1885年（明治18年）では1ha当たりの収量は2トン前後であったが、その後は栽培技術、品種の改良が進み、単収は着実に増加し、1985年に5トンを越えるようになった。つまり、100年の間に単収は250%増加したことになる。

（3）作付面積

稲の作付面積は1885年には255万haであったが、その後

は徐々に増加し、1969年に317万haでピークを迎え、その後は米の生産調整（減反政策）により、作付面積は170万ha弱へと急減した。



図1 1885年以降の一人当たりの米の消費量、稲作付面積および単位面積あたりの米の収量（JIRCAS作成）

（4）生産の現状、生産者の状況

米の産出額は1990年の3兆8249億円から2006年の1兆8146億円と半減している。2005年現在、稲作農家の76%は60歳以上であり、高齢化が一段と進み、稲作の生産構造は脆弱化している。今後、生産農家がさらに高齢化し、後継者の確保が難しい場合には生産量が急激に減少する可能性もある。

（5）消費動向、消費者からの要望

食生活における米離れは顕著である。少子高齢化・人口減のため主食用の国内消費については今後も拡大は望めないと考えられる。一方、輸入食品の毒物混入問題や表示の偽装問題が多発し、消費者から安全で安心な食品が強く求められており、国産農産物が見直されている。さらに、小麦の国際価格の高騰によりパン等の小麦製品の価格が高止まりする傾向にあり、米粉パンや米粉麺への関心が高まっている。

（6）現在の市場からの要望・期待

一般米飯用として、米卸・小売店が今後強化したい商

品は、①特別栽培米や有機栽培米、②地元産米、③健康志向米（玄米、花粉症緩和米、低アレルギー米など）、④低価格米等である。また、加工米飯および無菌米飯の伸びが著しく、冷凍米飯は微増である。発芽玄米は2002年まで急増したが、その後は微増に留まっている。

气流粉碎法等の製粉技術の改良により、パン、麺、ケーキ、ビスケットなど様々な食品への米粉利用の可能性が広がっている。しかし、従来の煎餅、団子等への需要が基本で、用途拡大による新たな需要量の増加には至っていない。2008年になって小麦粉価格が高騰しているものの、原料米のコストダウンが必須とされる。

最近、飼料用イネの開発・利用に各方面から注目が集まり、飼料用稲の栽培面積は7千ha（2007年見込み）に増加した。しかし、わが国の飼料自給率は、飼料全体で25%、粗飼料が77%、濃厚飼料は10%であり、飼料自給率を高めるためには濃厚飼料の自給率を高めることが必須である。

以上のように、加工用、非食用利用については、需要創出の可能性のあるものの、麦類その他輸入穀物の代替となる用途や、米デンプンなど工業原料用途、飼料米などの濃厚飼料、など、現在輸入農産物を利用して生産されている用途を米（あるいはホールクロップや稲副産物）で代替する必要がある、産業として成り立つためには、大幅な生産コスト削減は必須である。

3. 水稻作を巡る自然環境の変化

気候変動に関する政府間パネルの第4次評価報告書が公表され、過去100年間で気温は0.74℃上昇したことが指摘され、21世紀末で1.1～6.4℃上昇、2030年までは10年あたり0.2℃上昇すると予測されている。わが国でも、この100年で全国の年間平均気温は1.06℃上昇した。（北日本は0.96℃、西日本は1.15℃）。全国の夏（6～8月）の気温は、この100年で0.84℃上昇した（北日本は0.53℃、西日本は1.12℃）。2030年には九州中部から北部にかけて水資源賦存量がマイナスになる地域が増加することが予想され、本州の日本海側を中心に融雪水を水源とする春季の用水不足が懸念される。

高温により水稻の生育が促進し、生育期間が短縮し、北海道以外は潜在的な収量が減少している。一方、大気中のCO₂濃度の上昇で水稻の光合成能率が促進され、2050年頃には15%の増収が予測されるが、高CO₂濃度は高温不稔のリスクを高める可能性があり、予測の不確実性は大きい。温暖化による稲作への影響が予想以上に早く進行している可能性がある。また、高温による食味の低下が実需者や消費者の間で指摘され始めており、高温による品質低下のみならず、高温不稔および食味低下への対策も喫緊の課題となっている。

4. 世界的な食糧危機問題で提起された日本の米づくり、水田の活用の重要性

2008年は穀類の世界的取引価格の顕著な高騰がみられ、開発途上国だけでなく、先進国を含む20カ国以上で食料価格高騰が引き金となった社会的な暴動が発生し、「世界同時食糧危機」という表現が使われた。開発途上国の貧困層の数もこの食料価格高騰のために1億人以上増えたとされる。一方、日本の食糧自給率（カロリー・ベース）は40%と先進国の中では最低の部類に入り、国民の間で食の安全保障への関心が高まり、また現在の日本の農業が疲弊、衰弱化している実態を一般の国民が危機感をもって懸念する事態となった。これを受けて日本政府は自給率向上を一つの柱とした、食の確保、農業・農村の活性化へ向けての施策を打ち出している。現在の40%の自給率を50%へと10年以内で上げることが大きな目標とされ、それを実現するためには水田の有効活用が鍵となっている。

5. 今後の稲の育種研究

米余りが始まって以来、品種開発の目標が量から質へと大きく転換し、あきたこまち、ヒノヒカリ、ひとめぼれ等の良食味の銘柄品種が育成されるようになった。しかし、これらの良食味品種は良食味性に特化するあまり、多収性、病虫害抵抗性、直播適応性等の低コスト性・安定生産性の改良は不十分であり、食味を除く実用特性の水準はニシホマレ等の従前の品種に遠く及んでいないのが実態である。

稲作の低コスト・省力化、環境負荷低減、減農薬・省資源栽培等への要望がますます強まる中、これまでの良食味品種ではその対応にも限界がある。以上のような状況の下、次世代品種の育成が待たれ、以下のような形質あるいは特性を持った品種が重要とされる。

(1) 直播適性

水稻生産者にとって栽培しやすく利益を上げるには省力化、大規模化による低コスト栽培が不可欠であり、直播栽培はその有効な手段である。また、消費者にとっても低コスト化による低価格な良食味米は大きな魅力がある。さらに食品産業など実需者からは低コストで、成分・品質・食味が一定のロットが確保されることが求められている。そのためには直播適性の改良が重要である。しかしながら機械移植が定着している今日、根底から栽培システムを変えることは、社会的にも技術的にも容易ではなく、長期的な取り組みが必要である。実用化に求められる要素技術の一つが直播適性品種の開発であるが、栽培システムを変革するだけの画期的形質を有する品種はまだ育成されていない。

(2) 多収性

生産者が水稻栽培で利益を上げるには、大規模化が可能で低コスト・低価格で売れる米が必須である。また、

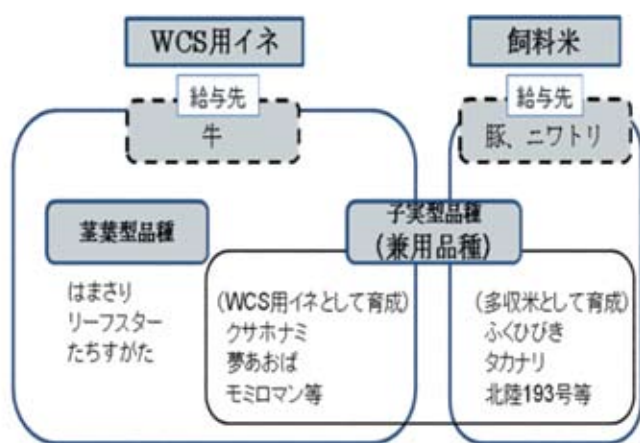
国内の飼料自給率及び食料自給率を上げるためには、飼料用稲（稲発酵粗飼料用、飼料用米）や加工原料向け品種の開発が政策的にも重要である。そのためには、多収性が不可欠である。

（3）米粉用など加工用

国内の食料自給率の向上は喫緊の政策的課題であり、その一環として、休耕田を利用した米粉用品種の新たな作付けとその加工・利用に大きな期待が集まっている。一方、過去20年にわたり米の消費拡大のためさまざまな特性を有する品種を開発されてきているが、今後とも耐老化性、早炊性、高精米歩留り、無洗米適性、玄米食適性などについてその研究蓄積を活かして米の用途開発を推進することが必要である。

（4）飼料用

飼料用水稲品種は、子実を利用する飼料用米品種、地上部全体を利用する稲発酵粗飼料（WCS）用イネ品種、そして両方の利用が可能な兼用品種の3種に分けることができる（図2）。飼料用米の専用品種としては、地上部全重収量は一般主食用品種並であるが、子実収量が極めて高い「ふくひびき」、「タカナリ」が挙げられる。WCS用イネ品種は子実と茎葉を合わせた株全体の収量（地上部全体収量）が高いことが特徴であり、地上部全重収量の構成によって、茎葉の割合が高い茎葉型と米の割合が高い子実型に分類できる。茎葉型のWCS用イネ品種には「はまさり」、「タチアオバ」、「リーフスター」などがあり、子実型のWCS用イネ品種には「ホシアオバ」、「クサホナミ」などがある。こうした、子実型のWCS用イネ品種は子実収量と地上部全重収量の両方が高いことから飼料用米とWCS用イネの両方に利用できる兼用型と言える。



◎図2. 飼料用水稲品種の分類

飼料用米品種として、最も重視される形質は多収性である。最近育成された飼料用米品種はいずれも800kg/10aから1,000kg/10aの高い収量性を示しているが、輸入トウ

モロコシと価格を比較すると依然として割高である。そのため、より一層の収量性の向上と低コスト生産への適応性を付与する必要がある。

6. 基盤的研究・育種法開発

今後の日本での稲の品種改良を推進していくには、品種改良に使われる遺伝的変異の拡大がその基盤となる。日本での稲育種は大きな成果が得られてきたが、一方現在の日本の米品種の遺伝的変異の狭さが懸念されている。例えば現在の日本の米の品種でその栽培面積での上位の10の品種はコシヒカリとその親類関係にある品種で占められている。また、今後必要とされる、超多収性、直播向き特性、温暖化対応形質等を持った品種を育成して行くには従来の遺伝資源では不十分であり、熱帯のインド型品種を育種素材として積極的に利用し、さらに野生種の遺伝的変異の利用を含めた遺伝的変異拡大が必須である。

今後の稲の品種改良には多くの課題があり、それを実行していくには品種改良という技術開発そのものの効率化を進めて行く必要がある。日本はイネゲノムの解読では世界各国と共同で行ってきた実績がある。ゲノムあるいは分子レベルでの情報をもっと有効に利用し、それを現場での品種改良へと結びつける努力が進行中である。遺伝子組み換え技術を用いた画期的な品種育成もそれに含まれている。

7. 終わりに

食料の生産は人類にとって必須の作業であり、人口増加が続き、農業をとりまく自然環境が悪化している中で、農学研究の果たす役割は大きい。世界の多様な農業生産体系のなかでも水田稲作は最大の人口を支える最も重要な生産システムであり、また唯一の持続的生産が証明された生産システムである。その中核的役割を果たしてきた稲の品種改良の役割は今後も増していくと考えられる。昨年以來、中国、韓国と日本のそれぞれの国の「作物研究所」が年に一度共同で国際シンポジウムを開催し、研究協力を推し進めている。今後もアジア・モンスーン地帯での水田稲作の持続的活用、そして米の多用途拡大に向けた国際研究協力の重要性が増していくと考えられる。

謝辞

本原稿を作成するにあたっては当研究所の岡本正弘（前）研究管理監、根本博研究管理監、長峰司企画管理室長のご協力を得たことを深く感謝し、また、図1は国際農林水産業研究センター（JIRCAS）の小山、塩野両氏より提供を受けた事の特記し、深く感謝したい。

効率的な家畜繁殖技術の開発

•Profile•



渡辺 伸也 わたなべ・しんや ●独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 畜産草地研究所 高度繁殖技術研究チーム 上席研究員

1961年11月生まれ、1984年東北大学農学部（最終出身校）畜産学専攻農学博士。専門分野は、家畜繁殖学。以前は、雄家畜の繁殖研究、最近は、体細胞クローン牛やその後代の健全性調査などが中心。

1. はじめに

日本の畜産業は、限られた天然資源、限られた土地という大きなハンディキャップを背負った条件下で営まれてきた。そのハンディキャップを克服するため、優秀な経済形質を持つ家畜を効率的に繁殖させる技術開発が1930年代頃から精力的に行われてきた。さらに、牛人工授精は1950年の家畜改良増殖法により、牛凍結精液は1961年の家畜改良増殖法の改正により、牛胚移植は1983年家畜改良増殖法の改正により、また、牛体外受精は1992年の家畜改良増殖法の改正により、それぞれ、生産現場における技術利用の枠組みが明確化され、日本におけるこれら家畜繁殖技術の浸透が徐々に進んだ。その結果、現在では、日本の雌牛の約99%に対し凍結精液による人工授精が、また、約1%に対し胚移植が、それぞれ、実施されている。したがって、日本における自然交配により生産される子牛はごくまれな存在となっている。本稿では、これらの繁殖技術の開発の経緯と技術の現状について概説したい。

2. 人工授精

日本における最初の家畜人工授精は、1896年、新山莊輔による馬の人工授精である。本格的な家畜の人工授精は、1912年、イワノフ（ロシア）の技術を学んだ石川日出鶴丸が馬で実施したものである。その後、乳牛(1928)、兎(1930)、鶏(1936)、豚・山羊(1938)、羊(1939)、和牛(1940)の各家畜・家禽においても、人工授精が試験された。1930年代中頃には、馬の人工授精が全国的規模で普及した。1945年以降は、農業の機械化に伴う農耕馬の減少などにより、人工授精の主要な対象は馬から牛に移行した。そして、1954年からは、牛凍結精液に関する技術開発が開始された。1965年には家畜改良事業団が設置されるなど、牛凍結精液の生産・配布体制も整備され、凍結精液が日本国内へ急速に普及していった。

牛人工授精の延頭数は、牛全体で年間145万頭である（日本家畜人工授精師協会、2007）。凍結精液は、家畜改良事業団などの広域人工授精センター（乳用牛、和牛）や公立の機関（和牛）等により供給されている。1984年から

は牛の輸入精液が利用されている。

一方、日本の豚においては、受胎性の高い凍結精液の作製が困難であるなどの事情から、人工授精の普及率は数%に過ぎないが、一部の地域やブリーダーにおける熱心な人工授精の取り組みによる成功事例も出てきている。しかし、その他の家畜・家禽の商業的な人工授精はほとんど行われていない。なお、日本の競走馬では、登録上、人工授精は許されない。

近年、乳用牛および和牛の経産牛において、人工授精時の受胎率が低下している（図1）。それに伴い分娩間隔が延長している。ただし、未經産牛における顕著な受胎率低下は認められていない。米国、英国、スペインでも同様な現象が顕在化している。

3. 胚移植

日本における胚移植研究は、1940年代に開始された。杉江侑らは、1964年、新鮮胚由来の子牛生産に成功し、さらに、1979年には、凍結胚由来の子牛生産も果たした。杉江らは、非外科的な胚移植や採卵の技術を開発するなど、先駆的な業績を残した。その後、牛胚移植の技術は、農林水産省の事業などを通じ、日本国内の国公立機関により盛んに取り組みられるようになった。近年では、年間6万頭弱の受胎雌牛に胚移植が実施されている。その結果、2005年には、18,463頭の子牛が胚移植によって生産されるに至った。現在、農林水産省では、「ETチャレンジ50機関」を公表している。この取組における2005年度の達成機関は52である（表1）

一方、日本における豚胚移植は、1973年、西川義正らによって最初に報告された。その後、1990年、小栗紀彦らが凍結胚由来の子豚生産に成功している。豚胚移植は、研究開発の早い段階から生産現場に導入された牛の場合とは異なり、子宮内における胚の初期発生や妊娠成立などの学術研究の手段として用いられることが多い。豚胚移植が生産現場にあまり取り入れられない理由としては、①多胎動物かつ妊娠期間が短い豚においては、過剰排卵による多子生産のメリットがない、②非外科的な豚の胚移植技術が普及していない、③胚の凍結方法が確立

されていないなどの理由があげられている。

胚移植に関連して開発された繁殖技術としては、過剰排卵誘起、発情発見、胚の体外操作、胚の品質評価および凍結保存など多くのものがある。これら技術の多くが、体外受精技術の開発に向けた素地になった。

4. 体外受精

日本における家畜の体外受精研究は、1970年代に本格化し、子畜生産に向けた基礎的な知見や技術の蓄積が進んだ。そして、1985年、体外成熟卵子を用いた体外受精による子牛生産に花田章らが世界で初めて成功した。その後、花田らの研究室には、全国からの依頼研究員が殺到し、牛体外受精が全国各地に技術移転された。それと並行して、農林水産省の研究プロジェクトなどの各種事業により、体外受精の研究基盤が強化された。さらに、1989年には、牛体外受精由来胚を全国に供給するための機関である家畜改良事業団・東京バイオテクセンター（現家畜バイオテクセンター）が設置され、年間1万個程度の移植用体外受精由来胚が酪農組合などに提供されている。その結果、2006年度には、2,308頭の体外受精に由来する子牛が生産されるに至った。現在、農林水産省では、「IVFチャレンジ40達成機関」を公表している。この取組における2005年度の達成機関は19である（表2）。

一方、体外受精による子豚の生産には、1993年に吉田光敏らが日本で初めて成功した。豚体外受精については、凍結胚の受胎性が低いほか、上述の胚移植の場合と同様の理由により、生産現場ではほとんど普及していない。しかし、豚体外受精の実験系は、生物学的な学術研究のツールとして大いに活用されている。

体外受精技術を確立していく過程で、未受精卵子の成熟、精子の受精能獲得、胚の培養技術などの関連技術が開発された。これらの多くは、核移植研究を行う際の基盤技術として活用されている。

5. 核移植

日本では、1980年代から続いていた家畜の胚移植や体外受精などの研究や農林水産省の事業による上述の取組を通じ、牛胚の培養、顕微操作および胚移植に熟練した優秀な研究者・技術者が国公立機関などを中心に多数在籍していた。このような状況下、角田幸雄らが1990年に受精卵クローン牛の、また、1998年には世界初の成牛に由来する体細胞クローン牛の生産に成功した。以降、日本国内では、受精卵クローン牛が718頭（43機関）、体細胞クローン牛が557頭（46機関）、それぞれ、生産されている（2008年9月30日現在、農林水産省資料）。しかし、

クローン牛生産においては、子牛生産率が低いうえ、死産や生後直死が多発するという問題が未解決である。

日本におけるクローン牛の取り扱い、1999年に出された農林水産省の通達によって、受精卵クローン牛は任意表示による出荷可能、体細胞クローン牛は出荷自粛という状態になっている。

一方、体細胞クローン豚については、2000年に大西彰らが初の体細胞クローン豚の生産に成功した。そして、現在まで335頭（8機関）の体細胞クローン豚が日本国内で生産されている（2008年9月30日現在、農林水産省資料）。これらクローン豚の大部分は、代替臓器生産や疾患モデルなどの医学的利用を念頭に置いた遺伝子組換え豚とみられる。この傾向は、遺伝子組換え動物がほとんど含まれない体細胞クローン牛の場合と対照的である。

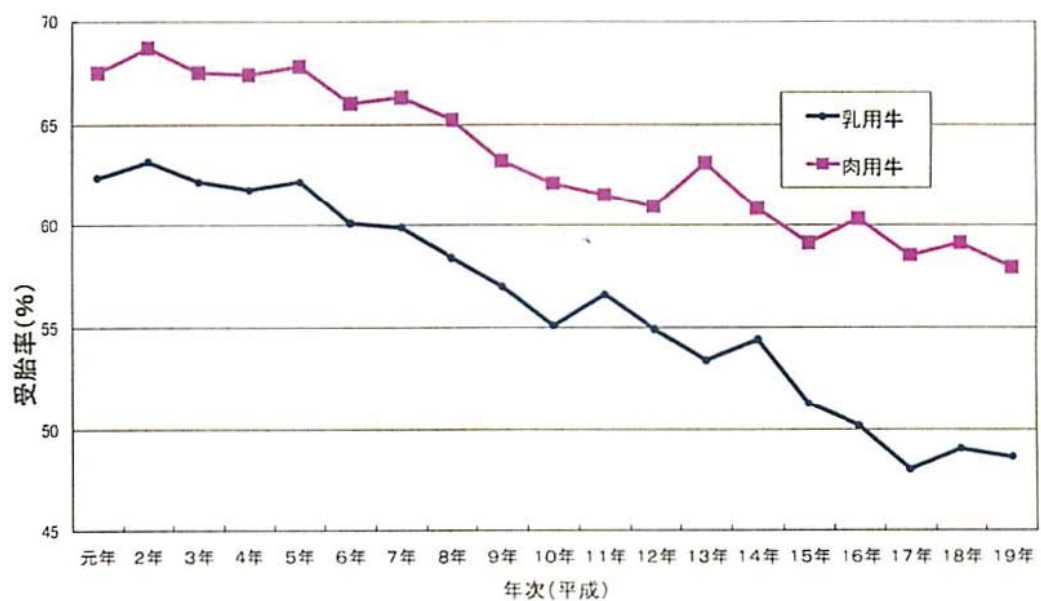
2008年4月1日、厚生労働大臣が「体細胞クローン技術を用いて産出された牛及び豚並びにそれら後代に由来する食品の安全性」に関する健康影響評価を、内閣府食品安全委員会委員長に依頼した。その後、新開発食品専門調査会の下にワーキンググループが設置され、審議がすすめられている。そして、2009年3月12日には、新開発食品評価書案が公表された。そこでは、「体細胞クローン家畜やその後代が生産した乳肉は一般牛が生産した乳肉と同等」という評価案が示された。その案について、食品安全委員会主催の意見交換会が東京（3月24日）と大阪（3月27日）で開催され、また、インターネットによるパブリックコメントが3月12日～4月10日に実施された。今後、これら国民の意見を取り入れながら上述の健康影響評価の最終結論が下されるものと見込まれる。

6. おわりに

国土が狭い日本では、その制約された条件下で効率的な家畜生産を行うため、家畜繁殖の研究開発が積極的に行われてきた。その結果が「人工授精→胚移植→体外受精→受精卵クローン→体細胞クローン」という技術開発のステップ・アップの実績である。特に体細胞クローン技術を適用した子牛・子豚の生産においては、世界の最先端を突き進んだと表現しても過言ではない。しかし、体細胞クローンのステップになって、これら家畜によって生産された乳肉の安全性に対する不安、これらの家畜生産に対する動物愛護的観点からの疑義、さらには生産現場からの期待と不安などの様々な意見が国民の間で浮上するという事態になっている。このような状況において我々研究サイドのできることは、科学的な知見のわかりやすく丁寧な説明を国民にしていくこととクローン技術の更なる研鑽ではなかろうか。

参考文献

- ・ 仮屋堯由、繁殖バイオテクノロジーの概要、家畜繁殖九州シンポジウム講演資料集、41-50、2001
- ・ 安倍明德、体外受精卵を利用した高品質牛肉生産、家畜繁殖九州シンポジウム講演資料集、13-20、2001
- ・ 吉ざわ努・平子 誠・下司 雅也・高橋 昌志・永井 卓、生産現場における受胎に係る要因について－アンケート調査結果から－、平成20年度核移植技術全国検討会（第13回）報告書、39-52、2009
- ・ 遠藤健治、牛の生産現場における体細胞クローン技術に対する見方、平成20年度核移植技術全国検討会（第13回）報告書、9-18、2009
- ・ 渡辺伸也、わが国における牛クローン研究の現状と応用の見通し、TechnoInnovation、18、32-34、2009



◎図1 日本の牛人工授精における受胎率の推移(吉ざわら(2009)より)

ETチャレンジ50達成機関

(平成17年度版)

	都道府県	実施機関名	移植頭数	受胎頭数	不明頭数	受胎率
1	熊本県	江藤動物病院	78	54	0	69.2%
2	北海道	かわまた家畜診療所	532	357	0	67.1%
3	北海道	全国農業協同組合連合会ETセンター	2,111	1,415	0	67.0%
4	北海道	北海道農業公社十勝育成牧場	308	204	0	66.2%
5	北海道	道南NOSAI南部家畜診療センター	102	67	0	65.7%
6	北海道	豊西家畜診療所	218	143	0	65.6%
7	北海道	(有)セビリティコンフィデンスブリーディングサービス	477	306	0	64.2%
8	北海道	伊達市農業協同組合	488	309	0	63.3%
9	鹿児島県	小東家畜医院	95	57	4	62.6%
10	福島県	柳橋動物病院	111	67	1	60.9%
11	北海道	十勝農業共済北西部家畜人工授精所	170	102	0	60.0%
12	北海道	岡本家畜人工授精所	90	54	0	60.0%
13	長崎県	なんこう受精卵移植研究会	129	77	0	59.7%
14	北海道	(有)ハイリッド	123	73	0	59.3%
15	熊本県	(有)上田家畜繁殖クリニック	227	134	1	59.3%
16	青森県	(有)小比類巻家畜診療サービス	383	213	22	59.0%
17	新潟県	佐渡農業共済組合家畜診療所南部分室	87	51	0	58.6%
18	北海道	札内農業協同組合	125	73	0	58.4%
19	北海道	(有)フジ バイオ サイエンス	275	160	0	58.2%
20	栃木県	匿名希望	485	282	0	58.1%
21	北海道	匿名希望	827	480	0	58.0%
22	北海道	大樹町農業協同組合	133	76	0	57.1%
23	北海道	びえい動物病院	166	94	0	56.6%
24	愛知県	ジャパンエンブリオテック	1,225	693	0	56.6%
25	北海道	天塩町農業協同組合	230	130	0	56.5%
26	群馬県	館林市農業協同組合	127	71	0	55.9%
27	北海道	釧路地区NOSAI阿寒釧路支所	233	130	0	55.8%
28	鹿児島県	BIOFIX ETセンター	193	106	0	54.9%
29	北海道	釧路地区NOSAI音別白糠支所	124	68	0	54.8%
30	岐阜県	多治見牛ETクリニック	910	495	1	54.5%
31	京都府	京都府農業協同組合酪農センター	263	140	0	53.2%
32	熊本県	吉川ETセンター	96	51	0	53.1%
33	岩手県	いわい東農業協同組合ETセンター	226	120	0	53.1%
34	北海道	足寄町大規模草地育成牧場	115	61	0	53.0%
35	沖縄県	牛の病院	157	83	0	52.9%
36	長野県	JA全農長野ETセンター	897	466	0	52.0%
37	愛知県	愛知県酪農農業協同組合豊橋支所	129	67	0	51.9%
38	北海道	十勝農業共済鹿追人工授精所	130	67	1	51.9%
39	群馬県	匿名希望	110	56	2	51.9%
40	北海道	くしろ丹頂農業協同組合	115	59	1	51.8%
41	群馬県	岡田家畜人工授精所	309	160	0	51.8%
42	北海道	浜中町農業協同組合	711	368	0	51.8%
43	北海道	中春別農業協同組合	203	105	0	51.7%
44	長野県	笹崎獣医科医院	120	62	0	51.7%
45	長崎県	壱岐市受精卵移植研究会	122	63	0	51.6%
46	福岡県	嘉穂地区乳用牛改良検定組合家畜人工授精所	128	66	0	51.6%
47	北海道	中標津町農業協同組合	554	284	0	51.3%
48	埼玉県	今井家畜診療所	250	128	0	51.2%
49	福島県	福島県酪農農業協同組合県中支所	149	76	0	51.0%
50	宮崎県	小林市受精卵移植協議会	187	95	0	50.8%
51	北海道	計根別農業協同組合	378	189	2	50.3%
52	埼玉県	埼玉県秩父高原牧場	112	56	0	50.0%

注1: 体内受精卵移植の年間受胎頭数50頭以上、受胎率50%以上の機関

注2: 妊否不明頭数が移植頭数の10%を超える機関については掲載していない

注3: 目標を達成したものの非公表を希望した実施機関として栃木県(1カ所)が上記以外に有る

注4: 上記以外に公的試験研究機関として岐阜県畜産研究所酪農研究部、山口県畜産試験場が目標達成している

注5: ランキングの順位は小数点第2位以下も含めて判定、ただし、小数点第2位以下も同じの場合は同一順位とした

◎表1

(農林水産省資料より)

IVFチャレンジ40達成機関

(平成17年度版)

	都道府県	実施機関名	移植頭数	受胎頭数	不明頭数	受胎率
1	北海道	本別町農業協同組合	136	82	0	60.3%
2	群馬県	全農群馬県本部中部酪農センター	160	93	0	58.1%
3	千葉県	千葉県農業共済組合連合会	543	300	0	55.2%
4	北海道	根室農業協同組合	74	40	0	54.1%
5	島根県	益田地域協議会	41	22	0	53.7%
6	群馬県	館林市農業協同組合	104	55	0	52.9%
7	北海道	道南NOSAI東部家畜診療センター	116	60	0	51.7%
8	岩手県	岩手ふるさと農業協同組合家畜人工授精所(金ヶ崎)	76	38	0	50.0%
9	長野県	南信酪農業協同組合	151	74	0	49.0%
10	群馬県	全農群馬県本部東部酪農センター	156	76	0	48.7%
11	長野県	(株)長門牧場	222	102	0	45.9%
12	千葉県	南房総みるく農業協同組合	41	18	0	43.9%
13	北海道	(有)セビリティコンフィデンスブリーディング	51	22	0	43.1%
14	栃木県	酪農とちぎ農業協同組合	79	34	0	43.0%
15	長崎県	島原地方酪農業協同組合	72	30	2	42.9%
16	福岡県	嘉穂地区乳用牛改良検定組合家畜人工授精所	268	111	1	41.6%
17	北海道	中春別農業協同組合	46	19	0	41.3%
18	熊本県	熊本県酪農業協同組合連合会	2,215	903	0	40.8%
19	岡山県	おかやま酪農業協同組合津山支所	285	115	0	40.4%

注1: 体外受精卵移植の年間移植頭数40頭以上、受胎率40%以上の機関

注2: 妊否不明頭数が移植頭数の10%を超える機関については掲載していない

注3: 目標を達成したものの非公表を希望した実施機関として群馬県(1カ所)が上記以外に有る

注4: 上記以外に公的試験研究機関として、(独)家畜改良センター熊本牧場、大阪府環境農林水産総合研究所 食とみどりの総合技術センターが目標達成している

注5: ランキングの順位は小数点第2位以下も含めて判定、ただし、小数点第2位以下も同じの場合は同一順位とした

◎表2

(農林水産省資料より)

日本における海水魚養殖の来歴と現状

•Profile•



村田 修 むらた・おさむ ●近畿大学水産研究所所長

1940年5月生まれ。1966年近畿大学水産増殖学専攻、農学博士。

研究分野：海水養殖魚の品種改良に関する研究（特にマダイの選抜育種および交雑育種）。最近ではクロマグロ、クエなどの人工孵化種苗生産と養殖に関する研究。著書：海産魚の養殖（マダイ・ヒラメ）熊井英水編著、漢文社、2000。水産増養殖システム 海水魚（ブリ・ブリヒラ・ヒラメ）熊井英水編、恒星社厚生閣、2005。など

はじめに

日本の海水魚養殖の主なものにはブリ *Seriola quinqueradiata*（英名Yellowtail）、カンパチ *Seriola dumerili*（英名greater amberjack）、マダイ *Pagrus major*（英名red sea bream）、ヒラメ *Paralichthys olivaceus*（英名bastardhalibut）、シマアジ *Pseudocaranx dentex*（英名striped jack）、トラフグ *Fugu rubripes*（英名tiger puffer）などがあり、さらに、最近では特に注目されている魚種としてクロマグロ *Thunnus orientalis*（英名northern bluefin tuna）、クエ *Epinephelus bruneus* Block（英名kelp grouper）などが挙げられるであろう。筆者が勤めている近畿大学では先に記述した魚種について野生のものを人間の手で育て上げること（家魚化）を先駆け、それらの親魚育成を計り、その親からの人工孵化種苗生産の技術開発を行ってきた。そして養殖用種苗は天然産に依存するのではなく、全て人工種苗であるべきとの信念のもとに開発を行ってきた。さらに、養殖効果を高める手段の一つとして欠かすことのできないのは優良種苗の作出である。そこでそれらの品種改良を行い、中でもマダイのそれは日本の養殖産業に大きな革命をもたらしたといっても過言ではなからう。ここではそれらの一部について紹介することにする。

海水魚類養殖の来歴

海面魚類養殖の歴史は、野網和三郎が香川県引田の安戸池で始めたブリ養殖によって幕を開けた。しかし、養殖漁業の将来を見据えた時に池中養殖（築堤式・網仕切式）では生産に限度があることから、1954年より近畿大学水産研究所白浜実験場において原田輝雄は海面に筏を浮かべた網生簀養殖試験を開始した。そして、ブリ養殖が産業としての形態を成すようになったのは網生簀養殖法の開発が端を発した1955年以降のことで、その養殖生産量が農林統計に掲載されるようになったのは1960年、1,524トンであった。カンパチ、シマアジなども1955年ごろか天然種苗を採捕して養殖されていたが、統計に現われるようになったのはシマアジが1974年で、カンパチは統計上ブリに包含された。トラフグは養殖物としては

じめて出荷されたのは1970年であるが、蓄養は1933年ごろから行われていた。マダイの養殖研究は1910年頃に始まったが事業としては1965年以降のことで、1970年に初めて統計に539トンと記載された。民間でヒラメの養殖が始まったのは1980年のことで、1970年に初めて統計に539トンと記載された。因みに2005年における主要4魚種の養殖生産量および養殖業の占める割合はそれぞれマダイで76,081トンおよび83.7%、ブリ類で159,741トンおよび74.4%、ヒラメで4,591トンおよび43.0%、フグ類で4,582トンおよび42.2%である。海産魚の全漁獲量の中に養殖生産量の占める割合は1995年が17.9%であり、その後漸増し、10年経過した最近2005年のそれは21.4%に増加している。一方、魚種別漁獲量のなか中で養殖生産量の占める割合はマダイが最も大きく83.7%、次いでブリ類の74.4%、ヒラメが43.0%およびフグ類が42.2%と続き、養殖魚生産の重要性が理解できるであろう。

マダイの増養殖史

海産魚の増養殖に関する研究は、マダイでの歴史が最も古い。マダイの人工孵化・仔魚飼育を最初に試みたのは北原多作で、その後、1928年、梶山らが海面に浮かべた木箱の中で稚魚までの飼育を行ったが、陸上水槽で稚魚までの飼育に初めて成功したのは1962年で、観音崎水産生物研究所が、全長15～20 mmの稚魚22尾を飼育したのが最初である。種苗としての量産については、瀬戸内海栽培漁業センター伯方島事業場が、初期餌料に初めてシオミズツボワムシを用いることによって1965年にその道を開いた。しかし、採卵用親魚はすべて天然親魚であったが、養成マダイ親魚からの採卵・人工孵化飼育は、1964年に近畿大学水産研究所白浜実験場で最初に行われた。

養殖については、ブリ養殖の創始者である野網和三郎が創業2年目の1928年、産卵後の痩せたマダイ成魚700尾を蓄養したのが最初であろう。近畿大学水産研究所では1955年、兵庫県明石沿岸で採捕した約8,200尾（平均体重1 g）のマダイ稚魚を和歌山県白浜へ輸送し、試験養殖を開始し、1965年頃から本格的にマダイ養殖が行われるよ

うになった。

さらに、近畿大学が1964年から取り組んできた成長の早い、姿の美しい魚体を選んで親魚とする選抜育種法の研究を取り入れた。その結果、3～4世代（12～16年目）頃から魚体の成長が早くなった。例えば、マダイの体重が1kgになるには天然産種苗の場合では3～4年を必要としたが、品種改良した種苗は1年8ヵ月～2年で同様な大きさに成長するようになった。

成長が速い人工生産マダイ種苗が開発されたことに加え、体色改善技術の開発が進んで市場価格も上昇したことや、ハマチ養殖の過剰生産による低迷などを受けて、1980年頃からマダイ養殖が急増した。

さらに、品種改良の一環として、異なる種類の魚を人工交雑して、両親魚種の良い形質を受けた新しい魚種が作出するために1964年からは交雑育種法を取り入れた。その結果、マダイ×クロダイ（マクロダイ）、マダイ×ヘダイ（マヘダイ）、マダイ×チダイ（マチダイ）、イシダイ×イシガキダイ（キンダイ）、ブリ×ヒラマサ（ブリヒラ）など20種に近い新魚種を作出してきた。これらの交雑種の中で全てが有用とはいえないが、何種類かは養殖対象種として実用化に向かっている。



◎図1 4年養殖クロマグロ体重125kg

呼吸ができなくなる。また、皮膚が非常に弱く、手でつかむと、そこから腐るといわれるぐらいで、扱いが非常に難しい。しかし、それらを克服して、満5歳を迎えた1979年に世界で初めての自然産卵が確認され、その時の感動は忘れることができない。その卵を用いて孵化および飼育を試みた結果、孵化後47日目（全長5.9 cm、体重2.3 g）までの飼育には成功したが、以後は全部斃死した。この親魚群の産卵は、年が経過しても再び認めることはなく稚魚の長期飼育もできなかった。このように、採卵・人工孵化の成功と稚魚育成での挫折に追いやられ、ヨコワを活け込み養成していた別親魚群からの産卵もなく11年間の空白期を迎えた。しかし、挫折することなく養殖実験を続けた結果、1994年7月3日から自然産卵を開始し、これまで稚魚にまで育てながら実用種苗を得るに至らなかった以前の結果を踏まえ、改めて飼育技術再構築の重要性を認め、研究所挙げてのプロジェクトを発足させた。その結果、全長5～6 cmの稚魚1,800尾を生産し、世界で初めて網生簀に沖出しを行うことができた。さらに、世界で初めて人工孵化稚魚の放流実験も実施することができた。しかし、網生簀に沖出しした稚魚の1ヶ月後の生残数は僅かで、外傷が目立ち、その後は次々に斃死し、1年以上の飼育が困難であった。

この異常な減耗状況は、今までの魚種では例がなく途方に暮れたが、観察の結果その死因が衝突死であることを確認した。クロマグロの発育過程には、初期減耗や共喰いなど様々な課題があるが、先ずはこの原因究明と対策が最優先課題であった。そこで、1994年以降は、沖出し生簀の大きさについて検討した結果、稚魚であっても親魚養成と同じ直径30 mの大型円形生簀に沖出しした

1970年(0)*	研究開始(水産庁プロジェクト「マグロ類養殖技術開発試験」参画)
1974年(4)	天然幼魚ヨコワからの養殖に初めて成功
1979年(9)	世界初自然産卵－孵化－仔稚魚飼育に成功
1982年(12)	これまでの最長飼育記録 57日齢、全長98 mm
1983～1993年	産卵せず(11年間の仔稚魚飼育実験不能)
1994年(24)	人工稚魚の沖出しに初成功(1,872尾):246日齢 全長42.8 cm、体重1,327 g
1995年(25)	養殖用実用種苗の生産に始めて成功
1997年(27)	1995年産9尾生残、1996年産19尾生残
2002年(32)	1995年産人工親魚6尾、1996年産人工親魚14尾産卵:世界初完全養殖達成
2004年(34)	完全養殖－人工孵化飼育－初出荷達成
2007年(37)	人工孵化3世代誕生(完全養殖第2世代)、人工種苗として初出荷

*括弧の中の数字は研究開始からの積算年数

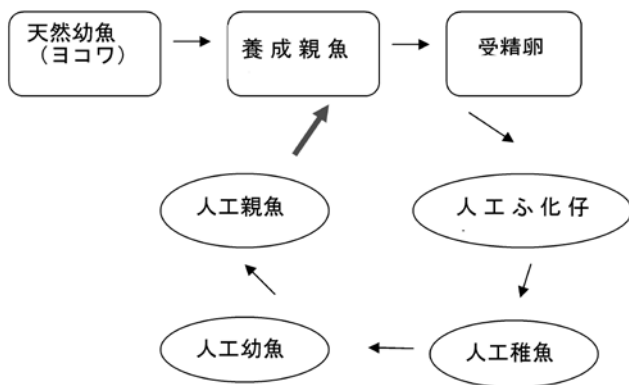
◎表1 完全養殖達成と初出荷まで37年間の経緯

クロマグロの増養殖史

筆者らのクロマグロ増養殖への取り組みは、1970年に水産庁が開始した3ヶ年のプロジェクト研究「マグロ類養殖技術開発試験」が切っ掛けとなった。

近畿大学水産研究所は開設以来、有用海産魚の養殖技術開発を行ってきたが、養殖用種苗は人工生産すべきとの考えから、最終目標は人工孵化から始めた完全人為管理下の養殖であり、完全養殖技術の開発が重要である。筆者らは、天然種苗入手の調査から初めたが、漁業者からは「マグロの網生簀への活け込みなど無理！」といわれた。そこで躊躇したが、であればこそその課題に向かって串本町大島に新実験場を開設し研究に着手した。

1974年には引縄釣りで得られたヨコワ(クロマグロ幼魚)を漁師から購入し、網生簀に活け込み飼育を開始した。ヨコワは休むことなく泳いでいないと、酸素が欠乏して



◎図2 完全養殖の概念図

ほうが、その後の生残率を高めることがわかった。

次いで、人工孵化クロマグロ幼魚を養成して親魚とし、それから採卵・人工孵化仔魚飼育する完全養殖達成に向かった研究を実施した。その結果、飼育してきた親魚が満7および6歳を迎えた2002年には体重110～150および70～120 kgに成長し、6月から8月にかけて自然産卵した。卵は真円形で直径1 mm内外の良質なもので、孵化仔魚は全長約3mmとなり、それを飼育した結果、17,000尾の稚魚を冲出しすることができた。このようにして、32年の歳月を要したが、夢であったクロマグロの完全養殖が達成された。なお、この稚魚（人工2世魚）は、2004年9月には体重20 kg前後に成長し、試験出荷を行ったところ完全養殖マグロとして高評を得た。

さらに、2007年には、人工孵化第3世代稚魚1,500尾を養殖種苗として養殖業者へ販売した。完全養殖のクロマグ

ロの稚魚をこうした形で出荷するのは世界で近畿大学が始めてである。

完全養殖の達成によって、養殖用種苗の確保は天然資源に頼らず、その生活史の全過程の人工生産が可能となった。そうすることによって、健全な種苗を安定的に生産確保でき、その結果、クロマグロ養殖を産業として計画的に推進することが可能となろう。また、養殖用種苗を天然資源に手を付けずに人工で賄うことによって、ワシントン条約締約国会議の取引規制や国際自然保護連合などの議論の対象になることもない。マグロの資源が世界の海で枯渇しつつあるため、漁獲規制が強化されるようになった中で、天然産に依存しない世界のマグロ養殖に貢献できればと考えている（表1、図1、2）。

おわりに

しかし、養殖産業の現状は経営的に非常に厳しいものが拭い去れない。それは魚価の低迷、養魚飼料の高騰、人件費の高騰および消費者の魚離れなどに起因して、養殖業界の低迷期が延々と続いている。それらを打開するには、生産量の調整、ブランド化を図りながら食の安全・安心をモットーにしたトレーサビリティ（養殖履歴）システムの構築に努めて、消費者へのイメージ回復への啓蒙が大切であろう。そして、多くの魚類において人工孵化種苗生産した稚魚からの養殖システムが開発された現在、養殖産業は海産魚介類の自給率の向上と天然資源の枯渇防止、さらには持続的な養殖環境を目指すべきであろう。



水資源

水資源

はじめに

中国科学技術月報第32号の特集は「食糧の持続的生産に関する研究」でした。今回は食糧同様、一日も欠かすことのできない「水」を特集いたします。

水は飲料水のほか、生活用水、農業用水や工業用水など多方面にわたって人間の生活を支える「資源」としての側面も併せ持っています。人間のさまざまなニーズに応えうる淡水は地球全体で約2.5%しかなく、そのほとんどは南極や北極の水や地下水として存在しています。残りの0.01%が湖沼、河川、湿地、土壌、大気、生態などに存在し、そのうちの70%が湖沼の水であると言われています。私たちが自然生態系から得るめぐみは「生態系サービス」と呼ばれており

「地球上に人間が67億人もくらす現代社会においては、こうしたサービスは生態系をきちんと保全管理する

ことによつてのみ持続的に享受し続けることができるものである」。(高村典子「湖は、どうしたら蘇るのだろうか」『中国の水環境問題 開発のもたらす水不足』、67頁、2009年)

とくに水資源は、食料と違って「増産」可能なものではないことから、無作為な蕩尽や汚染は私たちにとって深刻な結果をもたらします。

今回の特集では、中国と日本の水資源とそれをめぐるさまざまな問題について各分野の第一人者に論文を執筆していただきました。ここで取り上げましたさまざまな事例と解決方法が「水」と人間の未来を考える際の一助となりましたら誠に幸いです。

中国総合研究センター

中国における飲用水処理の応用の現状と発展

•Profile•



劉 文君 Liu Wenjun ●清華大学飲用水安全研究所所長

教授、博士課程指導教官、飲用水安全研究所所長、中国土木学会水工業分会秘書長、全国紫外線消毒基準化技術委员会主任、国際紫外線協会（IUVA）常務理事。1968年8月生まれ。1999年、清華大学卒、工学博士学位取得。全国優秀博士論文及び教育部新世紀優秀人材サポート計画認定者。専門定期刊行物に文章70余篇発表、専門著書3冊、訳書2冊を上梓し、設計マニュアル、専門書4冊の編集に参加。省・部レベル科学技術進歩賞受賞4件。主な研究方向：微汚染水源の飲用水処理、現代の水消毒技術及び理論、給水管路網の水質安定性の制御原理及び技術、飲用水の水質安全性評価技術及び理論。

1. 生活飲用水水質基準の発展状況

中国の元々の国家水質基準は1985年に制定され、その際に35の水質項目が定められた。

中国衛生部は2001年、『生活飲用水衛生規範』という名称で水質検査項目を公布し、そのうち通常検査項目は34、特別検査項目は62であった。この96の水質項目には多数の有機汚染物質制限濃度が定められ、先進国のスタンダードにも合致していたが、ただし「水質監測」には、「水源水、工場から出る水、一部の代表性を有する管路網末端水については、少なくとも半年に1回、通常検査項目の全分析を行う。特別検査項目については、現地の水質状況と存在する問題に応じて、必要時に検査項目と頻度を具体的に決定すればよい」と定められていた。これは中国の国情“多くの検査項目は高精度の計器がなければ分析測定ができないが、大多数の地区・都市にはまだそれらの条件が備わっていなかった”に適っていたが、実際には、特別項目（数多くの有機汚染物質）の検査を放棄していたのだった。さいわい通常検査の中に酸素要求量という有機物の総合的指標を定め、有機物の取込総量を規制していたのが、85年の目標に比べれば大きな前進であった。

中国建設部は2005年6月、『都市給水水質基準』（CJ/T206-2005）を公布し、衛生部の規範を下回らず、かつできるだけこれと協調するという原則に従って、同基準の中の、濁度は「特殊な状況下でも5度を超えない」を「3度を超えない」に改め、酸素要求量は「特殊な状況下でも5mg/Lを超えない」を「原水の酸素要求量が>6mg/Lの時、5mg/Lを超えない」と明記し直した。これは水源水が<6mg/Lの時には必ず3mg/Lに達しなければならないことを明確に規定し、衛生部の規範よりもいっそう厳しいものとなった。建設部は通常検査42項目余り、特別検査61項目余りを定めた。

旧建設部は管路網水の基準到達のための水質項目として、濁度、残存塩素、細菌総数、総大腸菌の4項目しか設けず、他方、ユーザーが最も敏感で、最も紛争にもなる臭い、色や、最も心配な酸素要求量を避けて通っていた。

『市町給水水質基準』は管路網水の基準到達のための水

質項目として7項目を定め、色、臭い、酸素要求量等をすべて組み入れ、飲用水の水質が要求に達しているかどうかをより完全かつ全般的に評価し、各給水単位に対しより厳格な要求を提示し、「人を根本とする」という原則をより具体的に体现した。

2001年の衛生部規範、2005年の建設部業界基準の公布は、中国の新しい生活飲用水水質国家基準の制定のための基礎を築いた。

中国の新しい『生活飲用水衛生基準』（GB5749-2006）がついに公布され、2007年7月より実施された。新しい強制的な国の『生活飲用水衛生基準』は、有機物、微生物、消毒等方面に対する要求を強化した。新基準の飲用水水質指標は旧基準の35項目から106項目に増え、71項目が追加された。内訳は、微生物指標が2項目から6項目に、消毒剤指標が1項目から4項目に増え、毒理学指標の中の無機化合物が10項目から21項目に、有機化合物が5項目から53項目に、感覚器官性状と一般的な理化学的指標が15項目から20項目に増え、放射能指標が従来通りの2項目となっている。新基準は市町と農村の飲用水衛生基準を統一するとともに、国際基準にも合わせている。

新基準は「水質監測」の中で、「都市集中式給水単位の水質検査のサンプリング点選定、検査項目及び頻度、合格率の計算はCJ/T206にしたがって執行する」と明確に定めている。これは建設部の都市給水水質基準が定めた管路網水についての7項目の検査を是認したものである。この中では、臭いと酸素要求量が比較的基準に到達しにくい。

水質項目の酸素要求量は、中国の原水の有機物汚染がかなり普遍的で深刻であるという現状に焦点を合わせて総量規制を行う上で、必須のものだが、それは数多い単一有機物を検出することは今なお難しいにもかかわらず、有機汚染物質は微量でも、健康に対する潜在的脅威となり、時間の推移とともに、人体中に一定程度蓄積すると、病気を引き起こす可能性があるからである。しかも人々には有機汚染物質の害について、まだまだ長く果てしない認識のプロセスが待っており、今後、有機汚染物質に関する水質項目はさらに増え、厳しくなる可能

性があり、したがって、少なく取り込むほうが、どう考えても、多く取り込むよりもいいからである。伝統的な地表水処理プロセスは有機汚染物質の除去に対して限界があり、飲用水の $\text{COD}_{\text{Mn}} < 3\text{mg/L}$ という要求を保証するためには、間違いなく徐々に高度処理を採用することになるだろう。

水質項目中の臭いは揮発性有機物質によってもたらされる。水体中の臭いを引き起こす物質は、自然界の中の浮遊生物、放線菌、藍藻の分泌物、それに工業废水や都市汚水の中に存在する人工的に合成された揮発しやすい有機物である。良い水は無味無臭でなければならない、水に臭いがあることを感じたとき、人は水がちゃんと浄化されていないと考える。日々の向上を追求する21世紀という「生活の質」重視の時代に、水に臭いのあることが受け入れられるはずはない。

2. 水質前処理

化学的酸化

水質前処理には塩素酸化がよく用いられ、有機汚染物質がまだ取り除かれていない場合には、かなり多くの有害な消毒副生成物を生じることになる。現在、 KMnO_4 とその複合剤（一種の専門商品）を採用した応用がしだいに広がり、有機物の酸化、凝固の改善に対して比較的高い効果を上げている。ただし、 MnO_2 の堆積が濾過池を詰まらせ、配水システムを詰まらせるのを防ぐ必要がある。現地の水質によって KMnO_4 の採用が有害酸化物を生み出さないか、Ames法による突然変異誘発活性は低減するかということについては、報告が極めて少ないため、的を絞った研究、テストを行うことが今なお必要である。

オゾン前酸化は有機物の生分解性を高めることができ、さらに臭いを取り除き、脱色し、鉄、マンガンを除去することができるが、往々にして後続のオゾン一活性炭による高度処理と結びつけてしか採用されない。

吸着剤粉末炭の添加

一般に衝撃的汚染を取り除く場合にのみ採用されるが、それは添加量が $10 \sim 20\text{mg/L}$ 必要で、費用がかなり高い（約 $0.05\text{元}/\text{m}^3$ ）ためである。

pH調節

酸とアルカリを添加するため、運用コストが増し、さらに原水中に無機イオンが増えるので、中国ではほとんど採用していない。

凝集剤の添加

凝集剤は少ない添加量（ 1mg/L 未満）でしばしば良い効果が得られるが、中国では依然として一種類の凝固剤だけを添加するのが習慣となっている。

生物的前処理

水中のアンモニア態窒素の除去にとっては生分解が最も有効で、同時にいくつかの有機物、鉄、マンガンも取り除くことができ、現在、上海及び浙江嘉興地区におい

てすでに応用されている。

2.1.1 生物接触酸化

一般的な状況下において、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ は80%前後取り除くことができ、 COD_{Mn} の除去は安定しておらず、溶解性 COD_{Mn} は約5~10%除去することができる。多くの場合、弾性材料を採用し、コンクリート骨組みを利用してくりつけるが、値段が安く、粵港公司の $400\text{m}^3/\text{d}$ 工事に使用され、上海と嘉興桐郷でも採用されている。弾性充填材の運用における主要な問題は、充填材の上に積もった泥が自然には脱落しないこと、充填材の上の生物膜が更新しにくいことである。

流動化充填材はプラスチック片から成るボールで、比重が $0.96 \sim 0.98$ に抑えられ、水中で浮遊転動する。多孔管を採用して曝気し、ボールの上下反転を流動化状態に置くと、ボール上の膜が蓄積せず、更新がしやすく、脱落した膜は水流とともに運び出されるので、管理が簡単である。嘉興地区の5つの市・県が採用し、すでに効果を上げている。当該充填材は充填槽の半分の容積しか必要とせず、充填材 1m^3 当たり1,000元である。

2.1.2 バイオセラミックス粒子濾過池

粒子充填材は粒径が小さく、比表面積が大きく、生物膜量が大きく、生物凝集・吸着・分解作用を有しているほか、濾過作用も具えており、そのためその他の充填材と比べてアンモニア態窒素の除去効率が高めである。有機物を生分解するほか、懸濁・コロイド状態の有機物を効果的に除去することかでき、逆洗するので、濾材の上の生物膜が更新しやすく、 COD_{Mn} を約10~20%除去する。

生物濾過池の問題は水頭損失があることで、定期的に（週1回前後）逆洗し、水を消費しなければならない。普通セラミックス粒子（粉末状）は約500元/トン、円形粒子は約800元/トンで、堆積容重は約0.8である。

2.1.3 栗石充填材

粒径 $20 \sim 40\text{mm}$ 、層厚 6m 、濾過速度 2.5m/h 、曝気量 2.5 ：1、上向流で、逆洗の必要がないが、栗石層上部の水頭を利用して泥を排出しなければならない。アメリカSeven Trent Servicesと中国市政工程西北設計院浙江分院は、嘉興乍浦浄水場と平湖古横橋浄水場において試験を行い、さらに乍浦浄水場で10か月間の運用を行った。その結果、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ を分解して 10mg/L から 0.5mg/L にまで減らし、除去率は95%に達し、冬季でも80%の効率を上げた。

この研究によって思考の道筋が開かれ、污水处理技術を給水の生物的前処理に導入する試みは一応の結果を収めた。

污水处理における曝気生物濾過池は水中の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ を $20 \sim 30\text{mg/L}$ から $<1\text{mg/L}$ に減らすことができるが、問題は給水処理が $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の除去のために、これほど大きな代価を支払わねばならないのか、ということにある。

本技術について給水処理の特徴と結びつけて長期間の試験を行い、コストパフォーマンスの観点からその応用

の可能性が論証できることを望んでいる。

3. 高度処理

高度処理技術がよく用いるのはオゾン-生物活性炭（O₃-BAC）である。現在、深圳、広州、杭州、嘉興地区ですでに実施されている。その発展の趨勢から見ると、今後は水源水質がⅡ類を超えている場合、必ずこれを採用しなければ、水質基準のCOD_{Mn}の要求を満たすことができないだろう。

3.1 オゾン酸化とオゾン発生器

オゾンは強酸化剤であり、臭いを取り除き、脱色し、有機物を除去し、有機汚染物質の生分解性を高めることができ、給水処理に広く応用されている。だが、オゾン発生装置は中国ではまだ発展段階にあり、大型オゾン発生器はほとんど外国の企業（アメリカOZONIA、ITT、日本三菱、富士等）によって独占されている。この2年間、オゾン設備と酸素製造装置の製造において、中国企業は突破口を開いてトップレベルに追いつこうと努力し、青島国林会社がすでに6kg、10kg、さらには20kgO₃/hの管式（エナメル管）オゾン発生器を生産した。同方股份有限公司は1kgO₃/hを単位として組み合わせの可能なパネル式オゾン発生器を開発、生産しているところである。品質面ではまだ世界と隔たりがあるとはいえ、肝心なことは中国が自力で製造した発生器がすでに10kgO₃/hの壁を突破し、基本的に給水事業発展の需要を満たすことができるということである。価格面で優位を占め（外国製は1kgO₃/hで20～30万元かかるが、中国は<20万元）、アフターサービスの面でも外国の会社に比べてメリットがあり、生産・使用の中で絶えず品質を向上させ、中国でのニーズを満たしていくことが期待できる。

酸素製造装置は多数生産されており、原理はみな同じである。設備、部品・組立部品の供給が外国にかなわなくとも、必要な空気弁、分子篩等を外国から導入して品質を高めれば、オゾン生産の需要に応えることが可能である。

3.2 活性炭と生物活性炭

活性炭市場には粉碎炭、柱状炭、塊成した粉碎炭があるが、価格はまちまちで、粉碎炭は多くが4,500元～5,000元/トン、柱状炭は約5,500元/トン、塊成炭は6,500元/トン前後である。

粉碎炭は石炭を直接粉碎し、篩い分けし、焼成溶解し、活性化させたものである。塊成炭は石炭を挽いて粉（50 μm）にし、石油系粘着剤を加え、圧縮して塊にし、再び粉碎した後、必要に応じ425℃で有機物を取り除き、厳格に1,000℃近くにコントロールして活性化させたものである。塊成炭は吸着性能が大きく向上し、密度が高く、磨耗に耐え、5～6回再生させることができる。

3.2.1 活性炭の選択とO₃-BAC

塊成炭（泰興）と柱状炭（ZJ-15）の原水のCOD_{Mn}に対

する塊成炭（泰興）と柱状炭（ZJ-15）の吸着性能について吸着等温線試験を行ったところ、結果は表1の通りだった。

活性炭重量 (M, g)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
平衡濃度 (C _e , mg/L)	塊成炭	3.24	2.64	1.62	1.02	0.72
	ZJ-15		4.33	3.68	3.07	2.45

注：塊成炭試験の原水のCOD_{Mn} 5.52mg/L

◎表1 活性炭の吸着等温線試験結果

注：塊成炭試験の原水のCOD_{Mn} 5.52mg/L

ZJ-15炭試験の原水のCOD_{Mn} 5.66mg/L

吸着等温線試験結果の分析処理後、Freundlichの公式に代入すると

塊成炭：

$$(1) \quad q=14.7C_e^{0.82}$$

ZJ-15炭

$$(2) \quad q=4.0C_e^{0.76}$$

式中：q—吸着容量、mg/g

C_e—平衡濃度、COD_{Mn}、mg/L

表1の公式（1）、（2）から、塊成炭は吸着性能の優位性を具えていることがわかる。

塊成炭を用いてO₃-BAC試験を行うと、この時、活性炭は生物活性炭となり、取水の平均COD_{Mn} 1.34mg/Lは、O₃酸化により1.14mg/Lに、活性炭添加後は0.51mg/Lになり、8か月間にわたる試験の平均除去率は62.2%、運用初期の活性炭の吸着率の高い分を入れなければ、平均除去率は約55%となる。当該試験の取水水質は比較的良好で、オゾン投入量は3～4mg/Lとやや高いが、全体的な吸着効果は、その他の試験ポイントのO₃-BAC（柱状炭使用）を長期間運用した時の平均除去率30～40%に比べると高い。

通常処理がCOD_{Mn}を35%除去するものとして計算し、さらに高度処理のO₃-BAC（粉碎炭）がCOD_{Mn}を40%除去し、O₃-BAC（塊成炭）が50%除去すると、原水のCOD_{Mn}が6、7、8、9mg/Lの時の総合プロセス出水の推算されるCOD値は、表2の通りとなる。

原水	通常処理出水	O ₃ -BAC（粉碎炭）	O ₃ -BAC（塊成炭）
6	3.90	2.34	1.95
7	4.55	2.73	2.28
8	5.20	3.12	2.60
9	5.85	3.51	2.93

◎表2 総合プロセス出水のCOD値（mg/L）

表2からわかるように、粉碎炭採用時の原水のCOD_{Mn}が8mg/Lの時の総合プロセス出水のCOD_{Mn}は3.12mg/Lで、水質基準の3mg/Lを超えてしまっているが、一方、塊成炭を採用し、原水のCOD_{Mn}が9mg/Lである時、総合プロセス出水のCOD_{Mn}は2.93mg/Lで、依然として<3mg/Lである。

以上は推算結果なので、さらに粉碎炭、塊成炭、柱状炭について同一の原水を用いて長期間の比較試験を行い、マクロ指標からCOD_{Mn}を比較して、処理効果を確定し、それにより、O₃-BACプロセスにおいては廉価な粉碎炭（現在、大多数の浄水場で採用）を採用するのか、それとも価格が高めの塊成炭（外国の浄水場で採用）を採用するのかという問題を解決しなければならない。同時に、単一の微量有機物の添加回収試験を行い、それぞれの活性炭の除去効果を比較していく。塊成炭のCOD_{Mn}除去値が高く、微量有機物を取り除く効果が優れている場合は、性能・価格面から全般的に比較することにより、塊成炭の採用可能性を証明する。

嘉興地区の運用経験によれば、O₃-BAC高度処理技術の採用により、プロセス全体のCOD_{Mn}除去率を50～60%に維持することができる（長期間運用の場合）。

3.2.2 二段階のO₃-BAC

寧波水道会社はかつて二段階のO₃-BACプロセス試験を行った。取水のCOD_{Mn}が5.6mg/Lの時、第一段のO₃-BAC（O₃投入量3.0mg/L）により43%が除去され、出水のCOD_{Mn}は32mg/Lとなり、第二段のO₃投入量は1.5mg/Lで、取水のCOD_{Mn}が3.2mg/Lの時のO₃-BACによる除去率は47%に達し、出水のCOD_{Mn}は1.7mg/Lとなった。二段階のO₃-BACにより合わせて約70%のCOD_{Mn}が除去され、第一段のO₃-BACだけを行った場合よりも大きく向上した。通常処理で35%のCOD_{Mn}が除去されるものとして計算すると、二段階のO₃-BACがさらに70%を除去するので、総合プロセスの総除去率は約80%となり、原水のCOD_{Mn}が15mg/Lに達していても、出水は依然として基準に達するものと推算できる。確認する価値があるのは、第二段のO₃-BACは有効な除去率を長期間維持できるのか、試験が採用した活性炭は新しいものか古いものか、試験はどのくらい続けたのかということであり、本当に二段階のO₃-BACを採用することで70%前後の効果が得られたのだとすれば、O₃-BACの突破口を開いたものと言うことができる。

平湖河浄水場はすでに二段階のO₃-BACを採用し、実際の運用におけるプロセス全体のCOD_{Mn}除去率は70%前後となっている。

3.3 活性炭の再生

活性炭は吸着飽和後、再生処理すべきであり、捨てるべきではない。再生後、吸着能力は低下しないだけでなく、やや増すことができる。再生時の損失（輸送過程のロスと昇温ロスを含む）は約10%で、再生1トン当たり約2,000元、新炭補充500元の計2,500元がかかる。

嘉興地区の統計によれば、活性炭は1年間使用した場合、交換に水1m³当たり0.09元かかるが、2年間だと0.06元、3年間では0.03元しかかからないので、使用後に再生すれば、運用費はさらに得になる。

広州、浙江、杭州、嘉興地区は、O₃-BACプロセスを大

規模に採用するようになるまでは、現地での再生補充のため、各地区に活性炭再生工場を設置し、住民の生活飲用水の水質向上のために勤めるべきである。

O₃-BACプロセスは今後広く応用されるであろう。工事投資は約250元/m³/d、運用費は0.2元～0.3元/m³だが、水1m³当たりの価格水準が1元～2元である現在、0.2元～0.3元の増加は受け入れられるはずである。

3.4 膜技術の応用

各種膜技術…マイクロ濾過、限外濾過、ナノ濾過、逆浸透は、水質別給水システムの純浄水及び飲用浄水製造においてすでに効果的に応用されている。汚水再利用、工業給水にも応用の実例があるが、市政給水にはまだ報告は見られない。広東東莞虎門は10,000m³/dのマイクロ濾過工事を完成させ、汚染された東江の水を浄化しているが、溶解性有機物の除去が思うようにいかず、まだ成功していない。

3.4.1 マイクロ濾過、限外濾過

原水水質が良好で、かつ濁りがあり、細菌除去の必要がある場合、清潔なダム水、泉水ならば、その時はマイクロ濾過、限外濾過がともに高い浄化効果を上げるだろう。

地下水中の硬度、硝酸塩が基準を超えている時は、ナノ濾過膜を採用して無機塩及び有機汚染物質をうまく除去することができる。これについては北京の水源第三浄水場がかつて有効な試験を行った。天津近郊地区はナノ濾過を利用して地下水中のフッ素を除去し、大きな成果を上げている。

付近に他の水源がなく、長距離引水はコストが高すぎ、取水水源もかなり深刻な汚染を受けていて、O₃-BACプロセスを追加しても基準に達することができないという場合は、ナノ濾過技術の応用が不可避となる。

マイクロ濾過、限外濾過を利用した地表水の直接浄化と、凝固—マイクロ濾過、凝固—濾過—マイクロ濾過（または限外濾過）に関してはすでに試験結果がある。微汚染水源に対する凝固—沈殿—粉末炭添加—マイクロ濾過の採用についても、すでに試験が行われている。

清華大学、上海荏原環保公司、嘉源給水排水公司是、共同で嘉興南門浄水場においてかなり長期間にわたる試験を行った。当初、膜生物反応器を利用し、粉末炭を入れてCOD_{Mn}を効果的に除去しようとしたが、試験結果はあまり思わしくなかった。膜反応器に入れた粉末炭は吸着効果しかなく、生物炭の役割を果たせないため、先に粒子活性炭濾過池に進んでからマイクロ濾過に進んだほうがよい。粉末炭と膜技術の組み合わせの応用についてはさらに引き続き研究が必要である。

3.4.2 ナノ濾過

ナノ濾過技術は濾過池を経て一般にCOD_{Mn}を60～70%除去でき、さらに前処理による除去35%を加えると、総除去率は75～80%にも達し、通常処理にO₃-BACを加え

たCOD_{Mn}の総除去率55～65%よりも高い。したがって、O₃-BACプロセスでもなお要求に達することができない場合、COD_{Mn}を効率よく除去する技術はナノ濾過だということになる。無機イオン濃度が高くなく、主に有機物を除去する場合は、それに適したナノ濾過膜を採用すればよい。

ナノ濾過膜は中国ではまだ生産できないが、国際的に膜の価格はすでに徐々に下がっている。現在、ナノ濾過装置（逆浸透とほぼ同じ）の投資額は約600元/m³/dである。限外濾過膜は中国で生産でき、品質も劣らない。限外濾過装置の投資額は約300元/m³/dだが、外国の限外濾過装置だとやはり600元/m³/dかかる。

ナノ濾過技術の水1m³当たりの運用費は、原水水質、膜洗浄の薬品代、水道代、0.8～1.0MPaの昇圧に要する電気代、主な割合を占める膜価格、それに使用寿命によって決まる。普通の正常な状況下で、ナノ濾過膜は2～3年間、限外濾過膜は約3～5年間使用できる。

ナノ濾過膜技術の問題点は、膜の価格が高い、電力消費が大きい、水生産率が低い、濃縮水には処置が必要だということである。

3.5 浄化プロセスにおけるアンモニア態窒素の除去について

前処理、通常処理、高度処理（O₃-BAC）を具えた総合プロセスの中で、水中のNH₄⁺-Nは以下の段階において除去される可能性がある。

- (1) 事前の塩素添加過程での塩素とアンモニアの化合、または生物的前処理の中で除去される。
- (2) 凝固沈殿の過程で、懸濁粒子・コロイドの状態で存在する有機態窒素及びアンモニア態窒素が除去される。
- (3) 濾過池濾過層の中で生物膜が成長付着した砂粒層の生分解作用
- (4) O₃酸化により酸素の飽和した水が再び生物炭層を通過し、生分解される。
- (5) 最後の塩素添加消毒の際にアンモニアの一部が化合される。

原水中のアンモニア態窒素は上記の多段階の障壁によって除去され、そこにはNO₂⁻-Nが生物によって酸化されNO₃⁻-Nになる作用が伴っている。したがって、生物的前処理のアンモニア態窒素除去率を過大に強調し、濾過速度の低下、接触時間の増加、気水比の増大等といった無駄の多すぎる代価を支払ってまで、高いアンモニア態窒素除去率を得る必要はない。各技術段階の生物的作用（例えば傾斜板上の生物膜等）を十分に発揮させさえすれば、かなりしっかりと、全面的に除去することができる。

生物的前処理はアンモニア態窒素を効果的に減らし（70%～90%）、COD_{Mn}の一部を除去する（充填材の違いにより5%～10%）ことができ、生物凝集を生じて凝固材を減らす（約1/3）ことができる。ただし、停留時間が1～1.5h

あり、構築物の体積が大きく、占有面積が大きく、適当な資金（100～120元/m³/d）の投入が必要とされる。したがって、生物的前処理は、通常処理プロセスしか持たず、原水のアンモニア態窒素がかなり高く、COD_{Mn}がかなり高く、生物的前処理を採用するとプロセス全体がアンモニア態窒素とCOD_{Mn}をかなりよく除去でき、出水を基準に到達させることができるという場合に使用するのに適している。

高度処理のO₃-BACを有している場合、アンモニア態窒素がそれほど高くなければ（3mg/L未満）、生物的前処理を設けなくとも、事前のO₃酸化を採用し（例えば上海周家渡浄水場）、後続の凝固沈殿過程、濾過濾材層、BACに生分解作用を発揮させて、効果的にアンモニア態窒素を除去することができる。

4. 消毒

消毒は給水処理プロセスの重要な構成部分である。塩素消毒は国内外の最も主要な消毒技術で、アメリカの浄水場の約94.5%が塩素消毒を採用しており、中国では推計によると、99.5%以上の浄水場が塩素消毒を採用している。だが、塩素消毒にはこの20年間、大きな疑念が投げかけられており、その主な理由は次の三点にある。1) 消毒副生成物の問題。トリハロメタン、ハロ酢酸、ハロニトリル、ハロアルデヒド等といった、ますます多くの消毒副生成物が飲用水中に発見されている。トリハロメタンとハロ酢酸はその強い発がん性から、すでに規制の主な対象となっており、またそれぞれ揮発性と非揮発性の二種類の消毒副生成物を代表するものである。アメリカは特に消毒剤及び消毒副生成物規則（D/DBPs RULE）を設け、塩素消毒剤と消毒副生成物について規定を行っており、中国の『生活飲用水衛生基準』（GB5749-2006）と建設部の業界基準『都市給水水質基準』もともに消毒副生成物を水質基準に追加している。したがって塩素消毒副生成物の規制は非常に重要である。2) ジアルジアとクリプトスポリジウムの問題。この二つの原虫には耐塩素性があり、特にクリプトスポリジウムは塩素消毒がほとんど役に立たないため、新しい有効な消毒方法を採用して飲用水の安全性を保証することが極めて必要である。3) 飲用水の生物学的安定性の問題。飲用水中の生物同化可能有機炭素の存在により、細菌は管路網内で成長して生物膜を形成することができ、管路網内の残存塩素量が高くても、細菌の再成長を完全に抑えることは非常に難しく、また水質と送水管に対しても不利な影響を及ぼす。

飲用水の安全性を保証するために、微生物及び消毒副生成物を含めた指標はますます厳しくなると見られるため、消毒技術の改善を行うことが必要である。

4.1 塩素消毒の最適化

塩素消毒は現段階での中心的消毒技術であり、しかも近い将来に根本的な変化が起こることはないと思われ

るため、塩素消毒の技術的最適化を行うことは極めて必要である。その手段には次のものがある。①清水池の設計を改善し、 C_{10} を設計と運用の拠り所とする。②塩素とクロラミン消毒を有機的に組み合わせる方法。③多ポイントでの塩素添加。④統合型IDDFモデルを採用して塩素消毒の設計枠組み（Integrated Disinfection Design Frameworks）とする。

4.2 紫外線消毒の採用

紫外線とは電磁波の波長が200～380nmの光波を指し、一般に、UVA（315～380nm）、UVB（315～280nm）、UVC（200～280nm）の三つの領域に分けられる。200nmより短い遠紫外線領域は真空紫外線といい、極めて水に吸収されやすく、そのため消毒に用いることができない。消毒に用いる紫外線はUVC領域、すなわち波長が200～280nmの領域、特に254nm付近のものである。紫外線消毒のメカニズムは前記の酸化剤とは異なり、波長254nmとその付近の波長領域の微生物DNAに対する破壊力を利用し、たんぱく質の合成を阻止して、細菌を繁殖できなくさせるというものである。紫外線はクリプトスポリジウムに対して高い殺滅作用を有し、副生成物を生じないため、紫外線消毒は給水処理において大きな市場潜在力を示している。

紫外線の滅菌作用は最も早くは20世紀初頭、イギリスの学者バーナードとモカによって報告されたが、本当の意味で応用が始まったのは20世紀60年代であった。初期は主に低圧水銀ランプ（LP）だったが、90年代には中圧水銀ランプ（MP）とパルス紫外線水銀ランプ（P-UV）の研究、応用が行われた。

紫外線消毒技術の飲用水処理における応用は、1993年のアメリカ ミルウォーキー市でのクリプトスポリジウム症の爆発的流行以後、注目を浴びるようになったが、それは塩素消毒がクリプトスポリジウムのオーシストを殺すことができないのに対し、研究の結果、紫外線はクリプトスポリジウムのオーシストに対してすぐれた殺滅効果を持っていることがわかったからである。しかも、通常消毒剤量の範囲内（40mJ/cm²）では紫外線消毒は有害副生成物を生じないため、西側先進諸国では応用の実例がここ数年、特に小型浄水場において急速に増加している。そのため、国際紫外線協会（IUVA）が1999年に設立された。

アメリカは新技術の飲用水処理への応用については一貫してかなり腰が重く、保守的だったが、紫外線技術の応用に関しては予想外にすばやい行動をとった。アメリカ環境保護局は、紫外線消毒がクリプトスポリジウムの不活性化に対して有効であることを実験室で実証した後、わずか5年で紫外線消毒の飲用水への応用を認可した。大型浄水場、たとえばシアトルの浄水場は今年、紫外線消毒システムを完成させようとしており、ニューヨークの浄水場は2006年に紫外線消毒システムを完成させる

予定である（Water21、2004年第8号19～20ページ参照）。

紫外線消毒のメリットは次の通りである。①病原性微生物に対して広スペクトルの消毒効果を有し、消毒効果が高い。②クリプトスポリジウムのオーシストに対して特効的消毒作用がある。③有毒・有害副生成物を生じない。④AOC、BDOC等、管路網水質の生物学的安定性を損なう副生成物を増やさない。⑤臭い、味を低減し、微量有機汚染物質を分解することができる。⑥占有面積が小さく、消毒効果が水温、pHの影響をほとんど受けない。

紫外線消毒の主なデメリットは次の通りである。①持続的消毒効果がなく、塩素と組み合わせて使用することが必要。②石英管壁に結垢しやすく、消毒効果が低減する。③消毒効果が水中のSSと濁度の影響をかなり大きく受ける。④殺された細菌が復活する可能性がある。⑤国内での使用経験が比較的少ない。

4.3 二酸化塩素及びオゾン消毒の採用

二つの原虫を不活性化し、塩素化消毒副生成物を減らすために、二酸化塩素及びオゾン消毒を採用することは、新しい選択の一つとなっている。二酸化塩素には以下のいくつかのメリットがある。①殺菌効果が優れ、用量が少なく、作用が速く、消毒作用の持続時間が長く、剰余消毒剤量が維持できる。②酸化性が強く、細胞構造を分解し、さらに胞子を殺すことができる。③水中の鉄、マンガン、色、味、臭いを同時に抑制できる。④温度とpHの影響をほとんど受けない。⑤トリハロメタンやハロ酢酸等の副生成物を生じない。

オゾン消毒には以下のメリットがある。①殺菌効果が優れ、用量が少なく、作用が速い。②水中の鉄、マンガン、色、味、臭いを同時に抑制できる。③ハロゲン化消毒副生成物を生じない。したがって、二酸化塩素消毒は中国の一部の浄水場ですでに応用され始めており、オゾン消毒も中水の再利用に應用されている。

しかしながら、二酸化塩素及びオゾン消毒にはそれぞれのデメリットがある。二酸化塩素消毒のデメリットは、次の通りである。①二酸化塩素消毒は無機消毒副生成物である亜塩素酸イオン（ ClO_2^- ）と塩素酸イオン（ ClO_3^- ）を生成し、二酸化塩素自身も、特に高濃度の場合には有害であり、そのためアメリカEPAの消毒剤及び消毒副生成物規則と中国の新しい『生活飲用水衛生基準』はいずれもこれについて規定を行っている。②このほか、二酸化塩素の調合、使用にもいくつかの技術的問題が存在し、二酸化塩素は発生過程の操作が複雑で、試薬の価格が高く、あるいは純度が低く、輸送、貯蔵の安全性がかなり劣っている。そのため国内では現在小規模な給水場で應用されているが、大型浄水場についてはまだ使用の報告がない。

オゾン消毒のデメリットは、オゾンが不安定な分子で、自ら分解しやすく、水中に留まっている時間が短く、30分に満たないため、管路網の持続的な消毒効率が維持で

きないということである。さらに、オゾン消毒は臭素酸塩、アルデヒド、ケトン、カルボン酸類副生成物を生じ、うち臭素酸塩については水質基準に規定があり、アルデヒド、ケトン、カルボン酸類副生成物の一部は健康に有害な化合物で、管路網水の生物学的安定性を部分的に低下させるため、オゾン消毒は使用において一定の制限を受けている。大・中型管路網システムにオゾン消毒を採用する場合は、必ず塩素によって管路網内の持続的消毒効果を維持しなければならない。

したがって、発展という観点から見ると、塩素、紫外線、二酸化塩素、オゾン等の主要な消毒技術の中では、紫外線及びそれを組み合わせた消毒技術が、消毒効率が高い、消毒副生成物を生じない、または生じる消毒副生成物が少ない等のメリットゆえに、給水処理において非常に大きな将来性を有している。

5. 結語

中国では現在、工業廃水と都市汚水の処理がまだ思うように行われず、水源水質が様々な汚染を受け、また一方では、飲用水水質に対する水質基準の要求がますます高くなっている。この両者の間の矛盾はぜひとも浄化技術の向上によって解決すべきであり、給水の高度処理プロセスにすでにその萌芽が現れている。それは試験・研究の進展、既存の工事についての真摯な総括、さらには外国の技術の導入に伴い、今後5年間で大きな発展を遂げるに違いない。様々な困難は浄水従事者にプレッシャーをもたらしているが、プレッシャーはまた原動力でもあり、それは広範な給水従事者を激励して安全な飲用水の提供のために奮闘させ、給水事業の絶え間ない進歩を促すであろう。

中国の流域汚染と水体浄化

•Profile•



付 徳剛 Fu Degang ●東南大学生物科学医学工学部 生物電子学国家重点実験室 教授

1967年生。東南大学生物科学医学工学部博士課程教授。東南大学蘇州研究院蘇州市環境生物安全重点実験室副主任。1994年南京大学配位化学国家重点実験室にて博士の学位を取得。主な研究のひとつとして、環境汚染物の処理におけるナノ材料と光触媒技術の応用研究。責任者であるとともに主要構成員として、“973”と“863”を含む10以上の国家レベルの科学研究プロジェクトに参加し、これを完成。

1. 現状

中国環境監視総ステーションは2009年1月に、七大水系（珠江・長江・淮河・黄河・海河・遼河・松花江）の183本の河川の376の断面と太湖・滇池・巢湖を含む28の重点湖とダムの水質調査を行った。河川の調査項目は水温・pH値・電導率・溶解酸素・過マンガン酸塩指数・BOD5・アンモニア窒素・水銀・鉛・揮発フェノール・石油類・流量である。湖とダムの調査項目は水温・pH値・電導率・溶解酸素・過マンガン酸塩指数・BOD5・アンモニア窒素・水銀・鉛・揮発フェノール・石油類・全りん・全窒素・透明度・葉緑素a・水位である。

検査結果から、Ⅰ～Ⅲ類の水面断面は全体の54%、Ⅳ類とⅤ類は全体の25%、劣Ⅴ類は全体の21%を占めることがわかった。全体的には中程度の汚染であるが、主に、アンモニア窒素・過マンガン酸塩指数・BOD5の汚染指数が高い。その中では、長江本流の水質が最もよく、支流も良好であり、三峡ダムの水質はよかった。黄河本流は軽度の汚染、支流は汚染が重度であった。珠江は本流、支流とも水質は良好。松花江は本流が軽度、支流は中度の汚染。淮河は本流は良好、支流は中度の汚染だが、山東省の境界内にある支流は軽度の汚染であった。海河の本流は重度の汚染。遼河本流の中遼河は重度の汚染、支流の中条子河と招蘇台河も重度の汚染であった。

重点湖とダムのうち、白洋淀・達賚湖・大明湖・滇池・東湖・洪澤湖・滌山ダム・門樓ダム・西湖は劣Ⅴ類の水質であった。巢湖・南四湖・太湖・玄武湖はⅤ類。博斯騰湖・大伙房ダム・丹江口ダム・洞庭湖・昆明湖・鄱陽湖・千島湖はⅣ類。その他はⅢ類の水質要求を満たしていた。すべてのデータがそろった21の湖とダムの中で、最も富栄養化が進んでいるのは滇池であり、巢湖・大明湖・東湖・南四湖・洪澤湖・太湖・玄武湖は軽度の富栄養化、その他はみな中程度であった。

中国の水汚染の主な原因は以下のとおりである。

1. 経済の成長モデルが大ざっぱで、いまだ根本的な変革がなされていない。たとえば、淮河流域の製紙業や加工業は、汚染排出効果が明らかに改善されたとはいえ、その産業構造はなんら変わっておらず、汚

染排出総量は依然として高いままである。黄河上流域と中流域では重化学工業を主とした工業構造が長期にわたって形成され、石炭や石油などの資源を大量に開発し、利用効率は低く汚染排出を高めたのである。

2. 都市部に人口が集中するにつれて、生活污水の排出量は増大したが、都市と町のインフラは社会経済の発展より遅れている。たとえば、黄河全流域の污水处理率は30%に及ばず、全国の平均レベルをはるかに下回る。
3. 農業面での汚染源の影響が大きい。たとえば、黄河全流域では1.97億ムー（1ムーは1/15ha）の耕地があり、一人当たりの耕地面積は全国平均の1.5倍である。農薬や化学肥料の使用量が多いため土壌はゆるく、水や土の流失量も大きい。窒素とりんなどの有機物が大量に河川に流入し、そのため流域の水汚染はいつそう激しくなる。
4. 環境管理能力が不足している。たとえば、淮河流域の重点工業企業は基本的に汚染管理能力を備えているが、汚染監視はほとんどなされず、こっそり排出するか、基準値や規制量以上に排出しても、効果的な規制方法がない状態である。

2. 管理と計画

わが国の経済社会の発展過程において、水汚染問題は国家と地方政府が非常に重要視している最重要課題のひとつである。2008年2月28日、第10回全国人民代表大会常務委員会第32次会议において、『中華人民共和国水污染防治法』の改正案が可決され、中華人民共和国第87号主席令として公布され、2008年6月1日より施行されることとなった。現在、わが国の流域管理に関する法律と法規には、そのほかに『環境保護法』・『水法』・『水土保持法』・『洪水防止法』・『漁業法』・『河道管理条例』・『自然保護区管理条例』・『取水許可証制度実施方法』などがある。水法では、“国务院水行政主管部门が、国家が規定した重要河川と湖に流域管理機構を設立し、これらの流域管理機構が管轄範囲内で法律と行政法規を行使し、国务院水行政

主管部門から与えられた水資源管理と監督の職責を果たす”と規定している。これらの法律と法規は、水行政主管部門と流域管理機構、および水政監督検査員の法律執行の権利と義務を明らかにするとともに、責任を強化し、違法行為に対しての責任と行政処罰の程度を明確にした。

国家国民経済と社会発展計画もまた水環境管理に対し明確に要求した。第十一次5カ年計画の綱要6では、資源節約型、環境保全型社会の建設に重きをおき、“三河三湖”などの重点流域/区域の水汚染防止をとくに指示した。飲用水源保護区を科学的に規定し、主要河川と湖の汚染水排出の規制を強化する。飲用水源地の汚染水排出口の取り締まりを強化し、河川や湖への基準値を超えた汚染水排出を厳禁する。都市の污水处理施設の建設を強化し、污水处理費を徴収することにより、2010年までに都市の污水处理率を70%以上にまで高める。また、水資源の統一管理を強化し、生活・生産・生態用水をうまく計画使用し、河川の上流域と下流域、地表水と地下水などをコントロールして、地下水の採掘を抑えることを提案した。取水許可制度と水資源有償使用制度を完備し、基準量管理により総使用量を抑える制度を施行し、流域管理と区域管理を総合的に考慮した健全な水資源管理システムによって、国家初の水権分配制度と水権譲渡制度を確立することも提案した。

2008年、環境保護部は『淮河・海河・遼河・巢湖・滇池・黄河中上流の重点流域の水汚染防止計画(2006-2010年)』を発令し、2010年までに、淮河・海河・遼河・巢湖・滇池・黄河中上流などの6つの重点流域で集中式飲用水の水源地の整備と保護を行ない、省の境界にある水環境を改善することを発表した。これにより、重点工業企業は排出量を基準値以下に安定して抑えることができ、都市と町の污水处理レベルは明らかに向上する。また、汚染水の排出量を効果的に抑えることで、流域の水環境の管理と汚染の警報、応急処置能力は明らかに高まる。

国家中長期科学技術発展計画綱要(2006-2020年)は環境を重点領域としている。わが国の深刻な環境汚染、生態系の激しい退化、汚染物の無害化処理能力が低いこと、などを焦点に、環境技術に対し以下のような構想を提案した。(1) 循環経済発展を促し、これを支える。汚染排出企業の清浄生産技術の開発に力を入れ、廃棄物の減量化と資源化利用、安全処理を強化し、循環経済の共通技術研究を高める。(2) 区域の環境を総合的に管理する。流域の水環境と区域の大気汚染を総合的に管理するとともに、典型的な生態機能退化区域を総合的に整備する技術を集め、モデルを示すことにより、飲用水の安全保障技術と生態環境の監督技術、警報技術を開発し、環境保全を科学技術面から支える能力を大きく高める。(3) 環境保護産業の発展を促す。わが国の国情に合った重大環境保護設備と計器設備を研究し、環境保護製品市場における国産品の占有率を高め、環境保護設備の技術レベル

を向上させる。(4) 国際的な環境協力を積極的に参加する。地球環境の条約履行対策と気候変化の科学的な不確実さ、およびその影響の研究を強化し、地球環境の変化の監視と温室ガス削減技術を開発し、環境変化への対応力と契約履行能力を高める。

3. 水体汚染の制御と管理

中長期科学技術発展計画綱要は、重点領域の中で優先テーマを定め、重要点をとくに明らかにし、いくつかの重要な戦略製品や重要な技術、あるいは重要な工事を優先事項として選んだ。水系汚染の制御と管理は16の重要プロジェクトの一つの水プロジェクトとされた。水プロジェクトは建国以来、最大投資になる水汚染管理の科学技術プロジェクトであり、総経費は概算で三百億元以上になる。水プロジェクトは、わが国の社会経済成長を制約する重大な水汚染の科学技術上のネックを解決することを目標とし、工業汚染源の制御と管理、農業面での汚染源の制御と管理、都市の污水处理と資源化、水系の水質浄化と生態の修復、飲用水の安全保障、水環境の監督と警鐘発信および管理などの水汚染制御と管理などでの重要な技術を開発し、このネックを解消することを目指す。水プロジェクトの実施では研究目標を3段階に分け、第1段階での主要目標を水系の“汚染源を管理し、排出を減じる”技術の修得とした。第2段階では、主な目標を負担の少ない汚染回復”技術の修得とし、第3段階の主な目標は流域の水環境を“統合制御”する一連の重要な技術の修得とした。水プロジェクトでは6つの大きなテーマを以下のとおり設定した。湖の富栄養化の制御と管理技術の総合モデル、河川の水汚染制御の総合整備技術モデル、都市の水汚染制御と水環境の総合整備技術モデル、飲用水の保全技術の総合モデル、流域の水環境の監督と警鐘発信技術と総合管理モデル、水環境管理と政策研究およびモデル。“三河(淮河・海河・遼河)、三湖(太湖・巢湖・滇池)、一江(松花江)、一ダム(三峡ダム)”での水環境保全上の重要なことがらを明らかにし、典型的な流域と湖・河川・都市など異なる汚染類型の水系と重点地区を選び、飲用水の保全技術を集大成し、総合モデルを示すとともに、太湖流域を流域の総合モデル試験地域とした。

水プロジェクト計画の実施を早めるためには、事前の準備作業を十分に行わなければならない。2008年1月25日、国家水プロジェクト事務室は北京市・天津市・遼寧省・江蘇省など18の水プロジェクトモデル省/市の水プロジェクト事務室から40名以上の代表者を組織し、準備作業実施会議を招集した。2008年5月、国家水プロジェクト管理事務室が正式に発足した。管理事務室は環境保護部・住宅都市農村建設部・科学技術部・発展改革委員会・財政部・水利部・農業部・教育部・中国科学院・工程院の10部からなる。2008年には32事業の225のテーマが国家水プロジェクトによって検討された。

2008年、国家環境保護部は太湖流域の応急監視の法規を制定した。太湖流域の汚染防止に対し、省エネ排出削減に関した要求と太湖流域の産業構造と汚染の特徴を総合的に考慮し、国家環境保護部は、パルプや製紙、製菓、羽毛、製糖、電気めっき、合成皮革業など13の業界が特別排出制限値を率先して守ることを公布し、2008年9月1日から執行した。特別排出制限値は、特に全窒素と全りん、化学的酸素要求量などの汚染物の制御要求に重きを置いており、最も厳しい制限値は現行基準値の10分の1以下になる。太湖流域で特別排出制限値が執行される行政範囲は江蘇省・浙江省・上海市である。

2008年、環境保護部は当年度の『国家先進汚染防止モデル技術リスト』と『国家環境保護進展奨励技術リスト』を発表した。排出削減重点技術を70以上選び出し、30の国家生態工業パークを建設することに合意した。

2009年は“第十一次5カ年計画”の環境保護目標を実現する重要な一年であり、2009年2月には“水プロジェクト”の実施が正式に発表された。現在は、汚染排出の削減目標の達成が厳しい状況にあるが、汚染源の抑制、総量の削減、基準値を守った排出、生態環境の改善などの技術開発を進め、わが国は2009年からかなり完備した汚染排出削減環境保護科学技術システム—特に窒素酸化物の排出基準の削減と汚染防止技術政策—を一步一步確立している。環境基準面では、環境保護部が現行の水質基準システムを整え、環境基準の研究を強化している。鉄鋼・非鉄金属・製紙・電力などの重点業界に対しては、現行の国家汚染物排出基準を改訂し、排出抑制技術のレベルを高め、重点業種の新たな汚染物排出基準を定めている。環境基準の実施と汚染物排出基準の必要性を核として、汚染物の分析方法の基準を改定し、汚染排出削減に緊急に必要な汚染源と排出監視技術規範、情報の伝達、モニター計器設備などの基準の制定などの作業を重点的に進めている。環境技術システムの確立に関しては、環境保護部は『国家先進汚染防止モデル技術リスト』と『国家環境保護進展奨励技術リスト』を継続して発表した。これによれば今後、汚染防止技術レベルの調査と技術評価を実施し、系統的な科学技術評価システムを確立する。また、若干の重大な省エネ排出削減技術を定め、関係企業に使用を勧め、汚染排出削減を効果的に行うための技

術的支持を提供する。消費の持続と環境に配慮した政府の購入事業措置を研究し、環境保護製品の購入を拡大し、購入リストを更新する。各種の工業パークと工業集中地区、生態モデル地区を建設する。

4. 終わりに

“第十次5カ年計画”と“第十一次5カ年計画”の期間、国家と地方は政策・法規・工程・科学技術・教育などの方面で一連の措置をとり、水環境の悪化を抑えるため重要な役割を果たしてきた。今後は、以下の方面での作業を継続して強化し、完備していく。

1. 廃水管理を強化し、汚染水排出基準を高め、総排出量を効果的に削減する。
2. 都市と町、農村地区の環境インフラを整備し、村と町の生活汚染を管理するために、生活ごみ収集処理システムを確立する。村落の生活污水は河川や湖に直接排出せず、条件が整う村落であれば、小型の集中式污水处理施設を建設する。
3. 農業科学技術を推し進め、化学肥料や農薬を科学的且つ合理的に使用し、生態農業と有機農業を発展させる。家畜と漁業養殖の構造を調整し、養殖モデルを改良する。
4. 生態の修復事業を展開する。重点湖とダム、湖とダムに流入する重点河川に生態湖畔エリアや前置ダムを設置するなど、生態修復工事を行い、適当な地区を選んで生態障壁を建造する。水質浄化に有利な植物を栽培し、水質の自浄能力を高める。流域の水源が水を十分に蓄えられるように整備し、水土の保持と自然資源保護などの活動を行い、湿地の保護と修復事業を展開する。実情に基づき、耕作地・住居・養殖池を林・湖・湿地に戻す試験事業を行う。
5. 水質監視能力を強化し、水汚染の応急対策と汚染源の制御能力を高める。
6. 流域水環境の容量を深く掘り下げて研究し、水汚染物総量の分配技術と管理システムを確立する。水を科学的に調達し、水門を合理的に設置するなどの措置をとり、湖水の流動性を促す。制度の改革と刷新により、流域の水質の効果的な管理を実現する。

有害藻類ブルーム処理の原理、方法と応用

•Profile•



俞 志明 Yu Zhiming ●中国科学院海洋生態・環境科学重点实验室主任

1959年5月生まれ。現職は中国科学院海洋研究所研究員、中国科学院海洋生態・環境科学重点实验室主任。1991年に中国海洋大学海洋化学学科の理学博士号を取得し、カナダのInstitute of Ocean Sciences、University of British Columbia、米国のWoods Hole Institution of Oceanography、University of Georgiaでポストドク、訪問科学者、客員研究員等として活動した経験を持つ。現在は国連環境計画（UNEP）の北西太平洋地域海行動計画（NOWPAP）ワーキンググループ（WG）3の専門家として、海洋の富栄養化、有害藻類ブルーム処理等の研究に主に従事している。学術論文120編余り、専門書2冊を既に発表。

有害藻類ブルーム（海洋の中では有害赤潮とも言う）は世界的な水環境災害の1つである。近年の中国経済の急成長に伴い、今や内陸の湖沼及び沿海水域における軽視できない生態環境問題となっている。中国国家海洋局が発表した「中国海洋環境の質公報」の最近5年間のデータ統計によれば、中国の近海では年平均80回余りの赤潮が発生し、その発生面積は年平均1万9,000km²余りに達する。有害赤潮は近海の生態環境を破壊し、近海経済に深刻な損害を与えており、しかも幾つかの赤潮藻類は毒素を発生させ、人類の健康を脅かす恐れがある。藻類ブルームの災害については、「顔色が変わる」程の状況に陥っている地方も少なくなく、例えば、2007年に中国・太湖で発生した青い藻の華事件は、地元住民の生活と社会の安定に深刻な影響をもたらした。有害藻類ブルームの発生は複雑で、そのメカニズムはまだ明らかになっておらず、正確な予測と予報を出すのが難しい。従って、有害藻類ブルームがもたらす危害を軽減するため、それを如何に処理するかが中国の水環境保護における重要なテーマとなっている。

原理から言うなら、発生した有害藻類ブルームを処理するには多くの方法がある。しかし、実際に用いる時は「コストが低く、取扱いが簡単で、汚染を出さない」等の原則に合致させる必要があるため、本当に普及・応用できるものは極めて少ない。特に海中の有害赤潮は通常、発生面積が比較的大きく、処理するのが殊の外困難である。現在、世界で普及・応用できる唯一の有害赤潮処理方法は粘土材を用いることだ。日本は1980年代に鹿児島で現場の研究と実験を行い、韓国は90年代に黄土を発生現場で応用しており、米国、香港等でも関連の研究が行われ、試みられた。粘土材による有害赤潮処理の利点はコストが低く、供給源が広く、扱いが簡単で、普及・応用しやすいことにある。その他、この方法は水環境に二次汚染をもたらすことがなく、魚類や貝類にも目立った危害がなく、比較的安全な処理方法だと言える。このため、多くの関係者から好評を得ている。しかし、この方法は長い間、使用量が多過ぎるという技術的難題を抱えていた。例えば、韓国では面積が数km²の養殖漁場で発生した赤潮

を処理する時、黄土の使用量が6万tに達し、日本でも鹿児島島の赤潮を処理する時、粘土の使用量が1kg/m²に達した。現場の使用量が多過ぎることは、粘土類による有害藻類ブルームの処理、特に海中の大規模な赤潮及び一部の浅水湖で発生した藻類ブルームの処理にあたり、その普及を妨げる大きな制約要因となっている。このため、人々は粘土材による有害藻類処理の効率を如何に高めるかという問題に関心を寄せてきた。

我々は90年代から、粘土による有害赤潮処理のメカニズムと方法の研究を進めてきた。その結果、粘土材の処理効率向上を目指した粘土表面改質の理論と方法を打ち出し、高効率の改質粘土を開発し、淡水藻類ブルームと海水赤潮を現場で処理することに成功した。

1. 粘土粒子と藻類ブルームの凝集メカニズム

粘土はアルミニウム-珪素層状構造の天然鉱物であり、大地土壌の基本単位である。その層状構造に基づき、2層粘土と3層粘土に分けることができ、主な種類にはカオリン、モンモリロナイト等がある。粘土材の応用範囲は非常に幅広く、塗料、掘削、医薬等の各産業の他、現在では汚染物質の吸着材として環境保護等の分野にも幅広く用いられている。有害藻類ブルーム処理の素材となるが、その基本原理は凝集（flocculation）によって水中の藻類ブルームを除去するというものである。凝集剤となる粘土粒子の凝集効率は主に組成、構造、表面性質等に左右される。そこで、我々はまずこれらの面から粘土粒子と藻類ブルームの凝集メカニズム及びその特徴について研究を進めた。

我々は江蘇省と青島に産するカオリン、モンモリロナイトが中国近海のSkeletonema costatum、Prorocentrum minimum、Noctiluca scintillans（夜光虫）、Nitzschia pungens等の主な赤潮生物に及ぼす凝集作用の考察を行った。その結果、使用したカオリンの上記赤潮生物に対する凝集効率はモンモリロナイトよりずっと高く、さらには酸改質モンモリロナイトよりも高いことがわかった。この発見はモンモリロナイトによる赤潮生物除去の効果が最も良いとする伝統的観点と矛盾している。伝統的観

点の主な根拠は吸着理論である。モンモリロナイトは比表面が大きいので、溶解状態の分子又はイオンの吸着システムについて言うなら、伝統的論点は完全に正しいものである。しかし、粒子の直径が数 μ ～数十 μ の生物細胞と粘土の相互作用については大きな問題が存在する。粘土材による有害赤潮の処理は主に凝集作用に基づくもので、吸着作用とは大きな違いがあり、吸着理論だけで凝集作用の特徴を説明するのは難しく、メカニズムから見ると、両者には同じ所もあれば異なる所もあると我々は考える。

このため、我々は粘土材による有害藻類ブルームの処理に焦点を絞り、DLVO理論を踏まえ、粘土粒子と藻類ブルームの相互作用モデルを構築した。粘土粒子と藻類ブルーム間の相互作用は静電作用とファン・デル・ワールス力に分かれる。海水中の粘土粒子は負の電気を運び、藻類ブルームの表面も負の電気を帯びている。このため、粘土粒子と藻類ブルームの静電作用は反発作用として現れ、この作用の大きさは粘土粒子の表面電位の違いに関係している。我々が実験で用いたカオリンとモンモリロナイトの表面電位の測定結果によれば、カオリン表面の電気陰性度はモンモリロナイトよりも低い。これはカオリンと藻類ブルームの静電反発作用がモンモリロナイトよりも小さく、凝集効率が高いことを物語っており、pHの影響実験でこの結論が一段と証明された。次にファン・デル・ワールス力を考察するため、我々は各種の粘土と藻類ブルームの構造、形状が凝集作用に与える影響を研究した。その結果、鎖状の粒子、生物体の鞭毛等は粒子間の橋かけ作用を強め、凝集効率を高めることができ、凝集・沈降が一段と容易になることを発見した。この特徴から見ても、カオリンはやはりモンモリロナイトを上回る。

上記の研究はカオリンの凝集作用がモンモリロナイトよりも大きい原因を理論面から証明し、粘土粒子と藻類ブルームの凝集メカニズムを解き明かしており、粘土による藻類ブルーム凝集の効率を一層高めるための基礎が築かれた。

2. 粘土材による有害藻類ブルーム処理の効率を高める手段と方法-粘土表面改質理論

この理論の基本的な出発点は粘土表面の電気陰性度を引き下げ、粘土粒子と藻類ブルーム間の静電反発作用を最小にすることである。我々はまず粘土粒子と藻類ブルーム間の静電作用モデルを構築し、粘土粒子の表面に改質試薬を導入した後、表面の静電性の変化が凝集作用に与える影響について模擬研究を行った。研究の結果、粘土表面に用いる改質試薬Mが正の電荷Zを帯びると仮定して、粘土系にM⁺を入れると、粘土粒子と藻類ブルーム間の凝集作用が増強・促進されることを発見した。その増強の度合いはM⁺の性質に関係しており、M⁺の吸着力が

強ければ強いほど、正の電荷が多くなり、促進作用も強まる。同様に、ファン・デル・ワールス力の方程式を利用すれば、改質試薬Mの分子の鎖が長ければ長いほど、橋かけ作用が強まることを証明できる。

上記の結果は粘土表面の改質が藻類ブルーム凝集の効率に与える影響をメカニズムの面から明らかにしており、適切な改質化合物を選択し、粘土表面の性質を変え、その藻類ブルーム除去能力を高めるための理論的な導きと拠り所が示された。粘土表面改質理論に基づき、我々は無機改質試薬と有機改質試薬をそれぞれ選び、吸着、挿入等の技術を利用して無機改質粘土と有機改質粘土を調製した。

実験結果から粘土粒子の表面電位の変化に関する改質理論の予測が裏付けられた。それは改質試薬の濃度上昇に伴い、粘土粒子表面の電気陰性度が徐々に低下するというものである。その中で、カオリンの電位は常にモンモリロナイトよりも高く、一定の改質試薬の濃度下で等電点に到達すると、電荷の反転が生じる。一方、等電点に到達したモンモリロナイトは濃度が著しく高まる。改質後の粘土は藻類ブルームに対する凝集効率が大きく向上した。カオリンは殊の外顕著であり、改質前に比べ、凝集効率が数十倍から数百倍の伸びを示した。モンモリロナイトも同じ変化の動きをみせ、その凝集効率は改質前のモンモリロナイトよりもずっと高いが、改質後のカオリンには及ばない。それは表面電位の変化の法則と一致している。粘土粒子の表面電位と藻類ブルーム凝集効率との間の関係を詳しく考察すると、両者には正の相関性が存在していることがわかる。粘土による藻類ブルーム凝集の効率向上を目的とした我々の粘土表面改質理論が実験結果から一段と検証されたことになる。

上記の研究はNature、ES&T等の論文に引用されたことがあり、国連教育科学文化機関（ユネスコ）とAPECが2002年に共同出版した書籍「沿岸の有害赤潮監視・管理対策」に掲載されている。

3. 粘土改質方法の生態環境効果

有害藻類ブルームの処理方法が普及・応用の価値を持つかどうかは、その生態環境効果にも関係しており、無毒、無害、それに二次汚染を出さないことが普及・応用に当たっての重要な前提条件となる。処理方法の安全性を確保するため、我々は粘土改質技術の生態環境効果について一連の実験と考察を進め、その技術成果を現場で応用するための基礎固めをした。

まず、我々は改質粘土が水中の主な栄養塩に及ぼす影響について考察を行った。実験結果が示しているように、改質した粘土の磷酸塩に対する吸着能力は未改質粘土よりもずっと高く、その吸着能力は環境中の磷酸塩の濃度が増すにつれて増大する。一方、水中の硝酸塩に対しては、各種粘土系の吸着能力がいずれも低い。これは硝酸

塩が不活性電解質に属し、それ自体の活性が極めて低く、吸着作用が発生しにくいためである。その他、我々は有害藻類ブルームの除去過程で改質粘土が水中の溶存酸素(DO)と化学的酸素要求量(COD)に与える影響についても考察した。その結果、改質粘土で有害藻類ブルームを除去した時、水中のDOにも同時に変化の起きることがわかった。改質粘土を加える前は、藻細胞の死亡・分解によって大量の酸素が消費され、水中の溶存酸素は減り続ける傾向にある。しかし、改質粘土を加えた後は、藻細胞に対するその除去作用により、水中の溶存酸素が徐々に増え、正常なレベルまで徐々に回復していった。水中のCODも同じような変化が生じた。最初は藻細胞の死亡・分解により、水中のCODが7.45mg/Lにも達し、海水での正常な範囲を大きく超えていたが、改質粘土を加えると、顕著な除去効果が現れ、CODが1mg/L以下に下がった。上記の結果が示しているように、改質粘土は有害藻類ブルームを除去すると同時に、堆積物の表面への吸着・被覆によって磷酸塩の放出を阻止し、水中のCODを減らし、水質浄化の役割を果たすことができる。

水質に対する影響の他、我々は中国の代表的な海水養殖生物(クルマエビ、太平洋カキ等)をモデル生物とし、改質粘土の水生生物への影響についても考察を行った。東シナ海の*Prorocentrum*及び*Heterosigma akashiwo*に対する除去実験では、クルマエビの稚エビの生存率はいずれもその対照グループに等しく、100%に達した。通常、底生の貝類等は環境中の浮遊粒子状物質の変化に敏感である。我々は太平洋カキの幼体を培養している水域にそれぞれ異なる改質粘土を入れ、56日間連続培養した後、試料を採取し、透過電子顕微鏡でカキの鰓組織と消化腺の超微小構造を観察した。対照グループのカキの鰓組織構造と比較した所、改質粘土を添加した実験グループのカキの鰓組織はその細胞に目立った変化がなく、構造は依然として完全なものであった。また、カキの消化管の縁には密集し、整然と配列された大量の微絨毛が残っており、絨毛の母体と小根がはっきりと見える。これは改質粘土が太平洋カキの幼体の鰓組織と消化管に目立った機械的損傷を与えていないことを物語るものだ。長期間培養した後、改質粘土が生物の生存率にも顕著な影響を与えていないことがわかった。

一部の藻類ブルームは毒素を発生させ、他の水生生物や人類に中毒をもたらす恐れがあり、大きな危害の1つとなっている。このため、我々は粘土改質技術を利用して藻類ブルームを除去すると同時に、この技術方法が藻毒素に及ぼす影響についても考察を行った。改質粘土は藻毒素の発生を抑制することができ、抑制効率は最大で30%以上に達する。また、我々は改質粘土で*Alexandrium tamarense*を除去した時、水中の藻細胞の濃度及びそれが持つPSP毒素を効果的に減らせることを発見した。

上記の研究が証明しているように、改質粘土は有害藻

類ブルームを効果的に除去すると同時に、栄養塩を吸着させ、水質環境を改善し、藻毒素の発生を抑制することができ、他の主要生物にマイナス面の影響が生じることもない。これらの特徴は他の処理方法にない優れた点であり、粘土改質技術の普及・応用のための基礎が築かれた。

4. 淡水藻類ブルームの処理における粘土改質技術の応用

2005年の夏に入ってから、中国南京の玄武湖では*Microcystis aeruginosa*を優占種とする藍藻の水の華が大量発生した。この湖の面積は4km²だが、水の華の厚さは最大で20~30cmに達し、密度は10⁷cell/mlに達した。藍藻の水の華は景観を損ねるだけでなく、より深刻なのは大量の藍藻が腐って悪臭を放ち、毒素を出したことであり、玄武湖の水質と周辺住民の生活に重大な影響を及ぼした。しかも玄武湖公園では第10回「全国体育大会」の水上競技実施及び第1回「中国緑化博覧会」の開催が迫っており、重大な支障をきたす恐れがあった。

南京市政府の委託を受け、我々は「南京玄武湖水の華応急処理」プロジェクトを引き受けた。プロジェクトの主要任務は以下の通り。玄武湖の水環境に二次汚染をもたらさないことを前提に、同湖の環境と水の華発生の特徴を踏まえ、効果的な抑制技術を利用し、プロフェッショナルな応急措置チームを組み、確実に実行可能な応急処理案を定め、玄武湖での水の華の広がりを予防・抑制し、2005年9月の「緑化博覧会」と10月の「全国体育大会」水上競技が順調に実施できるようにすること。2005年9月、我々は粘土改質技術を応用し、南京玄武湖の有害藻類ブルームに対する大規模な処理を進めた。玄武湖は独立した3つの小さな湖から成り、北湖、東南湖、西南湖に分かれている。まず藻類ブルームが最も深刻な北湖の処理から始め、10日足らずで除去され、粘土改質技術による処理はひとまず成功を収めた。その後、「全国体育大会」水上競技の会場となる東南湖、及び西南湖の藻類ブルームの処理を行い、いずれも除去することに成功した。同湖は観光、レジャー等の機能が回復し、大会も順調に進めることができた。モニタリングの結果、生物量はそれまでの平均10⁵cell/mlから10³cell/mlに減った。玄武湖の水質状況が著しく改善され、その透明度は処理前の平均30cmから36cmに高まり、溶存酸素がやや増え、pHがやや下がった。また、*Microcystis*の毒素が効果的に抑制され、COD、TSI、過マンガン酸塩、Eh及び栄養塩がいずれも若干低下した。さらに生物の多様性がある程度回復し、他の主な水生生物(魚類、底生貝類)が改質粘土の影響を受けることはなかった。

粘土改質技術で玄武湖の藻類ブルームを処理するのに成功したことは、地元で大きな反響を呼び、淡水藻類ブルームの処理技術を大きく前進させるものだと称賛された。

5. 青島五輪セーリング会場の赤潮防止活動における粘土改質技術の応用

「グリーン五輪、科学技術五輪、ヒューマン五輪」は2008年オリンピック大会の理念と趣旨である。この目標を打ち出したことで、2008年五輪が史上最も成功した大会になることは間違いない。北京五輪の唯一のパートナー都市として、青島市はセーリング競技開催の重要な任務を担っていた。五輪セーリング競技開催に対する国際セーリング連盟の要求及び過去数度の同競技開催の成功経験に基づくなら、セーリング競技は海洋環境面での要求が非常に高いものとなる。しかし、青島の近海では過去何度も赤潮が発生しており、有効な処理措置を直ちに講じ、赤潮災害を防止しなかったなら、2008年五輪セーリング競技及びその2006、2007年テストマッチの実施に支障をきたすことになろう。任務は困難に満ち、責任は重大であり、赤潮処理方法には高い要求が課されることになる。

専門家の論証を経て、粘土改質技術が2008年五輪セーリング競技会場における唯一の赤潮応急処置方法となることが最終的に確定した。2006年のテストマッチ期間中に、現場で訓練を重ね、予防的な散布を事前に行った結果、大規模な赤潮は出現せず、「グッドラック北京-青島国際セーリング競技2006」を順調に実施することができた。2008年には粘土改質技術を利用し、青島の近海で発生した面積約86km²の赤潮を取り除き、五輪セーリング競技開催のための良好な海域環境を整えた。

6. 海水養殖農家を藻類ブルームの被害から守るための粘土改質技術の応用

海洋生物を死に至らしめることは藻類ブルームの主な危害の1つであり、中国の養殖業に毎年大きな損害を与えている。例えば、1998年に広東、香港の沿海で発生したGymnodinium赤潮は地元の海水養殖業に壊滅的な打撃をもたらし、その直接的経済損失は5億元余りに達した。また、1989年に渤海で発生した黄驊赤潮による直接的経済損失は2億元余りとなった。一部の藻類ブルームは毒素も出しており、これが貝類又は魚類に蓄積されると、食する人の健康と生命が脅かされることになる。このため、

有害藻類ブルームを如何に効果的に処理するかは、海洋水産・海洋環境の管理部門及び沿海養殖の事業所・農家にとって解決の必要に迫られた重大問題となっている。

近年、春と夏の赤潮発生時期に、我々は中国の養殖農家が請け負っている近海養殖区域で粘土改質技術による赤潮の処理を何度も手掛けてきたが、その効果は顕著であり、養殖のクルマエビや貝類等への悪影響も見られない。数万ムー（1ムーは約6.67アール）の養殖生物が赤潮の被害を免れ、養殖業者の称賛を得た。これにより、海水養殖区域の藻類ブルームを除去する面での同技術の有効性と安全性も証明されたこととなる。

要するに、改質粘土による有害藻類ブルーム処理技術は人々がその災害に打ち勝つための重要な手段を提供するものであり、近海生態環境の保護と経済発展にとって大きな意義を持つ。



A 改質粘土の散布前

B 改質粘土の散布後

◎図1 南京玄武湖の藻類ブルーム処理における改質粘土の応用



A 改質粘土の散布前

B 改質粘土の散布後

◎図2 青島近海の赤潮処理における改質粘土の応用

中国污水处理技術の研究と発展

•Profile•



施 漢昌 Shi Hanchang ●清華大学 環境科学工学部教授 環境シミュレーション汚染制御国家重点実験室主任

1950年2月生まれ。1982年 清華大学土木環境工学部卒業。1989-1990年 イギリス 水研究センター訪問学者、1994年 アメリカ ミシガン大学高級訪問学者、2002年と2005年 カナダ アルバータ大学訪問教授、2003年 アメリカ スタンフォード大学訪問教授。“污水处理高効率好気生物硫化反応器”、“エバネッセント波利用全光ファイバーバイオセンサー”、“移動式快速水質自動監測システム”などの新技術を発明した。国内で発表した論文は200篇以上、授權国家發明特許は42項目、教育部科学技术進步獎・教育部技術發明獎・環境保護科学技术獎を獲得し、中国環境科学学会環境科学優秀科学技術者の称号を得ている。

一、中国水環境汚染の現状

中国の水環境汚染の状況は依然として非常に厳しい。2007年の『中国環境状況公報』で発表されたデータによれば、全国七大水系(長江、黄河、松花江、遼河、海河、淮河、珠江)は全体的に中度の汚染であり、197本の河川の407個の監測断面のうち、I-III類、IV-V類、劣V類の水質断面の比率は、それぞれ49.9%、26.5%、23.6%であった。その中で、珠江と長江の水質は全体的に良好であり、松花江は軽度の汚染、黄河と淮河は中度の汚染、遼河と海河の汚染は重度であった。28ヵ所で重点監測した湖ダムのうち、II類の水質を満たしていたのは全体の7.1%、III類の水質は21.4%、IV類の水質は14.3%、V類の水質は17.9%、劣V類の水質は39.3%であった。主な汚染物は全窒素と全りんである。今後5-10年間は、水環境は依然として中国の主要な環境問題であろう。

都市化の速度は加速するが、生活污水の処理能力は依然として明らかに不足している。2008年末には中国の大都市と中規模都市のうち、1543都市がすでに污水处理工場の操業を始め、1873都市が污水处理工場を建設中である。これらの污水处理工場により大都市と中規模都市の污水处理状況は改善されたが、これらの都市以外に全国には2万以上の小規模都市や町、370万以上の村落があり、9億人以上の人々が污水处理設備のない場所で暮らしている。このような区域では生活污水の排出が水環境を汚染し続けている。このため、中国における今後の生活污水の処理技術は、以下3つの分野に主に発展するだろう。大型污水处理工場を改良する技術、中小規模の都市と町の生活污水処理(2万トン以下)技術、生活污水処理の汚泥減量化技術である。

二、污水处理技術の研究

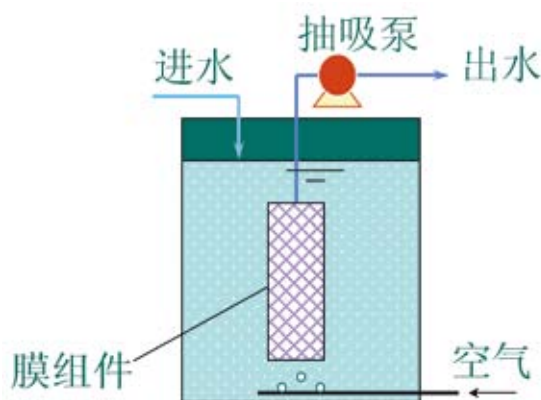
大規模污水处理技術の研究が中国で始まったのは1980年代になってからである。水環境の汚染を抑制するため、政府は工業プロジェクトの建設を要請すると同時に、污水处理施設を建設し、同時設計・同時施工・同時操業することを要求した。当時は、多くの科学研究機関や大学が工業廃水の処理技術の研究を行っていた。先進国の汚

水処理技術を参考にすると同時に、中国の国勢に基づいて、工業廢水処理技術の研究開発を行った。これらの技術は化学沈殿・化学酸化・ろ過・抽出・イオン交換などの物理化学の処理技術と活性汚泥法・生物接触酸化法・嫌気生物の処理などの生物化学処理技術を含む。これらの技術は工業廢水の処理に応用され、工業廢水による水環境汚染を軽減した。

1990年代末になると、経済が発展し都市化の速度が加速するにつれて、都市の生活污水の汚染負荷がすでに工業廢水の汚染負荷を上回り、都市の生活污水の処理は政府が重視するところとなった。2000年以降、多方面で国による科学研究プロジェクトが制定され、都市の生活污水処理技術は発展した。一連の污水处理技術は、研究を通して、すでに実際に応用されている。これらの技術は、酸化溝技術・好気性-無酸素物処理技術(A/O)・嫌気性-無酸素-好気性生物処理技術(A/A/O)・SBR(逐次バッチ活性汚泥法)・膜生物反応器(MBR)・生物流化床・生物暴気ろ過池などを含む。これらの技術は汚水中の有機物炭素原子を除去するだけでなく、窒素とりんも除去することができる。膜生物反応器(MBR)と生物流化反応器の研究と応用成果について、以下に簡単に紹介する。

1. 膜生物反応器

膜生物反応器は膜分離技術と活性汚泥法を統合して形成した污水处理の新技術の一種である。この技術の特徴



◎図1 膜生物反応器の原理



◎図2 膜生物反応器の工程

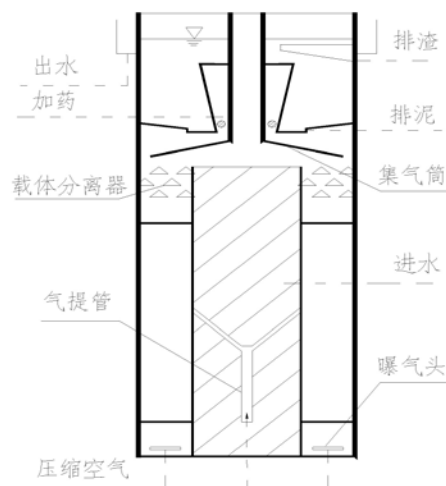
は、反応器中の生物量が多く、汚泥の負荷が低く、処理された水質がよいことである。污水处理後に再利用する必要がある場所にはきわめてメリットがある。中国では1990年代の半ばから、膜生物反応器の研究が行い、試行錯誤のすえ、現在では多くの污水处理工程に応用されている。膜生物反応器の研究は反応器の構造と負荷運行の研究だけではなく、膜汚染の研究も非常に重要である。長年の研究により、膜汚染を軽減する方法と膜の洗浄技術が生み出され、実際の応用が可能になった。図1と図2は膜生物反応器の原理と実際の工程を示したものである。

現在、国内で運行している膜生物反応器の污水处理能力は1日あたりの最大污水处理量は40000m³/dであり、1基の処理能力を100000 m³/dとする膜生物反応器の污水处理工場が現在建設中である。

2. 生物流化反応器

生物流化反応器は生物を担体とした流化作用が高効率物質移動と快速反応に達した污水处理の新技術の一種である。この技術の特徴は、反応器中の生物量が多く、汚泥の負荷が低く、反応時間が短く、使用場所が小さいことである。中小規模の污水处理や狭い場所にはメリットがある。中国では1990年代の後期から、生物流化反応器の研究が始まり、数々のテストと技術の革新を経て、現在では多くの污水处理工事に応用されている。生物流化反応器の研究は反応器の構造と内部の流体、負荷運行の研究を含む。長年の研究により、生物流化反応器は污水中の炭素原子を除去するだけでなく、窒素とりんも取り除くことができ、幅広く応用されている。図3と図4は生物流化反応器の原理と実際の工程を示したものである。

現在、中国には生物流化反応器の污水处理工程がすでに十数カ所にあるが、運行している生物流化反応器の1日あたりの最大污水处理量は2500m³/dであり、工程全体の最大污水处理能力は10000 m³/dである。



◎図3 生物流化反応器の構造原理



◎図4 生物流化反応器の污水处理

三、污水处理技術の改良と発展

1. 污水处理技術の改良

近年、都市の污水处理問題を解決するために、污水处理工場が数多く建設されたが、窒素とりんを除去する要求が高まるにつれ、一部の大型都市污水处理工場の処理技術も改良の必要が生じた。すでに設計された脱窒素除りん機能を持つ污水处理工場は改良運行が必要となり、剩余汚泥の処理も適切に解決しなければならない。污水工場の臭気と騒音問題、污水の再利用およびその安全性などの問題も解決が待たれる。これらの主な問題には、以下の研究と開発が必要である。

(1) 都市の污水处理工場の運行保障技術：污水の脱炭技術は同時に脱炭、脱窒、除りん技術までに改良する、基準を満たした省エネ污水处理工場の改良などを含む。

(2) 都市の污水处理工場の剩余汚泥の減量化技術：技術工程中の汚泥減量化、回流汚泥の嫌気減量、汚泥低圧

湿式酸化、汚泥乾燥技術などを含む。

(3) 都市の污水処理工場の臭気と騒音の抑制技術：生物除臭、低抵抗生物ろ過充填スプレーシステム、除臭剤調和、騒音減少抑制技術などを含む。

(4) 中小規模の都市と町の污水处理適応技術：発展および未発展地区の中小規模都市/町の高効率污水处理技術と設備の特徴に基づいて廉価な污水处理技術の開発を含む。

(5) 水の再利用技術：再利用目標が異なる都市の污水处理工場に焦点を当てた2級処理水の深度処理技術、再利用水の適切な消毒および污水再利用の安全保障技術などを含む。

2. 污水处理技術研究の発展

20世紀末は、生物技術・情報技術・材料技術の分野でハイテク技術を応用した基礎研究の成果が数多くあげた。これらの技術は水汚染の制御と管理中の難題に有力な解決法を提供した。これらの先進技術を用いて、水汚染制御と管理の研究開発を行えば、今後の污水处理分野で大きな成果を生み出すだろう。行うべき研究は以下のとおりである。

(1) 最新生物技術を中心とした污水处理の最先端技術：水質浄化の機能を持つ微生物を大量生産し、それを污水处理システムに応用する技術。

(2) 新材料を中心とした污水处理最先端技術：各種の

膜分離技術、膜分離と生物反応器の結合技術、高効率吸着および吸着剤の調和技術、強酸化技術に用いる新種触媒の調和技術。

(3) 情報技術を中心とした污水处理最先端技術：データの無線伝送・GPS・地理情報システムを集成したりリアルタイムの情報提供、高速転送、処理後の多次元のフィードバック技術;地理情報システムに基づく水汚染の総合情報分析技術など。

中国では、すでに1500基以上の污水处理工場が操業しており、目下建設中の工場は1800基以上である。2006年以来、研究者は、污水处理工場での処理水は安定的に排出基準を満たすという前提で、運行コストをできる限り抑え、污水处理工場の省エネ技術の研究に着手してきた。污水处理技術発展の第一の目標は汚染水を浄化し、水環境への汚染を減少することである。第二の目標は汚染処理に使用するエネルギーと薬剤の使用量を減らし、運行コストを抑えることである。第三の目標は污水处理の資源化と二酸化炭素排出の削減であり、污水处理で再生した水を再利用すると同時に、炭素・窒素・りんなどの資源を回収利用し、二酸化炭素の排出を削減する。中国の研究者はこの三つの目標を掲げて研究を行っている。国際協力を求め、污水处理技術を共同で研究開発し、水環境の汚染問題を解決することを望むものである。

銀川平原における主な水環境問題およびその原因と対策

•Profile•



銭 会 Dian Hui ●長安大学水文学・水資源工學部主任

1963年5月生まれ。理学博士。1995年に西安地質學院を卒業し水文地質工學の博士学位を取得。2001年4月から2002年3月にかけて教育部から助成金を受けカナダのトロント大学環境科学部で学ぶ。2002.11に教授に就任。2004.3には博士課程の担当教員。現在は長安大学水文・水資源工學部で学科長。これまでに20を超える科学研究プロジェクトを担当した。現在は国家自然科学基金プロジェクトである「地下水の混合作用に関する水文・地球化学効果の研究」を含む5つのプロジェクトを進行中。また本科課程や大学院課程における13教科を担当。著作や教材など合わせて4冊を出版。70以上の學術論文を發表。2000年に第7回霍英東教育基金會において青年教師賞3等賞(73098)を授与。また2005年9月には「陝西の高等教育機關における優秀青年教師」の称号を授与。

概要：

面積7295km²の銀川平原は中国北西部に位置しており、中国有数の商品化食糧の生産地である。銀川平原の水資源は主に黄河の水を引いて灌漑することにより賄われている。同平原の水資源に対する開発や利用が不適切であるため、水環境問題が数多く発生している。本論文では銀川平原における水文地質環境および水資源の利用状況の概要を紹介するとともに、同平原における土壌塩性化、湿地の縮小、地下水の高塩濃度化、地下水位の円錐状低下といった水環境問題を徹底的に分析している。またリモートセンシングや実測データに基づき前述した諸問題の現状、原因、変化の傾向について分析し、土壌塩性化や地下水の高塩濃度化の主な原因として地下水面が浅く蒸発が著しいという点を指摘している。さらに論文の最終部分では前述した水環境問題に関する対策や提案を列挙している。

銀川平原は寧夏回族自治区の北部に位置している。黄河の中・上流沿いで南の青銅峡から北の石嘴山まで、西の賀蘭山から東のオルドス高原西側まで広がっている。南北は165km、東西は42~60kmであり、総面積は7295km²となる。平原地域の海拔は1100~1400m、地理的座標は東経105°00'~107°00'、北緯37°20'~39°23'となる。人口は244万4400人で自治区総人口の45%を占める。同平原には2000年近くにわたる開拓の歴史があり、用水路、耕地、湖沼が至るところに見られる。灌漑面積は399.64万ムー(1ムーは約6.667アール)に達しており、農業、林業、畜産業、漁業、その他の産業にとって重要な拠点となっている。同平原中部にある区都の銀川市は同自治区で最も工業や農業が発達した地域である。

銀川平原は中間温帯に位置し乾燥した大陸性気候が特徴となっている。長い冬、熱く短い夏、少ない降水量、十分な日照量といった特色がある。年間平均気温は8~9℃、最近の年平均降水量は約183.59mmである。降水は6~9月に集中しており12月が最も少ない。年間平均蒸発度

は1662.33mmである。

銀川平原の生態環境は浅層地下水に依存している。水資源の不適切な開発や利用により大規模な土壌塩性化が発生している。地下水の高塩濃度化や水質の悪化が深刻であり、湿地の縮小が続いている。一部の地区では地下水の過剰な汲み上げにより地下水の円錐状低下が発生している。以上の問題は銀川平原における社会経済の発展を著しく妨げている。

1. 水文地質環境

銀川平原は新生代の断層運動により生じた盆地に河川、湖、洪水などによる作用が加わり形成された堆積平原である。山麓の洪積台地、沖・洪積平野、湖に土砂が堆積してできた平野で構成されている。地形は広大かつ平坦であり、南西から北東に向かい傾斜している。粗い粒子と細かい粒子が交互に堆積しており、単一層と多層構造が共存している。不圧地下水と被圧地下水が共に存在する。

銀川平原における第4軟岩類間隙水は地域的に単一地下水域と多層構造域に分けることができる。単一地下水域は主に西部や南部の一部に分布している。その他の場所は多層構造域である。地下250 m以上の部分において多層構造域は三つの帯水岩層がある。上から順に第一帯水岩層、第二帯水岩層、第三帯水岩層である。このうち第一帯水岩層は不圧地下水、第二および第三含水岩層は被圧地下水となっている。各帯水岩層の間には通常比較的連続した低透水層がある。

銀川平原の地下水は主に用水路浸出、灌漑水の浸透による涵養、大気や降水による涵養、平原周辺からの地下水流入による涵養、洪水による涵養、黄河による涵養などに依存している。地下水の排出には排水溝による排出、蒸発、人為的な汲み上げなどが含まれる。2003.7~2004.6における水収支計算結果(表1)によると、銀川平原における地下水の総涵養量は $23.4138 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 、総排出量は $25.9749 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ であった。

平原内におけるほとんどの場所では地下水面が浅く概ね3 m以内となっている（図1）。地下水の表面流量は地形、岩石特性、水の特性、用水路といった自然および人為的要素の影響を受ける。地下水などの水位線（図2）によると、平原の周辺から中央に向けての流れは勾配が大きく流水条件が良好であることが分かる。また平原南部から黄河に向けての流れも勾配が大きく流水条件が良い。平原中央から東北に向けての流れは勾配が著しく緩くなり、流水条件が悪い。平原北部の地下水は全体的に東北に向けて流れているが勾配は緩く流水条件が悪い。

2. 水資源の利用状況

銀川平原における地表水は主に黄河から引き込まれている。ほとんどが農業用水であり工業用水はごくわずかである。灌漑農業に供される地表水は $37.2167 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 、工業用に供される地表水は $2.4300 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ となっている。

2003年に銀川平原の各業種が消費した地下水は合わせて $5.8382 \times 10^8 \text{m}^3$ であった。このうち工業用に供された地下水は全体の35.8%に当たる $2.0925 \times 10^8 \text{m}^3$ 、農業に供された地下水は全体の27.1%に当たる $1.5804 \times 10^8 \text{m}^3$ 、都市部の生活用水として供された地下水は全体の32.6%に当たる

収支の種類	涵養量		収支の種類	排出量	
	(10^8m^3)	(%)		(10^8m^3)	(%)
用水路や灌漑用水	19.8958	84.97	排水溝	8.0121	30.846
降水	1.6504	7.05	蒸発	11.8838	45.75
周辺の地下水	1.0006	4.27	井戸	4.873	18.76
黄河	0.46	1.96	黄河への流入	1.206	4.64
洪水	0.407	1.74			
総涵養量	23.4138	100	総排出量	25.9749	100

表1 銀川平原における水収支計算結果



図1 銀川平原における地下水面等深度線図

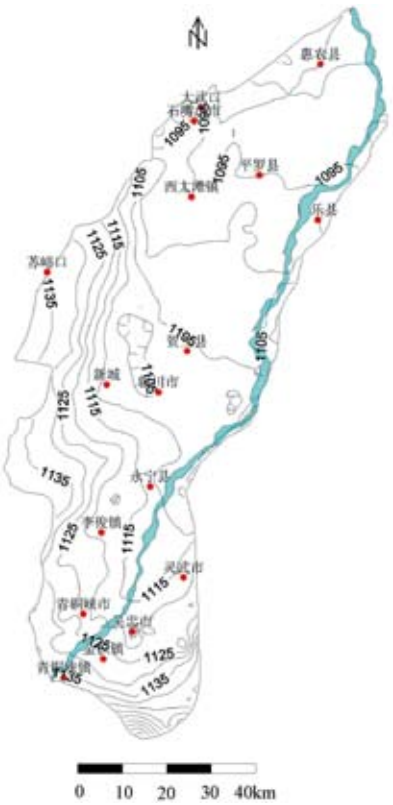


図2 銀川平原における地下水面等高線図

$1.905 \times 10^8 \text{m}^3$ 、農村において人畜が消費した地下水は全体の3.9%に当たる $0.2321 \times 10^8 \text{m}^3$ だった。銀川平原における地下水の汲み上げ量や関連データによると、汲み上げ量は1970年代に $1.5088 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 、1980年代に $3.1135 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 、1990年代に $4.0140 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 、2000年に $4.6418 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 、2002年に $4.6552 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 、2003年に $5.8382 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ と年々増加している。

水資源の利用に関して以下のような問題が存在する。

(1)利用効率が低い。特に農業用水の面で黄河からの取水方式があまり適切でなく有効利用率はわずか約0.58である。用水路の有効利用係数は平均0.43であり、低い。農地に対する灌漑配分が高く水田への配分総量は平均 $1939 \text{m}^3/\text{ムー}$ である（1ムーは約6.667アール）。最も配分が多かったのが呉忠市の $2239 \text{m}^3/\text{ムー}$ である。灌漑地に対する配分総量は平均 $1002 \text{m}^3/\text{ムー}$ で最も多い呉忠市で $1157 \text{m}^3/\text{ムー}$ だった。(2)配分バランスが悪い。銀川平原において利用可能な水資源は主に国家が定める黄河からの取水量である。水資源に限りがあるのに農業用水への配分が大部分を占めている。結果として水資源の乱用や工業や生態分野における水不足が深刻化しており、経済発展や生態環境の改善が制限されている。(3)利用構造が不適切。銀川平原における水の使用総量は $47.3442 \times 10^8 \text{m}^3$ である。このうち地下水の利用量は $5.8382 \times 10^8 \text{m}^3$ で全体の12.3%を占め

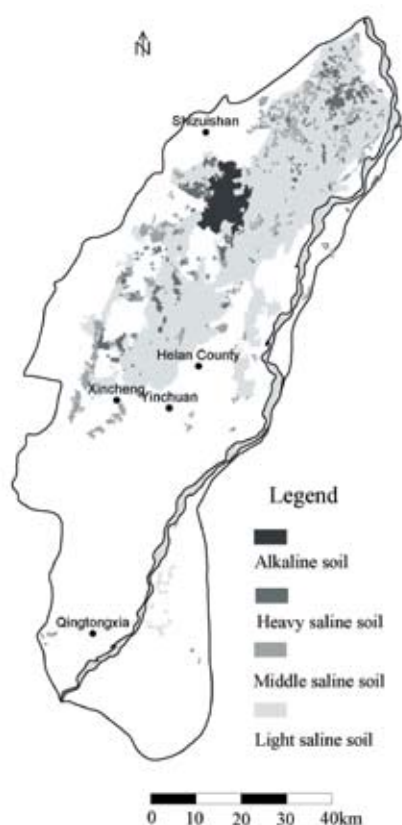
る。主に黄河からの取水に頼っているが、灌漑水の浸透により生じた浅層地下水の利用が進んでいない。多くの地下水が蒸発するに任されており水資源が無駄になっている。また排水負荷の増加により地下水位が上昇し、土壤塩化問題の解決が捗らない。

3. 水環境に関する主な問題

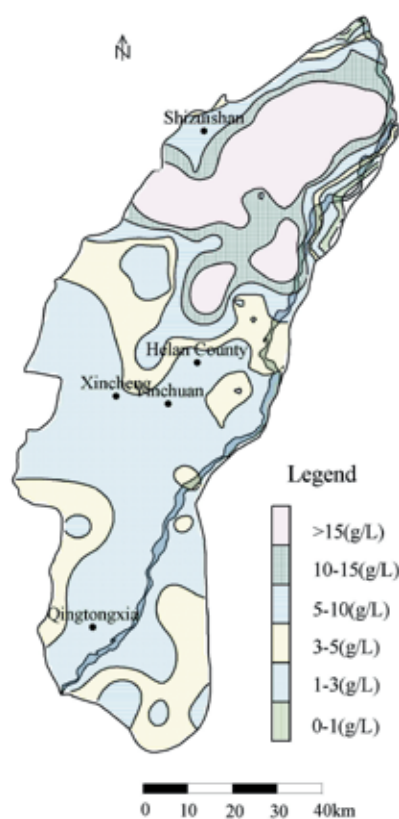
銀川平原における主な水環境問題は土壤塩化、湿地の縮小、地下水の高塩濃度化、局地的な地下水位の円錐状低下などである。以下に各問題に関する分析を記す。

3.1 土壤塩性化

図3は2004年11月にリモートセンシングに基づき導き出した銀川平原における土壤塩性化の程度や分布状況を示している。図4は2004年に実施した分析により得た土壤含塩量のエリアマップである。これらの図から銀川平原における土壤塩性化が主に銀北地区に分布していることが分かる。銀南地区では邵崗東部一帯および靈武東部の秦渠や東干渠付近に土壤塩性化が認められる。総面積は186万ムー（1ムーは約6.667アール）で耕地面積の43.4%を占める。図3や図4を図1や図2と比較してみると、土壤塩性化が発生している地区の地下水位が2m以内と浅く、勾配も緩く流水条件が悪いことが分かる。



◎図3 銀川平原における土壤塩性化の程度と分布図



◎図4 銀川平原における土壤含塩量のエリアマップ

表2 各年における湿地面積の統計表

単位: km²

年	河川	湖	河岸	養殖池	沼	合計
1987 年	197.18	154.55	290.39	17.65	22.32	682.09
1997 年	115.76	120.42	230.63	25.32	21.77	513.90
2004 年	109.14	249.92	61.60	29.73	50.21	500.59

3.2 湿地の縮小

湿地を沼、湖、河川、河岸湿地、人工湿地（用水路、貯水池、養殖池など）の5種類に分けることができる。リモートセンシングによって1987年、1997年、2004年における各種湿地に対して分析したところ、銀川平原における湿地総面積が2004年に500.59 km²になったことが分かった。主に平原北部に分布しており、永寧以北、平羅以南に特に集中している。このうち河岸湿地は黄河両岸に分布している。3つの年における湿地面積の変化は表2のとおりである。表から1987年、1997年、2004年と年を追うごとに湿地面積が減少していることが分かる。このことは近年増加している地下水の汲み上げ量や地下水位の低下と関連している。

3.3 地下水の高塩濃度化

図5は銀川平原における地下水のTDSエリアマップである。図から平原全域における地下水のTDS値が西から東に向かって、また南から北に向かって増大していることが分かる。TDS値が大きいほど水質は悪くなる。水の化

学成分による分類は南西から北東にかけて $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ と変化している。西部の山麓台地や平原南部では傾斜が強く帯水層の粒子が粗いため地下水の流水条件が良い。水の化学成分による分類は重炭酸や硫酸が主体となる。地下水が北東方向へ流れるにつれ、地下水位が上昇するため地下水の主な排出類型が水平方向の流水から垂直方向の蒸発へと変化する。水中の溶解性塩分が蓄積し水の化学成分による分類は硫酸や塩素化合物が主体となる。TDS値は概ね3g/L以上であり5g/Lを超える地区も存在する。地下水の水質が著しく塩化していることが分かる。塩化の原因には浸出作用や蒸発作用が関係している。蒸発によって土壌に塩分が蓄積され大規模な土壌塩性化が引き起こされる。また地下水の塩分濃度も急激に上昇し、水質が悪化するため適用範囲が縮小する。

3.4 一部の地域における地下水の過度の汲み上げ

工業や農業の発達した銀川市や石嘴山市では、深層地下水の過度な汲み上げが深刻であり、地下水位の円錐状

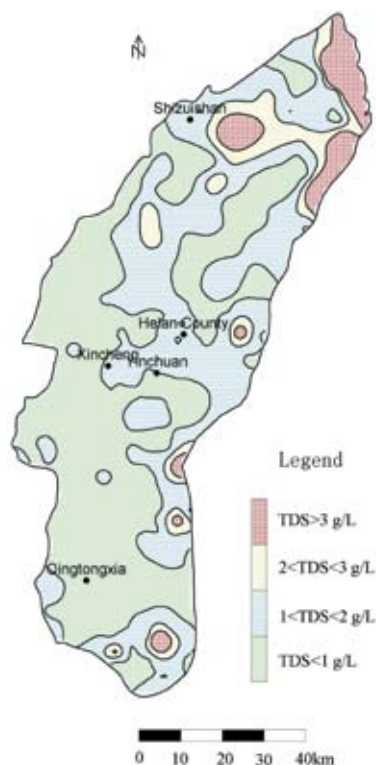


図5 銀川平原における地下水のTDSエリアマップ



図6 銀川平原における第一被圧地下水の水位等高線（2003.7）

低下が問題化している。円錐状に水位が低下している地区の面積は500 km²を超える（図6）。

銀川市における生活・工業用水は主に第一被圧地下水を汲み上げることで賄っている。多年にわたって大量に汲み上げたため、第一被圧地下水層における地下水位の円錐状低下が発生した。低下地区の面積は453.17km²である。地下水位の円錐状低下に関する推移状況を見ると、1986～1990年における低下地区面積の増加率は30.205km²/a、中心水位の低下速度は0.884m/aであった。1991～1995年における低下地区面積の増加率は10.10km²/a、中心水位の低下速度は0.7695m/aであり前の5年間より縮小した。1996～2000年における低下地区面積の増加率は1.73km²/aであり中心水位は1996年よりも回復している。以上のことから銀川市における地下水位の円錐状低下は比較的安定した状況となっていることが分かる。

石嘴山市は寧夏を代表する重工業都市である。生活・工業用水のために主に山麓の単一地下水域および第一被圧地下水層から地下水を汲み上げている。汲み上げ量の継続的な増加に伴い、石嘴山市大武口区に地下水位の円錐状低下が発生した。低下地区の面積は93.78km²である。最近は安定した状況にある。

4. 対策と提案

(1) 水資源に対する管理業務を強化するため、地表水と地下水の相互配分を見直すべきである。銀川市や石嘴山市といった水の使用量が集中している地区では井戸の配置（深度や密度）を調整する必要がある。使用と涵養のバランスを整え地下水の汲み上げが環境や地質に悪影響を及ぼすことを防止しなければならない。土壤塩性化が深刻な地区では浅層地下水の利用や地表水と地下水の相互利用を推進し、地下水位を一定の深度に保ち、また、地下水の無駄な蒸発を減少させることによって、土壤塩性化の拡大防止や土壤の二次塩性化が発生した地区における原状回復が見込める。地表水、湖、湿地を保護するため適切な保護区を設立し、その周辺で地下水の汲み上げを制限し、地下水位の低下を阻止すべきである。

(2) 銀川平原における最大の水使用用途は農業用水であり、農業灌漑用水が水の総使用量の80%以上を占めている。1ムー（約6.667アール）当たりの水の平均使用量は828～1070.7m³（2000年）に達する。水1立方メートル当たりの食糧生産高はわずか0.56kg/m³である。これに対しイスラエルでは2.32kg/m³に達している。以上のことから銀

川平原における水資源の利用効率が低いことが分かる。また農業分野において節水の余地が十分にあることも理解できる。仮に銀川平原における水の有効利用率を20%向上できるなら毎年7億6000万立方メートルの水を節約できる。

(3) 農地工学の応用を進め、用水路の漏水防止を実現すべきである。近年、銀川平原における水利事業に対する投資規模は小さく、灌漑取水プロジェクトや排水プロジェクトの老朽化や不完全さが目立っている。水を引き込む過程における漏れや流出が深刻である。用水路の浸透防止工事が進んでいないため浸透損失が大きい。また農地工学が十分に応用されていないため、水を引き込む過程や農地における水の損失が大きくなっている。中国国内の実例によれば、農地工学の十分な応用や用水路の浸透防止工事によって約40%の節水が実現する。

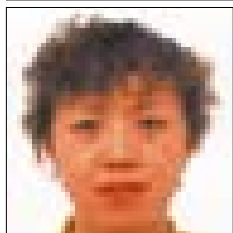
(4) 農地灌漑技術を改善する。政府によるずさんな管理や人々の作業習慣によって大雑把で無駄の多い灌漑方式が採用されてきた。排水量が取水量の60%に達しており、水の浪費となっているだけでなく土壤塩性化といった生態環境の悪化も招いている。農地の平坦化や注意深い作業が求められている。また水田に供給する水の制限、小規模灌漑、フィルム孔灌漑なども節水のための重要な措置となる。

(5) 銀川平原では第一被圧地下水の汲み上げが主流になっている。同平原における当該帯水層は局地的な円錐状低下が発生しており、大量の地下水が過剰涵養されている。銀川地区における地下水は多少なりとも汚染の影響を受けており、水質が良いとは言えない。このため地下水の過剰涵養によって第一被圧地下水の水質が脅威にさらされている。これは銀川市などにおける飲用水の安全に直接関わる問題だ。同問題に関する研究は目下ほとんど行われていない。重篤な問題を未然に防ぐためにも今後重視する必要がある。また污水排出に対する厳格な管理や汚染防止に加えて、污水の浄化処理と再利用による污水の資源化を進めるべきである。

(6) 銀川平原における水や塩の移動は自然や人間活動といった要素の影響を受け、複雑に変化する。同平原における水や土に関する環境モニタリング調査を強化し、長期的なモニタリングや研究を実施すべきである。自然や人間活動が生態環境に与える影響を確実に把握する必要がある。モニタリングは地下水の汲み上げに伴い発生する問題に速やかに対応するための基盤となる。

中国における海水淡水化の進展

•Profile•



馬 敬環 Ma Jinghuan ●天津工業大学環境化学工学部教授

1964年05月生まれ。天津大学において化学工業を専攻し卒業、工学博士の学位取得。主な研究分野は海水淡水化、海水資源の総合利用、油田污水处理、膜分離。2002年から現在まで数多くの重大かつ困難なプロジェクトを進行して完了後、天津市科学委員会の検収を受領済。2006年天津市政府政策諮問専門委員就任。著書多数。

はじめに

中国は水資源に非常に乏しい国であり、一人当たりの淡水資源量は世界平均のわずか1/4にすぎない。そのうえ季節的地域的分布も均等でなく、中国沿海地域は経済が発達し人口も密集しているため淡水資源が非常に不足している。現在、水資源の不足は中国社会経済の持続的な発展を制約する重要な要因の一つとなっている。^[1]全国669都市のうち400都市以上が給水不足であり、そのうち110都市が深刻な水不足に悩んでいる。水資源の不足という問題は沿海の経済の発展した都市で非常に深刻に現れている。また、中国の多くの沿海都市の水資源構造は単一的で過度に地表水に依存しているため、ここ数年地表水の水源がわずかに汚染したり突発的な汚染事故が発生したりすると、給水の水質および安全の問題に対して非常に多くの住民が関心を持つことになる。

いっぽう中国の海岸線は32647kmに達し、海水資源は豊富である。海水の淡水化による水の供給は時間と気候の影響を受けず、安定した水質で水量も十分に供給できる。また、生産される淡水化水の水質は完全に飲用水の水質標準に到達しているどころか、従来の水源や浄水技術によって生産された飲用水よりも優れたものである。ここ数十年の科学技術の進歩に伴い、海水の淡水化技術は急速に発展・成熟し、淡水製造コストは下がり続けている。海水の淡水化技術の発展により水資源の危機を解決するということは、いまや世界各国の共通認識である。よって、海水の淡水化技術を発展させ海水を淡水化して沿海都市の公共用水に用いることは、中国の淡水資源不足問題を解決することに有効であるだけでなく、沿海都市や離島の住民の生活用水の水質を高め住民に水の安全を保証することも可能にするのである^[2]。

1. 中国の海水淡水化の現状

中国の海水淡水化技術の研究は1958年に始まり、2006年6月現在で竣工・生産開始した海水淡水化事業は計41、生産水量は12.0394万m³/dに達している。そのうち25事業は離島の住民への給水に用いられ、水生産能力は合計1.72万m³/dであり、総生産水量の14%を占める。その他は電

力や化学工業など企業の自家用水である^[3]。

政府は第11次5カ年計画の『海水利用特別計画』において以下のように提示している^[4]。すなわち、都市住民への飲用水供給を目標とする大中型海水淡水化重要モデル事業を遂行することは今後数年間の重点課題の一つである。そこで、2010年までに全国のこの種の海水淡水化事業の能力を40～55万m³/d程度に増大させることが計画されている。

さて、天津は中国で比較的早く海水淡水化が実施された地域の一つであり、その海水淡水化技術は中国国内で先導的な水準にある。現在天津市政府は海水淡水化を都市給水の重要な一部とし、天津を中国の海水淡水化モデル都市とすることに決定している。天津は海水淡水化の分野に科学技術開発力を結集し、実り豊かな科学研究的成果を獲得してきた。光栄にも数十の国家級・省部級の科学技術進歩賞を獲得し、2007年には中国一の10000トン級低温多機能海水淡水化モデル事業、2500t/h海水循環冷却モデル事業、1000トン級海水利用開放式テスト基地を完成し、海水淡水化および総合利用技術国際交流プラットフォームを組み立て、海水淡水化発展計画綱要を制定した。また、滨海新区で実力があり新基軸に富んだ海洋科学技術型企業が形成されているように、海水淡水化は新興産業として急速に発展している。海水淡水化においてはすでにある程度の技術的産業的優位が形成されているのである。

従来の海水淡水化法は主に蒸留法と膜法であるが、新エネルギー技術の新しい方法と各種の従来の方法の長所を組み合わせることが今後の海水淡水化技術発展の趨勢である。

表1は中国海水淡水化事業プロジェクトの概況であるが、中国海水淡水化事業プロジェクトの中で逆浸透法が主流を占めていることが容易に確認できる。

2. 現在進行中の海水淡水化プロジェクト

第10次5カ年計画において、中国の海水淡水化は産業化の発展という点で重要な進展を見た。技術的なブレイクスルーを得、規模が絶えず拡大し、コストは大幅に低下

番号	位置	規模/(t/d)	方法	生産開始年
1	西沙永興島	200	電気透析	1981
2	天津大港発電所	2×3000	多段フラッシュ 蒸発	1989
3	浙江舟山嵎山鎮	500	逆浸透	1997
4	浙江舟山馬跡山	350	逆浸透	1997
5	遼寧長海県大長山島	1000+500	逆浸透	1999
6	滄州化学工業公司	1800(飲料水)	逆浸透	2000
7	山東威海華能発電所	2000	逆浸透	2000
8	浙江嵎山嶼礁島	1000(二期)	逆浸透	2002

●表1 中国海水淡水化事業プロジェクト概況^⑤

したのである。海水淡水化の重要性および戦略的意義はますます人々に認識されるところとなり、海水淡水化技術の研究開発、産業促進、事業投資などに対し幅広い注目・関心が集まっている^②。

そこで、水資源不足問題を有効に解決するために、天津は海水淡水化および総合利用プロジェクトを遂行しているところであり、現在各プロジェクトは順調に進行している。このプロジェクトは天津北疆発電所プロジェクト、大港海水淡水化プロジェクト、天津臨港海水综合利用一体化プロジェクト、宝成グループ海水淡水化装備産業プロジェクトなどである。これらは国家第一級の循環経済の試みである。例えば北疆発電所計画は4基の100万kWの火力発電超臨界ユニットと日産40万tの海水淡水化装置を建設するものであり、事業総投資額は260億元である。第一期事業の総投資額は124億元であり、2009年末には発電ユニット一台と海水淡水化装置が組み立てられて生産を開始し、2010年には第一期事業が全面的に竣工して一日20万tの淡水化海水が生産可能になるものと計画されている。プロジェクト完遂後は日産される淡水化海水は40万tであり、北京・天津はこの事業で提供される淡水化海水を使用することができるであろう。

天津臨港海水综合利用一体化プロジェクトの総投資額は32.9億元であり、プロジェクト規模は次の通りである。すなわち、冷却水50万t/d、海水淡水化能力10万t/d、精製塩(99.9%)85万t/aの取水および浄化工程・事前処理工程・淡水化工程・製塩工程・化学製品抽出工程である。また、2007年12月、宝成グループとタイ国サハビリヤ鋼鉄グループは42万t/d海水淡水化(EPC)プロジェクト事業総合協約に署名した。この協約の総額は約60億人民元である。そのうち第一期8万t/d海水淡水化(EPC)プロジェクトは2010年5月に完成するものとして計画されている^⑥。

そして、天津大港新泉海水淡水化有限公司のアジア最大の海水淡水化工場は、2009年7月にすべて完成する予定である。このプロジェクトは天津市大港区海洋石化園区内においてシンガポールのハイフラックスグループの投資により進められ、プロジェクト総投資額は7.5億元、第一期に達成される一日あたりの海水処理能力は10万トンであり、最終的には一日当たり15万トンの処理能力が形

成される。これらは主に落戸園区内の工業プロジェクト用水の需要を満たし、特に園区内に進行中の100万トンのエチレンプロジェクトの組み立てに給水される。さらに、2010年までに天津市は一大海水淡水化モデルプロジェクトを完成させる予定である。完成時には一日あたりの海水淡水化量は50万立方メートル、一年あたりの海水淡水化生産能力は1.5億トン以上、一年あたりの海水直接利用量は40億立方メートル以上にも達する^⑦。

また、青島市は深刻な水不足に悩まされている中国北方の沿海都市の一つである。青島の海水直接利用は一貫して中国上位にあり、現在の海水直接利用総量は毎年10数億tに達し、主に工業冷却水に利用されている。青島市が関係しているスペインと合作の10万 t/dの海水淡水化工場プロジェクトはすでに正式に着工しており、海水淡水化工場は2010年に完成して、運転開始の予定である^⑧。

最後に、舟山市普陀区六横鎮地処六横島は舟山市「三大島」の一つである。舟山市の総合計画に基づき六横島は舟山市または浙江省最大の港湾工業および臨港工業基地として発展していくことが予定されており、舟山市海洋経済発展の重点島である。しかし、六横島の淡水資源は乏しく毎年の降雨量も少ないため住民の生活用水や漁業用水は常に緊張を強いられ、淡水資源は同島の経済的・社会的発展を制約する原因となっている。杭州水処理技術研究開発センター所属会社は、浙江省舟山市六横に10000トン級の海水淡水化事業プロジェクトを入札、落札し、さらに六横自來有限公司との海水淡水化システム事業の合作に調印した。同プロジェクトの総規模は日産淡水10万立方メートルで、三期に分けて実施される。第一期のプロジェクト規模は日産淡水2万立方メートル、総投資額概算1億元であり、2009年に初出水が計画されている。

3. 中国の海水淡水化の発展を制約する要因

中国の海水淡水化産業はいまだその階段を上り始めたばかりである。オリジナルな知的財産である最重要技術は多くを所有しておらず、産業化規模は小さく、いまだコストは比較的高い。また、水の価格形成システムは完成にほど遠く、海水淡水化産業の発展システムも未完成な産業である。

3.1 政策面

コストの違いは、政策の方向付けを決定する重要な要因である。すなわち、中国の水利体制において、もともと水は比較的完成した体系を形成しており、この体系のもとで水は価格的な恩恵という保護を享受してきた。しかし、海水淡水化産業は一つの新興産業であり、従来の水の価格体系の外に独立して存在している。現在の中国では、海水利用奨励政策および法律・規定による奨励が不足している。海水淡水化産業は、すでに、その始まりから完全に原価計算および市場経済方式による発展に基づいている。中国水利市場において海水淡水化産業は「先

天不足」であり、発展初期に制限を受け企業の積極性に影響が及んでいるのである。確かに政府は海水淡水化を奨励し、すでに『海水利用特別計画』に乗り出し、第10次5カ年計画と『当面の重点的国家奨励発展産業、製品および技術目録』に組み込んだ。しかし、にもかかわらず具体的な支援政策が欠けているのである。

政府の説明によると、海水淡水化プロジェクトは非常に大きな財政的支出を必要とし、国家にはこの点について明確な政策と補助金がないため、海水淡水化の民生プロジェクトには困難がつきまとうというのである。一般民衆についていうと、相対的に高い淡水化原価は現在まだ受け入れられがたい。現在海水淡水化民生プロジェクトは、主に極度に水が不足している離島および航行中の船舶で小規模に応用されているだけである。

3.2 価格面

海水淡水化のコストが高すぎるということは、従来の水価格と比較しての話である。水価格の高騰は必然の趨勢であり政府も徐々に水価格市場を開放していこうという考えを持っているものの、これはかなり長期的なスパンでの話である。従来の水価格は国家経済および民衆の生活全体に関連したものであるため、安定的な発展の必要上、水価格市場の開放への道りは相当に長くゆっくりとしたものになるであろう。政策的援助のもと中国は一貫して水の低価格政策を実行してきており、天津のように従来の水価格が全国平均よりも高いところでも住民飲用水の価格が3.6元/トン、工業用水の価格が5元/トンであるのに対し、現在の海水淡水化コストは6元/トンである。経済性から検討した場合、海水淡水化は競争力を備えていないのである。常冬至によると、海水淡水化は市場経済の道を歩んでいるが国家の援助がなく、建設運営コストはすべて淡水化水価格に反映されている。すなわち低い水価格という現状から言うならば、海水淡水化産業の競争力はいまだ低く、コストが産業発展を制約する重要要因となるであろう。

3.3 投資リスク

海水淡水化プロジェクト投資の特徴は、投資額が大きく、周期が長く、かつ回収率が低いというものである。海水淡水化工場一つを建設するのにはともすれば数億、大きなプロジェクトにいたっては数十億の投資が必要であり、海水淡水化は「15年かけてもまだ投資を回収できない」と考える人もいる。この方面では国家の健全な投資保障体系を欠いているので、中国で海水淡水化に従事している企業の大多数はいまだ初歩的な段階であり、このような巨大な投資リスクを受け入れられる企業は存在しない。そのため大型海水淡水化プロジェクトの管理経験も欠いているので、さらに投資リスクは増加することとなる^[9]。

3.4 技術面

現在海水淡水化技術はすでにかなり成熟しており、コ

ストを大幅に下げる余地はそれほど残されていない。現在の海水淡水化コストをさらに1~2元下げることは不可能である。技術コストを下げるためには、別の隘路を開かねばならない。すなわち、プロジェクト技術の集約モデルからエネルギーの消耗と不必要な資源浪費を減少させ、海水の総合循環利用を実現するのである。

循環経済の発展や海洋環境保護の強化という要求によって、淡水化技術の成熟・投入・普及・応用の次に、濃縮海水综合利用技術の開発が重要課題となってきた。海水淡水化の副産物である濃縮海水はナトリウム・カリウム・臭素・マグネシウム・リチウムなどの有用物質を豊富に含み、かつその多くは陸地で得がたい鉱物資源である。濃縮海水中のこれらの化学成分の濃度は普通の海水の約2倍であるので、同じ量の化学資源を得るのに海水を直接処理する場合の半分ですみ、かなりコストを下げるができる。そのほか、濃縮海水を利用して化学資源の抽出を進めることにより海水をくみ上げて塩素殺菌を加えるなどその他の事前処理を行う必要がなくなるため、投資額およびプロジェクト費用を大きく節約することができる。そしてさらに海水淡水化操作過程で発生する濃縮海水の温度や流量パラメータを安定させ、化学資源抽出過程で安定的に操作しやすくすることができる。これらから、淡水化副産物である濃縮海水について化学資源の総合利用を進めることは十分必要であると言うことができる。

中国政府は海水淡水化および综合利用の技術開発を非常に重視しており、国務院発行の『国家中長期科学技術発展計画』において、海水淡水化と海水化学資源利用の技術を重点領域の優先テーマとして列挙している。すなわち、中国国家発展開発改革委員会頒布の『海水利用特別計画』において濃縮海水・海水抽出カリウム・臭素・マグネシウムなどを重点プロジェクトとして列挙しているのである。また、国家科学技術部の第11次5カ年計画国家科学技術支援計画の重点項目中、1万トン級の海水抽出カリウム・千トン級の海水抽出臭素・1万トン級の海水製造マグネシウムが重点課題として列挙されている。大規模海水淡水化プロジェクトの実施にともない、濃縮海水の総合利用も日程に上がってきた。海水の総合利用を実現するには一段ハイレベルな新技術が必要とされるため、われわれは国家科学技術計画の実施に協力し、適宜オリジナルな知的財産権の鍵となる技術・材料・設備を研究開発しなければならない。そして海水淡水化と濃縮海水利用技術の同時的発展を目指すのである^[10]。

4. 海水综合利用技術

本項は海水淡水化の副産物である濃縮海水の综合利用方法案を紹介し、濃縮海水の综合利用技術を発展させることをめざすものである。本課題について、長年にわたって進められてきた海水淡水化過程综合利用技術の研究経

験や国内外の専門家の意見を組み合わせ、われわれは常識的な思考の枠を打ち破った。事前処理過程においてカルシウム・マグネシウムイオン除去、再淡水化を行うことを構想したのである。これは次のような工程をとる。海水→コンクリート+超ろ過+カルシウム除去、→マグネシウム抽出→淡水化→臭素抽出→カリウム抽出→ナノろ過→蒸留、蒸発→液体塩（純塩化ナトリウム）。この工程の長所は次の通りである。

1. 事前処理過程においてカルシウム・マグネシウムイオンを除去し、淡水化過程の負荷を最大限軽減することによって、淡水化のための投資額を減らし、淡水化コストを下げるができる。

膜法淡水化技術において、逆浸透膜圧力を高めやすいカルシウム・マグネシウムイオンを除去することによって膜浸透圧を下げ、同じ圧力で回収率を大きく高めることができる。また熱利用法式淡水化技術において、カルシウム・マグネシウムイオンを除去することによって設備のスケール付着を減らし、伝熱係数を高め造水比を高めて海水淡水化の産水率を大幅に高めることができる。これは淡水化に必要な設備投資を大幅に下げることの意味する（設備の減価償却が淡水化コストに占める割合は非常に大きい）。また、淡水化後産出する濃塩水の濃度を大きく高めて後期蒸発濃縮製塩の投資とコストを軽減することができる。

2. 淡水化後濃塩水から直接臭素・カリウムを抽出できる。

産水率が50%で臭素含有量が0.135mg/Lであり、産水率が55%のとき臭素含有量が0.147mg/Lであれば、空気吹出法による臭素抽出の必要濃度を基本的に満たしている。臭素抽出後の濃塩水は吸着法を利用したカリウム抽出が可能である。

3. ナノろ過は液体塩の品質を保証することができる。

臭素・カリウム抽出後の濃塩水は比較的高濃度の硫酸根を含み、少量のカルシウム・マグネシウムなど二価以上のイオンも含むので、ナノろ過膜技術を利用して二価以上のイオンを有効に阻止することができるが、大部分

を占める一価イオンはナノ膜を透過する。そして溶液中のカリウムイオン・臭素イオンはすでに除去されているので、透過液は比較的高純度の高い塩化ナトリウム溶液となっているはずであり、蒸発濃縮により飽和状態に近くなりソーダ工業に高純度で不純物を除去する必要のない精製された液体塩を提供することができる。また、ナノろ過膜の濃縮液は濃度の比較的高い硫酸根イオンを含むため K_2SO_4 製品の製造が可能であり、同時に副産物としてNaCl製品を生み出し、最終的に残る母液はごくわずかである。ナノ膜の利用によって高純度の液体塩化ナトリウムを得ることができ、また固体塩化ナトリウム・硫酸カリウム製品も得ることができる。すなわち淡水化後の濃塩水はすべて利用できるのである。

4. 液体塩の生産によって工場化製塩が可能となる。

ナノろ過膜透過液は純度・濃度が比較的高い塩化ナトリウム溶液であるはずなので、蒸発濃縮によって飽和に近くなり、蒸発によって過飽和・結晶させて固体の製品を作り出す必要がない。このため飽和塩水により真空塩を生産する投資と運用コストを大幅に節約することができる。これによって本当の意味での工場化製塩を実現できる。また、同時にソーダ工業に高純度で不純物を除く必要のない精製された液体塩を提供ことができ、精製工業塩の投資とコストを減らすことができる。

5. 展望

21世紀に入り、海水淡水化は水資源不足に対処して、水資源問題を解決する重要な手段となるであろう。海水淡水化資源化技術と周辺産業が作り出され、それによる新しい産業間の連携が形成され、経済的で整合のとれた事前処理産業連携と海水総合利用産業との連携が発展するであろう。そして、事前処理・淡水化・総合利用を経た最終段階での海水廃棄ゼロが実現されるであろう。これが将来の海水淡水化の発展の趨勢である。

参考文献

- [1] 高從皆・陳国華ほか、海水淡水化の技術とプロジェクトガイドブック[M], 化学工業出版社
- [2] 劉可・畢学軍、わが国海水淡水化の市政給水利用の発展の展望と問題[J], 西南給排水, 2008, 30 (2) : 20-23
- [3] 譚永文・譚斌・王琪、中国海水淡水化プロジェクトの進展[J], 水处理技術, 2007, 33 (1) : 1-3.
- [4] 国家発改委、国家海洋局和財政部、海水利用専門計画[M], 北京 : 国家発改委・国家海洋局および財政部, 2005.
- [5] 楊尚宝、わが国海水淡水化産業発展の政策思想について[J], 水处理技術, 2008, 34 (1) : 1-2
- [6] 塩業と化学工業[J], 2009, 2 : 23
- [7] 軍民両用技術と生産品[J], 2009, 3 : 26
- [8] 沈鎮平、工業水处理[J], 2008, 28 (11) : 79
- [9] 常冬至、海水淡水化産業を制約する5つの要因、中国投資[J], 2009, 1 : 89-90
- [10] 崔樹軍・韓惠茹、鄧会寧ほか、海水淡水化の副産物である濃縮海水総合利用方案の探求、塩業と化学工業, 2008, 37 (1) : 36-39

日本の水資源の現状と課題

•Profile•

国土交通省水資源部総合水資源管理戦略室

はじめに

我が国では、高度経済成長期における大都市圏を中心とした慢性的な水不足に対応するためにダムなどによる水資源開発が積極的に推進されてきた。近年は、安定成長期に移行し、家庭への節水型機器の普及、工業用水の回収率の向上、水田面積の減少などにより、水使用量は横ばいからやや減少の傾向にある。その結果、ダム等の水資源開発施設の整備がなお必要な地域もあるものの、全体としてはかつてほどの渇水に見舞われることは少なくなっている。

一方、平成19年2月以降順次公表された「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」の第4次評価報告書において、地球温暖化の進行、極端な大雨の頻度の増加、融雪の早期化による干ばつのリスク増加等が指摘されている。

さらに、安全でおいしい水や豊かな水環境等に対する国民の要請が高まっている中で、水資源関連施設の老朽化を背景とした事故や水質悪化の発生リスク、災害時の水供給力低下等の課題への対応が強く求められている。

本稿では、水資源の利用状況と課題を紹介するとともに、水資源に係る課題に対応する、水量と水質、地表水と地下水、平常時と緊急時を一体的にとらえて水資源を総合的にマネジメントする「総合水資源管理」について紹介する。

1. 日本の水資源と利用状況

1.1 水資源賦存量

水資源賦存量とは、理論上人間が最大限利用可能な水資源量であって、降水量から蒸発散量を引いたものに当該地域の面積を乗じて求める。昭和51年から平成17年までの30年間の平均水資源賦存量は、約4,100億 m^3 である。このうち水使用量は約834億 m^3 であり、87%を河川水、13%を地下水に依存している（図1）。

一人当たり水資源賦存量を世界と比較すると、世界平均である約8,600 m^3 /人・年に対して、約3,200 m^3 /人・年と2分の1以下である。なお、FAO（国連食糧農業機関）資料によると中国の水資源賦存量は約28,290億 m^3 、一人当たりの水資源賦存量は2,127 m^3 /人・年である。

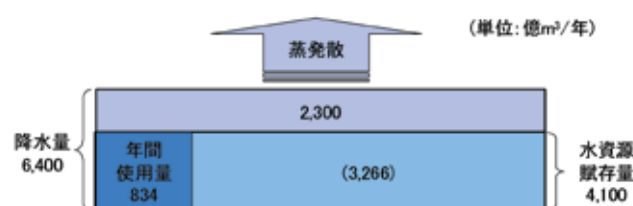


図1 日本の水資源賦存量と使用量

1.2 水資源の利用状況

2005年における水使用量（取水量ベース）は、合計で約834億 m^3 であり、近年横ばいから減少傾向にある。用途別にみると、生活用水と工業用水の合計である都市用水が約285億 m^3 、農業用水が約549億 m^3 である。なお、農業用水の使用量は、実際の使用量の計測が難しいため推計した値である。ここで、工業用水は従業者4人以上の事業所を対象とした淡水補給量である。なお、公益事業（電気事業、ガス供給事業及び熱供給事業）、養魚用水や消・流雪用水等において使用された水量は含んでいない（図2）。

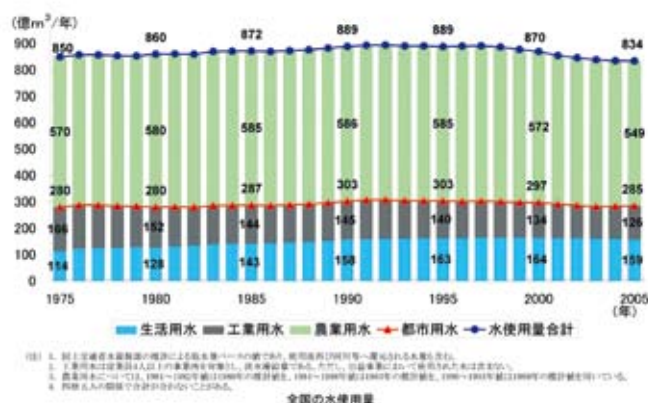
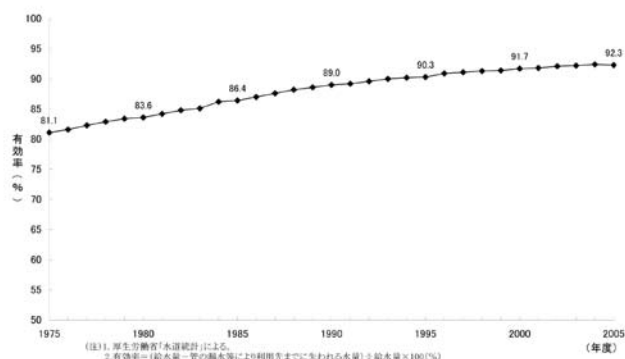


図2 全国の水使用量

(1)生活用水

2005年における生活用水使用量は、約159億 m^3 となっており、近年ほぼ横ばい傾向にある。上水道の有効率は、

漏水防止対策などにより、年々向上しており2005年度には92.3%に達している（図3）。



◎図3 上水道の有効率の推移

(2)工業用水

2005年における工業用水使用量は、30人以上の事業所において、約516億 m^3 である。工業用水においては一度使用した水を再利用する回収利用が進んでいるので、河川水や地下水から新たに取水する淡水補給量は約110億 m^3 である。回収率は年々増加しており、2005年は78.7%であった（図4）。



◎図4 工業用水使用量等の推移

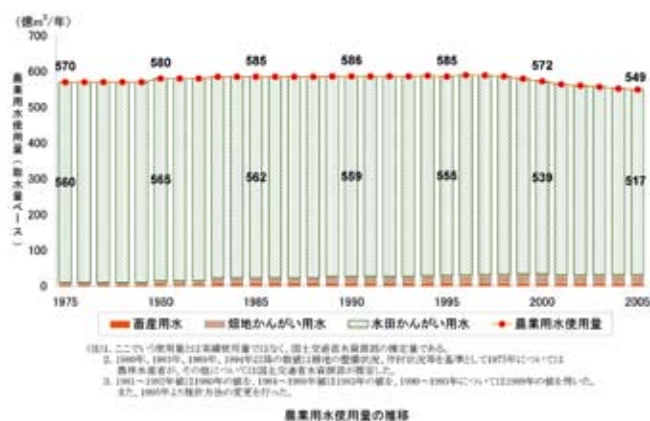
(3)農業用水

2005年における農業用水使用量は約549億 m^3 であり、水田面積の減少により近年使用量が減少している（図5）。農業用水は、水田かんがい用水、畑地かんがい用水、畜産用水に大別され、ここでは耕地の整備状況、かんがいの面積、単位用水量（減水深）、家畜飼養頭羽数などから使用量を推計している。

1.3 水供給の状況

(1)河川水

河川の流量は季節変動が大きいので、年間を通じて安



◎図5 農業用水使用量の推移

定的に水を利用するには、ダムなどの水資源開発施設により流量を安定化させる必要がある。日本のダム等の水資源開発施設による開発水量のうち、都市用水の開発水量は約182億 m^3 /年（2008年3月末）であり、これは都市用水使用量約285億 m^3 /年の64%を占めている。

河川水を取水する場合、水資源開発施設がまだ完成していない状況でもその緊急性等からやむを得ず、河川水が豊富ときだけ取水できる不安定取水を行っていることがある。2007年度末の都市用水の不安定取水量は、全国で約11億 m^3 /年であり、都市用水使用量の約4%に相当する。

(2)地下水

地下水は、個々の使用者が設置した取水施設により直接取水されるため、取水量を正確に把握することは困難であるが、都市用水及び農業用水における地下水使用量は約105億 m^3 と推定され、全使用量の約13%を占めている。都市用水に限ってみると、河川水が約75%、地下水が約25%となっている。

(3)下水・産業廃水等の再生利用

水資源の有効利用及び水環境の保全等の観点から、下水処理水や産業廃水の再生利用が行われている。下水処理水は、2005年度には約138億 m^3 発生し、約2.0億 m^3 が再利用されている。

(4)雨水利用

雨水利用は、2005年度末、全国で1,628施設において、水洗トイレ用水等の雑用水として利用されており、施設数は年々増加している。

(5)海水の淡水化

海水から塩分等を除去し淡水を得る技術が海水淡水化技術であり、これらの海水淡水化プラントは、全国で約21万 m^3 /日の造水能力に達している（2008年3月末時点）。このうち、水道事業等における海水淡水化プラントの2006年度の稼働実績は約1,601万 m^3 となっている。

2. 水資源管理をとりまく主な課題

(1) 気候変動による水資源への影響

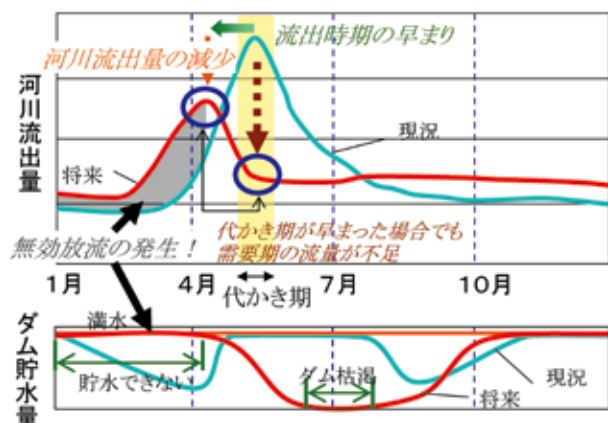
近年、少雨化や降水量の変動の増大によって既に水利利用の安定性が低下しているところであり、地球温暖化の進行により、今後水資源にさらに深刻な影響が及ぶことが懸念される。

今後数十年～百年を見通した我が国の気候変動に関する予測研究によれば、約百後には、冬季、春季に西日本を中心に少雨傾向となり、また、日降水量が100mm以上の年間日数、無降雨日数ともに増加すると予測されている。中でも、夏季については降水量の増加とともに変動幅も拡大することが予測され、大渇水の発生が懸念される。

また、気温上昇により積雪量が大きく減少し、融雪時期も早まると予測される。このため水資源を雪解け水に依存している地域においては、代かき期などの水の需要期の河川流量が減少して水不足が発生するおそれがある(図6)。

温暖化による水質への影響については、未解明な部分が多いが、水温上昇等によって水の安全面や水のおいしさ、生態系への影響が懸念される。

加えて、海面上昇によって沿岸部の地下水が塩水化し、水利利用に影響を及ぼすおそれがある。



◎図6 温暖化後の河川流出量（想定）

(2) 安全でおいしい水、豊かな環境への要請

河川や湖沼の水質は、下水道の整備や排水規制の強化等によって、全体的に改善傾向にある。しかし、湖沼では環境基準達成率が低くとどまり、河川においても渇水年には環境基準達成率が低下しているため、引き続き水質向上への取り組みが必要な状況である。一方で、安全でおいしい水、豊かな水環境、生態系への配慮に対する要請は高まっている（表1）。

(3) 施設の老朽化の進行等による施設機能低下と大規模地震等による水供給障害リスクの増大

高度経済成長期以降、急ピッチで整備が進められた施

自然保護に最も力を入れた地域	平成13年	平成18年
メダカやホタルなどの昆虫・小動物が生息している里地や里山の地域	41.7%	45.0%
都市やその周辺の緑地や水辺などの自然が残っている地域	22.9%	33.2%

(出典)「自然の保護と利用に関する世論調査」(内閣府)をもとに国土交通省水資源部作成

◎表1 水と関わる豊かな暮らしへのニーズ

設の老朽化が進行している。ひとたび大地震が発生すると施設の破損により、断水など市民生活や社会経済活動に大きな影響が及ぶ。大規模な地震が発生する危険の高まり、建設後年数の経過する施設の増大等を受けて、震災・事故時の水供給及び排水機能の低下が懸念されている。

(4) 水源地域を始めとする流域の保全

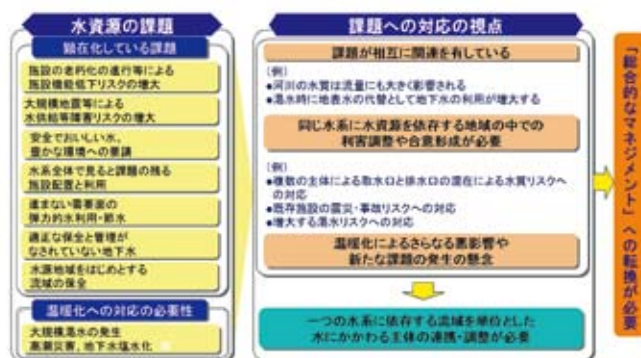
都市への人口や産業の集中などを背景に、河川流量の減少、湧水の枯渇など流域における水循環に問題が生じている。また、ダム上流の水源林などは土砂、流木の流出防止を通じて、水源の保全、ダム機能の維持などに寄与しているが、水源地域の過疎化・高齢化により、水源を支えていくことが困難な状況となっている。

3. 今後の水資源政策 -総合水資源管理への転換-

3.1 総合水資源管理とは

水資源が直面している課題は前項で述べたように多岐にわたっており、相互に関連している。また同じ水系に水資源を依存する地域のなかでの利害調整や合意形成などが必要なものが少なくない。さらに、地球温暖化の進行は、これらの課題にさらに悪影響を与えることが予想されるうえ、これまでなかった新しい課題を発生させる可能性も否定できない。

このような状況に対応するためには、従来行われてきた、個々のテーマへの対応や個別施策分野ごとの対応にとどまらず、関係主体が連携・調整しながら分野横断的な対応・対策を適切に組み合わせ、適切な順序で施策を行うことが必要である（図7）。

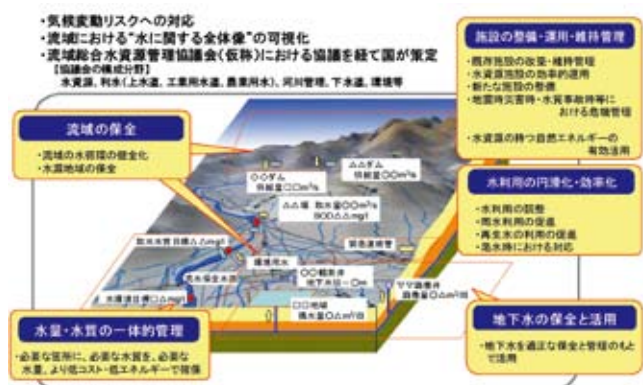


◎図7 総合水資源管理への転換の必要性

「総合水資源管理」とは、水循環の基本となる流域を単位として、水量と水質、平常時と緊急時、地表水と地

下水・再生水，上・中・下流，現在直面している課題と将来予想される課題等を包括的・一体的に捉えて水資源を総合的にマネジメントする方策である。

総合水資源管理の各施策は，基本的には各分野の行政主体，利水者等が行うが，水資源に係る課題が共有され，各主体の施策が円滑かつ調和のとれた形で推進されることが望まれる。そのため，流域を単位とした水資源の関係者が話しあう常設の場を設け，そこでの協議・合意を得てマスタープラン（流域総合水資源管理基本計画（仮称））を作成し，施策が推進されることが考えられる（図8）。



◎図8 流域総合水資源管理基本計画（仮称）の概要

3.2 総合水資源管理の具体的な施策

(1)施設の整備・運用・維持管理

大地震，事故等の緊急時の対応として，流域全体のリスク分析を踏まえた施設の改築・耐震化，広域水融通可能な緊急連絡管の整備，予備取排水口等の整備，災害発生時の水輸送体制の確立（水輸送バグの配備等），想定被災地での水備蓄（応急給水槽等），対応マニュアルの明確化等が必要である。また，水利用の安定性を確保するために，既存施設を活用して供給能力を増大させる方策が必要である。具体的には，ダム嵩上げによる利水容量の増大や複数のダムを導水管で結ぶダム群連携，ダムの統合運用等の施設の運用方法の改善，ダム間の容量を振り替えるダム群による供給能力の向上が考えられる。

(2)水を大切に使う社会の構築と安定した水資源確保

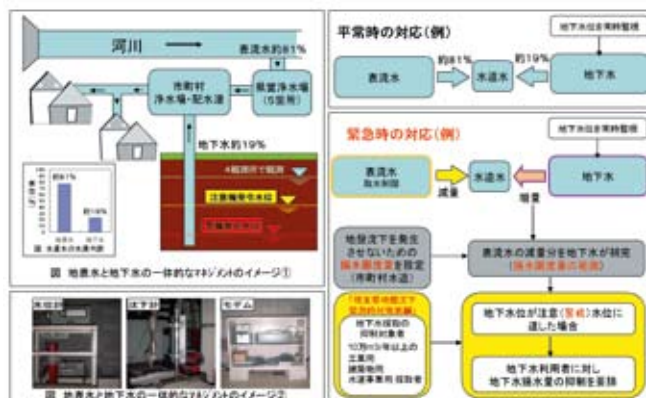
安定した水資源の確保のため，利水者の効率的な水管理や，円滑な水利調整など限りある水資源の合理的な活用が求められる。また，雨水・再生水は，現在は計画的な普及が図られていないため，渇水時を含めた緊急時の水源として位置づけることが考えられる。

(3)水量・水質の一体的管理

水質は水量と密接に関係するので，水源である森林や農地，都市を含む流域全体で，関係者が連携調整のもと，下水道整備，排水規制，面源対策などの水質の施策と水量の施策とを相互に調整をとりながら効果的に進めていく，水量・水質の一体的管理が必要である。

(4)地下水の管理

地下水は，地表水と並んで水循環を構成する重要な要素である。過剰な地下水利用は，地盤沈下につながることから，その影響を十分に把握しつつ，持続可能な形で適正な保全と管理のもとに活用を図ることが必要である。地下水については，現状では各種データの整備が不十分であることから，組織的なデータの蓄積・分析，情報共有などの仕組みづくりを行い，適正な管理を図っていくことが必要である（図9）。



◎図9 地下水の適正な管理（埼玉県の例）

(5)流域の保全

水は生物の生存基盤であることから，生態系にも配慮し，環境用水の導入，河川流況の改善などにより豊かな水環境を保全・創出することが必要である。

また，水資源の起点である水源林の保全，水源林を支える水源地域の活性化のため，流域の自治体の負担金の拠出等による水源林の間伐や人材育成などの上下流連携が求められる。

3.3 総合水資源管理の措置・体制

(1)総合水資源管理協議会（仮称）

総合水資源管理では，平常時と緊急時，地表水と地下水や水量・水質の一体的管理など，これまで以上に流域の具体的な事情を踏まえた詳細な施策について，関係主体とのきめ細やかな調整を行いながら検討し，合意を形成して，流域総合水資源管理基本計画（仮称）に位置づけることとなる。

また，同計画に掲げた施策の実施にあたっては，当該流域の関係主体が密接に協議しながら進めていくことが必要である。

このため，同計画の策定及び実施にあたっては，計画の内容及び計画に掲げた施策の実施について協議するため，当該流域を単位として，関係主体による常設の流域総合水資源管理協議会（仮称）を設けることが必要である。

(2)情報の共有と公開

流域総合水資源管理基本計画の策定段階では，施策案の効果や影響がシミュレーションで定量的に試算され，

協議会で様々な角度から検討されることが重要である。また、施策を円滑に実施するためには、流域住民の理解と協力が不可欠であり、必要な情報が広く一般に公開されていることが必要である。

しかし、地表水、地下水、下水処理水の水量、水質の情報は、現在一部がインターネット上で公開されているものの、関係機関への報告や年次報告などの公表資料への掲載にとどまっているものも多い。

そのため、地表水や地下水を大量に利用する者に取水量や地下水採取量の報告や公開を、関係行政機関にも河川水位、水量、水質、ダムからの放流量などのオンラインでの公開を、準備のための期間に配慮しつつ義務づけるとともに、情報を公開するためのデータベース、クリアリングハウス、情報のモニタリング体制の構築が求められる。

4. おわりに

水資源が直面している様々な課題は、極めて多岐にわたっている上に相互に深く関係しており、関係者間での利害調整や合意形成などが必要なものが多い。総合的水資源管理の具体化に向けては、関係する主体の意見を幅広く聴きつつ、概念・内容を精査していく必要がある。

なお、国土交通省水資源部ホームページで、総合水資源管理への転換をテーマとした「平成20年版日本の水資源」及び国土審議会水資源分科会調査企画部会でとりまとめた「総合水資源管理について（中間とりまとめ）」をご覧いただけるので、あわせてご参照いただければ幸いです。

参考URL

・国土交通省水資源部
<http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/index.html>

海水淡水化技術の普及状況と課題

•Profile•



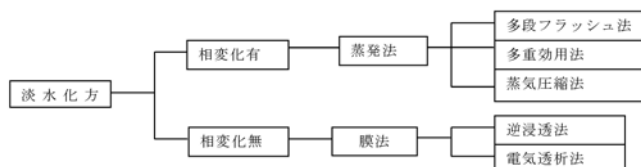
平井 光芳 ひらい・みつよし ●財団法人造水促進センター淡水化技術部長

昭和48年3月神奈川大学工学部応用化学科卒業。昭和50年4月（財）造水促進センター 入所。平成16年4月～（財）造水促進センター淡水化技術部長。造水促進センター淡水化技術部に所属し、逆浸透法海水淡水化を中心とした淡水化技術の開発事業、国内自治体等の海水淡水化計画、海水淡水化デモンストレーション等の普及事業を行っている。また、海外の海水淡水化技術動向調査、海水淡水化研究協力事業、海水淡水化FS調査等を行っている。

1. 淡水化方式と設置状況

これまでに開発されたおもな淡水化方式を図1に示す。このうち実用プラントに採用されている淡水化方式は、多段フラッシュ法、多重効用法、逆浸透法が主なものとなっている。これらの方式のうち多段フラッシュ法及び多重効用法は蒸発法に分類される。その原理は海水を加熱して蒸気を発生させ、その蒸気を凝縮して淡水を得る方法である。一方、逆浸透法（RO）は膜法の1つとして分類され、その原理は海水に圧力をかけて、その圧力のある海水を、特殊な膜（水は通すが水の溶解している塩類は通しにくい性質を有する膜；半透膜という）を用いて真水のみを透過させて淡水を得る方法である。また、膜法に分類される電気透析法は、特殊な膜（溶解した成分の荷電で選択的に透過させるか阻止するかの2種の電気透析膜）を交互に並べて、海水を入れたそれら部屋の両側に電位を与えて、希薄部と濃縮部に分離されることを利用し、希薄部から真水を取り出す方式である。その他の方式として、冷凍法、透過気化膜法（膜蒸留法）があるが、実験研究を除き実施例はほとんどない。

このように、淡水化システムの主要エネルギーとして蒸発法では熱エネルギーが、逆浸透法ではポンプを駆動する電気エネルギーが用いられる。



◎図1 実用化されている淡水化方式の分類

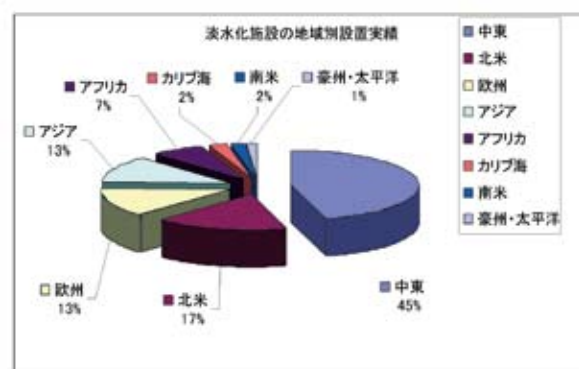
淡水化プラントの記録をみると、世界最初の淡水化プラントは、1944年イギリスに設置されている。現在、世界最大の海水淡水化プラントは、1985年に全施設が完成したサウジ・アラビアのアルジュベールにある46基100万m³/日多段フラッシュ蒸発法プラントである。逆浸透法では、イスラエルのアシュケロンにおいて40基 約400,000m³/日の海水淡水化プラントが、アルジェリアに

おいて計1,000,000 m³/日に達する海水淡水化プラントが2007年から2008年にかけて稼動している。

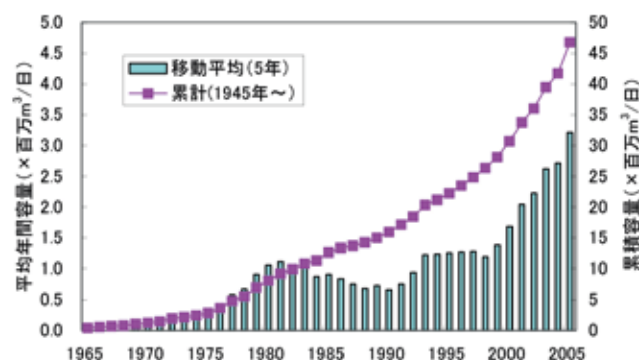
2. 世界の状況

(1) 全体（以下は2005年末契約ベースで集計されたもの）

海水淡水化、かん水淡水化、超純水用脱塩等の淡水化の需要は、中東湾岸諸国、地中海沿岸、北アフリカ等の需要増及び既存施設の更新需要によって、1945年からの累積容量が2005年末契約で4,700万m³/日、2005年運転開始4,000万m³/日となった。近年は毎年10%以上の伸び（毎年200万m³/日以上）を続けていている。今後、2010年まで平均年率12%で成長するとされ、2010年までに6,300-6400万m³/日に、2015年には9,400-9800万m³/日になると予測されている。



◎図2 世界の淡水化施設の地域比率

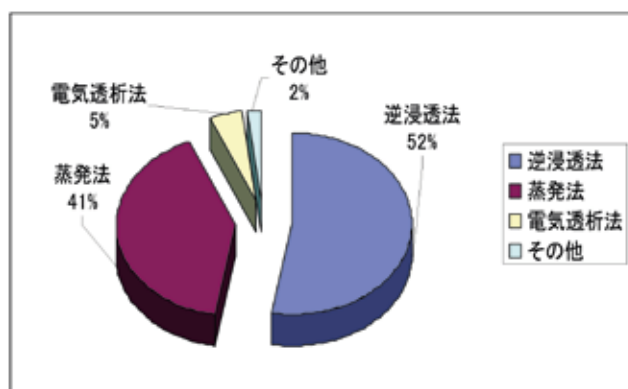


◎図3 世界淡水化施設契約実績の伸び（累積）

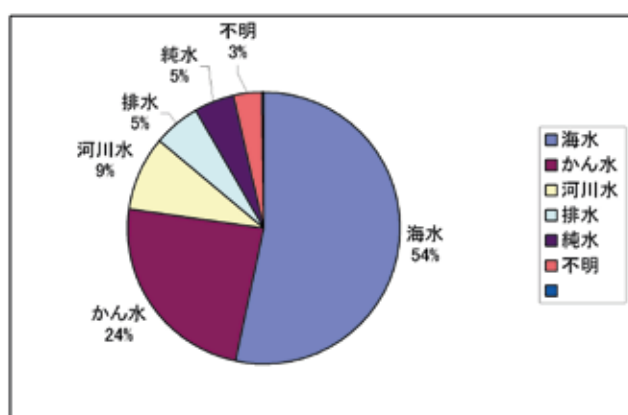
	Gulf Countries	Rest of the World	Total
2006	17,621,894 m ³ /d	24,935,321 m ³ /d	42,557,214 m ³ /d
2007	19,031,645 m ³ /d	26,930,146 m ³ /d	45,961,791 m ³ /d
2008	21,505,759 m ³ /d	30,027,113 m ³ /d	51,532,872 m ³ /d
2009	24,516,565 m ³ /d	33,630,367 m ³ /d	58,146,932 m ³ /d
2010	26,725,428 m ³ /d	37,589,038 m ³ /d	64,314,466 m ³ /d
2011	28,863,462 m ³ /d	39,844,380 m ³ /d	68,707,843 m ³ /d
2012	30,595,270 m ³ /d	43,549,908 m ³ /d	74,145,178 m ³ /d
2013	32,736,939 m ³ /d	47,730,699 m ³ /d	80,467,638 m ³ /d
2014	35,355,894 m ³ /d	52,981,076 m ³ /d	88,336,970 m ³ /d
2015	38,350,428 m ³ /d	59,184,038 m ³ /d	97,534,466 m ³ /d

◎表1 湾岸諸国とその他の地域の設置予測（2006年以降）

特に、逆浸透法が急速に増加しており、2005年末現在、逆浸透法(ナノ膜を含む)が蒸発法を追い越し全体の52%に達している。



◎図4 世界の淡水化施設の方式別納入実績



◎図5 淡水化の原水比率

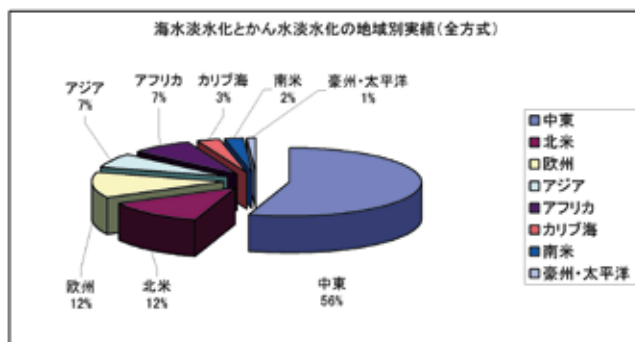
淡水化の原水は図5に示すように、海水とかん水（海水より薄いもの）、河川水等が使われるが、海水とかん水が全体の78%を占める。

(2) 海水及びかん水の淡水化

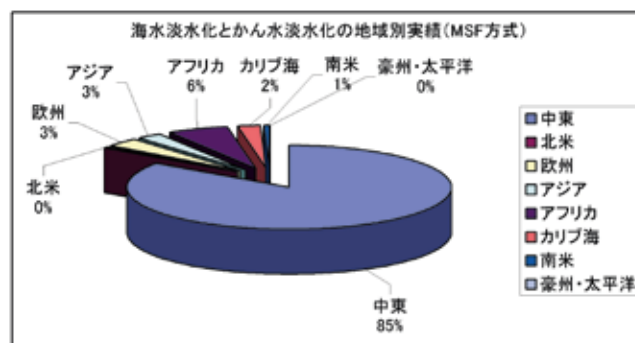
淡水化の中で、海水及びかん水を原料とする施設に絞っ

てみると、地域では中東が56%、北米、欧州がそれぞれ12%、アジア、アフリカが7%となっている。

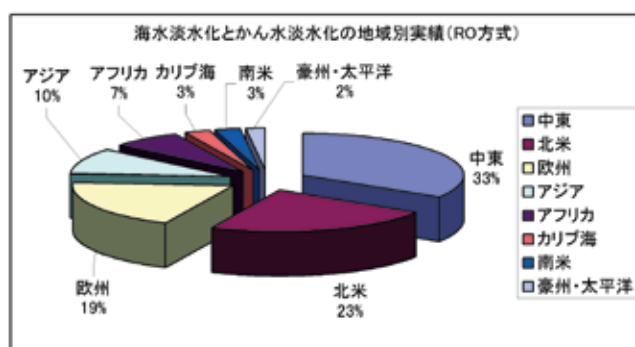
淡水化方式別に見るとMSF方式は中東地域が85%と大多数を占め、MED法及び逆浸透法では中東地域において、それぞれ39%、33%であり、北米、欧州、アジアが10～23%を占めている。



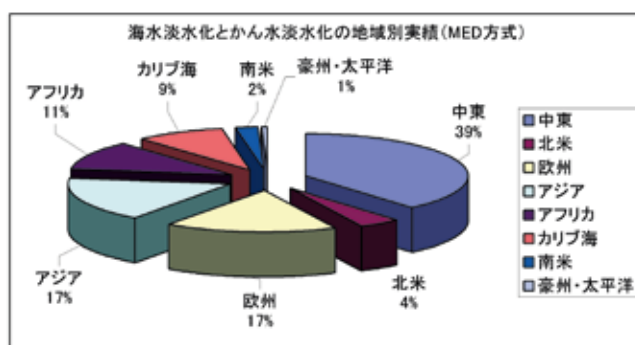
◎図6 淡水化施設の地域別比率（全体）



◎図7 淡水化施設の地域別比率（MSF方式）



◎図8 淡水化施設の地域別比率（RO）



◎図9 淡水化施設の地域別比率（MED方式）

3. 日本の状況

日本国内では、温帯域での台風、降雪、低気圧等でもたらされる水資源を有効に活用するよう主要な河川にダム等の施設が作られており、一部の地域を除き、水需給バランス上からの新規水源の要求は少ない。一方、沖縄

をはじめとした南西諸島、瀬戸内海地域の島嶼部での海水がこれまで問題となり、これらの地域では海水淡水化が導入され、水需給バランスは良好であるといえる。

現在、国内の民生用（飲料水、レジャー施設用水を含む）として65施設、141,312m³/日、うち、海水を原水とする

◎表2 2006年以降に運転または開始される大型施設(10万m³/日以上)

国名	契約年	運開年	プラント名	容量	方式	メーカー	ユーザー	状態
Algeria	2004	2007	Beni Saf	200,000	SWRO	Geida (Befesa/Cobra-Tedagua/Sadyt)	SONELGAZ/SONATRACH	Construction
	2005	2007	Cap Djinet	100,000	SWRO	Inima/Spa/Aqualia	SONELGAZ/SONATRACH	Online
	2005	2007	Mostaganem	200,000	SWRO	Inima/Spa/Aqualia	SONELGAZ/SONATRACH	Construction
	2004	2007	Skikda	100,000	SWRO	Geida (Befesa/Cobra-Tedagua/Sadyt)	ALGERIAN ENERGY COMPANY (AEC)	Online
	2005	2008	Tlemcen	200,000	SWRO	Geida (Befesa/Cobra-Tedagua/Sadyt)	ALGERIAN ENERGY COMPANY (AEC)	Construction
	2005	2008	Tlemcen-Hounaine	200,000	SWRO	Geida (Befesa/Cobra-Tedagua/Sadyt)	SONELGAZ/SONATRACH	Construction
Bahrain	2006		Hidd	409,265				Contracted
China	2004	2006	Tianjin	100,000	SWRO	Hyflux	Dagang District	Online
India	2005	2007	Chennai - Minjur	100,000	SWRO	Befesa	CMWSSB	Construction
Kuwait	2004	2007	Subiya 1+2	227,300	MSF	Doosan	MEW KUWAIT	Online
	2005	2008	Subiya 3	227,300	MSF	Doosan	MEW KUWAIT	Online
Oman	2004	2006	Sohar	159,110	MSF	Doosan	Ministry of National Economy	Online
Qatar	2005	2008	Ras Abu Fontas B2	136,380	MSF	Fisia Italimpianti	MEW QATAR	Construction
	2005	2008	Ras Laffan 2	272,760	MSF	Doosan		Construction
Saudi Arabia	2005	2008	Rabigh	200,000	SWRO	Mitsubishi	Rabigh Water and Electricity Company (RAWEC)	Construction
	2005	2009	Shoaiba 3	880,000	MSF	Doosan	WATER AND ELECTRICITY COMPANY (WEC)	Online
	2006		shuqaiq	214,000	SWRO	Mitsubishi		Contracted
Singapore	2005	2006	Ulu Pandan	116,000	RO(WW)	Keppel Engineering	NEWater	Online
Spain	2005	2007	Valdelentisco	140,000	SWRO	Cadagua	ACSEGURA	Online
UAE	2005	2008	Al Taweelah B3	314,600	MSF	Fisia Italimpianti	ABU DHABI WATER & ELECTRICITY AUTHORITY	Online
	2005	2008	Jebel Ali L2	250,000	MSF	Fisia Italimpianti	DUBAI ELECTRICITY AND WATER AUTHORITY	Online
	2005	2007	Jebel Ali (private de	113,500	SWRO	ITT Aquious	DUBAI ELECTRICITY AND WATER AUTHORITY	Construction
	2003	2006	Umm Al Nar	115,244	MSF	Hitachi Zosen	ABU DHABI WATER & ELECTRICITY AUTHORITY	Online
United Kingdom	2004	2006	Beckton	150,000	BWRO	Acciona Water/Interserve	Thames Water	Online
USA	2001	2006	El Paso	125,000	BWRO	Biwater AEWT	El Paso Water Utilities	Online

(参考資料)

- (1) The 19th IDA Worldwide Desalting Plant Inventory, (Global Water Intelligence,), August 2006,
- (2) Desalination Markets 2007, A Global Water Intelligence Publication

ものが99,767m³/日、工業用として29施設、78,106m³/日、うち、海水を原水とするものが36,500m³/日が設置されている。最初に淡水化施設を導入したのは長崎県の松島炭坑池島鉱業所である。1967年に生産水量2,650m³/日の蒸発法多段フラッシュ法プラントが設置された。前年に日本メーカーが海外で初めてサウジ・アラビアに納入した海水淡水化プラントと同型のものである。

現在、日本で最大規模の淡水化施設は2005年5月から供用開始した海の中道奈多海水淡水化センター（福岡地区水道企業団）の5万m³/日と、1996年2月から供用開始の沖縄県企業局海水淡水化センター 4万m³/日の逆浸透法海水淡水化プラントである。

4. 世界の淡水化事業

2006年以降に運転開始されるプラントを見ると、アルジェリアで、10～20万m³/日のROプラントが一部稼働し、サウジアラビアでも20～80万m³/日のROとMSFのプラントが建設される。アラブ首長国連邦（UAE）でも10～30万m³/日のROとMSFのプラントが建設される。その他の湾岸諸国を中心に大規模なものが各地で検討されている。

これらの将来計画のほとんどは、発電のための化石燃料プラント建設計画に淡水化施設が併設されるという二重目的プラントの事業形態である。

5. 日本企業の展開

中東地区における発電・造水大型プロジェクトについては民営化を反映して、いくつかの大型プロジェクトが日本の商社を中心とした事業活動として行われている例を下記に示す。

(1) アラブ首長国連邦「ウム・アル・ナール発電・海水淡水化プロジェクト」

東京電力（株）、三井物産（株）と英国の国際ナショナルパワー社からなるコンソーシアムが受託したもので、UAEの首都であるアブダビ市近郊のウム・アル・ナール地点において、出力85万kWの火力発電設備と日量75万トンの海水淡水化プラントの買収と、新規の出力155万kWの火力発電設備と日量11万トンの海水淡水化プラントを建設するもの。

- ① 事業形態：20年間のBOO (Build-Own-Operate) 方式、
- ② 電力と水の販売先：アブダビ水電力会社（ADWEC）
- ③ 出資比率：投資会社（IP社50%、東京電力35%、三井物産15%）が40%、ADWEAが60%を出資して、アブダビにプロジェクト会社（Arabian Power Company）を設立。
- ④ 運転保守：運転保守会社（ITM O&M Company Limited）出資（東京電力が30%、IP社が70%）
- ⑤ 完成時期：2006年6月（一部2005年6月）
- ⑥ 総事業費：2,500億円
- ⑦ 発電規模：85万kW+155万kW

- ⑧ 造水施設規模：75万m³/日+11万m³/日（新規分）
- ⑧ 淡水化方式：SWRO
- ⑨ 淡水化プラントメーカー：日立造船（株）[東レ（株）]

(2) アブダビ、タウィーラ発電・造水プロジェクト

丸紅（株）、日揮（株）、ビーティーユー社（BTU社、米国）及びパワーテック社（マレーシア）と連合で、落札したもので、アブダビ、タウィーラ地区（アブダビ北東約80Km）にて、既設100万kW火力発電設備および日量45万トンの造水設備の買収と新規100万kW複合火力発電設備および日量30万トンの造水設備の新設するもの。

- ① 事業形態：20年間のIWPP方式、
- ② 電力と水の販売先：アブダビ水電力会社（ADWEA）
- ③ 出資比率：丸紅・日揮連合が40%、ADWEAが60%を出資
- ④ 完成時期：2008年7月（一部事業開始2005年4月）
- ⑤ 総事業費：30億ドル（約3,300億円）
総事業費のうち20億ドルを国際協力銀行及び国際商業銀行団（8カ国より15行が参画）。
国際協力銀行は12億ドルの融資を供与。
国際協力銀行のプロジェクトファイナンス案件での融資額では、過去最大級
- ⑥ 発電規模：100万kW+100万kW
- ⑦ 造水施設規模：45万m³/日+30万m³/日（新規分）
- ⑧ 淡水化方式：MSF
- ⑨ 淡水化プラントメーカー：Fisia Italimpianti

(3) バーレン国、ヒッド発電・造水プロジェクト

住友商事（株）、インターナショナルパワー社（英国）、スエズ・トラクテルベル社（ベルギー）が落札したもので、バーレン、ヒッド地区にて稼働している既存の約1,000MW複合火力発電プラント及び日量13.5万トンの造水プラントの買収、日量27万トンの造水プラントを増設。

- ① 事業形態：20年間、IWPP方式、
- ② 電力と水の販売先：バーレン電水省
- ③ 出資比率：住友商事30%、インターナショナルパワー社40%、スエズ・トラクテルベル社30%
- ④ 完成時期：2007年11月
- ⑤ 総事業費：13億ドル（約1430億円）
- ⑥ 発電規模：1000MW
- ⑦ 造水施設規模：40.5万m³/日
- ⑧ 淡水化方式：MSF
- ⑨ 淡水化プラントメーカー：Fisia Italimpianti

(4) カタール国、メサイッド工業地区発電・造水プロジェクト

丸紅（株）カタール石油及びカタール発電造水会社が落札したもので、カタール国ドーハ市近郊に位置するメサイッド工業地区において2000MW（200万キロワット）の発電設備を新設。

- ① 事業形態：20年間、IPP方式、
- ② 電力の販売先：カタール水電力公社

- ③ 出資比率：住友商事30%、インターナショナルパワー社40%、スエズ・トラクテベル社30%
- ④ 完成時期：2010年4月
- ⑤ 総事業費：23億ドル（約2,530億円）
- ⑥ 発電規模：2000MW（200万キロワット）
- ⑦ 造水施設規模：18.1万m³/日
- ⑧ 淡水化方式：MSF
- ⑨ 淡水化メーカー：Fisia Italimpianti

(5) サウジアラビア、ラビーク造水プロジェクト

丸紅、日揮、伊藤忠商事および現地の独立系発電事業者ACWAパワー社からなる企業連合が落札したもので、サウジアラムコ社と、住友化学が合併で進める世界最大級の石油精製・石油化学プラントに、電気・水・蒸気を25年間にわたり供給するもの。

発電・造水設備はラービグ地区（紅海沿岸、ジェッダの北約140km）に建設。60万kW火力発電設備、毎時470トンの蒸気を発生させる重油焚きボイラー9台と、12万kW蒸気タービン5台、発電機5台、19.2万m³/日逆浸透法プラント。

- ① 事業形態：25年間、電気、水、蒸気の供給、BOOT
- ② 販売先：ラービグ・リファイニング・アンド・ペトロケミカル・カンパニー社
- ③ 出資比率：丸紅、日揮、伊藤忠商事および現地の独立系発電事業者ACWAパワー社
- ④ 完成時期：2008年6月
- ⑤ 総事業費：不明
- ⑥ 発電規模：600 MW（60万キロワット）
- ⑦ 造水容量：7,405トン/時（17.8 トン/日）
- ⑧ 蒸気：1,655トン/時
- ⑨ 淡水化方式：逆浸透膜方式
- ⑩ 淡水化プラントメーカー：三菱重工業（株）

(6) サウジアラビア、シュケイク造水プロジェクト

三菱商事、ガルフ・インベストメント（湾岸諸国が共同出資する投資会社）及びアクワ・パワー社（サウジの水事業会社）3社連合が落札したもので、シュケイク（イエメン国境に近い紅海側の都市）に85万kW発電設備と、17.8万m³/日海水淡水化設備を新設し、2010年からサウジ電力・水公社に20年間供給する。

- ① 事業形態：20年間、電気、水供給、IWPP
- ② 販売先：サウジ電力・水公社
- ③ 出資比率：3社60%、サウジアラビア政府：40%
- ④ 完成時期：2010年
- ⑤ 総事業費：約20億ドル（約2,300億円）
- ⑥ 発電規模：850MW（85万kW）
- ⑦ 造水施設規模：17.8万m³/日（21.2万m³/日）
- ⑧ 淡水化方式：逆浸透膜方式
- ⑨ 淡水化プラントメーカー：三菱重工業（株）

6. 逆浸透法海水淡水化施設普及の技術的課題

世界における海水淡水化施設の最大市場である中東産油国では蒸発法による淡水化が主流であり、エネルギー消費および建設費の少ない多重効用蒸発法(MED)の大型化が進展するにつれて現在支配的である多段フラッシュ蒸発法(MSF)に置き換えられる傾向が見られる。また水と電力の需給バランス改善の目的で蒸発法と逆浸透法のハイブリッド方式が採用されつつあるのが最近の実態である。

一方、中東産油国を除く世界各国は投資額、エネルギー消費の点で蒸発法よりも優位な逆浸透法が主流を占めている。例外的に今まで経済封鎖されていたリビアでは逆浸透法に注目が集まっており、欧米企業から着目されている。

表1に示したように、エネルギー消費の点で優位を占める逆浸透法海水淡水化施設の大規模プラントが中近東地区にも設置されているが、前述したように全体では蒸発法(MSF+VC+MED)の1/3に留まっている。これは逆浸透法海水淡水化施設がこの地域での実績面で信頼性に問題があったことにも関係がある。

7. 今後の動向

海水淡水化施設の普及促進には淡水化コストの低減とプラント性能の安定化、運転維持管理の容易さの確立が必須であり、蒸発法、逆浸透法とも相互に競合しながら今後とも技術開発が促進されていくものと思われる。

特に中近東地区では海水濃度も標準海水より高く、水温も高いので逆浸透法にとっては厳しい条件となり、膜汚染を惹き起こす微生物対策も重要な課題である。

コスト低減のシステムとして最近では蒸発法と膜法のハイブリッド方式が着目されておりUS 0.5 \$/m³以下の造水コストまで低下して海水淡水化施設普及に拍車がかかっている。

しかしながら、原油の高騰、金属材料の逼迫などにより運転費、建設費の上昇要因があり、最近では、US 1.0 \$/m³以上の造水コストまで増加しており、今後は造水コストを低位に維持することは困難なことが予想される。

水需給の現状と将来については地域差があり、一律に論じられないが地球全体で見ると急速な人口増加、文明の発展にともなう水需要増加、降水量の低減・砂漠化による水源不足が予測され、水需給バランスは厳しい状況にあり、生活用水、工業用水を海水淡水化に依存する地域が存続することは今後も変わらないものと思われる。

水不足問題の解決に貢献する膜技術

•Profile•



松山 秀人 まつやま・ひでと ●神戸大学大学院工学研究科 教授 先端膜工学センター センター長

1960年4月生まれ。1985年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。2004年10月より現職。2007年4月先端膜工学センターセンター長。1992年化学工学会奨励賞受賞。1997年日本膜学会研究奨励賞受賞。2009年化学工学会研究賞受賞。

1. はじめに

機能性膜技術は、水資源確保、大気環境保全や水素エネルギー有効利用といった環境・エネルギー分野において今後ますますその重要性を増すものと期待されている。膜のこれらの応用の中で特に水処理への関心が、最近急速に高まっている。図1には、2025年における世界の水不足予測を示す。中近東はもとより、アメリカ、中国、オーストラリア、ヨーロッパ等の広範な地域での水不足（高い水ストレス）が予測されている。20世紀は「石油の時代」であったのに対し、21世紀は「水の時代」と言われる所以である。

水不足問題は、食糧問題・エネルギー問題と一体化して解決すべき世界的課題であり、現在最も早急に解決を迫られている環境問題の一つとすることが出来る。

2. 膜を用いた水処理技術

水不足を解決する手段としては、膜技術がその根幹をなすものと言え、膜を用いた水処理は現在多くの関心を集めている。新しい膜がどんどん開発されていた時期の後の、第2期のブームが現在到来しているように思われる。例えば水処理膜の普及状況としては、年率25%以上で伸長しているという報告がある¹⁾。このような水処理膜分野では、日本企業のシェアが全体で60%とかなり高く、特に海水の淡水化用膜では70%にも達している。

膜法を用いた主な水処理技術は、RO膜（逆浸透膜）による海水淡水化、MF膜（精密ろ過膜）/UF膜（限外ろ過膜）による浄水処理、MF/UF/RO膜による下水・排水処理に大別できる。RO膜を用いた海水淡水化技術については、エネルギー回収の高効率化と低コスト化が進み、中東、中国、スペイン、オーストラリアの沿岸部を中心にして大型の海水淡水化プラントの建設が加速的に進んでいる。既に造水量30万トン/日のプラントがイスラエルに建設されているが、このプラントだけでおおよそ120万人の人々の生活用水をまかなえることになる。現在大学においてRO膜の研究を行っているところは多くはないが、今後は水透過機構の解明といった基礎的な検討を含め、この分野の研究が活性化するように思われる。

近年新たな浄水技術の開発に注目が集められているが、これは水道水源の悪化により、トリハロメタンの生成やカビ臭、クリプトスポリジウム等の病原性原虫類などの様々な問題が発生していることに起因する。膜技術を用いた浄水処理は、従来法に比べプロセスを簡素化でき、濁度の低減や大腸菌群の除去に優れているため、非常に有効な水処理法と言える。神奈川県には最近、処理能力17万トン/日の国内最大規模の膜ろ過設備の導入が決定している。20年度末現在で676施設、総施設能力は約109万トン/日とのことである。総施設能力は前年度比約30%増と導入数は増加傾向にあるが、まだ膜による処理水量は全体の2%以下程度に留まっている。

また、下水・排水処理分野においても、MBR（membrane Bioreactor）を中心に膜法の利用が拡大しており、シンガポール、アメリカ、オーストラリア等で大規模膜利用排水再利用設備が導入されている。このような排水再利用分野では、統合的膜処理システム（IMS, Integrated Membrane System）が採用される場合が多い。統合的膜処理システムとは、様々な水資源とその利用目的に合わせて、複数の膜処理システムを統合化して、最高のパフォーマンスとコスト削減を実現しようとするシステムである。例えばMF/UF膜とRO膜の統合化や、MBRプロセスとRO膜の統合化が行われている。

3. 我々の研究室での取り組み

MFやUF等の多孔膜は高分子溶液の相分離を利用して作製されることが多い。このような相分離による多孔膜作製法は、非溶媒（水）の取り込みにより相分離を誘起する非溶媒誘起相分離法（NIPS法、Nonsolvent Induced Phase Separation）と、冷却により相分離を誘起する熱誘起相分離法（TIPS法、Thermally Induced Phase Separation）に大別できる。両手法で用いる高分子溶液の典型的な相図と膜作製の組成変化パスを図2に示す。我々の研究室では「多孔膜の作製とその微細構造制御」の一つの研究の中心としており、両手法を用いて数多くの中空糸膜の作製を行っている。

効率的な水処理プロセスの構築に向けた、膜開発およ

び膜プロセスの現在の課題は以下の点であろう。

- (1) 製膜プロセスと得られる膜構造の関係の解明
- (2) 得られた膜構造と膜ファウリング特性の関係の解明

この内、製膜プロセスと膜構造の関係に関しては、多くの研究が行われ、相分離プロセスの熱力学的相平衡及び動力学的な解析を行い、定量的な膜構造予測が可能になりつつある。例えば図3は、我々の研究室で行ったTIPSプロセスでの膜構造成長の解析結果である²⁾。黒い部分が孔であるが、初期の二相連続構造から海島構造へ移行し、その後孔は成長している。製膜は従来、試行錯誤法に頼っていた場合も多かったようであるが、このような解析を通して、製膜プロセスの定量的な解明がなされつつある。

ポリフッ化ビニリデン (PVDF) は、耐薬品性や機械的強度に優れた高分子材料であり、膜素材としては最も関心を集めている材料の一つである。フタレート系溶媒を用いた場合には、通常はPVDFの結晶化(固-液相分離)により球晶の多孔構造が得られる。著者らは中空糸膜作製において融解温度の影響を検討した³⁾。図4に各融解温度で得られた中空糸膜断面構造を示す。高い融解温度では通常の球晶構造であるが、低い融解温度では網目状構造が得られた。この構造はスピノーダル分解機構(液-液相分離)に基づく構造に類似しているが、詳細な熱分析の結果、相分離機構は液-液相分離型ではなく、残存の結晶が核となる固-液型の相分離であることがわかった。網目状構造膜では水透過係数は低下するものの、膜の引張強度や伸び率は5倍以上向上することが明らかとなった。

PVDFの結晶化が起こる系について、新たに第3成分を添加することにより液-液型の相分離を誘起させることができる⁴⁾。たとえばPVDF/グリセロールトリアセート系に、グリセリンを添加することにより、明確な曇り点(binodal線)が現れる。10 wt%のグリセリン添加の場合に得られた中空糸膜構造を図5に示す。興味深いことに相図では明確なbinodal線が現れているにもかかわらず、膜断面の大部分はS-L型相分離に基づく球晶構造である。外表面近傍にのみL-L型相分離に基づく連結構造が得られた。従って同一膜内に二つの構造が混在する興味深い膜が作製できたと言える。このような構造は透水性の増大に効果的であった。

処理対象液(海水や河川水等)を膜で処理した場合、ファウリング(性能低下)により透水性能は初期性能から大幅に低下する場合が多い。この様なファウリングと膜構造との関係は以前より数多くの研究がなされているにもかかわらず、現在でも完全には解明されていない。膜のファウリング現象には、膜の親水性、表面電位、膜構造が大きな寄与を与えるとの指摘はなされているが、これまでは市販膜を用いて検討する機会が多かったため、3つの要素を個別に評価することが難しかったと言える。つまり異なる膜を用いれば、膜の親水性が変わると同時に

膜構造も変わってしまうようなことが起こる。我々は同一の膜材料を用いて、TIPS法およびNIPS法を用いて種々の構造を有する膜を作製することにより、膜構造と膜ファウリング性の相関について検討を行った⁵⁾。ファウリング実験を行った結果の一例として、フミン酸を用いて場合の透水量と溶質阻止率の経時変化を図6に示す。これら3種類の膜では初期の透水量はほぼ同じであったが、膜性能の低下の度合いは明らかに異なる。また図中の矢印の部分で逆方向に純水を流す操作(逆洗)を行ったが、この逆洗による透過性能の回復にも差異が認められる。これら3種類の膜の表面構造と表面粗さを図7に示した。表面構造が緻密で溶質が膜内部に堆積しないTIPS1膜や、表面多孔度の高いTIPS3膜が良好な低ファウリング特性を示したことになる。今後はさらに多くのこのような知見の蓄積を行い、膜材質、膜構造等に関して低ファウリング性を達成させるための設計指針を確立したい。

4. 神戸大に先端膜工学センターを設置

平成19年4月、神戸大学大学院工学研究科に「先端膜工学センター」(略称: 膜センター)が設置された。大学における膜工学に関する本格的なセンターとしては、日本初の膜センターと言える。現在センターは総勢12名の教員および110名以上の学生で構成されている。膜工学に関するあらゆる情報の集約、発信を積極的に行い、膜工学研究の世界的拠点形成を目指している。本センターの活動内容を図8に示した。

センターと連携して、膜工学に関する先端研究と人材育成の両面で産学連携を推進することを目的として、先端膜工学研究推進機構(略称: 膜機構)を平成19年7月に設立した。膜機構は主に企業会員(現在23社)で構成され、その具体的な活動内容は、膜工学に関する勉強会、講演会・膜工学サロンの実施、ニュースレターの発行等である。また産学連携のコーディネートを行い、産学連携プロジェクトの立案や公的研究予算の申請も行う。本膜機構への企業会員を広く募集しているため、興味を持たれた方は膜機構のホームページ(<http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-membrane/>)を参照していただき、入会申込みやお問い合わせをいただければ幸いである。

5. 終わりに

昨今膜技術を用いた水処理には大きな期待と注目が集まっている。現在使用されている膜では必ずしも十分とは言えない面もあり、益々の研究開発が必要と言える。新しく設立した膜センターや膜機構の活動を通して有効な膜技術確立することにより、水不足問題の解決に向けてぜひとも先導的な役割を果たしたいと考えている。

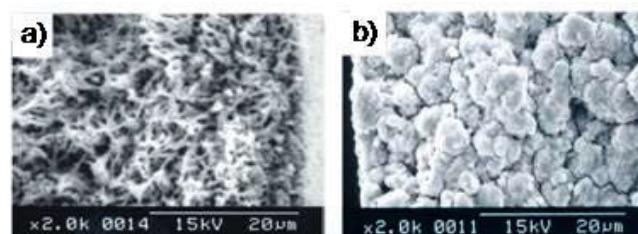
参考文献

- 1) ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム2008 講演要旨集、S4-1
- 2) 高地健太、牧泰輔、松山秀人、寺本正明、化学工学論文集、29、673(2003)
- 3) Kuwaki,R., Matsuyama,H. and Teramoto,M. : Proceedings of 10th APCChE Congress, 292 (2004)
- 4) Rajabzadeh,S. Maruyama,T., Sotani,T. and Matsuyama,H. : Sep.Purif.Technol., 63, 415 (2008)
- 5) X.Fu, T.Maruyama, T.Sotani, H.Matsuyama, J.Membr.Sci., 320, 483 (2008)



◎図1 2025年における世界水不足予測

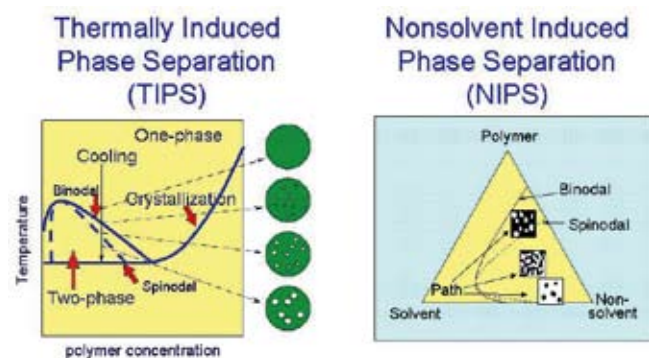
World Commission on Water for the 21st Century at the Second World Water Forum in March 2000より引用



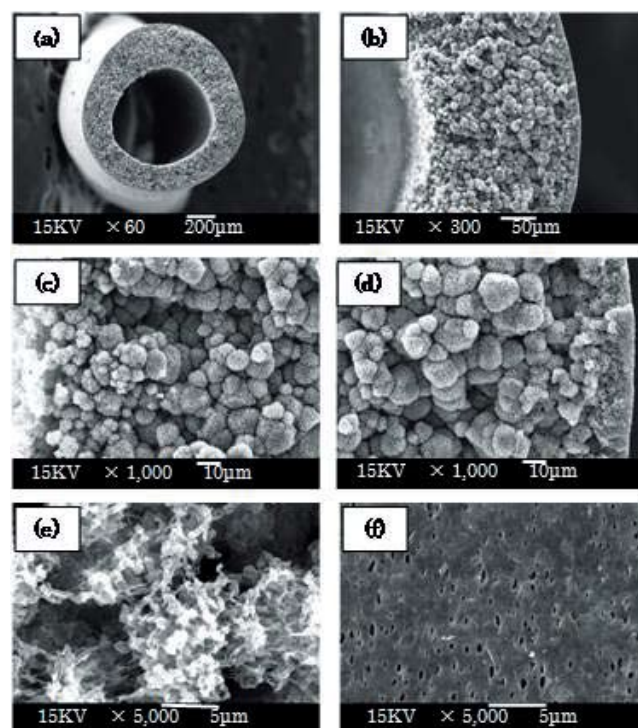
150℃ Inter-connected structure 180℃ Spherulite structure

◎図4 膜断面構造に及ぼす融解温度の影響

a)融解温度：150℃、b)180℃



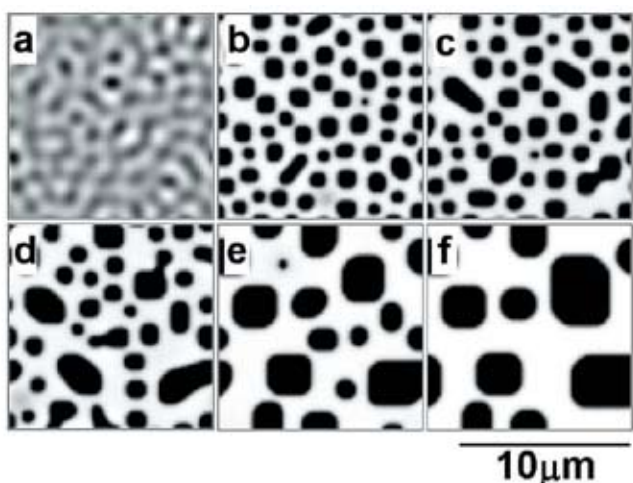
◎図2 TIPS法およびNIPS法で用いる典型的な相図と膜作製の組成変化パス



◎図5 PVDF/グリセロールトリアセート/グリセリン系により作製した中空糸膜構造

(a)全断面構造; (b)断面拡大図; (c)内表面近傍の断面構造; (d)外表面近傍の断面構造; (e)内表面; (f)外表面.

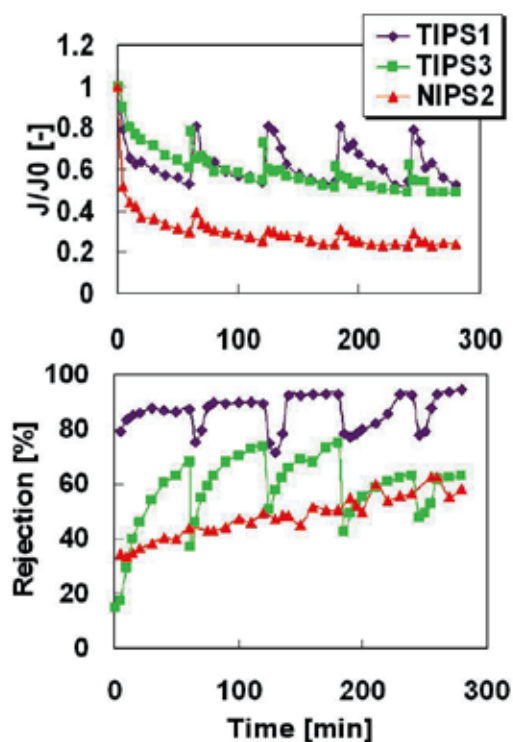
PVDF濃度：30 wt%, グリセロール濃度：10 wt%.



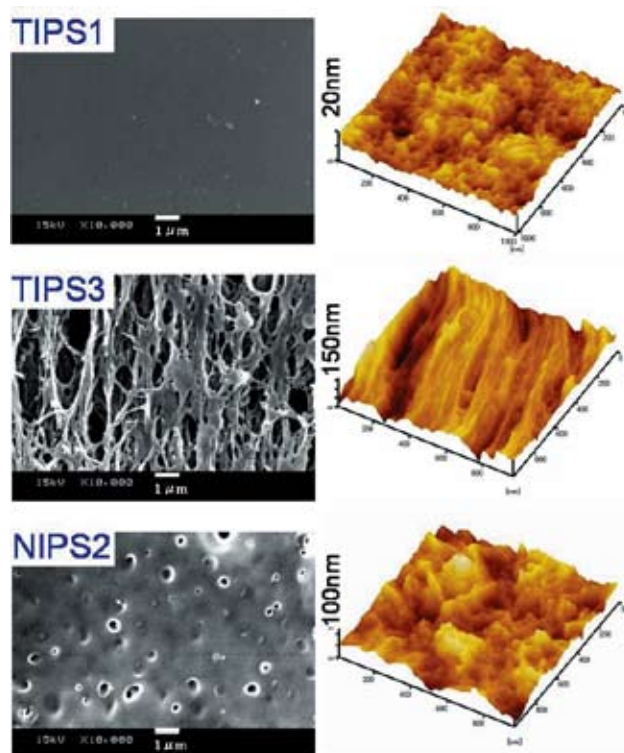
Time course of structure growth

(a)t = 0.1 s; (b) 0.5 s; (c) 1 s; (d) 2 s; (e) 5 s; (f) 60 s

◎図3 TIPSプロセスでの膜構造成長の解析



◎図6 膜ファウリング結果の一例



◎図7 ファウリング実験に用いた膜の構造



◎図8 先端膜工学センターの活動内容

20年後に生き残る水資源開発を

•Profile•



矢部 孝 やべ・たかし ●東京工業大学教授 株式会社エレクトラ 代表取締役

1950年1月生まれ、1972年東京工業大学工学部卒業、1972年東京工業大学助手、1981年大阪大学講師、その後助教授を経て、1995年より東京工業大学教授、1980年東京工業大学工学博士（論文博士）。大阪大学でレーザー核融合研究に従事し、その時代に考案した計算手法CIP法は世界中に広まり、参照数1200を超えている。この業績により1999年には、英国王立研究所設立200周年記念講演を行った。

我々は、株式会社エレクトラを東京工業大学の大学発ベンチャー第38号として2007年1月に設立した。現在の主な事業内容は、太陽光励起レーザーの開発、レーザーによるマグネシウム還元技術の確立、太陽光エネルギーを利用した淡水化装置の開発である。将来的にはこれらの技術が弊社の提案する再生可能エネルギーサイクル、マグネシウム社会の基幹技術として一つのサイクルを形成することになる（図1参照。参考文献 日経サイエンス2007年11月号）。これらエレクトラで開発を行っている技術のうち、本稿では、我々が開発し実用化が間近な淡水化装置について説明する。



◎図1 マグネシウムと太陽光励起レーザーを用いたエネルギー循環システム。

水不足の問題は、人類にとって早急に解決しなければならない問題である。2025年には30億人分の水が不足すると報告されている。この30億人分の水というのは計算すると年間1.5兆トン(1日当たり41億トン)となる。よってこの水不足問題の解決には、20万トン/日の淡水化プラントを20年以内という時間の制約の中で、2万基新設する必要があるということである。また仮にこのクラスの淡水化プラントが2025年までに完成したとしても、このプラントを稼働させるためには当然エネルギーが必要となる。しかし消費電力が少ないと言われている逆浸透膜淡

水化プラントでさえ60気圧の圧力で駆動するため、20万トン/日クラスのプラントを稼働させるためには、多大な電力が必要となる。30億人分の水不足を解消するため、2万基の逆浸透膜淡水化プラントを稼働させると使用電力は年間9兆kW時となる。これは2002年の世界電力使用量16兆kW時の56%に相当する莫大な電力量である。

比較的低消費電力で稼働するといわれる逆浸透膜法淡水化装置でさえこのような状況なので、現存する淡水化装置で将来の水不足問題を解決するというのは現実的ではないように思われる。水不足問題の解決のためには、建設が容易かつ低消費エネルギーで稼働可能な全く新しい淡水化装置が必要となる。

さらには、逆浸透膜法にはいくつかの大きな欠点がある。その1つは海水中のホウ素が除去できないことである。WHOの基準では、1リットルの飲料水中のホウ素の量を0.4mg以下と定めている。これ以上では、人間の生殖能力に影響が出るからである。しかし、最新の逆浸透膜でさえ、まだ、1.3mg残存している。

意外な問題もある。淡水装置の性能が良すぎると塩などが取れすぎて、この塩害をどうするかということも中東では問題となってきている。我々は、こうした淡水装置から出てくる塩やその他の資源を有効に利用するためのプロジェクトにも取り組んでいる。その1つが、この残存物から得られるマグネシウムの有効利用である。このマグネシウムは、太陽から直接作られた太陽光励起レーザーによって精製され、石炭の代わりとなって発電所の燃料や自動車の電池に使われる。この点については、多くの新聞や上述の日経サイエンスで紹介されているので、ここでは省略する。

それでも結局最も大きな問題は、淡水装置を駆動する電気であることの例をここに紹介しよう。2007年5月25日のAP通信で報じられたドバイの新型淡水装置建設計画である。日産270万トンの淡水装置に対して、必要発電設備900万キロワットということである。これは、大型火力発電所9基分である。2050年までに、CO2排出を半減させようというのが、後、20年後に50%のCO2排出増がありうる、

淡水化装置を受け入れることはできないであろう。

将来は、我々が提案するマグネシウム燃焼によって駆動される淡水化装置がその役割を担うであろうが、その前に、今ある技術で緊急な対策が必要である。この解決に有望なものは、太陽などの自然エネルギーを利用した淡水化装置であるが、現在提案されている装置は逆浸透膜と蒸発式の混合であったり、真空を利用した蒸発方式であったりと、電気で駆動されている逆浸透膜装置の10倍以上の価格となっている。最も、逆浸透膜が20年間で使用する電力を非石油生産国の電気代で計算すると、逆浸透膜装置の10倍の価格となるので、どちらも同じといえは同じであるが。

この問題解決のため、我々は太陽熱を利用する低消費電力かつ安価な淡水化装置を開発した。この淡水化装置は、逆浸透膜法のように高压の状態を作り出す必要は無く、常圧で淡水を製造することが可能である。また装置を多段化し、排水による熱ロスを少なくする工夫により、低消費電力で稼働する淡水化装置となっている。

本装置は、太陽エネルギーを利用する装置でありながら、太陽のない夜間を含め24時間運転することができ、現在、日産10トンクラスの装置の試験を行っている。今後の予定では、宮古島との協力により、2009年8月には、日産600トンのテスト装置を稼働させる予定であり、そのテストプラントと同時にある地域での実用装置を建設してゆくための予算が確保されている。現状では、世界中に早く技術を広めるために、太陽光を利用しているが、近い将来は、我々が開発した太陽光励起レーザーによって還元されるマグネシウムを石炭の代わりとする燃焼熱で淡水化が可能となるであろう。

我々が開発中の淡水化装置は、低消費エネルギー、低コストの装置となるが、淡水化装置自体にはなんら難しい技術は必要としておらず、いわゆるローテクの塊である。新しいのはその発想である。東京工業大学の矢部研究室ではこのようなこれまでにない発想に基づく技術がたくさん存在する。しかしこれらは未だ一般的にはなじみのないものがほとんどである。そこでこれらの技術を世に広めるため、ベンチャー企業を設立することになった。これが株式会社エレクトラを立ち上げたきっかけである。

エレクトラの究極の目標はマグネシウムによる循環型社会の構築である。しかし、この目標に対して外部資金を導入するのは不可能であると考えた。我々も何度も国のプロジェクトに応募したが、すべて落選している。そ

の理由は、「太陽電池で水を分解し、水素を作り燃料電池を使えば、もっと簡単で有望である」ということだった。しかし、水素はエネルギー密度が低すぎるので、貯蔵には向かない。100万キロワットの発電所のわずか一日分でも、1km四方で高さ10mのタンクが必要である。高压で大型のタンクが作れないからである。これは、自動車にも言える。確かに700気圧の小さな自動車用タンクは作れるかもしれないが、それに注入するために、全国に水素タンクを作るとどれくらい大きなタンクが必要かを考えた人がいない。メタンやメタノールを改質して水素を作るという案もあるが、そのときにCO₂が発生するとは誰も言わない。

こうした無理解な審査員を相手にいくら頑張っても意味がないということで、すべて自己資金でプロジェクトを進めることを決断した。これがエレクトラを設立した理由である。その資金で2007年7月に千歳に太陽光励起レーザー施設を建設し、現在、世界最高の効率を実現し、太陽光励起レーザーによってステンレス板を切断できるまでとなっている。資金さえあれば、一年以内に、必要なレーザー性能を達成できるであろう。しかし、これだけでマグネシウム社会を構築するまでの資金を確保することは困難なので、まずは、短期間で収入を上げる道を模索したのである。そこで生まれたのが、新型淡水化装置である。これを呼び水にして投資家の外部資金を獲得することに成功し、宮古島プロジェクトが始まろうとしている。



◎図2 千歳市に建設された4m²レーザー。一基あたり、1kWのレーザー出力を目指す。



大気汚染対策

大気汚染対策

はじめに

前回の中国科学技術月報では「水資源」とそれを取り巻く問題について特集を組みました。

今回の特集は「大気汚染対策」について取り上げたいと思います。前回の「水資源」特集でも汚染について取り上げましたが、今回の「大気」ともっとも異なる部分はその「汚染のわかりにくさ」ではないでしょうか。水面にアオコがはびこるような、一見して汚染内容が明らかになる状態と異なり、一般人には大気中にどのような物質が浮遊しどんな汚染をもたらしているのかほとんど認識できません。今回の特集の田口論文でも指摘されているように、大気は越境し、およそ一年かけて北半球と南半球が混ざり合うという性質をもっています。こ

の点でも場所が特定されやすい水の汚染とは大きく異なります。

こうしたことから汚染源を特定し、分析、観測し、問題解決に導くための科学技術の存在とその質の向上が非常に重要であることがお分かりいただけるかと思います。

大気にとっては、中国と日本の間に国境などはありません。日中両国で協力し合い、お互いの科学技術力を持って問題に取り組んでいくことが、現在そして将来的にも不可欠な作業であり続けるはずです。今回の特集が皆様のご理解の一助となれましたら幸いです。

中国総合研究センター

自動車排気ガス制御技術の進歩

•Profile•



李 俊華 Li Junhua ●清華大学環境科学・工学部 教授

1970年9月生まれ、清華大学環境科学工学部教授、博士課程教員。1992年に吉林大学化学部の学士学位を取得。2001年に中国原子能科学研究院の博士学位を取得。2003年清華大学ポスドクター終了後、清華大学着任。2008.3-2009.6、アメリカのミシガン大学客員教授。主な研究テーマは大気汚染対策、自動車排気ガスや固定発生源からの排煙に関する浄化技術。中国環境科学学会の大気環境分会理事。国家気象科学学会の大気化学委員会委員。清華大学優秀ポスドクターや學術新人賞授与。中国環境科学学会青年科学技術賞授与。教育部「新世紀における優秀人材支援計画」入選。學術専門書を2冊執筆したほか、100篇の學術論文を発表。このうち53篇がSCI収録。国家發明特許5件取得。

中国経済の急速な発展に伴い中国における自動車工業も大いに発展しており、自動車の保有量が大幅に増加している。アメリカに始まった金融危機はビッグスリーのうちゼネラルモーターズとクライスラーを倒産に追い込んだ。2009年に中国における自動車販売台数は5ヶ月間連続して世界一となった。5月における自動車の生産台数や販売台数は共に110万台を突破した。2009年通年で生産台数や販売台数が1000万台を超えることは疑いがない。自動車保有台数や都市化の歩みが加速するに伴い、排気ガスが都市における主要な大気汚染源となっている。排気ガス対策は大気汚染防止における重要な措置の1つと言える。排気ガス対策とは、主に自動車の排気排出基準を絶えず徐々に高めていくことである。北京では1999年に国Ⅰ基準、2002年に国Ⅱ基準、2005年に国Ⅲ基準を施行した。そして2008年には北京では中国で初めて国Ⅳ基準を施行した。北京での各基準施行時期は中国の平均より2年早い。排気ガスの排出基準が段階的に引き上げられることにより排気ガスが引き起こす大気汚染は効果的に抑制されている。

1. 排ガス制御技術の概要

自動車排ガス汚染を抑制するための最新技術にはエンジン、制御システム、操作条件を変更する改造といったエンジン内部の浄化と空気噴射、サーマルリアクターの取り付け、触媒コンバーターの取り付けといったエンジン外部の浄化がある。これまでの理論や実験によると、自動車排ガス汚染を根本から解決するためには、エンジン外部に触媒を設置し汚染物を分解する方法がもっとも有効である。燃料消費や自動車の排ガスレベルを有効に抑制することは研究や産業における長年の課題である。対象車種はガソリン車、ディーゼル車、自動二輪車、新型エネルギー車である。主な汚染物質は炭化水素（HC）、一酸化炭素（CO）、窒素酸化物（NO_x）、粒子状物質（PM）などである。

ガソリンエンジンとディーゼルエンジンでは後処理技術の面で異なる方向性が見られる。ガソリンエンジンの排ガス処理は三元触媒を利用した排ガス浄化技術が主流

である。厳しさを増す排ガス基準に対応するため、同技術は絶えず改良されている。現在ではガソリンエンジン内部における燃焼工程の最適制御に後処理技術である三元触媒コンバーターを加えることによって、有害物質の90%以上を無害なCO₂、N₂、H₂Oに変換することができる。しかし世界的な石油エネルギー危機が進行するに伴い、燃料消費や動力性能を犠牲とするガソリンエンジンは動力性能や経済性に優れたリーンバーンエンジン（lean-burn）に取って代われようとしている。リーンバーンガソリンエンジン、ディーゼルエンジン、天然ガスエンジンといった希薄燃焼エンジンの排気ガスは、HCやCOが明らかに少なく酸素濃度が高い。このため通常の三元触媒コンバーターでは希薄燃焼エンジンが排出する汚染物を有効に浄化することができない。代表的な希薄燃焼エンジンであるディーゼルエンジンの排気ガスに対する後処理技術は主にNO_xやPMの除去を中心として研究が進められている。これまでに数多くの浄化措置が実用化されている。

2. ガソリンエンジンの排ガス浄化技術

2.1 理論空燃比で作動するガソリンエンジンの排ガス浄化

ガソリンエンジンの排ガス浄化装置として用いられる触媒は以下のように発展してきた。1970年代に開発された酸化触媒は主に自動車排気ガスのCOとHCを浄化するものだった。その後に開発された第二世代の三元触媒はCOやHCに加えてNO_xも浄化することができた。高温下における触媒活性を向上させPbやSに対する中毒やH₂Sの排出といった問題を解決するため、高活性で安定性に優れた第三世代の触媒が開発された。この種の触媒には多層構造の活性層、あるいはZrO₂、BaO、La₂O₃などを酸化物として用いた安定剤が採用されている。1990年代になると触媒コンバーターのコスト軽減を実現した第四世代触媒の開発が始まった。同触媒ではPtやRhのすべてや一部がPdで代用されている。三元触媒は現在でも世界中で採用されているガソリンエンジンの排ガス制御技術である。三元触媒の高活性化、エンジンの総排出量削減を目的として着火温度の低下、貴金属使用量の抑制といっ

た方向で改良が進められている。またレアアースを用いた高性能の酸素貯蔵材料、耐高温で高比表面積の材料、貴金属と添加剤の担持技術、耐久性のあるコーティング技術などの分野で画期的な成果が見られている。

自動車エンジンの排気温度はアイドリング時における200・300℃から全負荷運転時における700・800℃と非常に幅広い。上り坂や加速時には触媒コンバーターの温度が1000℃以上に達することもある。厳しくなっていく排ガス規制に対応するため、コールドスタートに関する問題を解決する必要がある。最も簡単な方法は触媒コンバーターをエンジンの排気口近くに設置することだ。高温の排ガスの影響により短時間で着火温度に達することができるようになる。この場合に採用するTWC（三元触媒）はCC触媒（close-coupled catalyst）と呼ばれる。この種の触媒は耐熱性と焼結性能に優れている必要がある。またスポーツカーなど高い排気温度に対応するため長期耐熱性も求められる。一般的な触媒は1000℃近い高温下で作動させると容易に焼結現象が発生し触媒活性が大幅に低下する。このため1050℃の高温に耐え得る三元触媒の開発に力が入れている。

CC触媒とは別に、炭化水素吸着材を用いて低温排ガスのHCを除去する方法もある。コールドスタート時に触媒に吸蔵させた炭化水素を高温時に放出し、後部触媒で酸化させ除去するという原理だ。HC吸着材の材料としてはゼオライトが主流である。一部では活性炭材料も使用される。同時に自動車が発生的に排出するHCの量についても考慮すべきである。

2.2 リーンバーンガソリンエンジンにおけるNO_x浄化技術

希薄燃焼技術は燃料を燃焼させる際に大量の空気を送り込むことによって、燃焼における効率や経済性を改善するものである。また排気ガス中の一酸化炭素（CO）や炭化水素（HC）といった有害物質を大幅に削減することもできる。リーンバーン型ガソリンエンジンの開発や生産、ガソリンエンジンのディーゼルエンジン化、ディーゼルエンジンのリーンバーン化促進などは国際的な傾向となっている。しかしリーンバーン技術には重篤な欠点も存在する。NO_xの発生量が多いこと（約90%はNO）、および排気ガスの酸素濃度が高いこと（一般的に5%以上）である。このため一般的な三元触媒を用いてリーンバーンガソリンエンジンやディーゼルエンジンが排出するNO_xを浄化することができない。加えて先進諸国ではNO_xの排出を厳しく規制した排ガス基準を相次いで制定・施行している。高酸素濃度におけるNO_x対策が新たな研究テーマとなっている。

吸蔵還元触媒（NSR）技術は希薄燃焼自動車によるNO_x汚染を抑制するために三元触媒を基礎として発展した新技術である。吸蔵還元触媒の原理には吸蔵還元サイクルが関係している。希薄燃焼の状態においてNOやHC_xは酸化されNO₂やCO₂となる。次いでNO₂は硝酸塩への転

換を経て貯蔵される。リッチ燃焼の状況下において水素化合物はPtの位置に吸着する。NO₂が硝酸塩から放出されHC_xによってN₂に還元される。反応過程においてNO_xを100-300℃の間で十分に吸蔵でき、高温下（最高500℃）で容易に放出できなければならない。重要なポイントとしてNO_x吸蔵触媒には酸化性元素とアルカリ性元素の複合酸化物が必要である。希薄燃焼の状態において酸化性元素はNOを酸化してNO₂とする。NO₂はアルカリ性元素と反応し硝酸塩の形で表面に貯蔵される。リッチ燃焼の状態では硝酸塩はNO_xを放出し三元触媒によって還元する。

最も早くからNSR技術の研究を行っている日本のトヨタは既に吸蔵還元触媒の開発に成功している。貴金属（主にPt）、幾つかのアルカリやアルカリ土類金属（Na⁺、K⁺、Ba²⁺）、希土酸化物（主にLa₂O₃）をAl₂O₃に浸すという製造方法だ。明らかになっている資料によると、トヨタの開発したPt/BaO-Al₂O₃、スピネル構造のBaAl₂O₄、ペロブスカイト構造のBaSnO₃などにおけるNO_xの吸蔵還元特性はどれも良好である。同社の研究から貯蔵物質のNO吸蔵力がアルカリ度に正比例することが分かっている。しかし炭化水素化合物の酸化度が増大すればアルカリ度は低下する。PtとBaOの粒子径や両者の間隔もNO吸蔵を制限する要素の1つである。互いに接触する小さな粒子は大きな粒子よりも吸蔵されやすい。

同技術における主な問題はSO₂やCO₂が引き起こす触媒の活性劣化である。酸性ガスであるSO₂やCO₂は吸着材のアルカリ性元素と反応して難分解性の硫酸塩や炭酸塩となる。こうしてNO_xの吸蔵還元サイクルが阻害される。触媒の中毒メカニズムを解析し、耐硫化性を改善することがNO_x吸蔵還元技術に関する研究における重点である。

3. ディーゼル車の排ガス制御技術

1970年代に欧州や日本でトラックや大型バスのディーゼルエンジン化が進められた。目下欧州では自家用車の年間生産台数のうち40%がディーゼル車となっている。フランスやスペインでは50%以上に達している。ディーゼル車の生産台数や保有台数の増加や環境意識の高まりに伴い、ディーゼル車からの有害排出ガスやその対策についての関心が高まっている。これらの問題はディーゼル車の今後の発展を制約するボトルネックともなっている。ディーゼルエンジンの排気ガスにおける主な汚染物質はNO_xとPMである。これらを浄化するためには系統だった技術が必要である。燃料の改良、エンジン内部における浄化、後処理を融合させなければならない。このような有機統合的なディーゼルエンジン排気ガスの後処理技術に関する研究はNO_xやPMの除去を中心として進められ、幾つかの浄化措置が登場するようになっている。ディーゼルエンジンを対象とした排気ガス浄化技術には酸化触媒（DOC）、DeNO_x触媒、微粒子除去装置（DPF）などがある。

3.1 酸化触媒を応用した浄化技術

ディーゼルエンジンに対する排気ガス浄化技術として最初に採用されたのは酸化触媒である。一般的には貴金属のPtやPdを活性成分として、多孔質物体を担体として採用している。排ガス温度が250℃以上であれば良好な浄化作用を発揮し、HCの30%~80%およびCOの40%~90%を酸化することができる。また粒子状物質における大部分の可溶有機物（SOF）も酸化できる。しかし微粒子状物質における黒煙（dry soot）やNO_xに対しては概ね効果が無い。

DOCの性能を左右する要素は排ガス温度と燃料中の硫黄含有量である。燃料中の硫黄含有量は一般的に500ppm未満と規定されているが、50ppm未満が望ましい。酸化触媒の効果が強いほど生成される硫酸塩も多くなり、ディーゼルエンジンから排出される微粒子が増加する。酸化触媒にとって最も良い作動環境は250-350℃である。目下中国で流通しているディーゼル燃料は品質が悪く硫黄含有量が500ppmを超える。HCやCOを効率よく浄化すると同時にSO₂の酸化を抑制する触媒を開発することには大きな意義があると言える。

海外におけるディーゼルエンジンを対象とした排ガス後処理技術を見てみると、国Ⅱ、国Ⅲ、国Ⅳといった排ガス規制の施行段階においてDOCが応用されている。特に国Ⅲや国Ⅳにおいては大多数のディーゼル車が高圧燃料噴射やEGRを主体とした技術によって排ガス規制をクリアしている。結果としてPMや未燃HCの排出量が増加したため、DOCが国Ⅳ排出標準に合致させるための理想的な後処理技術となった。2008年に国Ⅳ排出標準が施行されてからDOCはディーゼルエンジンメーカーにとって必要不可欠な装置となった。特に小型ディーゼル車では圧倒的多数がDOCによって国Ⅳの排ガス規制をクリアしている。強調できる点として今後さらに厳しい排ガス規制が施行されたとしてもDOCが淘汰されるようなことはない。DOCはDPFの再生やDe-NO_x還元剤漏洩防止にも幅広く応用される見込みがある。

3.2 ディーゼル車の排気ガスにおける粒子状物質に対する抑制技術

これまで30年間にわたってDPFはディーゼル車の排ガス対策に関する最も盛んな研究分野であった。ディーゼル車の排気ガスにおける粒子状物質を浄化する方法には微粒子除去法と触媒反応法がある。微粒子除去法とは主に排ガスをろ過することによって物理的な手段で微粒子を除去する方法である。多くの国が自動車の排出する微粒子状物質に注目するようになってきている。微粒子除去装置は排ガスに含まれる微粒子状物質を制御する最も有効な手段である。

海外ではコーディエライト製フィルター、炭化ケイ素製フィルター、金属製フィルター、チタン酸アルミニウム製フィルターなどの研究や実用化が進められている。

材料の特性に応じて用途に違いがある。炭化ケイ素は熱容量が大きく耐熱性に優れているため、一般的に強制再生システムと合わせて乗用ディーゼル車や小型ディーゼル車における粒子状物質の抑制に採用される。コーディエライト製フィルターは熱容量が小さく触媒コーティングの温度を上昇させてしまうため、自然再生システムと合わせて使用する場合が多い。しかしフィルター内にカーボンが過度に蓄積するとフィルターが損壊する場合がある。DPFの応用における別の難題はDPF再生技術である。多くの研究が焦点を強制再生システムと自然再生システムの融合に移している。主な技術内容はディーゼルエンジンを制御し排気温度を上げる、または酸化剤を添加することである。次いでDOCの酸化反応を利用し温度を上昇させDPFの再生を行う。海外で行われている最新の研究からも分かるとおり、ディーゼルエンジンの制御、フィルターの材質、酸化触媒を研究成果に基づき整合させることがDPF再生技術の要点となっている。

3.3 DeNO_x触媒浄化技術

ディーゼルエンジンのNO_xを除去することは現在でも挑戦的な重要な研究テーマとなっている。ディーゼルエンジンに応用すべき完璧なNO_x後処理技術は未だに存在しない。既存のNO_x浄化技術には吸蔵還元技術（NSR）、アンモニアを用いた選択還元型NO_x触媒（NH₃-SCR）、炭化水素を用いた選択還元型NO_x触媒（HC-SCR）などがある。

アンモニアを用いた選択還元型NO_x触媒は1970年代に登場した。現在ではUrea-SCRシステムがユーロVやUS Trial Bin5に合致するNO_x浄化技術として大型ディーゼル車への試験的採用が始まっている。商業ベースのUrea-SCR触媒システムは固定発生源に対する排煙脱硝技術に用いられている触媒システムと基本的に同一である。主にV₂O₅-WO₃/TiO₂やV₂O₅-MoO₃/TiO₂システムである。同触媒システムの原理は酸素が圧倒的に多い状況下において、尿素を加水分解して生成したNH₃によりNOを選択的にN₂に還元するというものである。尿素は幅広い温度範囲においてNO_xを選択的に還元する非常に優れた特性を有しているため、同触媒システムの浄化率は260-500℃において90%以上に達する。しかし同触媒システムの活性成分であるバナジウムが高温下で揮発しやすく、排ガスとして放出されると大気環境や人体に危害を与える恐れがある。また微粒子除去装置の再生において瞬間温度が700℃以上となるため、同触媒の担体であるTiO₂の相転移が発生し、活性度が大幅に低下する場合がある。

ゼオライト触媒によるNO_x選択還元は触媒の高活性度や幅広い活性温度といった特性のゆえに1990年代初めから注目されていた。ゼオライト触媒の活性度はゼオライトの種類や構造と密接な関係がある。同一の目的反応において金属イオンとゼオライト酸点が「相乗効果」を起こすことにより活性度が確定する。Cuイオン交換の場合、

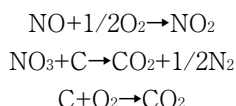
Cu-ZSM-5の活性度が最高となりCu-Yが最低となる。FeイオンをH-ZSM-5やH-Betaと交換する場合、良好な活性度が認められる。アメリカのFord社やGM社はCu-ZeoliteやFe-Zeolite触媒の実車試験を相次いで実施した。Cuイオン交換のゼオライト触媒は低温における活性度が良好であった。しかしFeイオン交換のゼオライト触媒は高温域でより高い活性度を示した。また実際の応用から排出ガスに含まれる炭化水素化合物が触媒に蓄積されやすいことが分かった。この結果、触媒の活性部位が覆われてしまい活性度が低下する。ただし炭化水素化合物による活性度の低下は高温下で再生される。

1990年代にIwamotoやHeldなどによって提案されたHCを用いたNO_x選択還元触媒は目下世界中で研究が進められている。しかし同技術によってNO_xを制御するには多くの未解決問題を克服する必要がある。目下開発中の触媒には貴金属、ゼオライト、金属酸化物の三分野がある。周知のとおり、ゼオライト触媒は水熱安定性が悪く実用化が難しい。貴金属触媒は低温活性や耐SO₂特性に優れている。しかし活性温度域が狭く反応過程でN₂OやNO₂といった毒性や危険性の高い副産物が生成される。金属酸化物触媒の活性温度は一般的に400~450℃である。また触媒活性の面でも改善の余地がある。

3.4 ディーゼル車の排ガス浄化に関する技術の一体化

近年、ディーゼルエンジンにおける主要な汚染物質であるNO_xやPMおよびHCやCOを同時に除去するマルチ後処理技術が注目されている。DPF-SCRやDPF-NSR (DPF-LNT) が今後の排ガス規制をクリアする組み合わせとして有力である。前者は主に大型ディーゼル車のNO_xやPMを同時に除去するために用いられる。後者は良好な低温活性ゆえに小型ディーゼル車やリーンバーンガソリンエンジンに適している。

フィルターで集めた粒子状カーボンを還元剤とした場合、触媒において粒子状カーボンの除去—触媒燃焼による再生—触媒反応によるNO_xの還元といった一連の理想的な過程が実現する。関連する反応には以下のものがある。



化学研究における主な問題はマルチ触媒における触媒

材料が粒子状カーボンの吸蔵、HCやCOの酸化、NO_xの還元といった機能を持っていない点である。また材料には少量の貴金属、レアアース元素、遷移金属またはその酸化物を含む必要がある。

4. 新型エネルギー車における排ガス制御技術

新型エネルギーには圧縮天然ガス (CNG)、液化石油ガス (LPG)、アルコール類やエーテル類といった含酸素燃料、バイオディーゼル燃料、水素、電気などがある。燃料危機と排ガス汚染が自動車工業の発展における二大懸案事項である。エタノール混合ガソリンや資源が豊富な圧縮天然ガス (CNG) といった新型エネルギーを選択することが最近の傾向となっている。エタノール混合ガソリンや圧縮天然ガス (CNG) などの新型エネルギーに関する宣伝や応用が進むに伴い、自動車用燃料としてのシェアも拡大している。新型エネルギー車の排出する一般的または特殊な汚染物質が大気に及ぼす影響が注目されている。

CNG自動車の排出ガスに含まれる未燃焼のメタンは温室効果ガスの一種である。メタンの地球温暖化係数はCO₂の32倍である。しかも化学特性が安定しているため一般的な手段では除去できない。CNG自動車の主要汚染物質であるメタンやNO_xをどのように有効に除去するかが重要な問題である。またメタン酸化触媒における低温活性やメタンを還元剤とするNO_x選択還元が研究テーマとなっている。

エタノール混合ガソリンはブラジルやアメリカなどで幅広く採用されている。中国でも混合比率が10%のエタノール混合ガソリンの販売を18の省にまで拡大する予定だ。エタノール混合ガソリン車の排ガス浄化については従来の三元触媒が選択されている。しかしエタノールの混合比率が高くなると含酸素燃料に含まれる酸素が空燃比を上昇させ、窒素酸化物が十分に除去されなくなる。またエタノール混合ガソリン車は当然ながらアルコール類および部分的に酸化したアルデヒドや酸を排出する。これらの化合物が大気中に排出されると環境に重大な悪影響を及ぼす。以上のことからエタノールを代替燃料とする場合、NO_x、CO、HCを除去すると同時にアルコール類やアルデヒド類の排出を抑制しなければならない。

東アジア地域における汚染物排出量が地上オゾンに及ぼす効果

•Profile•



安俊嶺 An Junling ●中国科学院大気物理研究所 研究員

1967年3月15日生。博士、研究員、博士課程教員。1989年に南京気象学院大気物理学部を卒業し学士学位を取得。1996年に中国科学院大気物理研究所で博士学位を取得。2000年10月から2003年1月にかけて京都大学防災研究所および酸性雨研究センター(ADORC)において上級客員研究員を務め、東アジア地域における酸化剤、酸性沈着、メソスケール大気化学モデルといった研究に従事。また地域空気品質モデル RAQMを開発。モデルの比較計算を行う国際プロジェクトMICS-ASIAや中国、日本、韓国が共同で進める東北アジア合同研究プロジェクトLTPに参加。これまでに国家自然科学基金、国家863計画、中国科学院方向性プロジェクトなどを主宰。現在は中国気象学会大気化学委員会の委員を務め大気汚染物質の変質、輸送、沈着メカニズムといった分野での研究に従事。これまでに国内外の有名雑誌において40以上の論文を発表。



屈玉 Qu Yu ●中国科学院大気物理研究所の大気境界層物理・大気化学国家重点実験室

1979年5月31日生。博士、研究員。2002年に南京気象学院電子情報工学部を卒業し学士学位を取得。2008年に中国科学院大気物理研究所で博士学位を取得。目下、中国科学院大気物理研究所の大気境界層物理・大気化学国家重点研究室(LAPC)において大気化学や大気環境に関する研究に従事。これまでに10篇近くの学術論文を発表。

概要

オゾン(O₃)の生成には多くの因子が関わっており非線形性を示す複雑な過程となっている。一つの因子が別の因子に及ぼす効果は直接的効果と間接的效果に分けることができる。本論文では因子分離法や改良後の地域空気品質モデル(RAQM)を採用し人為起源の窒素酸化物(NO_x=NO+NO₂)、人為起源の揮発性有機化合物(AVOCs)、自然起源の揮発性有機化合物(BVOCs)が春・夏に東アジア地域の地上オゾン濃度に及ぼす間接的效果について分析した。結果が示すところによると、AVOCsとNO_xおよびBVOCsとNO_xの相乗効果により光化学反応におけるO₃の生成が強化される。AVOCsとNO_xの相乗効果は季節により大きく変化するという特徴があり、中国南部では概ね夏季に最小となる。BVOCsとNO_xの相乗効果は中国南部と北部で大きな差が認められる。中国南部では概ね春季に効果が強くなり、北緯30度より北では概ね夏季に春季より強い効果が見られる。オゾン対策について検討する場合、排出量と共に地域的な差異や季節による変化も考慮する必要がある。BVOCsが及ぼす間接的寄与は日によって大きく変化する。個別の研究成果をO₃対策に応用したとしても予期した効果は得られないであろう。中国北部(北緯30度以北)では人為起源を制御し、中国南部におけるBVOCsの排出量が高い場所では自然起源および人為起源の影響を共に考慮すべきである。

1 序

対流圏におけるO₃は地球の大気を構成する重要な要素である。対流圏O₃の中でも特に地上O₃濃度の上昇は人体

や動植物の成長に一連の悪影響を及ぼす。重篤な場合は生態システムにおけるバランスにとって著しい脅威となる。東アジア地域では急速な経済発展、旺盛なエネルギー消費、大都市または都市群における自動車排気ガスによる汚染などによってO₃汚染が加速している。有効な対策を模索することは各レベルの政府や市民の関心の的となっている。

対流圏下部におけるO₃は主に光化学反応によって生じる。NO_xと揮発性有機化合物(VOCs)は光化学反応によってO₃を生成する上で主要な前駆物質となっている。O₃の生成量や生成速度はNO_xやVOCsの濃度と関係しているだけでなく、両者の比率(VOCs/NO_x)と密接な非線形関係がある。中国国内外の研究結果によると、NO_xの低い環境下(NO_x規制区)においてO₃濃度はNO_xの増加に伴い上昇するが、VOCs濃度の変化はO₃に大きな影響を与えない。またNO_xの高い環境下(VOCs規制区)ではNO_xの増加がO₃濃度の低下を、VOCsの増加がO₃濃度の上昇を引き起こす。O₃対策を確定する過程において、NO_x規制区あるいはVOCs規制区の区分は地形、汚染物の排出状況により決めるだけでなく、気象条件も十分に考慮すべきである。EKMA(empirical kinetic modeling approach)オゾン等濃度曲線は、1つの地区がNO_x規制区であるかVOCs規制区であるかを分析する常識的な手法である。しかし同手法では異なる排出源による効果や気象条件の変化といった要素の影響を把握することができない。

NO_xやVOCsの発生には人為起源と自然起源がある。これら二つの排出源がO₃生成量に与える影響を正確に把握すれば適切なO₃対策を実施することが可能となる。IPCC

の報告によると、欧米のNO_x排出量は比較的安定しているが、東アジアでは毎年約4%増加している。アジアにおいて化石燃料の燃焼に伴うNO_xの排出は21世紀も引き続き大幅に増加すると予想される。数百種類に及ぶVOCsは物質によって光化学O₃生成に対する効果がさまざまであるためO₃対策を複雑にしている。当初、VOCsに関する研究では工業や交通といった人間活動によって引き起こされる汚染に注目していた。しかし1970年代から自然起源が地上O₃に及ぼす影響について論議が繰り広げられている。一部の学者によると、都市における自然起源の排出量は人為起源の排出量に比べて少ないため、自然起源がO₃生成に及ぼす効果は無視できるという。後に欧米の一部の科学者は数値モデルを利用し自然起源のVOCs（主にイソプレン）が地上O₃の生成に及ぼす作用について研究を行った。同研究によりイソプレンの排出量が人為起源のVOCs排出量よりも多く、生物起源の効果がO₃生成に多大な影響を及ぼすことが分かった。この分野における研究はアジアでは比較的少ない。

これまでの研究には二つの問題が存在する。第一にO₃の個別例（数日から数週間）を分析することによって結論を導き出している点である。個別例に基づいた対策は長期的な有効性という面で疑問を抱かせる。観測結果もO₃濃度が最も高くなる日が最も制御が困難というわけではないことを示している。以上のことから比較的長期（季節）にわたる数値シミュレーション研究が有効なO₃対策を制定する上で非常に重要であることが分かる。第二に汚染源の制御に関し多くの研究者が次の公式を用いて汚染源の地上O₃濃度に及ぼす効果を計算している点がある。

$$G_i = G_0 - G_i, \quad (1)$$

式において、 G_0 はすべての排出源を考慮した地上O₃の仮定濃度、 G_i は第*i*類の排出源を無視した地上O₃の仮定数値、 G_i は第*i*類の排出源がO₃濃度に及ぼす効果を指す。この方法で得られるのは特定の排出源による総合的な効果である。同物質による単独の効果（直接的効果）と異なる排出源との相乗効果（間接的効果）を分けて考慮することはできない。

因子分離法は一連のシミュレーション結果の一次方程式の解を求めることにより、非線形過程において特定の因子が及ぼす単独の作用（直接的効果）および異なる因子との相乗効果（間接的効果）を切り離すことができる。また異なる排出源がO₃生成に及ぼす影響における毎日、毎月、季節ごとの変化を明確にすることができる。本論文では因子分離法や改良後の地域大気品質モデル(RAQM)を採用し人為起源の揮発性有機化合物(AVOCs)、自然起源の揮発性有機化合物(BVOCs)、人為起源のNO_xが春・夏に東アジア地域の地上O₃の生成に及ぼす間接的効果について分析する。また有効なO₃対策の制定に役立つ新しい見解を提供する。

2 モデルの説明と検証

2.1 地域空気品質モデル

RAQMモデルによる研究では東アジア地域（北緯0～55度、東経75～155度）をシミュレーション地域としている。水平解像度は1°×1°、垂直方向は地形に沿う座標系を採用している。地表面から対流圏最上部を12層に分けておりシミュレーションにおける最下部は約50mである。RAQMモデルには汚染物の排出過程、移流拡散過程、乱流拡散過程、湿性・乾性沈着過程、気相化学過程が含まれている。乾性沈着についてはWeselyのパラメータ化改良法を採用している。湿性除去過程は湿性除去率に基づき計算している。垂直方向の乱流拡散係数については地域酸性沈着モデルRADM2.6版の計算方法を採用している。これまでに実施されたRAQMモデルを用いた数々のシミュレーション研究によると、同モデルが汚染物の長距離移流を適切にシミュレーションすることによって気候変動における主な特徴を反映できることが分かっている。

本論文における研究に合わせてRAQMモデルに三つの改良を施した。(1) 気象場の変更。光化学反応によって生成されるO₃は日変動特性が顕著であるため、本研究ではメソスケール気象モデルMM5を応用している。6時間毎のNCEP再解析データに代わり1時間ごとの温度、相対湿度、風速といった一般的な気象場データを採用している。MM5の水平格子間隔は81km、垂直方向は23層である。積雲パラメタリゼーションはAnthes-Kuo方式、境界層パラメタリゼーションはMRF方式を採用する。また混合相を陽の水蒸気スキーム、雲の冷却を放射過程とする。MM5モデルを運用するに当たり6時間毎に欧州のメソスケール気象予報センター(ECMWF)による1°×1°データと一致させる。(2) 降水時間の非均等性を反映。広域にわたる汚染物質の長期（月、季、年）シミュレーション研究において、降水シミュレーション数値の信頼性は低い。一般的に月の平均降水量が用いられるが1時間ごとの実測降水量のデータは限られているため、本論文では特定の格子点における1時間当たりの平均降水量 R を次のように定義する。

$$R = (R_{hr}/R_{mon}) * R_{obs}, \quad (2)$$

当該格子点における月の平均降水量 R_{obs} を示すと共に降水が時間によって非均等であることを反映できる。式において R_{hr} はMM5モデルによって計算された1時間当たりの平均降水量、 R_{mon} は月の平均降水量、 R_{obs} は月の平均降水量実測値を指す。観測ポイントがある場合（中国大陸には700の観測ポイント、日本には8つの観測ポイントのみ選択・使用）、格子点における降水量は観測ポイントにおける降水量の補間値から得られる。観測ポイントがない場合、格子点における降水量はNCEPのデータから採用する。(3) 気相化学メカニズムの変更。本論文における重要な研究テーマの一つは自然起源のVOCs排出量がO₃生成に

2000年における人為起源の NO_x およびVOCsの排出源はStreetsたちに基づいている。また総炭化水素源の程度や東アジア諸国の経済状況に基づき人為起源のVOCsを一定の割合でエタン、プロパン、エチレン、アルカン、オレフィン、芳香族、酸化物に分けている。昼夜や季節によって変化する自然起源のVOCs（主にイソプレン）は日本の酸性沈着・酸化剤研究センターから得た。人為起源および自然起源の排出源データにおける空間解像度は $1^\circ \times 1^\circ$ とする。人為起源および自然起源のVOCsや NO_x を体積混合比の単位に換算し、VOCsを各物質における炭素数に応じて変換する。図1はVOCsと NO_x の分布状況を示す数値比である。中国北部の大部分、台湾、北朝鮮、韓国北部、日本では春季にVOCsや NO_x が少ない。同時期に広西チワン族自治区や広東省の南部といった中国南部ではVOCsや NO_x が多い。夏季になると自然起源のVOCs排出量が増加するため中国北部でVOCsや NO_x が4未満になる部分が縮小する。中国南部では概ね8以上であり広西、湖南、江西などの多くが15を超えている。



2.2 モデルの検証

www.adorc.gr.jp)には厳格かつ一貫したモニタリングデータの品質管理システムがあり、モデル機能を評価するための優良データを提供している。東アジア酸性雨モニタリングネットワークや同観測ポイントに関する詳細についてはAn et al.[2002,2003]やHan et al.[2006]を参照する。本論文では6カ国に分布する20の観測ポイントにおけるデータとシミュレーション結果を比較した。各ポイントにおける空間位置の分布は図2で示すとおりである。



図4の縦座標は月間NO₃湿性沈着量に関するシミュレーション値と観測値の対数である。ほとんどの観測ポイントにおいてシミュレーション値と観測値の差は概ね2倍までであり許容範囲と言える。水園、洪文、Metro Manilaといった観測ポイントではシミュレーション値が異常に低くなっている。これは恐らく排出量を低く見積もったためである。日本の排出量データは比較的信頼性が高くシミュレーション効果も良好である。

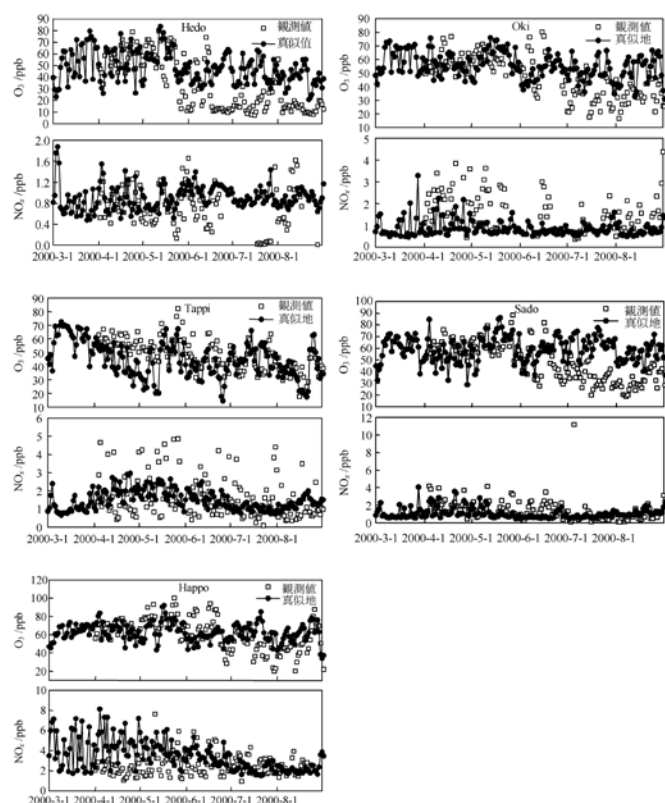


図3 2000年の春・夏季における1日の最高O₃濃度と平均NO_x濃度のシミュレーション値と観測値の対比

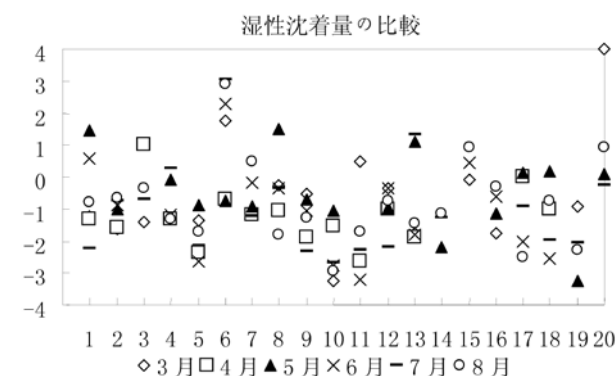


図4 2000年における月間NO₃湿性沈着量のシミュレーション値(W_m)と観測値(W_o)の比較

3 試験方法と結果

3.1 因子分離法

因子分離法はO₃生成における非線形過程に対して感度分析を行い各種排出源がO₃生成に及ぼす影響を定量的に算出できる。近年多くの学者が因子分離法を大気化学分野に应用している。

本論文では人為起源のNO_x (因子N)、AVOCs、BVOCs (因子AとB) について表1で示すように因子分離法に基づく八つの試験方法を検討した。

モデル運用の結果に対する処理：RNAB試験を実施しモデル最下部(50m)の各格子点において最高O₃濃度に達する時間と濃度を毎日記録する。次いで他の7種類の試験を

試験コード	排出源コントロール	シミュレーション結果
NOEM	すべての排出源を閉鎖	f_0
ROON	NO _x のみ考慮	f_N
ROOA	人為起源のVOCsのみ考慮	f_A
ROOB	自然起源のVOCsのみ考慮	f_B
RONA	NO _x と人為起源のVOCsを考慮	f_{NA}
RONB	NO _x と自然起源のVOCsを考慮	f_{NB}
ROAB	人為起源のVOCsと自然起源のVOCsを考慮	f_{AB}
RNAB	すべての排出源を考慮	f_{NAB}

表1 因子分離法によるシミュレーション試験の設計

実施しモデル最下部の各格子点において対応する時間のO₃濃度を記録する。最後に方程式の解を求め各排出源の直接的効果と相互間の間接的效果を算出する。結果は次のとおりである。

$$f'_0 = f_0, \quad (3)$$

$$f'_N = f_N - f_0, \quad (4)$$

$$f'_A = f_A - f_0, \quad (5)$$

$$f'_B = f_B - f_0, \quad (6)$$

$$f'_{NA} = f_{NA} - f'_N - f'_A - f_0, \quad (7)$$

$$f'_{NB} = f_{NB} - f'_N - f'_B - f_0, \quad (8)$$

$$f'_{AB} = f_{AB} - f'_A - f'_B - f_0, \quad (9)$$

$$f'_{NAB} = f_{NAB} - f'_N - f'_A - f'_B - f'_{NA} - f'_{NB} - f'_{AB} - f_0, \quad (10)$$

式において f' は各排出源の直接的効果および相互間の間接的效果を指す。

3.2 地上O₃最大値の空間分布に関する季節的特徴

図5は制御試験RNABのシミュレーション結果を示している。すなわち人為起源のNO_x、AVOCs、BVOCsを考慮した場合における日中の最大O₃濃度の空間分布である。シミュレーション区域における北緯35度以北、東経110度以西のO₃高濃度エリアはモデル西端の設定と関係している。O₃観測結果が不足していたため西端の数値はCarmichael et al.[1998]を参考として設定された。モデル上部において境界値を高く設定した場合、季節性の長期シミュレーションにおいてO₃の累積が生じやすくなる。今後、中国西部における観測データが充実すれば同問題は解決できる。

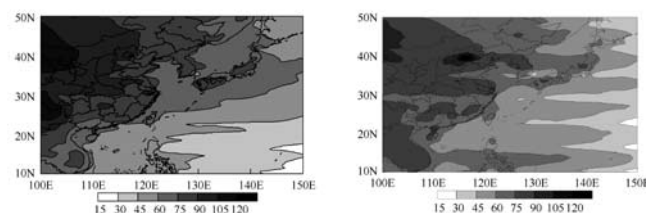


図5 2000年春季における日中の最大地上O₃濃度に関する季節平均値(単位: ppb)

東アジア地域における1日の最大O₃濃度には顕著な季節変化が認められる。春季は概ね高く、中国の中部や北部にある一部の省・区、韓国中部、日本の一部で特に数値が高い(>90 ppb)。夏季になっても中国の北緯30～35度お

よび35～42度の間に高O₃帯が残る。北京、天津、唐山におけるO₃濃度が著しく上昇するのは気温上昇や日照時間の増加によって光化学反応が活発になることと関係している。Cardelino and Chameides [1990]の研究によると、大気温度は人為起源および自然起源の排出量や化学反応に大きな影響を与え、温度が上昇するとO₃生成量が明らかに増加する。中国の北緯30度以南、韓国、日本におけるO₃濃度が春季に比べて著しく低下する原因は気象条件である。夏季には南風や南東の風が強く吹き比較的クリーンな空気が低緯度の地域や海洋上から補充されるため当地のO₃濃度が希釈される。晩春から初夏にかけてアジアモンスーン循環により当該地区に多くの雲が発生し降水量が増える(図6)。これらの気象条件によって汚染物質の形成や累積が抑制される。東アジアの太平洋沿岸における都市から遠く離れた観測ポイントでは夏季に数値が低くなる。Wang et al. [1998b]も香港のO₃濃度が夏季に最も低くなることを発見した。

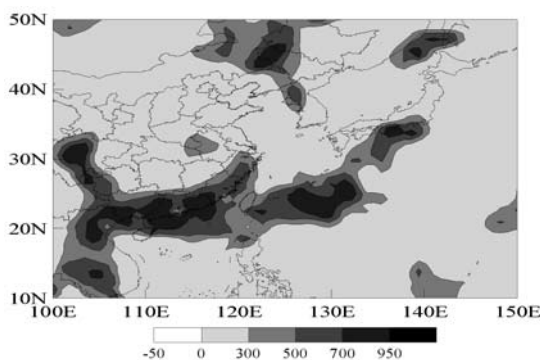


図6 2000年における春季と夏季の降水量差(mm)

3.3 NO_xとAVOCsおよびNO_xとBVOCsの間接的効果に関する季節変化

図7はNO_xとAVOCsおよびNO_xとBVOCsが1日の最大O₃濃度に及ぼす間接的効果に関する季節平均の空間分布である。NO_xとAVOCsの間接的効果 f'_{NA} (図7a、図7b)はNO_xやAVOCsの排出量が多い中国東部、朝鮮半島、日本などに集中しており季節変化も著しい。春季に中国における北緯30度以北の東部沿岸地区、福建東部の沿岸地区、台湾北部、広州、湖北中・東部、韓国北部、日本の一部などの平均値が5 ppb以上となる。長江デルタでは f'_{NA} が50 ppbを超える。北緯36～42度にある北京、天津、唐山では夏季に間接的効果が増大し60 ppb以上に達する。同様に朝鮮地区でも間接的効果が増大する。河南南部、安徽北部、江蘇地区における f'_{NA} は春季と夏季が同程度である。また長江デルタでは若干減少する。中国の北緯30度以南における大部分の地区では夏季 f'_{NA} の影響力が著しく縮小する。中心部の強度も5～20 ppb低下する。これは前述したようにアジアモンスーン循環の活発化が関係している。

NO_xとBVOCsの間接的効果に関する空間分布(図7c、図7d)でも春季と夏季に著しい差が認められる。春季に中国の北緯30度以北における大部分の地区で間接的効果 f'_{NB} が小さくなる。河南省南西部にある桐柏山付近では例外的に増大し効果が5 ppbに達する。これは桐柏山にある広大な原生林によって自然起源の排出量が増加するためである。NO_xとBVOCsの間接的効果はO₃生成量を著しく増加させる。北緯30度以南における f'_{NB} は東経105度以東にあるすべての省・市に影響している。特に湖南の衡山付近には大きな広葉樹林が広がっており f'_{NB} は15 ppb以上となる。また広東省湛江市には豊富な農林畜産資源があり f'_{NB} は17 ppbを超える。これらはNO_xとBVOCsの間接的効果(図7a)を超えており自然起源の排出量が大きく関わっていることが分かる。夏季には気温の上昇に伴って北緯30度以北における自然起源の排出量が増加するため f'_{NB} の影響も増大する。黒竜江省のハルビン市や鶏西市を中心とした地区で f'_{NB} が約6 ppbにまで達する。東経110～130度、北緯40度付近に比較的影響力の大きいエリアが広がっており中国の渤海海域や朝鮮半島にも影響が及んでいる。これらは春季とは明らかに異なる現象である。特に遼東半島の瓦房店市地区で f'_{NB} が高く15 ppbに達する。北緯30～35度にある河南桐柏山の f'_{NB} は15 ppbにまで増加する。安徽北部や湖北東部における f'_{NB} も春季より増加する。長江デルタ、日本の九州や四国、台湾海峡と同沿岸地区における f'_{NB} も夏季に春季より増大する。以上のことからBVOCsが温度に対して非常に敏感であることが分かる。温度上昇に伴いBVOCsの排出量が増加し反応も活発化する。例外は湖南衡山および広西の一部や北部湾の大部分は夏季に東アジアモンスーンの影響で f'_{NB} が若干減少する。

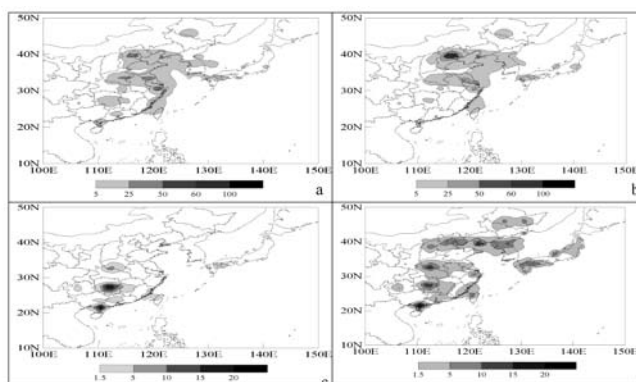


図7 2000年におけるNO_x、AVOCs、BVOCsが1日に最大地上O₃濃度に及ぼす間接的効果(ppb) (a 春季におけるNO_xとAVOCsの間接的効果、b 夏季におけるNO_xとAVOCsの間接的効果、c 春季におけるNO_xとBVOCsの間接的効果、d 夏季におけるNO_xとBVOCsの間接的効果)

3.4 NO_xとAVOCsおよびNO_xとBVOCsの間接的効果に関する日変化

図8は中国の黒竜江省鶏西市、遼寧省瓦房店市、湖南省

双峰県（衡山付近）、広東省湛江市などにおける3～8月の f_{NA} や f_{NB} の日変化を示している。四つの地区における f_{NA} や f_{NB} の日変化は共に大きい。また気象条件や人為起源および自然起源の排出量が毎日変化するため、時間や地区によって f_{NA} や f_{NB} の効果を示す数値に大きな差がある。

北方に位置する鶏西市や瓦房店市では気温上昇が始まる5月から f_{NA} や f_{NB} の数値が上昇傾向となる。特に f_{NB} の効果が増大することから夏季におけるBVOCsの影響に注意すべきことが分かる。鶏西における f_{NA} の効果は f_{NB} よりも大きいが豊富な森林資源が夏季に自然起源の排出量を増加させるため f_{NA} と f_{NB} の大きさは拮抗する。7月には多くの条件下において f_{NB} が f_{NA} よりも大きくなる。瓦房店では夏季の f_{NA} が目立っている。夏季には f_{NB} が f_{NA} の約50%にまで増加する。

南方に位置する双峰県や湛江市では f_{NB} の効果が f_{NA} よりも高く自然起源の作用が顕著である。図が示すように夏季に f_{NA} の数値が春季より低下する。一つの原因は季節風によって当地における汚染物質の濃度が希釈され NO_x とAVOCsの反応によって生成される O_3 が減少するためである。また f_{NB} の効果を示す数値の変化から夏季に著しい低下は生じていないことがわかる。このことはBVOCsが温度に対して非常に敏感であり温度上昇に伴いBVOCsの排出量が増大し反応も活発化することを示している。結果としてOHラジカルに対する競争が激化し、BVOCsがより多くの NO_x と反応し O_3 を生成する。双峰地区は衡山山脈に隣接しておりBVOCsの排出量も大きい。7月以降は多くの条件下において f_{NB} が f_{NA} の約2倍となる。最高値は50 ppb近くに達する。湛江地区もBVOCsの影響が大きく f_{NB} による効果が目立っている。1日の最高値は60 ppbに達する。

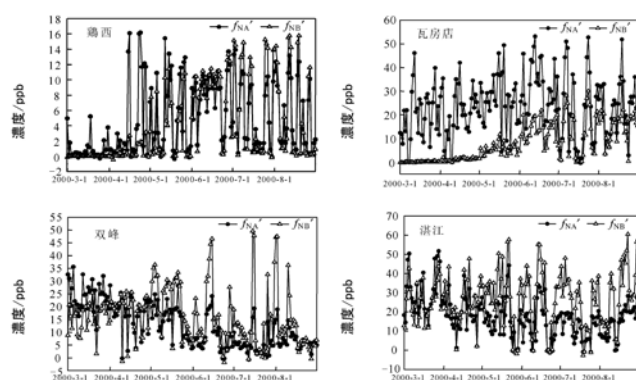
4 結論

因子分離法や改良後のRAQMモデルを用いて春季におけるAVOCs、BVOCs、 NO_x が O_3 生成に及ぼす効果について検討し以下のような結論に達した。

(1) AVOCsと NO_x による間接的効果が大きい地区はAVOCsや NO_x の排出量が多い中国の東部沿岸地区、朝鮮半島、日本の一部に集中しており季節変化も著しい。春季に長江デルタにおける間接的効果は50 ppb以上に達する。夏季は東アジアモンスーンの影響で中国の北緯30度以南における大部分で間接的効果が春季より著しく低下する。

(2) BVOCsと NO_x による間接的効果は中国の南方と北方で大きな差がある。数値が高いのは主に中国の南方地区である。特に湖南、広西、広東の境目、広東省の広州や湛江、福建省のアモイ、台湾北西部などの数値が高い。BVOCsは温度に対して非常に敏感であり温度上昇に伴いBVOCsの排出量が増大し反応も活発化する。北緯30度以北の大部分の地区において夏季にBVOCsと NO_x による間接的効果が春季より大きくなる。

(3) AVOCsと NO_x およびBVOCsと NO_x の間接的効果に関する日変化は顕著であり時間や地区によって大きな差がある。このため個別例に基づいた研究成果を O_3 対策の制定や実施に応用したとしても予期した効果を得ることは難しい。中国の北部（北緯30度以北）では人為起源を制御すべきである。中国の南部におけるBVOCs排出量が著しく高い場所ではオゾン対策を制定するに当たり自然起源および人為起源を同時に考慮すべきである。



◎図8 2000年の春・夏季における NO_x とAVOCsおよび NO_x とBVOCsの間接的効果に関する日変化

中国大気汚染物質排出リストの発展と挑戦

•Profile•



王書肖 WANG Shuxiao ●清華大学環境科学工学部 大気汚染抑制研究所副所長

清華大学環境科学工学部副教授、大気汚染抑制研究所副所長。1974年6月生まれ。2001年清華大学環境工学博士学位取得。前後して国家科学技術難関攻略計画、部委員会基金、国際合作など20余のプロジェクトのリーダーおよび主要研究員を歴任。政府のプロジェクト973「中国の酸性沈下関連物質排出の特徴と強度の研究」、プロジェクト863「地域大気汚染源の識別と動態源リスト技術および応用」のサブプロジェクトを担当、固定源粒状物質・揮発性有機物・無機炭素／有機炭素・水銀などの大気汚染物質排出の特徴の測定、地域的大気汚染物質排出リスト、地域的複合大気汚染の伝播・変化・抑制などの分野で研究を推進。中国内外の定期刊行物や国際会議での発表論文は40余編、単独著書出版3冊、省部級以上の奨励賞受賞3回。

酸性雨や光化学スモッグなどに代表される地域的な大気汚染現象は、現在全世界で注目を集めている大気環境問題の一つである。研究が深まるにつれ、地域における大気汚染物質排出の特徴が地域的大気汚染現象の発生、伝播、変化、抑制を研究する際の重要な情報であることが徐々に知られるようになってきた。そこで、国家・地域レベルでの大気汚染物質排出状況を確実に把握し大気汚染抑制戦略制定の参考とするために、1980年代から国家大気汚染源排出リスト作成に関して海外で多くの詳細な研究が行われてきた。科学や基準の観点を取り入れたリスト作成方法がこれらの排出リスト作成過程に応用されてきたのは、例えばアメリカの国家排出リスト(National Emission Inventory)において適用されている基準やツール、それにヨーロッパのEMEP/CORINAIR大気排出リストガイドブック(EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook)などに見られる通りである。これら基準などに基づいて作成された排出リストは、大気汚染抑制政策の効果を分析する際に用いられ、米国州間大気浄化規則(Clean Air Interstate Rule)や欧州大気清浄計画(Clean Air for Europe program)などの法規を制定するための科学的根拠を提供している。

1 地域的排出リスト作成の基本方法

多くの人々が排出源となって排出される大気汚染物質について地域排出リストが作成される際は、しばしば下記公式(1)によって排出量が計算される。

$$E_{i,j} = \sum_m A_{i,m} \cdot ef_{m,j} \quad (1)$$

公式中の*i*は地域、*j*は大気汚染物質の種類、*m*は汚染源の種類である。*A_{i,m}*は燃料消耗量、製品生産量、溶剤使用料など地域*i*の*m*類の汚染源に対応する活動レベルである。*ef_{m,j}*は*m*類の汚染源が排出する汚染物質*j*の排出因子である。

排出因子の確定は、排出リスト作成の最重要要素である。人々を排出源とする地域レベルでの排出リストにおいて、排出因子は主に質量平衡法と数理統計法の二つによって確定される。そのうちの質量平衡法は主に原料ま

たは燃料の性質の影響を受ける排出に適用される。また、排出過程の生産条件に敏感でない汚染物質排出過程、例えば燃焼過程におけるSO₂排出や塗料VOCs排出にも適用される。数理統計法は主に多くの要因の影響を受ける汚染物質排出過程に適合したものである。多くの同種類の排出源に対して行われた排出測定によって得られたデータをもとに、数理統計法を用いてその排出源のなかで最も可能性の高い排出因子に到達する。

大気汚染物質排出測定技術の発展と排出メカニズム研究の深化にともない、海外での排出リスト作成過程にも多様な方法が用いられるようになった。アメリカでは、発電所などが大規模に排出する多様な大気汚染物質に対して、データのオンラインモニタリング(CEM)において整合を取りつつ、かつ連続的に排出量の計算を進める技術が開発された。また、移動源および非特定汚染源に対しては、排出量を計算するモデルツールが開発された。例えば流動源に対してのMOBILE6・NONROAD・MOVESなどのモデル、生物排出に対してのBEIS・GloBEIS・BEIGISなどのモデル、石油貯蔵缶のVOCs排出に対するTANKSモデルなどである。これらの技術は最新科学の研究成果を応用したものであり、排出リストの正確性を高めるものである。

2 中国の排出リストの現状と主な問題

諸報道によると中国の大気汚染物質排出リストの研究は1990年代に始められたのだが、最初に取り組みしたのは温室ガスについての研究であった。1993年に王明星らは中国の水田や家畜など6種源のCH₄排出量を試算したが、これが中国で最初の全国的大気汚染物質排出リストに関する報道である。1994年、Akimotoらは東アジアのSO₂・NO_x排出リストを作成したが、その中には中国の排出量が含まれている。2003年の報道によると、David Streetsらは省を単位として中国のSO₂・NO_x・CO₂・CO・CH₄・NMVOC・BC・OC・NH₃など多種類の汚染物質の排出リストを計算したが、これは中国に関する最初の多種汚染物質総合排出リストである。中国の研究者も地域での排出に関して研究と作業を進めてきたが、

その多くは独立的・分散的であり、総合的・全面的・動態的な地域における排出情報は極めて不足している。その結果、汚染源の排出状況と時空的特徴を全面的に反映することができず、また予報警報、地域コントロール、地域コントロール効果に関する評価の諸要求を満たすことができないでいる。現在、中国は基準となる排出リストの枠組みとその作成方法を欠き、実測に基づく排出因子が不足しており、大気汚染源の排出情報はシステムと基準に導入するには不十分である。このことは現在の中国の大気汚染研究および抑制政策の解決課題の一つとなっている。また、排出リストの信頼性について評価および検証を進める基準となる方法が欠けているために、排出リストの応用が困難になっている。

2.1 排出リストの枠組みと作成方法

合理的な排出リストの枠組みは相対的に正確な排出リストの必要条件であり、その中でも最も主要な部分は排出源の分類方式である。RAINS-PMモデルは、排出予測要求を満たす排出リスト中のすべての種類の排出源が必ず備えている5条件を提案している。第一に排出源の重要性、第二に統一的に定義可能な活動レベルと排出因子、第三に将来の活動レベルの予測可能性、第四に汚染抑制措置の実現可能性と適用性、第五に活動レベルに関連するデータの取得可能性がそれである。アメリカの国家排出リストで使用される排出源分類コード（Source Classification Codes, SCC）は排出源を9760種類に分類している。SCCコードは全部で4段階に分けられる。第一段階は排出源の基本類型であり、特定汚染源・非特定汚染源・生物源・道路源・非道路源などの5種類がある。第二段階は部門で分けられる。第三段階は業種で分けられるものであり、主に主要製品・原料・燃料の品種で分類される。第四段階は排出場所または排出の過程で分類される。

先進国の大気汚染物質排出リストと中国の排出リストは、排出源分類の系統性および全般的性において非常に大きな格差がある。まず、中国の現在の排出源分類はほとんどが業種一般にとどまっていたり、具体的な排出ポイントや排出生産過程での排出量計算に欠けている。中国の非常に多くの業種では進んだ生産工程と遅れた生産工程が並存しているという現象が見られるが、これらの異なる工程のためにしばしば排出の特徴が大きく異なるのである。セメント工業を例にとってみると、シャフトキルンのCOとNO_xの排出濃度はそれぞれプレヒーター付きキルンの0.116倍および22.9倍である。業種一般に基づいて分類作成された排出リストは異なる工程では排出特徴が異なるという事実を見逃してしまい、排出量計算に大きな誤差が生じてしまうのである。次に、中国の現在の排出リストには多種類の重要排出源が抜け落ちてしまっている。ある種の汚染源の活動情報が相対的に欠如しているため、中国の現在の排出リストの情報は主に固定燃焼源だけを扱っており、塗料使用や生物源などの汚染源につ

いてふれたものは非常に少ないのである。

排出源分類のほかに、中国の現在の排出リストがカバーしている汚染物の種類も十分ではない。現在の排出リストは主にSO₂・NO_x・CO・NH₃などの気体汚染物質や煤塵・粉塵に関するもので、地域における複合大気汚染研究を支える一次粒状物質（PM_{2.5}・PM₁₀）やVOC、特にその化学成分の情報を欠いている。

そのほかに、中国の現在の排出リストは基準年・方法論・排出源分類方式・データの由来などが統一されていない。このため異なる結果同士での比較の可能性が低く、また不確定性が非常に高くなり、地域的複合大気汚染において重要な役割を果たすカーボンブラックと有機炭素排出量の不確定性が500%近くになるほどである。

2.2 排出因子の測定

排出リストの作成過程において、排出源の測定によって得られた排出因子は非常に重要な情報である。排出源測定データを比較可能にするために、各種排出源測定方法を調査研究する基礎として、米国環境保護庁は各種標準汚染物質・重金属・揮発性有機気体についての測定方法を推奨した。この測定方法の対象汚染物質は5種の標準気体汚染物質（CO₂・CO・NO_x・SO₂・TVOC）・粒状物質（PM・PM₁₀・PM_{2.5}）・15種の重金属・VOC・有害大気汚染物質（Hazardous Air Pollutants, HAPs）・その他の無機気体汚染物質（H₂S・F・HCl）である。これに比べ、中国の排出因子測定基準は非常に不完全なものであり、現在は工業固定源排煙・煤塵・CO・NO_x・SO₂など汚染物質の採集および測定基準と自動車のベンチ測定の基準が頒布されたに過ぎない。これによってカバーされる汚染源と汚染物質は非常に少なく、表1の通りである。特にPM_{2.5}・PM₁₀・VOCs・重金属の排出測定基準が欠けており、地域的排出リストの要求を満たすにはほど遠いものである。

◎表1 中国とアメリカの排出源測定方法の比較

汚染物質	EPA 測定方法	中国の測定方法
二酸化炭素・酸素	3, 3A, 3B, 3C	
亜硫酸ガス	6, 6A-6C, 8	HJ/T 56-57-2000
窒素酸化物	7, 7A-7E, 20	HJ/T 42-43-1999
一酸化炭素	10, 10A, 10B	HJ/T 44-1999
粒状物質	5, 5A, B, D, E, F, G, H, 5I, 17, 201, 201A, 202, 315	GBT16157-1996
PM _{2.5} ・PM ₁₀	201, 201A, 202	
揮発性有機物	18, 21, 25D, 204A-F, 305, 307	
水銀など 15 種の重金属	29	

大量の汚染物質排出調査および排出測定に基づいて、アメリカは固定排出源の排出因子ハンドブックAP-42を

制定した。AP-42はほぼすべての固定排出源と地域的汚染に関連するすべての大気汚染物質をカバーしている。ヨーロッパも排出測定的基础としてCEPMEIP内のPM排出因子データベースのような排出因子ハンドブックを制定した。そのほかに、VOCsと粒状物質内の複雑な化学成分について、アメリカはさまざまな排出源から排出されるVOCsと粒状物質の成分一覧をまとめ、成分ライブラリSPECIATEを制定した。これに比べて、中国の測定によって蓄積された排出因子はSO₂・煤塵・粉塵に集中しており、カバーされる汚染源は主に固定源であって、総合排出リストの要求にはほど遠いものである。近年中国の研究者は、民間排出源や自動車源の測定方法および粒状物質のサンプリング選別、成分分析およびVOCsのサンプリング分析に探索的研究を進めているが、排出因子の確定にはまだ大量の系統的測定、特に従来のコーキング・セメントのシャフトキルン・レンが窯など中国特有の汚染源の測定作業が必要である。

2.3 排出リストの応用

排出リスト確立以後、科学研究者や政策決定管理者は排出データの更新・排出の予測および背景の分析・排出特徴の分析・データ処理モデルの輸入・情報相互の可視化など一連の課題に直面することとなった。これらの課題に対して内外の研究者は一連のモデル、ツールおよび技術を開発したが、これらの研究開発ではアメリカのそれが最も成熟している。アメリカのノースキャロライナ・マイクロエレクトロニクスセンターが開発したSMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions Modeling System) モデルは、最も幅広く用いられる排出源データ処理モデルの一つである。その主な機能は一年を時間単位、行政区を空間単位とした排出リストが空間的・時間的分配を進め、同時にモデルが選択的に使用する化学メカニズムに基づいて排出リストの最初の汚染物質に化学物質の種類と質量の比例分配を進めることによって、空気質量モデルが時空解像度と化学物質の種類面で排出リストの高精度の要求を満たすというものである。SMOKEにはMOBILEモデルとBEISモデルが組み込まれており、リアルタイムで流動源と天然源の排出を高精度に計算することができる。そのほかに、このモデルは将来の排出について予測と背景分析を行うことができる。アメリカのミシガン湖大気監視連盟が開発したCONsolidated Community Emissions Processing Tool (CONCEPT) モデルはSMOKE類似の機能を持つもう一つのモデルである。SMOKEと比べてCONCEPTは排出予測と背景分析により優れた機能を持ち、簡単な排出抑制コストの分析も行うことができる。現在アメリカ環境保護庁が開発中のEmission Modeling Framework (EMF)は、排出源データの分析および処理の統一的なプラットフォームを確立することを目指したものである。このプラットフォームは排出源データ処理モデルであるSMOKEを核心とし、統一

的なフレームで分析・管理・可視化のツールを開発したものである。このプラットフォームによって研究者は排出源データに関する各種の課題を実現することが可能となった。

これに比べて中国の排出リスト応用ツール研究は遅れており、しかも都市汚染源の管理に集中している。地域レベルの研究に関する報道は、張強基がGIS技術とクロスプラットフォームのプログラミング技術において開発した地域的多基準排出源モデルのみである。既存の排出データプラットフォームでは主に次の二点が欠けている。第一に排出情報のグリッド解像度が不十分である。既存の全国排出リストの研究のグリッド解像度は1°前後であり、東アジア地域の汚染物質の伝播など大地域レベルのシミュレーション研究に多用されているが、地域・都市レベルの多重グリッドネストシミュレーションにおいては精度不足なのである。第二にリアルタイムで排出源排出の変化を反映することができていない。中国の経済は急速に発展しているため、造成される各都市および地域の汚染源の排出変化は非常に大きく、すばやく確実にこれを掌握することは困難である。そこで、主要汚染物質の地域動態源排出リストおよびデータベース管理システムを確立し、地域の排出源の排出情報を動的に更新していくことが求められるのである。

2.4 排出リストの検証

大気環境中の物質としての汚染物質の種類はきわめて多く、直接物質質量または排出量を観測することは非常に困難である。数多くの化学物質の物質質量観測にはいまだ効果的な技術手段が乏しく、直接的な実験観測を用いてすべての汚染源排出状況に対して検証を行うことは不可能である。このため汚染濃度観測結果から汚染源を逆検証する技術が研究されている。これが汚染源リストを間接検証する有効な手段となる。

逆検証は従来の排出リストを検証する方法として近年急速に発展してきた。東アジアで最も早くに作成された大気汚染物質排出リストであるTRACE-Pに対して、海外では観測情報に基づいた多様な逆検証研究が展開されてきた。COに関して、アメリカのハーバード大学とアイオワ大学などは前後して航空測量・衛星リモートセンシング・地上観測情報を利用して東アジア地域の部分燃焼源排出総量について逆検証を行った。Streetsはリストの逆検証の結果に基づき排出リストを向上させた。すなわち中国特有の燃焼排出源についてははっきりと識別し、同時に技術に基づいた排出源分類方法を確立して、CO排出源漏れと特有排出源の排出因子の問題の基礎的解決に至り、中国CO排出リストの正確性を大きく向上させた。

しかしNO_xのリスト逆検証については、大気物理化学の仮説を用いることによって、COの逆検証と比べて、かえってその逆方向数値シミュレーションの計算の複雑さが増加した。ハーバード大学は衛星リモートセンシング

のデータを用いて、NO_xの逆検証結果について次のような事実を明らかにした。すなわち、NO_xの排出時空分布と趨勢には90年代後期から大きな変化が見られるというのである。また、Zhangはリストの逆検証の結果に基づいて中国の主なNO_xの排出源の活動レベル・排出因子・季節変化の特徴について分析を進めた。そして、技術に基づく動態的方法を用いて中国の1995～2004年のNO_x排出リストを確立し、さらに中国のNO_x排出量の変化趨勢を正確に描き出した。

ただし、逆検証研究は排出リストの検証と改善に方向性を示したが、中国の地域的COおよびNO_xリストに対する海外の逆検証研究にはほとんどの場合、以下のような問題が含まれている。まず、逆検証が用いる前提のリストはTRACE-P・EDGAR・CORPなどのような全世界規模の超巨大レベルのリストであり、精度が不十分である。次に逆検証の制約条件はすべて衛星リモートセンシング・航空観測・点在する地上観測サイトなどに基づいており、対応する高精度の観測情報が不足している。そのほかに以上二つの原因に限定され、逆検証は排出源排出種類と地域での検証を完全にはカバーしておらず、時空分布と趨勢の検証解像度が少し低い。

また、中国国内に衛星リモートセンシングのデータを利用して大気汚染物質濃度を逆検証した研究があるが、衛星リモートセンシングのデータのリストに基づいた逆検証研究はまだ存在しない。

3 中国排出リスト技術の改善と完成

中国の排出リストを改善し、地域的大気汚染研究および政策決定の要求を満たすためには、排出因子測定と排出リスト作成の関連技術には依然として課題がある。

上述したように、現在中国の排出因子測定基準方法は主に工業固定源の排煙・煤塵・CO・NO_x・SO₂などの汚染物質測定と自動車のベンチテストに集中している。そのため固定源については、海外の既存の研究に基づいて固定源PMとVOC、そしてその成分の正確な測定方法を研究開発するだけでなく、中国特有の従来からのコーキング・セメントのシャフトキルン・れんが窯などの稼働状況の劣悪さや排出濃度の高い排出源測定技術に関して特

に開発を進める必要がある。移動源については、中国製自動車の走行状況に適用する車載測定技術を開発する必要がある。そのほかに、非特定汚染源と生物源の排出測定技術を発展させる必要がある。

排出リスト作成技術に関しては、主に中国の排出源部門の分布特徴に適用される分類方法を制定する必要がある、また現在の社会経済的統計に基づいて動態的活動レベルの情報を獲得してその処理技術を確立する必要がある。さらに道路源・非道路流動源・生物源などについては中国の自動車および非道路移動源排出レベル・植生分布・農業および牧畜業の発展状況に適用される排出モデルを確立する必要がある。

このほかに、汚染物質抑制政策に用いられる排出リストは規格性・適用性・信頼性を備えるべきであるという要求に応える必要がある。その規格性を保証するためには、政府部門は早急に排出源分類方法・排出因子測定方法・活動レベルの獲得と処理手続きに関して国家または業界の基準・ガイドラインを確立する必要がある。そして排出リスト確立過程で一致して使用される方法論を保証し、排出リストの動態的更新の方法的基礎を提供するのである。その適用性を保証するためには、使いやすいインターフェイスを備えた排出リストソフトウェアを開発し、活動レベルのデータ収集と処理機能および排出リストの動態的更新を行わなければならない。そして同時に空気質量モデルの排出データフォームが必要とする多元的排出量データを抽出し、基本的な照会機能と可視化機能を満たさなければならない。また、その信頼性を保証するためには、排出リスト作成過程の質量抑制／質量保障の手続きを制定する必要がある、排出リストの不確定性分析技術や地上観測・衛星リモートセンシングなどのデータに基づく排出リスト逆検証技術を発展させる必要がある。

以上の研究上の課題について、中国科学技術部の支援のもとに清華大学はプロジェクト863「地域的大気汚染源の識別と動態源リスト技術および応用」の研究を進めているが、2010年にはブレイクスルー的な研究の進展を期待している。

中国の大気中低分子有機酸研究及び大気汚染防止におけるその役割

•Profile•



李 心清 Li Xingqing ●中国科学院地球化学研究所研究員

1965年3月生まれ。1997年、中国科学院地球化学研究所で地球化学博士の学位を取得。主な研究分野は次の通り。①古海洋における同位体地球化学と環境。地質時代の海洋酸素、炭素、ストロンチウムなど安定同位体の変化の特徴、そのメカニズムの研究及びこれをベースにして古海洋の環境変化の特徴を再構築すること。②大気環境地球化学。大気中有機酸の含有量と同位体組成の特徴、有機酸の生物地球化学的循環と大気自由酸度の変化、及びカルスト地域の炭素循環に対するその影響。③地球変動及びその対応技術。中国の歴史時代の気候変動と中華文明の発展に対するその影響、及び土壌由来温室効果ガスの排出削減技術という2つの分野が重点。

1. 大気中低分子有機酸の環境への影響

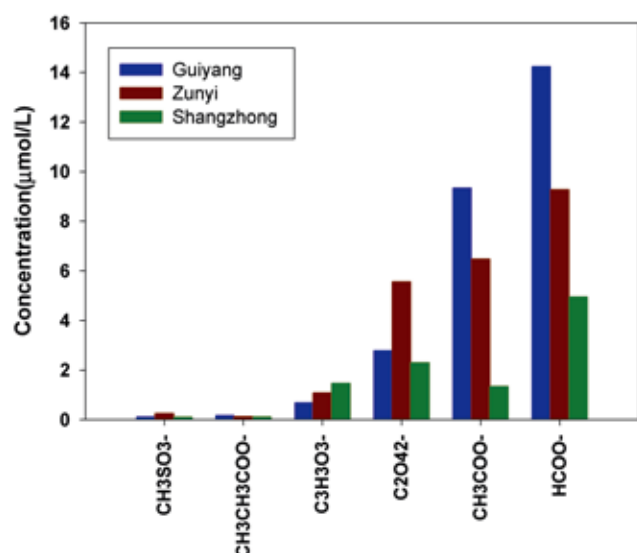
大気中の微量ガス成分、特にメタン、CO₂、揮発性有機炭素（VOC）、オゾン等は地球の気候と環境に対して大きな影響を与える。大気中有機酸はVOC類有機化合物であり、主にギ酸（HCOOH）と酢酸（CH₃COOH）を含み、その次にプロピオン酸（CH₃CH₂COOH）、シュウ酸（HOOC-COOH）、ピルビン酸（CH₃COCOOH）等の低分子カルボン酸がある。無機酸（硫酸や硝酸等）に比べ、有機酸は種類が多く、発生源が複雑であり、しかも対流圏の中に広く存在している。その酸性は無機酸より弱い、酸性雨の形成に対し同じように大きく寄与しており、これは特に非工業地域と人間の活動から遠く離れた地域で顕著に見られる。これらの地域では、降水酸度に対する有機酸の寄与は65%にも達し、無機酸の含有量が多い都市及び工業汚染地域でも、その降水酸度への影響は45%に達する。一方、中国東南部において、降水酸度に対する有機酸の寄与は平均66.3%となる。降水酸度への多大な寄与により、有機酸は陸地及びその水域の生態系と環境に大きな影響を与えると同時に、pH値に左右される若干の大気化学反応にも影響を及ぼしている。また、大気中有機酸は対流圏の全有機炭素の20%前後を占め、大気中におけるその循環はヒドロキシル基（OH）の濃度を低下させるのに大きな働きをする。後者は対流圏化学の極めて重要な成分であり、対流圏中のメタン、一酸化炭素等の温室効果ガスを減らす最も主要な酸化剤となる。このため、対流圏における有機酸の循環は地球の気候変動にも関係している。有機酸はさらに大気中の重要な凝結核であり、大気中におけるその化学プロセスは降水地域と降水量の多さに影響し、地域の気候と環境に影響を及ぼすことになる。この他、大気中有機酸は金属工業施設の腐食、石灰岩建材の風化、及び文化財や文書ペーパーの質的变化等の過程にも関係する。その危害はこの20年で中国の大気汚染が深刻化するに伴い、クロールアップされ、ますます多くの注目を集めている。

2. 国際的な大気中低分子有機酸研究及び中国の役割

1960年、Erikssonは有機酸が大気の化学組成と降水の性質に大きく寄与しているとの見解を初めて示した。しかし、その後の20年近くにわたり、この見解は人々から重視されることがなかった。1980年代初めになると、大気の試料採取と分析技術の向上及び酸性雨問題の深刻化により、大気・降水の化学組成とその性質に対する研究が始まった。その間、後の有機酸研究に重大な影響を与えることになる研究計画、即ち「地球降水化学研究計画」が登場した。この研究は1979年にスタートし、米Virginia大学環境科学部が中心となって完成させた。この研究を通じ、人間の活動から遠く離れた地域では有機酸の降水酸度寄与率が65%にもなることを発見したのである。この報道により、人々は大気中有機酸を重視するようになった。その後の20年間に、大気中有機酸に関する20件近くの大規模な研究プロジェクト又は計画が各国で進められた。これらのプロジェクトは気相、液相とエアロゾル相における有機酸含有量の測定を通じ、大気中有機酸の発生源、移動、他の化学成分との間の相互作用、及び有機酸の沈降など一連の問題（即ちその生物地球化学的循環問題）を研究するものであった。1980年代は有機酸研究が急速に進んだ時期であり、わずか数年の研究から大気中有機酸に対する認識面で大きな蓄積が得られた。1987年8月にカナダのPeterboroughで開催された「第6回世界大気化学・地球汚染会議」では特別分科会を設け、大気中有機酸に関する各国の研究成果が発表された。1990年代は有機酸の研究が一段と幅広い分野で行われ、中・低緯度の各地域における大気中有機酸の含有量測定で大きな前進が見られた。それと同時に、極地と山地水河の水コア記録による有機酸研究でも歴史的視点からその生物地球化学的循環について探究が行われた。近年は有機酸の生物地球化学的循環と地球変動の関係についての研究が特に重視され、IGBP研究の枠組みの下、大気化学と地球変動の関係を認識することを目的とした幾つかの大型国際研究計画が進められている。例えば「アマゾン

ン地域における大規模生物圏・大気圏実験研究計画」、「生物圏と大気圏における微量ガスとエアロゾルの相互作用研究計画」、「森林火災と大気化学・気候変動研究計画」等であり、これらの計画ではいずれも有機酸の生物地球化学的循環が重要な研究内容に組み込まれた。

中国の大気中有機酸研究はおおよそ2つの部分から成る。1つは西部山地水河の水コアにおける有機酸記録の研究である。この研究は大気中有機酸の変化の歴史が刻み込まれている水コアの特徴を生かし、その含有量の変化と気候、生態環境の変化及び人類社会・経済の発展との関係を探るものだ。もう1つは中国の現在の降水中有機酸含有量及びその空間分布の特徴について研究を進め、有機酸の発生源、沈降フラックス等の問題を認識することである。水コア記録がはっきり示しているように、中国西部の天山とチョモランマ地区の大気中有機酸含有量は世界の同じ緯度にある他の地区の10倍前後となる。中国東部の降水でも高含有量の有機酸が同様に検出されており、地域的な降水の自由酸度に対するその寄与の大きさは世界に類を見ないものである。水コア記録の分析でも、現代の大気・降水の分析でも、大気汚染が中国の大気中有機酸の最大の発生源であることを示している。大都市から中小都市に、都市から農村に行くと、大気中の有機酸（特にギ酸と酢酸）含有量が目立って少なくなる。この現象は中国西南部の各汚染地域における大気中有機酸含有量の年間観測から窺い知ることができる（図1）。このため、大気中有機酸の分析は大気汚染度を識別する1つの評価指標としてよい。



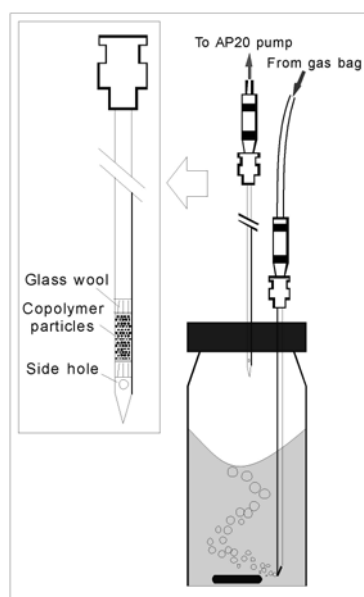
◎図1 貴陽市、遵義市、尚重鎮3地区の大気・降水中有機酸含有量の対比。貴州省最大の都市、貴陽市は総人口372万で、森林被覆率が35%となる。市街区域（南明区と雲岩区）の人口密度は7,070人/km²。大気汚染が深刻な環境を代表している。同省北部に位置する遵義市は中心市街区域の人口が82万で、その人口密度は1,220人/km²、森林被覆面積は37.8%となり、中度大気汚染を代表する。同省東南部に位置する黎平県尚重鎮は森林被覆面積が65%で、都市の汚染源から遠く離れており、人口密度が146.56人/km²。西南地区における大気の自然的背景を代表するもの。

3. 大気汚染問題の認識面から見た有機酸含有量分析の不十分な点と解決の道

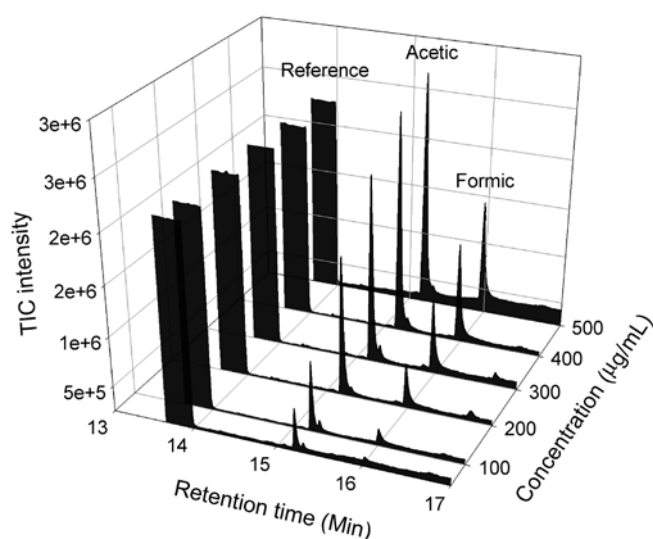
国際的に広く採用されている有機酸の研究方法と同じように、中国の現在の研究方法も有機酸含有量の分析に力点が置かれている。この方法は大気汚染度を知ることができるが、大気汚染の発生源を識別し、各汚染源の汚染度を数量化する等の面では役に立たない。この種の問題は大気汚染の処理において解決の必要に迫られた難題といえる。この問題に答えるには、有機酸に発生源別の標識を付ける技術的手段と方法が必要になる。その方法とは有機酸の炭素同位体組成分析である。

過去数十年の間、メタン、CO₂等の分子・同位体組成の研究はその生物地球化学的循環を認識する上で非常に大きな役割を果たしてきた。同位体分析方法が大気の微量ガス研究で大きな可能性を秘めていることをはっきり示したのである。このため、有機酸分子の安定同位体の分析もその生物地球化学的循環問題を解決する手段となるはずである。地表条件の下で、大気中有機物質の炭素同位体組成（ $\delta^{13}\text{C}$ ）は炭素の発生源と関係があり、温度等の物理的条件による影響を受けることが少ない。同時に、自然界の各炭素発生源の間には同位体組成で大きな差異が存在している。このため、 $\delta^{13}\text{C}$ を分析すれば酸基イオンを発生源別に区分することができる。そればかりでなく、多くの既に知られた有機酸発生源は同時に数種類の低分子有機酸を大気中に放出している。従って、多種類の低分子有機酸の $\delta^{13}\text{C}$ を測定すれば、 $\delta^{13}\text{C}$ と有機酸発生源別寄与量の間に多元方程式を確立し、大気中有機酸に対する発生源別の寄与割合を算出することができる。この他、物理的条件による影響をあまり受けなため、有機酸が大気中で酸化されたり他の化合物に分解される過程でも大きな同位体分留がなく、有機酸の挙動を追跡することができる。

しかし、有機酸の同位体分析を行うには1つのカギとなる技術的問題を解決する必要がある。即ち単一有機酸分子の分離と精製である。その最新の解決方法は日本のSHINWA化工が製造したNeedlEX脂肪酸型抽出針を利用し、適度な酸性条件下でヘッドスペース抽出法を用い、有機酸分子を濃縮（図2）した後、ガスクロマトグラフィーと質量スペクトルの併用技術により、水溶液中の有機酸の炭素同位体組成（図3）を分析することである。大量の検査分析から、この種の方法で得られた分析結果は有機酸炭素同位体組成の真値と顕著な差異のないことが証明されている（ $P>0.05$ ）。LC-SAX濃縮カラムと組み合わせれば、大気中低分子有機酸の炭素同位体組成をppmレベルで測定することができる。



◎図2 水溶液中有機酸の抽出装置図。脂肪酸型NeedlEXを抽出瓶の上部ヘッドスペースに差し込み、その後部を抽気ポンプにつなぐ。抽気ポンプが生み出す負圧作用により、高純度のHe₂ガスが抽出瓶底部に差し込まれた1本の穿刺針を通じて瓶の中に入り、ガスを補充すると同時に、水溶液中の有機酸に対してバージを行う。こうして有機酸がヘッドスペースに入り、NeedlEXによって吸着・捕集される。



◎図3 ガスクロマトグラフィー・同位体質量分析器のTIC検出器で検出された、50ppm～500ppmの濃度条件下におけるギ酸と酢酸のクロマトグラム

4. 中国西南部貴陽地区の大気中低分子有機酸の同位体組成

中国貴州省の省都、貴陽市の夏・秋季における降水中のギ酸と酢酸の炭素同位体組成に対する分析結果（表1）は、2種類の有機酸の同位体組成が似ていることをはっきり示しており、その発生源が一致することが証明された。既存データから見ると、2つの主要な発生源は人類がもたらした大気汚染と森林が放出したアルケンの大気中における酸化である可能性が高い。夏から秋にかけて植生の生産力が弱まるのに伴い、大気汚染が生み出す有機酸の占める割合が増え、これによって降水中の有機酸が減少する。森林の大気、繁華街の大気、自動車の排ガスなど発生源別の有機酸炭素同位体組成に対する分析結果が示すように、その同位体組成は各発生源の間で大きな差異が見られる。

Collection data	Concentration (μmol/L)		stable carbon composition($\delta^{13}\text{C}$) with STDEV (n=6) (‰)	
	Formic acid	Acetic acid	Formic acid	Acetic acid
2008.08.25-26	10.25	5.43	-27.25±1.11	-26.17±1.51
2008.09.02-03	5.75	3.85	-25.72±2.17	-26.23±2.24
2008.09.13-14	18.53	11.64	-28.80±0.49	-29.33±0.41
2008.09.24-25	17.43	6.97	-27.65±0.98	-28.87±0.43
2008.10.03-04	7.29	3.41	-28.29±1.60	-27.10±2.40
2008.10.08-13	22.43	13.09	-29.08±0.46	-30.40±0.44

◎表1 貴陽市市街区域の降水中のギ酸と酢酸の含有量及びその $\delta^{13}\text{C}$ 値の分析結果

5. 大気中低分子有機酸同位体トレーサー研究の将来の発展方向

同位体トレーサー技術を利用し、大気中の有機酸及びその大気汚染との関係を研究することはまだ始まったばかりである。複数の方法でこれまでに測定された有機酸の同位体組成から見ると、世界各地域の炭素同位体組成には非常に大きな違いがあり、地域別の対比を行うことは興味深い研究となる。この新しい手段を大気汚染防止に応用するには、以下の研究を早急に進めなければならない。第1に、発生源の異なる有機酸について炭素同位体組成の標定を行うと同時に、有機酸の放出フラックスを発生源別に測定する。これは実用的な研究であり、大気汚染源を識別するのに適している。具体的な大気汚染処理においては、可能性のある汚染源をモニタリングし、処理対象を確定する必要がある。第2に、大気と降水中の有機酸同位体組成について地域別の測定を行い、その同位体組成の空間分布の特徴をつかむ。この研究は基礎的な科学研究であり、得られたデータは大気汚染の防止に役立つ。

日本におけるCO₂地中貯留技術開発の取り組み

•Profile•



薛 自求 セツ・じきゅう ●(財)地球環境産業技術研究機構 CO₂貯留研究グループ 主任研究員

1963年8月生まれ。1993年北海道大学大学院・資源開発工学専攻・工学博士。日本初の国家プロジェクトである長岡CO₂地中貯留実証試験は、地質構造が複雑な日本でも、CO₂地中貯留が安全に実施できることを示している。薛氏は長岡実証試験の計画段階から参加し、室内の基礎的研究から野外の現場計測までプロジェクト全般に貢献した。最近5年間(2004-2008)、国内外の学術雑誌に計20編の論文を投稿している。その功績が認められて、2007年から発行されている地球温暖化対策の専門誌「International Journal of Greenhouse Gas Control」のAssociate Editorとして、CO₂挙動モニタリング関連論文の編集を担当している。この国際専門誌は英国のElsevier社より出版されており、薛氏は4人の編集者のうちのひとりとして、アジアと豪州地区の責任者となっている。

1. はじめに

1997年の国連気候変動枠組条約締約国会議(COP3)では、温室効果ガスの排出削減数値目標とスケジュールを定めた京都議定書が採択された。京都議定書では、2008年から2012年の間に温室効果ガスの排出量を先進国全体で1990年比5.2%削減すること、またその中で日本は同年比6%の削減が義務付けられている。今年6月政府はポスト京都議定書の国際動向をにらんで、2020年時点の温室効果ガス排出削減の中期目標について、2005年に比べてCO₂などの温室効果ガスを15%削減すると発表した。この中期目標は今後の国際的枠組み交渉で日本の基本的な立場となり、12月にコペンハーゲンでの国連気候変動枠組条約締約国会議(COP15)を経て、温室効果ガス削減の数値目標が正式に決まる。15%削減は実現可能な目標と考えられ、達成すれば2030年には05年比で約25%減、50年には約70%減と試算されている。

環境省がまとめた2007年度の温室効果ガス総排出量は13億7,100万トンであり、京都議定書基準年の1990年度比では8.7%の増加となった。このうち、エネルギー起源は15%の増加となった。原子力発電所の利用率の低下や渇水による水力発電量の減少に伴い、石炭などの化石燃料を利用する火力発電量が大幅に増加した影響が大きかった。このように、政府や産業界の努力にもかかわらず、国内の温室効果ガス排出量は京都議定書採択後も増え続けている。CO₂を大量に排出するのは、火力発電所、製鉄所、セメント工場及び化学プラントである。このような「大規模発生源」から分離回収したCO₂を地中に貯留する(CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage)技術が、大気中の温室効果ガス濃度の増加を緩和する有効な方策として期待されている。国際的な専門家で作る気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は2005年にまとめた報告書の中で、2030年までの中長期的温室効果ガス排出緩和策としてCO₂地中貯留の実施を各国に推奨している。

CO₂地中貯留は再生可能エネルギーの利用促進、エネルギー効率の改善及び燃料転換といった他の緩和策と並行して実施される効果的な地球温暖化対策技術として注目されている。1996年10月より始まったノルウェー沖合い

にある北海油田Sleipner サイトでのCO₂地中圧入事業を機に、CO₂地中貯留は地球温暖化対策の即効的技術として期待され、各国で盛んに研究開発が行われている。2003年7月より新潟県長岡市の帝国石油株式会社の岩野原基地では、日本初の国家プロジェクトとなるCO₂地中貯留の圧入実証試験(以後、長岡実証試験と呼ぶ)が実施されるようになった。長岡実証試験は経済産業省の補助金を受けて、財団法人地球環境産業技術機構(RITE)の主導の下で2000年度から進められてきた。財団法人エンジニアリング振興協会(ENAA)の協力を得て、2003年7月から約1年半をかけて、計10,400トンのCO₂を地下約1,100mの塩水性帯水層に圧入した。地中貯留技術は、国または民間において取り組まれるべき重要度が高い／持続的な効果が期待できる技術の一つとして位置付けられている。本稿では、長岡実証試験の概要を紹介しながら、日本におけるCO₂地中貯留ポテンシャル(貯留可能量)や国内でのCO₂地中貯留事業化の課題を議論する。

2. 日本のCO₂地中貯留ポテンシャル

1996年10月より始まったノルウェー沖合いにある北海油田Sleipner サイトでは、天然ガス精製時に分離したCO₂を海底下約1000mの帯水層に圧入しており、その事業規模は年間約100万トン(ノルウェーの年間排出量の約3%相当)となっている。帯水層は主に多孔質砂岩からなっており、経済的に利用価値がほとんどない塩水(化石海水)が含まれている。砂岩層の上部には、難透水性の泥質岩の地層(キャップロック)が覆っており、砂岩層に圧入されたCO₂を長期にわたって安全に貯留できる有望なサイトと期待されている。

キャップロックとなる泥質岩の地層がドーム構造(背斜構造)を伴う場合は構造的帯水層と呼ばれ、石油や天然ガスの貯留層と似た構造となっている。現在確認できている構造的帯水層に限定しても、日本におけるCO₂地中貯留ポテンシャルは約301億トンに達している(表1参照)。これは2007年度の温室効果ガス排出量の約23年分に相当する。一方、ドーム構造を伴わない非構造的帯水層をあわせた試算では、帯水層貯留のポテンシャルが約1,460

億トンと試算している。

地質データ	カテゴリー A	カテゴリー B
油ガス田	坑井・震探データが豊富	A1
	35 億トン CO ₂	B1
基礎試験地	坑井・震探データあり	A2
	52 億トン CO ₂	275 億トン CO ₂
基礎物探	坑井データなし・震探データあり	A3
	214 億トン CO ₂	B2
合計	301 億トン CO ₂	1,160 億トン CO ₂

◎表1 日本におけるCO₂地中貯留ポテンシャル

また、2005 年に発行された地中貯留に関する特別報告書 (IPCC Special Report) では、塩水性帯水層 (saline aquifer) へのCO₂ 地中貯留を「大気中の温室効果ガス濃度を安定化させるための主要な対策の一つ」と位置づけている。その主な理由の一つは、帯水層貯留のもつポテンシャルが世界全体で約2 兆トンと試算されていることである。

3. 日本初のCO₂地中貯留実証試験

北海のSleipnerサイトが世界初の海域帯水層貯留であるのに対し、新潟県南長岡ガス田で行われたCO₂圧入実証試験 (長岡実証試験) は世界初の陸域帯水層貯留である。経済産業省の補助金を受けて、地球環境産業技術研究機構 (RITE) がエンジニアリング振興協会 (ENAA) の協力を得ながら、計10,400 トンのCO₂を地下約1,100 m の帯水層に圧入し、地質条件が複雑な日本でもCO₂地中貯留が可能なことを示した。長岡プロジェクトでは陸域帯水層貯留の利点を生かした綿密なCO₂挙動モニタリングが行われた。以下では長岡実証試験の概要を紹介する。

1) 実証試験サイトの概要

CO₂圧入実証試験サイトは地下の状況がよく調査されている国内の油ガス田地域の複数の有力な候補地点の中から、新潟県南長岡ガス田の帝国石油株式会社の岩野原基地が選ばれた。岩野原基地は長岡市中心から約9 kmの信濃川支流となる渋海川左岸に位置する (図1 参照)。ここでは地層が北北東-南南西方向を軸とする顕著な褶曲構

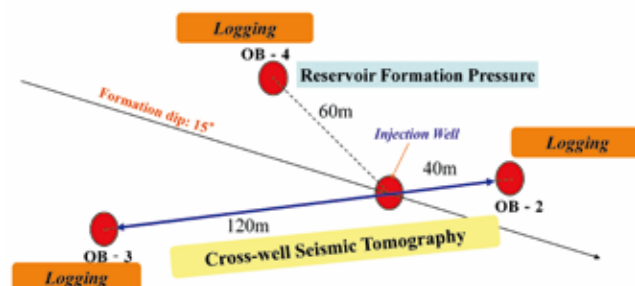


◎図1 長岡CO₂ 圧入実証試験サイトおよび地質構造の概念図。

造を形成し、背斜構造部分は石油や天然ガスの重要なトラップ (集積構造) となっている。このように、すでに流体を閉じ込めている背斜構造の帯水層は、地中貯留の長期安全性が期待できる。CO₂は地下約1,100 m の灰爪層の砂岩卓越部 (Ic 層) に圧入され、CO₂圧入によるガス採掘への影響はなく、ガス採掘によるCO₂貯留への影響もないと考えられる。

2) 坑井掘削とCO₂圧入

長岡実証試験サイトでは、圧入井 (IW-1) の周囲に3本の観測井 (OB-2, OB-3, OB-4) が掘削された。図2は貯留層深度における坑井の水平位置関係を示す。観測井OB-2とOB-4を結ぶ直線は圧入井を含み、地層が東南東に約15° 傾斜している。観測井OB-2とOB-4は圧入井に対して、それぞれ地層傾斜の後方と上方に位置する。超臨界CO₂の密度が地層水より小さく、地層傾斜の上方へ移動すると予想されるため、両観測井の位置はCO₂の広がりをつめるのに都合がよい。また、観測井OB-2とOB-3の間では弾性波速度の異常領域 (速度低下域) を調べるための坑井間弾性波トモグラフィ測定が実施され、圧入されたCO₂の挙動や貯留層内のCO₂の分布を2次元断面上で把握できる。

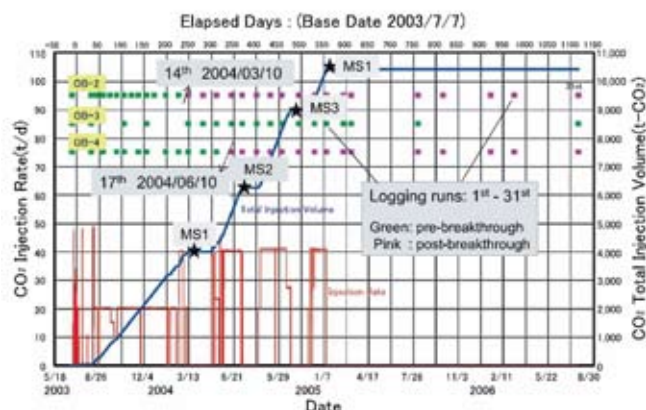


◎図2 長岡実証試験サイトにおける貯留層上部での圧入井と観測井の配置。

長岡実証試験サイトでは、2003 年7 月7 日よりCO₂圧入を開始した。圧入期間中、CO₂ 製造設備の定期点検や中越地震の影響による圧入停止があったものの、2005 年1 月11 日までに計10,400 トンのCO₂が圧入された。図3は試験期間中の圧入量と圧入レートの変化と物理検層や弾性波トモグラフィの実施時点を、圧入後のモニタリングを含めてプロットしたものである。

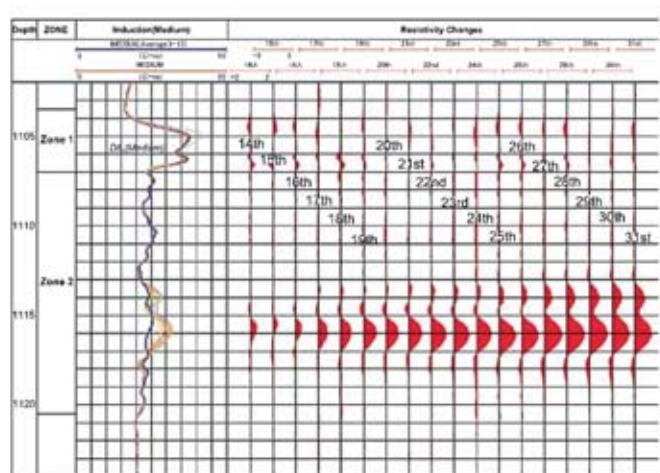
3) CO₂ 挙動モニタリング

帯水層に圧入されたCO₂は貯留層孔隙内の地層水を幾分押しよけるながら、圧入井から周辺へ広がる。その際、貯留層中の地層水飽和率は減少し、CO₂飽和率は増大する。このようなCO₂と地層水との置換プロセスによって、貯留層を伝播する弾性波速度は低下し、比抵抗は増大する。長岡プロジェクトでは、このような物性変化を検出するための物理検層 (音波検層、比抵抗検層および中性子検層)、坑井間弾性波トモグラフィが定期的実施されたほ



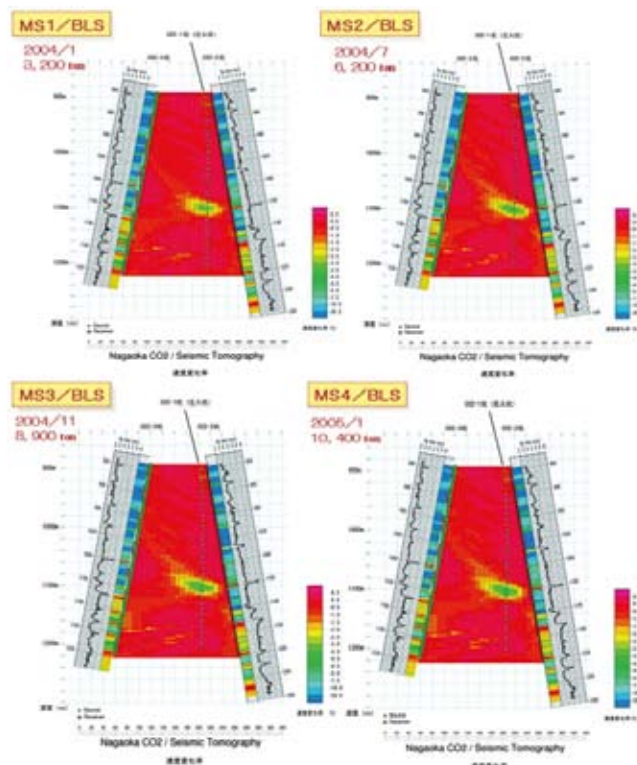
◎図3 物理検層と坑井間弾性波トモグラフィによるCO₂挙動モニタリングの実施スケジュールと圧入レートや累積圧入量との関係。小さい四角は物理検層の実施時期を示しており、緑色とピンク色はそれぞれCO₂到達前とCO₂到達後を示す。星印は坑井間弾性波トモグラフィの実施時期を示す。

か、圧入サイト周辺地域（2 km × 2 km）を対象とする反射地震波探査も実施され、貯留層に圧入されたCO₂の挙動がモニタリングされた。とくに、物理検層と坑井間弾性波トモグラフィは、世界でははじめてとなる圧入後のモニタリングも行われた。



◎図4 CO₂圧入期間中および圧入後の比抵抗検層結果。左枠の青線はCO₂到達前の1～13回の比抵抗検層結果の平均値を示している。右側は14回以降の検層結果で、比抵抗値の変化領域が拡大している。

物理検層の一例として、比抵抗検層の結果を図4に示す。この図の左枠にある太い青線はCO₂到達前の13回の検層で得られた比抵抗の平均値である。第14回以降の比抵抗検層結果は左枠で重ねて示した後、右枠には相対的な変化量を実施順に示している。第17回以降は深度1,116 mを中心に比抵抗増大域が大きく成長したほか、深度1,113 m～1,114 mの間にもCO₂の存在を示唆する比抵抗の増大が認められた。このような比抵抗増大域は、圧入井の坑井テストで確認された高浸透性の区間とよく対応しており、CO₂圧入終了後も広がっている。最終的には2つの



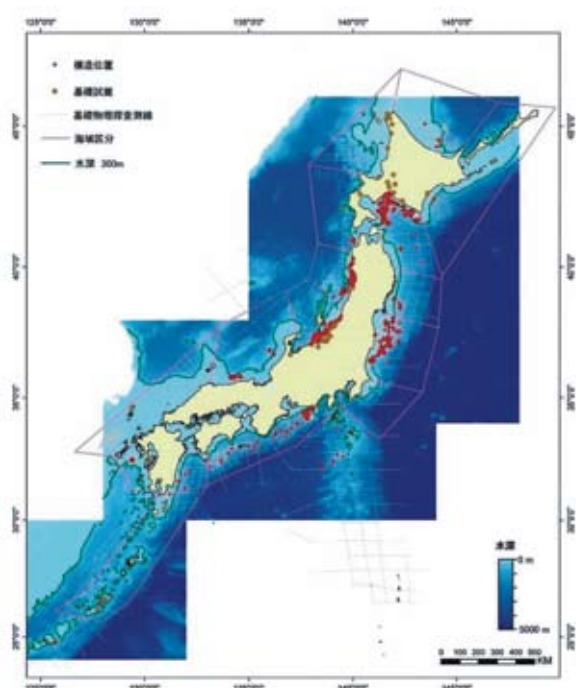
◎図5 CO₂圧入期間中に得られた坑井間弾性波トモグラフィ MS1～MS4の解析結果

増大域がつながり、深度方向に約4 m（1,113 m～1,117 m）にわたる高比抵抗領域が形成された。

音波検層が観測井近傍の微小区間の速度を検出するのにに対し、坑井間弾性波トモグラフィは複数の観測井の間の弾性波速度分布を2次元で把握できる。長岡実証試験サイトでは、観測井OB-2、OB-3にそれぞれ発信機と受信機を設置し、圧入井を挟むこれらの坑井間の速度異常域（CO₂浸透によって生じた速度低下域）を検出した。図5はCO₂モニタリング測定MS1～MS4で得られたCO₂の分布域を示している。弾性波トモグラフィ測定では、2次元断面上の速度異常域をもとに圧入されたCO₂の広がりを知ることができる。

4. 国内の動きとCCS実施に向けた課題

長岡のプロジェクトはCO₂圧入量としては小規模であるが、多方面にわたる貴重な科学的データが取得された点で世界的にもユニークなプロジェクトである。地中貯留の対象となる帯水層は日本の陸域と海域に広く分布するが、Sleipnerのような商業規模の地中貯留を実施する場合、圧入サイトと排出源の間の距離も考慮しなければならない。両者の距離は地中貯留事業のコストに大きく影響するからである。とくに、圧入サイトが海域となる場合は、離岸距離と水深も重要な検討要素となる。図6は基礎物理探査より得られた国内の貯留層構造の分布と水深を示している。この図では主に海域の帯水層、かつ水



◎図6 基礎物理探査より得た日本列島における背斜構造の分布図

+ は背斜構造が存在する位置を示す。

深が300 m 以浅の貯留層の分布に限定している。北海道、新潟県および秋田県に分布する貯留層近傍では、地質調査のための基礎試錐も行われており、これらの調査結果は圧入サイト選定にとって重要な情報となる。

一方、図7は国内の火力発電所、一貫製鉄所、セメント工場のような大規模排出源の分布を示しており、図中の数字は年間CO₂排出量の推定値である。大規模排出源と帯水層の分布関係を見ると、本格的な地中貯留を実現するには、貯留ポテンシャルの大きい非構造的帯水層（背



◎図7 日本全国の11 地域におけるCO₂ 大規模排出源の分布図

赤点: 火力発電所, 紫点: 一貫製鉄所, 緑点: セメント工場. 紫色の円は地域ごとのCO₂ 排出量を示す。

斜構造を有しない帯水層) を視野に入れた検討が必要である。ただし、貯留ポテンシャルはある種の仮定に基づく手法によって試算されたCO₂貯留可能量である。個々の圧入サイト選定の段階では、ボーリング調査などを実施し、貯留可能量を精査しなければならない。

このように地中貯留技術には、コストの削減、圧入したCO₂の漏洩、環境への影響、安全性評価手法の確立、海洋生態系への影響、法制度の整備、国民の理解など解決すべき課題は多い。しかし、地球温暖化が世界的に問題視されている状況下で革新的な解決策がない現状を考えると、地中貯留はCO₂ 排出量削減の有効な技術の一つである。とくに深部帯水層でのCO₂ 貯留メカニズムに関する科学研究と関連技術の開発はCCS 実現の鍵を握っていると言えるだろう。

東アジアにおける越境大気汚染と観測

•Profile•

高見 昭憲 たかみ・あきのり ●国立環境研究所 アジア自然共生研究グループ アジア広域大気研究室 室長

専門：大気化学、主に微粒子（エアロゾル）の観測と化学的変質の研究。1988年京都大学工学部工業化学科卒業。1993年オックスフォード大学大学院修了（物理化学D.Phil.）。1993年東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻助手。1999年 国立環境研究所大気環境研究領域大気反応研究室主任研究員。2007年国立環境研究所アジア自然共生研究グループアジア広域大気研究室室長。2008年名古屋大学大学院環境科学研究科客員教授

1. はじめに

近年アジア地域では経済的な発展が進み、エネルギー消費が増え、大気中への排出が増加しています。大気中に排出された物質は輸送され、その間に化学反応を起こし、別の物質への変化や、ガスから粒子への変化が起こります。越境大気汚染の観測をする場合、どのような影響を想定しているかにより対象物質が異なります。環境への影響には大きく分けて、健康影響、生態影響、気候影響の三つが考えられ、大気汚染物質はそのすべてに関連します。まず、大気汚染がかかわる影響と対象物質について紹介します。

人間の健康に影響する物質としてオゾンがあります。主にオゾンを成分とする光化学オキシダントの濃度が高くなると目やのどが痛くなるなど健康被害が顕著になります。光化学スモッグ注意報は120ppbv以上の光化学オキシダントが1時間以上続くと予想される場合に発令されます。2007年5月に北部九州地区で高濃度オゾンが観測されたため光化学スモッグ注意報が発令され、運動会などの屋外行事が中止になったことは最近の出来事です。2007年の高濃度オゾンエピソードの解析結果によると、空間スケールで500kmを越える80ppbv以上の高濃度オゾンを含む空気塊が中国北部沿岸から日本列島に輸送され、九州地区での中国起源のオゾンの寄与率は40-45%に達すると報告されています。（大原ら 2008）

健康影響はオゾンだけではなくありません。アメリカのDockeryらはアメリカの6つの都市における疫学調査を行い、微小粒子（PM_{2.5}）や硫酸塩と健康影響には相関があると発表しました（Dockery et al. 1993）。国立環境研究所においても大気中の微小粒子の挙動と健康被害の調査を行い、微小粒子などには循環系への影響があり、細胞に酸化ストレスを誘発する可能性があることを指摘しています（若松ら 2006）。ダストあるいは黄砂と呼ばれる土壌起源の粒子状物質は、もともとは自然起源であり、人為起源の汚染とは異なりますが、中国などで観測される砂嵐は非常に激しく健康影響をもたらします。また日本に飛来してくる黄砂上に大気汚染物質や細菌（グラム陽性球菌など）などが付着し、黄砂と共に輸送されていると

いう報告もあります（Kobayashi et al. 2007）。このほかにも、人間活動により発生する鉛や水銀など重金属も飛来しており、これらの健康影響を検討することも重要です。

生態系への影響としては酸性雨の問題が挙げられます。酸性雨の問題は森林枯損や湖沼の酸性化による生態系の変化に加え、材料や文化財の腐食も問題となる可能性があります。酸性雨調査は環境庁（当時）により1983年から開始され現在でも継続して行われています。酸性雨長期モニタリング計画（環境省）によると「東アジア地域では、大気汚染等の深刻な環境問題を抱えつつ経済が急速に発展しており、将来、酸性雨を含む越境大気汚染が深刻になることが懸念されている。」とあります。

平成16年度の「酸性雨対策調査総合取りまとめ報告書」によると

- ・全国的に欧米並みの酸性雨が観測されており、また、日本海側の地域では大陸に由来した汚染物質の流入が示唆された。
- ・現時点では、酸性雨による植生衰退等の生態系被害や土壌の酸性化は認められなかった。

現時点ではまだ酸性雨による影響は深刻化していませんが、越境輸送による汚染物質の流入が認められており、今後も観測の継続が必要である状態であると考えられています。

東アジア地域における酸性雨問題への取組の第一歩として、「東アジア酸性雨モニタリングネットワーク（EANET）」が組織されました。日本の主導により1998（平成10）年から試行稼働が実施され、政府間会合の決定を経て、2001（平成13）年から本格稼働が開始されています。EANETでは、東アジア各国が測定局をつくり東アジアにおける酸性雨監視のネットワークを構築しています。ここで言う東アジアには中国、韓国、日本、東南アジア諸国、極東ロシア、モンゴルが含まれています。EANETではSO₂、NO_x、降雨中のイオン成分などが測定され公開されています（EANETホームページやADORC 2005などを参照してください）。アジア域での国際的な取り決めとして大気環境監視を行い、データを公開することは画期的

であり、相互理解を進める重要なステップだと評価することができます。

気候影響に関しては、二酸化炭素などの気体も重要ですが、微小粒子や黄砂も重要な役割を果たしています。しかしながら、まだ不確実性が大きいのが現状です。元素状炭素は黒色であり光を吸収します。硫酸塩は透明であり光を散乱します。有機物や硫酸塩、さらには元素状炭素が混合し1個の粒子になった場合に、その粒子が光をどの程度散乱（吸収）するかを解明することが、東アジア域における気候変動予測を行ううえで非常に重要であるといわれています。また、これらの物質が黄砂と混合した場合などについてもその光学的特性を解明することが重要です。さらに、硫酸塩、有機物は雲を形成する際に必要となる雲核としての役割があると考えられており、いわゆる、間接効果（雲形成と降雨）を見積もる際に重要なパラメータであると考えられています。

このように、大気汚染物質は多岐にわたり、さまざまな領域で影響を与えています。そのためにも適切な観測方法を用いてできるだけ総合的に観測することが重要です。

2. 東アジアにおける越境大気汚染の観測

越境大気汚染について研究する上で重要な要素が三つあります。それは、排出量、輸送過程、化学反応です。それらについてまず解説し、最後に我々が最近行った観測について紹介します。

2.1 東アジアにおける排出量の増加

アジア地域では経済的発展に伴いエネルギー消費が増加し、大気汚染物質の排出量が増加しています。最近の排出量推計では、中国・インドにおける二酸化窒素（NO_x）、揮発性炭化水素（VOC）の排出量が増加しています（Ohara et al. 2008）。2003年における中国のNO_xの排出量は1980年に比べ約3倍になっています。また排出量の多い地域も、中国沿岸部から内陸にかけて広がっています。我々は中国の研究者と共同で、大連やチンタオ付近においてオゾンや二酸化硫黄（SO₂）などを観測しました（Takami et al. 2006）。その結果によると、冬にSO₂が最高で80ppbvを越えることもありました。また都市部だけでなく周辺の山間部でも高濃度のSO₂が観測されました。また、航空機観測の結果によると（Hatakeyama et al. 2005）、海上から山東半島に入りチンタオに近づくにつれてオゾン濃度が上昇しチンタオに到達するときには60ppbvとなり、チンタオ近郊ではSO₂が40ppbv、NO_xが20ppbv近くまで上昇しました。都市部において大気中の汚染物質が高く、中国では排出量が増加し大気汚染が深刻であることがわかります。

2.2 物質輸送

越境大気汚染を考える上で、その輸送過程を基本的に支配しているのは総観規模の気象です。日本は、夏は太

平洋高気圧に覆われ太平洋の比較的清浄な大気が日本に輸送されます。反対に冬は大陸性の高気圧に支配され、いわゆる大陸からの寒気の吹き出しによって物質が輸送されます。春には移動性の高気圧が中国大陸から日本へ移動し、前線を伴う低気圧と高気圧が交互に日本を通過します。春季、前線通過後にSO₂や一酸化炭素（CO）などのガス状大気汚染物質や粒子状物質濃度が上昇するケースが見られます。多くの場合、前線が東シナ海を通過した後、中国大陸沿岸部に高気圧が進入し、山東半島から九州沖縄地区にかけて、すなわち、東シナ海を北西から南東方向にむけて風の場合が形成されます。この風の場合によって物質が輸送されると考えられます。

物質輸送の観点からすると気象的な要素が支配的であると考えられ、冬季から春季にかけては、中国大陸方面から日本方面へ物質が輸送されやすい気象状況が形成されています。先ほど述べたように、中国沿岸部において大気汚染物質が多く排出されていれば、越境大気汚染が起きやすい状況にあります。

2.3 物質の変化

排出源近くではSO₂、NO、VOCなどとして放出される物質も、大気中では光化学反応などを経てさまざまな物質に変化します。SO₂は大気中や雲粒などの液滴中で酸化されSO₄²⁻に変換されます。SO₂は輸送中の天候により物質の反応速度が変わり、輸送後の物質の組成が変化します。窒素化合物はもう少し複雑であり、発生源ではNO、NO₂としてオゾンの反応サイクルに寄与します。一方で、NO₂は反応によりガス状硝酸（HNO₃）となり、乾性あるいは湿性沈着で消失します。ただし、アンモニア（NH₃）があると硝酸アンモニウム（NH₄NO₃）となり微粒子を生成します。さらに粒子状のNH₄NO₃は輸送中に黄砂など粗大粒子に取り込まれ輸送されることもあります。このように窒素酸化物は化学反応を起こすと共にガス、粒子とその形態（相）変化を起こしつつ輸送されるため、たとえば、NO_xの測定だけで越境輸送を評価できるわけではなく、気相と凝縮相（粒子）の窒素酸化物を測定する必要があります（Takiguchi et al. 2008）。

さらに複雑な様相を呈するのは有機物です。もともと排出される形態にVOC、一次粒子としての有機炭素（OC）および元素状炭素（EC）があります。その上、VOC、OCの成分は非常に多く、自動車排気ガス中の有機成分はしばしばガスクロマトグラムなどで組成分析がなされていますが、非常にたくさんのピークがあり多種多様な物質が含まれていることがわかります。これら、VOC、OCは大気中に放出された後、光化学反応を経て、さまざまな物質（カルボン酸、アルデヒド、ケトン、過酸化物）などを生成し、蒸気圧が低くなると粒子状物質を生成します。ECにもこれら有機物が吸着し、疎水性のECが親水性の有機化合物にコーティングされ、光学的性質を変え（Shiraiwa et al. 2009）、また、雲核形成に寄与するとい

う報告もあります。

これら、SO₂、NO_x、VOCの反応はオゾンの生成と無関係ではなく、大気中の反応はすべて関係しています。オゾン生成の反応機構自体はよく研究され理解がすすんでいますが、VOCについては物質の種類も多く、二次粒子生成などにまで視野を広げるとまだまだ未解明な部分がたくさんあります。オゾン対策としてVOCやNO_xの削減などを行うにあたって、その削減の効果を見積もるためには、オゾンを中心とした反応を理解しておく必要があります。また、微粒子の健康影響や気候影響を評価する上では、二次粒子生成が重要ですが、そのためには、SO₂、NO_x、VOCおよびオゾンの大気中の動態の理解が欠かせません。

2.4 越境大気汚染物質の観測例

国立環境研究所では1990年代から大規模な航空機観測を行い、また計算機シミュレーションなども駆使して東アジアにおける越境大気汚染の問題に取り組んできました。近年、われわれは沖縄北部辺戸岬や長崎県福江島において、主に、エアロゾル質量分析計という高時間分解能で粒子状物質の組成や粒径分布を測定できる装置を用いて観測を行いました (Takami et al. 2005, 2007, Takiguchi et al. 2008)。微粒子の濃度の長期変動を観測することにより、経済発展による物質の排出および輸送量の変化を捉えること、および、硫酸塩、硝酸塩、有機物などの粒子状物質に含まれる各成分についてその変質と混合についての知見を得ることを目的に観測を行っています。さらに、排出量推計や大気シミュレーションの検証のためにも同じ基準での長期連続観測は必要です。

越境大気汚染の典型的な例を以下に示します。Fig.1は2005年沖縄辺戸岬で観測した、SO₂、オゾン、粒子に含まれるSO₄²⁻の濃度変動を示したものです。2005年3月18日の深夜から朝方にかけてSO₂、SO₄²⁻とも急激に濃度が上昇しました。天気図では、3月18日午前中に前線が沖縄付近を通過して太平洋に移動し、高気圧が北京の南方に移動してきました。流跡線解析によると上海から山東半島にかけての中国の沿岸地域から空気塊が輸送されてきていました。空気塊が大陸方面から移流しやすい状況になっており、3月18日に観測された濃度上昇は中国起源の空気塊の輸送によってもたらされたと推測できます。

1992年ごろ国環研村野らにより沖縄辺戸岬でフィルターサンプリングによる粒子状成分の組成が観測されています (Murano et al. 2000)。当時の粒子中に含まれるSO₄²⁻濃度は大体3・gm³でした。我々は2003年10月から連続してエアロゾル質量計を用いて微粒子中の組成分析を行っています。ここ数年のSO₄²⁻の値は5・6・gm³程度で推

移しており、当時と比較すると濃度が増加している傾向にあります。これが中国におけるSO₂の排出量の増加で説明できるかどうかについては検討中です。

経済発展に伴い中国ではVOC、NO_xの排出量が増加しています。また大気汚染物質ではありませんが肥料としてアンモニア (NH₃) が大量に使われており、先ほど述べたとおり、粒子生成に重要な寄与をしています。粒子に含まれるアンモニウム塩は硫酸塩などとして存在し、微粒子中の主要な成分となっています。沖縄辺戸岬ではこの窒素化合物の動態を解明するため、反応性の総窒素酸化物 (NO_y)、ガス状硝酸 (HNO₃)、粒子状硝酸 (NO₃)、アンモニア (NH₃)、アンモニウム (NH₄⁺) を行っています。現在進行中の研究では、中国大陆から輸送される場合、アンモニウム塩として輸送されていることがわかりました。すなわち、アンモニア (NH₃) として散布されていても、越境輸送の過程で凝縮相 (粒子) 相に取り込まれていることが明らかになりました。

3. おわりに 越境大気汚染研究の課題

東アジアの気象要因と経済発展の状況を鑑みれば、今後も大気汚染物質が大陸から日本に輸送されてくることは十分予想されます。対策を策定するに当たり、まずは、物質の排出量、大気中の物質輸送と反応について科学的知見を各国で共有する必要があります。その際に有効なのは各国が共通の枠組みで活動を行い、データなどを共有して、共通の基盤のもとで議論をすることです。幸い、EANETに代表されるように、このような枠組みはすでに稼動しておりデータも蓄積されてきています。今後は観測項目や観測技術、観測拠点を拡充していくことが必要です。しかし、これら既存の観測だけでは新たな現象解明は困難な場合がありますので、我々が観測拠点としている沖縄辺戸岬観測ステーションで行われているような最先端の機器を用い、必要な観測項目を網羅した総合的な観測が必要です。また、地上観測だけでは代表性の問題や、鉛直分布の問題もあるので、航空機観測や、船舶を用いた観測、さらには、衛星を用いた観測なども今後は十分活用して行く必要があります。

越境輸送の実態を把握し、その影響を評価するための手段は日進月歩であり、中国や韓国をはじめとする東アジアの研究者の意識も高く、今後も科学研究は進歩していくと考えられます。その上で必要なのは人々の意識の変革であり、10年後あるいは50年後の東アジアがどのような状態になっているのが望ましいのか、共通の認識を持つことができれば大気環境の改善もすすむと思われます。

参考文献

- 大原利真ら、大気環境学会誌 43巻 P198-208 (2008)
 若松伸司ら、国立環境研究所特別研究報告 SR-74-2006
 ADORC, Data Report on the Acid Deposition in the East Asian Region 2005, Niigata, Japan
 Dockery, D.W. et al., NEJM 329 p1753-1759 (1993)
 EANET <http://www.eanet.cc/jpn/>
 Hatakeyama, S., Takami, A., et al., Atmos. Environ. 39 (2005) 5893-5898
 Kobayashi et al., Eerozoru Kenkyu 22 218-227 (2007)
 Murano, K., et al., Atmos. Environ. 34 5139-5149 (2000)
 Ohara et al., Atmos. Chem. Phys., 7 4419-4444 (2007)
 Shiraiwa, M., Kondo, Y., Takami, A., et al. J. G. R., D24210, doi:10.1029/2008JD010546 (2009)
 Takiguchi, Y., Takami, A., et al., J.G. R., doi:10.1029/2007JD009462 (2008)
 Takami, A., et al. Atmos. Environ. 39 4913-4924 (2005)
 Takami, A., et al., Atmos. Res. 82 688-697 (2006)
 Takami, A., et al., J. G. R. D22S31 doi:10.1029/2006JD008120 (2007).

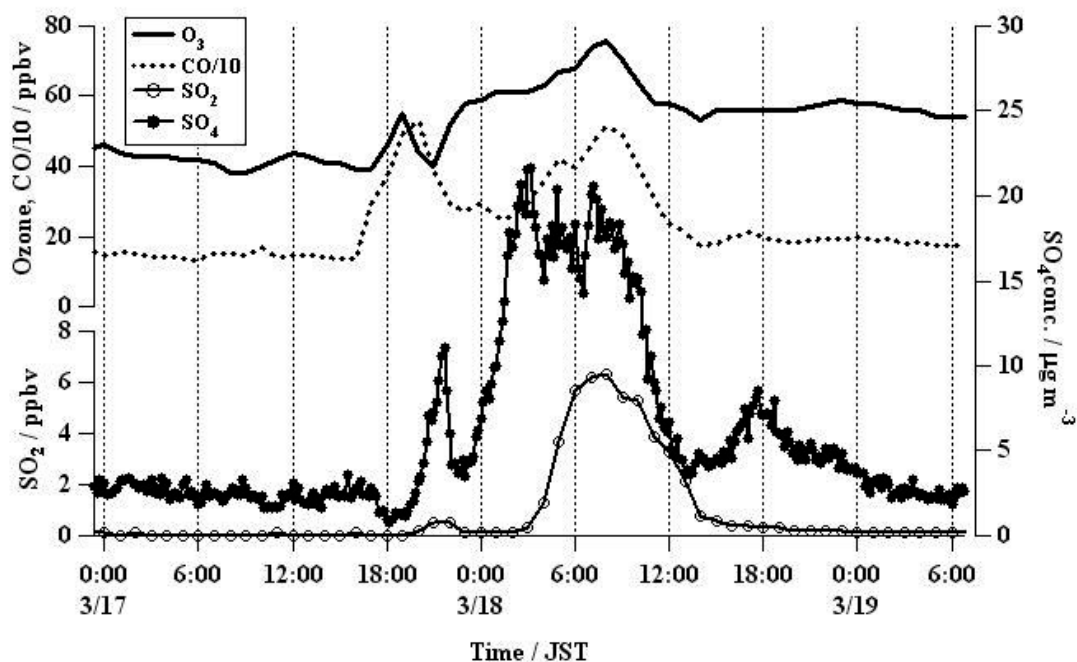


Fig. 2005年沖縄辺戸岬で観測した、SO₂、オゾン、粒子に含まれるSO₄²⁻の濃度変動

大気環境診断・予測技術の開発

•Profile•



田口 彰一 たぐち・しょういち ●産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門 地球環境評価研究グループ グループ長

1956年3月生まれ。1986年3月東京大学大学院理学系研究科博士課程後期単位認定退学。地球物理学専攻。1995年4月理学博士。2006年4月より現職。

地球環境問題と関連して当グループで行っている大気環境の診断的研究の一部を紹介させていただきたい。地球環境問題としては二種類を想定している。ひとつは日本で放出された物質が海や空を通して地球の裏側へ運ばれその地域の自然環境を壊してしまう場合で、北半球で放出されたフッ素化合物が南半球の成層圏のオゾンを壊した例がある。もうひとつは経済の発展に伴い世界のどの地域でも経験する環境の劣化である。都市化にともなう大気汚染、食料の増産と消費の増加に伴って川や海に窒素やリンといった元素が流れ込んで蓄積する現象(富栄養化)などは先進工業国だけの事ではない。我が国は領土が狭いのでこの地から放出される物質が水平線の向こうで何を引き起こしているのか自由に調べるといわけにはいかない。彼の地で起こっている事柄は現地の協力が得られた場合は調査を行うのだが、これはいつも可能な訳ではない。科学と想像力を駆使してひたすら思い描く必要がある。例えば領土の末端で、いよいよ境界を越えていく空気の最後の姿を見届ければ、その先を予測する参考になるかもしれないと思われるであろう。そのような発想から、父島と波照間島で大気の組成を観測している。地球の裏側から届く空気は、我が国の最高峰である富士山の頂上で捕まえて分析している。さらにその分析を助けるために使っている数値モデルとその検証方法について述べる。

大気中の微粒子(エアロゾル)は初めから粒子の状態で大気に放出されるものと、気体の状態で放出されたものが光の作用や化学的反応によって粒子となる場合とがある。土埃等は粒子の状態で巻き上げられるが、火山の噴火によって放出される硫黄酸化物、自動車の排気ガスに含まれる窒素酸化物などは変化の末に粒子となる。この微粒子のうち重いものは地面に落ちてしまうが小さいものは長い時間大気中を漂っている。空気中を漂う微粒子の中には雲粒の種となるもの、雲粒にとけ込むもの等があり、その雲粒が雨粒に成長すると雨として地表に落ちて大気から取り除かれる。これらの微粒子には健康と地球の気候に影響するのではないかと懸念がかかっている。

東京都小笠原村に父島がある。この島には鹿児島県種子島から打ち上げられた人工衛星を追跡管制するために宇宙開発研究機構が施設を設置している。この施設を拝借して大気中の微粒子の観測を行った。微粒子の大きさ別の個数の分布と黒色炭素の濃度を測定する装置は標高230mの所(北緯27度04分、東経142度13分)に設置した。父島は北西の季節風が吹く冬には日本の風下にあり、夏は亜熱帯高気圧の小笠原高気圧の文字通り本拠地となる。

古賀他[1]は2000年12月から2002年1月まで直径0.3マイクロメートル(マイクロは百万分の一)より大きな微粒子の直径の分布、黒色炭素の質量含有率の分析結果を報告した。ここでは便宜上粒子の大きさを直径と呼ぶが微粒子の形は一般には球形ではなく歪んでいる。直径で分けた二種類の微粒子(0.3から1マイクロメートルと1から5マイクロメートル)の個数の比率を使うと都市の影響の認められない清浄空気と影響を受けた疑いのある汚染空気に分類できた。清浄空気の中の直径別の個数の分布は海洋上の大気境界層(海面から数百メートルから数キロメートルまで変動する層)で観測される分布とは異なり、さらに上空(自由対流圏)の分布に近かった。従って清浄空気は亜熱帯高気圧に伴っている下降気流によってもたらされていると想像された。亜熱帯高気圧は赤道付近で高度10キロメートル以上まで上昇した空気が極の方向へ移動し亜熱帯で下降する循環の一部である。また、汚染空気中での直径別の個数分布は従来都市で測定された値に近かった。

2000年12月から2001年1月、2001年12月から2002年1月の期間について父島に到達する汚染空気がどのような都市の影響を受けているか東アジアの大気輸送モデルによって検討した。北緯35度の北側の中国と南側の中国、朝鮮半島、日本、日本の中の火山の夫々の領域から硫黄酸化物の放出量として推定された量をモデルの空気に溶かし込んで、その空気の移流と拡散によって父島の空気が受けとる影響を計算した。この中の一つの領域の影響が半分以上を占めるような場合を選び出してみたところ日本国内の火山の影響が最も大きく、人為起源の中では中国北部と朝鮮半島の影響が大きかった。この期間は三宅島と桜島の噴火活動が活発だった時期と重なる。微粒

子の体積当たりの含有率と黒色炭素の重量当たりの含有率を調べた所、モデルから推定された発生源によって異なっていた。微粒子の密度は事例によって異なるが、一立方センチあたり1-1.4グラムを仮定すると、黒色炭素の重量含有率は、発生源が中国の場合は9-13%、朝鮮半島が日本の場合5-7%、その他では4-5%であった。これはそれぞれの地域での産業構造、交通機関、生活様式の違いを映し出していると思われる。

環境省国立環境研究所は沖縄県八重山諸島の波照間島(北緯24.1度、東経123.8度)に地球環境観測ステーション(<http://db.cger.nies.go.jp/gem/warm/Ground/hs.html>)を設置し多くの大気成分を観測している。この島は人が住む島としては日本で最も南に位置する島である。横内他[2]は当所の全球大気輸送モデルを観測結果の分析に利用しヒドロフルオロカーボン(HFC)の観測結果を報告した。自動計測装置を設置し一時間間隔の観測が継続的に行われており、HFCだけでも3種類測定しているが、ここではHFC-23という物質を取り上げる。これはHCFC-22という空調機で使用する冷媒の製造過程で出来る副産物である。寿命は約260年と長い。濃度は体積混合比と呼ばれる単位で表すと毎年1.4ppt(pptは一兆分の一)の割合で増加していることが観測から分った。地球の空気的全量を考えると年間14.3ギガグラム(ギガは十億)の割合で増えている勘定になる。赤外線吸収も強いので地球の気候に及ぼす影響が懸念されている。

一年を通した濃度の変化を見ると夏は他の季節より低くなっていた。その中で一時間から数日の間濃度が高くなる現象が見いだされ、汚染空気ではないかと思われた。世界を18の地域に分けて夫々の地域で放出されたHFC-23が波照間島に到達する日時を全球大気輸送モデルを用いて計算した。そうすると、HFC-23濃度が増大する場合の空気は直前に中国大陆を通過していることが分った。HFC-23の濃度が高い時、同じ空気中の一酸化炭素の濃度と比べてみた。一酸化炭素は燃料の不完全燃焼によって発生する気体で、工場、車、焼き畑、森林火災などから放出される。これとは別に、樹木が放出する有機化合物が変化して一酸化炭素となることも分っている。もしHCFC-22の製造工場が一酸化炭素の放出が盛んな都市にあると仮定すると、一酸化炭素の発生量の推定値とこの比率を使う事によってHFC-23の放出量が推定できる。一酸化炭素には複数の発生量推定値があり、基礎とする推定値を変えると50%の幅で変化するが、中国からの放出は年間約10ギガグラム程度と見積もられた。これは先に述べた全世界の排出量の三分の二を占めることになる。波照間には日本からやってくる汚染空気も観測されるがその中にはHFC-134aが多く含まれ、HFC-23の割合が少ない事も観測された。これも産業構造の違いを映し出している。

日本の代名詞の一つが富士山(標高3776m)である。こ

の富士山の頂上には台風の位置を捉えるための気象レーダーが1964年に設置され長年運用されて来たが1999年廃止された。レーダーの跡地を放っておくのはもったいないという事でNPO法人(<http://npo.fuji3776.net/>)が組織され、富士山測候所跡地を活用する活動が行われている。

大学、研究機関、気象庁の協力のもとで微粒子が大気環境に及ぼす影響について観測研究が行われた。兼保他[3]は黒色炭素、一酸化炭素、オゾン、微粒子の中のメタン系炭化水素、微粒子の光学特性を分析した結果を報告した。この中で微粒子をフィルタに採取しその成分も分析した。2003年の5月の末から6月にかけてシベリアの森林火災から立ち上った煙の層に観測所が覆われた時に微粒子の測定が出来た。この煙は人工衛星から撮影された写真にも写っていた。煙の中の黒色炭素の最高濃度は一立方メートルあたり1.9マイクログラムあった。一酸化炭素の濃度も通常より高かったが、一酸化炭素に対する黒色炭素の比率は過去にカナダの森林火災に起源があると思われる空気を米国東海岸や英国で測定した比率よりも大きかった。この事から今回富士山で観測された煙は雲や雨の影響を受けずに輸送されたのではないかと考えた。もしそうなら発生時の煙の組成は富士山に到着するまでにあまり変わっていないと思われる。フィルタに捉えられた微粒子には分子量の大きいメタン系炭化水素が含まれていた。炭素の個数が奇数のメタン系炭化水素が多い事から発生源は背の高い樹木であると思われる。オゾンと一酸化炭素の濃度の時間変化と煙の層の上下の移動から煙の層の上空にはオゾンの高濃度層が存在すると考えられた。煙の中の光の吸収が波長によって変化する仕方をもとに考えるとこの煙は有機化合物を多く含むと思われる。

空気を構成する成分は水蒸気を除けば窒素78%、酸素が21%、アルゴンが1%で残りは1%にも満たない程ごく僅かである。この残りを微量成分と言っているが、健康に被害を与えたり、地球の気候に影響すると疑われる物質はこの中にたくさんあるので侮れない。微粒子に変化する前の気体成分(前駆物質)やHFC-23等の一個一個の成分は空気にとけ込んでから他の成分とぶつかり合い、風に流されて世界中の空に広がっていく。この様子を計算機で再現する事によって観測された濃度が地球上のどの場所の影響を強く受けているかを推定する事が試みられており、これまで述べた研究にはその情報が利用されている。この計算を行うプログラムは化学輸送モデル(CTM)等と呼ばれ、この中でも全球を計算対象としたモデルは第一回全球大気研究計画(FGGE)で地球大気の三次元の状態が1979年以降毎日二回ずつ提供されるようになった頃から開発が進んだ。このような資料が作成できるようになったのは静止気象衛星が赤道上空に複数個配備され雲の動きを常に全球で観測しその画像から上空の風向風速が推定できるようになったためである。このようなモデル

を使って大気環境の診断を行う場合に重要な事は計算結果の検証である。

田口他[4]は天然放射性物質である原子量222のラドンを用いた検証を報告した。これは土の中に含まれる原子量226のラジウムの壊変により発生する水に溶けにくい気体で発生してから3.8日で半分となる早さで消滅する。横道にそれるが、この系列は元をただと原子量238のウランから始まっていて、このウランは実に45億年かって半分になる。原子量226のラジウムは1600年で半分になる。気の長い話ではあるが大元のウランが地表の土や岩石にほとんど均一に含まれているためにラドンも均一に放出される。壊変では放射線が出るので、地面に接した空気が溜まる構造の部屋では放射線を浴びる事になり健康に悪影響があると考えられている。いくつかの短い寿命の物質を経て原子量210の鉛となる。この鉛は金属粒子で空気中に漂っている別の微粒子と一緒にとなると考えられている。検証の話に戻るが、調べたモデルは世界全体を2.5度幅の升目に区切りその角で微量成分の濃度を計算するモデルである。地表から上空約30キロメートルを取り扱いこの間を15の区画に分割して取り扱う。ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)という機関が提供している風速資料を利用している。陸上では毎秒一平方センチメートル当たり1原子が放出されているとした。海洋からは陸上の二百分の一の放出を仮定した。この放出量はかなり大雑把で、量的な検証には不十分と言う意見もあるが、モデルの質的な検証には大いに役立つ。この報告では先に述べた父島やハワイのマウナロア山の山腹の観測所の他中国の10カ所の資料を利用した。こうすると巧く計算できている所と改良しなければいけないと思われる事柄が分ってくる。

このようなモデルを使って計算すると、空気という物がいかに大胆にかき混ぜられているかに驚かされるのではあるが、それとともに北半球の空気と南半球の空気はおよそ一年かかって入れ替わり、赤道の近くには目に見えない境界がある事も分る。計算結果から父島や波照間には夏になると南半球側からやってきたと思われる空気の

訪問を受けることがあるようだ。北半球の夏の間、北半球の空気と南半球の空気の境界は赤道からすこし北半球側に入ったあたりに位置している。モデルで計算した微量成分の濃度分布の中に台風の渦がこの南半球の空気を巻き込む様子を見いだした時は半信半疑であったが、台風が波照間の近くを通過した時の波照間の観測結果と照らし合わせると辻褄が合っている。

そもそもなぜ地球の裏側の環境の問題を気にしているか、産業技術の観点から一言私見を補足させていただきたい。端的に言えば、そこには我が国の工業製品の大切なお客様がいらっしゃるからである。生活環境に悪影響を及ぼしたのではお客様を失いかねない。市場経済の主役は消費者でそのご意見は企業の命運を握っている。企業は加害者のレッテルを張られる事がないよう常に神経を尖らせている。我が国の経済は原料を輸入し製品を作って輸出するという加工貿易で成り立っている。日本経済の屋台骨を支える製造業の中には創業者の志に共鳴した人々の運命共同体の性格を持っている所も少なからずある。社会に貢献したいという熱い思いが時には江戸時代の武士道で技術者を奮い立たせ、公害問題、石油危機等幾多の困難を乗り越えてきた。ところが、健全な企業がある日突然環境を破壊する加害者と言うレッテルを張られ、困難に直面する場面が繰り返し起こっている。フッ素化合物を例にとれば、これを安く大量に生産する工場を創意と工夫を凝らして作り上げた企業が、ひとたび風向きが変わる事によって、大きな負債を抱える事になる。このような風向きの変化は科学的な発見によってもたらされる事もあるが、状況証拠が真っ黒というだけで結論を見切り発車したという疑いを捨てきれない事例もある。物的証拠が無いまま自白をもとに起訴された容疑者とどこか共通する所がある。恐ろしい事に拙速に導かれた結論に誤りがあったという事例が中西[5]により紹介されている。そのような間違いを未然に防ぐためには、環境に負荷を与える物質をいち早く特定する事と合わせて、一つ一つの観測資料を積み上げ、辛抱強く証拠固めに取り組む事が公的機関の一つの役割と思われる。

参考文献

1. Koga他, Atmos.Env., 2008.
2. Yokouchi他, GRL, 2006
3. Kaneyasu他, JGR, 2007.
4. Taguchi他, Tellus, 2002.
5. 中西順子著『環境リスク学—不安の海の羅針盤』、日本評論社 2004年.

発展途上国における硫黄酸化物の排出抑制と ゼロエミッションサイクルの構築

•Profile•

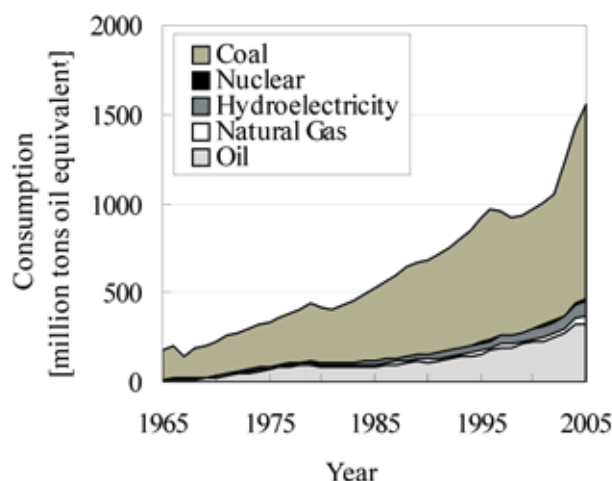


坂本 和彦 さかもと・かずひこ ●埼玉大学大学院理工学研究科教授、環境科学研究センター長

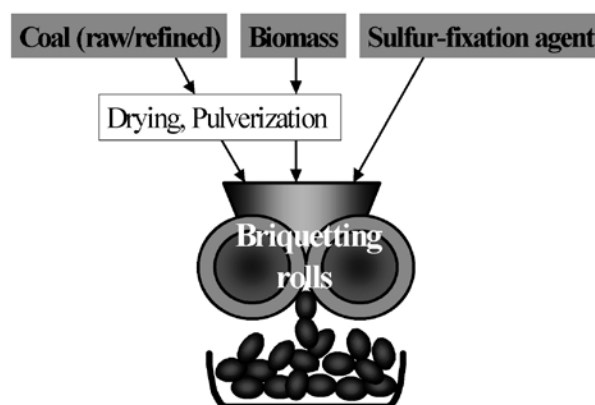
国立大学法人埼玉大学大学院理工学研究科教授、環境科学研究センター長。1945年5月生まれ。1973年東京大学大学院理学系研究科化学専攻 理学博士。1990年埼玉大学工学部教授。1995年同理工学研究科教授。1998年同学長補佐。2000年同評議員・地域共同研究センター長。2002年同工学部長。2004 同総合研究機構技術部長。2009 同環境科学研究センター長。主な研究内容：大気汚染物質の動的挙動、黄砂粒子への硫黄酸化物の沈着、低品位石炭のクリーン燃料化、その他：環境省中央環境審議会委員・大気環境部会長、(社)大気環境学会会長、2001年大気環境学会学術賞、1993、1996年中国国家環境保護局長表彰、2000年第27回環境賞、2004年大気保全功労者環境大臣表彰。

1. はじめに

近年、中国におけるエネルギー需要は工業化や経済成長に伴い急激に増大してきている。Fig. 1に示すように、中国ではそのエネルギー源の6-7割を石炭に依存しており、多くの地域では高灰分、高硫黄分で低発熱量の低品位石炭が利用されてきたため、大量の煤塵、硫黄酸化物(SO_2)および二酸化炭素(CO_2)が排出され、大気汚染ならびに酸性雨といった地域汚染問題が発生し、さらには温暖化への寄与も懸念されている。しかし、石炭は一次エネルギー資源の中でも最も豊富に存在しかつ低価格の化石燃料であるため、今後の中国や発展途上国においてもエネルギー需要と経済力を考慮すれば、石炭依存が急激に低下するとは考えにくい。したがって石炭のクリーン燃料化技術は必要不可欠と考えられるが、このクリーン燃料化技術の一つとしてバイオブリケット(以下BBと略す)化技術がある。このBBは、低品位の微粉状石炭に農林業廃棄バイオマスと硫黄固定剤($\text{Ca}(\text{OH})_2$)を添加してアーモンド状等に圧縮成型した、高燃焼性と高強度を兼ね備え



◎Fig. 1. Transition of primary energy consumption in China from 1965 to 2005; the data was given from BP Statistical Review of World Energy 2006.



◎Fig. 2. Scheme of coal-biomass briquette production using a briquetting machine.

た、大気汚染物質や温暖化ガスの排出抑制を意図した民生用固体燃料である(Fig. 2)。

私たちは、これまでに石炭を主要なエネルギー源としている中国で、重慶をはじめとする高硫黄並びに高灰分の低品位石炭を利用している地域に適したBB化について検討してきた。高硫黄ならびに高灰分の石炭を主要なエネルギー源としている重慶では、室内汚染や大気汚染による人への健康影響、酸性雨等による森林、土壌、作物、建築材料や文化財などへの被害が見出されている。したがって、酸性沈着の原因物質排出制御技術に関する研究は重要である。BBは硫黄分固定率と煤塵の排出低減率も高く、着火性と燃焼性も良く、未燃分損失なども少なく、熱効率が高いと推定されるため、健康影響や酸性雨原因物質である硫黄酸化物の排出抑制手法として有効であると期待される。また、循環性資源であり、未利用または廃棄物であるバイオマスをBBの副原料として用いれば、燃料としての有効性以外にバイオマスに本来的に含まれている植物繊維がブリケットの強度を増大させる粘結剤(バインダー)としても役立つと考えられる。また、バイオマスを添加した成型炭の燃焼灰中には植物生長に有効な

Ca、Mg、Kなどが多く含まれると推定されるため、農作物成長への栄養塩類供給の可能性であり、かつ、燃焼灰中にはSO₂の固定に利用された消石灰(Ca(OH)₂)の残存分があり、強アルカリ性であるため、酸性土壌の改良が可能と考えられる。そのため、BB燃焼灰を酸性雨地域の土壌改良剤として農林地へ散布すれば、廃棄物を最小化したゼロエミッションサイクルが構築されるものと期待される。

私たちは、これまでに中国で産出する各種石炭からBBを実験的、または小規模生産設備により製造し、その燃焼実験からBBの大気汚染物質排出低減特性の評価、製造技術の現地化・普及のために、適当なバイオマスを選択するために必要とされる各種バイオマスの成分、性状及び石炭の燃焼特性への寄与などを検討してきた。また、バイオマスのリグニン含有量、燃焼排気としての汚染物質排出量および試作したBBの耐圧強度により、バイオマス添加によるBBの性能への寄与を調べてバインダーとしての適性を検討した。BBの燃焼実験による燃焼排気ガス中の汚染物質の測定、石炭及びBB燃焼エアロゾル試料の化学組成及び酸性化に対する緩衝能力の分析、降水の酸性化との関係、重慶市郊外における一般民家でのBB利用による室内汚染の低減効果を調べた。さらに、各種pHの人工酸性雨(SAR)によるBB燃焼灰中のCa、Mg、Kなど塩基成分の溶出及びその酸緩衝能を測定し、BB燃焼灰の植物成長に必要な栄養塩類の肥料効果ならびに酸性土壌の改良剤としての利用可能性ならびに燃焼灰と家畜堆肥の同時施用によるモデル農産物の成長実験を行ってきた。

ここでは、これまでに私たちが実施してきた低品位石炭のバイオブリケット化によるSO₂の排出抑制から燃焼灰の利用までを考慮した「バイオブリケットを核とするゼロエミッションサイクルの構築」にいたる研究をまとめて紹介する。

2. バイオブリケット原料、副原料およびバイオブリケットの特性

原炭燃焼による硫黄酸化物の排出

重慶近郊で一般的に利用されている石炭の水分、灰分、揮発分および硫黄分などを測定した結果、Chendu coal 1を除いて、いずれの石炭にも、硫黄分や灰分などの大気汚染原因物質の含有率が高かった。そして、硫黄分の多くは燃焼性硫黄であり、燃焼によりSO₂として排出される。これまでは中国西南部の成都および重慶では大気汚染物質の拡散に不利な地理的条件と気象条件に加えて高硫黄分、高灰分の石炭を排出抑制対策が不備なまま使用していたため、重度大気汚染が引き起こされていることが再確認された。

バイオマス燃焼排ガス中の汚染物質と燃焼特性

バイオマス原料としての特性を調べるため、7種類の農作物廃棄物と4種の食品製造廃棄物の成分分析を行った。

その結果、バイオマスの揮発分と灰分はそれぞれ68～86%と1.7～22%の範囲にあり、80%以上の高揮発分かつ6.0%以下の低灰分のバイオマスはオガクズ、高粱の藁、食品製造廃棄物(高粱酒粕、バガス粕、豆腐粕及びビール粕)であった。バイオマスの低残存灰分・高揮発分という特性を考えた場合、食品製造廃棄物はBBの副原料として利用可能であり、石炭やバイオマスなどの固体燃料の燃焼初期に揮発・分解燃焼が先行するので、それが酸化雰囲気中で可燃性の熱分解生成ガス(揮発分)を生じ、この生成物が着火源により着火する。着火温度は一般にその揮発分が多いほど低い。石炭に20%程度のバイオマスを混合して調製したBBの着火温度は、石炭だけからなるブリケットに比較して、100℃近く低下し、期待通り、高揮発分のバイオマスはBBの着火性を高めることが確認された。

調査したバイオマス燃焼1kg当たりからの塩化水素(HCl)とSO₂の排出量はそれぞれ35～912と52～1764 mgの範囲であり、全般に少なかった。さらに、当初の研究対象地域であった重慶は、冬が短く、無霜期が長く、降水量が多いため、植物の成長が早く、農作物および野生牧草などの植物資源は豊富であった。また、農作物は多種多様であり、稲、トウモロコシ、小麦、高粱などの藁や茎の廃棄物である未利用資源は豊富に存在する。一部推定を含む重慶市におけるバイオマスの年間生産量の調査結果によれば、バイオマスの5%程度がBB製造に使われたとしても、生産し得るBBは300万トン/年にも及び民生用の燃料としては十分と考えられた。

リグニンの含有量

石炭にバイオマスを添加してBBを製造すれば、バイオマスはバインダー効果(粘結効果)を示し、石炭へのバイオマス添加量の増加と共に耐圧強度は増加し、農作物廃棄物由来のバイオマス添加量が15～25%で十分な耐圧強度を持っていた。このバインダー作用はその中に含まれるリグニンとヘミセルロースの軟化によって石炭粉が接着した結果と考えられ、その強度はリグニン含有量と関係していた。農作物廃棄物と比べて、豆腐粕及びビール粕のリグニン含有量は著しく低かったが、これらに農作物廃棄物を併用すれば、長距離の輸送にも耐えうる強度のBBが製造できる。

バイオブリケットの耐圧強度

石炭にバイオマスを添加して製造したBBにおいて、バイオマス添加量が15～25%添加すれば通常のハンドリングに耐え得る強度を持っているが、その成型特性は主原料である石炭の石炭化度、炭質等および副原料であるバイオマスの種類や添加量によって影響を受ける。そのため、予め原料配合による成型特性を知る必要があるが、その手段として錠剤試験が有効であると考えられる。試作した錠剤及びBBの耐圧強度の測定結果からBBの成型特性は以下のようにまとめられる。

石炭とバイオマスの比を3:1でオガクズ(25%)を添加した

場合、石炭種によって、BBの耐圧強度は異なり、精炭の方が原炭よりやや高かった。

Fig. 3によると、BB錠剤の耐圧強度はリグニン含有量に関係し、バガスを除いてバイオマスリグニン含有量の増加と共に耐圧強度が上昇することがわかった。ここでは、バガス添加のBB錠剤はかなり高い耐圧強度を持っているが、バガス中にはリグニンとヘミセルロース以外に糖分も含まれているためと推定される。なお、低リグニン含有量の食品製造廃棄物と農作物廃棄物との混合物をバイオマス副原料とすれば、食品製造廃棄物をバインダーとして利用できる(Fig. 4)。一般に石炭へのバイオマス添加量の増加と共に耐圧強度は増加する(Fig. 5)。

重慶産石炭にバイオマス(麦藁及びオガクズとも) 20%を添加したBBの耐圧強度は50 kg以上に達していた。

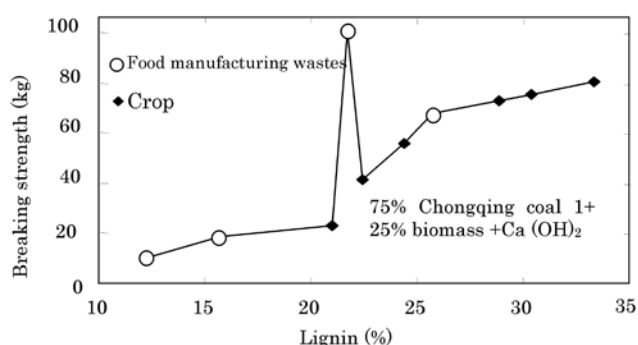


Fig. 3. Relationship between the breaking strength of bio-briquette and the lignin content of biomass.

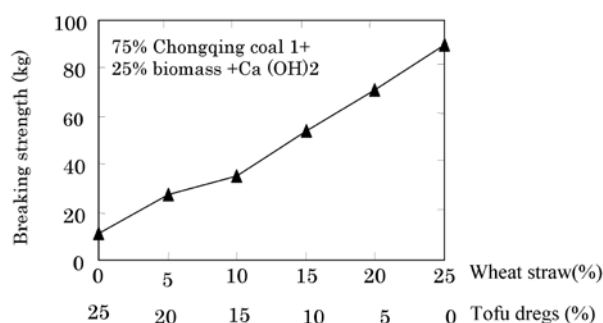


Fig. 4. Relationship between the breaking strength of bio-briquette and mixed biomasses.

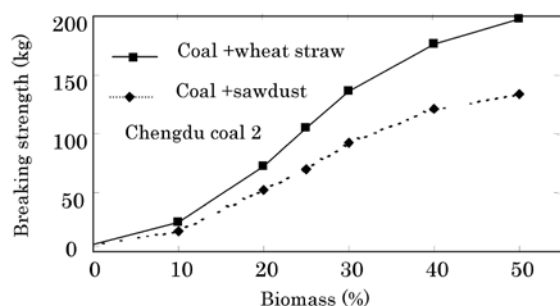


Fig. 5. Relationship between the breaking strength of bio-briquette and addition of biomass.

3. バイオブリケットによる汚染物質の低減効果

Table 1に示した原炭の燃焼に比べ、BB燃焼からのHCl、SO₂とダストの排出量は著しく減少し、ここでの燃焼条件下でそれぞれの低減率は26~61%、82~88%と55~83%の範囲であった。また、有煙炭では、ダストの低減効果は無煙炭より顕著であった。なお、HClの固定率はあまり高くなかった原因として、バイオマス燃焼では、石炭より多くHClを排出し、かつ塩化物は高温で分解しやすいためと考えられる。石炭のBB化により燃焼排出ガス中のSO₂などの汚染物質が効果的に抑制されるので、BB化は有効な硫酸型酸性雨汚染防止対策の一つとして期待できる。

Table 1. Emission of the air pollutants from coal and their bio-briquette combustion, and reduction efficiency of pollutants by bio-briquetting (dry basis).

Sample	Emission (mg/g-coal)			Combustible S%	Reduction efficiency (%)		
	HCl	SO ₂	Dust		Dust	HCl	SO ₂
Chendu raw coal 1 ^{a)}	0.05	8.01	0.69	0.40			
B.B ^{b)} (coal +sawdust)	0.04	1.02	0.31	0.05	55	30	83
Chengdu raw coal 2 ^{b)}	0.20	40.62	2.37	2.03			
B.B ^{b)} (coal +sawdust)	0.10	4.16	0.90	0.21	62	35	85
Chengdu raw coal 3 ^{b)}	0.15	52.83	2.82	2.64			
B.B ^{b)} (coal +sawdust)	0.06	6.65	1.02	0.33	64	49	82
Chongqing raw coal 1 ^{b)}	0.39	49.49	2.25	2.47			
B.B ^{b)} (coal +sawdust)	0.11	5.48	0.79	0.27	65	61	84
Chongqing refined coal 2 ^{b)}	0.12	22.20	8.93	1.11			
B.B ^{b)} (coal +sawdust)	0.12	2.06	2.18	0.10	76	54	87
B.B ^{b)} (coal+rice bran)	0.28	1.93	1.60	0.10	82	26	88
B.B ^{b)} (coal+maize stalk)	0.30	2.67	1.59	0.13	82	31	83
B.B ^{b)} (coal+tofu dregs)	0.14	2.99	1.51	0.15	83	50	82

^{a)} Anthracite coal; ^{b)} Bituminite coal; ^{c)} Bio-briquettes (B. B.) were produced from 75 wt% of raw coal and 25 wt% of biomass by the addition of sulfur-fixation agent (Ca(OH)₂)(Ca/S=2.0)

4. バイオブリケット燃焼排ガス中の大気エアロゾルの酸緩衝能力

大気エアロゾルは大気汚染主因の一つであるとともに、酸性雨と密接に関与し、石炭燃焼により排出された粒子状物質は大気エアロゾルの重要起源となっているため、原炭及びBB燃焼エアロゾル試料の化学組成及び酸性化に対する緩衝能力(ΔCb)を分析して、それらの化学的特徴及び降水の酸性化との関係を検討した。Fig. 6に示したいずれの石炭及びBB燃焼エアロゾルも酸性であり、すべてのΔCbは負の値であるが、BB化により酸性度は低減した。石炭燃焼により排出されたエアロゾルは降水に取り込まれると、降水の酸性化を促進するが、BB燃焼の場合、降水酸性化への寄与が低下すると推定される。

Table 2に示した原炭とバイオブリケット燃焼によるエアロゾルの水溶性イオンの排出量により、いずれのエアロゾル中にもSO₄²⁻は総陰イオンの約9割を占めていた。主な陽イオンはH⁺とNH₄⁺であり、燃焼エアロゾルの水溶液はほぼ硫酸溶液であると言えるが、BB燃焼から排出されたエアロゾル中のH⁺とSO₄²⁻濃度は、原炭の直接燃焼に比較してかなり減少していた。一方、BBの燃焼エアロゾル中のCl⁻濃度は原炭より少々高かった。その原因は、バイ

オマス燃焼からのHCl排出量が原炭より高かったためと考えられる。

中国の重慶市における大気エアロゾルの化学的特徴として粒径 $2.1\mu\text{m}$ 以下の人為起源由来のイオン SO_4^{2-} と NH_4^+ は多く含まれ、微小粒子への人為起源の寄与が非常に大きいことが示されている。この大気エアロゾルには、高硫黄分石炭の燃焼により直接排出される硫酸塩と SO_2 が酸化されて生成する二次生成硫酸塩の関与がかなり大きいと推定されるが、BB化によって、その寄与を著しく低下せしめるものと期待される。

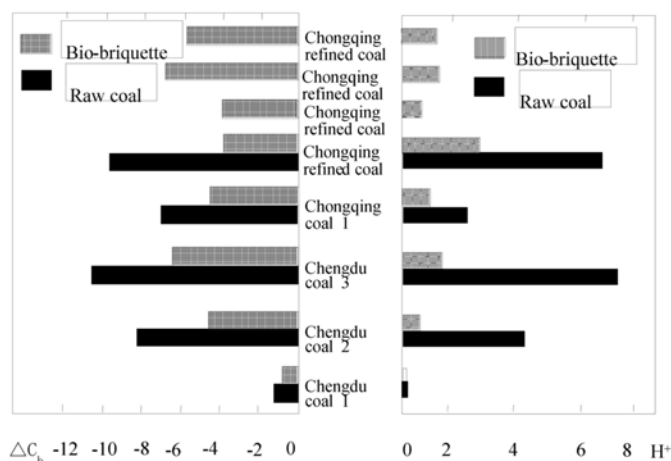


Fig. 6. H⁺ and ΔC_p of coal and bio-briquette combustion aerosols (μeq/g-fuel)

Table 2. Emission of water-soluble ion in aerosol from coal and bio-briquette combustion (unit: neq/g-coal).

Sample	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	ΔΣ ⁻	ΔΣ ⁺	B ⁰
Chengdu raw coal 1	7	11	7	825	110	105	459	37	36	147	851	892	1.05
B.B ⁰ (coal+sawdust)	3	46	24	370	63	113	57	14	102	196	440	545	1.16
Chengdu raw coal 2	16	14	14	5,184	3,706	9	1,027	26	55	192	5,229	5,014	0.96
B.B ⁰ (coal+sawdust)	9	87	41	1,446	507	109	968	195	98	201	1,575	2,080	1.14
Chengdu raw coal 3	17	56	23	8,676	6,503	126	968	57	60	1,027	8,773	8,740	1.00
B.B ⁰ (coal+sawdust)	2	75	31	3,204	1,143	96	979	119	62	1,174	3,310	3,572	1.08
Chongqing raw coal 1	20	42	16	3,540	1,940	279	871	120	101	0	3,617	3,312	0.92
B.B ⁰ (coal+sawdust)	11	43	13	1,906	808	123	597	225	0	22	1,962	1,775	0.94
Chongqing refined coal 2	19	18	3	7,783	6,082	116	1,101	27	65	237	7,823	7,628	0.98
B.B ⁰ (coal+sawdust)	5	318	61	1,793	2,302	247	167	432	101	349	3,177	3,498	1.10
B.B ⁰ (Coal+rice bran)	6	646	79	1,079	557	361	853	1,274	84	701	1,810	1,829	1.02
B.B ⁰ (Coal+maize stalk)	5	348	105	1,223	1,076	264	199	498	11	298	2,078	2,346	1.13
B.B ⁰ (Coal+tofu dregs)	4	513	69	1,707	1,013	223	301	310	143	294	2,292	2,283	1.00
Chongqing raw coal 3	222	106	1,170	12,191	9,795	612	2,140	75	54	1,291	13,690	13,967	1.02

^a B=ΔΣ⁻/ΔΣ⁺, ^bBio-briquettes (BB) were produced from 75 wt% of raw coal and 25 wt% of biomass by the addition of sulfur-fixation agent (Ca(OH)₂/Ca/S=2.0).

5. 重慶市郊外南川市における一般民家に置ける室内汚染調査

南川市の農村地帯では、粉末状石炭が安価であるため、それに粘土や消石灰を混合して(Fig. 7)燃やしている。利用されている石炭の硫黄含有率は高く、それらを直接燃焼させれば排出される SO_2 には高濃度であるため、それによる健康影響の悪化は明らかである。そこで、原炭を利用する民家Aと硫黄固定型成型炭(以下ブリケット：原炭：パルプ廃棄物：消石灰=84:8:8(w/w))利用する民家Bを選



Fig. 7. Mixed fuel prepared from raw-coal and clay.

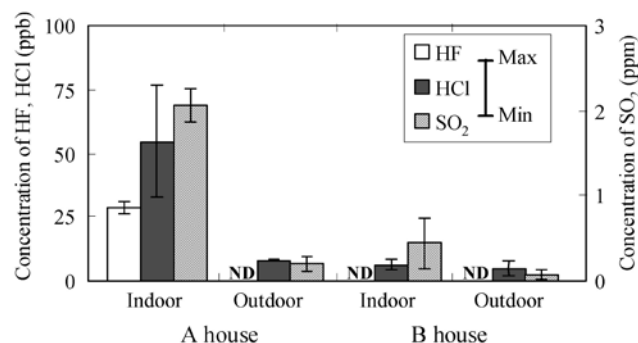


Fig. 8. Concentration of acidic gases emitted from raw coal and briquette combustion.

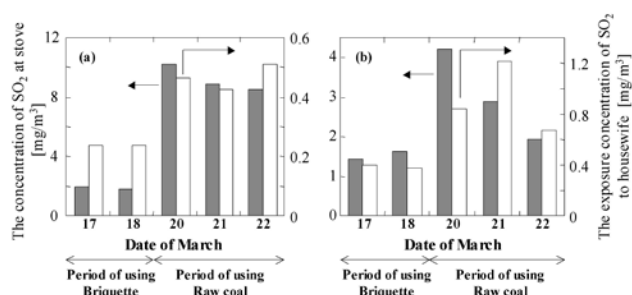
定し、室内外の酸性ガス濃度の測定を行った。

Fig. 8に示したように、室外における酸性ガス濃度は SO_2 それぞれ0.21、0.07 ppmとなりA家、B家とでは大きな変化は見られなかったが、室内の SO_2 濃度はA家、B家でそれぞれ2.1、0.4 ppmとなり、顕著な差が見られ、南川産のBBを用いたB家では全ての酸性ガス濃度の大幅な減少が観測された。しかし、ここで測定を行った両家庭の間取りが異なるため、このような違いがそれに起因する可能性を考慮し、いずれの家庭においても原炭と南川産のBBを一定の期間燃料として利用してもらい、その間に置ける室内汚染レベルとして、コンロ付近の平均濃度と主婦への暴露量を測定するため、Fig. 9に示すようにパッシブサンプラーを主婦につけてもらい、南川産のBBの SO_2 を始めとする酸性物質の低減効果の評価を試みた。

民家A、Bにおいてパッシブサンプラーを用いて主婦に対する硫酸化物暴露量(24時間平均値)を測定し、その経日変化をFig.10に示した。A家よりもB家のコンロ付近における SO_2 濃度は原炭及びブリケット利用時のどちらにおいても低かったが、A、B家においてBB利用によりコンロ付近の SO_2 濃度は減少し、A家においては77～83%、B家においては15～65%の低下が確認された。また、主婦への SO_2 暴露量も減少し、A家、B家の主婦に対してそれぞれ44～54%、41～69%低減された。ここで実測された減少率はやや低いが、Table 1に示した結果は、S/Ca当量比が約2であるのに対して、南川市で利用しているBBの当



◎Fig. 9. Housewife with a passive sampler.



◎Fig. 10. The concentration of SO_2 at stove and the exposure of SO_2 to housewife for 24 hours in house A (a) and house B (b).

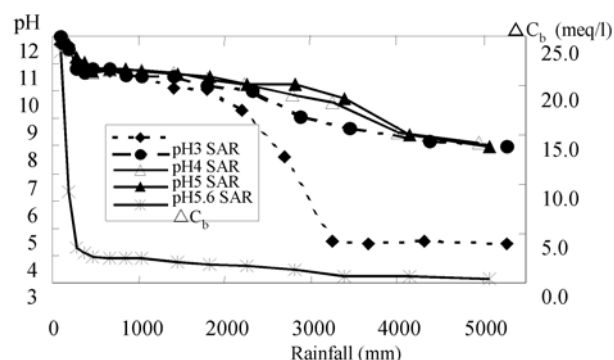
量比が約1.4と低い事によるものと考えられる。

各家庭によって変動はあるものの、コンロ付近、台所入口付近における SO_2 濃度の低下が確認された。また、主婦は1日中台所にいるとは限らず、農作業などで屋外にいることも多いが、原炭利用家庭の主婦と比較してBB利用家庭の主婦の SO_2 暴露量は減少していた。以上のように、パッシブサンプラーによる測定結果から、BB利用により室内汚染の低減と同時に人への酸性物質暴露量も低減させ得ることが確認された。

7. バイオブリケット燃焼灰の酸性土壌改良剤として利用—人工酸性雨(SAR)による灰溶出液のpH変化及び酸緩衝能力—

バイオマスを添加した成型炭の燃焼灰中には植物生長に有効なCa、Mg、Kなどが多く含まれているため、農作物成長への栄養塩類補給の肥料として利用可能と推定される。また、硫黄の固定(CaSO_4)に利用された残りの過剰分の消石灰($\text{Ca}(\text{OH})_2$)が残存している燃焼灰はアルカリ性であるため、酸性土壌の改良剤として使用できると考えられる。そこで、以下に示すように酸性土壌に撒布したBB燃焼灰の酸緩衝能力を調べた。

Fig. 11に各種pH SARによる灰溶出液のpH経時変化及びpH5.6による溶出液の酸緩衝能 ΔCb を示した。これより、pH3の高酸性度の降雨でも約2500 mmの降雨まで灰が酸性化されず、また、5000 mm以上の降雨が降っても



◎Fig. 11. Variation of pH and ΔC in solution of residue ash leached by simulated and rain.

灰溶出液のpHは3に酸性化されず、pHは4.50まで低下するだけであることがわかった。一方、pH4、5、5.6のSARを4000 mmまで滴下したいずれの溶出液でもpHはほぼ8.0であり、強アルカリ性を呈していた。さらに、pH5.6 SARによる燃焼灰溶出液の ΔCb 経時変化を見ると、バイオブリケット灰溶出液は高い酸緩衝能力を持っていると考えられる。したがって、バイオブリケット燃焼灰を重度酸性雨地域の農林地へ散布すれば、酸性雨を中和した後残ったアルカリは酸性土壌を中和することができ、酸性土壌の改良剤として利用可能と推定される。さらに、燃焼灰溶出液はアルカリ性であるため、植物に有毒な Al^{3+} などの重金属を溶出しにくいと推定される。なお、中国の一部地域における酸性土壌への消石灰施用は大麦の生長性を向上させており、土壌中のAlなどの毒性重金属の活性を低下させることができると考えられている。

SARによるバイオブリケット灰溶出液中の成分分析から、その中には Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} および Mg^{2+} が多く含まれていることがわかった。pH3或いはpH4のSAR約9 mm相当を滴下すると、1gのバイオブリケット燃焼灰からのいずれの溶出液中にも Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 及び Ca^{2+} の含有量はそれぞれ約0.2、24、1、2、1000 ppmに達していた。一方、人工酸性雨を滴下し続けた場合、 Na^+ 、 NH_4^+ および K^+ 濃度は速やかに減少したにもかかわらず、 Ca^{2+} と Mg^{2+} は依然として多く存在していた。5000 mm以上の降雨相当量を滴下しても、溶出液中に約7 ppmの Ca^{2+} と0.4 ppmの Mg^{2+} が含まれていた。

燃焼灰の溶出液中に塩基性陽イオンは多く含まれ、その総当量濃度($\text{Na}^+ + \text{NH}_4^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)は重慶地域の土壌の交換性塩基量(0.15~0.25 meq/g-soil)より遥かに高く、特に、降雨相当量の増加に伴う総塩基性陽イオンの量は減少していたにもかかわらず、約5000 mmの降雨相当量を滴下した後でも土壌の交換性塩基量に相当していた。また、pH3とpH4の人工酸性雨による塩基性陽イオンの溶出は500 mm以下の降雨相当量でほとんど同程度であり、その後、高酸性度の方が溶出量は多くなっていた。なお、 Ca^{2+} の当量濃度は総塩基性陽イオンの90%以上を占

めていた。欧州の森林被害地域では、大気汚染物質の排出規制による大気粉塵の減少とともに、塩基性陽イオンの急激な減少も森林衰退の原因であり、森林土壌中の利用可能な Ca^{2+} と Mg^{2+} の量は減少している。よって、BB燃焼灰から Ca^{2+} と Mg^{2+} は多く溶出するため、BB燃焼灰を Ca^{2+} と Mg^{2+} 補給の肥料として農林地へ散布すれば土壌の Ca^{2+} と Mg^{2+} など塩基の不足状況を改善できると推定される。

8. 酸性土壌へのバイオブリケット燃焼灰添加によるハツカダイコンの生長影響

BBの燃焼灰を酸性土壌の改良剤としての適用性を予備的に評価するため、牧草の一種であるアルファルファを試験植物として選択し、赤玉土(粒径： $< 2 \text{ mm}$)を $0.1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ で処理し酸性化(pH4.2)させたものを供試土壌として、BB燃焼灰添加したもの、添加していないものについて、人口酸性雨による栽培試験を行った。Fig. 12に示すように、BB燃焼灰添加した方が発芽・生長ともによいことがわかり、BB燃焼灰による酸性土壌のpH調整効果が明



Fig. 12. Growth test of alpha;pha (Left: addition of BB combustion ash, Right: no addition of BB combustion ash).

Table 3. Cultivation experiment conditions.

	Soil [g]	Ash [g]	SAR* pH	n
Case I	150	7.5	4.2	9
Case II	150	7.5	5.6	9
Case III	150	0	4.2	9
Case IV	150	0	5.6	9

* Simulated acid rain

Table 4. Dry weight of radish plants.

	Total [†] [g]	Shoot ^{†*} [g]	Root [†] [g]
Case I	0.36	0.14	0.22
Case II	0.33	0.14	0.19
Case III	0.25	0.11	0.14
Case IV	0.26	0.13	0.13

*Sum of stem and leaf [†]p<0.01

らかに見られた。った。

次にBB燃焼灰添加の有無ならびに人工酸性雨のpHについて、Table 3に示す実験条件で、酸性条件に弱いとされているハツカダイコンをプラスチック製ポットに播種して、その栽培試験を行った。給水には重慶市の酸性雨のイオン組成を模して調整した人工酸性雨を用いた。

植物育成ランプ(20w×10本)を装備したアクリル製ゲロースチャンバー内で、各条件において一つのポットに3

Table 5. Nutrient (calcium and magnesium) and phytotoxicant (aluminum and manganese) amount in radish plants

	Shoot [mg g ⁻¹ plant]				Root [mg g ⁻¹ plant]			
	Case I	Case II	Case III	Case IV	Case I	Case II	Case III	Case IV
Ca	44.73	49.32	19.56	21.47	19.01	17.53	6.91	4.42
Mg	9.41	9.56	7.41	7.80	8.50	8.37	7.53	7.57
Al	2.85	2.10	1.68	2.67	29.57	27.57	25.83	27.07
Mn	0.40	0.44	0.91	1.02	0.79	0.74	1.62	0.81

(a) Acidified soil (control)



(b) Acidified soil + BB-combustion ash



(c) Acidified soil + BB-combustion ash + livestock compost



Fig. 13. Cultivation experiment of radish plants (a: Acidified soil (control), b: Acidified soil + BB-combustion ash, c: Acidified soil + BB-combustion ash).

個体の割合で3ポットづつ栽培を行った。31日後に植物体を回収し、各個体の地上部(茎+葉)、地下部(根)の乾重量および土壌pHを測定した。各条件の乾重量および土壌pHをTable 4に示す。人工酸性雨のpH変化による乾重量の相違はなかったが、燃焼灰添加により、乾重量が増加することが確認された。燃焼灰を添加していない条件では土壌pHが約4.5と酸性のままであるのに対し、燃焼灰を添加することにより土壌pHは約6と上昇しており、酸性条件に弱いとされているハツカダイコンの生長が燃焼灰を加えることにより促進されたものと考えられた。

また、植物生長に必須であるCa、Mgおよび植物生長に有害であるAl、MnをHF-HNO₃-HClO₄で加熱酸分解した後、ICP-AESで定量した結果をTable 5に示す。いずれの成分においても、人工酸性雨のpH変化による影響は確認されなかった。Ca含有量は、地上部、地下部ともに燃焼灰の添加により増加することが確認され、これはBBに硫黄固定材として添加しているCa塩に由来するものと考えられた。また燃焼灰添加によりAl含有量は高くなったが、Mn含有量は減少することが確認された。燃焼灰の添加に伴いpHが上昇することによりMnの溶脱が抑制されたためであると考えられる。

Table 4に示したように、BB燃焼灰は酸性土壌の改良に一定の効果を持っていることは明らかになったが、ハツカダイコンの生長は栄養分の不足のため十分な成長にはほど遠い状況であった。そこで、重慶郊外の農村部における養豚を考慮して、BB燃焼灰と豚糞堆肥の同時施用を検討した。その結果を、Fig. 13に示すように、酸性土壌へのBB燃焼灰と豚糞堆肥の同時施用により、十分商品価値のあるハツカダイコンが生産でき、かつ可食部への問題となる重金属等の移行は確認されなかった。

9. 水生植物利用のバイオブリケット燃焼灰の土壌改良剤としての評価

新たなバイオマスとして、窒素系化合物やリン酸系化合物を水中から効率よく吸収する水生植物を利用することができれば、そのBBの燃焼灰が酸性土壌中和剤としてだけでなく、肥料効果も期待できるうえ、富栄養化した湖沼や河川の浄化にも役立つと考えられる。そこで、窒素、リン系化合物の吸収蓄積効果が高く、中国でも多く存在しているヨシ、ガマ、ホテイアオイといった水生植物を選択し、これらを用いて調製したBBの燃焼灰の土壌散布時における栄養塩供給効果および金属毒性を、農業廃棄物バイオマスである稲藁を用いて調製したBB燃焼灰のそれと比較することにより、土壌改良剤としての有用性を評価した。なお、ここで用いたBB試料は、石炭(芙蓉炭)と各水生植物バイオマスを3:1で混合し、硫黄固定剤である消石灰(Ca(OH)₂)をCa/S = 2の当量比で添加し、高圧成型したものである。

BB燃焼時に栄養塩類(N、P、K)の揮発損失が起こり、

燃焼灰の土壌散布時における肥料効果が低減する可能性があるため、それらの残存率を測定した。その結果、窒素は全て揮散しており、窒素供給による肥料効果は期待できないが、PとKおよびMgに関しては、植物種による差はあるものの、その大部分が燃焼灰中に残存することが確認された。例えばPにおいては、その残存率は77～94%である。これらの栄養塩類含有量は、ヨシ及びガマに関しては、今回採取した水生植物試料中の含有量よりも稲藁中の含有量のほうが高い結果となったが、これは、稲藁の生育地への施肥の影響によるものであるということが、各バイオマス採取地の土壌分析の結果から確認された。一方で、ホテイアオイにおいては高濃度のPおよびKが含まれており、これらの含有量を基にバイオマス由来のP及びKがBB燃焼灰の中で占める割合を算出したところ、どちらも85%程度と高い値を示していた。このことは、栄養塩含有量の高いバイオマスを利用することにより、そのバイオマスを用いて調製したBBの燃焼灰が高い栄養塩供給能力を有するというを示唆している。

各種水生植物燃焼灰、及び石炭燃焼灰中の毒性金属含有量の測定結果をTable 6に示す。従来の農業廃棄物バイオマスである稲藁と各種水生植物を比較すると、ほぼ全ての金属において水生植物のほうが高い濃度を示した。燃焼灰の利用を農業用地へ適用する場合、酸性条件において単量体のイオンとして溶出し植物生長を阻害することが知られているAlの影響を評価することは非常に重要である。水生植物の総Al含有量は、稲藁のAl含有量と比較すると非常に高いが、石炭燃焼灰中のAl含有量よりは低く、BBの石炭/バイオマス混合比を考慮した場合では、最も高いホテイアオイのAl含有量においてもBB中のAl全量の10%に満たない程度であった。実際にはこのAl全てが溶出するわけではなく、また、燃焼灰添加土壌のpH上昇によりAl溶出量が低下することが麦藁BB燃焼灰5%添加土壌のカラム溶出試験によっても確認されていること

Table 6. Heavy metal contents of different biomasses- and a coal- combustion ashes.

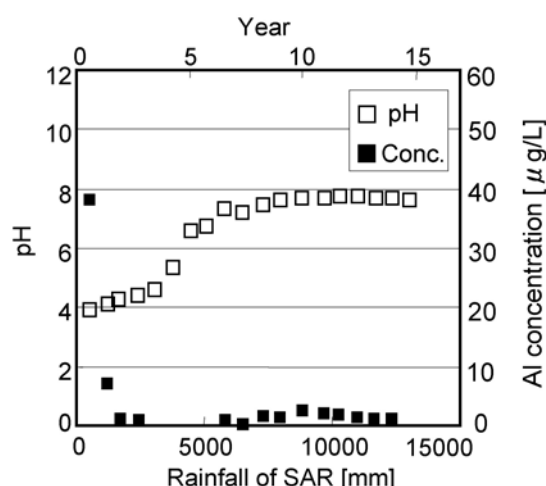
	(μg/g-ash)				
	CR ^{a)}	CT ^{a)}	WH ^{b)}	RS ^{a)}	Coal
	Shoot	Shoot	Whole	Shoot	
Al	2560	5480	18400	544	28600
Fe	4910	5530	15800	976	107000
Cu	50	52	149	25	162
Cr	113	40	39	25	145
Zn	194	190	1260	163	94
Ni	45	26	32	9	122
Cd	n.d.	n.d.	n.d.	2	n.d.
Mn	2440	13800	8240	5590	269
Pb	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

CR = common reed (*Phragmites australis*), CT = cattail (*Typha latifolia* L.), WH = water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), RS = rice straw

n.d. = not detected

a) Sample collected from Arakawa river system

b) Sample collected from Tonegawa river system



◎Fig. 14. pH variation and Al concentration of leachate by simulated acid rain(SAR) dropping column experiment. (pH of SAR = 4.5)

から(Fig. 14)、このAlによる影響は無視できるレベルであろうと判断できる。

他の重金属による土壌及び地下水汚染への影響に関しても、規制基準より低く、無視できるレベルであることが確認された。以上の結果から、水生植物利用BB燃焼灰の土壌散布による金属の毒性影響は少なく、その高い有用性が示唆された。

10. バイオブリケットを核とするゼロエミッションサイクルの構築

中国を主たる対象として、低品位石炭または石炭のみでは燃料として利用し得ない微粉状廃棄石炭と循環性資源であるバイオマス廃棄物を適当な割合で混合し、硫黄固定材として消石灰を用いて高压成型して調製するバイオブリケットの有用性を明らかにした。Fig.15は中国西南部の酸性雨地域をモデルとした、廃棄物を最小化するゼロエミッションサイクルとしてのバイオブリケットを核とする循環型総合環境保全対策を模式的に示したものの



◎Fig. 15. An Example as zero-emission cycle using bio-briquetting of raw coal.



◎Fig. 16. Test plant for bio-briquetting constructed at Anshan in China.

である。中国東北部遼寧省鞍山市では、バイオブリケット製造のための日中合弁会社(Fig. 16)による経験と実績を経て、我が国よりのODA円借款事業として、年産60万トンのバイオブリケットプラントが建設計画が進められている。東北部では民生用以外に集中供熱等では一カ所で大量に利用される可能性があり、ここで排出される燃焼灰については、無焼成煉瓦の製造等、Fig. 15に示したものは別の燃焼灰の用途開発が必要であろう。

12. おわりに

バイオブリケットに関する研究を開始してから既に10年以上、Fig. 15に示す構想もすでに10年以上が経過しているが、BB燃焼灰による酸性土壌の改良ならびに堆肥等の同時施用によるハツカダイコンの生長試験や窒素・リンなどの富栄養化原因物質高吸収水生植物を副原料とするBB燃焼灰添加酸性土壌によるチンゲンサイの生長試験により、全体のゼロエミッションサイクルが成り立つことが確認できたのは最近のことである。バイオブリケットに関する研究は、環境省地球環境研究総合推進費、文部科学省科学研究費、鉄鋼業環境技術開発基金などの多くの資金を得て、日中の多くの研究者と中国各地からの留学生を含む多くの大学院生諸君の協力により遂行されたものである。これまでの研究は支えてくれた多くの共同研究者ならびに大学院生諸君、さらには先に掲げた研究費助成にたいしても心から感謝する次第である。



生態系保全技術

生態系保全技術

はじめに

生態系は、エコシステム（ecosystem）とも呼ばれ、自然界のある地域に住むすべての生物群集とそれらの生活に關与する環境要因とを一体として見たものです。

生態系は包括的なシステムとして成立しているため、ある一つの要因—たとえばある種の化学物質、外国から持ち込まれた植物、動物など—が、ある生態系に深刻な影響を与えてしまうという事例はひろく知られております。とくにグローバル化が進んだ現代において、今回の特集で日中の論者が取り上げている「侵入生物」の問題は地球規模で深刻な問題となっており、問題解決のための生態系保全に關する研究と技術開発が望まれています。

ある生態系とそこで発生している問題を特定するためには、そこで包括的システムとして機能しているネットワークを把握することが不可欠となります。この点に關しても、今回の特集で日中の論者によって最新の研究動向が紹介されています。

さらに中国独自の自然環境ゆえに発生する問題と生態系保全技術について、今回中国の論者によって詳細に分析・紹介されているところであります。

以上の日中の論者による論文が、読者の皆様にとって有益であることを編集部一同祈念しております。

中国総合研究センター

植物の侵入が生態系の炭素・窒素循環に対する影響

•Profile•



李 博 Li Bo ●復旦大学特別招聘教授、生物多様性科学研究所所長

1963年生まれ。現職は復旦大学特別招聘教授、生物多様性科学研究所所長で、主に外来侵入植物生物学、個体群生態学、生態系生態学の研究に従事。1996年1月に英University of East Angliaで博士号を取得。研究分野は植物個体群生物学。1996年～2000年に日本の北海道大学と国立農業研究センターでそれぞれJSPSポスドク、STA研究員。2000年末に帰国し、復旦大学教授。2009年、JSPS Invitation Fellowとして再び北海道大学を訪れ、短期の共同研究。現在、Journal of Systematics and Evolution、Journal of Plant Ecology及び「生物多様性」の副編集長。これまでに国内外の学術刊行物に140編余りの論文を発表、9冊の著書（訳書を含む）を出版。



廖 成章 Liao Chengzhang

1972年1月生まれ。2007年に復旦大学生態学科で博士号を取得。研究分野は生物侵入生態学。現在、国家林業局計画院に勤務し、全国の湿地モニタリング、自然保護区と都市景観の企画設計等に從事。

共著者：駱 亦其、姜 麗芬

要旨：

植物の侵入は土着生態系の完全性と生物多様性をひどく脅かすだけでなく、侵入地の生態系プロセスとその機能を潜在的に変えることになる。生態系の機能とプロセスにおける炭素・窒素循環の重要性に基づき、本論文は植物の侵入が侵入地の生態系の炭素・窒素フラックス、炭素・窒素ストック及び炭素・窒素循環のその他指標に与える影響を総合的に論じ、且つこの研究分野で探究の待たれる問題について検討を加えた。

1. 前書き

生物侵入（biological invasion）は地球変動の中で大きなウェートを占める（Vitousek *et al.* 1997）。それは土着生態系の完全性と生物多様性を脅かすだけでなく、侵入地の生態系プロセスを潜在的に変えることになる（Liao *et al.* 2007、Liao *et al.* 2008b、Rout & Callaway 2009）。現在、生物侵入は最も手強い世界の三大環境問題（他の二大問題は気候変動と生息場所断片化）の1つ（Sala *et al.* 2000）と見なされ、一連の経済的・社会的問題を引き起こしている（Pimentel *et al.* 2005）。予測によれば、経済・貿易のグローバル化、農業の機械化及び人間の活動の活発化に伴い、今後数十年間は外来種の侵入ペースが著しく速まる可能性がある（Pimentel *et al.* 2005、Weber & Li 2008）。

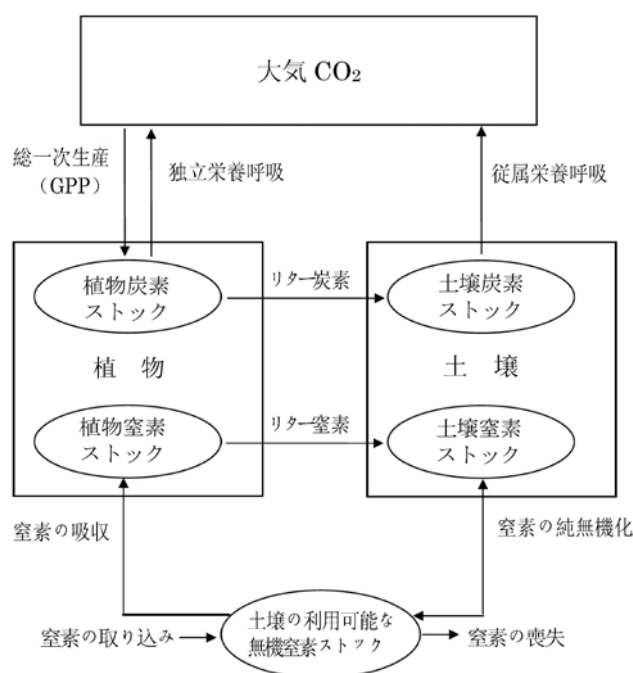
各生物種群（植物、動物、微生物）はいずれも生物侵入を引き起こす可能性があり（Pimentel *et al.* 2005）、外来植物の侵入は其中で大きなウェートを占めている。グローバル侵入種データベースのウェブサイト（<http://www.issg.org/database/welcome/>）が公表した資料によれば、強い侵入性を備えた世界の100種のうち、外来侵入

植物（invasive alien plants）は37種を数え、分類した幾つかの侵入生物種数の中で最も多い。侵入植物は非常に大きな危害をもたらす。なぜなら、それは新しい生息地で爆発的に増え、土着植物に取って代わり、本来の生態系の構造と機能を変え、環境、経済、社会の各方面で深刻な結果を引き起こすからだ。多くの結果の中で、生態系プロセスに与える影響は最も深刻なものである可能性が高い。このため、生態学者は20年前から多くの関連研究を行い、特に植物の侵入が生態系の炭素・窒素循環にどう影響するのかについて研究を進めてきた（Liao *et al.* 2008b）。

早くも1958年に、Charles & Eltonはその専門書「The Ecology of Invasions by Animals and Plants」の中で、植物の侵入は生態系への潜在的な影響があると指摘した（Elton 1958）。しかし、生態系の炭素・窒素循環の複雑性、及び植物の侵入が生態系プロセスに与える影響の重要性に対する当時の認識不足から、その炭素・窒素循環への影響はかなり長い間、生態学界から重視されることがなく、この分野の研究は遅々として進まなかった。1987年、Vitousek & Walker（1989）はミリカ・ファヤ（*Myrica faya*）のハワイ火山跡地への侵入について研究した際、ミリカ・ファヤ自身の窒素固定により、その侵入が生態系における窒素の有効性を高め、火山跡地の生態系の遷移と発展を促していることを発見した。この研究は既に侵入植物の生態系プロセスへの影響に関する典型的事例であった。これ以降、侵入植物が生態系の炭素・窒素循環過程をどう変えるのかについての研究が活発に行われるようになり、大量の実験結果が得られた（Ehrenfeld 2003とLiao *et al.* 2008bを見ること）。本論文では植物の侵入が生態系の炭素・窒素循環に及ぼす影響を簡潔に概説する。

2. 炭素・窒素循環——重要な生態系プロセス

炭素・窒素循環は陸地生態系の物質循環とエネルギー流における最も重要な2つの基本的過程である（図1）。生態系の炭素循環を簡潔に説明すると次のようになる。即ち植物が中心となり、緑色植物の光合成により大気中のCO₂を有機物として固定し、主に植物、土壤中に貯蔵すると同時に、植物と土壤生物の呼吸により、再び大気中にCO₂を放出するのである。一方、生態系の窒素循環は微生物の働きにより、大気中のN₂を植物が利用できる無機窒素として固定する。その一部は植物に吸収されて植物窒素ストックとなり、別の一部は微生物による無機化を通じ、最終的に土壤窒素ストックの中の安定した一部となる。さらに再び大気中に戻される部分もある。図1からわかるように、生態系の炭素循環と窒素循環は相互作用し、密接不可分な2つの過程である。



◎図1 陸地生態系の炭素・窒素循環の概念モデル (McGuire et al. 1995の改正版)

生態系の炭素・窒素循環の研究内容には炭素ストック (carbon stock) と窒素ストック (nitrogen stock)、炭素フラックス (carbon flux) と窒素フラックス (nitrogen flux) がある。生態系の炭素・窒素ストックは植物、土壤、微生物等の中に貯蔵される炭素・窒素量を指す。炭素・窒素フラックスは生態系の気体、植物、土壤等の各要素間における炭素・窒素の移動量を指す。炭素フラックスの特徴を表す過程には光合成、生態系の純一次生産 (NPP)、リター（落葉落枝）の分解、土壤の呼吸等がある。生態系の窒素フラックスの特徴を表す過程には窒素固定、窒素の無機化、アンモニア化等がある。この他、

生態系の炭素・窒素循環の特徴を表す指標として、植物の葉面積指数、リター窒素濃度等がある。

3. 植物の侵入が炭素フラックスに与える影響

植物の光合成と生長速度への影響：

光合成は陸地生態系における2つの最も基本的な過程（もう1つは分解）の1つであり (Berg & McClaugherty 2003)、植物が大気中のCO₂を固定する重要な過程となっている。植物の侵入現象が人々の注目を引く大きな理由の1つは、それが侵入地で爆発的に生長するからだ。カナダノアキノキリンソウ (*Solidago canadensis* L.) の中国への侵入、ホテイアオイ (*Eichhornia crassipes*) のアジアとアフリカへの侵入、耐塩遺伝子型ヨシ (*Phragmites australis*) の米東海岸への侵入等がその例として挙げられる。侵入植物が爆発的に生長する主な原因は、それが強い光合成能力と高い生長速度を持つことにある。Baruch & Goldstein (1999) はハワイの森林で侵入植物と土着植物の光合成速度の違いを比較した際、侵入植物30種の平均純光合成速度 ($9.65 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) が全体として土着植物34種の純光合成速度 ($6.91 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) を大きく上回ることを発見した。この他、侵入植物は土着植物に比べて葉面積指数が高い。例えば、中国・長江河口の湿地での実験によれば、侵入種 *Spartina alterniflora* Loisel の生長シーズンにおける平均葉面積指数は土着植物ヨシの約2倍であった (Jiang et al. 2009)。

生態系の純一次生産への影響：

生態系の純一次生産は植物が光合成により大気中のCO₂を固定し、生態系炭素として実質的に取り込む量をいう。Wilsey & Polley (2006) は米テキサス州で侵入C₄草本3種、土着C₄草本4種、土着非イネ科C₃草本3種の各地上部分の純一次生産に関する2年間の実験研究を行った。その結果、全体として見ると、侵入植物の純一次生産はいずれも土着植物を上回っていた。Kelly & Hawes (2005) がニュージーランドのWanaka海岸帯湿地に生えている *Lagarosiphon major* と *Elodea canadensis* の2種の侵入植物を研究したところ、侵入植物の純一次生産は土着植物の約10倍であった。多くの研究が示しているように、植物の侵入はその生態系の地上部分の純一次生産を変えることになる。しかし、地下部分の純一次生産に影響を与えるかどうかについてはあまり研究されていない。

リターの分解過程への影響：

生態系プロセスの中でリターの分解は植物と土壤の炭素・窒素循環をつなぐ重要な絆となる（図1）。先人は植物の侵入がリターの分解過程に影響を与えることについて多くの研究を行った。Vitousek & Walker (1989) はミリカ・ファヤのハワイの森林への侵入について研究した際、その落葉リターの地表での分解速度が土着植物のテンニンカ (*Metrosideros polymorpha*) より高いことを発見した。Witkowski (1991) はオーストラリアから南アフリ

リカ海岸帯の湿地に移入した*Acacia saligna*、*A. cyclops*という2種の侵入低木と土着植物について地表リター分解の比較研究を行った。その結果、*Acacia saligna*のリター分解速度は土着植物の*Leucospermum parile*より高く、一方、*A. cyclops*は土着植物の*Pterocelastrus tricuspidatus*より低かった。Windham & Ehrenfeld (2003) は米ニュージャージー州の海岸帯のヨシが*Spartina patens*の塩性湿地に侵入したことについて研究した際、ヨシの地表でのリター分解速度が*Spartina patens*より低いことを発見した。先人の多くの研究がはっきり示すように、外来の木本植物であれ草本植物であれ、その侵入はいずれも土着生態系の地表でのリター分解速度を変えることになる。

土壌呼吸への影響：

土壌呼吸は根系、微生物の呼吸の総称であり、生態系における炭素喪失の重要な経路となる。Smith & Johnson (2004) は木本植物の北米草原生態系への侵入について研究した際、侵入木本植物と土着草本植物の土壌呼吸速度を測定した。その結果がはっきり示すように、侵入木本植物の下にある土壌の呼吸速度は草地土壌よりも著しく低く、これは外来木本植物の侵入がその生態系土壌の炭素喪失を減らしたことを意味している。彼らはその原因を説明した際、侵入木本植物が鬱蒼たる林冠を作り上げて、林内の土壌温度を下げ、土壌呼吸速度の低下がもたらされたとの考えを示した。McCarron *et al.* (2003) はカンザス州の草原に侵入した低木種について1年にわたる研究を行い、Smith & Johnson (2004) とほぼ同じ結論を得た。また、土壌の呼吸速度が低下した原因についての説明もSmith & Johnson (2004) に近いものであった。しかし、草本植物の草地生態系への侵入又は森林生態系への侵入について言うなら、外来草本植物の侵入がその生態系の土壌呼吸速度に影響するののか否かに関する研究はまだ報道されていない。

4. 植物の侵入が窒素フラックスに与える影響

生態系の窒素フラックスへの影響：

植物の侵入が生態系の炭素フラックスに与える影響は窒素フラックスへの影響を伴っている可能性がある。なぜなら、生態系の炭素・窒素循環の間には密接な関係が存在するからだ。生態系の純一次生産に対応する窒素フラックスの過程は主に植物の窒素吸収とリター窒素の固定化 (litter nitrogen immobilization)、微生物の窒素固定等である。Windham & Ehrenfeld (2003) はヨシの*Spartina patens*湿地への侵入について研究した際、ヨシ本体の窒素吸収 ($15.3 \text{ g N m}^{-2} \text{ year}^{-1}$) とリター窒素の固定化 ($12.0 \text{ g N m}^{-2} \text{ year}^{-1}$) がそれぞれ*Spartina patens*の本体 ($9.5 \text{ g N m}^{-2} \text{ year}^{-1}$) とリター ($2.0 \text{ g N m}^{-2} \text{ year}^{-1}$) より高いことを発見した。その主な原因はヨシの純一次生産とリター生産量が*Spartina patens*より多いことにある。Vitousek & Walker (1989) はハワイの森

林へのミリカ・ファヤ侵入について研究した際、ミリカ・ファヤ林の下にある土壌の微生物の窒素固定能力が土着の森林土壌より著しく高いことを発見した。これはミリカ・ファヤが菌根窒素固定植物に属するからである。

リター窒素の無機化への影響：

リター窒素の無機化はリターの分解を伴いながら同時に進行する。Allison & Vitousek (2004) はハワイの山地で森林中の侵入植物6種と土着植物5種の落葉リターの地表分解速度を比較研究した。その結果、侵入植物は落葉リターの窒素無機化速度が全体として土着植物より高く、落葉リターの養分が分解過程で土壌中により多く放出されていることを発見した。Ashton *et al.* (2005) は4組の侵入植物と土着植物の落葉リターの分解速度を比較研究した際、うち3組の侵入植物は落葉リターの窒素含有量低下が土着植物より速く、そのリター窒素が土壌中により多く放出されていることを発見した。侵入植物のリターは窒素の無機化速度が速く、これはリターの窒素濃度の高さに関係している可能性がある (Liao *et al.* 2007、2008b)。Allison & Vitousek (2004) の研究によれば、大多数の侵入植物は葉の窒素濃度が高いだけでなく、落葉リターの窒素濃度も高い。

土壌の窒素循環過程への影響：

土壌の窒素循環は主に土壌窒素の純無機化、アンモニア化、硝化作用等の幾つかの過程を含む。Hibbard *et al.* (2001) は北米の大草原に侵入した低木林、森林、萌芽林の樹種について土壌窒素の純無機化実験を1年間行った。その研究結果が示しているように、低木林、高木林、萌芽林の土壌窒素の純無機化速度はいずれも土着の草地土壌の3～5倍となる。Ehrenfeld *et al.* (2001) は米ウォーシントン森林の2つの地点で侵入植物と土着植物を対象に16カ月にわたる土壌の純アンモニア化・硝化実験を行った。その結果、侵入木本植物の*Berberis thunbergii*林と侵入草本植物の*Microstegium vimineum*林は土壌の純アンモニア化速度が2地点でいずれもマイナス値を示した。一方、土着植物林の下にある土壌の純アンモニア化速度は1地点でプラス値、もう1つの地点でマイナス値を示した。また、侵入植物林の下にある土壌の純硝化速度は2つの地点でいずれも土着植物を上回った。しかし、植物の侵入が土壌の脱窒素作用等のその他窒素循環過程に影響するののかかに関する研究はまだ少ない。

5. 植物の侵入が炭素ストックに与える影響

植物炭素ストックへの影響：

土着植物に比べ、侵入植物は急速に生長し、個体が大きく、個体群密度が高い等の特徴を示すことが多く、その生物量は土着植物を上回るケースがほとんどである。Vitousek & Walker (1989) の研究によれば、侵入植物ミリカ・ファヤの茎と根の生物量は土着植物テンニンカより高い。*Spartina patens*塩性湿地へのヨシの侵入に関

するWindham (2001)の研究が示すように、ヨシの地上と地下の生物量はそれぞれ*Spartina patens*の2倍以上となる。しかし、これとは一致しない研究結果もある。例えば、Ehrenfeld et al. (2001)のウォーシングトン森林での研究によれば、侵入木本植物*Berberis thunbergii*の地上生物量は土着木本植物*Vaccinium pallidum*より高いが、侵入草本植物*Microstegium vimineum*の地上生物量は*Vaccinium pallidum*より低かった。この研究からは同時に又、侵入植物2種の地下支根生物量がいずれも土着植物より低いことが発見された。他にも逆の研究結果が報道されている。例えば、Christian & Wilson (1999)の研究によれば、カナダの大草原に侵入したクレストッド・ホイトグラス (*Agropyron cristatum*)の地上と地下の生物量はそれぞれ土着植物より低かったという。先人のこれらの研究結果はEhrenfeld (2003)が総合分析から得た結論と一致している。Ehrenfeld (2003)はその分析の中で、植物の侵入に関する20の事例のうち、侵入植物の生物量が土着植物より著しく高かったのは16例あり、土着植物の生物量より低い事例は4例しかないことを発見した。従って、植物の侵入が生態系の植物炭素ストックに与える影響は全体として見るなら、増大する傾向にある。

リター炭素ストックへの影響：

リターストックの大きさは分解速度の影響を受ける。しかし、植物の侵入は純一次生産とバイオマス生産量に影響を与える一方、リター炭素ストックの大きさにも同様に影響しているようだ。Witkowski (1991)の研究によれば、侵入種の低木*Acacia saligna*と*A. cyclops*がはびこる湿地において、この2種の侵入植物のリター量はいずれも土着植物より150～200%高い。Angeloni et al. (2006)はガマ属植物 (*Typha × glauca*)のCheboygan湿地への侵入について研究した際、侵入植物のリター量が土着植物の10倍以上になることを発見した。しかし、Ehrenfeld (2003)は植物の侵入がリター量に与える影響について整理した際、植物の侵入に関する13の事例のうち、侵入植物のリター量が土着植物より著しく高かったのは6例しかなく、5例は土着植物より著しく低いことを発見した。残りの2例の研究では侵入植物と土着植物の間に明らかな差異が見られなかったという。

土壌炭素ストックへの影響：

現在、植物の侵入が土壌炭素ストックに与える影響については比較的多くのデータが集まっている。例えば、Hibbard et al. (2001)は低木林、森林、萌芽林の草地生態系への侵入について研究した際、低木林、森林、萌芽林の土壌炭素ストックが草地より著しく高いことを発見した。Jackson et al. (2002)は低木種、高木種の草地への侵入を緯度別に研究した際、低木林、高木林の下にある深さ0～3mの土壌炭素ストックが全体として草地より低く、侵入木本植物が生態系の土壌炭素ストックを低下させていることを発見した。Windham & Ehrenfeld (2003)

は塩性湿地への植物の侵入を研究した際、侵入植物ヨシの土壌炭素ストックが土着植物*Spartina patens*より低いことを発見した。しかし、Angeloni et al. (2006)はガマ属植物の湿地への侵入に関する研究の中で、侵入を受けた湿地の土壌有機質含有量が侵入されていない湿地に比べ4倍近く高くなることを発見した。

6. 植物の侵入が窒素ストックに与える影響

植物窒素ストックへの影響：

先人は侵入植物の窒素濃度について大量の研究を行った。その中の大多数の結果は、侵入植物の窒素濃度が土着植物より高いことをはっきり示している (Witkowski 1991, Allison & Vitousek 2004, Ashton et al. 2005)。植物の生産量と窒素濃度を総合して考えるなら、侵入植物の窒素ストックが往々にして土着植物より高いことを発見するだろう。例えば、Windham & Ehrenfeld (2003)は侵入植物ヨシの地上と地下の植物窒素ストックがそれぞれ土着植物*Spartina patens*より高いことを発見した。低木種の草地への侵入に関するLett et al. (2004)の研究によれば、低木林の地上部分の窒素ストックは草地の地上部分に比べ9倍近く高くなる。しかし、逆の研究結果も報道されている。例えば、Christian & Wilson (1999)の研究では、クレストッド・ホイトグラスの地上部分と地下部分の窒素ストックがそれぞれ土着植物より著しく低かったという。

土壌窒素ストックへの影響：

土壌窒素ストックに対する植物の影響は比較的複雑である。なぜなら、土壌窒素ストックの変化は植物だけでなく、土壌微生物にも関係があるからだ。窒素固定能力を持つ侵入植物は土壌の窒素ストックを増やすことができる。例えば、その能力を持つミリカ・ファヤがハワイの火山跡地に侵入した際、土壌窒素ストックが増えた (Vitousek & Walker 1989)。マメ科植物の*Acacia saligna*と*A. cyclops*が南アフリカの海岸帯湿地に侵入した際も土壌の窒素ストックが増えている (Witkowski 1991)。しかし、土壌窒素ストックの増大は非窒素固定植物の侵入を招く可能性もある。例えば、Hibbard et al. (2001)はその研究で、低木林、森林、萌芽林が侵入した地域の土壌窒素ストックは侵入を受けていない地域より明らかに高くなることを発見した。一方、侵入植物が土壌窒素ストックを減らしたとの研究結果も報道されている。例えば、Windham & Ehrenfeld (2003)の塩性湿地での研究によれば、侵入植物ヨシの土壌窒素ストックは土着植物*Spartina patens*より低かったという。

7. 解決の待たれる問題

以上述べた点を総合すれば、先人は植物の侵入が生態系の炭素・窒素循環過程に与える影響について研究した際、侵入植物の生活型には草本、低木、高木があり、侵

入地の生態系のタイプは湿地、草地、森林があり、研究する炭素・窒素循環には植物と土壌の炭素・窒素ストック、炭素・窒素フラックス及びその他の関連指標が含まれるとした。また、生態系が侵入を受ける期間は数年 (Cheng *et al.* 2008) から百年以上 (Christian & Wilson 1999) と幅がある。これらの研究を通じ、2種類の異なる見解が示された。1つは植物の侵入が生態系の炭素・窒素ストックを減らし、その炭素・窒素フラックスを低下させるとの考え方である。もう1つは植物の侵入が生態系の炭素・窒素ストックを増やし、炭素・窒素フラックスを加速させるというもの。現在、植物の侵入による生態系の炭素・窒素循環への影響という分野の研究については、一層の探究が待たれる多くの問題がなお存在している。ここにその中の一部の問題点を整理しておこう。

第1に、植物の侵入が生態系の炭素ストックに与える影響についての論争は主に、侵入を受けた生態系と土着生態系の間における炭素蓄積のメカニズムを先人が深く理解していなかったことに端を発している。先人の多くの研究では生態系の炭素蓄積を決定する植物の生理的、生態的特徴が考慮されていなかった。このため、植物の侵入による生態系の炭素ストックへの影響について言うなら、侵入植物と土着植物の生理的、生態的特徴面での違いにより、純一次生産量とリター分解速度の違いが生じ、侵入地生態系の炭素ストックの変化を招いたのかどうかという問題は、なお一層の検討の余地がある。

第2に、植物の侵入がリターの分解過程に与える影響の研究では、多くの実験が地表でしか行われておらず、空中と地下のリター分解過程に注目したものは少ない。自然の生態系において、大多数の維管束植物の地上部分は生長シーズン中に全てが動物に捕食されることはなく、老化又は枯死した後も、直ちに全てが地表に倒れる訳ではない。例えばカナダノアキノキリンソウ、ヨシ等がそうである。同時に、大多数の植物は純一次生産のかなりの部分を地下に配分している (Roman & Daiber 1984等)。従って、地下の根系リター量もかなり高くなる。このため、地表のリター分解だけで、植物の侵入がリター分解の全過程に影響するのか否かを全面的に示すことは難しい。

第3に、植物の侵入が生態系の炭素・窒素循環に与える影響に関し、全体の方向と幅において定量評価を行ったものが非常に少ない。先人の多くの実験は生態系の炭素・窒素循環の一部の過程に焦点を集めており、生態系の炭素・窒素循環過程が相互作用、密接不可分の特徴を持つことを軽視した (Luo *et al.* 2006)。従って、実験の結論から、植物の侵入と生態系の炭素・窒素循環の間にフィードバック的な相互のつながりが存在しているのか否かを知ることは難しい。このため、先人の実験研究結果を収集し、Meta-analysis分析法で全体の結果を数量化する必要がある。

第4に、侵入植物はどのようにして微生物の働きにより、生態系の炭素・窒素循環過程を変えるのかがまだ明らかになっていない。侵入植物は新たな侵入地に到達し、構成種となった後、その土地の微生物との相利共生関係をどう築くのであろうか。また、自然の生態系において、安定した生態系の窒素循環過程は長い年月 (幾千幾万年) を経て確立されたものである (Vitousek 2004)。このため、侵入植物はどのようにしてその土地の土壌微生物と関係を築き、このような本来安定した窒素循環過程を壊すのであろうか。目下の所、生態系における侵入植物、微生物と炭素・窒素循環の相互のつながりを明らかにしようとした研究はまだ非常に少ない。

第5に、植物の侵入が生態系の炭素・窒素循環にどう影響するのかについての理論研究が不足している。先人は侵入植物の炭素・窒素循環への影響に関する大量の実験データを既に集め、その影響についてある程度の認識を持っているが、それを効果的に予測することはまだできない。また、生態系の炭素・窒素循環パラメータにおいて、先人が集めた実験データは分布が不均一なものとなっている。例えば、植物の侵入が地上の植物炭素ストックに与える影響についてのデータは多いが、地下生態系の純一次生産量への影響についてのデータは少ない。このため、どのようにして既存の実験データを利用し、モデルを用い、実験方法では研究するのが難しいその他の炭素・窒素循環過程を予測するのかは、今後研究を進める価値がある。

参考文献

- Allison SD, Vitousek PM. 2004. Rapid nutrient cycling in leaf litter from invasive plants in Hawai'i. *Oecologia*, 141 (4): 612-619.
- Angeloni NL, Jankowski KJ, Tuchman NC, Kelly JJ. 2006. Effects of an invasive cattail species (*Typha x glauca*) on sediment nitrogen and microbial community composition in a freshwater wetland. *FEMS Microbiology Letters*, 263 (1): 86-92.
- Ashton IW, Hyatt LA, Howe KM, Gurevitch J, Lerdau MT. 2005. Invasive species accelerate decomposition and litter nitrogen loss in a mixed deciduous forest. *Ecological Applications*, 15 (4): 1263-1272.
- Baruch Z, Goldstein G. 1999. Leaf construction cost, nutrient concentration, and net CO₂ assimilation of native and invasive species in Hawaii. *Oecologia*, 121 (2): 183-192.
- Berg B, McClaugherty C. 2003. *Plant Litter Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*. Springer-Verlag, New York.
- Cheng XL, Chen JQ, Luo YQ, Henderson H, Zhang QF, Chen JK & Li B. 2008. Assessing the effects of short-term *Spartina alterniflora* in-

- vasion on labile and recalcitrant C and N pools by means of soil fractionation and stable C and N isotopes. *Geoderma*, 145: 177-184.
- Christian JM, Wilson SD. 1999. Long-term ecosystem impacts of an introduced grass in the northern Great Plains. *Ecology*, 80 (7): 2397-2407.
- Ehrenfeld JG. 2003. Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes. *Ecosystems*, 6 (6): 503-523.
- Ehrenfeld JG, Kourtev P, Huang WZ. 2001. Changes in soil functions following invasions of exotic understory plants in deciduous forests. *Ecological Applications*, 11 (5): 1287-1300.
- Elton CS. Ed. 1958. The ecology of invasions by animals and plants. John Wiley and Sons.
- Hibbard KA, Archer S, Schimel DS, Valentine DW. 2001. Biogeochemical changes accompanying woody plant encroachment in a sub-tropical savanna. *Ecology*, 82 (7): 1999-2011.
- Jackson RB, Banner JL, Jobbagy EG, Pockman WT, Wall DH. 2002. Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature*, 418 (6898): 623-626.
- Jiang LF, Luo YQ, Chen JK & Li B. 2009. Ecophysiological characteristics of invasive *Spartina alterniflora* and native species in salt marshes of Yangtze River estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81: 74-82.
- Kelly DJ, Hawes I. 2005. Effects of invasive macrophytes on littoral-zone productivity and foodweb dynamics in a New Zealand high-country lake. *Journal of the North American Benthological Society*, 24 (2): 300-320.
- Lett MS, Knapp AK, Briggs JM, Blair JM. 2004. Influence of shrub encroachment on aboveground net primary productivity and carbon and nitrogen pools in a mesic grassland. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique*, 82 (9): 1363-1370.
- Liao CZ, Luo YQ, Jiang LF, Zhou XH, Wu XW, Fang CM, Chen JK & Li B. 2007. Invasion of *Spartina alterniflora* enhanced ecosystem carbon and nitrogen stocks in the Yangtze Estuary, China. *Ecosystems*, 10: 1351-1361.
- Liao CZ, Luo YQ, Fang CM, Chen JK & Li B. 2008 a. Litter pool sizes, decomposition, and nitrogen dynamics in *Spartina alterniflora*-invaded and native coastal marshlands of the Yangtze Estuary. *Oecologia*, 156: 589-600.
- Liao CZ, Peng RH, Luo YQ, Zhou XH, Wu XW, Fang CM, Chen JK & Li B. 2008b. Altered ecosystem carbon and nitrogen cycles by plant invasion: A meta-analysis. *New Phytologist*, 177: 706-714.
- Luo YQ, Hui DF, Zhang DQ. 2006. Elevated CO₂ stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: A meta-analysis. *Ecology*, 87 (1): 53-63.
- McCarron JK, Knapp A, Blair JM. 2003. Soil C and N responses to woody plant expansion in a mesic grassland. *Plant and Soil*, 257 (1): 183-192.
- McGuire AD, Melillo JM, Kicklighter DW, Joyce LA. 1995. Equilibrium responses of soil carbon to climate change: Empirical and process-based estimates. *Journal of Biogeography*, 22 (4-5): 785-796.
- Pimentel D, Zuniga R, Morrison D. 2005. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics*, 52 (3): 273-288.
- Roman CT, Daiber FC. 1984. Aboveground and belowground primary production dynamics of two Delaware Bay tidal marshes. *Bulletin of the torrey botanical club*, 111: 34-41.
- Rout ME & Callaway RM. 2009. An Invasive Plant Paradox. *Science*, 324: 734-735.
- Sala OE, Chapin FS, Armesto JJ, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke LF, Jackson RB, Kinzig A, Leemans R, Lodge DM, Mooney HA, Oesterheld M, Poff NL, Sykes MT, Walker BH, Walker M, Wall DH. 2000. Biodiversity - Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287 (5459): 1770-1774.
- Smith DL, Johnson L. 2004. Vegetation-mediated changes in microclimate reduce soil respiration as woodlands expand into grasslands. *Ecology*, 85 (12): 3348-3361.
- Vitousek PM. 2004. Nutrient cycling and limitation: Hawaii as a model system. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J, Melillo JM. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277 (5325): 494-499.
- Vitousek PM, Walker LR. 1989. Biological invasion by *Myrica faya* in Hawaii - plant demography, nitrogen-fixation, ecosystem effects. *Ecological Monographs*, 59 (3): 247-265.
- Weber E & Li B. 2008. Plant invasions in China: what is to be expected in the wake of economic development? *BioScience*, 58: 437-444.
- Wilsey BJ, Polley HW. 2006. Aboveground productivity and root-shoot allocation differ between native and introduced grass species. *Oecologia*, 150 (2): 300-309.
- Windham L. 2001. Comparison of biomass production and decomposition between *Phragmites australis* common reed and *Spartina patens* salt hay grass in brackish tidal marshes of New Jersey, USA. *Wetlands*, 21 (2): 179-188.
- Windham L, Ehrenfeld JG. 2003. Net impact of a plant invasion on nitrogen-cycling processes within a brackish tidal marsh. *Ecological Applications*, 13 (4): 883-896.
- Witkowski ETF. 1991. Effects of invasive alien acacias on nutrient cycling in the coastal lowlands of the cape fynbos. *Journal of Applied Ecology*, 28 (1): 1-15.

中国の水土流失及び水土保持の研究と実践

•Profile•



雷 廷武 Lei Tingwu ●中国科学院水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵食・乾燥地農業国家重点実験室主任

1958年生まれ。1988年、北京農業技術大学、農業水文学専攻、工学博士。1998年より中国農業大学教授、博士課程院生指導教官。2007年より黄土高原土壤侵食・乾燥地農業国家重点実験室主任、中国科学院水土保持研究所「知識革新プロジェクト」研究員。この間、豪ビクトリア州、持続的灌漑農業研究所、米ミシガン州立大学、農業・生物システム工学部、米Purdue universityのUSDA-ARS国家土壤侵食研究実験室、英HAPPER ADAMS UNIVERSITY COLLEGE及びOXFORD UNIVERSITYなど訪問して研究。国際定期刊行物に40編近くの論文を含む計約200編の論文を発表。12件の発明特許、13件の実用新案特許を取得。著作に「細溝浸食物理モデル」。「中国科教基金会」青年科学技術（茅以昇）賞、農業部科学技術進歩2等賞、中国土壤学会「第2回土壤学会賞」、「第9回銭寧土砂科学技術賞」を受賞。中国農業工程学会常務理事、中国水土保持学会理事を兼務。「水土保持研究」、「水土保持学報」の編集長、「農業工程学報」、「農業機械学報」、「水土保持科学」、「生態環境学報」、「CATENA」、「International Journal of Agricultural and Biological Engineering」等の中国内外学術定期刊行物の編集委員を歴任。

寧 堆虎 Ning Duihu

中国水利部水土保持司の教授クラス高級技師。1963年8月生まれ。1989年、中国農業大学農地水利工学修士。主に水土保持管理業務に従事。

屈 麗琴 Qu Liqin

北京林業大学水土保持学院研究助手。1980年3月生まれ。2008年、中国農業大学農業水文学博士。土壤侵食及び水文過程分野の研究に主に従事。

1 中国の水土流失の概況

中国は北緯3° 52' ~ 53° 33'、東経135° 05' ~ 73° 40' に位置する。中国の地勢は西高東低で、山地、丘陵、高原が全国総面積の約2/3を占める。また、国土全体の中で利用の難しい砂漠、氷河、岩山及び荒涼たる高緯度寒冷地帯等が35%を占めている。地質と地形が複雑で、山地・丘陵が国土の2/3を占め、大陸性モンスーン気候の影響で洪水と渇水の年間差が大きく、これが水土流失の自然条件となっている。特殊な地理的条件と社会的・経済的条件により、水土流失は大きな環境問題となっている。特に人口増加が食物と繊維の生産に対する需要増大を招き、水土流失を激化させた。中国国内では様々な水土流失のタイプを見ることができる。水土流失は今や人々の生産・生活及び国の生態と環境の安全に影響を及ぼし、社会の持続可能な発展を制約する要因となり、これは中国の重大な環境問題である。水土保持は農業の生産条件と生態環境を改善し、河川を整備するための根本的措置であり、各級政府からますます重視され、人々の関心を集めている。中国の水土流失は以下の特徴を持つ。

中国の水土流失は分布範囲が広く、面積が大きい。第2回リモートセンシング調査によれば、中国の水土流失面積は356万km²に達し、国土全体の37%を占める。そのうち水の作用による浸食が165万km²、風の作用による浸食が191万km²で、26万km²は水食と風食が交錯している。長江、黄河、珠江、海河、松遼河など7大流域の上・中流域域に主に分布しており、長江と黄河の上・中流域域が特に深刻である。

中国の水土流失には様々なタイプがあり、水食、風食、凍結融解浸食、重力浸食（地滑り、土石流、洞穴浸食）

等を含む。重力浸食は常に水食又は風食と共に発生する。また、中国の農牧交錯地帯は水食と風食が交錯しながら発生する水土流失地帯であり、両者の相互作用により、その浸食の激しさは単一の水食地域又は風食地域を上回る。

土壤流失量が大きい。推算によれば、全国で年平均約50億tの土壤が流失し、そのうち長江流域は24億t、黄河流域が16億tである。黄河の河口から竜門に至る区間の7.86万km²は水土流失が最も深刻な地域で、土壤浸食係数は5,000t/km²・a以上となり、一部の地域では30,000余t/km²・aに達する。

人口圧力と生存圧力及び伝統的な農業生産方式、例えば過度な森林伐採、急斜面での荒地開墾、草原の開墾・耕作、過度な重放牧等が植生の破壊、防風・砂地固定機能と貯水・土壤保全機能の低下をもたらし、水土流失が激化している。例えば、長江流域内の12の省では過去50年間に傾斜耕地面積が増え続け、林地面積が年々減少している。これらの傾斜耕地の多くは林地や草地を開墾して得られたものである。黄河、長江、淮河、珠江等の中・上流域には風砂地域が含まれるが、近年、草地はひどい過放牧が行われ、年々劣化し、その面積が減少している。

深刻な水土流失は多くの生態・環境問題を引き起こすとともに、経済の発展と人の生産・生活に深い影響を及ぼしている。水土流失は地形にダメージを与え、土地資源が破壊され、農地は日増しに荒廃し、面積が徐々に減少している。例えば、黄土高原地域では細溝の形成、洗掘、拡張により、良田がデコボコの荒地地になってしまった。中国東北部の黒土地帯では黄土が現れ始め、浸食溝が発達し、徐々に幅と深さを増している。水土流失のた

めに大量の耕地が失われた。岩石の多い山間部、特に降雨量の多い南方地区では基岩が露出し、土地が岩石砂漠化している。傾斜耕地は土壌の肥沃度が低下し、土地がやせ細り、劣化している。水土流失はさらに水体汚染を引き起こした。推算によれば、全国で毎年流失するアンモニア、リン、カリウムの総量は1億t近くに達する。水土流失は草地の砂漠化、塩性化をもたらし、劣化した牧草地は全国の草原面積の約半分を占める。土地の劣化はしばしば砂塵を引き起こし、環境に重大な影響を与えている。

水土流失は下流に深い影響を及ぼしており、大量の土砂が河川・湖沼・ダムに堆積し、水利施設の洪水調節・貯留能力が低下し、河道の洪水疎通能力が落ち、下流地域では洪水災害の脅威が増した。黄河の土砂流送能力は年平均約16億tで、そのうち約4億tが下流に堆積し、河床が毎年8～10cm上昇し、天井川が形成された。長江流域は水土流失が深刻で、毎年約3.5億tがダムや中小河川に堆積し、洪水の調節・貯留能力と流下能力を低下させ、豪雨流出時の集水過程が加速している。大まかな統計によれば、全国の大中小ダムに堆積した土砂は既に累計で200億t以上に達し、総貯水容量の10%以上を占める。大量の土砂の排出により、水資源の総合開発と有効利用が制約を受けている。水土流失が深刻な地域では、土砂の堆積による貯水容量への影響を軽減するため、「蓄清排渾」（清水を蓄え、泥水を排す）のダム稼働方式を採用するケースが多い。黄河下流では河床の上昇ペースを遅らせるため、土砂を海へ押し流すのに年平均200～300億m³の水を必要としている。

水土流失は貧困の根源であり、生態と環境を悪化させる主な原因である。水土流失がもたらす土地生産力の低下で、人々はより多くの開墾を必要とし、これが深刻な水土流失を引き起こしており、貧しいほど開墾し、開墾するほど貧しくなるという悪循環を生んでいる。

中国の代々の人は「水土を平治する」、「溝洫（こうきょ）で黄河を治める」、「治水は先ず源を治める」、「天下の人々に田を治めさせ、河を治める」という貴重な経験と理論を早くから生み出し、これが今日に受け継がれ、一層充実したものになった。中国の水土保持は基本的に水系流域を単位とし、大河川の整備と統一的に計画され、同時に実施されている。

2 中国の土壤浸食と水土保持の研究

半世紀余りこのかた、中国では土壤浸食と水土保持に関する研究・実用事業が絶えず前進し、国家級、省（市）級、地区・県級の水土保持科学技術研究システムが次第に構築された。各部門、各機関が水土保持の基礎研究と応用基礎研究及び利用技術の普及、モデル化、推進活動に従事している。人々が資源と環境を重視するのに伴い、水土流失はますます注目を浴びるホットな話題となり、

水土保持に関心が集まっている。各関係大学と研究院では水土保持専攻の博士・修士課程院生、本科生と専科生及び職業技術の教育体系が徐々に築かれた。特にこの10年余りで水土保持の教育事業は急速な発展を遂げ、各レベルの研究・管理人材が大量に養成された。土壤浸食と水土保持の科学技術研究・教育体系が次第に確立され、完備しつつある。現在、全国には各級の水土保持科学研究院・研究所が200余り、技術普及・試験ステーションが600余りある。また、全国の20余りの大学・高等専門学校が水土保持学科を設け、土壤浸食と水土保持の科学・応用研究、人材育成を行っている。

長年の努力の末、水土保持の理論体系、技術体系と規範が一応作り上げられた。半世紀余りに及ぶ土壤浸食整備の実践と技術面の探究を通じ、それぞれの地域、地理的環境、浸食タイプに適した土壤浸食防止の方法、モデル、技術的措置が確立された。中国の特色を持つ科学研究活動の道が開かれた。黄土高原の小流域における急斜面耕地の水土流失予測・予報モデル、ダムを築いて土砂を食い止め、耕地を作るためのSoil-retaining dam工法、乾燥、半乾燥地域における流出調節・制御技術と蓄積利用技術、傾斜耕地における水土保持耕作技術と食糧・牧草帯状浸食防止栽培技術等を広めた。また、幾つかの基幹設備を研究開発し、ハイテク技術が大いに普及・応用され、研究レベルが高まった。近年、中国科学院水利部水土保持研究所は法面流出土砂・流量オンラインリアルタイム自動測量システム、γ線水土流失自動モニター等を自主開発し、科学研究に応用して、わが国の水土保持研究レベルを高めた。リモートセンシング監視測定技術、情報管理技術及び生物化学技術の普及・応用が進み、作業の質と効率が向上した。水土保持科学技術は実践の中で重要な役割を發揮している。検定と確認検査に合格した科学技術成果は3,000余件あり、省・部級以上の科学技術賞を300件余り受賞した。

土壤浸食と水土保持に関する科学研究と技術開発の普及・応用が各レベルの學術機関で進められている。

中国科学院水利部水土保持研究所は土壤浸食と水土保持の専門研究機関である。その主な任務は黄土高原地域を重点とし、水土保持研究を中心に据え、黄土高原の生態環境改善、農業・林業・牧畜業の総合的発展及び黄河の治水に役立てることだ。同時に、中国のその他地方の水土流失が非常に深刻であることを考慮し、水土保持研究所は他地域の水土保持研究も引き受けている。

黄土高原土壤浸食・乾燥地農業国家重点実験室は中国の土壤浸食・乾燥地農業分野における基礎研究及び応用基礎研究の重要な拠点であり、中国科学院水利部水土保持研究所に依拠して設立された国家重点実験室である。実験室の主な研究は土壤浸食過程及びその調節・制御、土壤浸食モデル及び予報、水土保持の新しい方法と技術である。実験室は水土保持研究所の4カ所の野外生態網試

験ステーションを利用し、野外研究と実験観測を行っている。土壌浸食研究を進めるのに必要な屋内シミュレーション設備もある。例えば人工降雨シミュレーションホール、リモートセンシングシステム、GISシステム等である。実験室は関連分野の基礎研究と応用基礎研究を主に引き受けている。また、国際共同研究を幅広く繰り広げており、米国、オーストラリア、日本、カナダ、イスラエル、ドイツ、英国、オーストリア、韓国など20余カ国・地域の科学者と良好な協力関係を築いた。実験室は国内外の関連分野の科学研究者がここで共同研究を行うのを歓迎し、また、研究者が自ら課題を持ち込み、この機器設備を利用して科学研究を進めることも歓迎している。

水利部中国水利水電科学研究院、水利部黄河水利委員会黄河水利科学研究院、水利部長江水利委員会長江水利科学研究院及び関係省の水利科学研究院が水土保持研究所を設立し、関連の基礎研究と応用基礎研究及び技術の開発・普及・応用に従事している。

中国の科学関係者の長期にわたる水土流失理論研究と試験研究により、豊かな研究成果が得られ、貴重な科学データと実践経験が蓄積された。中国の土壌浸食分類システムが完成し、その分布と法則を基本的につかみ、土壌浸食のメカニズムと進行・変化の傾向についてかなり系統的な認識が得られ、関連の理論が打ち出された。工学技術、林業技術、農業技術を主体とした水土保持技術体系、行政、立法、監督/管理、法執行を主体とした管理体系が築かれ、水土保持の学問体系が徐々に整いつつある。

水土保持科学技術者の数十年に及ぶたゆまぬ努力を通じ、様々な条件に適した水土流失防止の方法、モデル、技術的措置が探究された。例えば、段畑技術、Soil-retaining dam技術、生物道路浸食防止技術、植生回復技術、雨水利用技術、地滑り・土石流早期警報技術、都市建設水土流失予防等である。

一連の国家技術規格の研究・公布・実施は、中国の水土保持の技術規格システムが整いつつあることを示す。

土壌浸食と水土保持の科学研究の発展及び研究過程で得られた成果により、水土流失に対する認識が高まり、その整備モデルを科学的・合理的に構築し、関連政策を提起・実施するための基礎が定められた。

3 水土保持の重大プロジェクトとその成果

一、8つの整備区

1982年の第4回全国水土保持対策会議で、水土流失重点整備区を設けることが決まった。国务院の承認を経て、無定河、三川河、皇甫川、甘肅省定西県、海河流域の永定河上流、遼河流域の柳河上流、長江流域の葛洲壩ダム区、江西省興国県という水土流失の深刻な8つの地域が重点整備区に指定された。第1期工事は1983年に始まり、1992年末に完了して国の確認検査に合格した。10年間で

完成した水土流失総合整備面積は19,925km²となる。第2期工事は2段階に分けて進められた。第1段階が1993年～1997年、第2段階が1998年～2002年で、2002年に確認検査に合格した。実施範囲には永定河、湫水河、大凌河、柳河、無定河、皇甫川、贛江、定西が含まれ、陝西、甘肅、山西、内蒙古、江西、遼寧、河北、北京8省（自治区・直轄市）の56県（市・区・旗）に及んだ。2004年にスタートした第3期の整備は集中・広域、大規模な整備、水土保持の大型モデル区建設という構想に従い、42のプロジェクト区域の359カ所の小流域で計画的に実施され、陝西、甘肅、山西、内蒙古、江西、遼寧、河北、北京8省（自治区・直轄市）の42県（市・区・旗）に及んだ。

二、長江整備工事

長江流域は山岳・丘陵面積が広く、山が高く斜面が険しく、雨量が集中し、浸食されやすい岩層と土壌が広く分布し、人為的活動が活発で、水土流失が非常に深刻である。長江流域の水土流失の深刻さ、及び三峡ダム建設の必要に基づき、1987年7月、全国水土保持工作協調小組は長江上流を国の水土保持重点整備区とするよう提案した。1989年～2001年、金沙江下流及び華節地区、隴南（甘肅省南部）陝南（陝西省南部）地区、嘉陵江中・下流、三峡ダム地区の4カ所で長江上流水土流失重点防止工事が実施された。これは「長江整備工事」と呼ばれる。10年余りの間に、整備範囲は長江上流の雲南、貴州、四川、甘肅、陝西、重慶、湖北、湖南、江西、河南10省（直轄市）の194県を含むようになり、水土流失整備は行政区域と分類区域の枠を越え、新たな突破口が開かれた。

2001～2005年、「長江整備工事」は大衆の生産・生活上の現実問題の解決を主要目標とし、小流域を単位とし、斜面流出の調節・制御を中心に据え、斜面水系工事に力を入れ、小型ダム整備、溪谷整備及び植生法面保護工、作業用通路設置等を進めた。また、メタンガス発生タンク、薪節約かまど等を普及させ、芝刈りによる植生の破壊を軽減した。

三、世銀水土保持プロジェクト

世界銀行の融資による黄土高原水土保持プロジェクト（世銀水土保持プロジェクト）は、中国の外資利用による水土流失整備プロジェクトであり、1994年10月3日に認可を得て実施された。

プロジェクト区域は黄河中流の粗砂の多い地域であり、山西省、内蒙古自治区、陝西省、甘肅省を含み、7つの地区（市・盟）に及ぶ。この地域は水土流失が深刻であり、年間の土砂流出係数は最低でも5,638t/km²（内蒙古伊克昭盟）、最高は26,400t/km²（陝西省佳蘆河）となる。農民の生活が貧しい。

人口増加、貧困、生産力低下がもたらす傾斜地の開墾・耕作はこの地域の水土流失の大きな原因となっている。水害、干害、砂嵐等の自然災害はこの百年来、増える傾向にある。これは過度な伐採、開墾、過放牧及び過度な

採掘等と関係があり、開墾が特に大きなウエートを占めている。急斜面の開墾は人為的な水土流失を引き起こす大きな原因である。

四、「退耕還林還草」実験プロジェクト

1980年代中期から90年代初期にかけて、国連食糧計画（WFP）と中央政府の支援の下、寧夏・西吉県、貴州省西部及びその他の一部地方で「退耕還林還草」（耕地を森林や草原に戻すこと）の実験が進められ、幾つかの成果と経験を得た。国の経済発展と西部大開発戦略の実施に伴い、それに当時の食糧事情から、また、1998年に長江、嫩江、松花江流域で大洪水が発生したため、朱鎔基首相は1999年に西部地区を視察した際、「退耕還林還草」を再び政府の重要な議事日程に上らせた。

1998年～1999年の十分な準備を経て、「退耕還林還草」の実験プロジェクトが2000年3月9日に正式にスタートした。このプロジェクトは長江上流（三峡ダム地区より上流の地域）及び黄河中・下流（小浪底ダム地区を境とする）の13省（自治区・直轄市）の174県に及び、6月には湖南、河北、吉林、黒竜江4省の14県でも始まった。

「退耕還林還草」プロジェクトは25°以上の急斜面耕地及び水土流失が深刻なその他耕地で優先的に実施された。国は協力農家に食糧補助と現金補助を行い、種苗を提供した。補助期間は一般に5年～8年とした。

2000年9月、国は実験状況のフィードバックに基づき、各政策・規定及び運営方式について整備と細分化を進め、このプロジェクトを効果的に導いた。

五、北京・天津風砂発生源プロジェクト

砂塵天気は中国北方地区で春季に比較的良好に見られる災害性天気である。砂塵嵐は北方地区の生産・生活、社会・経済の発展及び生存環境に大きな影響を及ぼしている。1993年5月5日と1988年4月16日の強烈な砂塵嵐はこの百年間でまれに見るものであり、甚大な損失をもたらした。2000年3月～5月に、北京地区では浮遊塵が12回発生し、住民の生産・生活に大きな影響を与えた。2002年3月18日から21日にかけて発生した砂塵天気は中国北方の140万km²余りの地域を襲い、影響を受けた人口は1.3億に達する。

北京・天津地区は中国の政治、経済、文化の中心である。環北京・天津地区の環境を改善し、砂塵嵐の襲撃を阻止することは重大な意義を持つ。

環北京・天津地区の砂塵発生源は主に内蒙古自治区のフンサンダク砂地、ホルチン砂地、内蒙古北部の劣化草原及び山西、陝西両省境界周辺の農牧交錯（半乾燥）地帯に分布している。このため、北京・天津地区の防砂治砂プロジェクト建設は内蒙古北部乾燥平原砂漠化整備区、フンサンダク砂地整備区、農牧交錯地帯砂漠化土地整備区、燕山丘陵・山地水源保護区の4つのタイプに分けて進められた。

六、黄河水土保持生態プロジェクト

黄土高原は水土流失が世界で最も深刻な地域である。黄河の土砂流送量は年平均16億tに達し、その65%は黄河中流の粗砂が多い7.86万km²の地域から流入したものである。このプロジェクトは黄河への土砂流入を減らすために実施された、粗砂の多い地域を対象とする水土保持生態プロジェクトである。

プロジェクト区域の面積は2.39万km²である。そのうち陝西、内蒙古両省（自治区）が境界を接する地域の皇甫川、孤山川、窟野河、秃尾河の流域面積は1.66万km²であり、ここは黄河の粗い土砂の主な発源地域だ。残りは「十大孔兌」（10本の小さな支流を指す）の流域面積0.73万km²となる。

七、東北黒土地帯の水土流失防止実験

東北は大規模な土地の開墾を経て、中国の食糧生産基地となった。東北黒土地帯の食糧総生産量は全国の16.35%を占め、食糧の商品化率は55%に近い。東北黒土地帯の総面積は103万km²だが、水土流失面積は27.59万km²に達し、その26.79%を占める。黒土地帯は緩やかな傾斜が長く続き、土質が軟らかく、耐浸食能力が弱く、降雨の集中及び過度な開墾・耕作、過放牧、乱伐、みだりな芝刈り等の人間の活動により、深刻な水土流失が引き起こされた。

2003年9月、東北黒土地帯の水土流失総合防止実験プロジェクトがスタートした。このプロジェクトは東北4省（自治区）の黒土地帯で水土流失面積1,804.17km²を整備するものであり、内蒙古、遼寧、吉林、黒竜江4省（自治区）の6地区（市）に及んだ。実施期間は2003年～2005年。

八、農業発展水土保持プロジェクト

国家農業総合開発水土保持プロジェクトは、国が最も早く実施した生態系整備プロジェクトの1つである。1989年に長江上流で実施され始め、プロジェクト区域は貴州、雲南、四川、陝西、甘肅、湖北6省に及んだ。1999年、農業総合開発水土保持プロジェクトは黄河中流の水土流失が深刻な地域まで拡大され、山西、陝西、甘肅、青海、寧夏の5つの黄河流域省（自治区）が新たに加わった。その後、プロジェクト区域は寧夏、陝西、山西、四川、重慶、江西、湖南の7省（自治区・直轄市）に縮小された。

実施後、成功した技術路線と整備モデルが総括され、顕著な経済効果、生態効果、社会的効果を得た。

九、珠江上流の南盤江と北盤江の石灰岩地域における水土保持総合整備実験

珠江上流の南盤江と北盤江の石灰岩地域における水土保持総合整備実験工事は雲南省、貴州省、広西チワン族自治区の17県（市）で行われた。プロジェクト区域は雲貴高原から広西と広東の低山・丘陵・盆地へ漸移するカルスト地帯であり、土地の岩石砂漠化が深刻である。

1998年に計画が完成。2003年6月、中国国際工程諮詢会社の評価に合格した。実験工事は小流域を単位とし、水

を主軸に据え、斜面水系工事、水路整備工事、傾斜耕地改造を重点として、大規模な伐採禁止・造林を実施し、水土保持防護林、薪炭林、経済果樹林を適度に増やし、水土流失を効果的に抑え、土地の岩石砂漠化を食い止めた。実験工事期間は5年であった。

実験工事の際に打ち出された「科学技術に依拠し、仕組みを刷新し、重点を際立たせ、質・規格・効率の高い精選モデル工事を行う」との要求に従い、入念に手配・実施し、工事は順調に進んだ。

このプロジェクトでは石灰岩地域における水土流失総合防止のモデルと技術路線が総括され、実行可能な工事建設管理メカニズムを探究した。整備の効果が徐々に現れている。

十、国債水土保持プロジェクト

1998年以降、国は大河川の上・中流地域の水土流失整備を生態環境作りと河川整備の重要な任務とし、債券発行によって資金を調達し、水土保持の生態環境作りに充てた。そのため、このプロジェクトは「国債水土保持プロジェクト」と呼ばれる。プロジェクトは黄河、長江、

海河、松遼、淮河、太湖、珠江7大流域の上・中流にある25省（自治区・直轄市）の700余県（市・区・旗）、6,000近くの小流域に及び、山西、陝西、内蒙古3省（自治区）の砒砂岩地帯における沙棘（*Hippophae rhamnoides*、グミの一種）生態工事も含む。面積7.94万km²。

工事は長江上・中流及び黄河中・上流を重点とし、小流域を単位とし、集中・広域の方針に従って実施された。山・水・田・林・道を統一的に計画し、総合整備を行い、生態の自己修復能力を生かし、閉鎖・伐採禁止・造林に力を入れた。

プロジェクトは投資の度合いが大きく、整備の進度が速く、生態効果、経済効果、社会的効果が著しく、水土保持の生態環境作りに参加しようという民間の意欲が引き出された。国債水土保持プロジェクトは生態環境悪化を効果的に食い止めることに加え、対象区域内の農村インフラを改善し、産業構造の調整を後押しし、大衆が貧困から脱して豊かになり、調和社会を築くための強固な基礎を築いた。

中国の土砂河川における生態環境水要求の特徴

●Profile●



倪 晋仁 Ni Jinren ●北京大学環境工学研究所 所長

1962年8月生まれ。1989年清華大学水利工学部で博士号取得。1992年北京大學教授着任、1995年北京大學環境工学研究所設立。主に水環境改善の理論と技術、河川の整備と修復工事に關する研究に従事。これまでに國家自然科學基金の重大プロジェクト、國家傑出青年基金、國家科學技術サポート計畫のテーマ、歐洲連合（EU）の科學技術協力プロジェクト、カナダのCIDAプロジェクトなどの50件余りの重要科學研究プロジェクトに着手。専門書5冊出版、國際的な學術誌に100編余りの論文を發表、10件余りの國家發明特許を取得、教育省の科學技術進歩1等賞を2度受賞。現在、政協全國委員、人口資源環境專門委員會委員、中華環境保護連合會理事、「應用基礎與工程科學學報」編集委員會主任等を兼務。

要旨：

中国には多くの特殊な土砂河川（土砂含有量の多い河川）があり、黄河がその最も代表的なものである。土砂河川は一般の河川と異なり、その土砂流送機能が河川系の1つの重要な機能となっている。このため、土砂河川系の健全性を確保するのに必要な生態環境水要求を研究する時は河川の土砂流送用水を優先的に考慮しなければならない。河川の生態環境水要求量を確定するための一般的な計算方法は、土砂河川の生態環境水要求の特徴をあまり考慮しておらず、土砂含有量の少ない河川にしか適用できない場合が多い。土砂河川である黄河を例にとると、黄河下流の水と土砂の各種状態下における生態環境水要求を系統的に認識し、増水期、渇水期及び通年の状況の違いを考慮すれば、その生態環境水要求の特徴を理解することができる。土砂河川の生態環境水要求の特徴に基づき、黄河の水資源利用と生態水要求の競争性を考えるなら、多目的ダムを利用して水と土砂を組み合わせた適切な調節・制御を行い、渇水期に流入した土砂を増水期に集中して流送するのがよく、それによって河道の堆積を減らし、生態環境水要求量を引き下げ、水資源の利用効率を高めるという目的が達成される。

1 土砂河川の特異性

河川系は自然界の最も重要な生態系の1つであり、人類と密接な関係を持つ。河川系の主な機能には送水、土砂流送、洪水排出、自浄、景観、水運、生態等があり、人々の生産・生活に大いなる利便性を与えている。しかし、人類共同体の発展に伴い、人間の活動が自然の河川系に大きなダメージを与えるようになり、その生態系の構造と機能が損なわれ、人間の生活にも不利な影響がもたらされた。例えば、河川の水資源の不合理な開発・利用及び水利構造物の建設によって、水生生物の生息環境がダメージを受け、さらには完全に破壊され、河道に土砂が堆積し、河口・湿地の生態が悪化する等の好ましくない結果を招いたのである。河川の水資源を効率よく持続的に開発・利用するには、河川生態系の健全性と安定性を維持するための生態環境水要求量を確保しなければならない。

ない。

河川の生態環境水要求量とは特定の時間と空間において特定のサービス目標を実現するための変量であり、特定の水準の下で河川系の諸機能を発揮するのに必要な水量を総称したものである。河川機能の違いに対応した生態環境用水は水質汚濁防止用水、生態用水、土砂流送用水、河口部の生態環境用水及び景観用水、娯楽環境用水等に分けることができる。

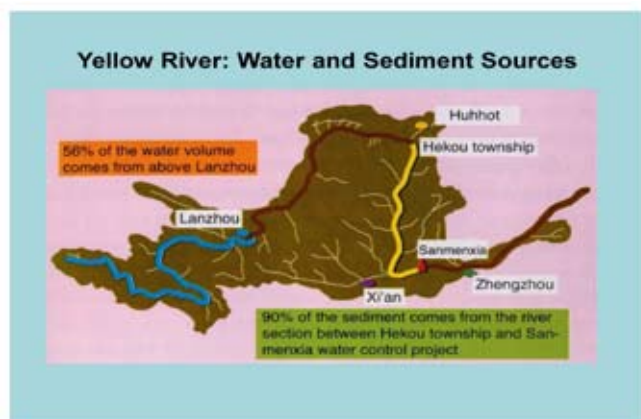
土砂河川は土砂含有量が多いという特殊性から、十分な土砂流送用水を確保することがそれを海まで押し流す基本条件となる。さもなければ、下流に堆積した土砂が河道の急速な上昇を招き、洪水の潜在的脅威が増すだけでなく、河川の生態系の健全性も脅かされることになる。典型的な土砂河川である黄河は、水量が少なく土砂が多く、水と土砂の発生源が異なり、水と土砂の年間分布が不均一で、断流現象が頻々に見られる等の特徴を持つ。黄河下流に入る河川水は粗い土砂の含有量が多く、水量と土砂がアンバランスであることから、河道の深刻な堆積、河床の上昇、河道の縮小を招くとともに、水利構造物の利用効率と耐用寿命にも影響を与え、下流の洪水防止、発電、灌漑、生態環境等に一連の悪影響が出ている。このため、黄河のような土砂河川について言うなら、土砂流送水要求は河川の生態環境水要求量の重要な構成部分であり、状況に応じてこれを優先的に確保すべきである。

現在よく用いられている生態環境水要求量の計算方法には歴史的な水文データを基礎とする7Q10法とTennant法、河道の水力学パラメータに基づく潤辺法やR2CROSS法、大量の水文、水化学実測データを特定の水生生物種の各成長段階における生物学情報と結び付け、流量の増減がその生息地に及ぼす影響について評価を行うIFIM法、さらに河川の生態系全体を視野に入れ、専門家の知識と経験を生かして総合研究を進めるBBM法及び全体研究法等がある。これらの方法は研究対象区域それ自体の特徴により、河川の土砂流送機能について十分な考慮が払われていない。この他、土砂流送用水に関する研究ではその水要求又は用水の計算、流送の効率向上及び河

道整備との関係といった面により多くの関心を寄せており、河川系の健全性という視点から土砂流送水要求と全体の生態環境水要求との関係を探ることが行われていない。黄河のような土砂河川については、土砂流送水要求と生態環境水要求の関係及び生態環境水要求の特徴を探ることが非常に重要である。

2 黄河下流における生態環境水要求の構造分析

黄河下流を例にとると、土砂河川の生態環境水要求についてその構造を分析することができる。

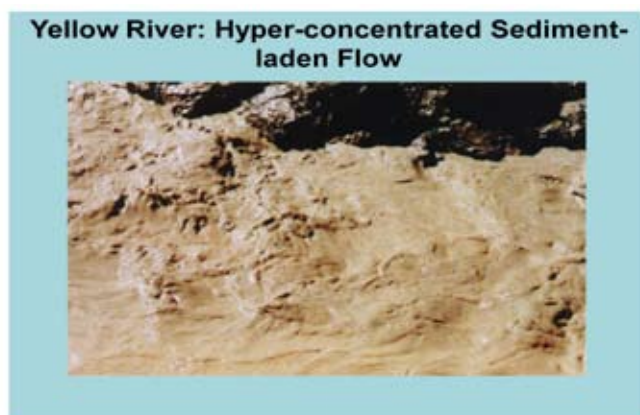


黄河流域の大部分は乾燥地帯及び半乾燥地帯にあり、水資源が全体的に乏しい。しかし、黄河は西北地区と華北地区の重要な水源として、流域の多くの都市と大型灌漑区域に水を供給する役割を担っている。1972年以降、黄河下流ではしばしば断流が発生しており、沿岸に多大な経済的損失を与えたばかりでなく、下流の生態環境もひどく損なわれた。黄河の健全な生命力を保ち、その水資源の持続可能な利用を実現するため、黄河下流の生態環境水要求に関する研究が広く重視されるようになった。

黄河は土砂が多いことで世界的に有名である。三門峡観測所での土砂流送量の平年値は16億t、実測した土砂含有量の平年値は35kg/m³に達し、その流送量と含有量の多さは世界に類を見ないものだ。大量の土砂を海に押し流すには十分な水量が必要となる。さもなければ、下流の河床に堆積した土砂が河道の縮小及び河床の上昇を招き、洪水の潜在的脅威を激化させる恐れがある。黄河の土砂河川としての際立つ特徴から、その下流の生態環境水要求における土砂流送の用水要求には独特のものがあ

り、これは世界の多くの河川と明らかに異なる点である。河川の最小生態環境水要求量は一定の原則と手順に従って確定する必要がある。具体的に言うなら、機能性を求める原則、時期を分けて考える原則、河区を分けて考える原則、主な機能を優先させる原則、効率最大化の原則、余効最小化の原則、多くの機能を調和させる原則、

全ての河区を最適化する原則等を含めることができる。関連作業の中で、黄河下流の最小生態環境水要求量について河区別の研究を進め、典型的な水と土砂の流入状態下における4つの主要河区の総合生態環境水要求量を確定した(表1に示す通り)。表には土砂流送の用水要求が総合生態環境水要求量に占める割合(%)も列挙されている。表からわかるように、各河区の土砂流送水要求量はいずれも総合生態環境水要求量の80%以上を占める。土砂流送の水量は黄河下流の生態環境水要求量の大部分を占めているのである。



水文 観測所	対象河区	増水期の最小流量 /m ³ s ⁻¹	渇水期の最小流量 /m ³ s ⁻¹	年総流出量 /10 ⁹ m ³	総流出量に占める 土砂流送水量の割合
花園口	三門峡—花園口	1,972.3	231.5	252.5	80.99%
高村	花園口—高村	2,321.9	234.3	289.3	83.20%
艾山	高村—艾山	2,190.5	158	259.9	87.38%
利津	艾山—利津	2,140.2	155.6	254.2	87.29%

●表1 黄河下流各河区の総合最小生態環境水要求量及び土砂流送水要求の総水量に占める割合

黄河下流の具体的な河道の状況に基づき、その最小生態環境水要求量を計算する時、主に考慮する河川機能は水質汚濁防止機能、土砂流送機能及び生態機能とすることができ、それぞれの機能を発揮させるには最低限の限界流量又は水量が必要となる。各機能用水の相互調整により単位水資源当たりの生態環境へのサービス最大化を実現することは考慮しないと的前提に立てば、黄河下流の各主要河区の増水期と渇水期における水質汚濁防止、土砂流送及び生態の限界水要求量を知ることができる。増水期の豊かな雨水は上・中流の黄土高原地域で土壌の大量浸食をもたらし、そのため、黄河下流各河区の土砂流送水要求量はいずれも200億m³以上に達する。一方、渇水期は土砂が比較的少ないが、それでも各河区の土砂流送水要求量は150億m³前後となる。土砂流送に比べると、水質汚濁防止と生態の水要求は明らかに少なく、一般に50億m³以下である。これからわかるように、黄河のような土砂河川について言うなら、河川の最小生態環境水要

求量を確保するには土砂流送の用水要求を満たすことがカギとなる。

以上は黄河下流各河区の典型的な水と土砂の流入状態における河川系の用水要求を機能別に列記したものである。歴史的な事実を見ると、1950年代以降、黄河下流の水と土砂の流入状態には大きな変化が起きており、およそ4種類の状態に区分することができる。即ち50年代に代表される三門峡ダム建設以前の「自然状態」、70年代に代表される三門峡ダム稼働後の「制御状態」、上・中流での土壤保全、取水工、ダム稼働と下流での水資源利用が相互に影響し合いながら下流で断流が頻繁に起きた80年代に代表される「複雑状態」、上・中流への水と土砂の流入が異常に多く、河道の堆積が深刻で、断流の深刻度が増した90年代に代表される「異常状態」である。それぞれの時間尺度又は決められた時間尺度のそれぞれの時期において、河川の生態環境水要求量は外部条件が変わったり、各機能の主導的役割が交互に変化することにより若干異なるものである。このため、黄河下流の生態環境水要求の中で土砂流送が大きなウェイトを占めていることに基づき、水と土砂の各種流入状態下における土砂流送水要求と生態環境水要求の相互関係をさらに詳しく分析する必要がある。

水と土砂の流入状態の違いに応じて、黄河下流各河区の増水期の土砂流送水要求が年間の生態環境水要求に占める割合を比較するなら、その割合はそれぞれの流入状態の間で著しい違いのあることがわかる。50年代に代表される自然状態は河川の水量が比較的豊かであり、同時に大量の土砂も運ばれてくる。そこでは土砂を海へ押し流す目的を達成するため、十分な土砂流送水量を確保することが必然的に要求される。一方、河川系のその他機能の用水要求は流出量に伴って変化する度合いが土砂流送機能よりもずっと小さく、このため、生態環境水要求量に占める土砂流送水要求量の割合は各種の状態の中で自然状態が最も高いものとなる。自然状態とは正反対に、90年代に代表される異常状態下では黄河下流の水資源が著しく不足し、断流が頻繁に発生しており、同時に、上流の土砂流入量も水流入量の減少に伴って減少することから、土砂流送水要求量が明らかに少なくなる。この時、河川系のその他機能の水要求量は生態環境水要求量に占める割合が若干増え、土砂流送水要求量の割合が低下する。その他、80年代に代表される複雑状態下での土砂流送水要求の割合は70年代に代表される制御状態下での割合よりも高くなる。これは80年代前期の黄河下流への豊富な河川水流入が多く土砂をもたらし、また、70年代の三門峡ダムの稼働方式が影響を与えたことによるものである。三門峡ダムは1973年末に第2次改造工事が完了した後、「清水を蓄え、泥水を排す」方式に従い、水と土砂の調節・制御による運用を開始し、増水期にたまった土砂の一部を増水期特に洪水期に集中して排出するよ

うになり、その結果、土砂流送の用水効率が高まり、全体的な用水要求が低下した。

土砂流送水要求の割合は水と土砂の状態に応じて変わるが、その状態がどう変化したとしても、土砂流送水要求量は一般に生態環境水要求量の70%以上を占める。このため、水と土砂の状態の変化は黄河の土砂河川としての特性を根本から変えるものでなく、土砂流送水要求は常に河川の生態環境水要求の中心となっている。

3 黄河下流の生態環境水要求の特徴

黄河下流の水と土砂の流入状況は増水期と増水期では非常に大きな違いがある。これは土砂流送水要求量の変化をもたらすだけでなく、各河区の総合生態環境水要求量を確定する上でも大きな影響を持ち、黄河下流の生態環境水要求の顕著な特徴となっている。

黄河下流の土砂流入は増水期の流入量が大部分を占める。表2にまとめた黄河下流各河区の状態別の年平均土砂流入量を見ると、異常状態でやや小さくなるのを除き、各河区の増水期の土砂流入量は一般に年間流入量の80%以上を占めている。増水期の土砂が十分に流送されなければ、大量の土砂が河道に堆積するのは必至であり、さらには河床が上昇を続けて「天井川」となり、洪水の脅威が増すことになる。このため、河川の生態系保護及び下流の洪水防止という安全面を考慮するなら、増水期の土砂流送水要求は必ず満たされなければならない。

	自然状態		制御状態		複雑状態		異常状態	
	土砂流入量 /10 ⁴ t	割合%	土砂流入量 /10 ⁴ t	割合%	土砂流入量 /10 ⁴ t	割合%	土砂流入量 /10 ⁴ t	割合%
三門峡—花園口	15.03	85.26	12.86	91.91	8.30	96.58	7.73	93.52
花園口—高村	13.34	85.47	10.54	85.29	6.71	86.49	6.09	83.79
高村—艾山	12.68	85.91	8.65	79.91	5.83	82.99	3.89	74.88
艾山—利津	9.98	82.76	7.79	79.98	6.01	84.93	3.95	75.13

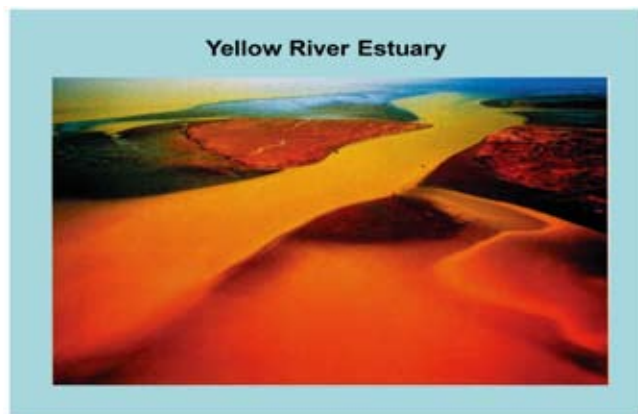
◎表2 状態別に見た黄河下流各河区の増水期の土砂流入量 及び年間流入量に占めるその割合

増水期において、河川は土砂流送機能を発揮する他、汚染物を希釈排出して一定の水質基準を満たすための十分な水量が河道になければならず、さらに河川の生態系を守るのにも一定の水量が必要である。しかし、水と土砂の流入状態がどうであれ、河川の水質汚濁防止水要求量と生態水要求量は土砂を流送するのに必要な水量よりもずっと少ない。増水期の土砂流送水要求が満たされる時、水流が土砂を海へ送り込む過程で、その他機能の用水要求も自動的に満たされる。このため、黄河下流各河区の増水期における総合生態環境水要求量は同期の土砂流送水要求量として確定することができる。増水期において、土砂含有量の少ない河川を研究対象とする外国の多くの生態環境水要求量の計算方法が黄河のような土砂河川に適していないのは明らかであり、これは黄河の生態環境水要求の研究が世界の多くの河川研究と根本的に

異なる点でもある。

渇水期の期間は増水期よりもずっと長い。しかし、表2からわかるように、黄河下流各河区の渇水期における土砂流入量は増水期よりも明らかに少なく、一般には年間流入量の20%を超えることがない。そうであるにも関わらず、土砂河川の特徴から、黄河下流各河区の渇水期における土砂流送の用水要求は依然としてその他機能の用水要求よりもずっと高い。増水期と同様に、渇水期の土砂流送の用水要求が満たされる時、その他機能の用水要求も自動的に満たされる。このため、理想的な状況下では黄河下流各河区の渇水期における総合生態環境水要求量も土砂流送水要求量と同等にすべきであり、この時、河川系の機能は最大限守られるのである。

しかし、黄河下流では水資源が不足しており、これを効率よく利用することが求められる。土砂流送用水量、即ち河川水の単位質量当たりの土砂を流送するのに必要な水量をその用水効率の具体的な現れとするなら、各河区で渇水期に1t当たりの土砂を流送するのに消費される水量は一般に増水期の水消費量の3倍以上であり、渇水期の水流の土砂流送効率は増水期よりもずっと低いことになる。黄河下流は渇水期の土砂流入量が少なく、且つ土砂流送の効率が低いため、この時期においてもなお土砂流送を河川系の主機能とし、河道の総合生態環境水要求量を確定するなら、黄河下流の水資源の深刻な「浪費」を招き、黄河の水資源配分を難しくすることになる。以上の分析を総合すると、黄河下流の渇水期の総合生態環境水要求量を確定する時は、河川の汚染防止機能と生態機能の用水要求を優先的に考慮すべきである。黄河下流の汚染防止機能と生態機能は切り離すことができず、且つ渇水期におけるその重要度は等しいものであり、この2つの機能の最低限の要求を調和させるには、両者の必要とする限界流量の中で大きい方の値を取ればよい。黄河の水資源状況及び土砂流送の時間分布の特徴から、黄河下流の渇水期における河川系の主機能を選択し、総合土砂流送水要求量を確定することができ、渇水期に土砂の一部を暫時堆積させることを認めるなら、下流のために100億m³前後の水資源を節約することができる。



河川系の主機能用水を時期別に最適選択すると、黄河下流各河区の総合生態環境水要求は増水期には河川の土砂流送水要求を主とし、渇水期には水質汚濁防止水要求及び生態水要求を主としたものになる。ここから最終的に確定される年間の総合生態環境水要求量は総合土砂流送水要求量と汚染防止/生態水要求量の間にある。このようにすれば、河川の水質汚濁防止水要求と生態水要求は年間を通じて完全に満たされ、増水期に流入する土砂も完全に流送することができる。渇水期に土砂が一部堆積されるが、その堆積量は年間土砂流入量のごく一部を占めるにすぎない。表3は渇水期の土砂流送の用水要求には目をつぶることで節約できる土砂流送用水量及びこれによってもたらされる土砂堆積の年間土砂流送量に占める割合を示したものである。各河区で毎年節約できる土砂流送用水量はいずれも100億m³以上（三门峡－花園口河区は若干少ない）であることがわかり、その節約される水量は水資源の乏しい黄河下流にとって重要な意義を持つ。

	三门峡－花園口		花園口－高村		高村－艾山		艾山－利津	
	節約水量 /10 ⁸ m ³	堆積割合 %	節約水量 /10 ⁸ m ³	堆積割合 %	節約水量 /10 ⁸ m ³	堆積割合 %	節約水量 /10 ⁸ m ³	堆積割合 %
自然状態	124.36	10.81	140.89	11.70	143.72	11.31	153.41	11.80
制御状態	95.56	9.87	118.97	13.85	130.96	16.33	124.10	13.00
復雑状態	89.62	7.58	127.79	12.42	128.97	12.88	118.28	9.08
異常状態	68.71	8.79	106.36	16.98	135.79	24.20	100.32	16.29

表3 渇水期の部分的な土砂堆積を認めることで節約できる土砂流送水量及び年間土砂流送量に占める堆積量の割合

渇水期の土砂流送用水が確保されなければ、土砂の一部が堆積されることになる。しかし、前記の検討からわかるように、土砂河川は増水期の土砂流送効率が渇水期よりもずっと高く、年間を通して見るなら、多目的ダムを利用して水と土砂の調節・制御を行い、渇水期に流入した土砂を増水期に集中して排出することができる。それによって渇水期の土砂流送要求が満たされ、渇水期に流入した土砂の流送効率も高まるのであり、河道の堆積を減らし、水資源の利用効率を高めるという目的が達成される。同時に、多目的ダムの稼働が下流に入り込む水と土砂の条件を変えた。関連の研究と実践が示しているように、ダムの放流水の土砂含有量、流量と放流時間を制御すれば、理論的には土砂流送の用水量を制御することができ、水と土砂の適切な条件下で、その用水効率が大幅に向上する。土砂河川の生態環境水要求の主要部分は土砂流送水要求であり、土砂流送の用水効率向上は生態環境の用水効率向上にもつながる。このため、ダムで水と土砂を調節すれば、土砂河川の生態環境水要求量を減らし、その用水効率を高めることができる。

土砂河川の特徴は河川系の機能における土砂流送機能の特殊な地位を決定づけている。土砂流送の用水要求が独特なものであることから、河川の生態環境水要求量を確定する時は通常の計算方法をそのまま当てはめること

ができない。黄河下流の生態環境水要求を例に挙げて分析すると、以下の結論を得ることができる。

- (1) 土砂河川で土砂を流送するには大量の水資源を消費する必要がある。土砂流送の用水要求はその他機能の用水要求よりもずっと高く、その水要求は生態環境水要求の大部分を占めている。
- (2) 増水期の土砂流送水要求が満たされる時、年間土砂の大部分を流送できるだけでなく、河川のその他機能の用水要求も自動的に満たされる。この時の生態環境水要求量は土砂流送水要求量に等しい。
- (3) 渇水期の土砂流送水要求が満たされる時、同じように河川のその他機能の用水要求を満たすことができる。しかし、土砂流送の効率の低さから水資源が大

量に浪費されることになる。水資源の高効率利用という視点から考えるなら、この時は土砂流送機能を河川系の主機能とすべきでなく、生態環境水要求量はその他機能の水要求量のうち大きい方の値に合致させるべきである。

- (4) 土砂河川は増水期の土砂流送効率が渇水期よりもずっと高い。このため、多目的ダムを利用して調節・制御を行い、渇水期に流入した土砂を増水期に集中して流送し、その流送効率を高めることができ、河道の堆積を減らし、生態環境水要求量を少なくし、水資源の利用効率を高めるという目的が達成される。

窒素沈着が森林生態系の土壌含有炭素に与える影響

•Profile•



韓士杰 Han Shijie ●中国科学院瀋陽生態研究所 研究員

中国科学院二級研究員、博士研究生指導教授、吉林長白山森林生態系国家野外科学観測研究展チームリーダー。1956年5月生、東北林業大学生態学博士。1978-1997、東北林業大学物理学科において助教授、講師、副教授を歴任。1990、主に森林生態系界面生態学と炭素循環科学の研究に従事。1998-2001、中国科学院百人計画(A)選定者。国家百千万人材プロジェクト第1期選定者。國務院政府手当獲得者。専門書は葉面界面生態学、単著、東北林業大学出版社、1996。中国の陸上生態系における炭素循環の生物地球化学過程、共著、中国科学出版社、2008。ここ10年に発表した論文は百余編、その内SCI 20余編。多くの国家級科学研究プロジェクトを主宰。

共著者：鄧小文

概要：

森林の土壌含有炭素は陸上生態系の含有炭素の重要構成部分であり、地球の炭素バランスを保つのに重要な意義を持っている。しかし、常に深刻化している地球の窒素沈着は森林生態系中の炭素元素の地球的化学循環の過程を改変し、森林の土壌含有炭素量の変化を引き起こす可能性がある。本文では、森林の土壌炭素収支の観点から、窒素沈着が森林生態系の土壌含有炭素に与える影響の複雑な過程を、落物分解、細根サイクル、土壌呼吸、土壌可溶性有機炭素の消失の4つの相対的に独立した過程に分類した。さらに中国内外の研究状況を総合し、これに関して簡単な論評を加えて現在の研究の不足を指摘し、本研究領域の発展方向を検討した。

1. 序言

土壌は陸上の生態系の含有炭素の最大構成部分であり、地球の土壌が有機質と植物残滓の形で貯蔵している炭素量は植生が貯蔵している炭素量の2倍以上である。さらに森林の土壌は陸上の土壌含有炭素の45%を占めることから、森林の土壌含有炭素は地球の炭素バランス研究において重要な意味を持つ。その森林の土壌含有炭素の変化に影響を与える数多くの要素の中で、窒素が徐々に幅広い関心を集め始めている。窒素は植物が必ず必要とする大量元素の一つであり、植物体内の多くの重要な有機化合物の組成元素である。その他の栄養元素とともに主に母質の風化によってさまざまなものを提供し、自然状態では植物の大気窒素固定過程において土壌の窒素が主な供給源となる。温帯森林の生物の窒素需要量は通常土壌有機窒素鉱化速度よりも多いため、温帯森林の生態系は一般的に窒素欠乏型と表現される。しかし、過去1世紀の化石燃料の使用のため化学肥料生産工業や農牧業が急速に発展し、人類の活動が大気に排出する含窒素化合物が日に日に増大した結果、大気の乾湿によって陸上生態系に進入沈着する含窒素化合物も大量に増加した。統計によると地球の窒素沈着量は1990年には103Tga～、すなわち1860年の31.6Tgaの3倍であり、2050年には195Tgaになることが予想されているという。また、アメ

リカ東部や西ヨーロッパの工業地域では、大気中の窒素の沈着量は工業革命前の10倍以上にもなるという。人間が原因となって引き起こされる窒素の流入は、すでに生態系の窒素の重要供給源となっているのである。そして、大気から森林生態系に進入沈着した外来窒素はそのごく一部分が植物によって利用されるだけであり、大部分は土壌に固定される。この窒素は主にNO、NO⁻、NHなどの形で存在し、土壌微生物によってきわめて利用されやすくまた土壌中の有機物・塩基のイオンときわめて結びつきやすいため、直接・間接的に土壌炭素の流入流出過程、すなわち森林の土壌含有炭素生産に影響を与えることになる。窒素沈着の有無またはその程度が土壌含有炭素生産に影響を与えるということは、すでに地球の変化と窒素沈着の研究において避けることのできない問題なのである。

2. 窒素沈着が土壌含有炭素に与える影響に関する研究史および研究の現状

1980年代初め、ヨーロッパと北アメリカの工業地域で窒素沈着により引き起こされる陸上生態系の退化と水系富栄養化などの生態系「窒素飽和」問題が現れたことにより、研究者は窒素沈着が引き起こす生態系の退化の問題について研究を開始することになった。そして80年代末から90年代初期にかけて観測レベルが高まり観測範囲が常に拡大するなかで、研究者はしだいに「窒素飽和」は限定された一地域の問題ではなく地球規模の環境問題であることを認識するようになった。このような状況で長期的な定位研究が開始され、また研究ネットワークが形成されていくとともに組織的で大規模な国家や地域を超えた合同研究も開始されて徐々に盛んになっていった。例えばヨーロッパ共同体の資金援助の下に1980年代末から1990年代中ごろにかけて、ヨーロッパでは窒素沈着が森林生態系に与える影響に関する国際的な研究計画が2回にわたって行われた。NITREX(Nitrogen Saturation Experiments)とEXMAN(Experiment ~ Manipulation of Forest Ecosystems in Europe)がそれである。アメリカでは1988年にマサチューセッツ(Massachusetts)のハー

バード・フォレスト(Harvard Forest)が創設した窒素沈着長期模擬窒素沈着(外加窒)試験場がすでに20年近い歴史を持っており、アメリカ全土を覆う窒素沈着観測ネットワークを設立し、さらに完璧を期している。ロッキー山脈(Rocky Mountains)、アパラチア山地(Appalachian Highland)、アラスカツンドラ(Alaskan tundra)など窒素沈着に敏感な山地やツンドラの生態系は、すでに窒素沈着研究の重点区域になっている。

地球の変化と研究の深化にともない、研究者は窒素沈着の環境効果について研究する際にはその生態系の含有炭素に対する影響について検討し始め、生態系の含有炭素評価のなかで不確定な土壤含有炭素を徐々に研究の重点とするようになっていった。現在まで窒素沈着が土壤含有炭素に与える影響について本格的に扱った研究は現れていないが、多くの先行研究が等しく項目を割いて窒素沈着の土壤含有炭素の何らかの過程について言及している。例えば、Hagedornらはオープンコンテナ技術を応用してブナ(*Fagus sylvatica* L.)とオウシュウトウヒ(*Picea abies* Karst)の2種類の森林タイプの土壤含有炭素状態をシュミレーションしたのであるが、その異なる窒素沈着レベルの変化の過程において窒素沈着が土壤の腐植質の分解速度を落とし土壤含有炭素量を増加させることを発見した。Makipaaらはモデルを利用してフィンランド南部のヨーロッパアカマツ(*Pinus sylvestris*)林が気候の変化と窒素沈着という条件の下で含有炭素を変化させる状況をシュミレーションし、窒素沈着という条件のみを考慮した場合、内部に土壤含有炭素を含む生態系の含有炭素は11%増加することを発見した。Nefらは同位素技術を用いてコロラド(Colorado)高原ツンドラ地帯の土壤含有炭素を研究し、窒素流入は土壤の軽組炭素(周期10年前後)の分解過程を加速し重組炭素(周期数十年から1世紀)の分解過程を抑制することから、総合的には窒素沈着が土壤含有炭素に与える影響は大きくないということを発見した。しかし、20年の長期にもわたって行われてきたアラスカツンドラの窒素増加研究は、窒素増加は地表の生物量を2倍に増加させるが、土壤含有炭素の変化だけを考慮した場合長期的な窒素増加はツンドラの生態系を2kgC/m²損失させるということを示した。総じてこれらの研究は単に土壤炭素の流出過程や比較的静態的な土壤含有炭素について検討したにすぎず、窒素が土壤含有炭素に与える影響として作用するメカニズムについて不明確に指摘したにすぎないといえるかもしれない。これらの研究成果はさらに一歩確認を進める必要があるのである。

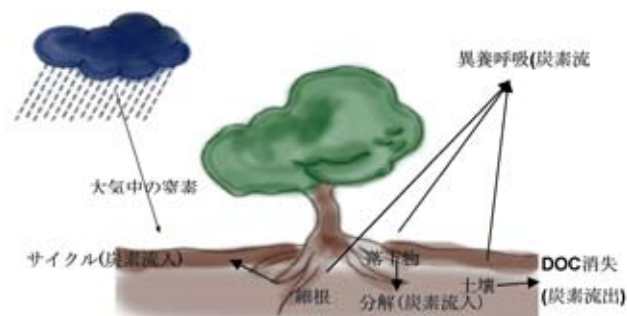
3. 窒素沈着が森林生態系の土壤含有炭素に与える影響の過程

3.1 森林土壤含有炭素に影響を与える主な過程

土壤は多様で複雑な一つのシステムであり、土壤含

有炭素の変化は落下物分解、細根サイクル、土壤呼吸などさまざまな要因が相互に関係し影響しあっている生物化学過程である。既存の文献を総合してみると窒素沈着が土壤含有炭素に与える影響の研究には理論上、技術上のあいまいさがあり、ほとんどの研究はわずかに土壤含有炭素に影響を与える何らかの過程、または何らかの複数の過程について言及しているのみであるため、土壤含有炭素の変化の真の過程を客観的に描写することは難しい。いかにして窒素沈着が土壤含有炭素に与える影響を全面的に分析するか、そしていかに複雑な過程のメカニズムに関わり過ぎないかということが、目下解決の急がれる問題なのである。

炭素収支(carbon budget)法とは地球の生態系の含有炭素を研究する主な方法であり、主に地球の各タイプの生態系の源状況と集合状況に依存して総合的に地球の含有炭素の動態的变化状況を導き出すものである。森林土壤含有炭素は一つの動態的な変化の過程であるが、地球規模の土壤含有炭素に関する研究方法を参考にし土壤炭素収支状況に基づいて、窒素沈着が森林生態系土壤含有炭素に与える影響についての複雑な過程を4つの相対的に独立した過程に分けることができる(図1)。落下物分解と細根サイクル(土壤炭素の流入)、土壤呼吸と土壤可溶性有機炭素(DOC)の減少(土壤炭素流出)である。窒素沈着が森林土壤含有炭素に与える影響は、これら4つの過程の研究を通して総合的に導き出すことができる。



◎図1 土壤含有炭素の変化に影響を与える主な経路

3.2 窒素沈着が落下物分解過程に与える影響

森林の落下物分解は森林の土壤の性質と植物・微生物への養分供給に重要な影響を与える。落下物分解過程の腐植化過程は森林の土壤含有炭素の重要な流入過程の一つである。窒素沈着は落下物の性質、分解過程、落下量によって土壤含有炭素に影響を与える可能性がある。窒素沈着が落下物の落下量に与える影響の程度は、主に樹木の種類と養分条件によって決定される。窒素が不足しているところでは窒素流入は植物の生長を促進し、落下量を増加させる。しかし、すでに窒素が飽和状態となっているところでは長期的な窒素の流入は森林の退化と森林落下量の減少を引き起こす可能性があるのである。

Magillらの研究は、外源窒素の流入が比較的高い条件の下では針葉樹の落下量ははっきりと増加するが、広葉樹にははっきりとした変化が現れないということを明らかにした。Erlssonらの窒素が不足した状態のオウシュウトウヒモデル地域に関する研究は、長期的な窒素沈着は流入地表の落下物を増加させることを明らかにした。Zakらの北方広葉樹林に関する研究は、窒素沈着が森林落下物の生産量に与える影響は大きくないとみなした。

落下物の化学成分分析により、長期的に窒素沈着または窒素肥料の施用を受けた森林の凋落物の窒素含有量は、妨害を受けなかった生態系に比べはっきりと高いことが明らかになった。例えば、BergkystとFolkessonがスウェーデン南部のブナ林実験地で行った研究は、窒素施肥強度を66kgN・ha⁻¹強度と198kgN・ha⁻¹強度に分けた実験地での落下物の窒素含有量は12.5mg/gと13.3mg/gに分かれ、コントロールモデル地域(11.5mg/g)とは顕著な差異が生じるということを発見した。Vestgardenのヨーロッパアカマツ落下物の早期段階に関する研究は、内源窒素であれ外源窒素であれ窒素はすべて落下物の分解を促進するというのを発見した。Bergらの研究は、落下物分解の初期段階では分解速度と窒素含有量は線形相関的であり、この段階は落下物中の総流出物質が26%～36%にいたるまで持続するというのを発見した。この段階では主に水溶性物質と分解しやすい非木質性繊維素が分解され、窒素元素含有量はその分解過程を刺激し加速したものとBergらは考えている。分解過程の進行にともなって落下物中比較的分解しにくい木質素の含有量がしだいに増加し、落下物分解は後期段階に入る。この段階では窒素元素は落下物分解に抑制作用を現すが、これは主に窒素元素と木質素が合体反応を進め、さらに分解しにくい腐植質を生成するためである。小分子窒素の豊富な環境においては白腐菌は木質素を分解する酵素を合成できず、落下物分解過程を抑制した。落下物後期分解は落下物分解過程において決定的な作用を及ぼすため、窒素沈着が土壤の腐植質の分解速度を落とし、それゆえに土壤炭素の流入を増加させると考える研究者もいる。しかし、実験時間が短いことと観測モデル地間の差異から、この点は現在学会で承認を得るには至っていない。

3.3 窒素沈着が細根サイクル過程に与える影響

細根サイクルは土壤含有炭素の重要な供給源の一つであり、細根サイクルによって温帯森林土壤に入る有機炭素は土壤炭素総流入量の14.0%～86.8%を占め、それ以外の状況でもほとんどの場合40%を占める。窒素沈着は細根化学成分、生長量、サイクル速度の相違によって細根サイクル過程に影響を与える可能性がある。外源窒素流入は細根の化学成分を変化させる可能性があるが、ある研究は窒素沈着強度の比較的高いモデル地では細根の窒素元素含有量と酸溶性有機質含有量は増加することを

発見した。しかし、窒素沈着が細根生長量とサイクル速度に与える影響に関する研究では、技法が制限されているため研究結果の不確定性はいまだ比較的大きい。伝統的な生物量連続サンプリング法(sequential sampling of fine root biomass)が現在細根研究で最も一般的に使われている方法であるが、この方法には統計学上比較的大きな欠陥がある。一方では細根を重複してサンプリングするため時間と空間の差異を混合してしまい、細根の生長量を高く評価しがちであり、他方ではこの方法は細根の生長と死亡のシンクロニーを軽視してしまい、細根の生長量を低く評価してしまう可能性があるのである。そこで、この方法を利用して窒素沈着が細根サイクルに与える影響に関して研究を進めると、その結果として不確定性に行き着いてしまう。ある研究は細根の生長量と生物量は窒素流入量の上昇に比例して増加するといい、同じ方法を利用した別の研究は正反対の結果を導き出すのである。Pregitzerらの生物量を利用した研究は、外源窒素流入は細根のサイクル速度を低下させることを発見した。さて、炭素・窒素収支法(C/N budget)は細根サイクルを研究する差異によく用いられるもう一つの方法であるが、これもまた同様に多くの不確定性を備えている。窒素平衡法は細根の生長が消耗する窒素は土壤の窒素鉱化総量と植物の地上部分の窒素を吸収量との差であると考え、これは雨水流出によって流出する窒素量と大気窒素の流入を軽視したものである。窒素沈着が森林生態系の土壤含有炭素に与える影響について、1625炭素平衡法は仮設土壤の含有炭素は変わらず、土壤落下物炭素流入と土壤呼吸炭素流出のデータを利用して細根生長と呼吸が消耗する炭素を計算する。炭素・窒素平衡法による研究は外源窒素の流入は土壤の現存細根生物量を低下させるにもかかわらず、細根総生長量をはっきりと高め、細根のサイクル速度を加速させると考えている。以上をまとめると、細根サイクルの炭素流入過程に関する研究は土壤含有炭素の変化に影響を与える4つの独立した過程のなかの比較的弱い部分であり、理論であれ研究方法であれ足りないところが多く、さらなる研究の発展が必要であると言える。

3.4 窒素沈着が土壤呼吸に与える影響

土壤呼吸とは土壤含有炭素中の炭素の主な流出形式であり、土壤、表層落下物、土壤根系を含むすべての地下部分での呼吸を指す。落下物呼吸とは落下物が分解する速度を表す指標の一つであり、窒素沈着が落下物呼吸に与える影響は基本的にそれが落下物分解に与える影響と一致する。すなわち、落下物分解初期には窒素流入は落下物呼吸速度を促進し、分解後期には窒素は落下物呼吸に対して抑制作用を起こすのである。窒素流入が土壤呼吸に対し抑制作用を持つことは明白である。Franklinらがスウェーデン北部の樹齢40年の針葉樹林モデル地に20年窒素を施肥した研究は、窒素施肥モデル地の土壤呼吸総

量は対照地と比べ40%低いことを明らかにした。MichelとMatznerが行った窒素沈着強度の異なる15の地区のオウシュウトウヒ林の土壌に関する実験室研究と、Bowdenらがハーバード窒素実感モデル地で行った研究も類似の結果にいたった。これらの研究は、細根呼吸は土壌呼吸の10%~90%を占め、窒素流入が細根呼吸に対して明白な促進作用を持つことを明らかにしている。Burtonらは北アメリカ大陸を横断して気候の異なる10個のさまざまな林型のモデル地を研究し、細根呼吸と大気窒素流入量ははっきりと正の相関関係を示すことを発見した。Zoggらはミシガン州の温度と窒素地若レベルの異なる4つのサトウカエデ(*Acer saccharum*)モデル地に関して研究を行い、窒素流入は細根の呼吸速度を速めることを発見した。事実上窒素沈着が林地地下の成分の呼吸過程に与える影響は同時進行的であるため、もっとも適合した方法を探し出し、窒素沈着が地下の各部分の呼吸に与える影響をその総呼吸量への影響から分離するかということが、土壌呼吸炭素流出過程に関する研究の鍵となるであろう。

3.5 窒素沈着が土壌の可能溶性有機炭(DOC)消失に与える影響

DOCは土壌炭素元素の重要な存在形態であり、主に落下物・腐植質分解と細根分泌によって生産され、土壌微生物代謝の主なエネルギー供給源であると考えられている。一定の条件の下で土壌中のDOCの一部は地下または地表雨水流出によって流出し、地表水に流入する可能性がある。この部分は炭素総量に比べて小さく安定性も劣っているため、土壌含有炭素の計算において通常軽視され広く注意されることはない。最近の研究の報道によるとある地区を長期的に観測した結果水中DOC含有量が増加の趨勢にあることを発見したというが、Findlayはこれは窒素沈着が土壌のDOCを大量に流出させたためである可能性があると考えている。つまり、窒素沈着が土壌のDOC生産および消失に与える影響に関する研究はまだまだ多くなく、理論と実験結果の両面で多くの論争が存在しているのである。ある研究者の仮説では窒素沈着が土壌の木質素を不完全分解に導き、土壌のDOC含有量を増加させている可能性があるとなっており、一群の研究もこの点を裏付けているようである。しかし、窒素元素は土壌腐植質の安定性の増加と細菌生長の促進という2つのルートによって土壌のDOC含有量を低下させると考える別の研究者もいて、この論法を支持する一群の研究結果

もある。しかし、窒素沈着が土壌のDOCを消失させる過程とDOCが土壌の転移転化規律に与える影響について相互に関連させた研究は今のところ報道されていない。過量のDOC消失が土壌含有炭素と水系環境に及ぼしうる負の影響はいかなるものか、窒素沈着が消失の主導要因なのか、そしてこれは消失過程にいかなる影響を及ぼすのか。これらの問題は現在では明らかにされていない。

4. 結語

以上の内容をまとめると、窒素沈着が森林土壌の含有炭素の流入(出)過程に与える影響に関する研究はバランスを欠きながら進展してきたということが言えるであろう。その中で落下物流入と土壌呼吸流出の過程に関する研究は比較的深まり、ある程度の共通理解がすでに形成されている。しかし、細根流出と土壌有機炭素消失の2つの過程に対する研究はいまだ模索段階であり、理論上、方法上のさらなる進展が求められている。システムの角度から窒素沈着が引き起こす各炭素過程間の物質とエネルギーの流動変化に関しては、それらの間の結合モデル研究がいまだ初歩段階にとどまっている。以下の問題に対する総合分析もさらなる研究が求められている。まず窒素沈着が落下物流入過程に与える長期的な影響に関しであるが、落下物分解は一つの長期的な過程であり、窒素沈着は落下物分解に影響を与えるだけでなく植物生長と落下量にも影響を与えることから、窒素が落下物流入過程に与える影響に関しても長期的な観測が求められる。次に細根は土壌含有炭素流入形態として公認されているが、現有の細根サイクル研究の方法の限界により窒素沈着が細根輸入過程に与える影響を正確に評価することは困難である。窒素沈着が細根流入過程に与える影響に関する研究については、方法的刷新に重点を置かねばならないであろう。また、ある研究は窒素流入が細根と落下物分解の初期呼吸を促進し、土壌と落下物分解の後期呼吸を抑制しうることを明らかにしている。このような抑制・促進作用は同時進行のものであり、窒素沈着が土壌呼吸に与える影響をこのような複雑な過程から分離する方法は、土壌呼吸炭素流出過程において解決が急がれる問題である。最後に窒素沈着が森林土壌のDOC生産・消失過程に何らかの影響を与えうる可能性に関しては、この影響はどのように引き起こされるのか、土壌の類型や森林の水文とはどのような特徴を持った関係にあるのかなども現在の研究目標である。

日本における外来植物の実態とそのリスク評価

•Profile•



藤井 義晴 ふじい・よしはる ●(独) 農業環境技術研究所生物多様性研究領域 外来生物生態影響リサーチプロジェクトリーダー

独立行政法人農業環境技術研究所上席研究員外来生物生態影響リサーチプロジェクトリーダー。1955年1月18日生まれ。1981年 京都大学大学院農学研究科博士後期課程中退、食品工学専攻博士（農学）。昭和52年農林水産省農業技術研究所、四国農業試験場を経て、平成7年農業環境技術研究所他感物質研究室長、平成17年より現職、2005-2008まで国際アレロパシー学会会長、著書「アレロパシー-他感物質の作用と利用」、2009年度文部科学大臣賞（研究部門）受賞。

1. 研究の背景

貿易や人間の世界的な交流の増加に伴い、外来植物の侵入・導入が増加している。これらの中には蔓延して人間の健康や農業に直接被害を与えるだけでなく、日本固有の生物多様性あるいは生態系に対する攪乱要因にもなるものがあると懸念される。侵略的な外来植物の防除対策は世界的な緊急課題であり、日本においても外来生物による生態系影響の排除を目的として、2004年6月に「特定外来生物による生態系等に係る被害の防止に関する法律」（略称：外来生物法）が公布され2005年6月から施行された。日本は独自の生態系を有する島国であり固有植物種が多い。日本の維管束植物の固有率は36%であり、インドネシアの60%、中国の56%よりは低い、1%以下のドイツやイギリス、8%の韓国に比べて高く、世界でも固有植物の多い国のひとつである。

外来生物法では、「特定外来生物」を指定し、飼育、栽培、保管、運搬、輸入、譲渡、引き渡し、販売、野外へ放つこと、植えること、および播くことなどを原則禁止している。違反すると、個人の場合懲役3年以下もしくは300万円以下の罰金、法人の場合1億円以下の罰金という重い罰則が課せられる。植物では現在二次指定まで行われ、合計12種が挙げられている。表1に特定外来生物に指定された植物のリストを示した。

外来生物法では、この法律による規制の範囲内ではないものの、一部の外来生物については「取り扱いに注意が必要である」との観点から、「要注意外来生物」のリストを作成・公表して注意を喚起している。要注意外来生物は、「被害の恐れはあるものの科学的な知見が不足しているため現在は危険性が適正に判定できない」、とされているものである。

そこで、外来生物法に貢献する目的で、科学技術振興機構（JST）の科学技術振興調整費重要課題解決型研究において、「外来植物のリスク評価と蔓延防止策」の課題名で2005年7月から2008年3月まで外来植物の実態とリスク評価に関する研究を実施した。特定外来植物と要注意外来植物の実態、および将来導入される外来植物のリスクとその防除に関する研究を実施した。本研究は、独

立行政法人農業環境技術研究所が研究代表となって実施し、独立行政法人農業・食品産業技術研究機構（畜産草地研究所と近畿中国四国農業研究センター）、国立大学法人岡山大学、雪印種苗株式会社（千葉研究農場、北海道研究農場）、財団法人植物化学調節剤研究協会が参画した。

2. 外来植物の実態

2-1) 外来植物蔓延の実態把握

蔓延実態を、全国レベル、流域レベル、群落～遺伝子レベルの3段階で評価した。全国レベルの評価は、農林水産省農村振興局の農業農村環境情報整備調査データ（平成14-17年）を用い、農環研で開発したRuLIS（景観調査情報システム）により外来植物の蔓延実態を調査した。全国規模で蔓延している種、気候的な制限のある種、分布拡大傾向にある種が明らかになった。ナガエツルノゲイトウが今後分布を拡大する可能性のある要注意種であることが判明した。流域レベルでは、RuLISを用いた解析で群落タイプ別の出現頻度を解析することができ、A)高被度で優占する危険植物として、コカナダモ、ホテイアオイ、ナガエツルノゲイトウ等、B)広範囲に生育する危険植物として、ナガエツルノゲイトウ、セイタカアワダチソウ、コセンダングサ、アメリカセンダングサ等、C)特定立地に結びつき生育する危険植物として、コカナダモ、アメリカミズキンバイ、コセンダングサ等を選定した。外来植物が侵入しやすい場所は、高度に圃場整備された水田の放棄地、新たに整備された水路、河川、客土された畑地の放棄地等の人間による土地改変や施肥などの攪乱を受けた場所であることが判明した。これらの研究は主に農環研で実施した。

2-2) 外来植物の非意図的な侵入

輸入穀物への種子混入による経路を調査し、輸入穀物にはアキノエノコログサ、セイバンモロコシ、イチビ、オオクサキビ、ヒルガオ類が含まれること、特に輸入コムギには除草剤抵抗性雑草が含まれる可能性があることが判明した。年間2000万トンの輸入穀物には平均で0.2%の雑草種子が混入しており、最大の非意図的な侵入経路であることが判明した。この研究は主に農環研で実施した。

2-3) 外来牧草類の侵入実態の評価

外来牧草類の非意図的導入の侵入経路の評価については、分子マーカーを用いた集団遺伝学的手法により、蔓延集団と各侵入経路との関連性を明らかにした。この研究は主に畜産草地研究所と農環研で実施した。

2-4) 水生外来植物の実態

現在指定されている特定外来植物12種のうち8種は水生植物と多い。また、水系であり除草剤の利用が制限されるので駆除にも特殊な技術が必要である。また、水生植物の繁茂は西日本に多いので、これまで研究の進んでいる岡山県南部の水系を中心に水生植物の外来種と自生種の繁茂状況を調査した。また、駆除法に役立てるため、冬季から春季に生態的な防除法を考案し、生物多様性への影響調査を行った。この研究は主に岡山大学で実施した。

2-5) メリケンカルカヤの侵入実態と分布拡大状況の評価

既に侵入した外来植物のリスク評価法を策定するため、既に侵入した植物の侵入経路の特定と定着・分布拡大予測を行った。とくに、アメリカ合衆国でアレロパシーによる生態系への影響が報告され、日本に近縁種がなく、外見から区別が容易な外来植物であるメリケンカルカヤに対象を絞り、侵入途上にある岡山県内を詳細に調査するとともに、全国調査を実施して侵入実態を明らかにするとともに、分布拡大状況を明らかにした。この研究は主に岡山大学で実施した。

2-6) 外来種タンポポ類（セイヨウタンポポ）の実態

セイヨウタンポポは、ニホンタンポポの遺伝子を取り込んで雑種を形成し、一見セイヨウタンポポの9割が雑種であること、雑種は定着能が高く日本の環境に適応する進化をしていることが明らかとなった。この研究は主に農環研で実施した。

3. 外来植物のリスク評価用データベースの開発

3-1) すでに日本に侵入している外来植物のリスク評価用データベースの開発

現在まで日本に非意図的に侵入した外来植物と、意図的に導入した植物が逸出・帰化状態になった種類を加えた帰化植物一覧表を作成し、渡来年代などを明らかにした。外来植物の種子を収集し保存する事業を行い、標本、種子標本のデータベースを構築し、輸入穀物などに含まれる雑草種子を判別するためのデータベースを構築した。検索機能がついた64科554種の植物情報をもつ世界屈指のデータベースとなった。この研究は主に岡山大学で実施した。

3-2) 新たに導入される外来植物のリスク評価用データベースの開発

新たに園芸や牧草として導入する外来植物のリスクを評価し水際での防除に役立てるため、海外より緑化や園

芸の目的で新たに導入する可能性のある植物を購入し、これらを播種し、その特性を調査した。とくにその生育特性や日本での夏や冬越しの状況を栽培試験によって把握し、これらを記載したデータベースを作成した。この研究は雪印種苗が農環研と協力しながら実施した。

3-3) 外来植物のアレロパシー活性評価用データベースの開発

特定外来生物、要注意外来生物に新たに導入・侵入する可能性のある外来植物を加えた合計800種の外来植物のアレロパシー（他感作用）活性を3つの生物検定法で検定しデータベースを作成した。その結果、特定外来生物に指定されている植物はアレロパシー活性が強いことが明らかになった。アレロパシーの強い植物80種において、すでに報告のあるアレロケミカルをデータベース化した。新たに、アレロケミカルとして、アカギからL-酒石酸を、コンフリーからロスマリン酸を、ギンネムからL-モシシンを同定した。

4. 外来植物のリスク評価手法の開発

4-1) オーストラリア方式の雑草リスク評価法を元にした日本型リスク評価法の開発

既に定着している外来植物の防除判定ならびに新たに導入しようとする外来植物の導入可否判定を適切に行うために、外来植物の生態系影響リスク評価法を開発した。既往の知見を基に、外来植物の生態系影響リスク（在来植物・希少種への影響、近縁種との交雑性、競合性、人畜加害性等）を類型的に明らかにしようとした。オーストラリアで開発された未導入植物の雑草性リスクを評価する手法を改良し、49の評価項目からなる日本型の評価法を完成させた。この研究は主に農環研で実施した。

4-2) FAO方式の雑草リスク評価法を元にした日本型リスク評価法の開発

13項目の評価項目からなるFAO方式の雑草性評価法において、これらリスクの発現に関連する植物の生態的特性（定着性、分布拡大能力、種子生産性、栄養生殖性等）を整理し、特性ごとにリスク発現にかかわる寄与率を係数化して外来植物のリスク評価項目を提示することを試みた。さらに、外来植物の原産地と日本の環境、病虫害および競合する植物群集等の違いなどを評価項目として加えて、日本独自の外来植物の評価システムを開発した。FAO方式の雑草性評価法を日本に既に侵入している外来植物に当てはめて評価した。また、評価項目のそれぞれの寄与率を計算してこれに基づく評価を行った結果、含まれる有毒成分やアレロパシーによる影響の寄与が大きいたことが明らかとなった。日本において外来植物の雑草性判定上重要な項目を表2に示す。これらの項目を使ってFAO方式を改良し、10項目からなる雑草評価法を策定した（新FAO方式）。その結果、二次指定された特定外来植物はいずれも点数が高く、とくに、ボタンウキクサ、

アレチウリ、ブラジルチドメグサ、ミズヒマワリおよびナガエツルノゲイトウの5つが高得点であった（表3）。ナガエツルノゲイトウ以外の4種は、現在河川や河川敷で爆発的に広がって問題となっている。ナガエツルノゲイトウは、今後の蔓延が懸念され、速やかな防除が望まれる。このほかに、要注意外来生物に挙げられているホテイアオイやセイタカアワダチソウの得点が高いことが明らかになった。今回新たに、シツノアイアシ、ナギナタガヤ、ナンバンアカアズキ、アメリカネナシカズラ、ナガミヒナゲシ等の雑草性リスクが高いことが明らかとなった。

5. 成果の公表

本研究成果を国民に説明する公開セミナー等を全国各地で、合計9回実施した。参加者の総数は1425名であった。これらの内容は、下記のホームページに紹介している。

http://www.niaes.affrc.go.jp/project/plant_alien/index.html

また、外来植物とその種子に関して開発したデータベースの一部は、外来植物のリスクの研究に役立てたり、穀物などに混入した種子を識別する目的で利用していただくため、下記のホームページで公開している。このデータベース外来植物の学名、和名、渡来年代および種子画像から構成されている。また、とくに要注意植物種に関しては画像検索が出来るようになっている。

http://www.rib.okayama-u.ac.jp/wild/okayama_kika_v2/okayama_kika.html

さらに、これまでに報告のある外来植物の有害物質を文献等から調査し、環境省の提示した要注意外来植物を中心に、80種の植物の起源、日本における分布・生育特性、有害物質、他感作用に関する情報を記載したデータベースを作成し、「外来植物ミニ図鑑－環境に影響するおそれのある外来植物」、および、含まれる有毒・有害成分の情報を加えた「外来植物と化学成分－特異的に含まれる生理活性物質や有害成分」を作成した。この2冊の図鑑は公開セミナー等で配布したが、その一部は次のインターネット上でも公開している。

http://www.niaes.affrc.go.jp/project/plant_alien/index.html

6. 現在の研究状況と今後の問題

本プロジェクトの結果、今後さらに検討が必要とされる緑化植物については、2008年度から環境省の「地球環境保全等試験研究費・公害防止等試験研究費」において、「緑化植物による生物多様性影響メカニズム及び影響リスク評価手法に関する研究」が5ヶ年計画で開始している。これは、国立公園等における緑化植物による生物多様性影響評価を行うプロジェクトである。

しかし、本プロジェクトで、最大の外来植物の侵入源

であることが明らかになった輸入穀物に含まれる外来雑草に関しては、農水省における防除体制が不十分であり、早急にリスクを評価する研究プロジェクトを開始し、規制を行うことが必要である。また、侵入したときの雑草化リスクが大きい水生植物についても、継続研究が必要であり、とくに今後急増すると予想されたナガエツルノゲイトウの水際での防除が必要である。ナガエツルノゲイトウは、日本では侵入が開始されたところであるが、中国ではすでに全土に侵入し蔓延しているため、その経験を日本での蔓延拡大と防除に役立てる共同研究を実施することが望まれる。

本プロジェクトでは3つの特色あるデータベースが完成した。これらに関しては、今後も継続してデータを蓄積する必要がある。とくに、岡山大学で開発した外来植物種子画像データベースは、この分野で世界最高水準のものとなった。また、外来植物図鑑は、外来植物のリスクとベネフィットを評価する基本資料として重要である。また、化学生態特性に関する有毒物質とアレロパシーに関するデータベースは、世界に類のない唯一のものであり、今後維持発展させたい。また、農環研では、アジア太平洋外来生物データベース（APASD）を作成して公開している。この内容の充実にも努めたい。

外来生物に関する研究には国際共同研究が必要であり、農環研ではこれまで2回モンスーンアジア諸国の研究者を招聘した国際ワークショップを開催した。2009年には中国とアメリカ合衆国（コネチカットとハワイ）で国際会議が開催される予定である。2010年には名古屋でCOP 10が開催され、生物多様性に関して話し合われる。日本でも外来生物に関する研究の発展が期待される。

◎表1 特定外来生物に指定された植物¹⁾

オオキンケイギク (*Coreopsis lanceolata*)、ミズヒマワリ (*Gynocoronis spilanthes*)、オオハシゴソウ (*Rudbeckia laciniata*)、ナルトサワギク (*Senecio madagascariensis*)、オオカワヂシャ (*Veronica anagallis-aquatica*)、ナガエツルノゲイトウ (*Alternanthera philoxeroides*)、ブラジルチドメグサ (*Hydrocotyle ranunculoides*)、アレチウリ (*Sicyos angulatus*)、オオフサモ (*Myriophyllum aquaticum*)、スバルティナ・アングリカ (*Spartina anglica*)、ボタンウキクサ (*Pistia stratiotes*)、アゾラ・クリスタータ (*Azolla cristata*)

¹⁾ 平成21年7月24日現在

◎表2 日本において外来植物の雑草性判定上重要な項目

項 目	重み
水生植物である、あるいは水に強く河川敷で広がる	Y=3
同じ種に雑草になっているものがある	Y=2
意図的・非意図的を問わず人間活動で広がる	Y=2
刺（とげ）や針をもつ	Y=1
人や動物に対して有毒か忌避される	Y=1
アレロパシー活性（他感作用）が強い	Y=1
蔓性であったり、他の植物を窒息させるほど被覆力が強い	Y=1
種子が多産である	Y=1
栄養繁殖（無性生殖）により再生する	Y=1
切断・耕耘・火入れに耐性か、むしろ広がる	Y=1

◎表3 特定外来植物およびその他の外来植物の新FAO方式による雑草性リスク評価（試行）

和名	学名	水生植物である	同種に雑草がある	人間活動で広がる	刺や針を持つ	人や動物に有毒か忌避	他感作用が強い	蔓性が被覆力強い	種子が多産である	栄養繁殖する	切断・耕耘・火入れに耐性	点数	
特定外来生物に指定された植物	ボタンウキサ	<i>Pistia stratiotes</i> L. var. <i>cuneata</i> Engler	3	2	2	0	0	1	1	0	1	11	
	ブラジルチメグサ	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i> L.f.	3	2	2	0	0	1	1	0	1	11	
	ミスミマワリ	<i>Gymnocoronis spilanthoides</i> DC.	3	2	2	0	0	1	1	0	1	11	
	アレチウリ	<i>Sicyos angulatus</i> L.	2	2	2	1	0	1	1	1	0	11	
	ナガエツルノゲイトウ	<i>Alternanthera philloxeroides</i> Griseb.	3	2	0	0	0	1	1	1	1	10	
	アゾラ・クリスタータ	<i>Azolla cristata</i> Kaulf.	3	2	2	0	0	1	0	0	1	0	9
	オオフサモ	<i>Myriophyllum brasiliense</i> Cambess.	3	2	2	0	0	1	0	0	1	0	9
	オオカワヂシャ	<i>Veronica angallis-aquatica</i> L.	3	2	0	0	0	1	0	1	1	0	8
	スパルティナ・アングリカ	<i>Spartina anglica</i> C.E. Hubbard	3	2	0	0	0	0	0	1	1	0	7
	オオハongoソウ	<i>Rudbeckia laciniata</i> L. var. <i>laciniata</i>	0	0	2	0	1	0	1	1	1	0	6
オオキンケイギク	<i>Coreopsis lanceolata</i> L.	0	0	2	0	0	0	1	1	1	1	6	
ナルトサワギク	<i>Senecio madagascariensis</i> Poir.	0	2	0	0	1	1	0	1	1	0	6	
その他の植物	ホテイアオイ	<i>Eichhornia crassipes</i>	3	2	2	0	0	0	1	0	1	1	10
	セイタカアワダチソウ	<i>Solidago canadensis</i>	0	2	2	0	1	1	1	1	1	1	10
	ツノアイアシ	<i>Rottboellia exaltata</i> (L.) L.f.	0	2	0	1	1	1	1	1	1	1	9
	ナギナタガヤ	<i>Vulpia myuros</i> (L.) C.C. Gmel.	0	2	2	0	0	1	1	1	1	1	9
	センシビードグラス	<i>Eremochloa ophiuroides</i> Hack	0	2	2	0	0	1	1	1	0	1	8
	ナンバンアカアズキ	<i>Macroptilium lathyroides</i> (L.) Urban	0	2	2	0	0	1	1	1	0	0	7
	アメリカネナシカズラ	<i>Cuscuta pentagona</i> Engelm.	0	2	2	0	0	0	1	1	1	0	7
	ナガミヒナゲシ	<i>Papaver dubium</i> L.	0	2	2	0	1	1	0	1	0	0	7
	セイヨウハギクソウ	<i>Euphorbia platyphyllos</i> L.	0	2	0	0	1	1	1	1	0	0	6
	ニセカラクサケマン	<i>Fumaria capreolata</i> L.	0	2	0	0	1	1	1	1	0	0	6
	クロハナモズイカ	<i>Verbascum nigrum</i> L.	0	2	2	0	0	0	1	1	0	0	6
	ハリナスビ	<i>Solanum sisymbriifolium</i>	0	2	0	1	1	0	1	1	0	0	6
	ミカニア	<i>Mikania micrantha</i>	0	2	0	0	0	0	1	1	1	1	6
	アメリカキンコギカ	<i>Sida spinosa</i> L.	0	2	0	0	1	0	0	1	1	1	6
	マルバツユクサ	<i>Commelina bengalensis</i> L.	0	2	0	0	0	0	1	1	1	1	6
	エノコログサ	<i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv.	0	2	0	0	0	1	1	1	0	0	5
	ヒゲナガスズメノチャヒキ	<i>Bromus rigidus</i> Roth.	0	2	0	0	0	0	1	1	0	1	5
	カラスノチャヒキ	<i>Bromus secalinus</i> L.	0	2	0	0	0	0	1	1	0	1	5
	コメツブツメクサ	<i>Trifolium dubium</i>	0	2	0	0	0	1	1	1	0	0	5
	オオブタクサ	<i>Ambrosia trifida</i>	0	2	0	0	0	1	1	1	0	0	5
	ヒマワリヒヨドリ	<i>Eupatorium odoratum</i>	0	2	0	0	1	1	0	1	0	0	5
	(和名なし)	<i>Salvia horminoides</i> Pourret	0	2	0	0	0	0	0	1	0	1	4
	(和名なし)	<i>Phalaris brachystachys</i> Link.	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	4
	コメスズメノチャヒキ	<i>Bromopsis inermis</i> (Leysser) Holub.	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	4
	ヒロハヒルガオ	<i>Calystegia sepium</i> (L.) R.Br.	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	4
	ブタクサ	<i>Ambrosia artemisiifolia</i>	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	4
	ドクミギ	<i>Lolium temulentum</i>	0	2	0	0	1	0	0	1	0	0	4
	カコウアサミ	<i>Ageratum conyzoides</i>	0	2	0	1	0	0	0	1	0	0	4
	セイバンモロコシ	<i>Sorghum halepense</i>	0	2	0	0	1	0	0	1	0	0	4
	ヒメムカシヨモギ	<i>Conyza canadensis</i>	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	4
オオアレチノギク	<i>Conyza sumatrensis</i>	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	4	
ヒメジョオン	<i>Erigeron annuus</i>	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	4	
アオゲイトウ	<i>Amaranthus retroflexus</i>	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	4	
ニセアレチギンギシ	<i>Rumex sanguineus</i> L.	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	3	
ノハラガラシ	<i>Sinapsis arvensis</i> L.	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	3	
スズメノエンドウ	<i>Vicia hirsuta</i> (L.) S.F. Gray	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	3	
キアレチギク	<i>Flaveria bidentis</i>	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	3	
イガマメ	<i>Onobrychis vicifolia</i> Scop.	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
ニゲラ	<i>Nigella arvensis</i> L.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	
ハリモクシュク	<i>Ononis spinosa</i> L.	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	
コロハ	<i>Trigonella foenum graecum</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	

注) 6点以上の点数を持つ植物のリスクが高いと評価した。
評価項目の点数は今後の研究で変更される可能性もある。

野生生物管理と自然再生

•Profile•



松田 裕之 まつだ・ひろゆき ●横浜国立大学大学院教授

1957年福岡県生まれ。1980年京都大学理学部卒業、1985年に同大学院生物物理学専攻博士課程卒業（理学博士）、日本医科大学助手、水産庁中央水産研究所主任研究官、九州大学理学部助教授などを経て、2003年より横浜国立大学大学院教授。2007年に日本人初のPew Marine Conservation Fellowとなる。専門は数理生態学、環境リスク学、水産資源学。

自然を人為的に回復させる

近年、日本では再生という言葉がさまざまな分野で用いられる。自然再生もその一つである。自然再生（Nature restoration）とは、人間活動によって損なわれた生態系またはその機能の一部を復元することである。生態系にはある程度の回復力（Resilience）があり、人間の負荷を取り除けば元に戻ることもあるが、人間の負荷を完全には取り除けない場合、限度を超えた影響を受けた場合には、放置しても自然が回復しない。

半世紀前には、ニホンジカやクマ類など、日本の野生動物は激減し、絶滅の恐れさえあった。その後保護した結果、多くの鳥獣は個体数が回復した。ニホンジカは過剰になり、農作地や林業地が食い荒らされた。それだけではなく、国立公園の貴重な植物が食害に合い、激減した。農林業被害対策としては、シカの捕獲は1990年代になって本格化した。国立公園内のシカ捕獲については、自然の遷移に任せるべきという意見も多かった。自然植生に激甚な影響が出ていることが指摘され、2008年になり、現在は人が定住していない知床世界遺産の最先端部である知床岬でも、シカの捕獲が始まった。

いずれも、自然の回復力を生かしつつ、それに手を加えながら、生態系を維持しようという取り組みといえる。本稿では、野生生物管理と自然再生の例として、エゾシカと石西礁湖のオニヒトデの例を取り上げる。

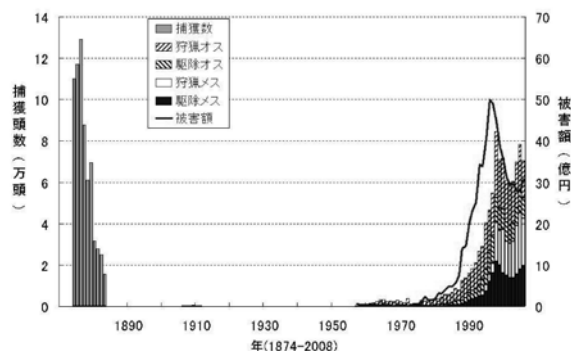
ニホンジカの激増と野生生物管理の新たな課題

ニホンジカにはいくつかの亜種があり、エゾシカ、ホンシュウジカ、ヤクシカなど日本国内に5亜種、台湾、中国大陆にもいくつかの亜種がいる。大陸の亜種は個体数も少なく、分布も狭いとされている。日本でもかつては乱獲などにより個体数が減り、保護されていたが、近年、日本各地でニホンジカが増加し、分布域も拡大している。以前は日本国内でも乱獲により激減し、保護されていたが、近年は狩猟圧の低下、土地利用変化により増加したと見られている。ニホンジカに限らず、多くの野生鳥獣が、かつては個体数の減少による保護が課題であったのに対し、近年では増えすぎが問題となっている。

世界遺産と生物圏保存地域に指定されている屋久島では、もともとシカの天敵であるオオカミがいなかったが、急峻な地形と狩猟圧により、シカ個体数は抑制されていた。現在では、西部の世界遺産登録地域で1km²あたり70頭以上となるほど激増し、農林業被害のみならず、世界遺産地域の固有植物など自然植生に激甚な被害を与え始めている。南九州でも、シカの増えすぎにより一部の植物が激減し、絶滅の恐れがある。そのため、日本植物分類学会は2003年3月にシカ食害の対策を求める要望書を提出した。

北海道でも、明治時代に乱獲と豪雪による大量死により激減していたエゾシカが増え始め、農林業被害額が50億円を超えるに至った（図1）。1998年より始めた北海道東部（道東）における道東エゾシカ保護管理計画により、おそらくアジアで初めて、野生動物管理において順応的管理を導入した。そこでは、管理計画を実施しながら1993年度の個体数を100とする相対個体数指数を毎年推定し、最新の個体数指数をもとに捕獲圧を調節し、捕獲数と個体数の増減傾向から個体数を推定しなおす作業を進めた。捕獲によって個体数を調節するためには、自然に増える数以上に捕獲する必要がある。それも、子供を生むのは雌だから、雌の捕獲が重要である。最初は、個体数を推定し、個体数と自然増加率の積を上回る捕獲数を設定しようとした。けれども、個体数推定値にはかなりの推定誤差が伴う。また、過去の推定値の多くは過小推定だったとみられる。多くの推定法では、ある区画内の個体数を数え上げ、それを生息地全体に外挿する。その際に区画内の発見率を100%などと過大に仮定するためである。

当初、北海道では道東のシカ個体数を8.6-16.4万頭と推定していた。シカは一夫多妻制のため、成獣は雄より雌が多い。しかし、過去の雌雄別捕獲頭数は角のある雄が多く、12万頭では雄成獣は獲り尽されているはずである。そのため、上記推定値は過小推定と考えられた。真の個体数が不明である以上、できるだけたくさん獲る方針（緊急減少措置）で臨んだ。それでも、30万頭以上の場合、捕獲数は自然増加を下回り、増え続けると予想され



◎図1 北海道のエゾシカ捕獲頭数と農林業被害額の推移（北海道資料）

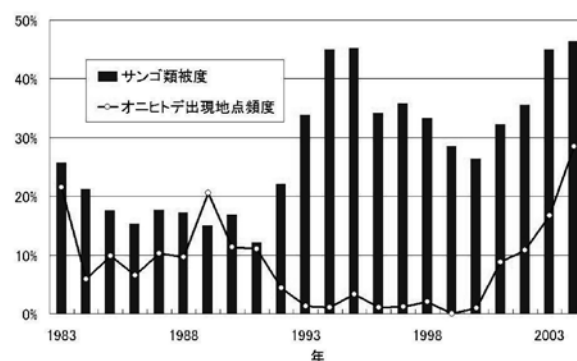
た。実際に捕獲した結果、複数の継続監視によるシカ個体数指数は減少に転じた。このことから、シカ個体数も20万頭程度と推定された。その後、エゾシカ個体数の推定には、夜間目視調査による個体数指数と捕獲数から絶対数を推定する「ベイズ推定法」が用いられている（Yamamura et al. 2008）。

日本において、野生鳥獣による農林業被害が増えている。日本の狩猟免許保持者は年々高齢化し、人口が減っている。野生鳥獣が増えていても、それを捕獲する人がいなくなりつつある。そのため、2007年に鳥獣による農林水産業等に係る被害の防止のための特別措置に関する法律（特別措置法）が制定され、罠猟などの手続きが簡素化された。

ニホンジカだけでなく、カモシカ（日本固有種、同属が中国に分布）、ニホンザル（下北半島個体群はサル類の最北端の生息域）、イノシシ、ツキノワグマ、ヒグマも、農林業被害など人間との軋轢が増えている。それらの国内での個体数はよくわかっていないが、上記のように、およその自然増加率と増減傾向さえ継続監視できれば、管理することができる。

自然再生事業

先に述べたとおり、機能が損なわれた自然に手を加えて回復させるための事業を行うため、自然再生推進法が、2003年1月より施行された。この法律は、「自然再生に関する施策を総合的に推進し、もって生物の多様性の確保を通じて自然と共生する社会の実現を図り、あわせて地球環境の保全に寄与することを目的」としている。この法律において、「自然再生」とは、「過去に損なわれた生態系その他の自然環境を取り戻すことを目的として、関係行政機関、関係地方公共団体、地域住民、特定非営利活動法人、自然環境に関し専門的知識を有する者等の地



◎図2 石西礁湖におけるサンゴ被度とオニヒトデ出現地点頻度の年次変化（上野光弘ほか、未発表）

域の多様な主体が参加して、河川、湿原、干潟、藻場、里山、里地、森林その他の自然環境を保全し、再生し、若しくは創出し、又はその状態を維持管理すること」と定められている。

これに対して、自然再生事業が新たな環境破壊となることを危惧する声もある。そのため、日本生態学会生態系管理専門委員会(2005)では「自然再生事業指針」を策定した。

南西諸島の石垣島と西表島の間に位置する石西礁湖は、生物多様性が非常に豊かな海域として知られている。石西礁湖では1960年代からオニヒトデによるサンゴの被害が懸念された。1989年のオニヒトデ大発生の際、オニヒトデ駆除事業が行われたが、低密度に抑えることができずにサンゴ被度が低下した。その後回復したものの、2004年ころから、再びオニヒトデは増え始めている。

石西礁湖自然再生事業では、上記「自然再生事業指針」も参考にしつつ、地域協議会を組織し、オニヒトデ対策を実施している。1980年代に失敗した際には、できるだけ多くのオニヒトデを駆除する目標を掲げ、ヒトデの高密度域で駆除したが、分布が拡大して被害を防ぐことができなかった。自然再生事業では、重点的に保護すべき場所を設定し、他が増えても、その場所に駆除努力を集中し、その場所のサンゴだけは守るよう目指している。そのうち、海洋環境の変化により、オニヒトデは自然に減ると期待される。そのときまでに、最低限のサンゴを守るため、保護重点区を設けている。

このように、自然の生態系の変動様式を理解し、実現可能な目標を設定し、費用効果の高い実効性ある方策を科学者が提案し、地域の担い手が合意することが、自然再生事業では重視される。石西礁湖では、漁民と観光業者（ダイバー）が協力分担して駆除事業を行っている。

引用文献

- 日本生態学会生態系管理専門委員会 (2005) 自然再生事業指針. 保全生態学研究. 10: 63-75
 Yamamura K, Matsuda H, Yokomizo H, Kaji K, Uno H, Tamada K, Kurumada T, Saitoh T, Hirakawa H (2008) Harvest-based Bayesian estimation of sika deer populations using state-space models. Population Ecology 50:131-144

生物多様性と生態系サービスに関する研究

•Profile•



中 静 透 なかしずか・とおる ●東北大学生命科学研究科教授

1956年3月生まれ。1983年大阪市立大学理学研究科生物学専攻（単位修得大学） 理学博士（大阪市立大学）。専門は森林生態学、生物多様性科学。森林の動態と更新、林冠生物学、森林の持続的管理と生物多様性などを研究。主な著書に、「モンスーンアジアの生物多様性（岩波書店、共著）」、「Diversity and Interaction in a Temperate Forest Community. Ogawa Forest Reserve of Japan,」Springer-Verlag（共編、共著）、「森のスケッチ（東海大学出版会）」など。

生態系サービスとは

生態系が人間にもたらす利益（便益）を生態系サービスという。国連の主導で行われた、ミレニアム生態系アセスメント（Millennium Ecosystem Assessment 2005, 以下MAと略す）では、生態系サービスを、供給、調節、文化、基盤サービスの4つに分類している。供給サービスは、資源としての物質やエネルギーを供給するサービスであり、調節サービスには生態系が存在することによる水質浄化や気候緩和など、さらには天敵の存在により特定の病害虫の大発生を防ぐなどの生物的調節に関するサービスが含まれる。文化的サービスは、生態系や生物の存在によって人間が得ている創造力や意匠、信仰、教育、レクリエーション機能などの文化的・精神的な利益である。基盤サービスは、これらのサービスを支える基本的な生態系の機能をさす。

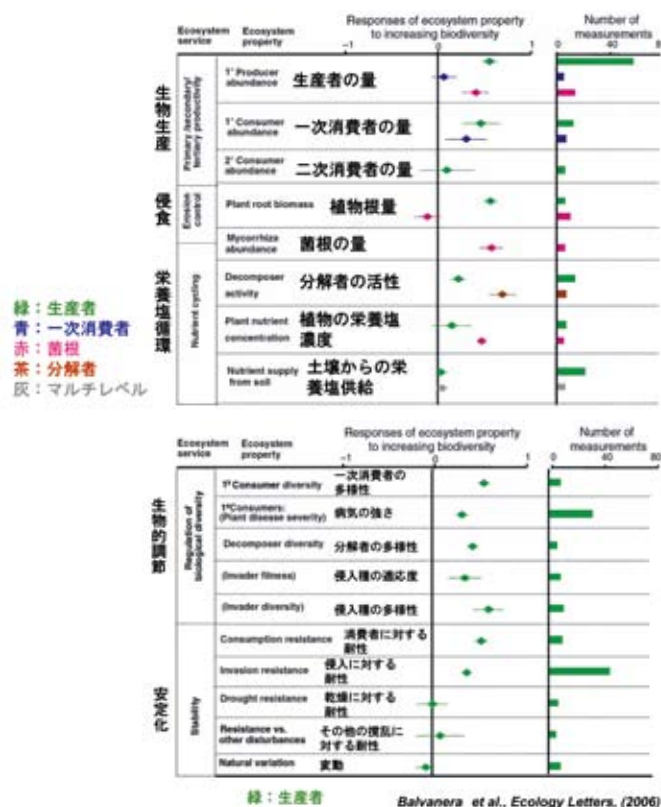
一般に、生物多様性は基盤サービスとして生態系の基本的機能を支えているが、すべてのサービスにとって重要な意味をもつわけではない（Dobson 2006）。供給サービスや調節サービスの多くはとくに高い生物多様性を必要とするわけではない。単一種の作物などでも資源供給サービスは得られるし、むしろその方が効率的な場合もある。観賞用の植物や薬品など、多様な用途を前提とする場合には、供給サービスでも生物多様性が重要となる。調節サービスの中でも、生態系の現存量や生産速度に関係するものは、多様性があまり重要でない場合が多い。ただ、病害虫の制御や送粉など生物的な調節については、生物多様性が重要である。また、文化的サービスのほとんどは生物多様性と重要な結びつきをもつ。しかし、生物多様性によってもたらされる生態系サービスについては、科学的な解析があまり進んでおらず、その効果がいまいに捉えられてきた感がある。

生物多様性と生態系サービス

1990年代中ごろ以降、生物の種数を人工的に制御することで生物多様性が生態系機能やサービスにどのような影響をもつか、という点を明らかにする研究が進んできた。これらの研究の多くは、人工的に生物多様性をコン

トロールし（たとえば、草原に植える植物の種数を変える、モデル淡水生態系でプランクトンの種数を変えるなど）、その処理が生態系の機能やサービスに与える影響を測定するものである。

1994年のNature誌に掲載されたアメリカのD. Tilmanらによる研究は、草地生態系に生える植物種の数的人為的に変えて一次生産量を測定し、植物の種数が増えるほど生産力は高くなるという実験結果を得る（図1）（Tilman et al. 1994）。ほぼ同じ頃、イギリスのJ. Lawtonらを中心とするグループでも、草地生態系を想定して、植物の種数、それを食べる昆虫の種数、さらにその昆虫を捕食



◎図1 多様性をコントロールした場合の生態系への影響に関するメタアナリシス。生産者（植物）、一次生産者、菌根などの多様性を人工的に制御した場合に生態系にたいしてどのような影響があるか、多くの実験・観測例を分析したもの。Balvanera et al. (2006)を一部改変。

あるいはそれに寄生する生物の種数などを、気象条件とともにコントロールしたエコトロンと呼ばれる装置をもちいて、生物多様性をもつ機能を実験的に解明する研究も現れる (Naeem et al. 1994)。

これまでの数多くの実験により、生物多様性の高い生態系では、生産力が高い、年変動が小さく安定である、病虫害の被害が少ない、新しい種が侵入しにくい、防災サービスに優れている、などの傾向があるとする報告がでている。生物多様性が高いことにより、異なった資源（光、水、栄養塩）を効率よく利用できるようになるため、全体の生産力が上がる。気候条件が変動する中では乾燥害や冷害などに強い植物が含まれていることにより、全体の生産量の年変動が小さくなり、全体の収量が時間的に安定する。天敵が多い生態系では、特定の害虫や病気が大発生する確率が低下する、などがこれらのメカニズムとして考えられている。

ただし、これらは制御可能な種数（おおむね20種まで）での実験結果であり、種数をさらに増やした場合には、種が多様であることの効果は薄れてくると考えられている。したがって、自然界で現実的に見られるような多くの種がそれぞれに明確な効果をもっていることの説明にはならない。また、条件をかなりコントロールされた実験によっても、実験結果が必ずしも一定ではなく、ある程度の不確実性があり、このような不確実性が生物多様性の難しい点とも考えられてきた。これを克服するために、メタアナリシスという、すでに出版された多数の論文や実験の結果を二次的に分析する手法を用いて、2005年ころまでに発表された膨大な論文が分析されるようになった（図1）。いくつかのレビューが発表され、大まかにはこれまで言われてきた生物多様性が生態系サービスに果たす効果がたくさんの実験結果によっても、正しいことがわかってきた (Balvanera et al. 2006)。

一方では、こうした実験的研究だけでなく、実際に生物多様性をもたらしている生態系サービスを具体的に明らかにしようとする研究も多くなってきた。たとえば、コスタリカのコーヒー園では、送粉を行うハチが森林で営巣するため、森林からの距離が遠くなると受粉率が低下する。そのため、コーヒー園の周辺に森林を残すかどうかで、収穫や収入が異なる (Kremen et al. 2002)。また、アメリカのダイズ畑でも、周辺にさまざまな生態系がモザイク状に存在するほうが天敵による防除効果が高いという結果が得られている (Gardiner, 2009)。日本でも、送粉昆虫や農作物の害虫の天敵の多様性が森林の発達段階とともに変化することが明らかにされ、農地の周辺の土地利用が送粉や害虫制御などの調節サービスに影響することが示されている (Makino et al. 2006, Maleque et al. 2009)。

一方で、文化的サービスの中には、教育や信仰のように、必ずしも生態系によってもたらされたと認識されて

いないサービスもあるし、社会的・経済的にもその重要性が認められてこなかったものが多い。また、その効果や評価についても、特定の地域や歴史的背景を前提とするものが多いため、自然科学的アプローチだけで生物多様性とサービスの関係を解明することは難しい。

生態系サービスの評価と定量化

このように、一方で生物多様性が生態系の機能に及ぼす影響が定量的に明らかとなり、一方で生物多様性と生態系と人間の福利との関係が明確になってくると、生物多様性の保全や持続的利用のために、生態系サービスの定量的評価が必要になる。生態系が劣化することで失われるサービスの中には、これまで外部経済化されてきたものも多い。たとえば、河川の水質浄化サービスなどは、その効果が明白でも経済的な価値を認められてこなかったため、排水などによって公害問題がおきると、そのコストは外部不経済として扱われてきた。しかし、汚染に対する規制や水源税などにより、次第にこうしたサービスにコストを払うことが認められるようになってきた。同じように、送粉や病虫害制御など生物多様性に関係するサービスの定量化は難しいと考えられてきたが、送粉昆虫が消失したり、天敵が減少したりすることにより、農業コストが高くなったり、被害が生じたりする。前述のように生態系サービスの定量化が進むと、生物多様性の必要性についての理解が進むと同時に、経済への内部化が進む可能性がでてくる。2006年には温暖化についてのStern Reviewが報告されているが、生物多様性版のStern Reviewともいえる経済評価のプロジェクトが2009年に中間報告をし (TEEB, European Communities, 2008)、2010年の生物多様性条約締約国会議で最終レポートが報告されることになっている。

温暖化の炭素排出権取引においても、途上国には森林造成などのインセンティブが働きにくい一方、現存する高蓄積の森林を伐採しなければ、その分の炭素放出を抑えられることから、2007年の気候変動枠組条約のCOP13からREDD (Reducing Emission from Deforestation and forest Degradation) という枠組みが検討されている。REDDでは、残存する森林を保全することになるので、生物多様性も保全できるという共益的效果 (コベネフィット) がある (Angelsen, 2008)。さらに、残存する森林を連続して保全して温暖化によって分布移動する生物の生息域を確保することができれば、温暖化の適応策にもなりうる。

炭素排出権取引やカーボンオフセットの発想を、生物多様性においても導入しようとする動きがある (ten Kate 2004)。ある開発行為を行う際に消失あるいは劣化が予想される場合に、それと同等の価値のある生態系や生物多様性を保全あるいは再生することによって補償しようとするものであるが、生物多様性の場合にはその導入には

いろいろ議論がある。絶滅などが起こった場合には補償できない場合があることや、まず保全を優先し、やむを得ない場合にだけオフセットをするという手順を踏むべきであるが、経済的仕組みが先行する場合には、保全が軽視される危険性があることなどが議論されている。一

方では、こうしたメカニズムの導入は、とくに企業などこれまでにないステークホルダーが生物多様性保全に参加することを促進するという側面もある。この議論は、今後ますます大きくなっていくだろう。

引用文献

- Angelsen, A. (ed.) (2008) Moving Ahead with REDD. Issues, Options and Implications. Center for International Forestry Research, Indonesia.
- Balvanera, P., Pfisterer, A. B., Nina Buchmann, N., He, J., Nakashizuka, T., Raffaelli, D. & Schmid, B. (2006) Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters* 9, 1146 – 1156.
- Dobson, A., Lodge, D., Alder, J., Cumming, G. S., Keymer, J., McGlade, J., Mooney, H., Rusak, J. A., Sala, O., Wolters, V., Wall, D., Winfree, R. & Xenopoulos, M. A. (2006) Habitat loss, trophic Collapse, and the decline of ecosystem services. *Ecology* 87, 1915–1924.
- European Communities (2008) The Economics of Ecosystems and Biodiversity. Wesseling
- Gardiner, M. M., Landis, D. A., Gratton, C., Difonzo, C. D., O' Neal, M., Chacon, J. M., Wayo, M. T., Schmidt, N. P., Mueller, E. E. & Heimpel, G. E. (2009) Landscape diversity enhances biological control of an introduced crop pest in the north-central USA. *Ecological Applications* 19, 143–154.
- Kremen, C., Williams, N. M. & Thorp, R. W. (2002) Crop pollination from native bees at risk from agricultural intensification. *PNAS* 99, 16812–16816.
- Makino S., Goto, H., Inoue, T., Sueyoshi, M., Okabe, K., Hasegawa, M., Hamaguchi, K., Ctanaka, H. & Okochi, I. (2007) The Monitoring of Insects to Maintain Biodiversity in Ogawa Fores Reserve. *Environmental Monitoring and Assessment* 120, 477-485.
- Maleque, M. A., Maeto, K. & Ishii, H. T. (2009) Arthropods as bioindicators of sustainable forest management, with a focus on plantation forests. *Applied Entomology and Zoology* 44, 1-11.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005) Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis, Island Press. Washington DC.
- Naeem, S., Thompson, L. J., Lawler, S. P., Lawton, J. H. & Woodfin, R. M. (1994) Declining biodiversity can alter the performance of ecosystems. *Nature* 368, 734 – 737.
- ten Kate, K., Bishop, J., & Bayon, R. (2004) Biodiversity offsets: Views, experience, and the business case. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK and Insight Investment, London, UK.
- Tilman, D. & Downing, J. A. (1994) Biodiversity and stability in grasslands. *Nature* 367, 363 – 365.

生物多様性を育む生態系ネットワーク： 安定同位体分析を用いた評価手法の開発

•Profile•



奥田 昇 おくだ・のぼる ●京大大学生態学研究センター 准教授

1969年12月生まれ1998年京都大学動物学専攻理学博士。水域生態学を専門として、現在は、琵琶湖の生物多様性と生態系機能に関する研究に従事。琵琶湖の生物多様性保全を目的とした研究プロジェクトを数多く手がける。NPOなどの環境教育活動にも力を入れる。主な著書に、「生物の多様性ってなんだろう？—生命のジグソーパズル—」（分担執筆、京都大学学術出版会）、「流域環境評価と安定同位体」（分担執筆、京都大学学術出版会）など。

柴田 淳也 ●愛媛大学沿岸環境科学研究センター グローバルCOE研究員

2010年、愛知県名古屋市にて生物多様性条約第10回締約国会議（COP10）が開催される。本会議は、2002年にオランダのハーグ（COP6）で採択された「締約国は現在の生物多様性の損失速度を2010年までに顕著に減少させる」という「2010年目標」の達成状況を検証し、新たな目標を策定することを主要議題に据える。開催国として、生物多様性保全への取り組みとその成果が問われることになる。

我が国では、COP10に先立ち、2007年に第三次生物多様性国家戦略が策定された。この戦略の中で、生物多様性の損失をもたらす3つの危機が指摘されている。すなわち、「人間活動に起因する生息地の縮小・消失」「里地里山の放棄による生息環境の劣化」「外来種の人為的移入による生態系攪乱」である。

本稿では、琵琶湖に生息する在来魚を例として、上述の人為的要因がいかに近年の生物多様性の損失をもたらしてきたかを概観し、筆者らが実施した在来魚保全に資する流域生態系評価手法に関する研究事例を紹介する。最後に、我が国をはじめとするモンスーン・アジアの国々が共有する伝統的文化に根ざした生物多様性保全の在り方について論考したい。

モンスーン・アジアにおけるコイ科魚類の繁栄

コイ科魚類は世界の陸水域から2,400種以上が記載されている脊椎動物の中で最も種の多様性が高いグループである（Nelson 2006）。その多様性は、特にアジアにおいて顕著である。また、その現存量の豊富さから、内陸の国々では貴重なタンパク源として利用されている。本科魚類には、降雨によって出現する一時水域を産卵場として好む種が多い。これらは、自然界では水生植物帯であったり氾濫原であったりするが、人間により創出された二次的自然である農業用水路や水田などしばしば産卵場として利用される。

モンスーン・アジアでコイ科魚類が繁栄した背景には、温暖多雨な気候を利用して発達した水稻耕作が、結果と

して、これらの魚類に適した生存基盤を提供したことと関係あるかもしれない。このように、モンスーン・アジアでは、稲作文化を通じたヒトとコイ科の共存・共生社会が成立していたと考えられている（中島 2001）。

変貌する琵琶湖 失われゆく生物多様性

琵琶湖は我が国で最大の湖である。その貯水量は日本全体の淡水資源のじつに3分の1を占め、近畿4府県1400万人の生活を支えている。その大きさ故、いにしえより琵琶湖は「淡海（あふみ）」と呼ばれてきた。滋賀県を近江（おうみ）の国と呼ぶのも、この「淡海」に由来する。琵琶湖の幸に恵まれた近江の地では、鮒寿司、ハス田楽、本諸子の塩焼などコイ科を食する独自の湖魚食文化が発達している。

さらに、琵琶湖は日本一大きいというだけでなく、生物多様性の高さで世界にその名を轟かせている。最新の報告によると、2800種以上の生物がこの湖に生息する。その内、61種は琵琶湖にしか生息しない固有種である。琵琶湖は約400万年の歴史をもつ古代湖である。その悠久の歴史の中で多様な生物が独自の進化を遂げた。

世界的に稀有な生物多様性を誇る琵琶湖だが、この半世紀ほどの間に様相は一変した。まず、1960年代の後半から富栄養化の兆候が現れ、赤潮やアオコなど水質悪化の問題が顕在化した。富栄養化は水道水のカビ臭として流域住民の関心事となるが、その一方で、水質汚染に弱い生き物たちは人知れずその姿を消していった。また、1972年に始まった琵琶湖総合開発による湖岸造成は、埋め立てられたヨシ帯を餌場や産卵場として利用する生き物を湖岸から追いやることとなった。さらに、近年では、オオクチバスやブルーギルなどの肉食性の高い魚類の人為放流によって、在来生物に対する食害が懸念されている。

これらの人為攪乱が在来生物の多様性を減少させる主要因であることは明白だが、どの生物がどのような要因によって減少したかを解明する生態学的研究は残念ながら

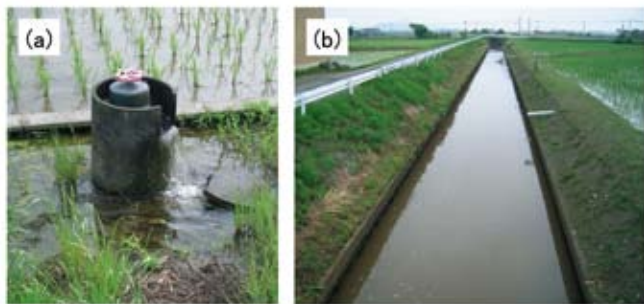
ら遅々として進んでいない。

途絶する水辺のつながり

このような現状を踏まえ、筆者らは生態系ネットワークを遮断する生息地の物理的改変が在来魚に与える影響を評価するプロジェクト研究を実施した。前述の人為攪乱要因に較べると若干なじみの薄い環境問題であるが、その生態影響は看過できないほど甚大であることを憂慮した。

琵琶湖には、大小合わせて500本余りの河川が流入する。その集水面積は滋賀県の面積にも匹敵する巨大な水循環ネットワークである。河川を水循環の大動脈に喩えるなら、網の目のように張り巡らされた小水路はいわば毛細血管であり、それと水田が連結することによって1つのネットワークシステムが形成される。仮に、琵琶湖岸の生息地の一部が損なわれたとしても、この生態系ネットワークが十分に機能しているなら、琵琶湖よりはるかに大きな面積を誇る代替生息地を多くの在来魚が利用できるはずである。

しかし、この淡い期待は脆くも崩れ去ることとなる。琵琶湖総合開発の一環として、農業用水の安定供給を目的に実施された土地改良事業により琵琶湖に隣接する多くの圃場で逆水灌漑が整備された(写真1)。この灌漑は、琵琶湖の水を動力ポンプによって直接水田に汲み上げ、排水を塩ビ管からコンクリート水路に垂れ流す方式を取る。産卵のために琵琶湖から遡上してきた魚類は入り口からも出口からも水田に入ることができず路頭に迷うしかない。



◎写真1 逆水灌漑方式の水田。水田に設置された蛇口から引水し(a)、排水は塩ビ管を伝ってコンクリート水路に流される(b)。

この灌漑システムを従来の方式に戻すのは、在来魚の保全上、非常に有効であると考えられる。しかし、現代社会において、これを実現するのは容易いことではない。この点については、本稿の最後であらためて考察したい。

生態系ネットワークのサブシステムとしての内湖

現在、琵琶湖流域では、コイ科魚類が産卵場として好むヨシ帯の大半は「内湖」と呼ばれる小水塊に存在する。

内湖とは、もともと琵琶湖沿岸の一部であった内湾や入り江の湾口部に砂嘴が形成されることによって本湖から隔離された水塊を指す。形状的には農業用ため池に似るが、琵琶湖と水位連動した生態系ネットワークのサブシステムであるという点で機能的には大きく異なる。

昔の内湖には多様な生態系機能が備わっていた。例えば、集落から出た生活排水や農業排水は直接琵琶湖に流れ込むことなく、内湖に貯留されることによって浄化されていた。いわば、天然の浄化装置である。また、内湖は、琵琶湖から産卵に訪れるコイ・フナ類を効率的に捕獲できる好漁場として、相当量の水揚げが古文書にも記録されている。

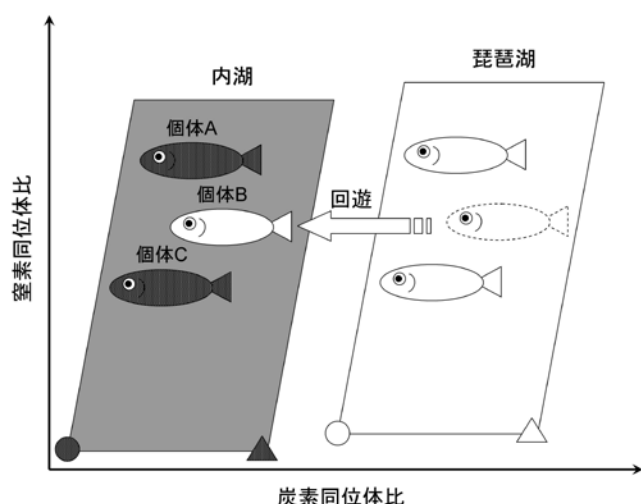
明治時代には琵琶湖周辺に数多く点在していた内湖だが、戦後の食糧増産の必要性から農地としての埋め立てが進み、その面積の7分の6が消失した(西野 & 浜端 2005)。現在は23内湖が残存するのみである。また、湖岸道路の整備や水位調節を目的とした樋門の設置によって、琵琶湖とのつながりが物理的に遮断された内湖も少なくない。

安定同位体を用いた魚類の生息履歴推定

このような生態系ネットワークの断裂が、琵琶湖から内湖に産卵回遊する魚類にどのような影響を及ぼすか評価するのが本研究プロジェクトの目的である。魚類の回遊行動を追跡するには幾つかの方法がある。例えば、魚体に標識を施した個体を放流・再捕獲する方法、電波や音波発信機を装着した個体の位置情報を受信機で捕捉する音響手法などである。しかし、これらの従来の方法には、データ回収率が悪い、一度に多数の個体を追跡できない、長距離の移動を捕捉できないなどの欠点があった。そこで、我々は、炭素・窒素安定同位体分析を用いて、魚類による琵琶湖から内湖への回遊実態を定量化する方法論の導入を試みた。

炭素・窒素安定同位体分析は、近年、生態学研究の分野で幅広く活用されている(永田 & 宮島 2008)。特に、動物の食性解析や生態系の構造解析でその威力を発揮する。この解析の原理は、動物が摂食の際に取り込んだ有機炭素や窒素を同化する過程で生じる同位体分別によって炭素および窒素の安定同位体比が規則的に上昇することを利用したものである。特に、炭素同位体比は生態系の生産基盤に固有の値を示し、その生態系に生息する生物は必ずその炭素同位体比の範囲内に含まれるという特徴をもつ。いわば、生物の居住区域を標すZIPコードのようなものである。この特徴を活かして、最近では、農産物の産地偽装を検査するトレーサビリティとして安定同位体を用いられている。

この手法を応用すると、ある場所で捕獲された魚がどの生息地で暮らしていたかを推定することができる(図1)。例えば、内湖で捕獲された個体の中には、もともと



◎図1 安定同位体分析を用いた魚類の生息履歴推定の概念図。琵琶湖と内湖の生態系は固有の炭素・窒素同位体比を示す（それぞれ、白とグレーで囲まれた領域）。○と△印は生態系の基盤をなす一次生産者。内湖で捕獲した個体が琵琶湖に固有の安定同位体比を示すなら、その個体（図中の個体B）は琵琶湖から内湖に最近移動してきたものと推定される。

内湖に生息していたものと産卵のために琵琶湖から内湖に一時的に回遊してきたものが含まれる。内湖に固有の安定同位体比を示す個体は内湖産と判断され、琵琶湖に固有の同位体比を示す個体は琵琶湖産と判断することができるというわけだ。

コイ科魚類の回遊実態

実際に、各内湖で捕獲された魚類の安定同位体分析を行い、どの程度の割合の個体が琵琶湖から回遊してきたものであるか見積もった。さらに、各内湖における回遊頻度と琵琶湖に連絡する水路の物理構造特性との関係を解析することによって、魚類の産卵回遊に適した水路の諸特性を抽出することを試みた。調査対象として、3種の在来フナ類（ニゴロブナ・ゲンゴロウブナ・ギンブナ）を用いた。ニゴロブナとゲンゴロウブナは琵琶湖の固有種である。

安定同位体分析による生息履歴推定の結果、産卵シーズンに琵琶湖から内湖に回遊してきたフナ類の割合は内湖全体で30.9%であった（Shibata et al. 準備中）。内湖間で比較してみると、琵琶湖からの産卵回遊が全く見られない内湖も存在することから、生態系ネットワーク機能としての連絡水路に何らかの構造上の違いがあるものと推察された（写真2）。回遊頻度の高い水路の物理的構造特性を多変量解析によって検討してみたところ、幅の広い水路よりむしろ狭い水路にフナ類が頻繁に回遊することが明らかとなった。その一方で、樋門や堰などの人工構造物や水路一面に繁茂する水生植物など魚類の往来を妨げる物理的障壁が存在すると、回遊が阻害される要因となりうることも浮彫りとなった。



◎写真2 琵琶湖と内湖を連絡するさまざまな水路。(a)樋門（水路奥側）によって魚の移動が妨げられる水路。(b)整備されたコンクリート水路。(c)フナ類が好んで産卵遡上する幅の狭い手掘り水路。(d)水生植物が繁茂した未手入れの水路。

生態系ネットワークと在来魚保全

琵琶湖に生息する在来魚の多くは、湖岸や内湖などの一時水域を餌場や産卵場として利用する。かれらがその生活環を全うするには岸辺の生息地が必要不可欠である。したがって、生態系ネットワークが失われることは、これらの魚の再生産が損なわれる、すなわち、個体群の絶滅確率が増加することを意味する。生息地のつながりを修復・再生することが琵琶湖の生物多様性を保全する上でいかに重要であるかご理解いただけただろうか。

我々の提案する安定同位体を用いた生態系ネットワークの評価手法は、今後の生態系管理施策において効力を発揮すると期待される。これまで、内湖では、排水機能を向上させるための連絡水路の改修工事や水位操作のための樋門設置などが実施されてきた。これらの管理施策は、あくまでも治水・利水機能を最適化するようにデザインされたものであり、必ずしも在来魚の産卵回遊を促進するためのものではない。時として、悪影響さえ及ぼしうる。これらの人工構造物を撤廃することは現実的でないが、在来魚の産卵遡上時期に合わせて樋門の開閉を調節するなど柔軟な管理を実施するだけでも何らかの改善効果が見込めるかもしれない。また、そのような順応的管理の効能は、同様に安定同位体手法によって評価可能である。

現在、生態系管理の現場では生態系や生物に関する生態学的知見が圧倒的に不足している。生態学者がさらなる努力を費やさねばならぬことは言うまでもなく、これらの生態学的知見を政策決定者や土木工学者と共有し、

順応的管理の現場にフィードバックさせるための組織間ネットワークの構築も求められるだろう。

自然との共生社会を目指して

本稿では、モンスーン・アジアで発達した稲作文化とコイ科魚類の関わりについて、琵琶湖流域社会を例に挙げながら紹介した。伝統的な灌漑によって維持されてきた生態系ネットワークシステムが在来魚の多様性保全に有効であることは先に述べた通りである。生物多様性国家戦略にも謳われるように、「里地里山の放棄による生態環境の劣化」は生物多様性にとって大きな脅威となりうる。しかし、残念ながら、そのような農業活動を維持することは現在の日本の社会システムにおいて極めて困難と言わざるを得ない。安価な農作物の国外輸入に頼る流通経済システムが大量の兼業農家を生み出し、農家にとって負担の少ない逆水灌漑の普及を後押ししたからだ。

このような現状にあって、内湖は琵琶湖の生態系ネッ

トワークを維持する最後の砦と位置づけられる。我々の研究は、昔ながらの小さな水路が琵琶湖から内湖へ産卵回遊する魚を導引するのに効果的であることを実証した。このような水路を再生することは土木工学的には容易であるが、それを行政的に管理するのは一筋縄でない。なぜなら、このような水路にはひと夏で水生植物が繁茂してしまうからだ（写真2d）。そのような水路は、逆に魚の産卵遡上を阻害しかねない。昔ながらの手掘り水路の管理には、人による不断の手入れが必要なのである。

私有地である水田と異なり、内湖はコモンズとしての性格をもつ。稲作文化の発展したアジアの国々では、水路などの共有地を地域共同体で管理する仕組みが備わっている。残念ながら、現代社会において、地域共同体における人と人のつながりは希薄化しつつある。生態系ネットワークシステムの維持と生物多様性の保全を実践するには、地域社会のネットワークシステムを修復することが不可欠となるだろう。

参考文献

1. 中島経夫 (2001) 日本の基層文化における西と東—歴史の中での琵琶湖の役割—. In: 知ってますかこの琵琶湖を:琵琶湖を語る50章 (琵琶湖百科編集委員会編), p153-158, 彦根市, サンライズ出版
2. 永田俊 & 宮島利宏 (2008) 流域環境評価と安定同位体:水循環から生態系まで. pp 476, 京都市, 京都大学学術出版会
3. 西野麻知子 & 浜端悦治 (2005) 内湖からのメッセージ:琵琶湖周辺の湿地再生と生物多様性保全. pp 253, 彦根市, サンライズ出版
4. Nelson JS (2006). Fishes of the world (4th ed). pp601, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.



資源循環利用技術

資源循環

はじめに

「グリーンニューディール政策」は、2009年1月に就任したアメリカのオバマ大統領が大々的に打ち出したことで世界的な注目を集める政策となりました。主な内容は、今後10年間、再生可能エネルギーへ1500億ドルの投資を行うことや500万人のグリーン雇用の創出など、雇用創出と環境・エネルギー政策を結び付けたもので、これまでのアメリカ経済において当然視されてきた大量生産、大量消費、大量廃棄といった方向から新しい社会経済システムへの移行を目指す画期的な試みとされています。

日本、中国においても、従来型の大量消費・廃棄型の社会経済システムから脱却し、社会の持続可能な成長を目指して数々の研究が進められてきました。その中で、

廃棄物の発生を極力抑え、発生した廃棄物は環境に負荷を与えないように再利用や再資源化する「資源循環型社会」構築は重要な位置を占めています。特に急激な経済成長に伴う都市人口の大幅な増加とそれに伴う深刻なごみ問題に直面している中国にとっては「資源循環型社会」に関する科学技術は大きな意味を持つものであります。

今回の特集では、そうした「資源循環型社会」に向けての両国の取り組みや最新の科学技術をご紹介しますものであります。本特集が読者の皆様の一助になりましたら幸いです。

中国総合研究センター

循環型経済—中国における持続可能な発展の実践

•Profile•



畢軍 Bi Jun ●南京大学環境学院院長

南京大学環境学院院長、教授。1967年2月生まれ。1994年北京師範大学環境計画・管理専攻卒業、理学博士。環境管理と政策の分析、産業生態学と循環型経済、環境リスク分析とマネジメント、地域の持続可能な発展に関する研究・教育に従事する。これまで国内外に発表した論文・著作は120あまり。国家社会科学の重要プロジェクト、国家科学技術支援計画、863計画、水関連重要プロジェクト、国家自然科学基金、国家公益プロジェクト等の助成を多数取得。現在は、国家社会科学基金の重要プロジェクト「循環型経済の発展と資源環境の制約解消に関する若干問題の研究」、国家科学技術支援計画「農業工業団地の資源循環利用に関する重要技術の開発と応用研究」、国の水関連重要プロジェクト「水汚染物排出許可証の管理技術とモデル」、環境保護部環境保護公益プロジェクト「長江デルタ地域の環境一体化管理技術システム研究」等のテーマについて主席専門家をつとめる。

劉凌軒 袁增偉 張炳

2009年1月1日、中国では「循環型経済促進法」が公布実施された。これは、循環型経済と環境管理に取り組む学者たちにとって非常に喜ばしいことであり、循環型経済が学術的、政治的なレベルから、ついに企業や社会へと全面的に方向転換し始めたといえる。今世紀、中国経済は急速な発展を維持してきているが、同時に、それによってもたらされる資源環境への重圧を受け続けている。将来の長期間にわたり、中国はさらに人口が増加し続け、経済は穏やかに成長していく発展段階にある。しかし、世界金融危機によって世界経済の枠組みには、重大な調整・変革が求められている。温室効果ガス排出と気候の変化により、日増しに厳しくなる環境容量に対して、さらに「炭素」の拘束が加わっている。資源、環境、経済のバランスのとれた発展が厳しい情勢を迎え、新たなチャレンジを必要としている現在、循環型経済という言葉はすでに時代遅れなのだろうか。これには新たな意味を与えるべきなのだろうか。

一、中国の循環型経済建設における成果

循環型経済という言葉は、国際環境管理とエコロジー経済の流れの中で、当初はあまり目立たず、ドイツや日本の環境管理立法上の概念を参考にしたものにすぎなかった。この概念を中国で広めることができたのは、一つには「循環」が物を大事にすること、資源の再利用という概念で理解しやすい上、人と環境の関係に対して楽観的な態度を示しているからである。もう一つには、「経済」が中国にとってあまりにも重要だからである。中国は大きく、人口が多い。経済発展は「止められない」のではなく、「決して止めてはならない」ものである。私たちが理解する循環型経済とは、経済、環境、資源学系の学者たちが微笑みと沈黙の態度でとる懐柔策であり、ほかに選択の余地のないものである。20世紀に中国の改革開放は良いスタートを切ったが、世界中の高汚染産業が中国へと方向転換をした。各地方経済がまだ十分に成長しきっていないころ、地方の役人と環境保護、資源循環

について話しても、まださほど受け入れられることはなかっただろう。しかしひとたび「経済」を語るなら、循環型経済はより受け入れやすいものになる。循環型経済が今日まで歩んでこられたのは、大勢に従ったものとはいえ決して容易なことではなかった。

2000年以降、中国の循環経済立法には顕著な進展が見られ、政策システムは徐々に整ってきている。モデル試行業務が着実に進み、技術面でのサポートが次第に整って、基礎業務が強化されるとともに、初期的な循環型経済モデルが形成されて、循環型経済の理念が人々の意識に根付き、循環型経済はすでに理念から行動へと変わり、プラスの効果を得ている。例としては、試行単位の資源消費、汚染物質排出量が大幅に下がっていること、重点業界の1単位あたりの生産力に対するエネルギー消費、物的消費が徐々に低下していること、資源の循環利用レベルと「三廢」(廢液、固形廢棄物、排ガス)の総合利用率が大きく上がっていること、汚染物質の排出に一定の制限が加わったことである。2007年には、中国のエネルギー産出率は標準炭1トンあたり8621元で、前年同期比で3.7%上昇、工業固形廢棄物の総合利用率は62.8%で前年同期比2.6%上昇、工業増加値1万元あたりの用水量は142m³で前年同期比6.6%減少、都市ごみの無害化処理率は56%で前年同期比4%増加した。

二、循環型経済の多層的な発展と対応技術

中国では、国家レベルの循環型経済試行機関の設置、循環型経済のための科学技術、財政投入が2期にわたって行われ、重点業界(鉄鋼、非鉄金属、石炭、電力、化学工業、建材、軽工業)、一般工業団地、重点地区、資源再生新興産業(資源リサイクルシステム建設、廢棄金属の再生利用、廢棄家電の回収利用、再製造業)を中心とする循環型経済の技術システムと発展モデルの初期形成が進んだ。また、水源の汚染減少、クリーナープロダクション、廢棄物の資源化利用、産業と生態の連結、環境に優しい製品の開発、政策決定支援等、循環型経済の中心的

技術について、異なる範囲、異なるレベルでの研究開発、促進・蓄積がされ、一部では産業応用が実現された。さらに、急速に発展する資源再生新興産業が育成され発展していることが、中国の循環型経済が大規模に発展し、重点業界の省エネ・排出削減と、地域の資源利用・環境保護・経済発展とがバランスを保っていくための、科学技術面での段階的なサポートとなっている。

（一）重点業界のクリーナープロダクション、省エネ・排出削減技術とその発展

中国は、持続的な資源環境の発展のボトルネックに窮しており、エネルギー消費と汚染の大きい業界のクリーナープロダクション、省エネ・排出削減に対する科学技術の投入は増大し続けている。クリーナープロダクションの面では、クロム化学工業クリーナープロダクションの集積技術、クリーン製革とエコ生産の連結集積技術、乾式アセチレン生産技術等、業界に大きな影響を与える一連のクリーナープロダクション代替技術が生まれている。省エネ・排出削減の面では、鉄鋼生産の過程でのCDQ（コークス乾式消火設備）、高炉余圧発電、焼結排煙の余熱回収、セメント生産過程での余熱回収発電技術、リン酸生産過程での廃液封鎖循環等、普及価値のある省エネ・排出削減技術が現れている。さらに、重点業界のクリーナープロダクション、循環型経済の技術方針リストが作成され、国の省エネ・排出削減目標実現にとって有効なサポートとなっている。

（二）循環経済型重点工業団地構築技術

中国の工業団地建設としては、経済技術開発区とハイテク技術産業団地が代表的なもので、鉄鋼・石油化学・非鉄金属・石炭等の大型企業を主導者とするコンビナート型の工業団地と、軽工業・電子・資源再生等の中小同業企業が密集した、専門的工業団地等の重要発展モデル、そして都市型発展の特徴を備えた総合的生態工業団地がある。循環型経済の理論と技術を利用して、工業団地のエコロジ化転換を推進し、循環経済型のエコ工業団地を建設することは、その主要な発展傾向になっている。

鉄鋼、非鉄金属、石油化学、石炭等の業界では物質循環とエネルギーの流れが巨大で、川上・川下産業が集中しており、鉄鋼企業、石油化学企業、非鉄金属企業、石炭企業等多種の大企業が主導するコンビナート形の工業団地の発展モデルが整い始めている。しかし全体的には、まだ単純な企業内の資源循環利用と川上・川下企業への延長発展の段階にあるだけで、大規模な産業化を推進でき、大型企業を主導者として多種の産業が共生連結するような循環経済型エコ工業団地の発展モデルは、いまだ形成されていない。

製革、発酵、製紙、製糖、電気鍍金等の業界では、クリーナープロダクションと循環型経済技術の面でいずれも大幅な前進が見られた。例えば製革業での生物の毛抜け防止・脱毛技術、クロムを使わない製革技術、発酵廃水の

高次処理と再生利用技術、製糖工業の取水ゼロ・廃水排出ゼロ技術、エコめっき技術等である。これにより生産工程の転換と産業モデルが実現された。

（三）重点地域と都市群の循環型経済構築のための技術とモデル

中国の地域経済は、地域の資源力と産業構造の特徴に応じて、特色資源の加工を主として広範囲の多種産業が集中する地域と、人口・産業の高度な集中を特色とする都市群経済圏に分けられ、中国の特色ある循環型経済の技術システムとモデルをひとまず形成している。エネルギー産業循環型経済の発展を通じて、一部地域ではすでに原料炭—発電—フライアッシュ—建材、原料炭—メタノール—川下製品といった産業連鎖が構築され始めている。また、他に先んじて工業・農業複合型の協調発展モデルを模索し始めた地域もある。例えば、農業製品の加工、農村の新エネルギー推進、藁などの综合利用、有機農業の展開等から着手し、農業循環型経済モデルを積極的に探るという例である。都市循環型経済は、発展のための主な動力であり、また主な区域となっている。

（四）資源再生業界の発展

中国の資源再生産業の規模は拡大し続けている。統計によれば、第十次五カ年計画期間中に、中国で回収された再生資源の総量は約4億トン、年平均回収量は8000万トン前後、年平均増加率は12%以上で、主な再生資源の回収総量は6500億元以上、年平均増加率は20%以上であった。中国の2005年の廃棄物資源回収総量は、1300億元に達し、その年のGDPの約1%になった。沿海の経済発達地区では、輸入廃物金属の解体が発展し、比較的大きな規模になっている。業界の発展が進んでいる地域は、広東、浙江、江蘇、上海、天津等の省・市で、山東、河北等の省も輸入廃物金属解体業の主要地域である。天然資源のない地域では、廃棄物資源の回収利用や輸入によって、原料生産基地が形成されている。

しかし、中国の資源再生業界の発展においては、技術問題よりも社会問題の存在が大きい。中国の資源再生産業の発展を制約する要素は多く、体制面での要素とともに、経済面での要素があり、科学技術面の要素とともに、精神文化面の要素もある。主には以下の各点である。回収が規範的でなく、市場に秩序が欠け、一部の回収業者は街中で集め回るという数十年来の古い方法をいまだにとりつていて、手法・技術レベルが原始的であること。企業の規模が小さく、産業化が進んでおらず、回収企業と加工企業の連結が悪いこと。資源再生利用の技術レベルが低く、二次汚染の問題が目立っていること。企業・社会の認識が不足し、参加意識が不足していること。税務上の設定に非合理的な点があり改善が必要であること。

循環型経済が概念から実践へと向かうにつれ、循環型経済の理論的枠組みと実践モデルの研究が進み、重要資

源の物質流の分析、クリーナープロダクションと循環型経済の指標システム、地域システムの分析技術等、循環型経済の理論と方法の研究業務には顕著な進展が見られる。中国の循環型経済理論の成果は、国家の重要政策の決定、循環型経済試行単位の建設に応用されており、中国の「循環型経済促進法」公布・実施を支援し、資源節約と環境への配慮が一体化した、中国の特色ある循環型経済技術システムを構築するための論理的基礎を築いている。循環型経済の政策決定過程では、国・地域レベルでの物質流分析(Materials Flow Analysis, MFA)を行い、「数値化可能、操作可能、チェック可能」な評価指標システムを打ち立てることが非常に重要である。

そのほかに中国では、業界のクリーナープロダクション基準と技術条件、業界の汚染物質排出基準、期限付きの更新、発展奨励技術目録等の面で、関連技術の評価研究を行い、製革等100以上の業界についてクリーナープロダクションの基準制定業務と、重点業界の循環型経済サポート技術リストを完成させている。しかし手法面では、主に専門家の判断と業界の技術レベル、技術発展傾向への評価を頼みとしており、主観性が強いいため、関連技術については評価の数値化が難しい。汚染物質の排出削減、資源エネルギーの節約、経済効果等多方面での、技術に対する総合的効果については、さらに考慮が必要である。特に、循環型経済の評価指標に基づく統計システムの完備が待たれる。

三、循環型経済の今後の傾向

以上をまとめると、中国の経済、社会の発展は、末端処理—クリーナープロダクション—3R対策の提唱—循環型経済試行モデル業務という経過を経た後、最終的に循環型経済促進法の公布、準備執行段階を迎えている。この段階では、各レベルで3Rの循環型経済措置、手段、理念を徹底実施するだけでなく、さらなる飛躍に努め、革新を恐れず、循環型経済の意味を拡大して、「クローズドループに注目して効率を上げる」ことから「規模を抑えて構造転換する」方向へシフトしていく必要がある。古来の錬金術と同じで、資源循環には毎回余分なエネルギーや、相応する資源等の対価が必要になる。つまり、資源の循環利用はただではなく、クローズドループには余分な資源やエネルギーの投入が必ず必要になる。つまり再利用・資源化とは、現在の高消費、高汚染の発展モデルに対する埋め合わせに過ぎない。資源消費と環境汚染の絶対量を下げるからこそが、中国の発展において長期的に追求されるべき点である。

また、中国経済の発展傾向に従えば、今後エネルギー需要は引き続き増加すると考えられるが、現在の石炭を主とした資源力とエネルギー構造では、中国は温室効果ガス排出の主要国になってしまい、温室効果ガス排出削減のため一層大きな圧力に直面することになる。低炭素

経済と低炭素技術は、循環型経済戦略の減量化原則と密接に関係するばかりでなく、中国の産業構造、エネルギー構造の調整、そして次世代の福祉に関わる重要課題にも影響を与える。中国の低炭素経済の突破口は、ミクロレベルでは技術改善と炭素の回収・封鎖・再利用技術の開発応用に、メゾレベルでは産業チェーン内での固形炭素の結合・延伸に、マクロレベルでは産業・エネルギー構造の調整、消費プロセスの誘導と改善にある。

循環型経済を実施することにより、エコロジー文化実現のための経済的、物質的基礎ができる。これはエコロジー文化構築にとって重要な点である。循環型経済とはエコロジー文化の考え方を体現したもので、持続可能な発展戦略という視点は、自然の角度から自然の内在的価値——つまり人類は自然界の主人ではなく、大自然の中の一員であり、自然を完全利用し破壊する権利を持つてはいないこと——を認め、守るものであり、自然生態の価値の完全性と多様性を保護していかなければならない。つまり、資源を奪って利用するという旧来の方法を変える必要がある。循環型経済促進法は、エコロジー文化建設にとって有効な法律の根拠となる。そしてエコロジー文化の建設のための、全社会に対する、そして幅広い国民の意識習慣に対する広報・普及活動は、循環型経済の発展にとって絶好の契機をもたらすであろう。

四、展望

中国の循環型経済の発展について、現段階で存在している問題についても避けては通れない。まず、循環型経済の科学技術面での刷新には、戦略性、先見性のある科学技術刷新の全体設計と計画が必要である。この十年来、中国は循環型経済の主要技術、設備、製品の面で多くの飛躍を遂げたが、これらの技術は多くがユニット・ノードや局部にとどまっており、単元から工程全体へ、企業から地域へ、生産から消費へという、資源加工と製品消費の一体化、業界の大きな範囲を跨ぐ循環型経済の集積技術に欠ける。特に、循環型経済のモデル試行でこれまでに得られた結果がまとまっていないため、集積的で普及可能であり、経済環境と社会公益のどちらにも役立つような循環型経済モデルと技術システムの構築が待たれる。

そして、中国の循環型経済の技術研究開発は、多くが重点業界、重点地域での省エネ・排出削減の必要性に目標を絞って展開されており、戦略性、先見性のある科学技術刷新の全体設計・計画がさらに必要であるとともに、循環型経済の技術的位置づけと、分野の振り分けについても改善が必要である。つまり、中国の環境保護モデルを転換させるような循環型経済に関する重大な理論刷新と、革命的な技術進歩によって、循環型経済の鍵となる基盤技術・モデルの進展を全面的に促進していくことが期待される。

最後に、循環型経済の重要な法律法規はすでに公布実施されているとはいえ、対応する措置、基準・規範、評価システム等は順に完備されつつある段階で、特に循環型経済の刷新技術については「操作可能、評価可能、数値化可能」な評価システムが必要である。技術刷新が循環型経済の発展推進のために果たす役割と位置づけが不明確なため、循環型経済の技術刷新を奨励する財政、税収等の奨励政策があいまいである。循環型経済発展に対する企業や地域の意欲は高いものの、技術刷新については必ずしも十分な投入がなされていないため、循環型経済のための科学技術刷新に、社会全体で新局面を形成していくことに、ある程度影響を与えている。

学者の職責とは、予測的な仮説、計算、論証により将来を模索し、それによって政府や社会に何らかの戦略、策略をとっていくよう計画、先導、提案したり、何らかの誤りを回避することであると、私たちは考えている。現在、循環型経済はすでに国の法律となっている。私たちはその発展をどのように完全化、健全化、昇華していくべきなのだろうか。

私たち研究班は長い研究実践において、まずは産業生

態学と物質流分析理論を中心とした基礎研究を行い、「数値化可能、操作可能、評価可能」な循環型経済の評価方法に取り組んできた。現在の研究課題は、流域の窒素、リン元素の代謝、全国的範囲での金属元素の代謝分析、地域と工業団地の物質流分析、地域・企業の温室効果ガス排出計算等である。その次に、環境政策分析を主な方向とした関連研究で、その目的は持続可能な発展と循環型経済のために「ソフト技術」を提供することである。中国の発展には技術が必要だが、技術のコスト、普及方法、受け入れ程度と実際の効果は、「ソフト」によって実現されると私たちは考えている。技術がなければ「米もないのにご飯を炊く」ことだが、「ソフト技術」がなければ「米があるのにご飯が炊けない」。この方向で私たちは、中国の各地域で行われる排出権取引の具体的な実践、環境管理市場のレバレッジ手法、環境情報公開制度の役割、政府・企業・社会の環境行動基準等に特に着目しており、中央政府、地方政府からの相談を受けている。中国が循環型経済の道をよりよく進んでいくためには、エンジニアリング科学の技術開発・応用だけでなく、こうした基礎研究こそが役立つと、私たちは信じている。

炭素資源循環技術――水熱によるバイオマスとCO₂の資源への転化

•Profile•



金 放鳴 Jin Fangming ●同済大学環境科学工程学院 炭素資源循環研究所所長

同済大学環境工程学院教授、博士課程院生指導教官、教育部長江学者特別招聘教授、東北大学客員教授。1957年5月生まれ。1994年、高知大学理学部付属水熱研究所、客員研究員。1999年、東北大学大学院工学研究科地球工学専攻修士、博士。1999年、東北大学大学院工学研究科、客員研究員。2004年、東北大学大学院環境科学研究科、准教授。2007年より現職。自然界における炭素資源の循環促進に関するシミュレーション研究に従事。これまでに200編近くの研究論文を発表、そのうち90編余りがSCI、EIに収録。13件の特許を申請。

1. 前書き

地球の資源枯渇と温室効果は世界の2大問題である。化石燃料の大量使用により、工業と市民生活から生じる廃ガス排出量が次第に増え、大気汚染と温室効果は人類が生存の拠り所とする地球環境をひどく脅かすようになった。6種の温室効果ガス（CO₂、CH₄、N₂O、HFCs、PFCs、SF₆）のうち、地球の気温上昇に最も大きな影響を与えているのは二酸化炭素である。

42万年前、大気中のCO₂濃度は $190 \times 10^6 \sim 280 \times 10^6$ にほぼ保たれていた。1万年周期で計算した変動幅は $7.0 \times 10^5 \sim 8.0 \times 10^5$ となる。1750年以降、CO₂濃度は明らかな上昇が始まる。この30年間は急激に上昇し、年平均増加率も加速している（表1）。2005～2007年の年平均増加率は 3.0×10^6 に達し、これは1750～1957年の17.6倍、1957～1991年の2.5倍である。断固たる措置を講じなければ、2200年には 900×10^6 に達すると予想される。21世紀末の地球の平均気温は1.4～5.8℃上昇すると見られており、これは20世紀の気温上昇（0.6℃）の2～10倍に相当し、1万年の中で最も速い昇温ペースとなる。

時間/a	大気中 CO ₂ 濃度 / 10^6	CO ₂ の年平均増加率 / 10^6
過去 42 万年～1750	190～280	
1957	315	0.17 (1750～1957 年)
1991	355	1.2 (1757～1991 年)
2000	368	1.4 (1991～2000 年)
2003	379	
2004	379	
2005	379	2.2 (2000～2005 年)
2007	385	3.0 (2005～2007 年)
2200 (予想)	900	

◎表1 大気中CO₂の増加傾向

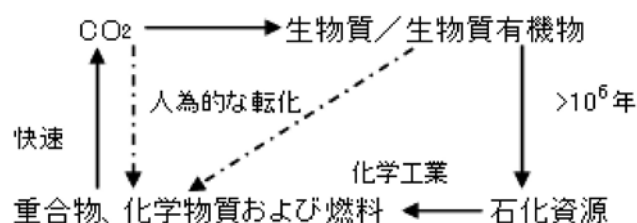
研究結果が証明しているように、過去50年の気候温暖化は主に人類の化石燃料使用で排出される大量の二酸化

炭素など温室ガスの昇温効果がもたらしたものである。予測によれば、今後50～100年にわたり、世界とわが国の気候は引き続き温暖化に向かうと見られる。気候変動は既に世界とわが国の自然生態系及び社会・経済システムに対し、第1レベル、第2レベル等の深刻なマイナス面の影響を及ぼしている。第1レベルの影響：地球が温暖化し、地表気温が上昇した。過去100年で地表温度は0.3～0.6℃上昇したが、この5年間を見ると、地球の平均気温は0.2℃上昇しており、通常の状態に比べ100倍の高さとなる。2050年の地球の平均気温は16～19℃に達し、これまでの温暖化ペースを上回ると予想される。第2レベルの影響：気候が異常で、気候帯が変化し、エルニーニョ、ラニーニャ現象が起きている。地表気温の上昇により、水の蒸発量が増え、高山の雪線が上昇し、一部の大河川が断流して枯渇に直面し、人類の生存を脅かすようになった。日照りのために地球が砂漠化、砂質化し、草原が劣化し、砂塵嵐を引き起こしている。また、幾つかの種が消滅し、農作物が減産となり、飢饉がもたらされ、外来種の侵入が激化し、生物多様性が失われ、多くの病気が流行している。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の研究によれば、有効な規制措置を講じなかった場合、大気中の二酸化炭素濃度は今世紀内に550ppmを超え、環境と社会に深刻な災難をもたらす恐れがある。このため、2050年までに世界のCO₂排出量を50～60%減らさなければならない。2005年に発効した「京都議定書」は、各国はいずれも二酸化炭素排出削減の義務を負うと規定し、また、先進国に対し、2008～2012年の排出量を少なくとも1990年比で5%削減するよう明確に求めている。これにより、CO₂の排出削減は世界が注目する大きな問題となった。

地球上の炭素循環過程（図1）からわかるように、CO₂は自然界のバイオ処理器、例えば植物の光合成等によってバイオマス又は生物有機物となり、廃棄バイオマス又は有機物が地下に沈降し、地下の高温高压水及び微生物の働きで石化資源に転化される。しかし、自然条件の下

では、この形成速度はかなり緩く、百万年以上を経る必要がある。それなのに、人類は快適な物質的生活を追求するため、節制することなく盲目的に大量の化石エネルギーを消費し、現在の地球上の資源枯渇と環境悪化を招いたのである。バイオマスとCO₂を人工的に高速で有機資源に転化できるなら、石化資源の過度な使用が引き起こした温室効果と資源枯渇の2大問題を根本から解決することができる。水熱反応は地球炭素資源の調和の取れた循環過程で重要な役割を果たしてきた。従って、この調和の取れた循環という自然現象によれば、バイオマスとCO₂を資源及びエネルギーに高速で転化することが期待できる。



◎図1 地球炭素資源循環図

こうした構想に基づき、我々は地球の炭素循環のバランス改善を出発点とし、環境、資源、エネルギーの諸要素を総合的に考慮し、水熱反応によるバイオマス廃棄物とCO₂の資源への転化について多くの研究を行った。本論文では水熱技術を利用し、バイオマスとCO₂を高付加価値の化工原料に転化することに関する研究について、その最新の進展状況を紹介する。

2. バイオマスの水熱反応による酢酸生成

水熱反応は高温水（200～600℃）を溶剤とする化学反応過程である。温度、圧力の変化に伴い、高温高压水は誘電率、粘度、密度及びイオン積等の性質に急激な変化が生じる。このため、温度、圧力を変えることにより反応の調節・制御という目的を達成することができる。同時に、高温水は気体、無極性有機物に対する溶解度が比較的大きく、また、気体が拡散、運動しやすい特性を備えており、良好な溶剤となる。この他、250～300℃の高温水のイオン積 K_w は常温水の1,000倍であり、反応過程において、水は酸・塩基触媒の役割を果たし、酸塩基触媒反応を大いに促進することができる。それはアルコールの脱水、アルドール縮合、二重結合・加水分解、Friedel-Craftsアシル化反応等でいずれも触媒作用を持つ。

我々は有機廃棄物の分解処理に関する研究を行った時、その種類に関係なく、ほぼ全ての有機物の水熱酸化プロセスにおいて、酢酸が安定した中間生成物となることを発見した。酢酸への完全分解にはかなり高い温度、圧力又は大量の酸化剤が必要となり、処理コストがかさ

むのは避けられない。

酢酸（Acetic Acid）は非常に重要な有機化工製品である。強制分解するのでなく、酢酸を生産・利用する方法を考えるなら、水熱反応を利用して有機廃棄物を新生資源に転化する新たな道を開くことができる。このため、我々は有機廃棄物から酢酸を生産することを研究の指針とした。採用した主な有機廃棄物には稲わら、もみ殻等の農業廃棄物が含まれる。稲わら、もみ殻等のバイオマス酢酸に転化する研究は既に大きな進展が得られ、酢酸の生成率は約30%に達する。

3. バイオマスの水熱反応による乳酸生成

乳酸は重合させてポリ乳酸を生み出すのに用いることができる。ポリ乳酸は現代の化工プラスチックと同様の物理的特性を備え、さらにはそれより優れている点もある。より重要なのはポリ乳酸が自然界の微生物によって分解され、最終的に二酸化炭素と水に変わり、環境を汚染しないことである。また、有機肥料として農地に施肥し、植物養分とすることができる。一方、ポリエチレン、ポリプロピレン等の化工プラスチックから作られる製品は、たとえ地下に深く埋め、長い時間が経過したとしても分解されず、よく耳にする「白色汚染」を引き起こすことになる。このため、ポリ乳酸は化工プラスチックに取って代わる可能性が最も高いバイオマス材料の1つと言える。

ポリ乳酸の応用意義は環境保護面に具現されるだけでなく、それは循環型経済、節約型社会の構築にとっても有意義な役割を果たす。化工プラスチックの原料は再生不可能な化石資源である石油から抽出されるが、石油は今や希少な消耗資源となりつつある。バイオマスを使って生産されるポリ乳酸は原料が無尽蔵にあり、分解後は植物に吸収され、物質の循環利用が行われる。しかも化工プラスチックに比べ、ポリ乳酸はより多くの二酸化炭素を生じさせることがない。なぜなら、その原料であるバイオマスは生長過程で植物の光合成により二酸化炭素を消費するからだ。この他、ポリ乳酸の産業化は農作物の付加価値を大いに高めることになろう。ポリ乳酸はエンジニアリング材料、包装材料、日用器具、農業用マルチフィルム等の方面で使われる他、医薬品・医療分野にも大いに活用できる。ポリ乳酸で作った骨釘、手術用縫合糸は体内で完全に分解されるため、抜去、抜糸を行う必要がない。さらに人工骨や人工皮膚の組織工学的足場を作り、そこで骨細胞又は皮膚細胞を培養することができる。足場材料が分解する頃には、人工骨や人工皮膚も成長している。また、ポリ乳酸で作った緩慢放出型のカプセル担体は人体内で徐々に消化・分解され、薬物が一定時間持続的に放出される。しかし、現在の乳酸製造はトウモロコシ等の食糧作物を発酵させる方法を用いており、人間との食糧の奪い合いが引き起こされることに

なろう。乳酸原料の代用物を探るため、我々はわら等のリグノセルロース系バイオマスを用い、水熱反応により乳酸を生成する研究を進めた。研究の結果、わら等のリグノセルロース系バイオマスを原料として用いれば、いかなる前処理も必要とせず、乳酸に直接転化できることを発見した。その乳酸生成率はトウモロコシ発酵と同程度の収量に達する。

4. バイオマスの水熱反応によるギ酸生成

ギ酸は最も単純な脂肪酸である。それは基本的な有機化工原料の1つであり、農薬、皮革、染料、医薬、ゴム等の工業に幅広く応用されている。現在、世界のギ酸需要量は年2%～3%のペースで増大していると思われる。そのうち欧州は飼料添加剤としての需要が大きく、年平均伸び率は8%～10%に達する。主な原因は欧州連合（EU）が処方されていない飼料用抗生物質の使用を2006年から全面的に禁止したためである。この他、アジア太平洋地域の需要の伸びは4.6%/年に達し、アフリカ・中東地域の需要は3.5%/年のペースで伸び続け、米州地域では3%/年の伸びが見込まれ、日本は1.9%/年となる。アジア太平洋地域ではギ酸の応用の見通しが非常に明るいと専門家は見ている。現在、この地域では主に天然ゴムの凝集剤として用いている。アジアの飼料市場は今後大きく伸びると予想される。より興味深いのは、ギ酸からギ酸燃料電池を直接作れることが最近の研究でわかったことである。

水熱法による多糖類バイオマスの酢酸への転化に関する研究の中で、我々は水熱酸化法を用いれば、多糖類バイオマスが高い収率でギ酸に転化する可能性の高いことを発見した。このため、水熱による多糖類バイオマスのギ酸への転化について研究を進めた。結果が示すように、ギ酸の収率はかなり高く、約80%に達した。

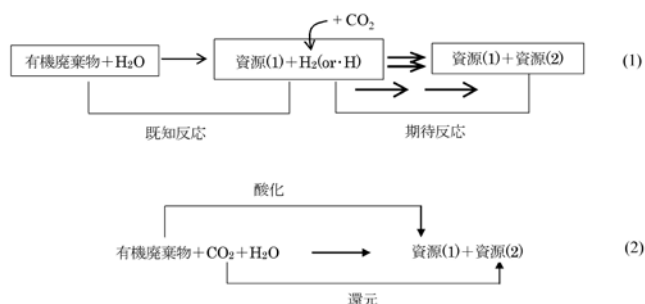
5. CO₂の水熱による資源化の研究

周知のように、CO₂が引き起こす地球温室効果は世界的に最も注目される環境問題の1つとなっている。バイオマスと比較するなら、化石燃料の使用はCO₂を一方向的に放出するだけだと考えるのが現在の見方である。この見方の本質はCO₂の吸収速度と放出速度のアンバランスにある。化石資源も元々は、CO₂と水の光合成によって作られる炭水化物から生まれたものだが、ただ炭水化物から化石燃料に至る周期が非常に長いので、こういうことが起きるのである。従って、CO₂の有機資源への還元を人為的に速めることができるなら、地球上のCO₂の循環を好ましいものにし、地球の温室効果を防ぐことが期待できる。

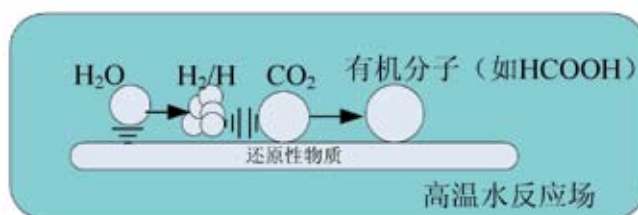
有機物の水熱による資源化又は処理に関する研究の中で、我々は多くの有機廃棄物が水熱反応において還元性を示し、しかも水中の水素が比較的低い温度で放出されることを発見した。従って、この水素を利用すれば、水

熱によりCO₂を有機資源に還元することが期待できる。有機廃棄物の水熱反応時に水中から発生する水素を利用してCO₂を有機資源に還元できるなら、CO₂の有機資源への転化を人為的に速めることができる。また、反応条件を制御することにより、有機廃棄物を分解して価値の高い有用物質とすることが期待できる。そうなれば、CO₂を資源に還元すると同時に、有機廃棄物自体も資源化されるのである。先に述べたように、高温高压水は地下で反応場となり、有機物の形成と循環に極めて重要な役割を果たしてきた。この自然現象はCO₂の循環について言うなら、植物の光合成以外に、高温高压水を利用してCO₂を有機資源へと循環させる道も非常に有望であることを示している。

反応平衡の視点から見ると、式（1）に示すように、有機資源化の反応システムにCO₂を加えた時、CO₂と水中から発生する水素の反応で有機資源が生成されるため、有機廃棄物の資源化反応平衡は右側の資源化方向へと進むはずである。CO₂を加えた時、水素が絶えず消費されるため、水中での水素の発生を促すことができる。これはCO₂を効果的に有機資源に還元すると同時に、廃棄物の資源化反応を促進することになる。この反応の全過程は式（2）で表すことができる。



このため、我々はCO₂の水熱還元技術に関する研究を進め、還元性を備えた有機物又は無機物を採用し、水熱システムの中でCO₂の還元を行い、CO₂をギ酸、メタン、メタノール等の有機資源に還元した。これと同時に、加えた有機又は無機の還元剤も酸化されて高付加価値の製品となった（図2）。



●図2 水熱によるCO₂資源の循環図

最新の結果が示しているように、特定の条件下で、80%のCO₂がギ酸に還元され、選択率は95%以上に達した。この他、研究の過程で、幾つかの状況下では、CO₂がメタン、メタノール等に還元できることを発見した。この技術のもう1つの注目点であるが、メタン、メタノールの生成率向上にはなお課題が残る。

水熱によるCO₂の有機資源への還元は以下の特徴を持つ。(1) 高温高压水は即ち水素源として、環境に優しいクリーンな媒質となる。(2) 高温高压水の中で、水又は有機廃棄物から発生する水素は高い活性を備えている可能性があり、原位置で直接CO₂を還元できる。このため、高効率・高速でCO₂を有機資源に還元することが期待できる。(3) 一般のCO₂+水素還元反応と異なり、水熱によるCO₂の還元では高純度のCO₂を必要としない。一般のCO₂+水素還元反応の場合、CO₂は必ず高純度でなければならない。このため、CO₂を純化するのに大量のエネルギーが必要となる。(4) 純化水素、及び水素を反応システムに送り込むのに必要な動力費を節約できる。

このため、水熱技術によるCO₂の有機資源への還元は大きな可能性を秘めており、グリーン（環境調和型）化工生産過程となる。経済的な原子反応というだけでなく、現代のグリーン化学の発展動向にも一段と適い、資源の有効利用と環境保護にとって重大な意義を持つ。

6. 結論

地球の資源枯渇と環境悪化は世界の2大問題である。地球上の炭素循環過程からわかるように、この2大問題の根源は人間活動のもたらすCO₂の排出速度が、CO₂が自然界のバイオ処理器により石化資源に再転化する速度を遥かに超えていることにあり、石化資源の枯渇と温室効果が引き起こされた。このため、バイオマスの有機資源への転化又はCO₂の有機資源への還元を効果的に高速で行い、地球上のCO₂の好循環を実現するための研究を進めることは非常に差し迫ったものとなっている。

そこで、我々は地球の自然現象のシミュレーションを通じ、水熱反応を中心に据え、廃棄物バイオマスとCO₂の資源及びエネルギーへの転化について研究を進めた。結果がはっきり示しているように、水熱反応を応用すれば、広範囲のバイオマスを酢酸、ギ酸、乳酸等の付加価値の高い化工原料に転化することができる。同時に又、温度較差と水熱条件の下、高効率・高速でCO₂を有機資源に転化することもできる。従って、水熱反応は地球の炭素資源バランスを改善する上で大きな可能性を秘め、応用の見通しが明るい。

謝意

本論文の中で述べた研究の一部は日本の東北大学で行ったものです。ここに、東北大学を既に退職された夏本兵治教授、田路和幸教授並びに木下睦准教授に謝意を表します。

ごみ資源化利用技術の研究

●Profile●



李 海濱 Li Haibin ●中国科学院広州エネルギー研究所バイオマスエネルギー研究センター長

中国科学院広州エネルギー研究所バイオマスエネルギーセンターの主任、博士、研究員。1968年9月生まれ。1997年に中国科学院山西石炭化学研究所の有機化工専攻を修了、工学博士。主に固体廃棄物の無公害化処理、資源化利用、バイオマスエネルギー利用分野の基礎研究と開発作業に従事。ごみ総合処理、バイオマスガス化発電など分野で数多くの技術研究および開発。国家973、863、国家自然科学基金、国際協力プロジェクト、中科院および広東省科技プロジェクトなど受託。これまで80編あまりの関連論文を発表、専門書『固体廃棄物エネルギー利用』を共著、10件あまりの特許授權を獲得。

呉創之、陳勇、劉曉風、廖銀章、劉克鑫

概要

中国都市部における生活系ごみ収集量はすでに1.5億トンを超えている。先進国と比較し、中国都市部における生活系ごみの無公害化処理レベルは今なお低い。本文は中国におけるごみの排出量と処理の現状分析と国内外のごみ成分と物理的性質を比較し、中国都市部の生活系ごみの特徴に対し、資源の循環利用を主な目標とする都市部生活系ごみの総合処理技術構想を提出するものである。

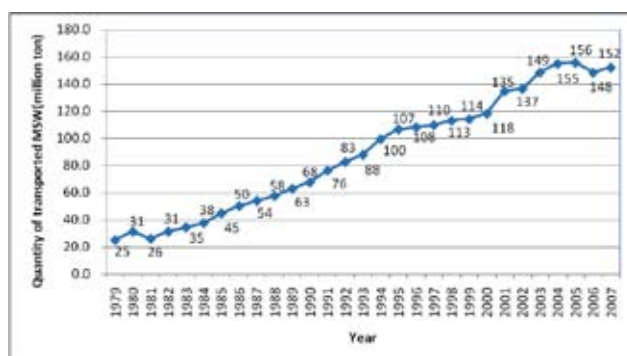
1、はじめに

2007年の中国都市部における生活系ごみ収集量は1.52億トンで、2003年以前の増加速度と比べ明らかに緩やかになっている。新設ごみ処理施設の使用開始に伴い、ごみ無公害化処理率は近年において最高の62%に達した。しかし、先進国と比較すると、ごみ無公害化処理率はまだ低く、40%近くの都市部の生活系ごみはいまだ適切な処理がなされていない。加えて、広大な農村地区のごみ処理は露天放置や埋め立てなどいまだ適当に処理されている状況に留まっており、中国全体のごみ無公害化処理レベルを向上をさせ、ごみ処理施設を絶えず増設し、完備する必要がある。中国のごみ成分、物理的性質に基づいて、国情に合ったごみ資源化利用技術の開発を強化しなければならない。

2、中国におけるごみ問題の現状および特徴

1) 年々増加してきた収集量に見られ始める穏やかな状況

図1で示されているように、中国の都市部の生活系ごみ収集量は1981年以来大まかに四つ段階を経て成長してきた。第一段階は1995年以前の急速な成長段階で、ごみ収集量の年平均成長率は10.7%であった。第二段階は1995年から2000年の間穏やかな成長段階で、ごみ年均成長率は2.1%であった。第三段階は2000年から2004年の間急速な成長段階で年均成長率は7.1%であった。第四段階は2004年から現在までの穏やかな成長段階であり、ごみ収集量は約1.5億トンを保持している。まとめると、ごみ収集量の変化傾向は中国における都市化過程の速度を側面的に反映するものと言える。

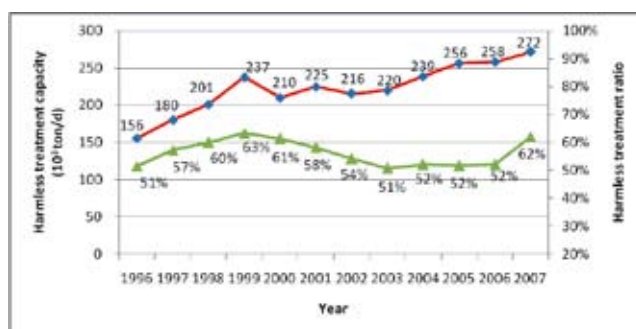


◎図1 ごく数年の中国都市部の生活系ごみ収集量

(出典：『中国統計年鑑』、『中国都市部建設統計年報』)

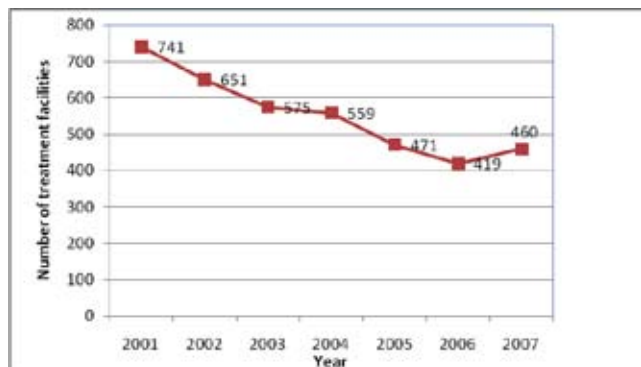
2) 処理の大規模化—絶えず増加する処理能力と、減少する施設数。

1996年以来、中国都市部における生活系ごみ無公害化処理レベルは基本的に年々少しずつ増加する傾向を見せている(図2)。2007年末までに、無公害化処理能力はすでにこれまでの最高レベルに達し、一日当たりの処理能力は27万トンを超えている。それと同時に、ごみ無公害化レベルも2007年の62%まで達している。指摘すべき点として、現行の無公害化基準の不一致により、1990年代の無公害化処理率データは実際に高めとなっているが、現在執行している埋め立て、焼却などの国家基準はすでに主要先進国に接近している。



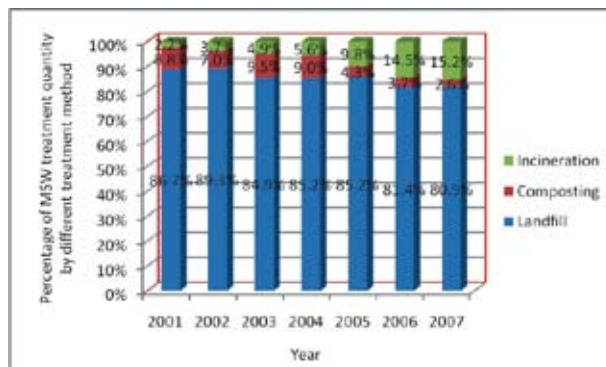
◎図2 中国都市部における生活系ごみ無公害化処理能力

(出典：『中国統計年鑑』、『中国都市部建設統計年報』)



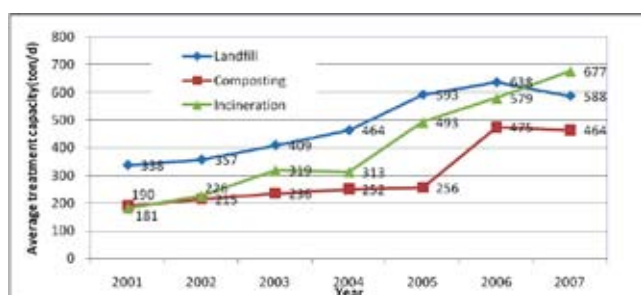
◎図3 中国都市部における生活系ごみ処理施設数の変化情況

(出典：『中国統計年鑑』、『中国都市部建設統計年報』)



◎図6 中国における各種ごみ処理施設のごみ処理割合

(出典：『中国統計年鑑』、『中国都市部建設統計年報』)

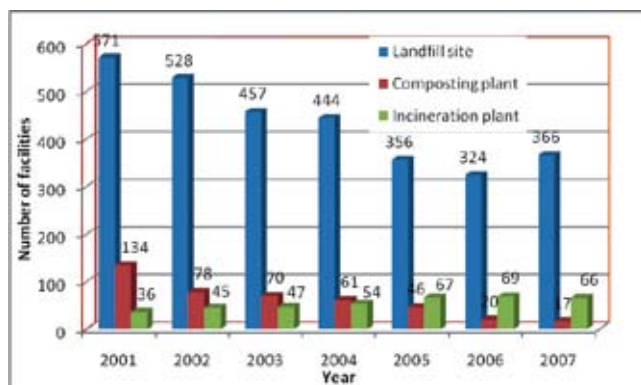


◎図4 中国都市部における生活系ごみ処理施設の一日当たりの平均処理能力

(出典：『中国統計年鑑』、『中国都市部建設統計年報』)

ごみ処理レベルの向上も小型のごみ処理施設を徐々に淘汰し、それに代わるさらに大規模で、汚染制御手段がさらに先進的なごみ処理技術の採用推進を促すものとなっている。ごみ無公害化施設は2001年の741施設から2007年の460施設まで減少したが、一施設当たりの処理施設の処理能力は2001年の303トン/日から2007年の591トン/日まで向上した。処理規模の増加は汚染源をさらに集中させ、先進的な技術手段の採用による二次汚染の減少という目標を達成させるのに都合がよい。(図3、図4)。

3) 主流の埋め立て、急成長する焼却、下降する堆肥の比率。



◎図5 中国における各種ごみ処理施設数

(出典：『中国統計年鑑』、『中国都市部建設統計年報』)

図5、図6から、中国における主なごみ処理技術は現在も依然として埋め立てがメインであるが、ここ数年来、ごみ埋め立ての割合はしだいに下降する傾向が見られる。埋め立てが占める割合は2001年の86.7%から2007年の80.9%まで下がっている。中国の多くの都市部にとって、ごみ埋め立ては広大な土地面積を占用するゆえに場所選定が困難となっているが、ごみ焼却発電は減容減量の程度が高いといった特徴を備えているゆえに、数多くの都市部ごみ処理施設新設の第一選択となっている。2001年から2007年までに、ごみ焼却発電所は36施設から66施設まで増加し、ごみ焼却発電出力におけるごみの割合も2.2%から15.2%まで急速に増加した。不完全統計によると、2009年までに、稼働中および建設中のごみ焼却施設はすでに100施設を超えており、今後しばらくの間、ごみ焼却発電は中国において最も成長が速いごみ処理方式となる。堆肥は昔ながらの易分解性有機ごみの処理方法であるが、ここ数年来、都市居住者の生活レベルの向上により、ごみ中に堆肥に適さないばかりか有害成分が絶えず増加し、堆肥製品の品質に不利な影響を与えている。さらに、堆肥製品の付加価値の低下、狭い用途、季節的な販売、堆肥施設のごみ処理助成金のレベルが低いなどの問題が、この技術採用の縮小状況を直接引き起こしており、2007年におけるごみ処理中の堆肥の割合は2001年の8.8%からわずか2.6%まで減少している！

3、外国におけるごみ処理方法

表1は一部の主要先進国のごみ処理方法である。全体的に見ると、ヨーロッパ、米国では埋め立てが依然としてごみ処理の主な方法となっている。その中でも英国が最高で80%以上が埋め立て処理を採用しており、米国は56%となっている。欧州連合(EU)25カ国平均の埋め立て割合も54%に達している。先進国であろうと、異なるごみ処理方法に対する市民の受け入れ度合い、処理コスト、土地資源状況などが異なるゆえに、各国が採用する主流のごみ処理方法も異なる。国土が広大な国は伝統的なごみ埋め立ての採用に偏っており、日本など一人当たりの土地

Country/region	Landfilled (%)	Incinerated (%)	Recycled, composted or other treatment (%)
EU-25	54	16	20
EU-15	49	18	33
UK	80	7	12
France	43	32	25
Germany	25	22	53
The Netherlands	8	33	59
Luxembourg	21	44	35
US	56	15	29
Japan	7	77	15

◎表1 一部の国におけるごみ処理方法（2001年）

（出典：Tony Griffiths, Keith Williams, Thermal treatment options, http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Griffiths_Thermal_treatment_options.pdf）

Year	Incineration	Landfill	MBT*+RDF**+Composting+Recycling
1993	7%	85%	8%
2004	11%	54%	35%

◎表2 イタリアにおけるごみ処理方法の変化

*: MBT: Mechanical-Biological Treatment

**：RDF: Refuse Derived Fuel

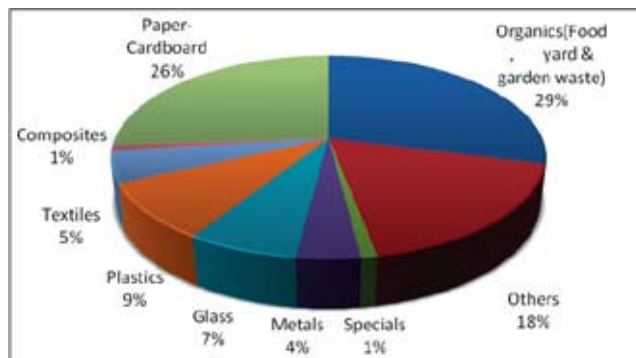
（出典：David Newman, Residual Waste Management in Italy, an Overview of Recent History and Future Trends, CONFERENCE "THE FUTURE OF RESIDUAL WASTE MANAGEMENT IN EUROPE" 2005）

面積が相対的にやや狭い国では占用面積が小さく、減容減量の程度が高いごみ焼却技術を採用している。各国の資源回収の意識が絶えず強まるにつれ、資源の循環再生理念を基礎としたごみ資源回收利用技術の採用がますます幅広く評価されている。例えばオランダ、ドイツのごみ回収利用率は50%以上に達している。イタリアにすると、1993年から2004年まで、ごみ埋め立ての割合は85%から54%まで下がっており、MBTなどの方法を採用した資源回収技術処理の割合は8%から35%まで大幅に増加し、同期の焼却の割合は7%から11%とわずかに上昇しただけであった。

4. 国内外におけるごみ構成比率の分析

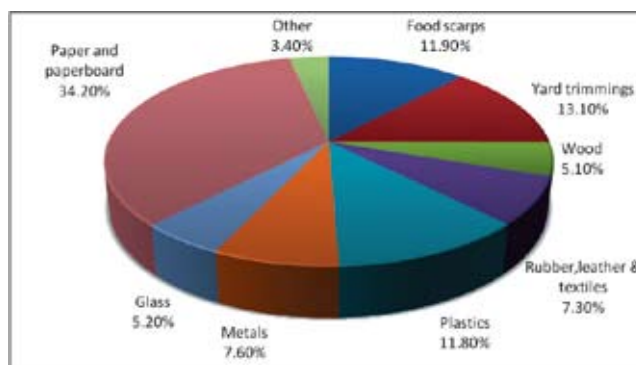
図7、図8および表3の比較から、異なる国、地区のごみ成分にやや大きな差のあることが分かる。まとめていうと、生活レベル、習慣の差により、経済先進国および地区におけるごみ中のプラスチック、紙ごみの含有量が相対的にやや高く、ヨーロッパ、米国などは40%以上、日本はさらに60%に達している。さらに、金属、ガラスの割合も比較的高く、含有量は10%を超えている。有機廃棄物（生ごみおよび庭ごみを含む）の割合も比較的低く、通常は30%を超えない。このようにごみ全体の含水量は比較的低いが、発熱量はやや高く、2500~3000kcal/kgに達する。

アジアの発展途上国におけるごみの共通する特徴は生ごみなど有機物の含有量が高く、その含有量は通常40%以



◎図7 ユーロッパ都市部における生活系ごみの平均的な構成比率（1998-1999, ユーロッパ39都市）

（出典：Municipal Waste Minimisation and Recycling in European Cities, Association of Cities for Recycling, <http://www.acrplus.org/upload/documents/document306.pdf>）



◎図8 米国におけるごみ構成比率（2005年）

（出典：MSW in the United States, 2005 Facts and Figures, US EPA）

Country/District	Organic waste	Paper	Plastic	Glass	Metal	Others
China	35.8	3.7	3.8	2.0	0.3	54.3
Hong Kong	37.2	21.6	15.7	3.9	3.9	17.6
Indonesia	70.2	10.9	8.7	1.7	1.8	6.2
Japan	17	40	20	10	6	7
Laos	54.3	3.3	7.8	8.5	3.8	22.5
Malaysia	43.2	23.7	11.2	3.2	4.2	14.5
Myanmar (Burma)	80	4	2	0	0	14
Philippines	41.6	19.5	13.8	2.5	4.8	17.9
Indonesia	70.2	10.9	8.7	1.7	1.8	6.2
Japan	17	40	20	10	6	7
Laos	54.3	3.3	7.8	8.5	3.8	22.5
Malaysia	43.2	23.7	11.2	3.2	4.2	14.5
Myanmar (Burma)	80	4	2	0	0	14
Philippines	41.6	19.5	13.8	2.5	4.8	17.9

◎表3 アジアの一部地区におけるごみ成分（2001年）

（出典：Institute for Global Environmental Strategies (IGES) (2001). Urban environmental challenge in Asia: current situations and management strategies. Part I: The summary of UE 1st phase project. Urban Environmental Management Project, Hayama, Japan.）

	Organic waste	Paper	Plastic	Glass	Metal	Textile	Other inorganic waste
Percentage	49.5%	10.9%	21.0%	3.8%	2.3%	6.9%	5.6%

◎表4 広州市における近年のごみ構成比率

上であり、最高70%まで達する。紙ごみ、プラスチックの含有量はやや低く、通常30%以下である。生ごみなど有機ごみがやや高い水分を含有しているゆえに、ごみの全体的な含水量は通常50%以上あり、発熱量も低く、一般的に約1000kcal/kgである。

中国におけるごみ成分はここ数年で著しく変化した。都市化過程の加速により、都市部におけるガス普及率も大きく向上した。2007年までに、中国の都市や町におけるガス平均普及率は87.4%まで達し、2000年の45.4%を大きく上回った¹⁾。ほとんどすべての都市居住者はすでに煉炭を生活エネルギーとして直接使用しないゆえに、ごみ成分中の無機性焼却残渣の割合は急激に低下した。多くの都市部において、ごみ中の無機物（ガラス、金属を除く）は主に環境衛生や道路清掃で出る土砂であり、生活系ごみである建築、内装工事のごみが少量混入する。例えば広州など大都市部における土砂ごみなどの無機物含有量はすでに10%以下まで下がっており、表3（2001年以前）の数値を大きく下回っており、発熱量もある程度向上して、1400kcal/kg以上に達している。全体的にいて、中国都市部における生活系ごみの成分は大まかにいうと、生ごみなど易分解性有機物が約50%、可燃性有機物（プラスチック、紙ごみ、繊維など）が20~40%、無機物（ガラス、金属、土砂など）が20%以下であり、含水率は通常約50%で、平均発熱量は1100kcal/kg以上である。

5、国情に合わせたごみ総合処理技術

ごみ処理技術の選択にはさまざまな要因を総合的に考慮する必要がある。例えば、土地資源状況、立法要求、住民の民意や受け入れ度合いなどさまざまであるが、結局のところごみの基本特性に基づき適切な方法を選択する必要がある。

中国都市部における生活系ごみ処理にはいまだ多くの問題が存在する。

一、生活習慣、認識レベル、経済社会発展段階などの原因により、中国のごみ収集は混合収集が主となっており、ごみ成分が複雑で、無機物・生ごみ・水分の含有量が高く、発熱量が低いといった三高一低の特徴がある。

二、現在の処理方法は単体技術が主である。埋め立て方式は広大な土地資源を占用し、大気、土壌と水源の二次汚染といった隠れた危険が存在し、ごみ中の資源を浪費してしまう。堆肥方法では非腐敗性有機物と無機物を処理できず、減容、減量および無公害化の程度が低い。焼却方法は投資とランニングコストが高く、排煙の二次汚染制御が非常に難しく、資源を最大限活用することができない。まとめると、各単体技術は中国のごみ特性に対して適用性が弱く、高効率、低コスト、資源化、ごみ資源の利用といった要求をすべて満たすことができない。

三、現在、応用している埋め立て、焼却などの最新技術、例えば埋め立て技術中のコンパクタ、埋め立てごみガス

発電の内燃機、焼却技術の炉排煙、排ガスの浄化などキーテクノロジーと設備などは依然として輸入に頼っている。

ごみ問題を解決するため、「ごみは資源であり、資源は利用しなければならない」を認識の基点とし、先進技術を通し、都市部のごみを減量し、ごみ中の各種物質を利用可能な資源に最大限転換し循環利用しなければならない。ごみを単純に処理するのは経済的かつ科学的ではなく、必ずその土地に適した措置をとり、ごみ中の構成要素の多様性に対し、資源、エネルギーの回収を出発点とし総合的に利用しなければならない。総合的な利用には以下の各分野の内容を含めなければならない。

- 1) 利用可能な物資（紙ごみ、金属、ガラス等）の回収・再生・利用
- 2) 易分解性有機物の堆肥処理
- 3) 高発熱量の難分解性有機物のエネルギー利用
- 4) 焼却残渣の固形化処理、焼却残渣の材料化の実現

現在、中国国内のある機関はすでにこの試みを始めており、よいモデルケースおよび採用効果を得ている。（図9、図10）。技術がさらに完成するにつれ、この種の資源を最大限回収することを目標とした技術、低投資、高効率な資源利用、経済性が高いごみ資源利用の方法は、中国におけるごみ処理において今後徐々に重要技術になってゆくと確信させてくれる。



◎図9 広東博羅300トン/日の都市部生活系ごみ資源化循環利用技術モデル工事



◎図10 四川宜賓500トン/日の都市部生活系ごみ資源化利用工場

6、技術推進中に存在する問題

1) 考え方の問題

ごみは資源であり、資源の利用方法は多種多様であるが、ごみ成分・性質に基づき分類し資源化することで環境調和性と経済性を一致させる可能性がある。

2) 政策の問題

現在、国はごみ処理費用の有料化政策を積極的に推進している。しかし、多くの地方において、総合処理技術に対し制定した処理費用基準が焼却発電の処理費用基準よりはるかに低く、総合処理技術の推進に不利となっている。

3) 工業化過程と肥料需求の矛盾

工業化発展が速い地区は人口が多く、生活系ごみの排出量の増加ペースも速い。建設ごみ処理施設建設の経

済基盤を備えているが、地元農業生産が縮小しており、肥料需要が少ない。この矛盾した販路問題を解決するには肥料の品質と付加価値を向上させることしかできないが、それにより肥料の販売と応用範囲を拡大し、肥料の販路問題を解決することができる。

7、結論

ごみ総合処理技術は発展途上国のごみの基本特性に相応しい技術計画である。ごみ中の各成分の異なる物理的性質に基づき、異なる単体技術を採用しごみを処理し資源化利用する。これは、「土地に適した措置、物に適した措置」、ごみの「減量化、再利用、再循環」といった循環経済の目標を実現する重要な技術である。

中国海洋生物資源の持続利用に関する研究

•Profile•



李 新正 Li Haibin ●中国科学院海洋研究所 研究員

1963年10月生まれ。1991年南開大学動物学専攻、理学博士。発表論文130以上、専門書3部、科学普及専門書1部。現在、中国甲殻類動物学会秘書長等をつとめる。

1. 前言

現在人類は「人口激増、資源欠乏、環境悪化」という三大問題に直面している。陸地の資源は日に日に減少しており、地球表面積の71%を占める海洋に対する開発は、人類にとって、21世紀の社会発展と資源の持続可能な利用のための重要課題となっている。豊かな海洋資源には、人類社会が今後も発展を続けていくための可能性がある。海洋資源には、海水水力、金属・非金属鉱床、石油・天然ガス等の資源のほかに海洋生物がある。これは、現在そして将来、人類が期待できる最も重要で最も直接的な資源である。海洋生物を利用した食品は、人類のたんぱく質需要の大部分を満たし、また多様な海洋生物は、新薬の重要な原材料にもなる。海洋生物の多様性によって人々はさまざまな景観を楽しむことができ、また海洋植物の光合成と発光生物は、二酸化炭素を吸収して地球温暖化を緩和している。

しかし、テクノロジーや国際貿易の発展に伴い、人類の影響はすでに遠く遠洋にまで及んでいる。農業とは何の縁もない南極大陸のペンギンの体内にさえDDTが存在しているし、海岸線は流出油で汚染され、シロナガスクジラは絶滅の危機に瀕している。しかし生物種と生態系が最も被害を受けているのは、やはり人類の居住地域に最も近い海域、つまり海岸地帯と近海である。海洋の遺伝、生物種、生態系の多様性が失われることそのものが、地球全体にとっての危機である。人類はほとんどが陸地に居住しており、多様な海洋生物資源の喪失に対する人々の注意は、陸地にはるかに及ばない。

陸地と比較すると、海洋生物の研究が始まったのは比較的遅く、説明されている海洋生物種も少ない。しかし海は生命のゆりかごだと言うように、海洋生物は陸地に比べて豊かで多彩である。動物界を例にとると、海には世界中に現存する32の動物門のうち31門が生息しており、そのうち14門は完全に海洋生息している（それに対して完全に陸生なのは1門のみ）。ほか5門のうち90%以上の種が、主に海洋に生息している。海洋の生命財産は生物種の数だけにとどまらない。地球上で観測される、生産力が最も大きい地域は北太平洋の海藻床である。サン

ゴ礁は、熱帯雨林と同じように生物種が多様なことで知られており、地球生物の遺伝子ライブラリである。最近の調査によれば、深海にも非常に多様な生物種が存在する可能性があり、海底の熱水泉口群が発見されてから30数年の間に、科と亜科が新たに20以上、族が50、新種が100ほど発見されている。入り組んだマングローブ林の海岸から、何も特徴がないように見える大洋の中心水域まで、海洋生態系の多様性は、少なくとも陸地生態系に引けはとらない。しかし、海洋生物の多様性に対する人類の理解は、非常に限られたものである。例えば、生命進化の過程でも重要な生物と考えられているシーラカンスは、1938年になってやっとインド洋にまだ生息していることが発見された。以前は化石として知られるだけであった。1977年には東太平洋で初めて熱水泉口が発見され、同時に熱水泉口にはこれまで人類がまったく知らなかった特殊な動物群系が存在しており、そこには複雑な生態系と独特な物質エネルギー循環システムが備わっていることも発見された。深海海底部にはまだ説明されていない生物種が100万以上存在すると、科学者たちは予想している。海を知ること、海洋生物の多様性と生物資源について詳しく研究することは、海洋の開発利用の過程で、人類にとって長期的で欠くことができない任務である。

2. 中国の海洋生物の多様性

2.1. 中国の海洋環境と生物多様性の一般特性

中国海域は、黄海（渤海を含む）、東海、南海で、中国が管轄する海域は緯度にして38度（遼東湾先端から曾母暗沙まで）にわたり、約300万平方キロである。世界にある49の大海洋生態系のうち、中国海域には黄海大海洋生態系、東海大海洋生態系、南海大海洋生態系、黒潮流域大海洋生態系の4つがある。この4つの生態系は、水文、生物区系、生産力それぞれに特徴がある。中国の海岸線は全長約18000キロで、岩岸、砂岸、泥岸がある。干潟の面積は2.07万平方キロで、各岸にはそれぞれ独特の海岸生物群と生態系がある。中国海域の潮汐には、半日潮、1日潮、混合潮の3種類があり、福建沿海で潮位差は最大8メートル以上になるのに対し、西沙群島ではわずか0.8メートル

ルである。潮間帯の生態系は潮汐と密接な関係があり、中潮帯（つまり本当の意味の潮間帯）では生物の種類が最も多く、数も最大である。水温は海洋生物種の性質を制約する最大要素の一つだが、2月には南北端で水温差が33℃になる。中国近海の流れは、主に黒潮とその分枝、現地で生成される沿岸流、モンスーン海流であり、そのほかに低塩を特徴とする河口流、低温と高栄養塩を特徴とする湧昇流がある。湧昇流の生態系は生産力が高く、漁場の所在地であることが多い。中国沿岸の1500本の河川が海に流れ込んでおり、大量の有機質と栄養塩を海に注ぎ、海洋生物の繁殖にとってよい条件となっている。河口は海水・淡水の入れ替わりと軟弱な底質を特徴とし、長江河口（崇明）や遼江河口等、北方の干潟ではアシが繁茂している。珠江河口、九龍江河口、南渡江河口等、南方や台湾の一部河口の干潟ではマングローブ林が発達している。河川河口の干潟は、多くの渡り鳥の生息地でもある。中国沿岸には6000個以上の島があり、島の効果によって島周辺の海域は生物種が最も豊かになっており、島の生物区系には非常に特色がある。旅順口の先にある蛇島がその好例である。

広大な海域面積、複雑な地形、変化に富む多様な理化学的条件に恵まれている中国海域の生物は、非常に多様である。中国の海洋生物には、特有の門の種類が多い、生物種が淡水環境よりも多く陸地環境より少ない、北から南下するにつれて生物種の分布が増加する、暖水種が多く、ほかに広域分布種と温暖種、さらに少数の冷温種がある、といった特徴がある（劉瑞玉等、1986年。黄宗国、1994年a）。

これまでに、中国の海洋生物類別のほとんどについては分類学的研究がなされ、これらの生物種について説明されている。しかし多くの単細胞生物、小型生物、微生物、採集や発見が難しい生物については、今後の研究が待たれる。サンゴ礁の生育環境、深海の生育環境、熱帯海域の生物種についても、調査と分類学研究がさらに必要である。

2.2. 中国の海洋生物群系と生物種資源

中国はアジア太平洋地区でも生物種が最も豊富な国であり、海洋生物の生物種も非常に豊かである。すでに発見・説明がなされている海洋生物は、黄宗国（1994年b）の統計によれば約20,278種、劉瑞玉（2008年）は22629種と統計している。後者の統計で扱った門の種類数は前者より少ない。前者について後者と同分類で統計をとると、合計17511種になる。つまり中国海域では、黄宗国（1994年b）と劉瑞玉（2008年）がともに統計をとっている同じ門の種類の中で、14年間に5118種、29%増加したということになる。しかし、中国海洋生物の生物種はこの数字にとどまらない。調査能力の向上、調査設備の改善、海洋環境、特に深海・遠洋・特殊環境に対する認識、小型・微生物研究器具の更新や研究手段の進歩にともない、中国の海

洋生物科学技術の担当者は、海洋生物種を常に記録しており、新たな海洋生物資源とその生物学上の特徴を発見している。

2.2.1. 海洋植物

海洋植物については通常、大型藻類、単細胞藻類（微藻類）、高等海洋植物に分類して研究を行う。大型藻類には藍色植物門、紅色植物門、褐色植物門、緑藻植物門があり、単細胞藻類には珪藻植物門、炎色植物門、黄金色植物門がある。うち珪藻植物門は単細胞藻の中でも代表的な存在で、海中の単子葉植物である海藻や、熱帯・亜熱帯の浅瀬に特有の木本植物であるマングローブと同様に、高等植物である。統計によれば、中国でこれまでに把握されている大型藻類は約1200種、海草は13種、マングローブは約30種である。海草には重要な経済的価値がある。食用できる藻類には、紅色植物門のノリ、テングサ、褐色植物門のコンブ、ワカメ、藍色植物門のスピルリナ等があり、工業原料としてアガロース、カラギーナン、アルギン酸等を抽出することができる。紅色植物門のテングサ、オゴノリ、褐色植物門のヒジキ等、多くの種には抗癌性物質や、血管疾病・ヨウ素欠乏症に有効な活性物質が含まれており、海洋薬品開発のための広い可能性がある。施普瑞、PPS、ヨウ素錠剤等一部の薬品はすでに開発に成功している。単細胞藻類は、海洋浮遊植物のなかでも主要な存在であり、海の第一段階の生産力に最も貢献し、他の海洋生物に大量の食料を提供している。マングローブは広西、広東、台湾、福建、海南島に分布しており、海岸でさまざまな高さのマングローブ林を形成して、海岸や干潟を保護する役割を果たしている。また魚、エビ、カニ等が繁殖しやすい場所を作り、海岸に生物多様性の高い区域を形成している。

2.2.2. 海洋無脊椎生物

海洋動物の門の種類は非常に多いが、無脊椎動物はさらに複雑多岐にわたる。中国では主な分類上すでに分類学と区系の研究が行われている。統計によれば、中国海洋でこれまでに記録されている原生動物は約2700種、海綿動物190種、腔腸動物約1000種、多毛類環形動物1000種あまり、軟体動物3900種あまり、甲殻類動物4000種あまり、棘皮動物580種あまり、苔虫動物470種あまりである。

これらは多くが人類の生活と深いかわりを持っている。有孔虫、放散虫等の原生動物は、地層年代を判別するための指標生物であり、腔腸動物である大型のヒドラは漁場の目印になる。造礁サンゴはサンゴ礁を形成する主要な海洋生物であり、中国熱帯海洋にあるサンゴ礁は、各種海洋生物が成長繁殖するための豊かな環境を生み出している。そこには多種多様の生物種が生息し、海の中でも生物種が最も多様な区域になっている。中国南海海域の水深50-100メートルにある暗礁には、水草に形が似たシロガヤが広範囲にわたって分布しており、「擬似草原」と呼ばれて、これも海洋生物の多様性が高い区域になっ

ている。苔虫動物もサンゴ礁を形成する主要な海洋生物の一つである。

多毛類環形動物、軟体動物、節足動物、棘皮動物は、海底生物の主要群系である。多毛類動物は隠れ住む性質があり、体が柔らかく脆いため、発見・採集が困難であり、実際の種類と数量は私たちの想像をはるかに超えると考えられる。海洋食物連鎖の上できわめて重要な存在である。甲殻類動物は水層、海底、深淵、浅海、潮間帯、泥砂底、岩礁、サンゴ礁、マングローブ林、海草床等の各種海洋環境に生息し、海洋生態系の中でも非常に重要な地位を占めている。底生生物の重要群系であるだけでなく、遊泳生物と浮遊生物の主な群系でもある。種類も多く、「海の昆虫」とも呼ばれる。居住環境が複雑多様なため、まだ知られていない種類も大量にある。甲殻類動物は海洋でも種類が最も多い生物群系であると見られている。軟体動物門は、海洋で現在知られているうち種類が最も多く、経済価値が最大の無脊椎動物門の一つであり、海洋生態系、特に底生生物の中で重要な群系であるとともに、生物量の主要な貢献者である。棘皮動物は底生生物の中でもよく見られる群系で、海洋生態系、特に底生生物の中で重要な地位を占める。

無脊椎動物の多くは重要な経済種である。例えば甲殻類動物のエビ、カニ、軟体動物のホタテガイ、アワビ、棘皮動物のナマコ、ウニ等は重要な海産物である。小型のものは魚やエビにとって天然の飼料となり、キチン質は工業用や医薬原料として使われる。一部は、薬品、工芸品、飼料等としての価値をもつ。

近年、海洋活性物質の研究開発が進んでおり、特に海綿動物、腔腸動物であるサンゴ、イソギンチャク、棘皮動物であるヒトデ、尾索動物であるタコ等の動物活性物質に対する研究・選別は非常に活発である。海洋無脊椎動物は、将来重要な薬品原材料となると考えられる。

一部の無脊椎動物は人間の生活に危害を及ぼす。例えば、ある種の原生動物は過度に繁殖すると赤潮を形成したり、魚やエビなど大型動物の体に寄生・付着して病害を招く。甲殻類動物のフジツボ、苔虫動物、軟体動物の二枚貝類等は、危害の大きい汚染生物であり、軟体動物のフナクイムシは、漁船や海岸の木製施設を壊すことがある。ヒトデは肉食性の棘皮動物で、サンゴ、貝類、藻類等に大きな危害を与える。

海洋無脊椎動物にはほかに、動物門、線形動物門、鉤頭動物門、有鬚動物門、被囊動物門、星口動物門、ユムシ動物門、鰓曳動物門、内肛動物門、箴虫動物門、腕足動物門、紐形動物門、扁形動物門、毛顎動物門、半索動物門、尾索動物門等の群系があり、これらは種類が少なかったり分布地域が狭いために軽視されやすいが、中国の海域には基本的に全種類分布している。このように多種多様な動物門類によって、海洋生物には高い多様性が現れ、海洋生態系の安定性が保たれ、人類に重要な海

洋資源が提供されている。

2.2.3. 海洋脊椎動物

海洋の脊椎動物は主に魚類である。統計によれば、中国でこれまでに知られている海洋魚類は3000種を超え、世界の海洋魚類の約4分の1を占めている。海洋魚類は最も重要な海洋生物で、種類が多く数量も大きい海洋の支配者であり、海洋の食物連鎖の中では頂点にある。そればかりか、海洋漁業全体を左右する地位にあり、重要な海洋生物資源である。薬用することができる有毒種もある。

魚類のほかに、海洋脊椎動物には爬虫類（ウミガメ等）、鳥類（カモメ、ペンギン等）、哺乳類（クジラ、アザラシ、イルカ等）があり、いずれも生態系面、経済面で一定の価値をもつ。

このほか海洋には、従属栄養菌類や炭化水素分解菌等の細菌、各種微生物がある。これらは数量が非常に大きい場合もあり、海洋生態系の中でも欠かせない部分を構成している。

3. 海洋生物の多様性に関する研究と保護

海水環境は、人類が海洋に進出する際の天然の障壁となっている。海洋についての研究と開発には困難が伴い、海洋生物の多様性に関する研究と保護も複雑である（MAB中国委員会、1988年）。しかし海洋生態系は、陸地の廃棄物排出の最終地点であり、大部分の廃棄物は最終的にここに集まる。地球の気候変化と人類の活動の活発化にともなって、海に対する人類の活動の影響はますます重大になっている。海洋生物の生存環境・生存条件はますます厳しくなり、海洋生物の多様化はより一層の脅威にさらされている。河口湾、塩沼、マングローブ林、海草床等、都市部に近い生態系には、ほぼ世界的範囲で深刻な退化が起きている。船隻はバラストタンクの中に海洋生物の卵や幼虫を大量につけているため、混み合う港では外来種は珍しいものではない。多い場合は半数を超える生物種が外部から侵入したもので、これらの生物種は土着種に甚大な衝撃を与え、ひどい場合には絶滅させてしまう。農業用水系を受け入れている多くの港湾は、農薬汚染や農林業による土砂沖積のつまりに見舞われている。世界的に増加しているサンゴの白化は、おそらくサンゴ礁とその他の海洋生態系に大規模な生態変化が現れる前兆であろう。地球の気候変化と人類の活動が、遠く離れた地域にまで影響を与えている。

海洋の全体的バランスと海洋資源の持続生産・機能を維持するため、海洋生態系の組成生物種を研究・保護するだけでなく、生態系全体に注目し、海洋生物の多様性に関する現状と変化の規則性を研究する必要がある。海洋生物の多様性保護については、この30年でようやく重視されるようになってきた。以前そして現在も、地域によっては海洋は人々の生活に関わる要素ではないため、

それが受けている危害について注意が払われてこなかった。海に捨てられた廃棄物は簡単に消えてしまうかに見えて、ほとんど警戒されていなかった。また人類にはこれまで、海を守る目的で管理するという伝統がなかったが、陸地の保護区は設けられてからすでに1世紀以上たっている。そして大部分の海洋区域は法定の領海外にあり、たとえ「排他的経済水域」であってもすべて共有の財産である。なぜなら海は、各国がその開発を競い合っている一種の「開放的資源」だからである。

しかし、海洋資源は取り尽くせない、使い終わらないものではない。巨大に見えて実は限りある海洋生物資源に対して必要な保護をせず、統括的で合理的な開発利用ができないのなら、陸地ですでに発生している森林面積の大規模な減少、深刻さを増す砂漠化、害虫の猖獗といった現象が海でも発生するだろう。人類が海洋生物資源を永遠に利用し続けることは不可能である。実際、海洋生物資源がすでに取り返しのつかない破壊を受けている海域もある。開発と保護、発展と環境のメリットとデメリットの全体的なバランスをとることが、生物資源の持続利用の鍵である。安定的な生態系があってこそ生物資源を安定的に提供できる。通常、ある生物群系に含まれる生物種が豊富であればあるほど、生物どうしの関係が理にかなったものになる。すなわち生物の多様性レベルが高いほど、そのシステムは安定的になる。

海洋生態のバランスに影響を与える要素は多い。近年は、特に汚染によって引き起こされる水質悪化で生物の生息環境が損なわれ、また乱獲によって経済種の個体群が減少、消滅している。

中国では近年来、海洋環境保護に関する研究や政策法規の制定を強化している。しかし多くの場面でまだ法規制定の遅れや不備が見られ、適用できる法規がない、あるいは法規があっても期限が切れているという事態が発生している。一部の地区では海水汚染がひどくなる一方で、生物種の消滅や個体群数量の低下が起きており、その生態系にある生物の多様性が薄れ、生物種どうしの相互依存関係が破壊されている。それによって生態系自体が非常に敏感になり、バランスが弱まって崩壊しやすくなるとともに資源の著しい衰退が起こる。海藻等浮遊生物が爆発的に繁殖して赤潮を起こすと、大量の海藻が海面を覆って海水を空気から遮るため、海水が激しい酸欠状態になって多くの海洋生物が死滅する。1998年の3月から4月にかけて、中国珠江河口地区では激しい赤潮が相次いで発生した。これはギムノディニウムの爆発的繁殖によって起きたもので、漁業が1000万元に上る損失を受けた。

乱獲も海洋生物資源の減少を招く根本原因の一つである。中国では漁船の船舶数とトン数が急速に増加し、漁具も進歩して漁獲能力が大幅に上がっている。このことは、中国経済の発展と人々の生活レベルの向上に貢献し

ているものの、過度な漁獲も避けられない。中国の四大海産物として挙げられる大黃魚（大キグチ）と小黃魚（小キグチ）は、1950年代から1970年代初めにかけては、資源量と漁獲量がまだ大きく、市場への供給も豊かであった。小黃魚の1957年の漁獲量は16.3万トン、大黃魚の1974年の漁獲量も19.7万トンに達している。しかし1970年代中期に漁船のトン数が大幅に増え、大・小黃魚に対して略奪的な捕獲が行われたため、資源の根本に致命的な破壊と打撃が加わり、必要な資源補充が間に合わなくなった。1982年からその捕獲量は激減し、中国近海の大・小黃魚資源は徐々に枯渇して、魚群はほぼなくなっている。過度な捕獲によって、市場に出回る多くの海産物も次第に小型化、幼体化している。1990年代末には黄東海のサワラが大量に市場に出回ったが、これはまだ成長しきっていないサワラの幼魚が捕獲されたもので、とても痛ましかった。渤海萊州湾の漁業資源群構成と生物多様性の調査によると、1998年の漁獲量平均は、1959年の3.3%、1982年の7.3%しかなかった。生物多様性は1959年から1982年にかけてわずかに上昇したものの、1982年以降は下降の一途をたどっている（金顕仕と鄧景耀、2000年）。海南島鹿回頭湾の潮間帯と潮下帯は、中国の代表的なミドリイシサンゴ帯で、たいへん美しい景観を誇っていた。ミドリイシサンゴは「石花」とも称され工芸品の材料になり、また焼いて石灰にし建材にもされるため、現地では大量に採掘された。鹿回頭湾のミドリイシサンゴは壊滅的な採掘に遭い、1980年代末には湾内には生きたサンゴはほとんどなく、死滅したサンゴの石が残るだけで、もともとそこに生息していた他の生物もそれに伴って消滅した。これに対して国は、三亜に国家レベルのサンゴ礁自然保護区を作り、まだ採掘されずに残っている地域を保護することとしたが、すでに破壊された地点の回復は全く不可能である。南沙群島のサンゴ礁も厳しい脅威にさらされている（中国科学院南沙総合科学調査隊、1994年）。

海洋養殖業は中国で長い歴史があり、中国国民経済にとって重要な貢献をしてきた。1980年代以降、中国では、藻類や貝類の干潟養殖、網箱養殖、いかだ養殖など、近海養殖業の発展に力を注いできた。1996年の中国の海水養殖生産量は437万トンで、海洋水産品の年間総量の28%を占めた。しかし、大規模な近海養殖と養殖業の急速すぎる発展は、海産物の品質低下を招いている。養殖対象の近親繁殖や高密度の養殖が行き過ぎると、体質の劣化や病気に対する抵抗力の低下が起こる。えさのやりすぎも海域汚染を招く。また養殖品種が海へ流入し、天然品種と交配することで親となる天然固体の体質が弱くなっている。そのほかに、導入した養殖品種を逃がしてしまうことで現地の生態系はさらに弱まり、それによってすでに世界各地で起きている重大な養殖病害が、中国でも発生している。1993年中国では、養殖タイショウエビに

広範囲で深刻な爆発的ウイルス病が発生し、養殖池内の半成体のエビが数日間ですべて死滅するという事態が発生した。その後、国と地方政府が大量の資金を何度も投入して、この病害に対する予防治療に取り組んでいるが、現在まで根本的な解決には至っていない。タイショウエビ養殖業はそれ以来立ち直れず、南米産バナメイを取り入れて主要なエビ養殖品種とせざるを得なくなった。1997年中国ではホタテガイ養殖もまた重大な被害を受けた。商品として成長しきる直前の貝が突然発病し、大量に死滅してほとんど出荷できなかった。専門家の分析によれば、これも体質低下によりウイルス感染した伝染病のためだという。

このほかに、干拓や堤防の建造によって引き起こされる生育環境の喪失、バラスト水の持ち込みや人工的な導入による外来種の侵入も、中国海洋生物の多様性が損われる原因である。

海洋生物の多様性は、人類に大量の資源を提供しているが、この資源の持続利用はまた人類自身が与える脅威にさらされている。幸運なことに生物資源は再生でき、持続利用が可能である。海洋生物資源を科学的に利用することは、海洋生物の多様性に関わる者の職責でもある。人類が海洋生物資源の開発利用を今後も続けるのなら、まず海洋生物資源の構成を理解し、それに基づいて保護と合理的開発の方策を制定し、厳しい法律法規を整備し、海を汚染する全活動を抑止し、過度の捕獲を禁止し、海水養殖にも新たな発想と技術を取り入れて、伝染病の流行や爆発的な病気の発生を防ぐ必要がある。

海洋経済を積極的に発展させ、海洋資源を合理的に開発利用していく必要性は、政府部門と研究者にとって徐々に共通認識となっている。1990年代以降中国では、中国

海域の各海区について休漁期を設け、休漁期間中は、各種船隻によるその海域での捕獲作業を禁止している。その後、各海域の休漁期はしだいに延長され、範囲も拡大して、繁殖期間中の海洋生物の幼体を保護するために役立っている。それが合理的な捕獲方法であり、海という、再生可能な人類の食物資源を、持続可能なかたちで利用していくための重要な対策である。一部の経済魚類では、休漁期制度の実施後に資源量が大幅に増大し、顕著な増産効果が得られた。海上養殖については、養殖区の合理的な区分、生理・病害の研究、品質向上等によって被害を減らすよう、専門家も提案している。そして海洋汚染の防止は、海洋生物資源を私たちが持続的に利用できるかどうかにとって、さらに重要なポイントであり、中国の人々、特に政府担当部門の目の前に置かれた、長期にわたる重い任務である。政府部門による法整備、法執行は、ある海区の海洋環境が有効な保護を受けるための鍵であり（李新正等、2001年）、国の自然保護区や多くの地方海洋自然保護区を設置することは、生物資源を有効に保護するためにふさわしい措置で、すでに顕著な成果を得ている（王斌、1999年）。中国では生物多様性を守るためにすでに多くの措置がとられているが、これを有効なものにしていくため、今後も徹底・強化が必要である。

皆が協力し合い、海に関する知識を啓蒙し、関係法規を円滑・有効に制定・実施し、海洋環境保護と海洋科学技術に対する社会全体の意識を高めていくことで、人類が海と海洋生物の真の友人となり、海洋資源を合理的かつ科学的に開発利用すれば、人類は豊富な海洋生物資源を利用し続けることができるだろう。海がもう一度青くなれば、未来はもっと良くなるはずである。

参考文献

- MBA中国委員会、1988年 人類は地球の一員 北京：北京出版社
 黄宗国（編）、1994年b 中国海洋生物の種類と分布 北京：海洋出版社
 黄宗国、1994年a 中国海域生物種の一般的特徴 生物の多様性2(2):63-67
 金頭仕 鄧景耀、2000年 萊州湾漁業資源群の構成と生物多様性の変化 生物の多様性8(1):65-72
 李新正 于海燕 王永強 帥連梅 張宝琳 劉瑞玉、2001年 膠州湾大型底生生物の生物種多様性の現状 生物の多様性, 9(1):80-84
 劉瑞玉（編）、2008年 中国海洋生物目録 北京：科学出版社
 劉瑞玉 崔玉珩、徐鳳山、唐質燦、1986年 黄海・東海底生生物の生態特徴 海洋科学誌 27:153-173
 王斌、1999年 中国海洋生物の多様性保護と管理対策 生物の多様性 7(4):347-350
 中国科学院南沙総合科学調査隊 1994年 南沙群島とその近隣海区における海洋生物の多様性に関する研究 北京：海洋出版社

循環型社会の構築における日中協力の可能性

•Profile•



吉田 綾 よしだ・あや ●国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究センター 研究員

1978年10月生まれ。2006年3月東京大学工学系研究科都市工学専攻 博士（工学）。2006年4月に国立環境研究所に入所。現在の研究テーマは、アジア地域における廃電気電子機器の処理技術の類型化と改善策の検討。（独）国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究センター オンラインマガジン 環境：http://www-cycle.nies.go.jp/magazine/top/20090824.html

循環型社会を構築する上での基本法である「循環型社会形成推進基本法」が2000年に成立した。循環型社会とは、天然資源の消費と廃棄物の発生を抑制し、再利用する物質の流れを作り、廃棄物の処分や資源の循環的利用が適切な管理手法のもとで行うことで環境負荷を出来る限り低減される社会と位置付けており、発生抑制、再使用、再生利用、熱回収、適正処分を廃棄物・リサイクル対策の基本的な優先順位と考えることが規定されている。

この枠組み法のもとに「容器包装リサイクル法」「家電リサイクル法」「自動車リサイクル法」「建設リサイクル法」「食品リサイクル法」などの個別の廃棄物・リサイクル法が施行されている。拡大生産者責任を導入した使用済み製品の回収・リサイクルの制度の構築されている。産業界では副産物利用の促進や政府による環境配慮製品の購入の促進、市民によるごみの分別排出、レジ袋削減などの取り組みが実施されてきた。これまで多くの技術、制度、システムを生み出しており、アジアなどの途上国の今後の施策作りにも貢献できる可能性がある。

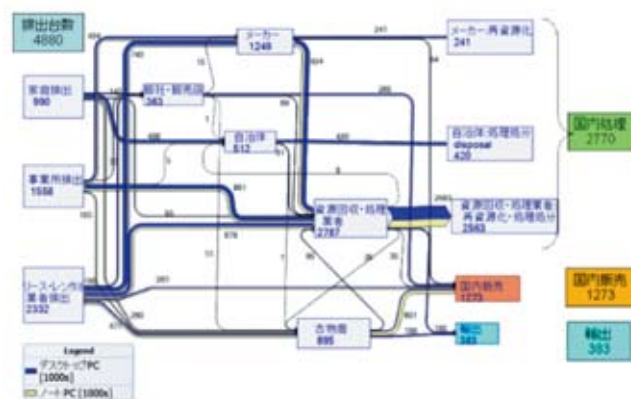
本稿では、国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究センター（以下、循環センター）において進めている中核研究「国際資源循環を支える適正管理ネットワークと技術システムの構築」の研究概要を紹介しつつ、中国における循環型社会形成に関する取り組みの現状の理解のもとに、今後の日本のどのような取り組み・経験を紹介することが可能かについて述べてみたい。

国境を越える資源循環

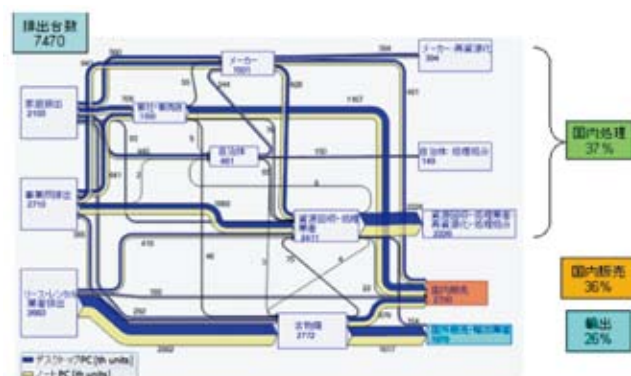
日本において、リサイクル法が制定された時期と現在とで、最も大きく変化したのは、「資源の流れ」である。これまでは廃棄物として国内で処理・処分されていたものが有用な資源として国内でリサイクルされ、一部は国外へも輸出されるようになった。経済のグローバル化によって、国境を越える資源循環も無視できなくなっており、廃プラスチックやe-wasteと呼ばれる使用済みの電気電子製品などがその代表例である。

循環センターでは、使用済み電気電子機器、いわゆるE-wasteの国際資源循環に関する研究を行っている。

例えば、使用済みパソコンについては、誤差最小化法を用いて、2000、2001と2004年度のデスクトップ（本体）およびノートパソコンのフローを推計し、リサイクル制度の施行前後の変化を把握した。その結果、2000年度および2001年度は、それぞれ392万台、488万台の使用済みパソコンが排出され、そのうち約3分の2にあたる量が国内で処理・リサイクルされ、4分の1が国内でリユースされ、8%が海外へ輸出されたと推計された。一方、家庭系パソコンのリサイクルが開始された後の2004年度は747万台が排出され、国内処理・リサイクル、国内リユースおよび海外輸出の割合は37%、36%、26%と推計された。



◎図1 2001年度の使用済みパソコンのフロー（単位：千台）



◎図2 2004年度の使用済みパソコンのフロー（単位：千台）

リサイクル法制定まで、使用済みパソコンや家電は粗大ごみとして自治体で破碎され、鉄などの金属回収した後の残渣を埋立処分されていた。リサイクルが自治体からメーカー系に移行したことは、資源利用・埋立処分量の削減の観点から効果があったが、使用済みパソコンは、なかなか国内では回収できていないのが実情である。

リサイクル法制定時にはこれほどの規模での国際資源循環を想定しなかったため、リサイクル法のシステムと国際循環の実態との調整を図る検討や見直しが進められている。循環センターでは、有価金属の国外への流出や国外の技術でどの程度効率的な貴金属や希少金属の回収ができていたかといった視点から、調査研究を行っている。

中国における循環経済の推進

中国は改革開放以来、目覚ましい経済成長を遂げてきた。しかし、その一方で、エネルギー消費量の増加や資源不足、低い資源利用率が、経済発展のボトルネックとなっているといわれている。この問題に対して、中国政府は、資源節約型、環境友好型（環境にやさしい）社会の建設、人と自然の調和の取れた経済・社会の発展を目指し、資源の有効利用と環境保護を達成することは、経済成長への制約を緩和し、経済的な利益を得ることに繋がると明確に位置付けている。この考えに基づいた「循環経済」(Circular Economy) 政策では、廃棄物のリサイクルだけでなくとどまらず、省エネルギー、省資源（原材料）、節水を含めた広義の循環利用の意味で捉えており、日本の「循環型社会」と比べると、より幅広い概念となっているのが特徴である。

企業の生産活動において省エネルギー、副産物利用などの促進し、クリーナープロダクションを進めるため、「清潔生産促進法」が2002年に制定、2003年1月1日から施行された。循環経済への転換の基本法として「循環経済促進法」が制定され、2009年1月1日から施行に至っている。このほか、生態工業園區 (Eco-industrial park) の建設が進められている。エコタウンについては、2009年6月に東京で開催された第2回日中ハイレベル経済対話において、環境省と中国環境保護部の間で、瀋陽市—川崎市の間で環境にやさしい都市の構築に関するモデル事業を共同で推進することが合意されており、今後さまざまな調査研究や事業が実施される見込みである。

家電リサイクルについては法案が公布され、2011年1月1日に施行される見込みであるが、その他の各種廃棄物については、まだ対策が不十分である。中国政府は、日本に対して容器包装、廃タイヤ、庭園（剪定）、食品廃棄物などの回収リサイクルについて、処理リサイクル技術や制度構築に関する協力を求めている。

アジア向けの現地適合型の技術開発

アジア地域の一部の大都市では急速な経済発展により、廃棄物対策も進んできているが、中小都市や農村地域などにおいては、生活雑排水・し尿などの液状廃棄物の適正処理が遅れている状況にある。循環センターでは、アジア地域における分散型の高効率、低コストな液状廃棄物対策として、これまでに蓄積してきた生物工学および生態工学を基盤とした浄化槽などの技術やノウハウを活用し、アジア地域での適正な資源循環に資するシステムを提案しようとしている。これまでに、中国をはじめとしたアジア地域の生活雑排水・し尿などの汚水処理の実情を調査し、生活排水の特性が日本と異なる場合があることや、浄化槽技術等の導入による環境負荷削減効果などについて検討を行ってきた。こうした経験をベースとして、2006年には、中国環境科学研究院（北京）においてアジア向けの高効率浄化槽などの汚水処理システムの性能評価装置が導入され、その展開が期待されている。

日中の社会経済状況の違い

中国における生活ごみ収集運搬量は1億4841万トン（2006年）に達している。中国では、ほとんどの都市で混合収集が採用されている。約8割が埋立処分されているが、一部の都市部では堆肥化や焼却処理も行われるようになっている。

日本の分別収集についての取り組みが周知され、多くのアジア諸国でも取り込まれるようになった。中国においても、都市ごみの分別収集が1985年ごろから各地で提案・実施されているが、市民の意識が低く習慣として定着しない、収集運搬の効率が悪く、分別用ごみ箱を設置しても結局は混合収集されているなどの理由により、依然としてモデル事業の展開にとどまっている。

これらの背景には、資源ごみを有価買取する非公式な回収・分別業者や個人の存在や、効率的な物流業者、適切な引き渡し先（リサイクル・処理業者）がないなどのインフラ未整備の問題があげられる。分別回収された資源ごみの引き渡し先の開拓、行政とリサイクル事業者との調整業務が不可欠であり、このようなソフトな分野においても日本経験ノウハウを伝えていく必要がある。

しかしながら、日本と中国では経済社会状況に大きな違いがあるため、日本の制度設計の経験や技術がそのまま役に立つ訳ではない。例えば日本ではリサイクル企業が処理費用をもらって処理・リサイクルをする必要がある廃棄物も、中国では安価な労働力による手分解・選別によって処理されるため、有価で取引されるものが多く、これらの回収処理に従事する個人や小規模事業者を管理（監視）できないという特有の難しさがある。このような社会経済状況の違いを認識しつつ、研究活動を一層推進し、我々の研究成果がみならず中国における処理リサイクル技術の改善や制度構築に貢献できればと思う。

都市廃水・廃棄物からの資源・エネルギー回収システム

•Profile•



津野 洋 つの・ひろし ●京都大学大学院工学研究科 教授

1947年4月生まれ。1978年工学博士。1973年京都大学助手。1975年国立公害研究所・環境庁。1983年京都大学助教授。1997年京都大学教授。主な研究テーマは、水質汚濁機構の解明と下水・廃棄物処理技術の開発。日本下水道協会有功賞、月刊水質、日本オゾン協会論文賞、日本水環境学会学術賞などを受賞。



日高 平 ひだか・たいら ●京都大学大学院工学研究科 助教

1974年9月生まれ。2002年京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻修了、博士（工学）。2002年京都大学助手。2007年京都大学助教。主な研究テーマは、下水・廃棄物処理技術の開発。土木学会論文奨励賞、下水道協会誌奨励賞論文賞などを受賞。

1. はじめに

資源や環境資源を我々の時代に消費し尽くすのではなく、子々孫々が使用しうると持続的発展の理念が提示されている。また、一方で、石油、石炭や天然ガスなどの化石燃料の使用による、大気中の二酸化炭素濃度の上昇に伴う地球規模の温暖化が懸念され、温度変化、異常気象、海面上昇などの問題が議論されている。この温暖化については、平成17年に「京都議定書」が発効され、我が国も率先して対応しなければならない。持続的発展と地球温暖化問題は、別の局面で論じられていることが多いが、この根底に流れているのは共通であり、資源の循環利用である。また、我が国は、国産の化石燃料資源をほとんど有しておらず原子力を除いたエネルギー自給率は4%程度と非常に低い状況である。さらにその50%を輸入される石油に頼っており、それも9割近くを中東に依存している。原油価格の高騰や不安定化がいつも懸念されており、エネルギーの自給率の向上が求められている。我が国では2度の石油ショックを受けて省エネルギー機器の開発が進んできた。個々の機器の省エネ化は今後も重要で開発されなければならない。しかしながら、より効率化のためには、創エネルギーも含めて社会システムの考えることも重要である。都市の根幹施設としての下水道は、分散資源の収集システムとしても働き、都市廃水・廃棄物からの資源・エネルギー回収システムの核となりうるものである。

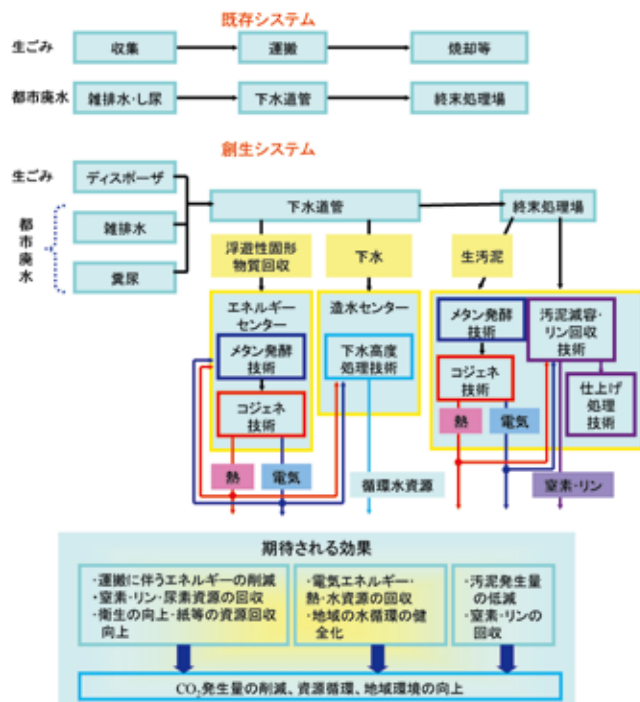
今までの社会システムは利便性や経済性の追求の価値判断を基に構築されている。この価値判断の下では、バイオマス・ニッポン総合戦略で対象とされている廃棄物

系バイオマスや未利用バイオマスは使い物にならず処理しなければならないとされてきた物であり、これを二酸化炭素発生量の削減という新たな価値の目的達成のために利活用することは、そのみが目的であれば、容易には進展しないと考えられる。構想される社会システムは、国民にとって、より利便性を感じ、福祉に富み、新たな希望を膨らますものでなければならない。そうであれば、現在よりも高規格の社会システムが構築され、経済の活性化、国民の幸福度の増進、そして持続的発展が期待される社会の構築に寄与することとなる。下水道の分野においても、地域の健全な水環境を保全し、健全な水循環の保全・創造に寄与し、福祉に富み、かつ資源・エネルギーの回収・循環型である高規格下水道が模索されるべき時代となっている。すなわち、高度処理下水道から高規格下水道への時代である。この目標に向けて、一元化下水道の企画を目指したシステムの検討を行った。

2. 一元化下水道研究の概要

この研究では、都市で発生する廃水や廃棄物を資源、あるいは資源材料として取り扱い、都市や地域内で資源を循環利用することをコンセプトに、下水道共用区域の中で可能な地域を限り各家庭などからの生ごみを、ディスポーザを用いて下水道に取り込み、下水道システムでのポンプ場などの拠点で浮遊性固形物質を回収し有機物の効率的高温メタン発酵などによりエネルギーを回収し、発電し、その電気や熱の利用を図るとともに、下水から地域の水循環を支える用水を創出するという、都市廃水と廃棄物の一元化システムの確立を目指して、その

資源回収・循環型の都市廃水・廃棄物処理システム技術の開発



◎図1 資源回収型の都市廃水・廃棄物処理システムと要素技術

要素技術の開発を行っている。また、このシステムでは、余剰汚泥減量化・燐資源回収型下水処理技術を開発することにより、終末処理場では、初沈汚泥はエネルギー創出に用い、余剰汚泥生成量の減量と燐の回収も目的としている（図1参照）。

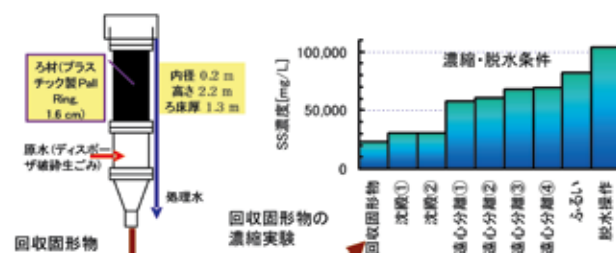
そして、このシステムを支える要素技術は、ディスポーザ粉碎生ごみと下水中浮遊固形物質の下水道管からの回収技術、回収浮遊固形物質および高温高負荷メタン発酵とエネルギー回収技術、効率的・省エネルギー型高度処理技術、ならびに終末処理場での汚泥発生抑制・燐回収型処理技術である。

このプロジェクトの実施により、生ごみの運搬に伴うエネルギーの削減、枯渇が懸念される燐の肥料としての回収、居住空間からの生ごみの消滅による衛生の向上と福祉の増進、紙などの資源回収率の向上、電気・熱・水資源の回収、地域の水循環の健全化、汚泥発生量の低減による省エネルギー化と処分地問題の解決、新たな産業の創出などの効果が見込まれ、もって二酸化炭素発生量の削減、資源循環型社会の構築および地域環境の向上に大きく貢献するものと考えられる。

3. 要素技術開発

(1) ディスポーザ粉碎生ごみと下水道からの浮遊固形物質回収技術

ディスポーザ処理液からの回収技術として、沈殿、ろ過、メッシュ分離および浮上分離を試験し、ろ過が最



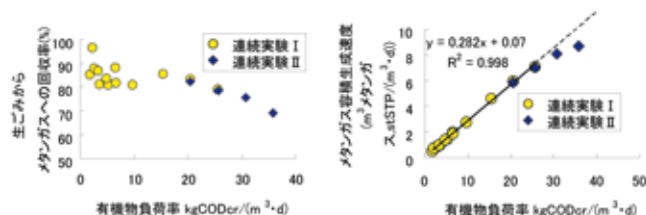
◎図2 ろ過実験装置と濃縮・脱水実験結果

も良好に適用可能であり、回収されたSS濃度は10,000～20,000 mg/Lであることを示し、それらを80,000mg/Lまで簡単に濃縮する方法を開発した（図2参照）。

また、ディスポーザの導入により、下水中の溶解性の有機物は増加するが溶解性の窒素や燐はほとんど上昇せず、生物学的栄養塩除去には好影響であることやディスポーザ破砕液を含む下水汚泥はメタン発酵性がよいことも明らかにした。

(2) 回収浮遊固形物質の高温高負荷メタン発酵とエネルギー回収技術

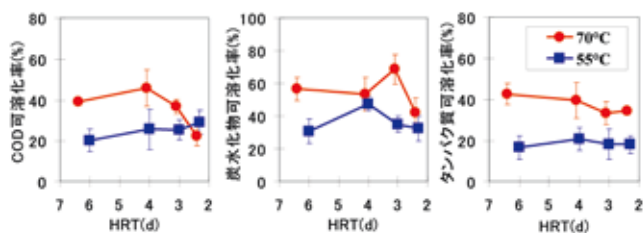
回収生ごみの高温・高負荷メタン発酵技術の開発を試み、汚泥を返送させる条件で安定化させることができ、CODcrベースで流入有機物の80%以上をメタンに変換する効率的な有機物負荷率として20 kgCODcr/(m³・d)が適切であることを明らかにした。そして生ごみ1 kgCODcr当たり280 Lのメタンガス(乾燥生ごみ1 kg当たり435 Lのメタンガス)が生成されることを明らかにした(図3参照)。また下水生汚泥と生ごみのメタン発酵も良好に行えることを示した。



◎図3 メタンガスへの回収率とメタンガス容積生成速度（生ごみ）

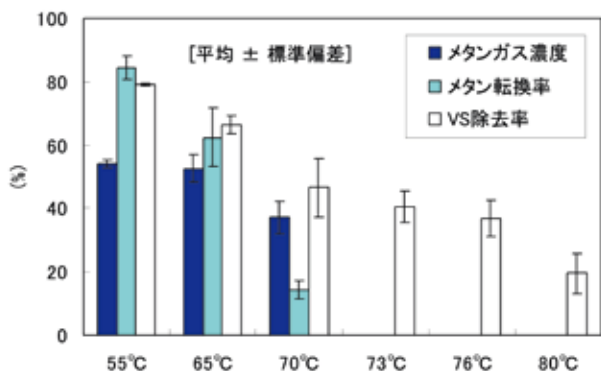
より安定的で効率的な処理技術として、都市内の廃熱などを活用することも意図して、高温処理よりも高い温度での超高温処理の検討を行っている。酸発酵槽におけるCODcr、炭水化物、およびタンパク質の可溶化率を比較すると、70℃と55℃の酸発酵槽で大きな違いがあることが分かる（図4参照）。

70℃においてHRTを6.4日から2.4日に変化させた場合は可溶化率は大きく変化したのに対して、55℃の場合はHRTを6日から2.3日に変化させても大きく変化しなかった。CODcr可溶化率は、70℃においては22～46%、55℃



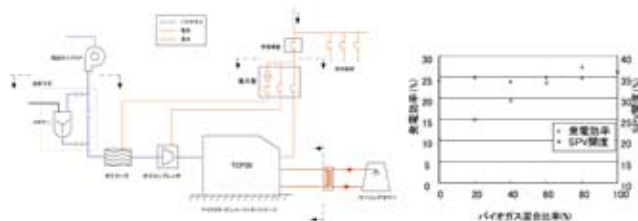
◎図4 超高温酸発酵槽の可溶化率（生ごみを主体とした基質）

においては21～29%が得られた。同様に、炭水化物およびタンパク質の可溶化率は、70℃でそれぞれ43～69%および34～44%、55℃でそれぞれ30～36%および17～21%であった。これらより、70℃の場合、55℃の場合より、いずれの可溶化率も高く、HRTは3日程度以上とするのがよいことが示された。温度を55～80℃で運転したメタン発酵槽でのCODcr基準メタン転換率、メタン濃度およびVS除去率を比較すると、55℃で運転した高温メタン発酵槽は安定した処理成績を示したのに対して、65℃から80℃の温度で運転した超高温メタン発酵槽の場合はメタン転換率およびメタン濃度が減少する傾向が見られた（図5参照）。65℃でpHを調節した場合、メタン転換率は62.5%、70℃では14.5%であったのに対して、温度を73℃に上げると、メタンガスは生産されなかった。これらの結果より、超高温酸発酵－高温メタン発酵を組み合わせた技術の開発を行っている。



◎図5 超高温メタン発酵の検討（生ごみ）

メタン発酵ガスを用いた発電では、マイクロタービン発電機（発電容量28kWと排熱回収装置（出力56kW）を一体化したもの）を用いて、生ごみメタン発酵ガスと都市ガスの混焼実証実験を行い、その適用性と必要技術を検討し、発電効率は任意の混合ガス比率で、流量制御弁（SPV）の開度を調節することで、タービンの運転停止をせずに安定して運転可能であることを実証した（図6参照）。また、下水汚泥の消化ガスでの連続運転実証実験により、定格出力で安定して連続運転が可能であることが確認され、シロキサンによる影響部位も確定された。現

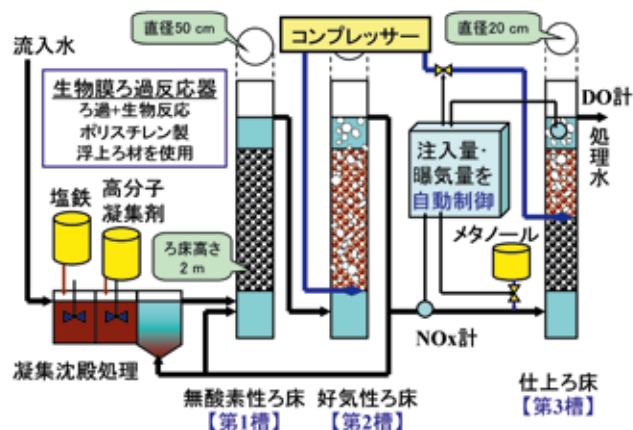


◎図6 マイクロタービン発電システムとバイオガス・都市ガス混焼実験結果

場での発電により熱を有効に利用できれば、エネルギー利用効率は70%にもなり、二酸化炭素発生削減に貢献できる。

(3) 下水道管の途中の拠点で高度処理水を得るための効率的・省エネルギー型高度処理技術

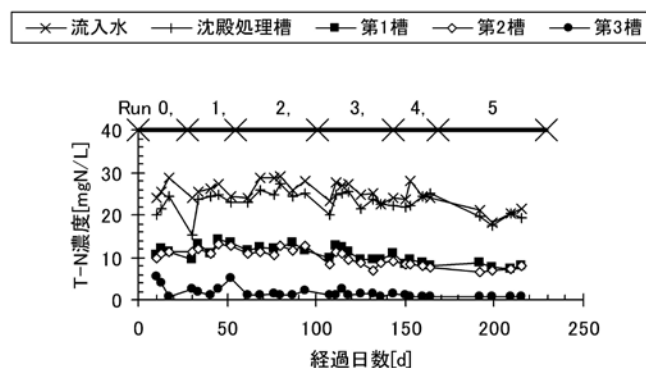
自動制御を有し自動運転可能な前凝集・生物ろ床タイプの物理生物化学的処理プロセスを開発した（図7参照）。



◎図7 高度処理実験装置

ろ床部での全滞留留時間は3時間程度でBODは5 mg/L程度、全窒素は2 mg/L以下（図8参照）、SSは3 mg/L以下、そして燐は0.2 mg/L以下、透視度は100度以上と、安定して処理しうることを実証した。

また硝化液を前凝集沈殿池の下部へ循環させることで、凝集生汚泥中の有機物を脱窒の水素供与体として活

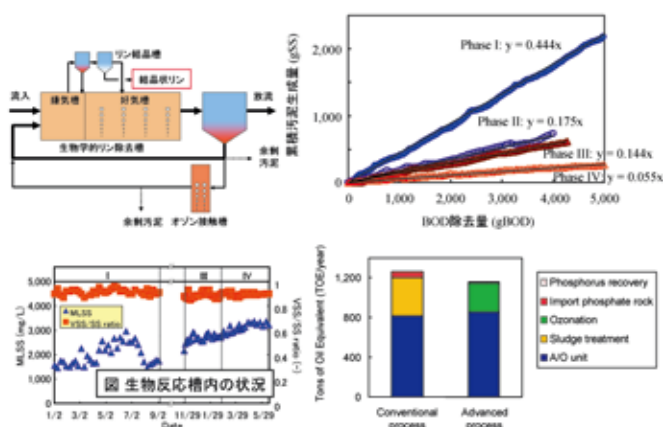


◎図8 窒素の処理特性

用することを試みた。その結果、硝化液を脱窒ろ床へ循環させるフローと同程度の処理時間で、同様の処理水質が得られることが示された。沈殿池内では2～5 mg/L程度のDO消費、および1～3 mgN/L程度の脱窒が進行していた。処理水量あたりの逆洗汚泥量および逆洗排水量の処理水量に対する割合も、同程度であった。流入S-CODcr/S-N比が5 mg/mgNの場合、処理水量1 m³あたり必要なメタノール量は20 mlであり、9 ml (31%)削減可能である。この装置の運転に必要なエネルギーは上述のメタン発酵の技術と組み合わせるとかなりまかなえることも明らかにされた。

(4) 終末処理場での汚泥発生抑制・磷回収型処理技術

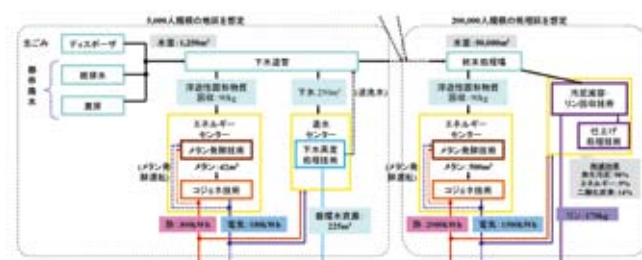
磷の濃縮と溶出という生物学的磷除去生物の特性と汚泥の可溶化・基質化というオゾン処理の特性を組み合わせ、磷を結晶の形で回収する技術の開発を行ってきた(図9参照)。これは、生汚泥はメタン発酵しやすいが、余剰汚泥は比較的しにくいことによる。汚泥の可溶化率は30%が適切で、そのときのオゾン消費量は30mgO₃/gSSであり、汚泥発生量を90%程度削減でき、70%程度の磷を回収でき、さらにエネルギー消費量を10%程度削減しうることを明らかにした。



◎図9 磷回収型処理技術

(5) システム全体でのエネルギー評価

得られた各要素技術の研究成果を組み合わせ、一元化下水道システムについて、エネルギー、磷資源や地球温暖化の観点からのシステムフローとそれによる効率の試算結果を図10に示す。都市廃水・廃棄物からの資源・エネルギー回収の観点で、大きな効果が期待される。



◎図10 得られた結果を基にした1つのシステムフローとそれによる効率(1日あたり)

4 おわりに

本研究成果が、実際の社会システムに使われ、高規格下水道の促進と福祉の向上に、また省エネルギーで資源循環型社会の構築に寄与できれば幸いである。またそのようになる努力を続ける所存である。これは、我が国の科学技術の発展に寄与し、世界のこの分野でのトップランナーとなり、さらには税金収入の増加にもつながる。将来の安定的な二酸化炭素排出量の削減施策にも重要である。

謝辞

これらの研究成果は、科学技術振興機構の戦略的基礎研究推進事業(CREST)「資源回収型の都市廃水・廃棄物システム技術の開発」、ならびに(財)鉄鋼業環境保全技術開発基金、(財)関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団、および(財)クリタ水・環境科学振興財団からの助成で行ったものを含んでおり、関連各位に謝意を表します。

日本の一般廃棄物の処理・リサイクルの動向

•Profile•



占部 武生 うらべ・たけお ●龍谷大学理工学部環境ソリューション工学科教授

龍谷大学理工学部環境ソリューション工学科教授、博士(工学)。1968年、横浜国立大学工学部金属工学科卒業。1988年より東京都清掃研究所主任研究員、2002年より東京都環境科学研究所 応用研究部長、2004年より現職。専門は廃棄物工学。金属学会技術開発賞、日本機械学会環境工学部門技術業績賞、環境大臣賞（廃棄物・浄化槽研究開発部門）、廃棄物学会功績賞を受賞。

1. はじめに

2000年循環型社会形成推進基本法が制定されるとともに、これに前後して容器包装リサイクル法、家電リサイクル法等の個別リサイクル法が制定された。基本法では、まず再使用、再生利用（リサイクル）、熱回収といった循環的な利用を図り、循環的な利用が行われないものは適正に処分することが規定されている。最近では、循環型社会と低炭素社会の形成の統合化を図る施策が採られている。

一般廃棄物の2006年度の年間総排出量は5200万トンで、1人1日当たりの排出量は1115gである。焼却比率は78%と高く、資源化率、埋立量については数値目標を立てその実現に努めている。ここでは、こうした社会状況下での一般廃棄物の処理・リサイクルの動向について述べる。

2. 処理とリサイクルの動向

1) ごみ質

容器包装リサイクル法の施行にともない紙やプラスチック容器の分別収集を行う自治体が増え、ごみ質への影響が出ている。この傾向がさらに進み厨芥の比率が増加すれば、発熱量がかなり低下することになり、厨芥の別途処理を検討する必要が生ずることも考えられる。ところで、1980年代と現在を比べた時、ごみ質の特徴的な変化の例として、塩ビ比率の低下、Cd、Hg等の重金属含有量の低下をあげることができる。これらは法規制されているわけではない。代替製品の開発・普及等によるものと考えられる。

2) 焼却・溶融

焼却炉では現在でもストーカ式が最も多い。流動床式焼却炉は減少したが、それに代わって溶融炉が増加している。焼却にともなうダイオキシン類の削減策として、燃焼室の高温化、燃焼ガスの攪拌の促進等が行われ、従来に比べて完全燃焼化が進み、ダイオキシン類の低減、未燃ガスの減少が実現している。燃焼室の高温化にともない、ストーカの水冷化、蒸発管壁へのパネル設置等が行われ、現在のところ比較的順調に稼働している。溶融

処理で生成されるスラグの生産量は85万トン（2008年見通し）に達している。スラグの日本工業規格が作られているが、スラグの用途の拡大が課題である。焼却灰の資源化としては、溶融スラグのほかにセメント原料化、エコセメント化があり、これらについては数は少ないが実機が稼働している。

焼却処理においてHC 1の高率除去を要する場合洗煙処理を行うケースが多いが、最近では吹き込み用消石灰の微粉化やNa系吹き込み材による安価な乾式除去で20～30ppmに除去できている。また、確実なNO_x除去に触媒脱硝方式が多く採用されているが、装置入口での排ガス再加熱に要するエネルギー削減のため、触媒使用温度の低温化に向けた開発が行われている。

3) 発電、熱利用

2006年の発電付きごみ焼却施設数は291、総発電能力は158万kWである。環境省は温室効果ガス対策の切り札として、2012年の総発電能力の目標を250万KWとしている。これにともない、高効率発電を促進するため交付金比率を通常の1/3から1/2とする処理量別発電効率（例えば601～800t/日で21%、1801t/日以上で25%）を定めている。

1990年代初頭までは過熱蒸気の圧力は3MPa、温度は300℃が主流であったが、最近では発電能力向上のため4MPa、400℃が広く採用されるようになり、さらに高温高压化が図られているケースもある。400℃での過熱器材はSUS310レベルのものが使用され、5年以上使用されているケースがいくつかある。焼却物としてRDFを用い、過熱器材にSUS310レベルのものをを用い430℃で稼働している循環式流動床炉で、過熱器材が激しい腐食を受けたケースがある。ボイラの高圧高温化に当たっては、溶融塩腐食等に対して各種配慮が必要になる。このように発電による廃熱利用は進んできたが、欧州でみられるような近隣地域への熱利用はほとんど進んでいない。温室効果ガス対策からも温水、蒸気等の利用促進が課題である。また、焼却施設の低温廃熱を利用する技術として、蓄熱材の液体、固体間の変態を利用して20km圏内にコンテナ車で熱供給が行える方式が研究され、実用化しようとしている。

4) 材料問題

利用温度の高温化にともない、ストーカ式焼却炉においてはストーカ、蒸発管、過熱器管が、外熱式熱分解ガス炉では空気予熱器が、熔融炉では耐火物の損傷が大きな問題になっている。このように、従来に増して材料問題の比率が高くなっており、ネックになっている材料問題が解決すればコスト低減や効率アップ、あるいは新たな処理法につながる場合もある。熔融炉における耐火物材や高温空気予熱器材については、精力的に研究・開発が行われているが、まだ対応できる材料は開発されていない。

5) プラスチック

容器包装リサイクル法により自治体に回収されたプラスチックは、パレット、板材等のマテリアルリサイクルのほかに、高炉還元剤としての利用やコークス炉化学原料化、合成ガス化等のケミカルリサイクルとして実用化している。この場合、前処理として塩ビの除去が行われる。

一般廃棄物からごみ固形燃料（RDF）を製造し、連続式焼却炉で発電することを国は推奨してきたが、三重県のRDF発電施設のRDF貯蔵用サイロで爆発事故が起こった。そこでは、現在RDFの保管管理を徹底して稼働している。この事故を契機にしてRDF施設の新たな建設は進んでいないが、産業廃棄物系の紙、プラスチックを主成分とする固形燃料（RPF）の製造施設は増加している。

6) 安全対策

廃棄物処理作業時の事故発生率は他に比べてかなり高い。これまでも火災、爆発等の事故はあったが、前述したRDFサイロで7人の死傷者が出た爆発事故は、廃棄物処理においてその危険性を予知し十分な管理をすることの必要性を強く認識させた。

7) 炭化、バイオガス化、亜臨界水処理

新しい処理方式としてバイオガス化、炭化、亜臨界水利用式等がある。炭化炉は外熱式ロータリキルン式で処理量が40 t/日・炉程度のものが稼働している。廃棄物からの炭化物は、灰分が多いこと、Cl含有量が高く、燃料等への利用にあたっては、洗浄により塩素や灰分の低減化が必要な場合がある。ここでも生成物である炭化物の用途開発が課題である。厨芥、紙等の乾式バイオガス化は実証段階から実用化に入りつつあるが、残さの利用/処理、ごみからのバイオガス化可能物の効率的選別等が課題となっている。亜臨界水領域でごみを処理する方式は10トン強/日・炉のものが稼働しており、実用化に入りつ

つある。

8) 埋立

日本では、大都市で管理型海面埋立がされているケースがあるが、準好気性の管理型山間埋立がされている場合が多い。焼却灰などを対象としたクローズドシステム型処分場も研究開発され、すでにいくつか稼働している。浸出水の処理では、難分解性有機物、アンモニアの早期分解が従来からの課題として残っており、それらの研究がされている。覆土におけるメタン酸化菌によるメタン削減効果等についても研究されている。メタンガスを利用した発電施設が東京都で稼働しているが、焼却灰の埋立が主流になった現在、今後この方式の増加は見込みにくい。

9) 家電リサイクル

家電リサイクル法が施行され、現在6品目が回収・再商品化されている。それぞれについてリサイクル率が定められているが、リサイクル率をさらにあげるため、選別技術の開発・研究がされている。廃家電などの基盤、携帯電話等には貴重なレアメタルや貴金属等が使用されている。資源の枯渇等から最近それらの価格が高騰している。そのため、従来から言われてきた都市鉱山の利用が緊急の課題になっており、廃家電からのレアメタルや貴金属の回収技術が開発・研究されている。

3. おわりに

循環型社会、低炭素社会形成に向けた制度ができたことなどにより、製鉄、非鉄精錬、セメント等の日本の基幹産業が自らの施設を利用して資源循環に積極的に係わるようになった。施設の若干の改造等で資源循環が可能になり、副産物も既存のルートを使用できるメリットがある。資源循環をになう自治体や新たな企業等の存在も重要であるが、基幹産業を含めた既存産業の資源循環への係わりの強化が今後一層重要になると思われる。

これまで焼却、埋立等の海外技術を導入したあとなんとか使いこなすまでには人、時間を要することを経験してきた。こうした日本の過去の経験は途上国に参考になると思われる。ところで、日本の廃棄物の処理技術は焼却から埋立、リサイクルに至るまで多面的にカバーしており、一部のリサイクルを除いて世界的レベルに達している。今後は、循環資源の技術力を生かして広く世界に貢献していくことが課題と思われる。

亜臨界・超臨界水によるバイオマス廃棄物の有効利用技術の開発

•Profile•



佐古 猛 さこ・たけし ●静岡大学大学院創造科学技術研究部 教授

静岡大学大学院創造科学技術研究部エネルギーシステム部門教授。1951年11月生まれ。1976年名古屋工業大学大学院工学研究科修士課程修了。同年兵庫県立姫路工業高等学校教諭。1977年通産省工業技術院物質工学工業技術研究所入所。1986～87年カリフォルニア大学バークレー校客員研究員。2000年 静岡大学工学部物質工学科教授。2006年より現職。受賞歴：2008年化学工学会研究賞受賞。2007年日経地球環境技術賞受賞。2006年イノベーションジャパン2006・U B Sスペシャルアワード 環境・エネルギー部門賞受賞。著書：・超臨界流体技術の開発と応用（シーエムシー、2008年）・超臨界流体のはなし（日刊工業新聞社、2006年）・Supercritical Fluids (Springer、2002年)



岡島 いづみ おかじま・いづみ ●静岡大学工学部物質工学科助教

1997年 室蘭工業大学工学部応用化学科卒業。同年北海道リサイクル環境開発㈱入社。1998年通産省工業技術院物質工学工業技術研究所所属。2000年長崎三菱電機テクニカ㈱入社。2005年静岡大学大学院理工学研究科博士後期課程環境科学専攻、博士(工学)。2006年静岡大学イノベーション共同研究センター研究員。2007年より現職。受賞歴：2007年平成18年度日本エネルギー学会奨励賞。2006年プラスチック化学リサイクル研究会第9回討論会発表賞。著書：・「超臨界流体入門」（化学工学会超臨界流体部会 編）、丸善(2008)、6.7 各種超臨界流体によるプラスチックの分解・再生・「各種手法による有機物の分解技術」、情報機構(2007)、第1章第18節 超臨界流体を用いた有機物の分解技術の展開・「水—基礎・ヘルスケア・環境浄化・先端応用技術—」（大森豊明 編集代表）、エヌ・ティー・エス(2006)、第3章第9節 超臨界水の物性とその応用技術

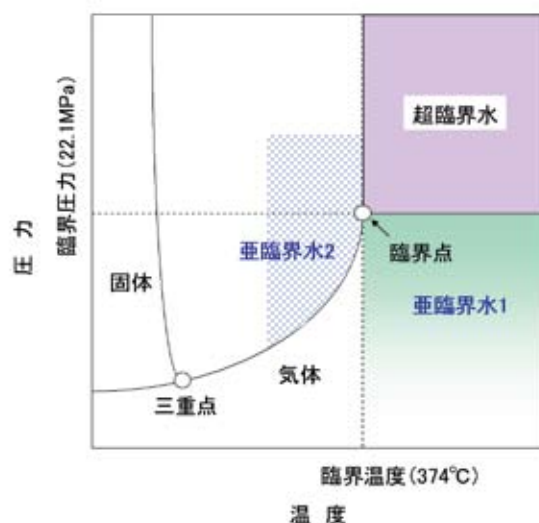
1. はじめに

地球環境の保全と資源循環型社会の実現のためには、食品廃棄物、家畜排せつ物、廃木材などの再生産可能でカーボンニュートラルのバイオマス廃棄物の有効利用が不可欠である。更に最近、これらの廃棄物の適正処理と資源化を促進する法律が次々と施行されていることもあり、エネルギー資源、化学原料、発酵原料等として活用するための技術開発が大いに注目されている。

その中で亜臨界・超臨界水を用いるバイオマス廃棄物の適正処理・資源化技術は有望な将来技術である。水は地球上に広く存在し、安価、取り扱いやすい、化学的に安定、環境への悪影響がないといった優れた性質を持つ溶媒である。この水を150℃以上、0.5MPa以上の亜臨界水や超臨界水にすると、水と熱エネルギーのみで有機物や無機物を処理できるというクリーンプロセス、多量の水分を含むバイオマス廃棄物を脱水や乾燥なしで処理できるという省エネルギープロセス、バイオマス廃棄物から有用資源の回収、エネルギーの回収、場合によっては完全分解・無害化といった様々な用途に使用できるという多目的プロセスの実現が可能になる。ここでは初めに亜臨界・超臨界水の特異な性質を示した後、近い将来、実用化が期待される亜臨界水によるバイオマス廃棄物の有効利用技術を紹介する。

2. 亜臨界・超臨界水とは？

図1に水の温度-圧力線図を示す。ここで水の臨界温度は374℃、臨界圧力は22.1MPaである。超臨界水とは水の臨界温度以上、臨界圧力以上の高温高压の濃い水蒸気



●図1 水の温度-圧力線図

である。一方、亜臨界水とは、水の臨界温度以上、臨界圧力以下の高温中圧の水蒸気（図中では亜臨界水1と表記）と、水の臨界温度以下で飽和水蒸気圧以上の中温中圧の液体水（図中では亜臨界水2と表記）のことである。400～650℃、10～30MPaの超臨界水と亜臨界水1は、液体と気体の両方の性質を併せ持っている。例えば、密度は室温の液体水（1g/cm³）の0.03～0.4倍程度であり、100℃、0.1MPaの水蒸気に比べて数十～数百倍大きい。一方、粘性率は気体並みに低く、自己拡散係数は液体と気体の中間程度である。つまり超臨界水と亜臨界水1は気体分子と同程度の大きな運動エネルギーを持ち、液体の1/10程度の密度を持つ非常にアクティブな流体といえ

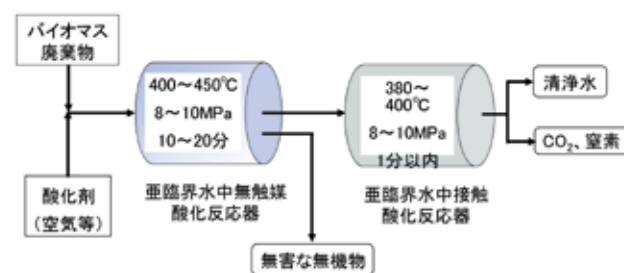
る。一方、150～350℃、0.5～25MPaの亜臨界水2は大きな加水分解力を持つ高温高压の液体水である。また亜臨界水や超臨界水は温度、圧力を制御することにより密度や溶解度等のマクロな物性から、流体分子の溶媒和構造等のミクロな物性・構造まで連続かつ大幅に制御することができる。

更に亜臨界・超臨界水は誘電率やイオン積という反応場に大きな影響を与えるパラメータを容易に制御できる。誘電率は溶媒の極性の尺度であり、溶媒は誘電率の近い値の物質をよく溶解する。例えば、室温、大気圧下の液体水の誘電率は約80であり、この時には誘電率の低い炭化水素（例えばベンゼンの誘電率は2.3）は溶解しない。しかし超臨界水や亜臨界水1では1～10程度と、無極性～弱極性の有機溶媒並みの値（例えば700℃、10MPaの亜臨界水1の誘電率は1.1）となるため、ベンゼンのような誘電率の低い有機物を溶解するようになる。一方、液体状態の亜臨界水2では、誘電率は15～45と弱～中極性の溶媒並になるので、多くの有機物を溶解できる。また水のイオン積は室温、大気圧下では 10^{-14} mol²/kg²であるが、400～650℃、10～30MPaの超臨界水と亜臨界水1では 10^{-15} ～ 10^{-29} 程度まで低下する。一方、亜臨界水2では 10^{-12} ～ 10^{-11} と、室温、大気圧下でのイオン積の100～1000倍になる。このように亜臨界・超臨界水は温度や圧力を変えることにより、単一溶媒でありながら水溶性から非水溶性の特性を示し、イオン反応場からラジカル反応場までを提供することができる。

3. 亜臨界水によるバイオマス廃棄物の資源化事例

3.1 二段式亜臨界水酸化法によるバイオマス廃棄物のクリーン燃焼・熱エネルギー回収技術^①

この技術で使用する亜臨界水は、図1中の亜臨界水1であり、水の臨界温度以上、臨界圧力以下の高温で加圧された水蒸気である。これまで多くの有機廃棄物処理では600～650℃、25～30MPaといった臨界温度以上、臨界圧力以上の超臨界水が用いられてきた。この水は非常に大きな分解力を持っているので、どのような有機廃棄物でも短時間に完全分解できるが、一方で処理条件が過酷でエネルギー多消費、耐熱・耐圧反応器が高価になる等の理由のために、一部を除いて実用化があまり進んでいない。そのために、無害で大きな分解力を持つ高温高压水の利点を生かしつつ、温度、圧力といった分解条件を緩和することが強く望まれている。筆者らは図2に示すように、400～450℃、8～10MPa、処理時間15～30分で運転する亜臨界水中無触媒酸化反応器と、380～400℃、8～10MPa、処理時間約1分以内で運転する亜臨界水中接触酸化反応器を直列につないだ二段式亜臨界水酸化装置を開発し、多種類のバイオマス廃棄物を上記の装置を用いて安全な無機ガスと水まで完全かつクリーンに酸化分解（亜臨界水中での燃焼といえる）し、発生する燃焼エ



◎図2 二段式亜臨界水酸化処理プロセスフロー

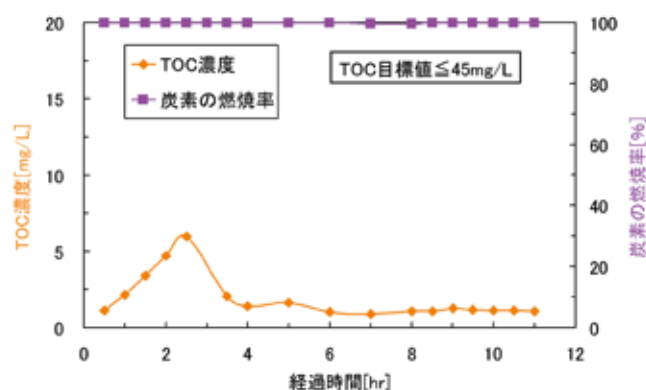
ネルギーを回収し有効利用する技術を開発した。すなわち従来の超臨界水を用いた酸化分解技術よりも、温度を200～250℃、圧力を10～15MPa下げることにより、省エネルギー性と経済性と操作性に優れた新しいバイオマス廃棄物の完全処理プロセスの開発を目指している。また反応条件の緩和による高温高压水の分解力の低下を補うために、高性能、長寿命、安価な固体触媒を採用している。

図3に、我々が開発した二段式亜臨界水酸化用パイロットプラントの外観を示す。この装置は、主に(1)バイオマス廃棄物供給ユニット、(2)酸化剤(圧縮空気)供給ユニット、(3)水供給ユニット、(4)第一段反応器(無触媒酸化)、(5)第二段反応器(触媒酸化)、(6)生成物回収ユニット、(7)高压用熱交換器・発電ユニット、(8)制御盤ユニットより構成されている。バイオマス廃棄物の処理量は最大30kg/hである。バイオマス廃棄物は高濃度のスラリー状態にして高压ポンプから第1段反応器に連続的に圧入している。

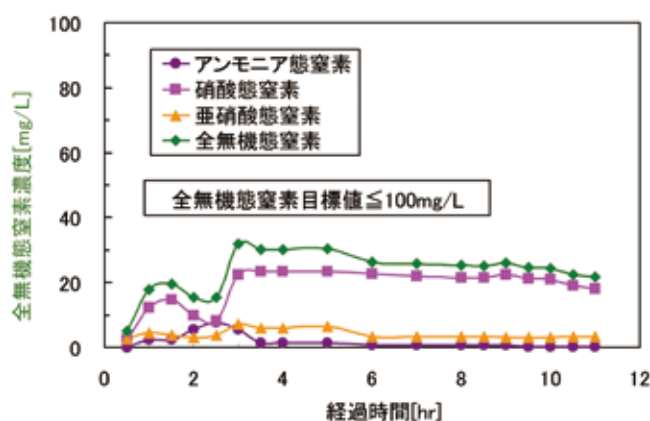


◎図3 二段式亜臨界水酸化用パイロットプラント

図4に、二段式亜臨界水酸化装置を用いて下水汚泥を処理した時、排水中のTOC濃度と炭素分の燃焼率の経時変化を示す。処理条件は、第一段反応器の温度及び圧力は413℃、8MPa、第二段反応器は384℃、8MPa、酸素比は1.3である。ここでTOC濃度の目標値は、排水中のCOD排出基準の120mg/Lから、TOC換算では $120 \times 12/32 = 45$ より、45 mg/L以下とした。排水中のTOC濃度は、処理開始2時間までは上昇傾向で最大7 mg/Lとなったが、それ以降は減少し4時間以降は2 mg/L前後と非常に低濃度で安定し、



◎図4 下水汚泥処理における排水中のTOC濃度と炭素の燃焼率の経時変化
(第1段反応器：413℃、8MPa、第2段反応器：384℃、8MPa、酸素比1.3、第1段反応器滞留時間17分、第2段反応器空間時間0.4分)



◎図5 下水汚泥処理における排水中の無機態窒素濃度の経時変化
(第1段反応器：413℃、8MPa、第2段反応器：384℃、8MPa、酸素比1.3、第1段反応器滞留時間17分、第2段反応器空間時間0.4分)

目標値である45 mg/Lの1/20以下になった。この時、炭素分の燃焼率は100%と完全燃焼を達成できた。

同じ排水中の無機態窒素濃度の経時変化を図5に示す。ここで全無機態窒素濃度は、 $\text{全無機態窒素濃度}[\text{mg/L}] = \text{アンモニア態窒素濃度}[\text{mg/L}] \times 0.4 + \text{硝酸態窒素濃度}[\text{mg/L}] + \text{亜硝酸態窒素濃度}[\text{mg/L}]$ で定義される濃度であり、目標値は排水の排出基準である100 mg/L以下である。11時間の処理時間の間、硝酸態窒素は平均で約20mg/L、亜硝酸態窒素は約5 mg/L、アンモニア態窒素はほぼゼロであり、全無機態窒素濃度は約25mg/Lと、目標値である100 mg/Lの約1/4まで下げることができた。これらの結果から、二段式亜臨界水酸化法により、後処理の不要なクリーンな排水として外界に排出できることが明らかになった。

家畜排せつ物や下水汚泥のように窒素分の含有率が高いバイオマス廃棄物を亜臨界水中で酸化処理すると、含まれている有機分は無害な二酸化炭素、水、窒素ガスまで変換されて系外に排出される。一方、空气中で焼却す

ると、主に窒素分に起因するアンモニアや窒素酸化物といった悪臭や有害成分が大量に生成し、外界に放出されて深刻な環境問題を引き起こしている。更に含水率が高いために未燃の固体残渣が大量に残る恐れもある。

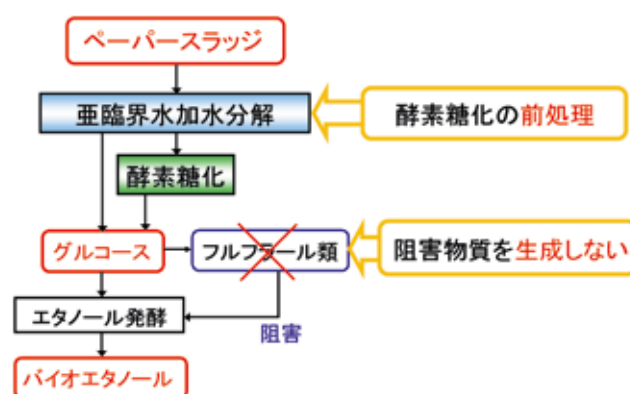
バイオマス廃棄物中の無機物について、亜臨界水酸化処理すると大部分は酸化物になり、固体として第一段反応器の底部から回収される。農業廃棄物や家畜排せつ物を処理すると、この無機物中に作物が成長する際に必要で、資源の枯渇が問題となっているリンが多く含まれていることから、回収して無機肥料として利用できる。第一段反応器から回収した固体残渣は、図4、5の処理条件では有機分を全く含んでおらず、無機分のみだった。この残渣の組成はカルシウム31%、リン8.5%、マグネシウム4.7%、カリウム0.6%であり、植物の肥料となるリンやカリウムが含まれていた。

以上の結果、二段式亜臨界水酸化法によりバイオマス廃棄物を処理すると、外界に排出するのはクリーンな排水、排ガス、肥料として有効利用できる無機残渣、そして400℃付近の排熱と、有効利用できるものと無害なものだけである。

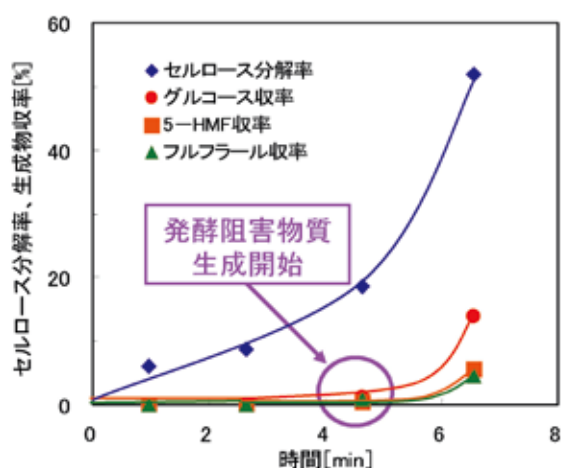
3.3 亜臨界水加水分解+酵素糖化によるペーパースラッジからのバイオエタノール原料の製造技術^②

日本国内において、再生紙を製造する過程で年間550万トンのペーパースラッジと呼ばれる製紙汚泥が発生する。ペーパースラッジは60wt%以上の水分を含んでおり、焼却処理には多大なエネルギーを必要とする。しかし現状では他に有効な利用方法はなく、焼却した後、灰の一部をセメント原料として再利用し、残りの大半は埋め立てられている。そこで我々はペーパースラッジを臨界温度以下、飽和水蒸気圧以上の亜臨界水2で加水分解した後に酵素糖化を行うことで、ペーパースラッジ中のセルロースからバイオエタノールの原料であるグルコースを高収率で生成するための研究開発を行っている。

図6に、現在開発中のペーパースラッジを用いたバイオエタノール生産技術の概略を示す。ペーパースラッジを亜臨界水加水分解し、その後セルラーゼ酵素により糖化



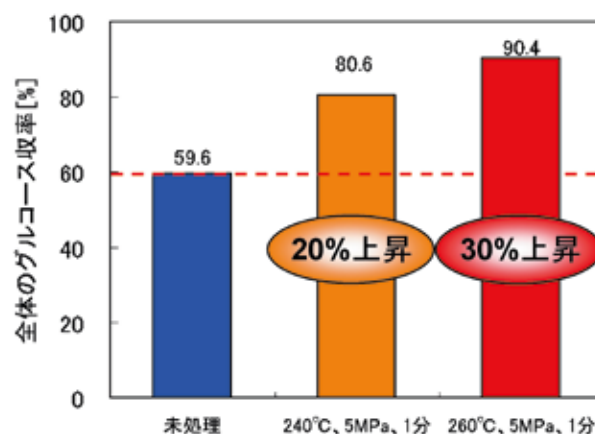
◎図6 ペーパースラッジを用いたバイオエタノール生産技術の概要



◎図7 亜臨界水中でのセルロースの分解率と主な生成物の収率の反応時間依存性 (260°C、5MPa)

して、グルコースを生産する。そしてグルコースのエタノール発酵によりバイオエタノールを生産する。この時、技術的に難しい点は、グルコースの過分解によるフルフラール類の生成抑制である。5-ヒドロキシメチルフルフラール (5-HMFと略記) やフルフラールはエタノール発酵の阻害物質のために極力生成を抑えなければならないが、グルコースは容易にフルフラール類に変換してしまう。そこで今回のグルコース製造法では、亜臨界水加水分解単独によりグルコースを高収率で生成する方法は取らず、亜臨界水加水分解はセルロースの水素結合性を弱めて、後段のセルラーゼによる酵素糖化の反応を促進する点に注力した。図7にセルロースを260°C、5MPaの亜臨界水で加水分解した時、セルロースの分解率と主な生成物の収率の反応時間依存性を示す。3分では、セルロース分解率は約10%だったが、単糖類のグルコースの収率はほぼゼロだった。5分ではグルコース収率は約2%まで上昇したが、阻害物質である5-HMFやフルフラールも生成し始めた。このために、亜臨界水加水分解工程の反応時間は5分以内とした。同様に240°C、5MPaの亜臨界水加水分解においても反応時間が5分ごろからグルコースやフルフラール類の生成が始まった。以上の結果から、セルロースの水素結合性がゆるみ、エタノール発酵の阻害物質がほとんど生成しない亜臨界水加水分解条件、すなわち反応温度240～260°C、反応圧力は反応温度における飽和水蒸気圧、反応時間5分以内を亜臨界水加水分解の処理条件とした。

図8に、240°Cで5MPaおよび260°Cで5MPaの亜臨界水2で1分間水熱処理したセルロースを、セルラーゼにより酵素糖化した時のグルコース収率を示す。亜臨界水処理なしでは、115時間の酵素糖化によるグルコース収率は60%だった。一方、240°C、5MPaで1分間、亜臨界水処理してから酵素糖化するとグルコース収率は80%、260°C、5MPaで1分間、亜臨界水処理してから酵素糖化すると90%



◎図8 亜臨界水処理+酵素糖化による全体のグルコース収率の増加 (経過時間 115分)

と、未処理の場合に比べて最大30%の収率アップが見られた。以上の結果、セルロースの短時間の亜臨界水処理は、酵素糖化の前処理法として非常に有効であることが明らかになった。

現在、図9に示す流通式亜臨界水加水分解装置を製作し、ペーパースラッジでの高速・連続加水分解処理技術の開発を進めている。



◎図9 流通式亜臨界水加水分解装置

3.4 亜臨界水によるバイオマス+プラスチック混合廃棄物の粉末燃料化技術^③

コンビニエンスストアやスーパーマーケット等から排出される廃棄弁当や惣菜等の売れ残りは、プラスチック容器の中に食品廃棄物が含まれているバイオマス+プラスチック混合廃棄物のために分別に手間を要すること、食品廃棄物は水分含有量が高く腐敗しやすいこと等から、現在、大部分は補助燃料を加えて焼却処理されている。

本研究では、これらのプラスチック含有バイオマス廃棄物をそのまま臨界温度以下、飽和水蒸気圧以上の液体

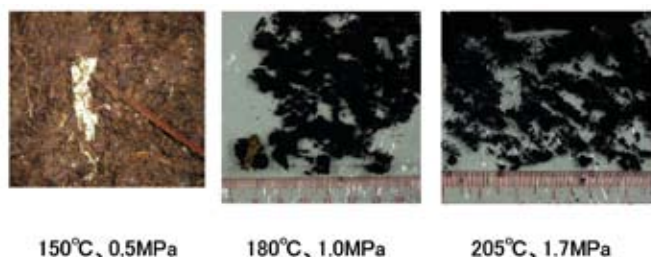
の亜臨界水2で水熱処理して全て粉末化することにより、処理前の分別が不要で、かつバイオマス廃棄物と廃プラスチックが均一に複合化した高発熱量でイオウ分等の含有量が少ないクリーンな粉末燃料を製造するための反応条件等を検討した。

実験試料としてコンビニエンスストアから排出された廃棄弁当、水分調整材として木粉を使用した。また処理装置として図10に示す内容積約0.3m³の反応器を持つものを使用した。高温の水蒸気、実験試料、水分調整材を投入し、強く攪拌しながら水熱処理を行った。

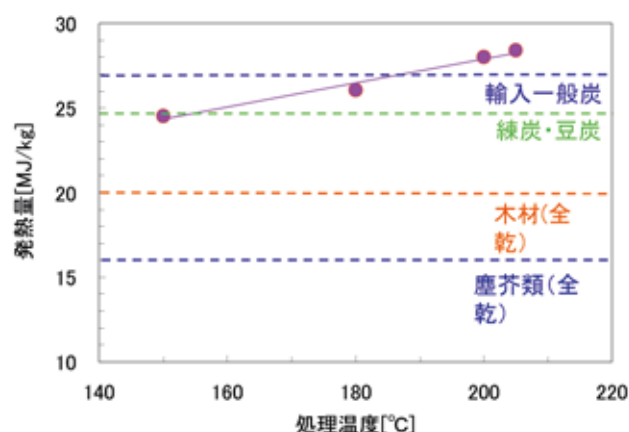
図11に、廃棄弁当を水熱処理して生成した固形分の性状の温度依存性を示す。反応圧力は反応温度における飽和水蒸気圧、処理時間は30分である。150℃で処理した場合、割り箸が形状を維持している等、廃棄弁当中の食品廃棄物や木質成分の分解はあまり進行せずに、全体が混練された状態で回収された。更に大部分のプラスチックがほぼ原形を保ったまま回収された。これは容器や袋に使用されているポリプロピレン等の軟化点が150℃前後であることから、その付近の温度で処理を行ってもプラスチックは溶融・分散しきれず、そのままの形で残存したためである。一方、205℃で処理した場合、廃棄物中のプラスチックは全て1～2mm程度に細かく分散し、その周りを食品廃棄物や木粉由来の微粉末に覆われた状態で回収された。図11で得られた生成物のうち、粉末部分（150℃



◎図10 水熱粉末燃料化装置（内容積：0.3m³）



◎図11 水熱処理生成物の形状の温度依存性（30分）



◎図12 水熱処理による粉末部分の発熱量の温度依存性（12～2MPa、30分）

では塊状のものを除いた、混練された部分）の発熱量を測定した。その結果を図12に示す。生成した粉末あるいは混練物の発熱量は、150℃から205℃で25MJ/kgから28MJ/kgと、処理温度の上昇とともに直線的に増加した。これは処理温度の上昇とともに粉末部分の中に分散するプラスチックの割合が多くなったためで、特に200℃付近で得られた粉末の発熱量は、全乾の塵芥類（16MJ/kg）よりもかなり高く、石炭（25～27MJ/kg）並みの高発熱量を得ることが出来た。

以上のことから、適正処理が困難なプラスチック含有バイオマス廃棄物を200℃付近で水熱処理することにより、石炭並みの高発熱量とイオウ分含有量の少ないクリーン粉末燃料を製造できることが明らかになった。この技術を用いると、現在国内で大量に余っている農作物非食用部（稲わら、もみがら等）や廃木材と、自治体で回収した廃プラスチックから高品質の粉末燃料を安価に製造することが可能になる。

5. おわりに

毎年、世界中で大量に排出されているバイオマス廃棄物を単なる廃棄物とみなさずに、亜臨界・超臨界水を用いて燃料や原料に変換するための技術を紹介した。今後、持続発展可能な低炭素社会を構築するためには、カーボンニュートラルのバイオマス廃棄物の適正処理と有効利用が不可欠である。その処理の際、水と空気と熱という環境負荷の極力少ないものしか使わない亜臨界・超臨界水利用技術は、21世紀にふさわしい典型的なグリーンテクノロジーである。ここで紹介した3つの技術について、現在筆者らは国のプロジェクトとして産学官連携で大型・連続装置を用いた実証研究を行っている。現在の進捗状況から判断して、いずれの技術も2～5年以内に完成し実用化されると想定している。

更に世界中を見渡すと、いたる所で腐敗しやすいバイオマス廃棄物を迅速に処理して衛生的な生活環境を維持

し、処理により得られた生成物を資源や燃料として有効活用する資源・エネルギー循環技術が求められている。今回紹介した技術は様々なタイプのバイオマス廃棄物に適用可能で、環境負荷が少なく、資源・エネルギーの循環を促進する経済的な技術であり、一刻も早く国内外で実用化することを期待している。

謝辞

今回紹介した研究の中で、二段式亜臨界水酸化技術は

関東経済産業局「地域イノベーション創出研究開発事業（平成20～21年度）」、ペーパースラッジからバイオエタノール原料の製造技術は(独)科学技術振興機構「重点地域研究開発推進プログラム(育成研究)(平成20～22年度)」、バイオマス+プラスチック混合廃棄物の粉末燃料化技術は農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業（平成20～22年度）」の助成を得て行っている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- ① 岡島いづみ、佐古 猛、工業材料、57巻、3号、pp.42-45(2009)
- ② 岡島いづみ、高橋賢、武藤真人、村松重緒、佐古猛、日本エネルギー学会第4回バイオマス科学会議発表論文集、pp.106-107 (2009)
- ③ 岡島いづみ、木村巖、小島嘉豊、佐古 猛、第15回日本エネルギー学会大会講演要旨集、pp.197-198 (2006)

資源循環型社会の展望

•Profile•



細田 衛士 ほそだ・えいじ ●慶應義塾大学経済学部 教授

1953年5月生まれ。博士（経済学）。専門は環境経済学、理論経済学。主として循環型社会のあり方の検討。1982年、慶應義塾大学大学院経済学研究科博士課程単位取得退学。英国マンチェスター大学にブリティッシュ・カウンシル・スカラー、同学部助教授を経て1994年より同学部教授。2001年より2005年9月まで慶應義塾大学経済学部長。経済産業省 産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル小委員会委員、環境省 中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会委員などを歴任。「環境経済・政策学会」の英文誌Environmental Economics and Policy Studiesの初代編集長。

1. はじめに

ここ10年以上にわたって、日本は廃棄物処理の適正化を図り、リサイクルを推進してきた。それは、「リデュース・リユース・リサイクル（3R）」という言葉がいかに一般に浸透しているかをみても理解できる。ペットボトルの容器の軽量化は進み、洗剤などの詰め替え容器も普通に見られるようになった。いわゆるリデュースが促進されたのである。また、製品の再使用（リユース）についても、パソコンや家電などの一部の限られた製品ではあるが、業界が形成されることによって適正なリユースの体制ができつつある。さらに当然のこととはいえ、色々な使用済み製品のリサイクルは個別リサイクル法によって行われるようになり、リサイクル率は日に日に向上している。

このように、3Rは確実に進んでいるのである。しかし、それで十分かと言うとそうではない。もちろん、3Rそれ自体が経済と環境の調和の最終目的なのではないのであって、究極の目的は持続可能な経済社会を作り上げることにある。そのためには、循環的利用によって資源の節約を行う一方で、希少資源を中心とした資源の確保を行う、いわゆる資源循環型社会の構築を図ることが求められる。その意味では現行のシステム（これをここではレジームという）は十分とは言えない。

本稿では、まず資源循環の現状を概観し、現行レジームの問題点を指摘する。その上で、健全で円滑な資源循環を進めて行くための制度・政策についてあるべき姿を描きたいと思う。

2. 資源循環の現状

既によく知られているように、日本は最終処分場枯渇問題など廃棄物の処理問題に悩んできた。その解決の手立てとして考えたのが、3Rという言葉で代表される廃棄物処理・適正処理政策であり、その進化的形態として発展したのが資源循環政策である。国は廃棄物処理法の度重なる改正、資源有効利用促進法や個別リサイクル法の成立などを通じて、3Rのためのレジームを作り上げてきた。

しかしながら、それが真の意味での資源循環型社会の

レジームたりえているかという、今そうと言い切れる状態にはなっていない。なぜなのか考えてみよう。このとき、使用済み製品・部品・素材（これを静脈資源と呼ぶ）には、新たに作られた製品などにはない性質が備わっていることに注意する必要がある。それは、潜在資源性と潜在汚染性という2つの性質である。

前者は、使用済みになっても何らかの処理をされた場合、再び有益な投入物として経済で使われる潜在的性質を表している。たとえば、鉄・非鉄・希少金属・樹脂などが静脈資源に多く含まれていると、この性質が経済で顕在化する可能性がおおきくなる。後者の性質すなわち潜在汚染性とは、製品・部品・素材が使用済みの段階で不適正な扱いや処理を受けた場合、自然環境を汚染する潜在的性質のことをいう。ヒ素や鉛・カドミウムあるいはフロンガスや臭素系難燃剤などがこの性質を顕在化させる恐れのある物質の例である。

さて、この2つの性質を持つ静脈資源の取り引きがなされるのが静脈市場（あるいは静脈経済）と呼ばれるものであるが、この市場が経済的機能において通常の財・サービスを取り引きする場である動脈市場（動脈経済）と異なるがゆえに大きな問題が生じる可能性がある。動脈市場の取り引きにおいて生産者や消費者などの経済主体間で必要になる情報は、当該財の機能や安全性などに関するもので、製造物責任など最小限の責任制度があれば、比較的少ない情報獲得努力で健全で円滑な取り引きが可能である。

他方、静脈市場の取り引きで必要になる情報は、静脈資源にどれくらいの経済価値があるか、あるいはどれくらいの環境負荷的性質があるかということに関するものであって、情報の内容は極めて複雑なものになりがちである。まず、多種にわたる物質について、どの物質が潜在的に市場で評価される価値を持ち、どの物質が潜在的に環境負荷的性質を持つのかを判断するためには多くの情報・知識を獲得しなければならない。にもかかわらず生産者は、製品・部品・素材情報を出したがない。しかも、これらの性質は置かれた状況によっても異なってくるのであって、潜在資源性や潜在汚染性が市場で現実

の資源性あるいは汚染性として顕在化するかどうかは、市場条件・法制度条件・技術条件などによって変わってしまう。このため、静脈資源に関する情報を積極的に取り引き主体に受発信させるような制度的条件を整えないと、健全で円滑な取り引きがなされないのである。

「健全で円滑な取り引き」と今書いたが、この意味を的確に理解するためには動脈経済とのアナロジーで考えてみるのがよい。動脈市場においては、取り引きの各段階で情報が比較的オープンに受発信されており、一部海賊版や偽製品・部品・素材などあるものの、取り引きが透明である。JANコードなどによって財の物流情報を把握することも可能である。昨今、冷凍食品の毒物混入事件があったが、その際にも速やかに情報が明らかになり、問題がないとまでは言えないものの素材情報の追跡が行われた。すなわち、財の取り引きのフローが「見える」形になっているのである。

これに対し、静脈市場では、取り引きのフローが透明でないものが多い。口語的な表現をすれば、「安かろう、悪かろう」の考えがまだまだ大勢を支配していて、静脈資源を誰が誰に手渡したか、手渡した静脈資源がどのような形で処理されたかということについて、動脈市場の取り引きと較べると著しく不透明なのである。この結果、不適当な処理やリサイクルを行って利益を得ようとする不適正主体に当該資源がわたり、多くの場合、不適正処理・不法投棄・不正輸出という形で環境問題が生じる。すなわち、見えないフローで取り引きがなされることによって潜在汚染性が現実の汚染として顕在化してしまうのである。

このような見えないフローを絶つことこそが、健全で円滑な資源循環型社会のための必要条件なのである。そして、まさに見えないフローをなくして静脈資源の取り引きフローを可視化することが、資源有効利用促進法や個別リサイクル法などの主要目的と言えよう。個別リサイクル法の目的の1つは、確かに容器包装や自動車、家電製品などの特定製品の適正リサイクルを促進することにある。これは間違いない。しかしその点だけに目をとらわれてしまうと本質を見誤る恐れが大きい。静脈市場の特徴を見据えた上で、取り引きを促進するためのフローを可視化することがより重要な点なのである。

ところが、ここ数年、これまでなかった問題が見えてきた。それは、資源循環が日本国内で留まるのではなく、海外とりわけアジア圏域の中で行われるということである。もちろん、先ほど述べたようにこの広域取り引きが見えるフローで行われていれば問題はないのだが、実際そうではないところに大きな問題がある。ここで2つの異なった問題があることに注意したい。1つは、日本の静脈資源がアジアの発展途上国に流出し、そこで当地の環境を汚染しながら処理・リサイクルされているという問題である。もう1つは、本来日本で確保しておきたい金・白金・

パラジウム・銀などの希少資源を含む静脈資源がアジアの発展途上国に流出し、当地で歩留まりの悪い形で資源抽出が行われているという問題である。

市場経済を原則とする限り、アジア圏域での資源循環は避けられない。効率的資源利用のためにはそのような資源利用は必要なことである。しかし、一方で汚染を他国に拡散させないような措置も必要だ。もちろん、廃棄物の輸出はバーゼル条約で厳しく制限されているが、この条約のみによって上の2つの問題を解決することは不可能である。そもそも、バーゼル条約は健全で円滑な資源循環を担保するために結ばれた条約ではないからである。それではどうしたら良いのか。以下では、これまでの環境経済学の知見で得られたことを基礎に、新しい資源循環型社会の展望を試みる。

3. 新しい資源循環型の構築

まず、次のことを確認したい。それは、潜在汚染性の小さいものについては、戦略的物資でない限り、アジア圏域の広域取り引きを行った場合でも従来通りの市場取り引きで原則問題ないということである。たとえば、静脈資源に一定の処理を施した後に得られた再生資源は通常潜在汚染性が小さく、市場価値を持つ。異物の取り除かれた鉄・非鉄スクラップが典型例である。こうしたものについては、通常の新しい財と同様、市場取り引きに任せても問題がない。それどころか、よく選別された鉄・非鉄スクラップなどの資源については需要の大きい発展途上国で有効に利用してもらうことが重要である。

市場メカニズムに任せても、もともと潜在汚染性は小さいのであるから問題は小さい。加えて、こうした資源のフローは質の高い市場で取り引きされる可能性が大きく、いきおいフローは見えるようになる。取り引き段階で情報を隠す必要がなく、情報も広く発信されるようになる。通常の動脈市場と同じようになるのである。一部の資源については業界団体も形成されるようになったため、一層情報開示が進むようになった。フローの可視化が進んだのである。

さて、潜在的に環境負荷の大きいあるいは汚染性のある静脈資源については同じように取り扱うことはできない。無制約な市場取り引きに任せておくと、どんなに質の低い経済主体でも市場にアクセスできるため、市場の質は悪化する。「安かろう、悪かろう」の原理に従って行動する主体が市場に参加してしまうのである。しかも、潜在資源性や潜在汚染性の情報は自動的に開示されるわけではなので、情報の非対称性によって意図的・非意図的にかかわらず取り引きに歪みが生じる。その結果、市場取り引きによって良いものや良い主体が選ばれるのではなく、悪いものや悪い主体が市場に残ることになる。経済学で言う典型的な「逆選択」の現象が現れるのである。

さらに留意しなければならないことがある。それは、

「資源制約」と「環境制約」は多かれ少なかれ強まらざるを得ないということである。前者は、天然資源のピークアウト（採掘量が過去の最大量よりも徐々に小さくなること）によって、さまざまな天然資源に対する需給バランスが逼迫するということによる制約である。インジウムの市場への供給量が小さくなると液晶の生産はマイナスの影響を受ける。金や白金の採掘量が少なくなると、電子機器の生産も制約を受ける。そのような制約要因となる元素・物質はまだまだあると言われている。天然資源を節約的に利用し、同時に経済を活性化するためには資源制約を考えざるを得ない。

後者の制約、すなわち環境制約は、生産活動・消費活動・資源循環活動すべての経済活動において環境負荷を低減し、潜在的汚染の可能性を小さくするという社会的要求からくる。これは、先進国のみで要求されることなく、発展途上国でも当然のことながら要求される。確かに、これまで発展途上国ではそのような要求が無視されがちであった。国家からして公然とこの制約をないがしろにすることもままあった。しかし、だからと言って、広域資源循環が普及拡大していくとき、潜在汚染性の大きな静脈資源が発展途上国でリサイクルされことによって日本由来の汚染が広がることを許すわけにはいかない。加えて、中国などが本気で環境制約を法制度として顕在化させたとき、日本が汚染輸出国として非難される恐れもある。

もう1つ、資源制約が強まるなか、地政学の影響を考慮しつつ、希少資源をはじめとする資源を確保する戦略的対応を考えておかなければならない。もちろん、地政学の影響など全く考える必要がなく、かつ市場が経済学でいうところの完全競争的なものであるならば、そのような考慮は無用の長物と言うべきである。しかし、1997年のパラジウムショックからもわかるとおり、天然資源市場はそのような純真無垢なものではあり得ない。環境と経済を調和させるような、資源戦略が必要となる理由がここにある。

3Rの発想は、静脈資源を廃棄物という視点から捉える発想であった。それはそれで正しい。しかし、2つの制約を考慮した上で資源循環型社会を築くためにはそれとは異なった角度、すなわち静脈資源を天然資源に代替し得る資源という角度から見る必要がある。とすると、積極的に静脈資源を確保するということが決定的に重要になる。日本でこそ、環境負荷が小さく、それでいて高度の資源抽出ができるのであり、この能力を実現するためにはまずは需要ネットワークを作り上げて、静脈資源が国内で吸収されるような仕組みを作らねばならない。

この点、中国は示唆的な戦略を採っている。中国も資源循環型社会の構築に躍起となっているが、その態度は日本と対照的で「廃棄物」という視点がほぼ欠けている。資源確保の観点が彼等の言う資源循環型社会の基底にあ

るのである。ざっくり言ってしまうと、環境制約も片目でにらんではいるのだが、今のところ本音は資源制約により大きな重点を置いて戦略を組んでいるのである。このため、よく選別された使用済みPETボトルから希少資源を含んだ制御基板などが日本国内で確保されず、中国など需要力の強い国々が吸収してしまう。玉をとれなければ、いくら日本国内で立派なりサイクルプラントを作っても無益というものだ。

生産物連鎖での制御を行い、環境負荷の小さいあるいは汚染の拡散の小さい資源循環を行うとともに、積極的に静脈資源を確保するようなレジームを作る必要がある。これまでのように広域資源循環をインフォーマルなレジームに任せておいたのでは、静脈資源の質は低いままであり、相も変わらず他国を汚染しながらのリサイクル、しかも国内に希少資源が残らないということになってしまう。

以上のような状況を回避するためには、静脈資源のフローを可視化し、追跡可能性・透明性・説明責任性のある静脈取り引きを実現しなければならない。しかし、それは国の法律や条約、いわゆるハード・ローというものだけでは難しいように思われる。もとより、ハード・ローはそれとして必要だが、静脈市場に係る経済主体が自らコミットする枠組み、すなわちソフト・ロー的な枠組みが必要になる。これは何も夢想的なものではない。流行りとはいえ、既にCSRは質の高い企業には当たり前のことになっている。加えて、エコタウンやリサイクルポートを基軸として、地方自治体や地域企業が協力しつつ、見えるフローでの静脈資源取り引きを行いつつある。こうしたレジームが拡大し、中国などをはじめとするアジアの国々・地域の諸都市がレジームに加われば、静脈資源の取り引きはきれいになると同時に効率化されることになるだろう。実際、このような取り組みは北九州などで行われている。

4. おわりに

本稿では、これまでの廃棄物処理行政に基づいたいわゆる3R政策から進化した資源循環政策の現状と課題を整理し、将来展望を行った。静脈資源を廃棄物の角度から捉えることは重要であるが、加えて天然資源と代替し得る資源という観点から捉えないと、真の意味での資源循環型社会の形成は困難であるということを述べた。資源制約と環境制約の2つの制約のある社会では、どちらか一方に偏った見方をすると、他国を汚染しつつ一方で希少資源が流出するという深刻な問題に突き当たってしまう。広域資源循環が既に市場に組み込まれている現在、これまでの廃棄物処理・リサイクル政策と資源戦略を結合する必要に日本は迫られている。

参考文献

- 小島道一（2005）『アジアにおける資源循環』アジア経済研究所.
細田衛士（2008）『資源循環型社会 ―制度設計と政策展望』慶應義塾大学出版会.
矢野誠（2005）『「質の時代」のシステム改革』岩波書店.
-



資源探查技術

資源探查技術

はじめに

中国の青海省祁連山の南縁にある永久凍土帯に位置する天峻県木里鎮で、2009年9月25日にメタンハイドレートが発見したと報道されました。陸上での発見としては、中国国内では初めてで、カナダ、アメリカに次いで3カ国目だそうです。

メタンハイドレートとは、メタンと水が低温かつ高圧の条件の下で固まった結晶で、見た目は氷に似ていますが、火をつけると燃えるため「燃える氷」とも呼ばれているものです。また、利用が比較的簡単な上、燃焼効率が高く、汚染物質も排出しないことから、地球上で開発されていない最大の新エネルギーだと言われています。

中国は、世界第三の凍土大国であり、凍土面積は215万平方キロに達しています。天然ガスハイドレートが存在する良好な条件を備え、資源利用の大きな将来性を持っています。科学者の初期的な推定によると、埋蔵量は少

なくとも石油換算で350億トンに達するそうです。

また、10月には中国石油化工が重慶市で貯蔵量1000億立方メートル級の巨大ガス田を発見したとの報道もなされています。

一人当たりの消費エネルギーは依然低いものの、将来的にはエネルギー消費大国となるとされている中国では、上記の報道にあるように、国土に豊富な資源を抱え、なおかつ積極的なエネルギー開発を展開しています。

今回は、中国にとって、また近海に多くのメタンハイドレートを含めた資源を埋蔵しているとされる日本にとっても、今後ますます重要になるであろう「資源探査技術」を中心に特集を組みました。

読者の皆様の一助になりましたら誠に幸いです。

中国総合研究センター

南海北部大陸棚における天然ガスハイドレートの生成・集積体系に関する基本的研究

•Profile•



呉 時国 Wu Shiguo ●中国科学院海洋研究所海洋地質・環境重点实验室主任

中国科学院海洋研究所研究員、博士課程大学院生指導教授。中国科学院海洋地質・環境重点实验室主任。2001年、ドイツハンブルク大学理学博士号取得。1995年、ドイツハンブルク大学客員研究員、海洋科学技術センター深海研究部フェローを経て2000年より現職2001-2002年、ハンブルク大学客員教授。主に、深水の石油天然ガス、天然ガスハイドレート、海底構造、海洋地球物理の研究に従事。論文を多数発表。国の特別事業であるスプラトリー諸島の総合的視察調査、南極の総合的視察調査、中独国際協力、日本の海洋科学技術センターの有人潜水調査、基金委員会、科学技術の973プロジェクト等の研究プロジェクト、30件あまりを主宰。現在研究中のプロジェクトとして、中国科学院のイノベーションプロジェクト「南海深水海域石油天然ガス探査に関する若干の問題に関する研究」、科学技術部の863プロジェクト「浅水流の形成メカニズム及び地球物理的識別」、「ハイドレート分解により引き起こされる海底の不安定性」、国の特別事業「わが国海域の天然ガスハイドレート形成の地質構造的背景」、大洋協会の「背弧海盆(back-arc basin)の構造の変化と熱水活動の研究」、石油会社の「南海における深水石油天然ガス大型埋蔵体系の発達の特徴と地震インバージョン」等の研究プロジェクトなど。

要旨：

非活動的大陸縁辺部はプレート活動が相対的に弱い部分であるが、一方でハイドレートの形成には有利なエリアでもある。非活動的大陸縁辺部におけるハイドレートの埋蔵の法則に関する研究により、天然ガスハイドレートの生成・集積体系には、地層拡散型と構造浸透型の2種類の体系が存在することが明らかとなっている。地層拡散型天然ガスハイドレート生成・集積体系は最も広範に見られる生成・集積のタイプであり、主に、地層中に溶け込んだガスがハイドレート安定領域でハイドレートを形成する。この場合、ハイドレートは構造が相対的に穏やかな細粒の堆積物中に主に存在し、そのハイドレート形成を左右するのは、沈積物の孔隙水中に溶解するメタンの濃度である。構造浸透型天然ガスハイドレート形成体系では主に、熱分解起源または生物起源の天然ガスが構造の薄弱な領域に沿ってハイドレート安定領域まで移動し、ハイドレートを形成する。ときどき起きる断層活動(fault episodic activities)が、熱分解起源のガスが上方に向かって移動するのを助け、ハイドレート安定領域でハイドレートが形成される。このタイプのハイドレートは、分布は局部的であるが、かなり濃集し、塊状のハイドレートが形成されやすい。南海北部大陸棚における実際の研究例から見ると、非活動的縁辺部では、断層—褶曲様式、ダイアピル状構造、スランプ堆積物、断層勾配急変域(slope breaks)、海底扇状地の砂体が、ハイドレートの濃集のプロセスを左右する重要な役割を担っている。

1 はじめに

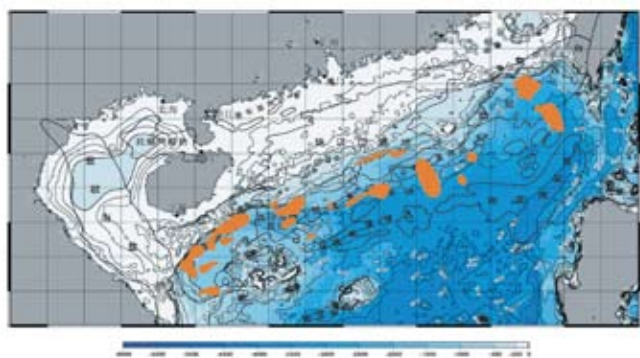
わが国の南海北部大陸棚縁辺は、非活動的大陸縁辺部であり、天然ガスハイドレートの豊富な生成・集積が期待される(宋海斌等、2003; 2007; 呉時国等、2004; 姚伯初、1998; 2001; 祝有海等、2003; 張光学等、2002;

Wu et al. 2005; 2007)。2006年に、広州海洋地質調査局により南海の天然ガスハイドレートのボーリング調査が行われたが、その際、神狐海域の3つのボーリング孔で天然ガスハイドレートが見つかった。この海域では、孔隙空間における天然ガスハイドレート飽和率は5-30%で、一部地区の飽和率は60%に達した。孔隙空間における遊離ガス飽和率は1~2%で、一部地域の飽和率はやや高かった。ハイドレート中のメタンガス資源量は1兆m³に達し、ガス埋蔵量は中レベルのガス埋蔵量であった(Zhang et al., 2008)。ボーリング、調査により明らかになったハイドレート安定領域の基底部は地球物理探査による海底擬似反射面(BSR)と非常によく一致していた。

2 南海北部大陸棚における天然ガスハイドレートのBSR分布

地震波反射面上、海底擬似反射面(bottom simulating reflector, BSR)は全体として、海底にほぼ平行な、強い反射波または比較的強い反射波として現れ、横方向で反射波の振幅の強度と連続性に一定の変化が見られる。これは、天然ガスハイドレート安定領域基底部の反射波と考えられており、一般的に、ハイドレートの存在の重要な根拠とされている(Hyndman & Spence, 1992)。近年の調査で、南海北部大陸棚縁辺には広範にBSRが分布していることが明らかとなった(図1)。BSRはその振幅、連続性等の特徴により通常、次の3種類に分類される。1) 強振幅BSR (S-BSR)。このBSRは、振幅が強く、連続性に優れるといった特徴を有し、比較的容易に識別でき、横方向では一定の範囲内でトレースが可能である。このタイプのBSRが発達する盆地は、多くは構造活動が強烈な南海東北部エリアに分布する(宋海斌等、2007; Wang et al. 2006; Wu et al. 2007)。2) 弱振幅BSR (W-BSR)。このBSRは、振幅が比較的弱く、弁別がややむずかしい。

中、浅部の地層は大部分が海底に平行であることから、大多数のBSRは基本的に地層と平行であるが、基底の起伏に変化が生じているごく一部のエリアでは、地層との間に顕著な斜交関係が生じている。このタイプのハイドレートは、地層が平らで穏やかな斜面盆地内にのみ見られる (Wu et al. 2007)。3) 不連続BSR (discontinuous BSR)。このBSRは振幅が強い部分と弱い部分がある。一部の地域にのみ見られ、多くが泥ダイヤピル状構造の最上部に位置する。一般的には、海南省東南盆地の大陸棚エリアといった、構造運動が比較的弱い地域に見られる。(Wang et al. 2006; Wu et al. 2007)。



◎図1 南海北部大陸棚のBSR分布図。

黄色—BSR、太い実線—盆地境界、細い実線—水深線

3 南海北部大陸棚における天然ガスハイドレートの生成・集積体系

天然ガスハイドレートの成因については、国内外の専門家がすでに考察している (Trehu et al. 2007)。天然ガスの成因のタイプと安定領域への進入を制御する要因により、天然ガスハイドレートは2つの成因タイプに分けることができる。理解しやすいよう、我々はこれを地層拡散型天然ガスハイドレート生成・集積体系、構造浸透型天然ガスハイドレート生成・集積体系と称する。

3.1 地層拡散型天然ガスハイドレート生成・集積体系

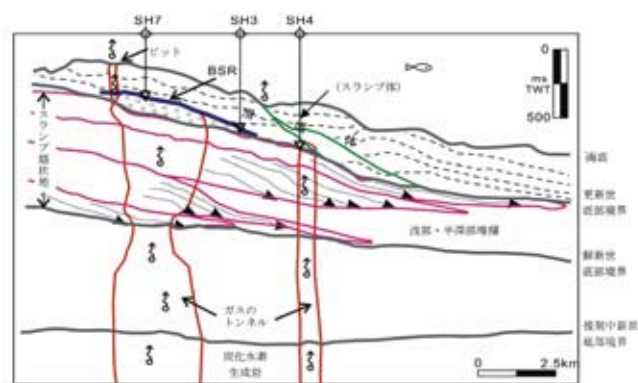
地層拡散型ハイドレートとは、地層中の生物起源ガスが地層の孔隙で形成するハイドレートを指す。このタイプのハイドレートは広範にわたって分布する。代表的なのは、Blake Ridgeである。このタイプのハイドレートでは、主に低濃度のハイドレートが形成される (Xu and Rippel 1999)。通常は、ハイドレート安定領域基底部の濃度が最大だが、内部の分布は不均一で、分布は堆積物の岩性や粒度によって左右される (Ginsburg et al. 2000)。生物起源のガスがハイドレート形成の重要な源である。特に、半深海の環境では、生物起源のガスがハイドレート形成の源となる。それは、こうした環境の深水の堆積物にはある程度の濃度の有機炭素が含まれているからである。転換率が高ければ、一定量の有機炭素がメタンを

形成し、海底の深度が加わればそれだけ、メタン溶解度は次第に増し、その量が孔隙水中のメタン飽和度を越えた時に、ハイドレートが生成される (全堆積物の約2.5%)。

南海北部大陸棚では、鮮新世—更新世—完新世と堆積速度が比較的速く、堆積物が海底に次々と急速に堆積した。堆積荷重が増すとともに下部の堆積物は押し固められて下方に沈み、下部の孔隙率の高い堆積が相対的に孔隙率の低い堆積へと換わり、安定した基底部が上方に移動して新しい温度・圧力条件が形成された。堆積相の境界もまたこれゆえに移動し、もともと存在したハイドレートは溶解して遊離ガスとなり、上昇する浮力の作用で、孔隙流体から上方に移って、ガスハイドレートを形成し、改めてハイドレート安定領域に入った。このために、ハイドレート安定領域の基底部は往々にして高濃度ハイドレートとなっている。

3.2 構造浸透型天然ガスハイドレートの生成・集積体系

構造浸透型ハイドレート生成・集積体系とは、ハイドレートを形成するガスが構造の裂隙に沿って上方に移動してハイドレート安定領域に至り、裂隙系統または地層の中に沈殿したり、海底に浸出したりした後、適した条件下でハイドレートを形成するもので、メキシコ湾が最も典型的である。このハイドレートは海底ハイドレートのごく一部に過ぎないが、この成因による場合、非常の濃集の塊状ハイドレートが形成されることが多い。このタイプのハイドレートは高品位で観察が容易であり、冷泉生物群と関連があることから、広く注目され、研究が行われている (Chen et al. 2005; Trehu et al. 2007)。



◎図2 南海北部大陸棚ハイドレートボーリング調査エリアの天然ガスハイドレート分布地質モデル

南海北部の非活動的大陸縁辺部には、このタイプのハイドレートが広い範囲にわたって存在するものと考えられる。深部の熱起源のガスが縦方向にハイドレート安定領域に至って、濃集の塊状ハイドレートを形成しているのだ (図2)。非活動的大陸縁辺部深水域には二層構造が存在し、下部のリフト盆地は良好な炭化水素生成の可能性を有する。埋蔵が比較的深いことから多くの場合ガスとして発生し、断層盆地または深水扇状地に大型ガス

田を形成する。こうしたガスは、断層を主な移動の通路として上方に移動し、新生代の堆積盆地内部に至り、そこで新生界の堆積物中の成熟度の低い炭化水素類と混合し、適度の温度・圧力域内でハイドレートを形成する（図2）。この点から分かる通り、断層と不整合面とが移動の通路体系を作り出し、ガスは多くの場合、超圧の孔隙流体とともに移動する。その上、下部のガス源の高压エリアから上部の低压エリアへ向かって、横方向に移動するか、または縦方向と横方向を組み合わせた移動をし、深いガス源の成熟度の高いガスが上方に移動して、浅部を源とする成熟度の低い炭化水素類と混合して、ハイドレートが形成、集積される。南海北部の白雲陥没の実例から見ると、神狐海域のBSRは多くが断層勾配急変域(slope breaks)に分布するが、その下部には巨大なガス田が存在していて、ガス源は十分であり、更に断層が流体の重要な移動通路となっている。ハイドレート安定領域では、堆積物の重力流が非常に発達し、粒が粗く、孔隙率が高い海底の砂体はハイドレートの濃集には非常に有利に働く。

4 構造浸透型天然ガスハイドレートの規制要因

地層拡散型ハイドレート生成・集積体系は主に構造が相対的に穏やかな、細粒の堆積物中に存在し、そのハイドレートの形成は、堆積物の孔隙水中に溶解するメタン濃度により左右される。孔隙中に溶解しているメタンの濃度、圧力、毛細管力等に後押しされ、拡散する方式で移動し、空隙水中に溶解するメタンの濃度が水-ハイドレートの二相体系の熱力学的バランスと飽和度を超えると、溶解していたメタンが結晶して、ハイドレートが形成される（Buffet and Zatsepina 2000; Zatsepina and Buffet 1997）。

十分なガス源がハイドレート形成・集積の必須条件である。そして、ハイドレート形成を規制する3つの重要なパラメータは、堆積物中の有機炭素量、生物起源のメタンの生産効率、孔隙流体中のメタン溶解度である。非活動的大陸縁辺部盆地には、極めて厚い堆積層と優れた炭化水素源岩が存在し、石油天然ガスは次々と上方に向かって浸透し、ハイドレート安定領域でハイドレートを形成し、濃集する。通常は、熱起源ガスがハイドレート形成の主な源である（Paull et al. 1996）。

構造浸透型の生成・集積体系では、ハイドレート安定領域内に遊離ガスが存在するため、BSRはあまり発達しない。大量のガスは浅層、ひいては地表まで逸散する。天然ガス（熱分解起源のガスと生物起源のガスを含む）は、一定のルートを通してハイドレート安定領域内まで移動して、ハイドレートを形成するが、ガスの移動はしばしば構造の作用により規制され、ときどき起きる断層活動が特徴として見られる。南海北部ならびに世界の典型的エリアについての研究に基づき、我々は、主に以下

のような規制要素が存在するものと考える。

4.1 活断層によるBSR分布の規制

南海北部海域は一般に、rifting period（リフト期）とdepression period（デプレッション期）という2つの段階を経験している。そして、このリフト期とデプレッション期に大量の断層構造が形成された（Luedmann et al. 1999; 呉時国等、2004）。構造のリッジ部のハイドレート安定領域基底部には、引張応力によって生じた一連の正断層が発達している。断層は、天然ガスが深部の地層から浅部の地層へ向かって移動するための通路となっており、天然ガスは断層に沿ってハイドレート安定領域に到達することができる。一方、褶曲構造は、浅部地層に移ったガスを適時に取り巻き、閉じ込める役割を果たす。Blake Ridgeでは、ハイドレート安定領域下部に位置する一部の断層およびより大きな規模の断層が、局所的な流体と天然ガスの移動を規制し、流体と天然ガスを、多くの低温鉱物とともに断層という通路を通して選択的にハイドレート安定領域に至らしめている。

4.2 ダイアピル状構造

広州海洋地質調査局は、南海北部で高解像度の地震調査を数多く実施してきたが、その中で大量のダイアピル状構造の存在が明らかとなった（図2）。このダイアピル状構造には様々な成因が考えられ、泥ダイアピル状、塩ダイアピル状、岩しょうダイアピル状等の成因タイプが存在する。そこに含まれる天然ガスハイドレートの特性もまたそれぞれである。ダイアピル状構造の存在は、断層がすでに、天然ガスハイドレート溢出体系の有機的な構成部分となっていることを物語る。

4.3 スランプ構造 (slump structure)

南海北部大陸棚海域では、水深300-1600m部分に、巨大なスランプ構造体が分布しており、海底はでこぼこしている。その海底から300-450mのところに特徴の明らかなBSRが海底にはほぼ平行に存在し、BSRは明らかに地層を斜めに横切っている。その上が巨大なスランプ体で、内部はカオスの反射を呈し、振幅空白部は比較的顕著だが不均等である（図2）。一方で、スランプ体は天然ガスハイドレートの形成と分布にとって有利な地質体である。まず、海底スランプ体は堆積物が急速に堆積してできたもので、地震反射はカオスの反射の特徴を持ち、堆積物は通常、孔隙率が比較的高く、天然ガスハイドレートの形成に必要な集積の空間を提供する。次に、堆積が急速に進むため、堆積物中に含まれる微細な有機質のかすが酸化しないうちに埋蔵され、保存され、細菌の作用で大量のメタンガスに変わる。同時に、スランプ堆積物は選択性に劣り、浸透率が低いため、ガスの流れは悪く、圧力は比較的遮蔽される。このため、天然ガスハイドレートの形成には望ましい圧力環境が形成される。一方、スランプ自身が、天然ガスハイドレートが分解して生じた構造である可能性がある。大量の天然ガスハイドレート

が安定を失い、ガスが逸脱したことが海底スランプ形成の主因となり、海底の地質災害を引き起こした可能性がある。アメリカの大西洋の大陸縁辺には200近い地すべりが存在するが、多くの地すべりはいずれも天然ガスハイドレートが分布するエリア内かその付近で起こっているし、別の海域の Blake Ridgeもまた天然ガスハイドレートと関係している。それはたとえば、西南アフリカの大陸棚とRidge、ノルウェーの大陸棚縁辺、ボーフォート海の大陸棚縁辺、カスピ海、北パナマの大陸棚、カナダニューファンドランドである。このように、天然ガスハイドレートとスランプ体の相互作用は注目に値する。台湾西南海域で、巨大スランプ体の底部に位置するBSRはこうした相互作用の表れである。

4.4 勾配急変域(slope breaks)断層

勾配急変域(slope breaks)構造とは、同堆積構造の長期にわたる活動で、古い地形の斜面が顕著に急になった部分を指す。勾配急変域は、盆地の充填可能空間の変化と堆積作用に重要な影響を与える。断層盆地において、規模が比較的大きい同堆積断層から構成される構造勾配急変域(tectonic slope-break zone)もまた断層勾配急変域(slope breaks)と称される。構造勾配急変域(tectonic slope-break zone)堆積相帯と堆積の厚みが突然変化している場所であることが多く、しばしば扇状三角洲や海底扇状地等の堆積砂体が発達している。低位域の砂体は層序の底部に発達し、勾配急変域に沿って群を成して分布し、構造岩性(structural-lithological)の石油天然ガス濃集部を形成している (li et al., 2004)。構造勾配急変域は異なる構造单元が互いに接する部分である。たとえば、斜面部、隆起・沈下が互いに接する部分であり、こうした部分は通常、上下差が比較的大きく、堆積の厚みが大きいという特徴を持つ。更には、主なガス源エリアに近く、その上、底部に断層が相対的に発達し、同時に、断層の勾配急変域上は岩性が比較的大きく、貯蔵域が比較的大きく発達し、大量の天然ガスを捕捉するのに適し、その結果、一定規模を有するガスハイドレートの集積が形成される。

南海北部の大陸縁辺盆地では、沈下期に大量の断層構造が形成されたが、くぼみの縁辺にはしばしば規模の比較的大きな同生断層が発達している。こうした断層は、盆地の境界や当時の古地形を規制し、その後も活動を続け、大陸棚の変遷を規制してきた。このため、こうした地域を断層勾配急変域と呼ぶ。こうした勾配急変域には、天然ガスハイドレートの濃集に有利な次の4つの条件が整っている。1) 勾配急変域が下部の炭化水素を生成するサグに連なっているため、熱分解起源の天然ガスが豊富にある。すなわち、良好なガス供給源条件が存在する。2) 勾配急変域には、海底タービダイトの砂体が豊富に発達しており、熱分解起源の天然ガスの上方への移動に有利である。3) 勾配急変域には断層が発達しており、天然

ガスのハイドレート安定領域への移動に有利である。4) 勾配急変域は多くの場合、比較的大きな傾斜があり、でこぼこした海底地形で、重力スランプや海底扇状地が発達しており、良好な貯蔵域となる。

5 結論

非活動的大陸縁辺部には、地層拡散型と構造浸透型という2種類の天然ガスハイドレート生成・集積体系が存在する。南海北部大陸棚のハイドレート濃集は、構造浸透型に属する。構造浸透型の天然ガスハイドレート生成・集積体系では、濃集した塊状ハイドレートが形成されやすく、その分布はしばしば、断層-褶曲構造、ダイアピル状構造、海底スランプ体、構造勾配急変域といった典型的構造と密接にかかわっている。断層-褶曲様式の中では、断層が天然ガスハイドレートの浅部への移動の通路となる。ダイアピル状構造は、地質応力の作用により、深部または層間の塑性物質が縦方向に流動して形成されたものである。このダイアピル状構造がしばしば堆積被覆層を上を持ち上げたり、貫いたりし、その結果流体が流れ出し、ハイドレートが形成される。海底扇状地と海底スランプ体は、急速に堆積が進んでできたもので、しばしば高い孔隙率を有して、天然ガスハイドレートの形成に必要な集積の空間を提供する。堆積物が急速に沈降するため、浅層の堆積物中に堆積した細かい有機質の滓は、酸化されないまま海底に埋蔵され、保存されて、細菌の働きで大量のメタンに転換する。これもまたハイドレートの形成に有利に働く。構造勾配急変域は構造の異なる部分が互いに接する部分であって、通常、地形の傾斜面が大きく、堆積の厚みが大きいという特徴を持つ。また、主なガス源エリアにも近い。その上、底部の断層が相対的に発達し、勾配急変域(slope breaks)上の岩性は比較的大きく、良好な貯蔵域が発達しており、大量の天然ガスをとらえやすく、ある程度の規模の天然ガスハイドレートの集積が形成できる。

参考文献

- 呉時国、張光学、郭常昇、鐘少軍、黃永様。2004 東沙海域における天然ガスハイドレートBSRの形成と安定的に分布する地質構造要素。石油学報、25(4): 8-16。
- 姚伯初。1998.南海北部大陸棚縁辺の天然ガスハイドレートに関する基本的研究。海洋地質。第四紀地質。4:11-17。
- 姚伯初。2001。南海の天然ガスハイドレート埋蔵。熱帯海洋学報、20 (2) :20-28。
- Andreassen K. et al., 1995. Seismic studies of a BSR related to gas hydrate beneath the continental margin of the Beaufort Sea. *Journal Geophys. Res.*, 100(B7), 12,659-12,673
- Borowski W S, 2004. A review of methane and gas hydrates in the dynamic stratified system of the Blake ridge region, offshore southeastern North America. *Chemical Geology*, 205: 311-346
- Collins B P. and Watkins J S. 1985. Analysis of gas hydrate off southwest Mexico Using seismic processing techniques and DSDP Leg 66 results. *Geophysics*, 50(1): P16-24
- Dillon, W. P., et al., 1998. Evidence for faulting related to dissociation of gas hydrate and release of methane off the southeastern United State. In: Henriot, J., et al., *Gas Hydrates*. 293-302
- Hovland M. and J.W.Gallagher. 1997. Gas hydrate and free gas volumes in marine sediments: Example from the Niger Delta front. *Marine and Petroleum*, 14: 245-255.
- Hyndman R.D. and G.D.Spence,1992. A Seismic Study of Methane Hydrate Marine Bottom simulating Reflectors. *Journal Geophys. Res.*, 97(B5), 6683-6698
- Kvenvolden K A, Ginsburg G D, Soloviev V A., 1993. World wide distribution of subaquatic gas hydrate. *Geo-Marine Letters*. 13: 32-40
- Laberg J S and Andreassen K. 1996. Gas hydrate and free gas indications within the Cenozoic succession of the Bjørnøya Basin, western Barents sea. *Marine and Petroleum Geology*, 13: 921-940.
- Laherrere J. H., 1999. Uncertain resource size enigma of oceanic Methane hydrates. offshore. *Angust*. 140-142.
- Lee M.W. et al., 1994. Seismic character of gas hydrates on the Southeastern U.S.continental Margin. *Marine Geophysical Researches* 16:163-184.
- Lu, S. and McMechan, G.A., 2004. Elastic impedance inversion of multichannel seismic data from unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas. *Geophysics*, 69:164-179.
- Maslin M, Mikkelsen N, Vilela C, Haq B. et al., 1998. Sea-level and gas-hydrate-controlled catastrophic sediment failures of the Amazon Fan. *Geology*, 26: 1107-1110
- Pearson, C.F., Halleck, P.M., McGuire, P.L., Hermes, R., and Mathews, M., 1983. Natural gas hydrate: A review of in situ properties. *J. Phys. Chem.*, 87: 4180-4185.
- Trehu A, Ruppel C, Holland M et al., Gas hydrate in marine sediments: lessons from Scientific Ocean Drilling. *Oceanology I*, 2006, 19(4): 124-142
- Veerayya, M., et al., 1998. Detection of gas-charged sediments and gas hydrate horizons along the western continental margin of India. In:Henriet J.-P. & Mienert J. (eds): *Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change*. Geological Society, London, Special Publications, 137: 239-253.
- Wu Shiguo, Wang Xiujuan, Wong H K, Zhang Guangxue, 2007. Low-amplitude BSRs and gas hydrate concentration on the northern margin of the South China Sea. *Marine Geophysical Research*, 28(2): 127-138
- Wu S, Zhang G, Huang Y, Liang J, Wong H K. 2005: Gas hydrate occurrence in the northern slope of the South China Sea. *Marine & Petroleum Geology*, 23 (1) : 1-10
- Zhang H, Yang S, Wu N., 2007. GMGS-1 Science team: China' s first gas hydrate expedition successful. *Fire in the Earth. Methane Hydrate Newsletter*, National Technology Laboratory, US department of Energy, Spring/Summer Issue , 2007, 1: 4-8

深海自律型水中ロボットの開発及び 大洋資源調査におけるその応用

•Profile•



王 越超 Wang Yuechao ●中国科学院瀋陽自動化研究所所長

1960年6月生まれ。1987年に中国科学院瀋陽自動化研究所で工学修士の学位を取得し、1999年に中国ハルビン工業大学で工学博士の学位を取得。現在、中国科学院瀋陽自動化研究所の所長、研究員を務める傍ら、ロボット学国家重点実験室主任、中国自動化学会ロボット専門委员会主任委員を兼務。主な研究分野：ロボット制御、マルチロボットシステム、ロボット技術の応用等。

一、前書き

地球表面積の71%を占める海洋は地球変動及び人類の生存・発展と密接に関係している。人類の生存と持続可能な発展のため、海洋を理解し、海洋を保護し、海洋を開発し、海洋を利用することは、現代の人類が直面する非常に重要なテーマとなっている。

中国は1980年代から大洋の科学調査を開始し、これまでに20回の航海を重ねた。1990年4月、中国は中国大洋鉱産資源研究開発協会（China Ocean Mineral Resources R&D Association、『中国大洋協会』と略）を設立した。1991年、中国大洋協会は国連から5番目の深海採鉱の先行投資者として認められ、30万km²の海底探査任務を引き受けた。中国大洋協会は「国連海洋法条約」に基づき、協会メンバーを組織して国際海底資源の実地調査、資源評価、環境研究等の活動を進め、大洋多金属団塊、熱水硫化物の調査で顕著な進展を得た。

海底の科学調査を進めるには、水中での探査調査を行うことのできる深海装備が必要となる。大洋多金属団塊の探査に取り組もうとする中国大洋協会の要請に応じ、中国は1980年代末に深海水中ロボットの研究開発を進めた。中国ハイテク研究発展計画の重大研究プロジェクトとして資金援助を受け、1995年に中国初の6,000m級深海自律型水中ロボット（Autonomous Underwater Vehicle, AUV）「CR-01」を開発することに成功した。「CR-01」は中国科学院瀋陽自動化研究所が全体の責任を負い、国内の多くの科学研究機関及びロシア科学アカデミー極東支部海洋技術研究所と共同で開発したもの。「CR-01」は1995年と1997年の2度にわたり、中国大洋協会が手配した太平洋での海底多金属団塊の調査活動に参加し、深海域で大量のデータ資料を得た。

中国科学院瀋陽自動化研究所は1970年代末から水中ロボットの研究開発に取り組んだ。80年代初め、作業深度100m級の有索式遠隔操縦水中ロボット（ROV）「海人一号（HR-01）」が中国で初めて開発された。その後、中国ハイテク研究発展計画等の支援の下、無索式自律型水中

ロボット（AUV）の研究をスタートさせ、1990年にAUV「HR-02」のテストベッドを完成し、AUVのアーキテクチャ、自動操縦制御、ナビゲーション、水中音響通信等のカギとなる技術の研究を進めた。これを基礎に、90年代中期、1,000m級無索式自律型水中ロボット「探索者」と6,000m級無索式自律型水中ロボット「CR-01」を開発することに相次いで成功した。「CR-01」は中国大洋協会が手配した深海資源の探査調査に応用され、これにより中国は深海ロボットを製造できる世界でも数少ない国の1つとなったのである。

本論文では「CR-01」の主要技術性能及び太平洋の多金属団塊調査におけるその応用状況を主に紹介する。

二、「CR-01」の概要

「CR-01」は予めプログラミングすることにより、海底で自律的に活動できる知能型水中ロボットである。自律とはロボットが自らを管理・制御し、使命を遂行することである。ロボットはエネルギー装置、環境感知装置及び自動操縦システムを備えており、予め与えられた任務に基づき、どう行動するかを自ら決め、環境の変化を自動的に分析し、反応を示すことができる。図1は水中ロボッ



●図1 6,000m級自律型水中ロボット「CR-01」

主要寸法	4.4 (長さ) × 0.8 (直径) m
作業水深	6000m
最大水中速度	2 ノット
エネルギー	銀亜鉛電池
空中重量	1300kg
航続能力	10 時間
長基線測位の精度	10～15m
写真撮影枚数	3000 枚
連続水中録画時間	4 時間

◎表1 「CR-01」の主な技術指標

ト「CR-01」の写真であり、その主な技術指標は表1の通り。

水中ロボット「CR-01」は主にキャリアシステム、制御システム、水中音響システム、リトラクタブルシステムの4つの部分で構成されている。その作業任務は専門の作業言語で編成され、翻訳後に「CR-01」の自動操縦コンピュータにダウンロードされる。これにより、予めプログラミングしたルートに基づき、所定の深さ、方向、高さ、距離に従って航行し、障害物を自動的に回避することができる。「CR-01」は72メガパスカル (MPa) の圧力に耐え、暗視ビデオカメラ、カメラ、サイドスキャン・ソナー、サブボトム・プロファイラーの4種類の調査機器を搭載している。これらの機器を利用すれば、海底のビデオ画像撮影、地勢測量、浅地層断面測量、水温・塩分・水深測量及びマンガン団塊存在度の測定を行い、また、各種の測量データ及び関連の座標位置を自動的に記録することができる。

6,000m級自律型水中ロボット「CR-01」は長基線 (LBL) 音響測位システムを備えている。このシステムは水上と水中の2つの部分に分かれる。水上部分は母船の全地球測位システム (GPS)、コンピュータ、曳航式アレイ等で構成され、水中部分はロボットのキャリアシステムと海底に設置される3つのトランスポンダから成る。ロボットが作業を始める前に、まず海底に3つのトランスポンダを投入し、長基線測位システムのディテクタアレイとトランスポンダの試験を行う。アレイの測定を通じ、3つのトランスポンダの位置を確定し、必要な座標系を設ける。この後、ロボットは3点で構成されるトランスポンダアレイのカバーエリア内で作業を行う。長基線測位システムによりロボットの航跡をリアルタイムで監視することができる。

長基線音響測位システムを利用すれば、水中で運動するロボットの軌跡を確定できる他、遠隔制御命令を出し、ロボットに対する監視・操作を行うことができる。ロボットが作業任務を完了して水面に浮上したら、無線信号とランプ信号を出し、回収を待てばよい。ロボットに重大な故障が生じ、又は自走能力を失った時は、システムが

意思決定を下し、非常脱出装置によって水面に浮上させ、救出する。

三、「CR-01」の海底調査への応用

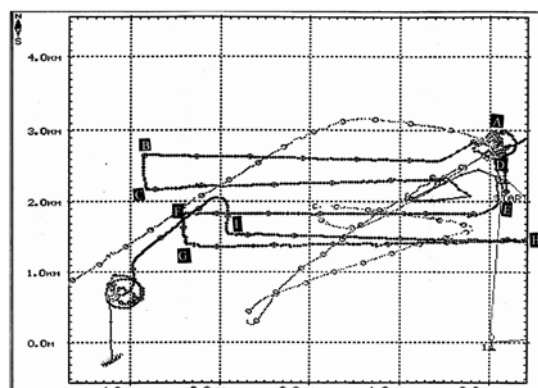
「CR-01」は主に国際海底の中国留保区域で多金属団塊等の資源を探索調査するのに用いられる。国連は「海洋法条約」及び中国の申請に基づき、中国が国際海底管理局に申請する探索区域として30万km²を選定した。6,000m級自律型水中ロボット「CR-01」は1995年と1997年の2度にわたり、中国大洋協会の科学調査船と共に太平洋に赴き、深海試験及び海底多金属団塊の調査を行い、成功を収めた。

調査期間中、「CR-01」は水深5,200mの海底に何度も潜り込み、実地探査を行った。ロボットに搭載されたカメラとビデオカメラによって海底マンガン団塊の大量の写真と画像が得られ、また、サブボトム・プロファイラーとサイドスキャン・ソナーによって海底の地勢測量データ及び浅地層断面図が得られた。上記のデータから海底マンガン団塊の分布及び存在度を確定することができる。

調査に入る前に、まず海底に3つのトランスポンダを投入し、長基線音響測位システムのアレイ測定を行った。その後、ロボットが潜水し、予めプログラミングしたルートに従って行動した。図3は1回の調査で予めプログラミングした「CR-01」のルート図であり、図4は長基線音響測位システムによって得られた「CR-01」の実際の航跡である。図からわかるように、実際の航跡と理論上の航跡は一致している。同時に、このシステムを通じ、母船の座標、ロボットの潜水地点の座標及び幾つかの変曲点の座標が得られた。これらのデータは理論値と合致する。実際のデータによれば、システムの測位誤差は約10mとなる。



◎図3 予めプログラミングしたロボットの航跡



◎図4 「CR-01」の実際の航跡

調査期間中、「CR-01」に搭載されている音響機器と光学機器はそれぞれ海底からの高さが異なるルートで使用された。「CR-01」は海底からの高さ30mの所定ルートを2ノットで航行し、サブボトム・プロファイラーとサイドスキャン・ソナーを用い、海底の浅地層構造、地勢及び対象物を測量した。また、海底からの高さ5mの所定ルートを2ノットで航行し、カメラとビデオカメラで撮影を行い、海底マンガン団塊の非常に鮮明な写真及び画像が得られた。

「CR-01」搭載の光学システムと音響システムで得られた観測データを分析することを通じ、その調査区域内の海底マンガン団塊の被覆率と分布の特徴を推定し、地形・地勢についてデータ解析を行った。その結果は詳細かつ正確で信頼できる。

深海の多金属団塊に対する調査と試験から、自動探査プラットフォームの水中ロボット「CR-01」は海底での航行が安定し、速度が均一で、深さと高さも正確であることがわかった。得られたデータは質が高く、その結果も正確であり、中国の同時期のその他深海探査設備より優れている。「CR-01」が得たデータは大洋底マンガン団塊を分析するための非常に有効な科学的拠り所を与えるものだ。「CR-01」等による海底多金属団塊の調査と探査のお陰で、中国は排他的探査権と優先開発権を持つ7.5km²の多金属団塊鉱区を獲得した。「CR-01」はこのために力強い技術的サポートを提供したのである。

四、結びの言葉

「CR-01」の開発に成功し、深海での試験を滞りなく終え、また、海底多金属団塊の調査にこれを応用した後、中国科学院瀋陽自動化研究所は中国大洋協会の要請に応じ、ロシアの海洋技術研究所と再度協力して、2001年に新しい世代の6,000m級深海自律型水中ロボット「CR-02」を開発した。「CR-01」に比べると、「CR-02」はより高い機動力を備え、垂直二重反転パドルが追加され、新型の測深サイドスキャン・ソナーを搭載しており、制御方式も改良された。このため、水中ロボット「CR-02」は海底火山のような複雑な海底で移動し、作業を行うことができ、深海コバルトクラストの探査調査に用いることができる。「CR-02」の開発に成功した後、海底採鉱に応用するためのシミュレーション試験を行った。2006年9月、「CR-02」は南シナ海海域での深海試験に成功し、深海環境下での任務と運動制御、検出と遠隔制御、水中探査技術及び総合性能等について十分な検証が得られ、中国大洋協会によるプロジェクト確認検査に合格した。

「CR-01」と「CR-02」の開発に成功し、深海での多くの探査調査任務を完遂したことは、中国が深海探査用機器の研究開発で重要な進展を収め、水中ロボット技術で世界の先進国に仲間入りしたことを示している。よりよく海洋を理解し、海洋を保護し、海洋を開発し、海洋を利用するため、中国大洋協会は「深海調査を持続的に進め、深海技術を大いに発展させ、深海産業を適時に確立する」との発展戦略を定めた。深海機器については、水中ロボットの研究開発に引き続き取り組む他、有人潜水器の開発が現在進められている。

参考文献

1. 封錫盛, 「有索式遠隔操縦水中ロボットから自律型水中ロボットまで」, 中国工程科学, 第2巻第12期, 2000年12月
2. 李一平, 封錫盛, 「太平洋のマンガン団塊調査における6,000m級自律型水中ロボット『CR-01』の応用」, 高技術通信, 2001年第1期
3. 学科発展報告総合巻: 2007 ~ 2008, 中国科学技術学会主編, 中国科学技術出版社, 2008年2月
4. 「わが国の自主開発による7,000m級有人潜水器が総組立の段階に入る」, http://www.gov.cn/jrzq/2006-05/05/content_273919.htm
5. 中国大洋鉱産資源研究開発協会, <http://www.comra.org>

中国海洋における鉱物資源および その探査・開発の展望

•Profile•



莫 傑 Mo Jie ●中国国土资源部青島海洋地質研究所科学技術諮問委員会弁公室主任

1937年7月生まれ。青島海洋地質研究所科学技術諮問委員会弁公室主任。研究員。1960年長春地質学院地質学科調査採鉱専攻卒業。内モン大興安嶺、陝西秦嶺等で域内の地質調査研究、採鉱調査、鉱区探査、地質局、地質部で科学技術情報調査研究、科学技術管理、国家863計画海洋地質プロジェクトの管理業務に従事。部・局と国の専門プロジェクトであるソフトサイエンスの課題研究10項目以上の主管。科学技術関連の参加著作には、『域内の地質調査における野外業務の手法』、『中国海洋科学の研究与開発』、『中国における石油・天然ガスの調査と発見』、『地球科学の新学科・新概念』、『科学の功績』、『新中国海洋地質工作大事記』、『青い沿海の領土』、『中国海洋事情』。編集、副編集を勤めた科学普及のための書籍には、『中国近海の空間地理』、『不思議な海洋世界』、『海：尽きない神秘』、『海の神秘探求と海の資源開発』、『科学技術による海洋振興叢書』。専門書には『海洋地質最前線』、『地球科学探索』。各種雑誌に概要的論文80編以上、訳文30編以上を発表。各種新聞・雑誌に報道文100編以上を発表。市、省、国家レベルの科学技術関連表彰多数。

概要：

中国の管轄する海域面積は約300万km²、大陸海岸線は約18000kmである。長い海岸線の浅海区、果てしなく広がる大陸棚近海区と大陸斜面の深水区には各種の豊富な鉱物資源が埋蔵されている。本文は海岸平野の地下塩水、海底炭田、海岸砂鉱、石油と天然ガス、天然ガスハイドレートと海底多金属団塊などの鉱物資源の分布、資源量（一部の地質埋蔵量を含む）、探査と開発の現状および将来の展望を総合的に概説したものである。

国連『海洋法条約』の関連規定によると、中国の管轄海域面積は約300万km²となっている。大陸岸線は18000kmを超えており、6500島もの大小さまざまな島があり、島の海岸線の長さは14000kmを超えている。渤海、黄海、東シナ海、南シナ海を含む海域には豊富な各種鉱物資源が埋蔵されている。

1 海岸平野の地下塩水^[1, 2, 5]

中国北部の広大な海岸平野地区の第四紀層には豊富な地下塩水資源が貯蔵されている。中でも山東省の萊州、寒亭、昌邑、河北省の南堡、滄州、天津市の塘沽などの地区は地下塩水の分布が最も広く、品質に優れ、貯留量も最大であり、環渤海海岸区における巨大な塩水密集地区を成している。現在、萊州湾は中国における大型塩化学工業の生産基地となっている。（図1）

鉱化度>50g/Lの地下水は地下塩水と呼ばれ、それには多種の元素と可溶性塩類が含まれる。主な化学組成は海水の化学組成と基本的に同じであり、塩分総含有量99.5%を占めており、Cl-Na型地下水である。塩化カリウムの含有量の変化がやや大きいのと、濃度との関係がはっきりしない以外は、その他の何種類かの絶対量はいずれも濃度（パーメ度Be'）との正の相関関係を示している。地下塩水の品質はその濃度、含有量と富化度により決定される。一般的に低濃度区（5～8Be'）、中濃度区（8～10Be'）、



●図1 地下海水の製塩場（中国海洋事業）

高濃度区(>10Be')に区分される。

探査結果によると、塩水濃度、富化度および規模の大きさに基づき環渤海平野の鉱床生成帯は、萊州湾、黄河デルタおよびその両側、渤海湾、遼東湾の4つの鉱床生成区に分けられ、黄海沿岸の基岩盤港湾海岸の鉱床生成帯は山東半島、遼東半島の2つの鉱床生成区に分けられる。

1.1 環渤海海岸平野地下塩水の鉱床生成帯

この地帯は広大に成長した海岸平野で、大きくて厚い第四系の柔らかい堆積物で組成されている。地下塩水は豊富で、巨大な環状で広がっている。萊州湾と渤海湾は黄河デルタ平野を介して連なっており、北は灤河デルタから、南は萊州湾東側の膠東丘陵まで広がり、アーチ型鉱物資源地帯を成しており、その範囲はたいへん広大である。

1.1.1 萊州湾南岸地下塩水の鉱床生成区

この区域は中国北部沿海地区でも地下塩水の最も豊富な分布区で、総面積は1500km²である。塩水層の厚さは30～60m、濃度は一般的に10 Be'より高く平均10～12

Be'、最高で20 Be'に達する。塩水層の深さは一般的に0～60mで最大80m、一部地域では300mにも達する。推定によると、この鉱床生成区の地下塩水の純埋蔵総量は約74億m³である。採掘係数70%に基づいて計算すると、可採量は51.8億m³に達し、塩含有総量は約8.13億トン、そのうち塩化ナトリウムが6.45億トン、塩化カリウムが1455万トン、塩化ビニルが7995万トン、硫酸マグネシウムが5479万トンである。抽出率を62.5%で計算すると、この区域の深さ80m内の純埋蔵量から原塩5.08億トンを抽出でき、その経済効果は非常に大きい。

1.1.2 黄河デルタおよびその両側地下塩水の鉱床生成区

現在、すでに探査と開発をおこなっている地区は山東の広饒、東営、垦利、沾化および埕口のいくつかの塩田に限られており、その面積は約1800km²である。塩水濃度は10 Be'ほどで、東営塩田など一部地域では最高濃度が15～17 Be'に達する。無棣、埕口などの塩田地下塩水の純埋蔵量は4.8億m³である。

1.1.3 渤海湾沿岸地下塩水の鉱床生成区

この区域の範囲は河北省ラン河デルタから山東黄河デルタまでとなっており、総面積は5000km²に達する。地下塩水は主に天津塘沽、漢沽、河北省南堡、黄骅、大清河などやや大きな塩田区に集中している。鉱床帯は長さ約560km、幅5～15km、面積1000km²である。鉱床は層状になっており、平面に分布している。鉱層は厚さ30～40m、深さ0～50mとなっており、区域全体の塩水濃度は低め(5～8 Be')で、一部地域の濃度は>10 Be'である。

南堡、黄骅、塘沽など13ヶ所の塩田探査資料に基づく推定では、この鉱床帯の地下塩水の純埋蔵量は12.3億m³である。

1.1.4 遼東湾沿岸地下塩水の鉱床生成区

この区域の総面積は約3000km²である。しかし地下塩水の分布は遼寧省錦州、溝邦子、盤山、営口の9ヶ所の塩田の一部地域に限られ、分布面積は600km²である。営口塩田探査資料によると、塩水濃度は5～8 Be'で、深さ20～40mとなっている。

1.2 黄海沿岸の基岩盤港湾海岸の鉱床生成帯

主に山東半島と遼東半島地区のやや大きな港湾の湾奥低地・小平野区に分布しており、その範囲と規模はいずれも海岸小平野区に及ばない。現在、青島膠州湾、嶗山湾、丁字湾および大連沿岸の諸港内はいずれも地下塩水鉱層が分布していることがすでに明らかになっている。

1.2.1 山東半島港湾海岸の鉱床生成区

膠州湾の地下塩水は主に港湾西岸と古北岸低地小平野区に分布しており、小さい環带状に広がっている。長さ30km、幅1～3km、最深25～30m、塩水鉱層厚さ10～20m、濃度は全般的に5～8 Be'で、南万と大橋の両塩田に限っては8～9 Be'の塩水が確認されている。東部の煙台、威海と南部の日照地区港湾の湾奥低地にも地下塩水の密集層があり、その濃度はやや低くほとんどが8 Be'以下である。

下である。

1.2.2 遼東半島港湾海岸地下塩水の鉱床生成区

この区域は港湾低地が狭窄であるため、面積が小さく、第四系の柔らかい堆積物が薄く（一般的に15～20m）、塩水層の厚さは10～15m、深さ0～20mとなっており、濃度はほとんどが8 Be'より低く、規模がやや小さいが、一部塩田の一部地域に限って14 Be'の塩水が確認されている。

現在、すでに開発利用されている大連清水河鉱区は、面積8km²であり、塩水層の厚さは10～15m、濃度8 Be'で、地下塩水の純埋蔵総量は1774万m³である。

20世紀80年代以降、中国では塩水開発が地下塩水から塩化学工業製品を直接抽出するまでに発展している。90年代に生産規模がさらに拡大し、地域も萊州湾から河北、天津、大連、青島などの省市にまで拡大した。同時に地下塩水を水産養殖と塩化学工業製品に利用しはじめた。

現在、中国海塩の年間生産量は約2000万トンで、50%ほどは井戸・浜塩からである。井戸天日塩面積は海塩生産面積のわずか20%で、コストを50～60%の削減、工業プロセスを30%短縮することで製塩産業の発展により働きを果たしている。

地下塩水を利用して塩化学工業を発展させた。つまり天日塩に残ったにがりを利用した抽出と高濃度の地下塩水を直接利用した抽出である。現在すでににがりからカリ岩塩、塩化マグネシウムの結晶、無水硫酸ナトリウム、マグネシウム塩など多種の副産物が抽出できるようになっている。その他U、K、Mg、Na、Li、I、Brなどの稀有元素を抽出することで大きな経済効果をもたらしている。

現在では臭素を生産しており、その他多くの元素も抽出できるようになっている。例えば萊州湾では高濃度塩水を利用して臭素を生産しており、年間生産が百万トンの塩田では、毎年1500万m³の10 Be'の地下塩水を利用して4000トンの臭素を生産している。萊州湾およびその他地区の高濃度の地下塩水埋蔵量は数十億トンにも達しており、その総合開発利用の展望は非常に望ましい。現在、萊州湾はすでに中国沿海地区初の近代化塩化工産業基地となっている。

2 海底炭鉱^[1, 2, 5]

中国初の海底炭田は山東省龍口市の東北約5km海域に位置し、陸地にある北皂炭鉱が海底へ伸ばしたものである。炭層6層で採掘が可能であり、炭系地層の総厚度は67～278m、一般的な厚さは約200mで、炭田分布面積は約150km²、主な可採炭層は約10m、探知した地質埋蔵量は12.9億トンである。

この鉱床は2005年6月に生産を開始、初の採炭切羽は同年にテスト採掘が完了し、計8.2万トンの原炭を採掘した。二回目の採炭切羽は2006年8月10日正式に生産を開始し、

2007年1月に完了、テスト採掘で計42.6万トンの原炭を採掘した。現在この鉱床はすでに正常に採掘が営まれている（図2）。



◎図2 海底の炭層に向けて延長し採掘する（中国海洋事業）

加えて黄海、東シナ海と南シナ海北部および台湾島浅海大陸棚区の約300km²の新生代地層にも豊富な石炭資源が埋蔵されている。石炭の地層建造の厚さは一般的に数百から千メートルで、炭層の厚さは0.3～2.5m、最も厚いところでは3～4mに達する。褐炭をメインに、次いで泥炭、長炭、コールタールピッチなどとなっている。これら海域は石油ガス密集地区となっていることから、石油ガスと石炭生産を重ね持つ2大鉱床海域となっている。現在、採掘技術条件は困難であるものの、海域の石炭資源も将来の潜在的な資源である。

3 海砂利および海岸砂鉱^[1, 2, 3, 4, 5, 9, 12, 14, 18, 21]

中国の長い海岸線のうち半分以上は岩盤や砂利でできた海岸であるうえ、海岸は多様で曲折しており、良好な地形条件を備え、豊富な陸源物質の源となっている。大陸棚は広範、平坦で、近海河口区の浅瀬と沿岸の浅い海域には豊富な砂利と各種の砂鉱資源が埋蔵されている。

3.1 建築用の海砂利

石英砂利は主に遼寧、山東、浙江、福建、広東、広西、海南省と台湾島沿岸に分布しており、福建、広東、広西の石英砂利の品質は最も優れている。石英砂利は主に更新世・完新世海成段丘面の海岸、風成砂丘と砂浜に分布している。砂体の長さは数百メートルから千メートルあり、幅は数十メートルから数百メートル、厚さは数メートルとまちまちで、鉱層は1～4層あり、深さは一般的に<15m（近岸浅海区30～50m）である。鉱体は層状、擬似層状、レンズ状で、沿海岸では水平状でわずかに海の方へ傾斜しており、鉱層は安定している。その分布範囲、厚さ、鉱物の成分、粒度および化学成分はいずれも変化が小さく、探知された地質埋蔵量は31億トンである。

中国海砂資源の潜在力：(1) 海岸地帯の海砂資源 控えめに見積もり、砂浜の平均幅を400m、平均厚さを2～3mと推定すると、資源総量は35.8億m³あるいは53.8億m³に達する。(2) 大陸棚の海砂資源 34.4万km²、平均厚さ3mで推定すると、資源量は6695億m³である。(3) 近岸浅海の海砂資源 一般的に水深5～30mで、一部の海区は40～60mまで延びている。推定資源量は67.9億m³～101.8億m³である。

3.2 海岸砂鉱

現在、中国全国ですでに探知されている海岸の重鉱物、砂鉱の埋蔵量は16.4億トンで、保有している埋蔵量は11.6億トンである。海岸砂鉱には主に石英砂、ジルコン、チタン鉄鉱、モナズ石、ゼノタイム、コルンブ石、金紅石、磁鉄鉱、錫石、クロム鉄鉱、コルタン、砂金、ダイヤモンドなど13の鉱種が含まれる。探知された金属と非金属砂鉱の埋蔵量は約3000万トンである。現在すでに探知されている主な鉱物地は約百ヶ所あり、各種の鉱床は195個（そのうち大型48個、中型48個、小型99個）、産出点110個（表1）である。

鉱 種	大 型	中 型	小 型	産出点
1. 磁鉄鉱	0	2	15	8
2. チタン鉄鉱	10	9	19	15
3. ジルコン	12	12	26	38
4. モナズ石	6	7	10	17
5. 金紅石	0	1	2	7
6. ゼノタイム	2	2	1	0
7. コルンブ石	0	0	0	3
8. 錫石	0	0	6	6
9. コルタン	0	0	1	3
10. 石英砂	17	15	12	1
11. 砂金	1	0	4	10
12. ダイヤモンド	0	0	0	2
13. クロム鉄鉱	0	0	3	0
合 計	48	48	99	110

◎表1 海岸の砂鉱種類、規模統計表

上述の海岸砂の主な分布地区：

- (1) モナズ石、ゼノタイム、チタン鉄鉱、金紅石、錫石、コルタンは主に広東、広西、海南省の沿海地帯に分布している。
- (2) ジルコンは上述の各省沿岸地帯に及んでおり、主に山東、広東、海南省に分布している。
- (3) 砂金は主に遼寧、山東、台湾に分布している。ダイヤモンド砂鉱は遼寧省復州湾にのみ確認されている。

統計によると、各種の海岸砂鉱の埋蔵総量は約31億トン以上ある。その内訳は磁鉄鉱123.5万トン、チタン鉄鉱2340万トン、ジルコン4734万トン、モナズ石24万トン、金紅石7.5万トン、ゼノタイム1.82万トン、コルンブ石60万トン、錫石9181万トン、コルタン137トン、砂金22.6トン、ダイヤモンド1442万カラット、クロム鉄鉱2.01万トンおよび石英砂30.7億トン（そのうち石英砂ガラスは約2.7億トン）となっている。浅海区で重鉱物の含有量が高い区域

は約20ヶ所、Ⅰ級異常域26ヶ所とⅡ級異常域24ヶ所である。このほか砂金とダイヤモンド砂鉱もある程度の将来性が見込まれている。

海岸砂鉱の分布と鉱床生成条件の研究によると、鉱種あるいは組み合わせに基づき11ヶ所の試掘鉱区に分けられる(図3)。そのうちダイヤモンド砂鉱1ヶ所(1)遼東半島—山東萊州湾)、砂金2ヶ所(2)遼東半島黄海浅海区、(3)山東半島萊州湾)、砂錫1ヶ所(4)広東陸豊—陽江)、石英砂2ヶ所(5)山東半島北黄海沿岸、(6)広東、広西、海南省)、軽質の重鉱物砂鉱(ジルコン、チタン鉄鉱、モナズ石、金紅石、ゼノタイム)5ヶ所(7)山東半島南黄海沿岸、(8)福建—広東陸豊、(9)広東陽江—雷州半島—海南南部、(10)広西防城—北海、(11)台湾西部海岸地帯)。

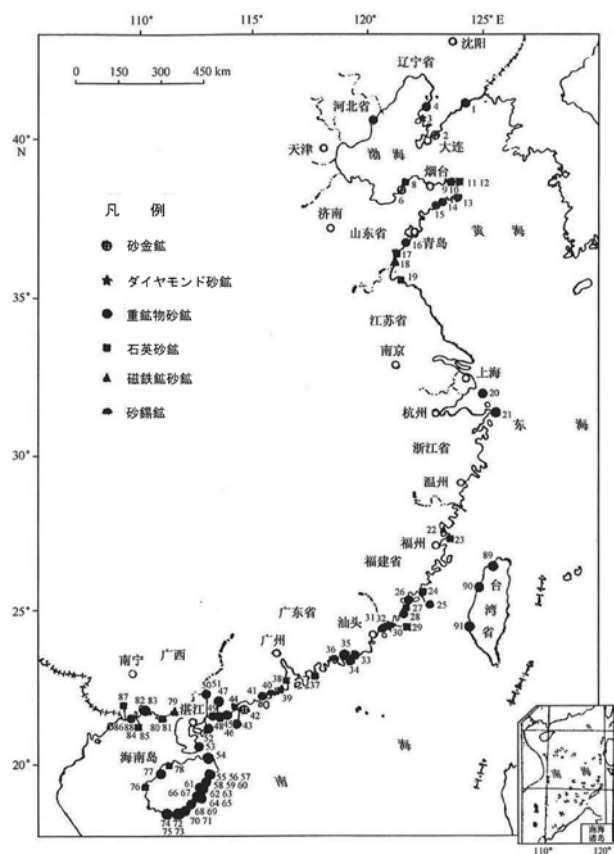


図3 中国海岸砂鉱の分布図(譚啓新、中国海岸砂鉱)

3.3 砂鉱物産出量および予測

関連統計資料による近年の各種砂鉱物産出量はチタン鉄鉱20万トンあまり、ジルコン1万トンあまり、モナズ石1500トンあまり、金紅石3000トンあまり、石英砂利数億トンである。2000年の統計データでは、海岸砂鉱の生産総量が11.8万トン(石英砂利の石産出量は含まない)で、そのうち、金紅石2300トン、チタン鉄鉱11.3万トン、ジルコン2500トン、モナズ石285トンとなっている。市場ニーズの量と成長率およびその他要素に基づく予測によると、成長率が最も高いのは建設用砂利石で約10%、その他

砂鉱成長率は2～6%である。

『2008年中国海洋経済統計公報』によると、全国海洋の総生産は29662億元で前年同期比11%の成長となり、国内総生産(GDP)の9.87%を占めた。付加価値12243億元を実現させ、昨年比10.4%の成長となった。12個の海洋産業のうち海洋鉱業はわずか10位で、その付加価値は9億元、昨年比21.3%の成長であった。

4 石油と天然ガス[5、6、7、8、14、18、20、21、23]

中国沿海大陸棚と大陸斜面の深水区は石油と天然ガス資源が豊富である。管轄海域は成長しつつづけており、新生界の厚さが2000m以上の堆積盆地は38ヶ所(近海域11ヶ所、図4を参照。南シナ海中、南部が27ヶ所)で、やや大きい石油・天然ガス資源の潜在力を持っている。中国近海の堆積盆地11個の石油・天然ガス潜在資源量は約240億トンの油と等価で、南シナ海中、南部海域25ヶ所の堆積盆地の石油・天然ガス潜在資源量は約154億トンの油と等価である。

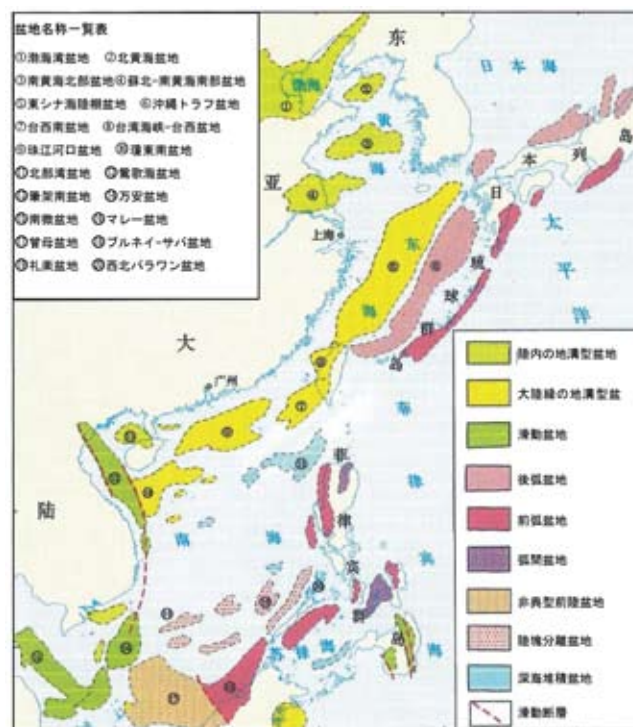


図4 中国近海および近隣の新生代盆地分布図(新中国海洋地質工作大事記)

専門家の推定によると、中国近海域には石油資源量が245.6億トン、天然ガス資源量が8.43万億 m^3 ある。南シナ海中、南部海域も含まれると、推定石油資源量は約500億トン、天然ガス資源量は10～12万億 m^3 である。しかし現在、海域の石油・天然ガス資源の探知率はやや低く、石油探知率は約20%、天然ガスの探知率はわずか10%である。

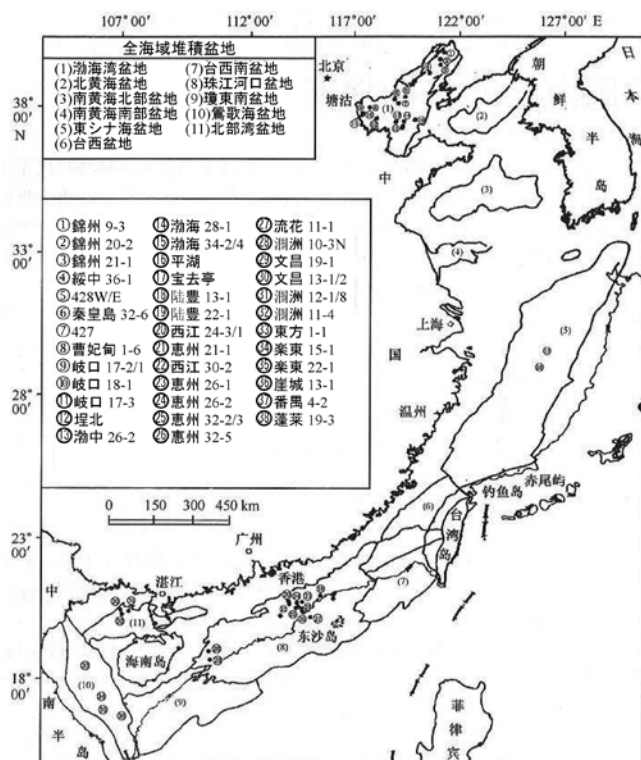
これまで、近海域で確認された石油・天然ガスを含む構造は150ヶ所近くあり、探知された石油・天然ガス田は

約70ヶ所（図5）、そのうち商業的に採掘が可能な埋蔵量の石油・天然ガス田は50ヶ所あまり（億トンクラスの大油田11ヶ所、千億立方メートルの大規模ガス田3ヶ所）である。探知された石油地質埋蔵量は累計数十億トン、天然ガス地質埋蔵量は数千億立方メートルである。

現在すでに相次いで45ヶ所の石油・天然ガス田の開発が開始されており、渤海、珠江河口、北部湾海域はすでに海洋石油の主要生産地区となっている。瓊東南、鶯歌海、東シナ海大陸棚区、渤中のくぼみおよび遼東湾のくぼ地は海上天然ガスの主要生産地区となっている。近年、海上石油の年間生産量は4000万トンの油の等価を超え、そのうち石油が3500万トン、天然ガスが70億 m^3 あまりとなっており、ここ10年、近海で探知された石油天然ガスの地質埋蔵量は毎年10～15%の速度で成長しており、生産量は毎年百万トン数量クラスで増加している。

2008年、12個の海洋産業のうち、海洋石油・天然ガス業は第4位に位置し、付加価値874億元を実現した。

関係資料の予測によると、2010年までに近海域で探知される石油地質埋蔵量は累計30～35億トン、天然ガス地質埋蔵量5000～6000億 m^3 、年間産出能力（海外のシェアを含む）は4500～5000万トンの油の等価に達している。



◎図5 中国近海の石油・天然ガスを含む盆地および主な石油・天然ガス田（蔡乾忠、中国海域石油・天然ガス地質学）

4.1 渤海区

渤海は石油・天然ガス資源が最も豊富な海域で、すでに石油・天然ガスを含む構造が80ヶ所あまり確認されている。埋蔵量の探知された石油・天然ガス田は30ヶ所あ

まりで、現在生産している石油・天然ガス田は約20ヶ所である。現在、渤海地区ではすでに石臼坨の隆起、渤西—渤南、遼中、遼北4ヶ所の開発システムが構築されている。

- (1) 石臼坨の隆起開発システム：QHD32-6とNB35-2の油田を主体とし、数百万トンクラスの生産能力を打ち立てる。
- (2) 渤西—渤南開発システム：天津市にガスを供給する主な生産基地で、毎年8～10億 m^3 のガスを供給できる。
- (3) 遼中開発システム：SZ36-1油田を主体とし、年間生産能力は500万トンに達する。
- (4) 遼中、遼北開発システム：JZ20-2およびJZ9-3油田を主体とし、このシステムが全面設立されると、年間生産量は原油数百万トンおよび天然ガス5億 m^3 が可能となる。

今のところ、渤海地区では計10個億トンクラスの大型石油・天然ガス田が探知されている。中国海洋石油総公司では2020年までに渤海で5000万トンの原油生産基地の建設を予定している。（図6）



◎図6 海上石油・天然ガスの海底ボーリング用プラットフォーム（中国海洋事業）

4.2 黄海区

黄海域は、北黄海、南黄海北部、南黄海南部の、3つの中・新生代堆積盆地に分けられる。黄海は、これまでに産業用石油・ガスフローが発見されていない唯一の海域である。1980年代に試掘された数ヶ所から、南黄海には常州6-1-1A油井と諸城1-2-1油井で石油・ガスが発見されただけであった。

現在までに、黄海域の石油・ガス地質調査では新たな発見がないものの、調査研究によって、北黄海盆地の貯留層形成条件は南黄海の2ヶ所の盆地に勝っていることが分かっている。少なくとも北黄海盆地は、中生代石油産出の問題を解決している。このことから専門家は、南・北黄海盆地の堆積には厚さがあり、根源岩・貯留岩・帽岩の組み合わせがよく、石油・ガスが集まる構造帯が盆地内に形成・成長しやすいため、有利な石油・ガス海区であると見ている。

4.3 東シナ海区

東シナ海大陸棚盆地は、掘削によって将来性の高い石油・ガス盆地であることが実証されている。すでに平湖石油・ガス田（中型）について埋蔵量評価がなされており、そのほかにも残雪、宝雲亭、武雲亭、春暁といった石油・

ガス田や、CO₂ガス田1ヶ所、及び断橋、天外天、玉泉、孔雀亭、麗水(LS36-1)の5ヶ所の石油・ガスを含む構造が発見され、東シナ海での石油・ガス探査にとって重要な飛躍となった。特にLS36-1-1油井で天然ガスが発見されたことは、東シナ海の家成相貯留層形成に関する地質探査での大きな進展である。ほかにも台湾海峡西部福建省沿岸の晋江、九龍江河口の外には、将来的に石油・ガス探掘の可能性のあるくぼ地が発見された。

平湖石油・ガス田の開発では1999年3月に操業が開始され(図7)、4月から上海へのガス供給をしている。本石油・ガス田からは連続15年以上の探掘が可能だと予想されている。



◎図7 東シナ海平湖石油・ガス田(新中国海洋地質工作大事記)

4.4 南シナ海区

南シナ海北部・南部にはそれぞれ15ヶ所の盆地があり、総面積は74万km²である。非常に厚い新生界ができており、石油・ガスの産出にとって良好な地質条件を備えている。現在南シナ海は、世界でも石油・ガス探査・開発の活発な海区の1つになっている。また、多くの盆地掘削によって石油・ガス資源が豊富なことも証明されており、南北の大陸棚・大陸斜面では、それぞれ30ヶ所以上の石油・ガス田(大油田1ヶ所、大ガス田3ヶ所、中小ガス田30ヶ所)が確認されている。

4.4.1 北部湾盆地

北部湾で発見された石油・ガス田と石油・ガスを含む構造は20数ヶ所あり、ウェイ西南のくぼ地に集中している。例えばWZ10-3、WZ6-1、WZ11-4、WZ11-4N、WZ11-1、WZ16-1、WZ12-3、WZ10-8、WZ10-2とWS16-1などは、すでに5ヶ所の石油・ガス田が操業している。しかし専門家は、これまでに探掘された地質埋蔵量と予測数値との隔たりが非常に大きく、くぼ地の急斜面や斜面地帯と構造帯にはまだ各種ガスの埋蔵が発見できると判断している。

4.4.2 鶯歌海—瓊東南盆地

この盆地は北部斜面、西部(中部)低地、西南斜面に分けられる。北部斜面の外縁には生物礁が多く形成されている。生物礁と砂岩の複合体は14ヶ所あり、総面積は約250km²、礁体の深さは中程度で800～2140mである。西部(中部)低地は、古第三紀厚層泥岩が新第三系の各

層に刺さったもので、ガス田と石油・ガスを含む構造がすでに10数ヶ所発見されている。なかでもYC13-1とDF1-1が大型のガス田である。

YC13-1ガス田のガス含有面積は49.9km²で、地質埋蔵量は1,000億m³以上である。1996年1月に正式操業が始まっており、天然ガスの年間産出可能量は34億m³で20年間安定供給できる。本ガス田から香港へのガス供給は年間29億m³、海南省へのガス供給は年間5億m³である。

4.4.3 珠江河口盆地

珠江河口盆地は、南シナ海北部大陸棚区域のうち中・新生代堆積を中心とした大型の陸縁地溝型盆地で、面積は約14.7万km²である。これまでに盆地内には石油・ガス田と石油・ガスを含む構造合わせて30数ヶ所が発見されている。内訳は大型油田1ヶ所(LH11-1)、大型ガス田(LW3-1)1ヶ所、中型石油・ガス田10数ヶ所(XJ24-1、XJ24-3、XJ30-2、HZ21-1、HZ25-1、HZ26-1、HZ27-1、HZ32-2、HZ32-5、HZ33-1、LF13-1、LF22-1など)と石油とガスの集中地帯2ヶ所(惠州くぼ地と東沙隆起)である。現在までに15ヶ所の石油・ガス田が操業生産をしている(図8)。



◎図8 1979年8月13日、「珠五井」で初めて産業用石油探掘に成功(中国海洋地質工作大事記)

LH11-1は、南シナ海北部で最初に見つかった2億トン以上で最大の生物礁油田である。本油田は水深305m、地質構造は複雑、油が稠密で、油井が浅く水深は深く、また埋蔵層が複雑で海況が劣悪なため、開発生産が困難である。斜面掘削の技術によって開発に成功し、ピーク時には年間生産能力は200～250万トンに達する。

2006年には珠江河口盆地の白雲くぼ地でLW3-1-1の深水(1480m)掘削に成功した。56mの天然ガス層に当たったことが大きな突破口となった。初期の計算では天然ガスの地質埋蔵量は1,000億m³以上である。これは現在までに近海域の天然ガス探査で発見されたなかでも最大量であり、これによって白雲くぼ地の深水区が、石油とガスの集中地帯であることが実証された。

南シナ海の中・南部の中国従来領海内においては、石油・ガスを含む盆地が30ヶ所あって、総面積は約58万km²である。石油資源の予測量は数百億トンだが、これまでにボーリング調査は行われていない。

5 天然ガスハイドレート^[10, 13, 15, 16, 17, 18, 21]

近年の調査研究により、東シナ海沖縄トラフ、南シナ海北部大陸斜面、西部大陸斜面、台湾海峡の台西南大陸斜面はいずれも、天然ガスハイドレートを生成・堆積するための良好な地質、地形、地質化学条件を備えていることが分かっており、これまでに東シナ海と南シナ海で一部の有力な目的地が絞り込まれている。

東シナ海海域の数万km²範囲には、天然ガスハイドレートが生成・堆積されるための、水深と地質化学条件が備わっている。沖縄トラフ中南部ではBSR（海底擬似反射面）の標識が大量に見つけられており、初期の見込みではこの区域での天然ガスハイドレート資源量は約数十億トンの石油当量になる。トラフ西南部の海底堆積物からは炭化水素類ガスの地化学異常が見られ、総合的には、沖縄トラフ中南部は天然ガスハイドレートの有効な鉱化地帯であると評価されている。

南シナ海海域の約100万km²範囲には天然ガスハイドレートの生成にふさわしい地質と物理化学的条件が備わっている。そのうち西沙トラフ、東沙トラフ、神狐海域、瓊東南シナ海域では、天然ガスハイドレート資源量は100億トン超の石油当量と予想されている。

現在すでに西沙トラフ、東沙神狐、瓊東南シナ海域の地震断面から明らかなBSR異常表示と、生物、地球化学的標識が発見されており、数ヶ所の目標地点が絞り込まれている。主なものは、筆架南異常域(I)、台西南—東沙トラフ異常域(II)、瓊東南—西沙トラフ異常域(III)、中越南異常域(IV)和万安—南薇西—曾母異常域(V)である。

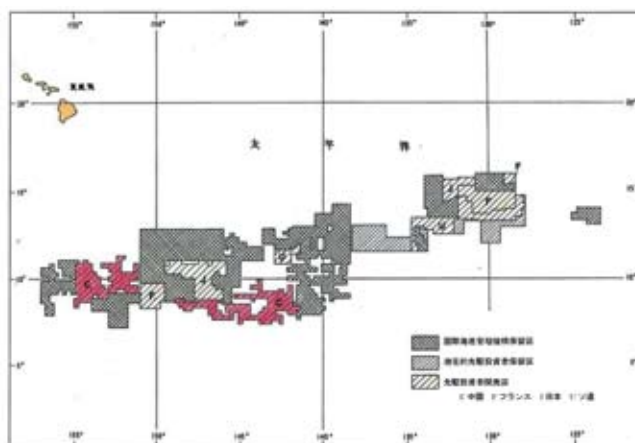
2007年5月南シナ海北部神狐海域の重要目標地点2ヶ所とすでにボーリング調査が確定している油井8ヶ所のうち、最初の1ヶ所から天然ガスハイドレートのコアサンプルが採取された（図10）。水深1245mの海底地下183～201mと、水深1230mの海底地下191～225mのコアサンプル2つで、豊度はいずれも20%以上、気体中のメタン(CH₄)含有量は99.7%と99.8%であった。



◎図9 南シナ海北部神狐海域で最初に採掘された天然ガスハイドレート（青島海洋地質研究所）

6 国際海底中国鉱区^[11, 18, 21]

1990年代以降、中国は東太平洋の海盆CCエリア内で10数回の航海調査を行い、国連の国際海底機構(ISA)の承認を得て、優先採鉱権を与えられた7.5万km²の海底鉱区を獲得している。（図10）。獲得できる団塊の量は4.2億トンで、そこからマンガン11175.52万トン、銅406.40万トン、ニッケル514.42万トン、コバルト98.49万トンが採取できる。



◎図10 太平洋における中国C—Cエリアのある鉱区（新中国海洋地質工作大事記）

中国の大洋鉱産資源中長期調査計画では、2020年前後の多金属団塊の商業的採掘に向けて技術備蓄をしておくほかに、2008～2015年には、主に東太平洋マゼラン海山の多金属地殻資源の調査評価を行って、鉱区と三大洋海嶺両側にある熱水活動区の多金属硫化物鉱床に関する調査評価を、国際海底機構に申請する。

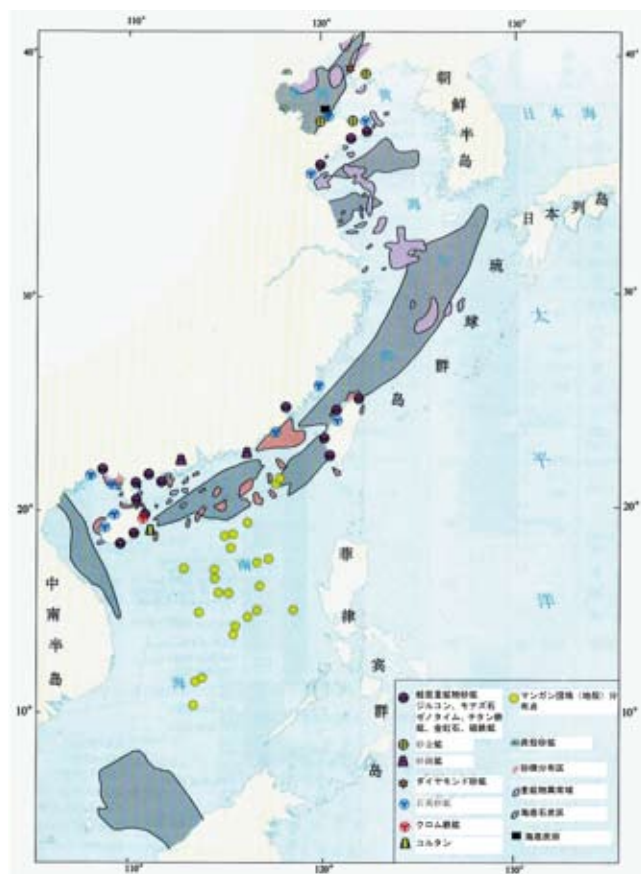
2005年から現在までに、「大洋一号」は太平洋海嶺の3000メートル以上の深海で200kgを超える熱水硫化物サンプルを採取した。その後、大西洋とインド洋で比較的整った熱水硫化物の「チムニー」鉱石サンプルを採取した。

2008年5月～2009年2月の「大洋一号」第20次航海では、南西インド洋超低速拡張洋の海嶺で新たな海底熱水区6ヶ所を発見した。「モニターグラフ」を使って巨大な海底「黒チムニー」（つまり多金属熱水硫化物サンプル）と大量の生物サンプルを採取した（図11）。東経63.5°付近、水深3700mにある南西インド洋海嶺の地溝帯中央の北側斜面では、初めて非活動熱水区を発見し、大型で完全な高温チムニー体サンプル第一号を採取した。



◎図11 技術者たちと採取した多金属硫化物（中国大洋協会）

このほか、南西インド洋海嶺付近では全長約20kmの広範囲にわたる低温熱水区を発見し、炭酸塩型の「白チムニー」サンプルを大量に採取した。また、南西インド洋の東経51.7°～51.75°、東経53.2°と63.9°の付近でも新たに広範囲の熱水活動区を発見し、サンプルを採取した。これで、第20次大洋調査では、南西インド洋で合わせて11ヶ所の海底熱水区と4ヶ所の熱水異常域を発見している。



●中国沿岸・大陸棚区域海洋固形鉱産資源分布略図

(中国現代海洋科学叢書：海洋地質学、楊子廣、2004)

参考文献

- [1] 曾呈奎、周海鵬、李本川編集. 中国海洋科学研究開発[M]. 青島：青島出版社、1992
- [2] 許東禹、劉錫清、張訓華等編集. 中国近海の地質[M]. 北京：地質出版社、1997
- [3] 王聖潔、劉錫清、李学傑. 沿海・浅海の砂礫資源利用に関する潜在的可能性[J]. 海洋地質動態、1997、(11)：1~3
- [4] 楊子廣、王聖潔. 海洋砂利採取業について[J]. 海洋地質動態、1997、(12)：7~11
- [5] 莫傑、劉雲起、孫岩. 地球上最大の鉱産資源宝庫—海洋鉱産資源. 宋金明編集、青い領土[M]を参照. 済南：山東科技出版社、1998、249~290
- [6] 莫傑. 海の神秘探求と海の資源開発[M]. 北京：地質出版社、1998
- [7] 莫傑、肖漢強. 中国の海洋石油・天然ガス工業[J]. 中国地質、1998(6)：3~5
- [8] 頼万忠. 中国近海石油・ガス探査の進展と展望[J]. 中国海洋ガス(地質)、1998、12(4)：217~225
- [9] 孫岩. 中国の臨海鉱産資源の分布と開発[J]. 海洋地質と第四紀地質、1999、19(1)：117~121
- [10] 祝有海、張光学、盧振權等. 南シナ海の天然ガスハイドレート鉱化条件と採鉱の展望[J]. 石油学報、2001、22(5)：6~10
- [11] 莫傑. 中国大洋鉱産資源調査の進展概況[J]. 海洋探査と資源開発の技術[A]. 北京：海洋出版社、2001、41~86
- [12] 王聖潔、楊子廣、吳桑雲等. 中国臨海建築の砂利採掘に関する環境地質問題と持続可能な発展のための対策[J]. 海洋探査と資源開発の技術[A]. 北京：海洋出版社、2001、150~152
- [13] 張光学、黄永様、祝有海等. 南シナ海天然ガスハイドレートの鉱化の展望[J]. 海洋地質と第四紀地質、2002、22(1)：75~81
- [14] 莫傑. 中国臨海砂鉱とその持続可能な発展戦略／中国の海洋ガス業、楊建海編集. 中国海洋事情[M]を参照. 北京：開明出版社、2002、216~231/335~361
- [15] 盧振權、龔建明、吳必豪等. 東シナ海天然ガスハイドレートの地球化学的標識と採鉱の展望[J]. 海洋地質と第四紀地質、2003、23(3)：77~81
- [16] 吳必豪、張光学、祝有海等. 中国近海天然ガスハイドレートに関する研究の進展[J]. 地学最前線、2003、10(1)：177~189
- [17] 龔建明、陳建文、戴春山等. 中国海域天然ガスハイドレート資源の展望[J]. 海洋地質動態、2003、19(8)：53~56
- [18] 莫傑. 海洋地学最前線[M]. (第三編海洋鉱産資源調査). 北京：海洋出版社、2004、241~376
- [19] 楊子廣編集. 中国海洋地質学[M]. 済南：山東教育出版社、2004
- [20] 蔡乾忠. 中国海域石油・ガス地質学[M]. 北京：海洋出版社、2005
- [21] 莫傑. 海洋地学最前線[M]. (第六編海洋鉱産資源、222~277、第七編ガス資源、278~321). 北京：海洋出版社、2007
- [22] 国家海洋局海洋発展戦略研究課題グループ. 中国海洋発展報告[M]. 北京：海洋出版社、2007
- [23] 張抗. 中国と世界の石油・ガス地政[M]. 北京：地質出版社、2008

塔河地区西南部の古生界碎屑岩油ガス集積評価法

•Profile•



周 文 Zhou Wen ●成都理工大学エネルギー学院 副院長

成都理工大学エネルギー学院副院長、油ガス田地質・開発工学国家重点試験室學術委員会委員。1962年9月生まれ。2006年6月、成都理工大学油ガス田開発工学科卒業、工学博士。過去10数年間に150件余りの研究プロジェクトを手掛けた。主として油ガス集積系及び動力学の研究、油ガス（エネルギー）資源の評価及び戦略研究、油ガス田開発地質研究、油ガス田開発工学（ソフト工学を含む）の研究に従事。100編余りの論文を発表し、EI等に60編余りが収録される。「割れ目性油ガス貯留層評価方法」、「油ガスプールの現在の地盤応力評価方法及び応用」等の国内外に大きな影響を及ぼす5冊の學術専門書を出版。国内の複雑な油ガスプールの開発地質研究、特に割れ目性貯留層研究、油ガスプールの現在の地盤応力場研究等の分野で造詣が深く、国内外の石油探査開発學術分野で大きな影響力を持つ。サウジアラビアのサウジアラコム、石油大学等を5回訪れ、研究と講義を行った。中国エネルギー学会理事、四川省石油協会理事、四川省地質協会会員、中国国家科学技術成果賞選考委員、中国国土資源部、四川省、重慶市の各科学技術成果賞選考専門家、四川省安全生産局専門家を兼任している。

趙冠軍 葉斌 鄧虎成 李秀華 黃婷婷

【要旨】

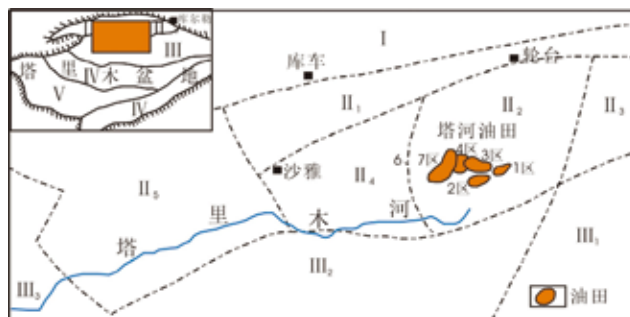
塔河地区西南部のデボン系東河砂岩部層（D_{3d}）の古構造の特徴、炭化水素源岩と油源の対比、石油移動の痕跡、トラップのタイプ及び条件、移動経路、集積の特徴に対する分析を通じ、次のことがわかった。研究区ではパリスカン前期及びそれ以降に主として2度の大きな構造運動が起き、異なる構造パターンが作り上げられ、これを基礎に、2度の主要な「油ガス充填注入」があった。第1期の主要な充填注入はパリスカン前期にあり、塔河北部の「古石油プール」が形成された。第2期は主にオルドビス系中-上部統の炭化水素源岩で発生し、ヒマラヤ中・後期に「油源断層」と「疎通誘導層」に沿って、ヒマラヤ期に形成された構造トラップ、構造-層位組合せトラップ等の油ガスの集積に有利な場所に大量に充填注入された。ヒマラヤ前期以前、石油の主な移動方向は北部であったが、ヒマラヤ期に構造の逆転により、油ガスの移動が南部と東南部に向かうようになった。ヒマラヤ中・後期は研究区の集積のカギとなる時期である。我々は前期石油生成、「油源断層」及び後期構造制御、後期集積というモデルを打ち出した。現在、研究区の南部は油ガス集積の有利な区域となっており、今後の探査のための拠り所を与えるものである。

前書き

研究作業区は塔河油田の西南部に位置し、塔河油田は新疆ウイグル自治区クチャ県と輪台県にある。構造位置はタリム盆地沙雅隆起中部のAkekuleアーチ西南部（図1）^②である。ボーリングを行った結果、研究区の地層は上から下へ第三系～オルドビス系となっており、そのうち古生界碎屑岩地層（S、D、C）はいずれもダウンラップの堆積形態でオルドビス系地層の上に重なっている（図2）。

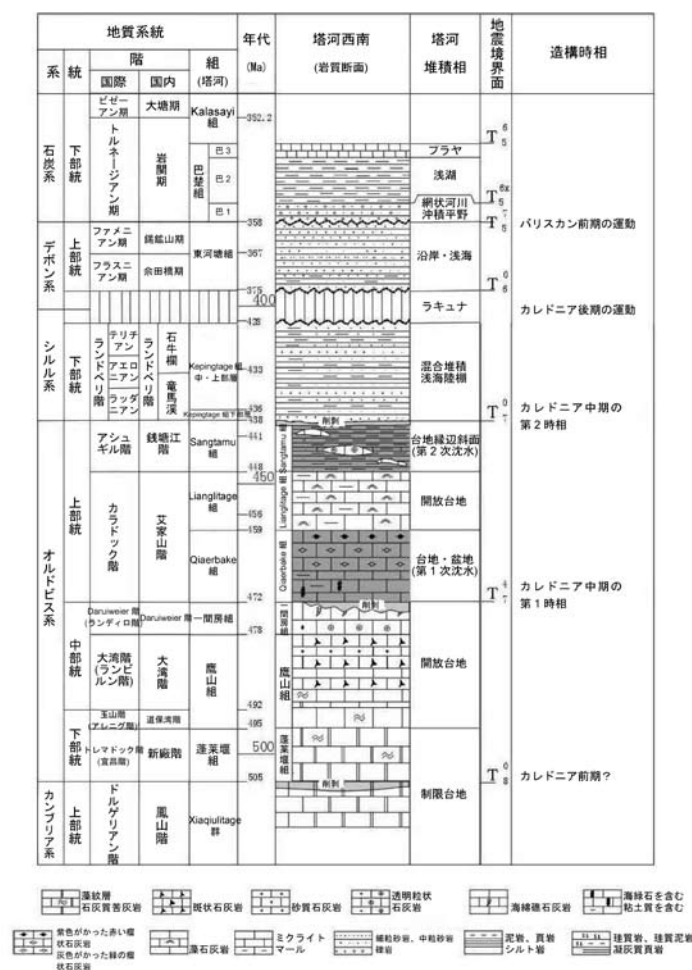
近年、塔河油田の探査区域が周辺に広がるのに伴い、油田西南部の巴楚組第1部層（C_{1b}¹）、東河塘組（D_{3d}）、Kalashayi組（S_{1k}）ではいずれも良好な油ガス徴が見つ

り、商業ベースの油ガスが得られた。これらの層準は既に塔河油田の重要な油ガス探査目標となっている。先人はAkekuleアーチの油ガス移動及び集積のモデルについて研究^{③、④、⑤、⑥、⑦、⑧、⑨}を行ったが、それらは主に研究区のオルドビス系炭酸塩岩と三畳系砂岩の石油プールを対象としたものであり、デボン系砂岩石油プールの集積に関する研究は比較的少ない。塔河西南部の古生界地層は岩質の変化が大きく、その貯留層の発達状況とトラップの特徴はまだ明らかになっておらず、油ガス集積期の位置付けについてはなお一定の論争がある。東河塘組の油ガス移動痕跡に関する研究はほとんど手が付けられておらず、その一部の研究も主に油ガスの物理的性質や地球化学的特徴^⑩を論じることに集中し、原油の窒素含有化合物^{⑪⑫}等の側面からマクロ的な分析を行っただけである。このため、作業区での集積条件の分析と石油プールのタイプ等の研究を強化し、正確な油ガス集積モデルを確立することは、目的層の次の段階の探査に直接関わるものであり、重要な意義を持つ。



◎図1 塔河油田の位置及び主要ブロック区分^②

I—クチャ陥没区 II—塔北隆起区
II1—沙雅—輪台ブロック・アップリフト II2—Akekuleアーチ
II3—草湖サッグ II4—Halabatangサッグ II5—沙西隆起
III—Aman陥没区 III1—Manjiaerサッグ
III2—Shuntuoguole低アーチ III3—Awatiサッグ



●図2 塔河西南部地層の総合柱状断面図

1. 地質の基本的特徴

1.1 構造的特徴の概況

研究区のAkekuleアーチでは複数の構造運動^[8]が起きた。盆地の進化と発展を背景に、Akekuleアーチは震旦（シニアン）－オルドビス世前期にひな型が形成され、カレドニア中期の造山運動によって隆起の形態が一段と顕著になり、北へ上昇し、南へ傾斜沈入する鼻状アーチが形成された。パリスカン前期に隆起した大部分の地域は長期の上昇・露出・風化・削剥過程でシルル－デボン系及びオルドビス系中・上部統の地層がほとんど消失し、その一部が残るだけであり、オルドビス系下部統も程度の差こそあれ削剥作用を受けた。パリスカン後期には上昇・露出・削剥が更に進み、一連の褶曲・断裂系が形成され、Akekuleアーチの北高南低の構造形態が基本的に出来上がった。こうした形態はインドシナ－燕山期までずっと続き、その地質系統は依然として北が薄く南が厚いという特徴を持つ。ヒマラヤ期に、Akekuleアーチは強烈なヒマラヤ衝突作用によって水平的な圧縮応力を受け、地域の堆積心が北へ移り、盆地のタイプに転化が生じた。その結果、中生界及びその上位の地層は北低南高の構造形態となったのである。

現在、東河塘組の頂部は構造形態が複雑である。全体としては西部が低く、東部と南部に向かって高さが増すという様相を呈している。頂面は小さく分散した沢山の構造が発達しており、その多くは小さな局所的カルミネーションである。

1.2 貯留層の特徴分析

デボン系上部統の東河塘組（D₃d）は主に研究区西部に分布し、西から東に向かってシルル系とオルドビス系の地層の上に不整合に重なり合い、厚さの変化が大きく、9m（T749）～101.5m（T740）となっている。全体として西が厚く東が薄く、北が厚く南が薄い傾向を示している。東河塘組は砂岩の分布範囲が広く、主として北東－南西の2つの縞状分布を呈しており、その砂体は厚く且つ連続し、対比性に優れている。平面から見ると、東河塘組の下部は一般的に8m～20mの砂質泥岩の地層が発達している。東河塘組の主要部分は後退型海浜堆積に属し、一部では内湾及び干潟堆積が発達し、北部のT728、S99、T738削井区ではデルタ堆積^[15]も発達している。

マクロ的に見ると、東河の砂岩層は岩屑石英砂岩を主とし、その次が石英砂岩及び岩屑砂岩であり、一部の井戸（T728、T739）では少量の細粒礫岩も含まれている。砂岩の粒度は細粒を主とし、中～粗粒がこれに次ぎ、その色は薄い灰色が多い。碎屑粒子は分級度がよく、円磨度は円～亜稜角を主とし、膠結の主なタイプは粒子が支える孔隙型である。この層の砂岩は全体として未固結・多孔を主とし、緻密な塊状層がこれに次ぎ、平行層理、板状斜層理、低角交差層理が発達している。

東河塘組砂岩貯留層の孔隙率の主な分布範囲は6～20%で、平均値は11.25%となる。浸透率の主な分布範囲は0.1～100×10⁻³μm²で、平均値は23.99×10⁻³μm²となる。物性は相対的に良く、砂体の発達条件に恵まれ、且つトラップが存在する場所では、油ガス集積・貯留の可能性がある。

1.3 炭化水素源岩の特徴分析

先人の資料を整理・分析^[3,6,9]した結果、S-D貯留層が三疊－ジュラ系炭化水素源岩に由来する可能性はほとんどないと考えられる。ペルム系下部統の多くが消失し、又は火山岩が中心で、堆積岩の分布が非常に少なく、石油生成能力については無視してよい。作業区と隣接区の石炭系沙10、沙30、沙59、満参1の井戸4本の有効炭化水素源岩資料の分析（表1）から、研究区内の石炭系炭化水素源岩の石油生成条件も良くないことがわかる。

先人は各層準にある原油の飽和炭化水素、芳香族炭化水素同位体及びビチューメン同位体を分析し、軽質成分－原油軽炭化水素フィンガープリントを分析した結果、研究区のオルドビス系、石炭系、デボン系の油はいずれも同源性を備えており、3つの層準の原油は主に下位のカンブリア系－オルドビス系の炭化水素源岩層から来るものだと考えを示した（顧憶氏ら^[6]、2000／王伝剛氏^[4]氏

◎表1 沙10、沙30、沙59、満参1井の石炭系炭化水素源岩パラメータ統計表

(顧憶氏の資料整理に基づく、2003)

井戸番号	層厚	岩質	厚さ m	試料	有機炭素含有量%	石油生成ポテンシャル量 mg/g
沙10	C ₁ kP	優黒質泥岩	85	3	0.13~0.27	0.07~0.16
沙10	C ₁ b ¹	石灰岩	14.5	1	0.16	0.04
沙30	C ₁ kF ³	優黒質泥岩	117.5	4	0.16~0.53(0.33)	0.14~0.24(0.19)
沙59	C ₁ kI	優黒質泥岩	29.5	2	0.28	/
満参1	小海子	優黒質泥岩	10	/	0.30	0.197
満参1	小海子	石灰岩	69	/	0.09	0.035
満参1	C ₁ kP	優黒質泥岩	47.5	/	0.17~19.97 (3.939)	0.02~26.16 (5.839)
満参1	C ₁ kP	石灰岩	38.5	/	0.04~7.3 (0.675)	0.196
満参1	C ₁ kP	ライトグレー泥岩	2	/	0.067	0.05
満参1	C ₁ b ¹	優黒質泥岩+石灰岩	45.5	/	0.02~1.88(0.28)	0~4.64(0.421)

備考：0.16~0.53 (0.33) は最小値-最大値 (平均値) を示す。

ら、2005)。今回、塔河油田のオルドビス系-三疊系地層から産出した原油の物理的性質分析、コア及び含油薄片分析、顕微赤外スペクトル石油成分分析を通じ、同様の認識が得られた。このため、研究区の中心的な炭化水素源岩はカンブリア-オルドビス系地層だと思われる。カンブリア-オルドビス系の炭化水素源岩は分布範囲が広く、有機質の存在度が高く、成熟度が高いという「1広2高」の三大特徴を持つ。炭化水素源岩は深水盆地相の石灰質珪質泥岩とマール、ミクライト、粘土質ミクライトであり、有機質存在度TOCは0.5～5.52%となる。TOC≥0.5%の源岩厚さは153m～336m（未穿）。Ⅱ、Ⅲ型ケロジェンを主とする。成熟度は1.1～2.45% VREで、その熟進化度は高～過成熟段階に達する。油ガス資源の予測によれば、Akekule及び隣接地域のカンブリア系-オルドビス系下部統の炭化水素源岩が発達し、パリスカン後期に至った時に形成される油ガス資源総量は56.4837×10⁸tとなる。また、ヒマラヤ後期までに形成される油ガス資源量は34.2219×10⁸tとなる^[3]。

1.4 帽岩の特徴分析

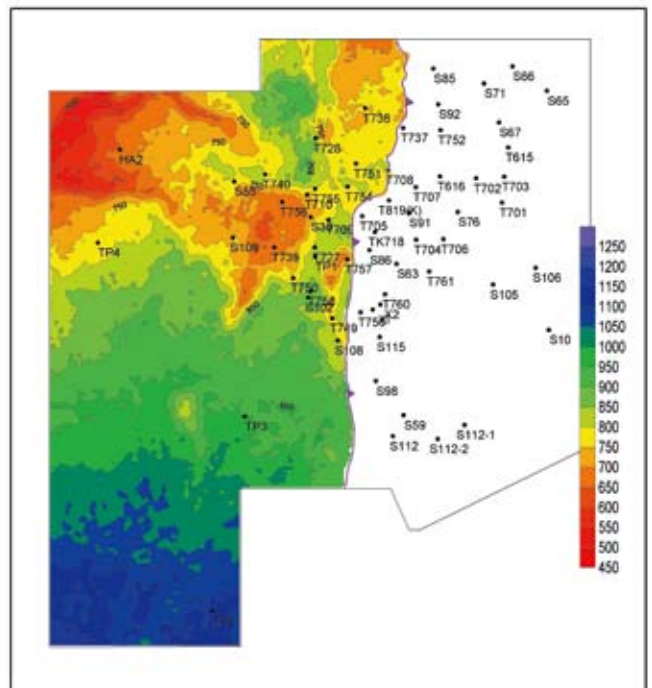
石炭系巴楚組第2部層（C₁b²）は層厚の相対分布が安定した褐紅色又は「ラテライト」色の泥岩が主に発達している。その厚さは30m～90mで、西と北に向かって厚さが増し、東河塘組の直接的な帽岩とすることができる。巴楚組第3部層（C₁b³）は主に石灰岩と岩塩の地層で、厚さの変化が大きいものの、石灰岩の岩質が緻密で、分布も安定し、全体に広く分布している。この地層は研究区の一部地域で岩塩地層が発達しており、地下の岩塩は塑性岩石層に属し、「地質流体」^[4]と呼ばれる。このため、岩質の視点から見ると、封塞の質が良い帽岩である。しかし、その分布範囲が限られているため、この地層にある石灰岩等の岩質地層と組み合わせて局所的な封塞帽岩とすることができる。

2. 古構造の特徴

示準層-層厚分析法を採用して研究作業区の古構造を研究した。削井断面、地震断面に対する分析研究を通じ、

不整合面の分布と相応の構造期に基づき、堆積環境を考慮する条件の下で、次の4つの主要示準層を選定した。1) ヒマラヤ前期の示準層は古第三系Jidike組の底部に近い比較的安定した泥岩地層を選び、T₂²境界面から約50ms前後離れている。2) インドシナ期の示準層はジュラ系Yangxia組の底部に近い泥岩地層を選び、T₄⁶反射境界面から約50ms離れた強反射境界面である。3) パリスカン後（末）期の示準層は三疊系Ketuer組下部の比較的安定した泥岩地層を選び、T₅⁰境界面から約60ms前後離れている。4) パリスカン前期の示準層はパイモータル石灰岩を選んだ。これを基礎に三次元地層資料を利用し、示準層押しつぶし方法を通じ、目的層と示準層の間の古埋没深度を確定して、古構造等値線図を描いた。

東河塘砂岩部層は作業区東部で消失しているが、パリスカン前期の造山運動の後、その古構造の特徴は西北が低く、東南が高く、北東に走り、北西に傾く緩やかな単斜構造として示される。そこには面積が小さく、構造幅が狭い多くの局所的カルミネーションと鼻状構造が発達しており、古構造の最も高い部分は研究区南部のTP3井東南に位置する。作業区中・南部では緩やかな単斜構造を背景に、面積約1～2km²、幅約20m前後の多くの局所的な古構造が発達している。

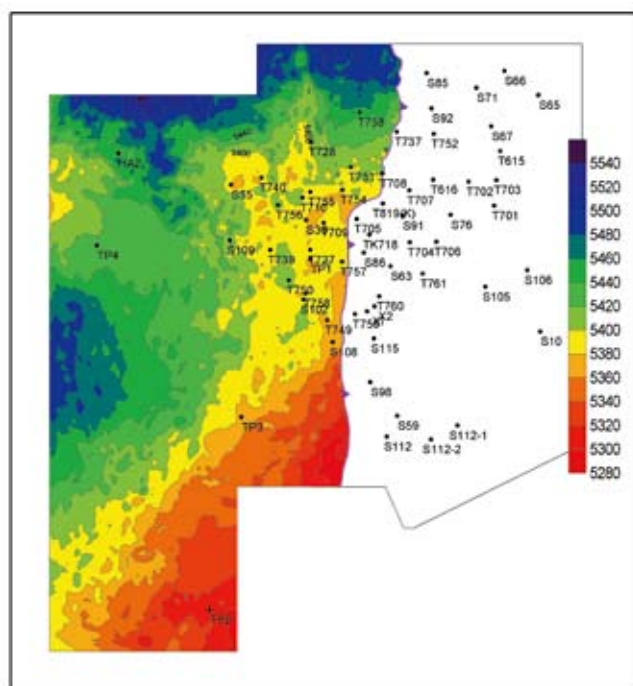


◎図3 パリスカン後期の東河砂岩頂部境界古構造図

パリスカン後期の構造運動は、作業区東河砂岩（D₃d）頂部境界の古構造の特徴を変え（図3）、これにより、古構造の全体の特徴がそれまでの南高北低から南低北高に変わった。この時期、研究区中・南部の構造は単純であり、主には南傾の単斜として示される。一方、北部の構

造は複雑であり、多くの凹凸が入り交じる構造形態となっている。作業区西北端と中部のT739、T757井の近くでは軸が北東に向かい、面積が約50、10、2.5km²で、構造幅が100m前後に達する古構造がそれぞれ発達している。また、S55井以北、H2井東北では軸が北東に向かい、面積約2km²、幅約30m前後の古構造が、TP3井の西側では面積約2km²、幅約100mのドーム状の古構造が発達している。この他、T738-T758井の一带では軸方向が南北に近く、南に傾動する鼻状構造が発達している。

インドシナ期の東河砂岩の古構造形態には大きな変化が見られず、パリスカン後期の特徴を受け継いでいる。ヒマラヤ前期はその前の時期の古構造の特徴が継続し、即ち作業区の南部が最も低く、西北端とT728井の一带が最も高い。



◎図4 ヒマラヤ後期の東河砂岩頂部境界古構造図

ヒマラヤ後期の造山運動は作業区のもう1つの強烈な運動であり、前期東河砂岩頂部境界の構造的特徴を変え（図4）、それまでの南が低く北が高い構造を西北が低く東南が高い構造形態に変えた。この時、作業区の西部と北部では2つの凹地が発達し、2つの凹地の間には北西方向の低い鼻状隆起が発達している。T754-T728-T740-S109-TP1井一带では幅の狭い鼻状隆起が発達し、この鼻状隆起を背景に、TP1井、S30、T740等では面積1～3km²、幅20m前後の5つの局所的カルミネーションが発達した。作業区の東南部では面積が比較的大きい2つの古構造が発達している。

上記の結果が示しているように、研究区で各時期に発生した構造運動は活動の強さと形態がそれぞれ異なり、

古構造の様相を次々と変えていった。これは作業区における各時期の古生界碎屑岩地層の油ガス移動、集積、貯留に影響を与えるものである。

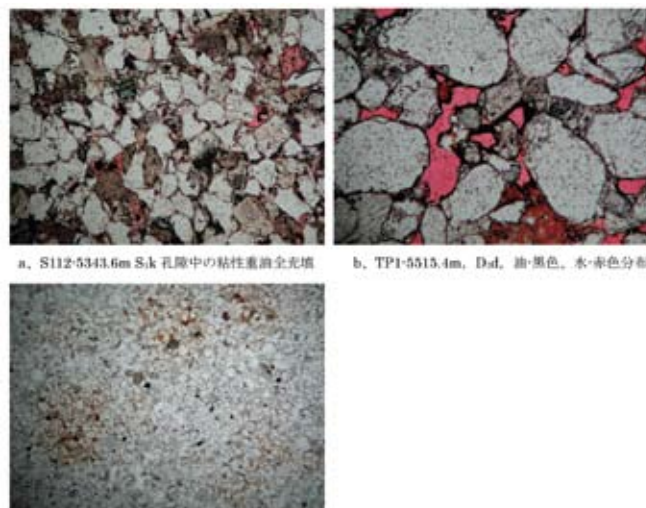
3. 油ガス集積のメカニズム研究

3.1 石油移動痕跡の研究

ミクロ面からより確実な拠り所を手に入れ、油ガスの移動痕跡を明らかにするため、該研究区の実情を直視し、コア含油性観察と含油薄片研究を踏まえ、顕微薄片赤外スペクトルによる石油基成分測定技術を初めて採用し、薄片中の各油質成分を確定し、対比分析を行い、これによって石油の移動経路をつかんだ。

3.1.1 コア及び薄片分析

該研究区の井戸17本のコア含油性観察によれば、東河塘組のコアは主に葉片状、縞状、割れ目状という3種類の石油痕跡が見られる。北部井地区の井戸では主に重油痕跡とピチューメン痕跡があり、研究区の南に向かうと、重油とピチューメンの痕跡が徐々に減少し、軽質油の痕跡が増加し、重油と軽質油の混合現象が見られる。

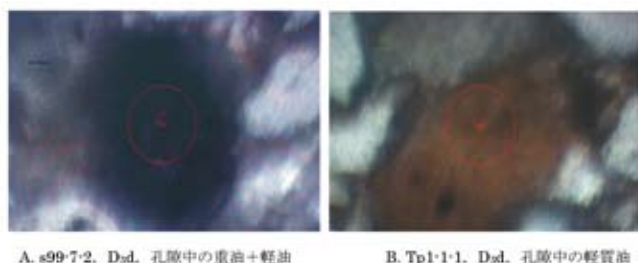


◎図5 含油薄片のマイクロ写真

624片余りの含油薄片資料の観察結果によれば、古生界碎屑岩貯留層の石油産出状態には以下の3種類がある。

- 1) 孔隙中の石油全充填状態：貯留層内のほとんどの粒間孔隙は原油によって充填されている。粒間孔隙内における油は満たされた状態であり、吸着水が孔隙の「縁辺」に分布している。例えば、研究区の西南部に位置するS112井（図5-a）では、シルル系（Ssk）砂岩貯留層の孔隙中に粘性重油、ピチューメンが全充填されている。
- 2) 孔隙中の油が水を包む状態：貯留層内の大部分の粒間孔隙は担体コロイド又は「鑄体」によって充填されている（表示の意味は水が占める部分）。孔隙の

縁辺にはピチューメンがあり、小孔又は孔隙の湾曲が大きい部位には油（一般には重油）が残留している（図5-b）。これは後期に水が油を追い払う過程があり、油の多くが排除され、少量の油が残留したことを物語る。



◎図6 研究区の一部試料の含油薄片写真（赤い囲み部分は顕微赤外サンプリング）

- 3) パッチ状、スポット状を呈した油の産出：後期に水に追い払われた後、残留した油又は移動・滞留した油を分析すると、主にはシュロ色の軽質油（図5-c）であった。薄片の石油痕跡資料から、石油には少なくとも2期の「充填注入」過程があり、前期が重油（酸化作用を経る）の「充填注入」、後期が軽質油の「充填注入」であるとの結論を得ることができる。

3.1.2 顕微赤外スペクトル成分分析

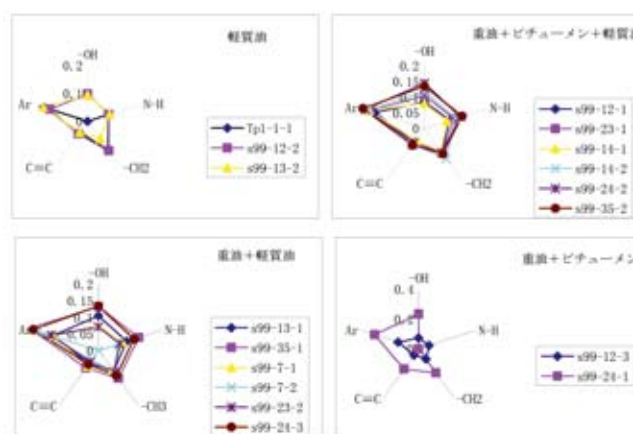
ミクロの視点から石油の移動過程をより正確に論証するため、顕微赤外スペクトル成分分析技術を用い、東河塘組の石油移動方向について判断を行った。

赤外吸収スペクトルは赤外電磁放射に対する物質の選択性吸収という特性を利用し、構造分析、定性・定量分析を行う手法である。赤外吸収スペクトルの吸収ピークを分析すれば、赤外スペクトログラムにおける分子の位置、強さ及び形状から推断し^[9,10]、分子が含む官能基及びその分子構造を確定することができる。また、特性吸収バンドの強さは、分子構造及び周辺環境と関係する他、光路の中に含まれる分子数の多さ（即ち物質の濃度）とも関係があり、光路の中の分子数が増えれば、その特性吸収バンドの強さも増すのである。つまり特性吸収バンドの強さは分子数（物質の濃度）の関数であり、このため、その強度を測定すれば、含まれる分子数の多さを計算することができる。

上記の方法を採用すれば、含油薄片中の各種石油痕跡について赤外サンプリング（図6）を行い、主要な基の量を計算し、その差異を対比し、同源性进行分析することができる。今回の研究では東河塘組砂岩部層（D3d）の含油薄片17点の各種痕跡について測定を行い、測点スペクトル系列図を作成し、スペクトル系列の対比により、基の吸収ピークを確定した後、ランベルト・ベールの法則を用い、各基の相対含有量を計算した。分析を通じ、-OH、N-H、-CH₂(CH₃)、C-C、Arの5つの官能基を最終的に選び、

レーダーマップを作り、各試料の油質の違いを分析した（図7）。

実験結果から以下の認識を得ることができる。(1)各種油類の官能基がいずれも基本的に存在しており、軽質油、重油、ピチューメンの油源が同じであることを示す。(2)重油+ピチューメン+軽質油と重油+軽質油の2種類の試料は図形の形状がよく似ているが、軽質油及び重油+ピチューメンの2種類の試料の図形とは一定の違いがあり、これは重油又はピチューメンと軽質油が期の異なる産物であることを物語る。研究区中部では2種類の油が混合している。(3)北部S99井と研究区南部TP1井の軽質油は試料に大きな違いがなく、両者が同源であることを物語る。このため、後期に生成した軽質油は構造が逆転した後、北から南へ移動することができる。



◎図7 顕微赤外吸収スペクトルで測定した石油官能基モル含有量分布レーダーマップ

上記の結果は、研究区の地層における各種油が同源であることを物語る。北部の軽質油は構造が逆転した後、南部に向かい、D3d疎通誘導層に沿って移動し、その経路に適合するトラップがあれば、集積・貯留が可能となる。

3.2 油ガスの移動経路

3.2.1 疎通誘導層の分布

該研究区で広域的移動の疎通誘導層となるのは主にD3d部層に連続分布する砂岩体であり、東河砂岩中・上部の比較的良好な貯留層が古生界油ガスの移動経路となる。

石炭系巴楚組巴1砂・礫岩部層（C1b1）は砂体分布の不連続性により、局所的な疎通誘導の役割を果たすだけである。シルル系Kalashayi組（S1k）砂岩は一般に分布範囲が狭く、たとえ分布が比較の広がったとしても、砂岩が緻密で、前期の充填にピチューメン等があるため、後期の油ガス移動に不利な影響がもたらされ、やはり広域的な疎通誘導層とはならない。

3.2.2 不整合面の移動作用

研究区の目的層には3つの不整合面があり、油ガス移動の経路としてのその意味は同じものではない。

- 1) オルドビス系頂面 (Sik底面) の広域不整合面。
オルドビス世後期Sangtamu組 (O_{3s}) の泥岩を主とするエリアにある。それは主に上位のシルル系Kalashayi組 (Sik) 泥岩と接触しており、一般には油ガスの「疎通誘導」の意味を持たない。研究区北東部において、この不整合の下位がO₁₂の石灰岩地層である時は、上部 (又は頂部) に存在する風化殻により、移動経路の役割を果たすことができ、下位まで来た油ガスは上部を覆う巴1砂礫岩部層又は東河塘組砂岩部層に直接入り、トラップにぶつかれば集積が可能となる。
- 2) シルル系 (Sik) 頂面、即ち東河塘組砂岩部層底面の広域不整合面。その疎通誘導作用は東河塘組砂岩の地層を通るケースとほぼ同じである。
- 3) 東河塘組砂岩部層頂面 (即ちC_{1b}¹底面) の広域不整合面。上部を覆う地層が巴1部層 (C_{1b}¹) 泥岩である時、その疎通誘導作用も東河塘組地層を通るケースとほぼ同じである。一方、巴1部層 (C_{1b}¹) 砂岩である場合、両者は一体化した移動経路となり、また、その下位のオルドビス系風化殻地層と接触している時は、1つの疎通誘導系を構成することが可能である。

3.2.3 「油源断層」分析

作業区内の断層は主にカレドニア運動の中・後期に形成され、バリスカン運動前期の変動を経て、バリスカン運動後期にその最終的な構造が定まった。断裂で切られた層準は一般に比較的深く、下位の地層はオルドビス系中・下部統まで切られ、さらにはカンブリア系の炭化水素源岩層まで伸びている。上位は三疊系の地層を超えていない。断面は一般に比較的険しい。バリスカン後期及びそれ以降の時期はカンブリアーオルドビス系の主要炭化水素源岩の大規模な二次生成期である。下位のオルドビス系地層と上位のシルル系ー石炭系地層が断層で切り離された時は、下部の石油が上部に移動する重要な経路

となり、こうした断層は「油源断層」と呼ばれる。

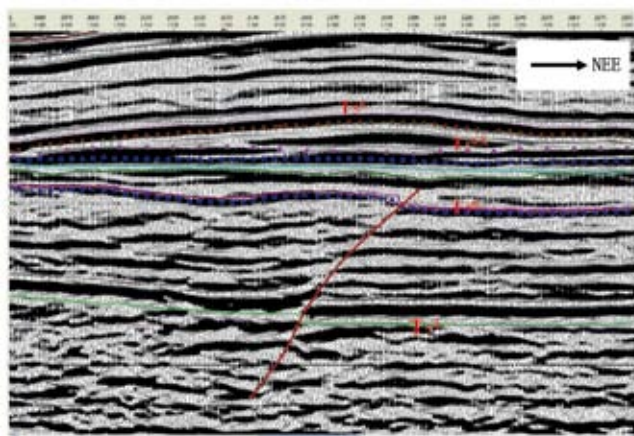
三次元地震資料及び作業区付近の二次元地震資料の説明から、研究区内の極めて近い個所に9本の断層が存在していることがわかる。これらの断層は相対的に低い位置にあり、断層で切り離された層準等の特徴を分析した結果、いずれも「油源断層」と見なすことができる。例えば、⑨号断層は作業区内の南部に位置し、S112井に近接している。三次元断面上に1本の逆断層 (図8) が見られ、見掛けの変位は60m前後で、S-O地層が切断されている。シルル系層厚図から明らかなように、走向はSN方向で、S112井の薄片の下には赤い片状石英砂岩のテクトナイト (図9) が見られ、これは断層の確かな存在を物語るものだ。

分析 (図10) 結果：①②号断層は主に東河塘組トラップの「油源断層」である。④⑨号は主にシルル系 (Sik) 及び巴楚組1部層 (C_{1b}¹) トラップの「油源断層」である。⑧号断層は東河塘組地層の尖滅線上に位置し、D_{3d}、Sik、C_{1b}¹トラップの「油源断層」としてよい。③⑥⑦断層は研究区から非常に離れている可能性があり、これはHalohatang地区トラップの「油源断層」である。

3.2.4 割れ目の疎通誘導作用

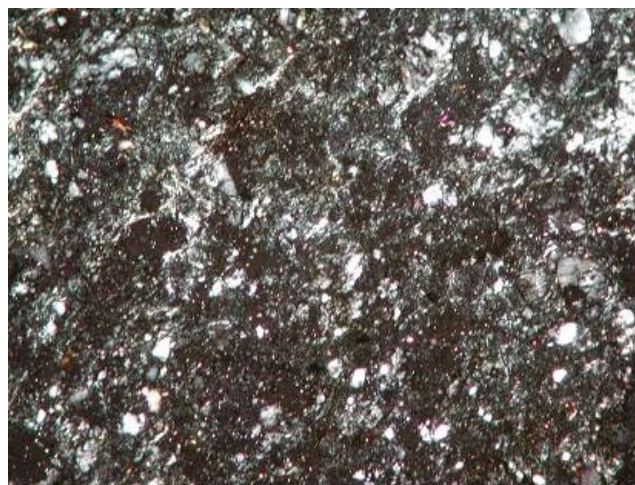
研究区の古生界碎屑岩地層には少数の鉛直割れ目が見られる。この種の不連続面には油徴が見られ、油ガスがその面に沿って流動していることは明らかだ。国内の各大盆地の稼働井におけるコア観察結果からわかるように、この割れ目は最長で10m前後^[1]となる。従って、この割れ目だけに頼り、シルル系、デボン系等の厚さが100m以上に達する地層を通じさせようとしても、それはかなり難しく、疎通面で局所的な役割を果たすにすぎない。

上記の分析から、断層と「疎通誘導層」、不整合面は研究区の石油移動の主要経路であり、シルル系、デボン系及び石炭系下部の石油プールのカギとなる要因の1つだと考える。



◎図8 塔河西南部⑨号「油源断層」の三次元地震断面説明

注：T₇₄-O_{3q}底、T₇₀-S_{1k}底、T₅₆X-C_{1b}¹底、T₅₆-C_{1k}底



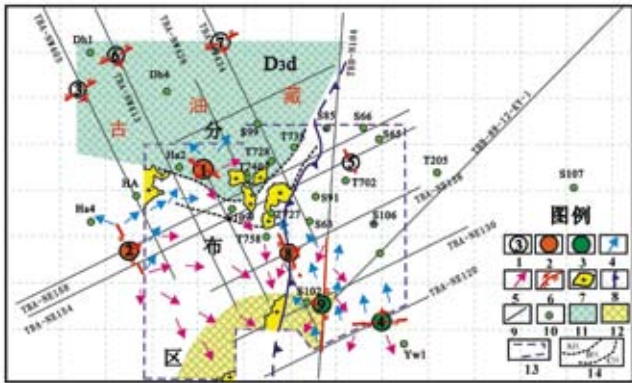
◎図9 S112井-5311.09-5312.06m Sik:

赤色の片状石英砂岩：構造応力による片状構造の誕生

3.4 封塞面及びトラップのタイプ

油ガスのトラップ封塞面に対する現在の区分¹⁾によると、研究区の主な封塞面タイプは次の通り。(1)構造封塞面で、主には変形岩質境界面 (TC) となる。(2)不整合面の封塞面 (U) で、これは湾曲した不整合面を指す。(3)地層封塞面で、主には地層 (岩石層) 尖滅線 (CJ) となる。(4) 岩質境界面の封塞面で、主には岩質尖滅 (CH) となる。他のタイプの封塞面は発見されていない。

これまでに発見された局所トラップを元に、封塞面のタイプに基づき区分したトラップのタイプは以下の通り。

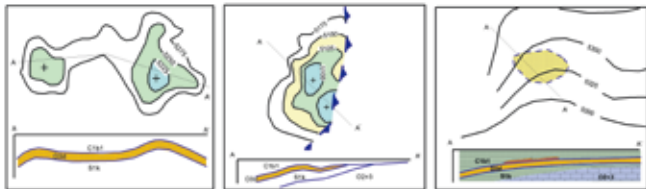


◎図10 塔河油田西南部の油源断層分布・移動経路分析図

1-断層及び番号、2-D3dトラップ油源点、3-S1k、Cib¹トラップ油源点、4-ヒマラヤ前期の移動方向、5-ヒマラヤ後期の移動方向、6-逆断層、7-東河塘組の主なトラップ、8-東河砂岩尖滅線、9-三次元地震測線、10-ウェルポイントの位置、11-前期の油ガス指向帯、12-後期の油ガス指向帯、13-三次元地震カバーエリア、14-性質別の原油分布 (A-重油、B-混合区、C-軽質油)

1) 単一封塞面構造トラップ (背斜構造トラップ) (図11-A)

主には東河塘 (D_{3d}) 地層に分布し、貯留層は東河砂岩地層であり、帽岩は巴楚組の1部層又は2部層 (Cib¹⁻²) 泥岩となる。主には東河塘組 (D_{3d}) の頂部が湾曲した不整合面の封塞面 (U) によって形成された。



A. 構造トラップ (U) B. 組合せトラップ (U+CJ) C. 岩質トラップ (CH)

◎図11 研究区の主なトラップタイプ概要図

例えば、S55-T740井トラップは東河塘組砂岩層に形成された幅の狭い完全な背斜トラップである。背斜の形態が不規則で、東西の2つの部分に分かれ、その中間が細長い帯状の「鞍部」とつながっている。西部の構造には2つのカルミネーションが存在しており、西の閉じたカルミネーションの方が高く (70m)、東の方が低い (40m前後)。

分析によれば、そこは底水石油プールであり、T740井の東河塘組 (D_{3d}部層) で試験を行った時、7.33m³/dの石油を産出した。

2) 二重封塞面構造一層位組合せトラップ

主には東河塘組 (D_{3d}) の頂部が湾曲した不整合面の封塞面 (U) と該組の地層尖滅線 (CJ) で構成されている (図11-B)。研究区ではTP1-S30-T754とS112西の2つのトラップが発見された。TP1-S30-T754井トラップは幅の狭い完全な二重封塞面背斜構造トラップである。背斜の形態が不規則で、北から南へ長い帯状の逆「√」字形を呈し、多くのカルミネーション (9つの局所カルミネーション) がある。北端はD_{3d}地層尖滅線の封塞となる。トラップ内のT727、Tp1井ではD_{3d}部層から石油が得られた。研究区東南部の東河塘組砂岩尖滅線付近に位置するS112西トラップは新しく発見された大型トラップである。

3) 単一封塞面岩質トラップ

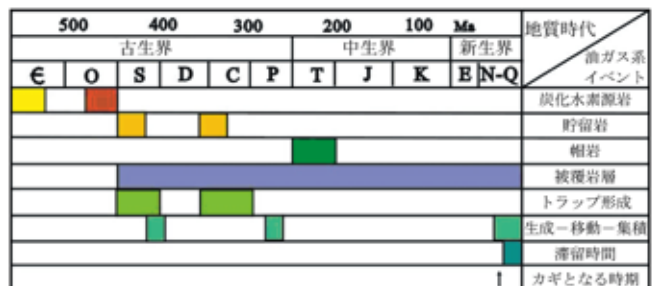
Cib¹、S1k地層の砂体分布が不連続なため、一部の地区では岩質トラップ (CH) (図11-C) の形成が可能となる。これまでにCib¹とS1kの石油プールが発見されており、その多くは岩質トラップである。例えば、T707井はCib¹部層のトラップ内に位置しないが、石炭系の砂岩・泥岩互層 (5563-5606.19m) でドリルシステムテスト (DST) を行った時の石油換算日産量は7.4m³/dとなり、また、これとは別のDST (5592-5606m) では9.6m³/dだった。該井の貯留トラップを分析すると岩質トラップに属していた。S112-2井Cib¹部層石油プールのトラップタイプも単一封塞面岩質トラップである。

4. 集積のカギとなる時期及び集積モデル

4.1 集積のカギとなる時期

炭化水素生成期及びこれに関連した構造運動は石油プール形成のカギとなる (図12)。構造進化の過程から見ると、研究区は2度の大きな構造変動を受けた。1つはパリスカン後期で、構造作用により研究区は北低・南高から北高・南低に変わった。もう1つはヒマラヤ後期で、この時は北高・南低の構造形態が北低・南高に変わった。2度の構造変化、特にヒマラヤ後期の構造変化は現在の石油プール集積を制御する重要な要因である。

カンブリア系中・下部統の炭化水素源岩には大体3期の



◎図12 塔河油田西南部のS-C集積イベントチャート

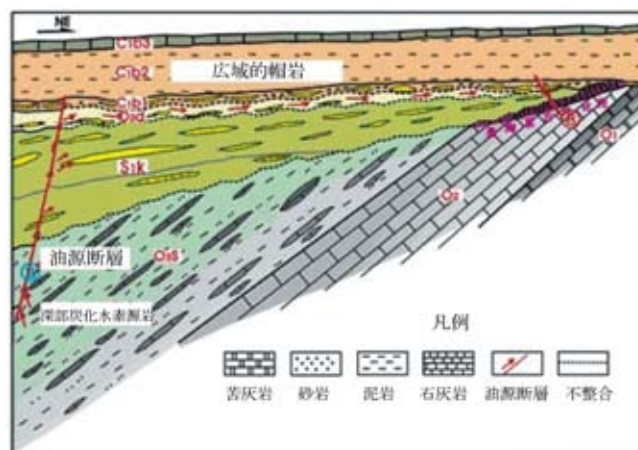
炭化水素生成・移動・集積過程があり、即ちカレドニア後期、バリスカン後期及びヒマラヤ期である。オルドビス系中―上部統の炭化水素源岩には大体2期の炭化水素生成過程があり、即ちバリスカン後期とヒマラヤ期である。研究区のシルル、デボン、石炭系の石油プールについて言うなら、その主な油源はカンブリア―オルドビス系の炭化水素源岩であり、カンブリア系下・中部統の源岩で早期に生成された油ガスの大部分は既に破壊され、残ったのは重油又はピチューメンが多い。現在、商業ベースの生産能力としての価値を持つ油ガスは主にカンブリア系及びオルドビス系中・上部統の炭化水素源岩から来ており、バリスカン後期以降に生成した油ガスは、ヒマラヤ中―後期に構造が「逆転」した後、移動が始まり、集積・貯留された。このため、カギとなる時期はヒマラヤ前―後期となる。

4.2 石油プールの集積モデル

集積条件をまとめ上げ、研究区の集積モデル（図13）を打ち出した。カンブリア系―オルドビス系の炭化水素源岩で生成した軽質原油は、「油源断層」を通して目的層に移動する。断層に通じるシルル系砂体では「岩質」トラップ等の石油プールを形成することができ、広域的な疎通誘導層である東河塘組に入った後、層に沿って上部に移動し、その経路にトラップがある時に集積される。主な広域的帽岩はCib²部層の泥岩である。Cib¹砂岩が移動経路に通じているなら、石油は入り込み、広域移動又は集積・貯留が可能となる。東河塘組で発見されたトラップから見ると、トラップは中・北部が比較的小さく、分散し、南部が比較的大きく、相対的集中している。これは後期石油移動の指向帯であり、油ガスを捕集する最良の地区となる。研究区の集積は前期石油生成、油源断層制御、後期構造制御、後期集積という特徴を持つ。

5. 結論

- 1) 示準層～層厚分析法を採用し、東河砂岩の古構造を研究した。その結果が示すように、バリスカン後期の運動により、東河砂岩頂部境界の古構造は全体としての特徴がそれまでの南高北低から南低北高に変わった。ヒマラヤ中・後期に再び構造調整が発生し、東河砂岩部層は全体として「南傾」から「北傾」に変わり、構造の逆転が起きた。東河砂岩部層（D_{3d}）のupdip尖滅楔形層内で一連の組合せトラップが形成された。
- 2) 研究目的層の中で油ガス移動経路とすることができるのは主に断層、疎通誘導層、不整合面、割れ目であり、石油の主な広域移動経路は「油源断層」、東河塘組砂岩「疎通誘導層」、不整合面となる。これは研究区の油ガス集積のカギとなる要因の1つである。



◎図13 西南部「油源断層」―東北部隆起斜面石油移動集積モデル

- 3) コア、含油薄片分析、顕微赤外スペクトル石油成分分析を踏まえ、石油移動痕跡について系統的な研究を行った。ヒマラヤ前期以前、石油の主な移動方向は北向きであったが、ヒマラヤ期に構造が逆転したため、油ガスの移動方向に「逆転」が生じ、研究区南部が移動指向区になったと考えられる。バリスカン後期における東河砂岩頂部境界の古構造の特徴は南低北高であり、集積した油ガスの大部分が破壊を受け、残ったのは重油又はピチューメンが多い。ヒマラヤ中・後期になると、構造に再び変化が起き、カンブリア系及びオルドビス系中・上部統の炭化水素源岩で再び大量の炭化水素が生成され、主に「油源断層」（下位の炭化水素源岩と目的層をつなぐ）と「疎通誘導層」（東河塘組砂岩層等）に沿って同期に形成されたトラップ内に充填注入された。
- 4) 赤外スペクトル法を油ガス移動痕跡の研究に用いることは非常に効果的である。それは塔河油田西南部の油ガス移動過程をミクロ面から実証しており、今後の油ガス移動研究の主要な技術方法の1つとすべきである。
- 5) 東河塘組では単一封塞面構造トラップ（背斜構造トラップ）と二重封塞面構造―層位組合せトラップが主に発達しており、一方、単一封塞面岩質トラップは巴楚組1部層（Cib¹）、シルル系Kalashayi組砂岩（Sik）の主要タイプとなっている。
- 6) 集積のカギとなる時期はヒマラヤ期であり、研究区の集積モデルを確立した。集積は「前期石油生成、油源断層と後期構造制御、後期集積の特徴」を持つ。
- 7) ヒマラヤ期に形成された構造トラップと構造―層位組合せトラップは油ガス集積の有利な場所である。研究区中南部のこの種のトラップは後期石油移動の指向帯であり、油ガスを捕集する最良の地区となる。このため、南部トラップの探査に力を入れるのは避けられないことである。

参考文献

- [1] 周文、黃輝、王世澤ほか、帽岩及び断裂帯の封塞作用評価[M]、四川科学技術出版社、2000
- [2] 張抗、塔河油田オルドビス系石油プールの性質を探索[J]、海相油気地質、2000,3(4):47-53
- [3] 丁勇、王允誠ほか、塔河油田シルル系集積条件分析[J]、石油実験地質、2005,27(3):232-237
- [4] 王伝剛、王鉄冠ほか、塔河油田原油安定炭素同位体の特徴及び集積の意義[J]、新疆石油地質、2005,26(2):155-157
- [5] 趙孟軍、堆積盆地油ガス集積期研究及び集積過程総合分析方法[J]、地球科学進展、2004,19(6):939-945
- [6] 顧憶、タリム盆地北部塔河油田の油ガスプール集積メカニズム[J]、石油実験地質、2000,22(4):307-312
- [7] 雲霞、閻文新、Akekuleアーチの集積地質条件及び石油制御法則[J]、新疆地質、2001.12
- [8] 陳発景、汪新文ほか、新疆タリム盆地北部の構造進化と油ガス関係[M]、地質出版社、1996
- [9] 顧憶、黄継文、邵志兵、塔河油田オルドビス系油ガスの地球化学的特徴と油ガス移動[J]、石油実験地質、2003.12
- [10] 何発岐、周家駒、雲霞、タリム盆地塔河油田の油ガス探査新技術[J]、石油実験地質、2001,23(3):p318-323
- [11] 董慶年、赤外スペクトル法[M]、北京化学工業出版社、1979:230-245
- [12] V.C.ファーマー [英]、鉱物の赤外スペクトル[M]、北京科学出版社、1982:33-35
- [13] 王明德ほか編、分析化学[M]、北京：高等教育出版社、1986:385
- [14] 胡望水、タリム盆地の逆転構造と油ガス集積[J]、新疆石油地質、1995,16(2):89-95
- [15] 顧家裕主編、タリム盆地堆積層序の特徴及びその進化[M]、石油工業出版社、1995

中国の海底資源調査・研究の進展

•Profile•



初鳳友 Chu Fengyou ●国家海洋局第二海洋研究所 国家海洋局海底科学重点实验室 首席研究員

国家海洋局海底科学重点实验室主任、首席研究員。1964年1月生まれ。1992年、中国地質大学(北京)鉱物学・地球化学の理学博士。主な研究分野は海底資源と鉱床成因論。責任者として2001～2006年の中国海底資源調査・研究活動を手配・実施。現在は「大規模な海底資源の鉱床生成メカニズム」等に関する研究を重点的に推進。

1 前書き

海底には豊かな鉱物資源が眠っており、これは人類の将来の生存・発展にとって必要な資源の宝庫である。国の管轄海域外にある国際海底区域は面積約2.5億km²で、地球表面積の約49%を占める。「国連海洋法条約」の規定によれば、この区域及びここに埋蔵されている資源は人類の共同財産であり、国際海底管理局が人類全体を代表して管理と調整を行う。中国は1983年から多金属団塊（ノジュール）、コバルトリッチクラスト、多金属硫化物等の国際海底資源の調査研究活動を計画的に手配・実施しており、人類が共同で海底資源を開発利用するのに大きく寄与した。

2 中国の海底資源調査・研究の歩み

中国は1976年から他の海洋調査プロジェクトと結び付け、南太平洋中部で大洋多金属団塊の試験的な調査・研究活動を進め、水深4,214～5,443mの海底でその試料を採取した。80年代に入ると、国家海洋局と旧地質鉱産部（現在の中国地質調査局）の管轄下にある事業所が中部太平洋の東部で多金属団塊の大規模な調査と研究を行うようになり、その調査区域は200万km²に達した。1991年、国家海洋局、地質鉱産部（当時）等の7省庁は「中国大洋鉱産資源研究開発協会」（China Ocean Mineral Resources R&D Association、中国大洋協会と略）を共同で設立した。中国大洋協会は中国の国際海底資源調査・研究活動を調整・手配するとともに、「国連海底管理局」に鉱区の登録申請を行うことに責任を負っている。この時、「大洋多金属団塊資源研究開発第1期（1991～2015年）発展計画」が策定された。

前期の9回の大規模な航海調査の結果に基づき、大洋協会は専門家に依頼して30万km²の区域を申請区（138°～157° W、7°～13° N）として選び、「国連海洋法条約」の要求に従い、それを資源量が等しい2つの部分（各15万km²）に分けた。半分は申請者が留保し、もう半分が国連海底準備委員会に提出された。1990年12月10日～14日、国連海底準備委員会の技術専門家チームは会議を開き、中国の鉱区申請を審査し、国家海洋局海底科学重

点実験室の金翔竜（Jin Xianglong）院士（アカデミー会員）らの専門家が申請書の技術関連問題について説明を行った。1991年3月、中国は15万km²の多金属団塊開発区（141°～155° W、8°～12° N）の申請を認められ、フランス、日本、ロシア、インドに続く5番目の多金属団塊資源「先行投資者」となった。1991～2000年の度重なる航海による調査結果を踏まえ、2001年5月、中国大洋協会は7.5万km²の鉱区を最終的に獲得し、国際海底管理局と「探査契約」を交わした。中国大洋協会は国際海底開発活動の先行投資者から国際海底資源探査の請負者となったのである。

国内外の深海環境プロジェクトの成果と経験・教訓を総括し、参考にした上で、中国の科学者は国際海底区域に関する「基線及びその自然的変化（Nature Variability of Baseline, NaVaBa）計画」を打ち出した。この計画は2001年に国際海底管理局の4大国際協力プロジェクトの1つとなることが決まった。現在、多金属団塊探査区の調査活動は環境評価を中心に進められている。

1998年、大洋協会は「コバルトリッチクラスト資源調査実施可能性論証会」を開き、同年、西北太平洋でこの資源の試験的な調査を行った。中国は2001年からコバルトリッチクラスト資源の大規模調査をスタートさせた。調査区域は中部太平洋海山群、マゼラン海山群、マークス海嶺等（図1）を含んでおり、詳細調査の面積は30万km²余りに及ぶ。2001年～2008年、国連海底管理局の「深

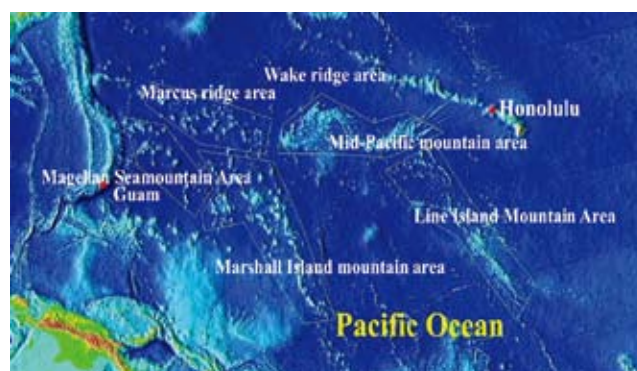
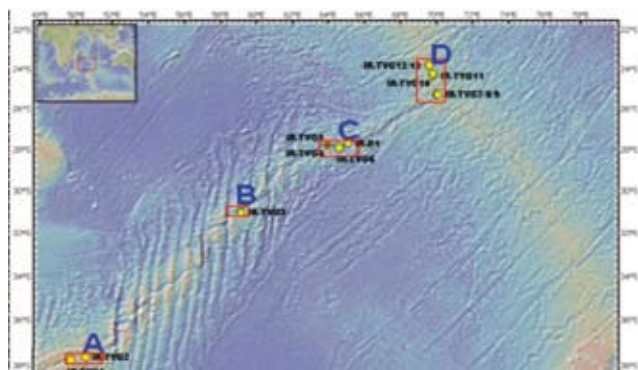


図1 太平洋コバルトリッチクラスト資源研究区

海における多金属硫化物とコバルトリッチクラストの探鉱・探査活動に関する規則」を審議する会議で、中国は実際の調査結果に基づき、規則・プロセス、申請面積、ブロック面積及び開発方式等について建設的意見を出した。中国のコバルトリッチクラスト資源調査は2006年から鉱区の画定段階に入り、現在、上記30万km²の範囲内で5万km²近くを選定し、詳細な地質学、地球物理学、鉱床学調査及び鉱区の環境調査を進めている。2001年～2008年には計8回の航海調査が実施され、その期間は600日を超える。2009年は既に80日間の調査を行った。

中国の海底熱水硫化物資源調査はスタートしたのが比較的遅い。2003年に東太平洋海嶺9～10°Nで40日間の試験的調査を行い、2005年から海底熱水硫化物の大規模な調査を始めた（この年に初の世界一周航海）。調査区域には東太平洋海嶺、中部大西洋、西南インド洋、東南インド洋の中央海嶺（図2）が含まれている。2005年～2008年には計3回の航海調査が実施され、その期間は700日間近くとなる。2009年の航海では160日間の調査を行う予定。



◎図2 2008年の「大洋一号」による西南インド洋中央海嶺熱水硫化物調査区

3 中国の海底資源調査・研究の主な成果

中国の海底資源調査は20年余りにわたって続けられ、多金属団塊、コバルトリッチクラスト、熱水硫化物、生物遺伝子等の資源調査及び環境評価等の面で豊かな成果が得られた。東太平洋の7.5万km²の多金属団塊鉱探査区内では約4.2億tの団塊資源（マンガン11,175万t、銅406万t、ニッケル514万t、コバルト98万tを含む）が見つかった。これは年間採掘量300万t、連続採掘期間20年の生産需要を満たすものである。コバルトリッチクラストの資源調査では既に5万km²近くの区域を選び、暗号化の調査を進めており、同資源の申請区（境界指標Co>0.5%、厚さ>4cm）を一応画定した。現在の調査の重点は鉱床学的評価、資源量評価、環境評価である。熱水硫化物の調査でも大きな突破口が開かれ、西南インド洋中央海嶺と赤道の東太平洋海嶺で熱水活動域が見つかり、大量の熱水ブラックスモーカー試料、岩石試料及び熱水生物試料を得ることに成功した。

(1) コバルトリッチクラスト

- 1) タイプの異なる海山にあるコバルトリッチクラストの鉱床学的特徴を系統的に対比し、探査のターゲット区域を選ぶ時の新たな道筋を示した。マルチビーム観測データに基づき、太平洋海山は形態上、平頂海山（ギョー）と尖頂海山の2種類のタイプに分けることができる。平頂海山は山頂堆積物がかなり厚く、急斜面が目立ち、一方、尖頂海山は堆積物が発達しておらず、勾配の変化が安定している。また、平頂海山はコバルトリッチクラスト鉱体の多くが深海域に出現し、その板状クラストは厚さの変化が大きく、且つ礫状クラストもしばしば見られる。一方、尖頂海山は浅海域から深海域まで安定・連続した鉱体が見られ、クラストのタイプが単一で、主には中厚層の板状クラストだ。その鉱体は連続しており、存在度、被覆率、発見率等の指標も平頂海山に勝る。尖頂海山のクラストはCo、Ni、Mn等の金属元素の含有量が相対的に多く、水深の比較的浅い場所では高品質の鉱体が形成され、将来の開発利用に有利である。この結果が示しているように、尖頂海山は今後の新たな探鉱目標となる。
- 2) コバルトリッチクラストの自然成長境界線と後期変成作用を発見し、資源の画定及び評価の質が高まった。ビデオ撮影調査の結果によれば、クラストの境界線（図3）はその形態と伸張の特徴に基づき、貫通型境界線とトラップ型境界線の2種類のタイプに分けることができ、また、クラストの分布とタイプに基づき、クラストと堆積物、板状クラストと海山団塊、板状クラストと礫状クラストの3種類のタイプに分けることができる。板状クラストと団塊間の境界線は区域的な環境の差異によるものでなく、それはクラストの初期成長（核形成）パターン及び固結した岩石と未固結堆積物間の核形成ポテンシャル障壁の違いによってもたらされたものである。礫状クラストは破碎帯の支配を受け、これに関係する境界線のタイプも海山の構造と地形に一定程度左右される。クラスト境界線の発見は、クラストには「マイナス成長」現象が存在し、鉱床の変成作用が資源の品質に大きく影響することを物語っている。クラ



◎図3 コバルトリッチクラストの自然成長「境界線」

スト境界線の特徴に基づき、堆積物に覆われる板状クラストが存在するかどうかを効果的に判別することができる。この調査はコバルトリッチクラスト資源の形成メカニズムと分布法則に対する認識を深めるものであり、有効な探鉱マーカーが確立され、鉱区画定作業において重要な役割を果たした。

- 3) 太平洋海山のクラスト資源分布に関する断面調査を系統的に行い、資源評価方法等の面で顕著な進展が得られた。2006年～2008年の期間中、テレビ浅層ボーリング、テレビグラフ、海底ビデオ撮影及び地球物理等の先進的なサンプリング手段を用い、太平洋の8つの海山でクラスト資源の綿密な断面調査を実施した。鉱物学、地球化学、鉱床学及びバイオマーカー化合物の研究と結び付けて、クラスト資源の分布法則と主な制御要素を探究し、太平洋海山クラスト資源の鉱塊サイズ、連続性と安定性の変化の法則を明らかにし、適切かつ実行可能な鉱区画定指標体系と資源量計算方法を打ち出した。上記調査の一部の資料と成果は既に公表され、国際海底管理局の会議でも意見交換が行われており、国際海底管理局がコバルトリッチクラスト資源探査規則を定める過程で「申請面積」、「鉱塊サイズ」、「開発制度」に関する提案をまとめるための直接的な科学的根拠を提供した。

(2) 熱水硫化物

- 1) 西南インド洋中央海嶺で重大な発見があった(図2、図4)。2007年3月、西南インド洋の大洋中央海嶺A区で海底熱水活動域(西南インド洋中央海嶺の63.5°E付近、水深3,700m前後)を発見した。西南インド洋中央海嶺と超低速拡大大洋中央海嶺で海底熱水活動域が見つかったのは世界で初めてのことである。2008年には当該区及びその周辺で多くの海底熱水噴出口が発見された。この場所が広範囲にわたる熱水活動域であることを示しており、また、超低速拡大大洋中央海嶺の構造環境の下、多金属硫化物のプールを形成する大きな可能性を秘めていることを物語るものだ。この発見は米AGU年次総会と国連国際海底管理局総会で世界の科学者から広く注目され、超低速拡大大洋中央海嶺の研究を進める上で重要な科学的意義を持つ。西南インド洋の大洋中央海嶺ではこれまでに6カ所で熱水活動が確認され、2カ所で熱水異常が見つかった。そのうち活動していない熱水地点は1カ所、活動していない炭酸塩タイプの熱水地点が1カ所(長さ約17km)あり、新しいタイプのホワイトスモーカーであるとほぼ断定した。この他、西南インド洋C区等でも2カ所の熱水活動地点(西南インド洋中央海嶺の51.7°～53.2°Eと63.9°E付近)が発見された。
- 2) 東太平洋海嶺の赤道付近で新たな発見があった。



◎図4 2007年に西南インド洋中央海嶺で採取した熱水ブラックスモーカー試料

2008年、東太平洋海嶺の赤道付近で5カ所の熱水活動地点、2カ所の熱水異常地点を発見したのである。この熱水活動域では多様な形態の海底熱水活動が見られ、その分布範囲は22kmを超え、大型熱水活動域の1つに属する。

- 3) 初歩的な研究結果が示すように、上記の熱水硫化物はCu、Au、Ag等の多種の元素を豊富に含んでおり、2009年度の調査がまもなく始まる。「超塩基性岩系の熱水硫化物鉱床の特徴」を重点とした研究作業が進行中である。

(3) 環境評価

中国の多金属団塊開発区内で面積15km²の小区(参照区)を2カ所選び、それぞれの小区に若干の固定観測ポイントを設けて、深海光学システム調査、深海音響システム調査、CTD及びADCP調査、深海係留系による連続観測、乱さない地質試料採取、浮遊・底生生物の試料採取、土工力学特性による原位置測量等を含む調査活動及び環境変化の研究を行った。初歩的な調査と分析の結果が示すように、同一区域の時系列であれ、同一時間の空間分布であれ、深海環境基線の変化は非常にはっきりとしたものである。生物個体群の密度分布は区域によって大きな違いがあり、同一区域であってもこの10年余りの間に一定の変化が見られる。例えば、同一時間において、1つの参照区は小型底生生物(Meiofauna。線虫類、harpacticoids、acarid等)の密度が46個/km²であったのに対し、もう1つの参照区の密度は21個/km²にすぎなかった。また、2つの参照区にそれぞれ設置されて10年近くになる係留系の記録結果から、底層流が時間の経過と共に大きく変化していることがわかる。エルニーニョ等の海洋学的現象も、海底環境の変化の記録に現れている。2008年末現在、中国は当該区で計11回の環境評価(NaVaBa計画)調査活動を既に行っており、深海好圧性細菌1例の全ゲノム配列を解読することに成功した。

4 中国の海底資源調査における技術開発の現状

中国の海底資源調査に使われる主な船舶には「大洋一号」、「海洋四号」、「向陽紅9号」等があり、「大洋一号」が主力船である。「大洋一号」船（図5）は以前、ロシアの「地質学者ピョートル・アンドロポフ号」であったが、1994年に船名を「大洋一号」に改めた。中国大洋協会に所属している。「大洋一号」は2002年に近代的な改装が行われ、現在では海洋地質、海洋地球物理、海洋化学、海洋生物、海洋物理、海洋水中音波など多くの学問分野の研究活動条件を備えており、海底地形、重力と磁力、底質と構造、総合海洋環境、海洋エンジニアリング及び深海技術装備など各方面の調査と試験を行うことができる。この船は長さ104.5m、幅16.0m、排水量5,600tで、定員75人（船員25人、調査スタッフ50人）である。



◎図5 科学調査船「大洋一号」

主な調査用設備には動的位置決めシステム、マルチビーム測深システム、浅層断面システム、深海曳航音響システム、深海曳航光学システム、超短基線位置決めシステム、自律型水中ロボット（AUV）、観測・試料採取型ROVシステム、ADCP、海洋傾斜磁力計、海洋重力計、マルチチャネル地震システム、CTD、深海係留系、深海ビデオ撮影システム、浅層ボーリングマシン、テレビグラフ、堆積物フィデリティ試料採取器等の先進的設備が含まれている。ネットワークセンター、マルチビーム・浅層断面実験室、重力・ADCP実験室、磁力実験室、地震実験室、ROV・AUV実験室、深海曳航・超短基線実験室、地質実験室、化学・生物実験室、水文実験室、生物遺伝子実験室、X蛍光分析実験室、甲板実験室など13の専門実験室を持つ。また、居住船室、食堂、会議室、フィットネスジム、サウナ室、洗濯室、バスケットボール場、衛星テレビ、オープンネットワークシステム等の生活施設も充実している。

中国大洋協会は1992年から深海調査用設備の導入と研



◎図6 浅層ボーリングマシン（掘削深度70cm）

究開発に力を入れるようになり、深海係留系、深海ビデオ撮影システム、浅層ボーリングマシン（図6）、テレビグラフ（図7）、AUV、ROV、堆積物フィデリティ試料採取器、マルチパラメータ海洋環境調査システム、船舶ネットワークシステム等の先進的設備を開発した。しかし、全体的に言うなら、中国の海底資源調査技術は依然として米国、日本等の先進国と大きな開きがある。中国は深層ボーリングマシン（掘削深度15m）、化学センサ、原位試験システム、海底作業ステーション、7,000m級有人潜水器等の海底資源調査用設備の研究開発に既に着手しており、近い将来、調査活動に投入される見込みだ。

同時に、新しい調査船建造の論証作業をスタートさせた。



◎図7 テレビグラフ

1992年、中国は深海採鉱システムの研究開発を開始し、1996年に多金属団塊の「複合式集鉱方法・モデルマシン研究」プロジェクトを完了した。また、2001年にはプロトタイプの湖底試験に成功した。コバルトリッチクラストと熱水硫化物の採掘・製錬に関する技術研究開発も現在進められている。

5 結びの言葉

1991年、中国有色金属工業総公司は日本に代表団を送り込み、深海採鉱技術・設備の分野における日本の研究の進展状況を視察し、双方の協力関係樹立を検討した。これは中国大洋協会発足後初の海外視察であった。中国はこれまでに米国、ロシア、ドイツ、フランス、英国、日本等の国々、及びIODP、Inter Ridge計画等の国際組織と海底資源調査・研究分野で幅広い協力を進めてきた。

21世紀を見据え、中国は「深海調査を持続的に進め、深海技術を力強く発展させ、深海産業を適時に確立する」との活動方針を定め、かなり系統的な海底資源調査・開発の技術体系を構築し、少数精鋭の科学技術陣を養成し、

中国大洋試料庫等の基盤施設を建設し、「中国大洋調査技術・深海科学研究開発基地」（国家海洋局海底科学重点実験室を拠点とする。中国・杭州）等の支援プラットフォームを築いた。将来の一定期間、中国の海底資源調査の重点は熱水硫化物、コバルトリッチクラスト、生物遺伝子の資源調査及び海底資源開発の環境評価調査に置かれる。同時に、大規模な海底資源の鉱床生成メカニズムの研究活動を積極的に推進し、海底資源の探査技術と開発技術の研究に力を入れ、国際海底区域のガスハイドレート、希土類資源等の新たな海底資源の調査研究を重視していく。

衛星リモートセンシング観測技術の利用

•Profile•



張 良培 Zhang Liangpei ●武漢大学測量製図リモートセンシング情報工学国家重点実験室特別招聘教授

武漢大学測量製図リモートセンシング情報工学国家重点実験室、「長江学者」特別招聘教授。1963年4月生まれ。1998年、中国武漢大学写真測量・リモートセンシング専攻工学博士。国際刊行物に170編余りの研究論文を発表、中国教育部自然科学1等賞、中国測量製図科学技術進歩1等賞、武漢大学優秀教師など受賞。

人類は環境保護の重要性を既に深く認識している。地球環境を守るため、科学者は地球の物質的世界、生物及びその役割の変化について観測・分析を行う必要がある。伝統的な情報取得法は現場又は現地での野外収集だが、時間を浪費し、出費がかさみ、しかも精度が高くない。このため、1960年代以降、多くの情報取得作業が高空からの遠隔収集に変わり、衛星リモートセンシングは徐々に人々に認められ、地球観測の重要な手段となったのである。

1. リモートセンシングとは何か

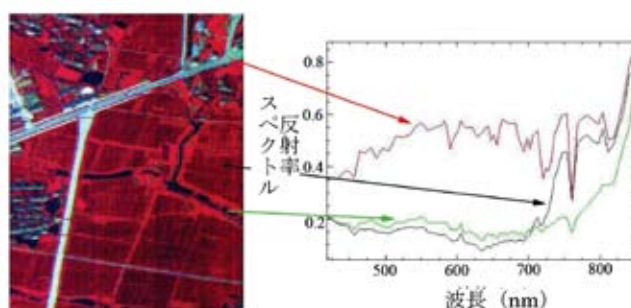
リモートセンシング、即ち遠隔感知は直接接触をせずに、各種のセンサを用い、遠く離れた対象物の電磁波情報について収集・処理を行い、対象物又は自然現象を感知・探査する技術である。図1はリモートセンシングによる情報取得の流れ図である。



◎図1 リモートセンシングによる情報取得の流れ図

リモートセンシングは地表の各地物情報をどう区別し、監視測定するのであろうか。周知のように、いかなる物体も反射と吸収のスペクトル特性を持つ。図2が示しているのは3種類の異なる地物のスペクトル分布曲線である。この図からわかるように、スペクトル特性は物体毎

に異なる。リモートセンシング技術とはこの特徴を利用し、それぞれの物体の性質を識別するものである。



◎図2 各対象物のスペクトル分布曲線図

2. リモートセンシング技術の利点

現場又は現地での伝統的なデータ収集方法に比べ、リモートセンシング技術は主に次の4つの点で優れている。

- (1) 探査する範囲が広い。1枚のランドサット (Landsat) 画像がカバーする地上範囲は3万km²余りに達し、これは中国海南島の面積にほぼ相当する。
- (2) データ取得の速度が速く、周期が短い。実地測量調査は数年、十数年さらには数十年を要するが、ランドサットはわずか16日で地球を1回カバーすることができ、MODISは1～2日しか要しない。
- (3) 地上の条件に制約されることが少ない。高山、氷河、砂漠等の条件に制約されずにすむ。
- (4) 取得する手段が多く、その情報量が大きい。人々は探査目標の違いに応じ、可視光カメラ、赤外線カメラ、可視赤外走査放射計 (VISSR)、合成開口レーダー、実開口レーダー等のセンサを衛星に搭載し、必要な対象物の情報を得ることができる。

3. リモートセンシングの応用

リモートセンシング技術のお陰で、人々は地球を連続的にカバーし、繰り返し観測できる画像情報を通じ、それぞれの地物が持つスペクトル特性の違いに応じ、地表系内部の各地物の分布と変遷を素早く正確に分析できる

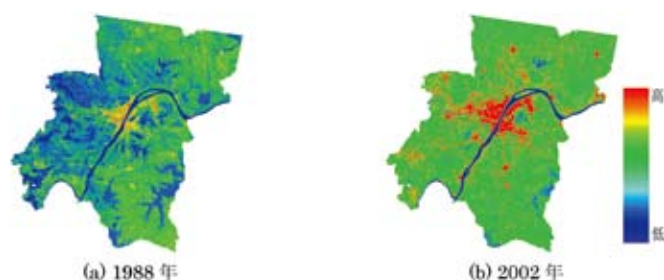
ようになった。リモートセンシングによる対地観測データの取得がシステム化されるのに伴い、この技術は生態環境、林業、鉱産物、都市変遷等の研究分野及び関連産業において時空分布・変化の情報を取得するための重要な手段となり、経済建設、社会の発展、国の安全保障、市民生活などに広く応用されている。

中国武漢大学によるリモートセンシング技術の幾つかの典型的な利用例を以下に示す。

(1) 都市ヒートアイランドのリモートセンシングによる監視

地球温暖化と都市化プロセスの加速に伴い、都市の地表が次々と自然の地表に取って代わり、顕著な熱効果を生んだ。都市のヒートアイランド現象は市民の生産活動と生活に危害をもたらし、悪化する一方の都市の熱環境は今や社会・経済の持続可能な発展を妨げる大きな要因の1つとなっている。リモートセンシング技術を使って都市のヒートアイランド効果を分析すれば、その分布の構造と特徴を正確につかみ、ヒートアイランド効果の分布・強度と時空変化の状況を理解し、都市システムの計画的配置に科学的な根拠を提供することができる。

図3は武漢市のメイン市街地における1988年・2002年夏季の地表温度分布図であり、米ランドサットの熱赤外データを利用した。温度分布図からわかるように、都市部はヒートアイランド効果が顕著であり、且つその範囲は中心地域と一致し、境目がはっきりとしている。2002年はヒートアイランドの面積が1988年に比べて著しく拡大し、その強度も増している。



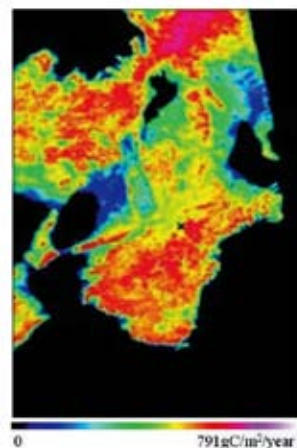
◎図3 武漢市のメイン市街地における1988年・2002年夏季の地表温度分布図

(2) 植生の純一次生産力 (NPP) のリモートセンシングによる監視

植生の純一次生産力 (NPP) は緑色植物が単位時間内に蓄積した単位面積当たりの有機物の量を指す。地表の炭素循環で大きなウェイトを占めるNPPはその原動力となるだけでなく、生態系の炭素固定を決定し、生態プロセスを調節する主要ファクターでもあり、地球の変動及び炭素収支の中で重要な役割を演じている。リモートセンシング情報を利用すれば、広範囲にわたる植生のNPP

値及びその分布状況を効果的かつ的確に推定し、環境と生態系の保護、林業など多くの分野に情報サービスを提供することできる。

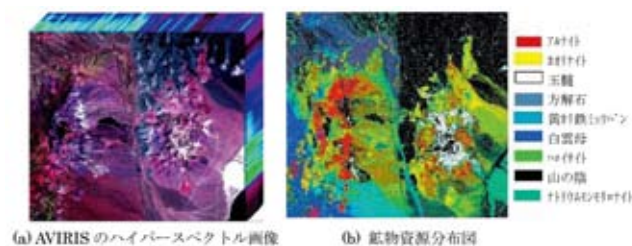
図4はリモートセンシング手段を利用して作成した日本・紀伊半島の2001年の年平均NPP分布図である。検証の結果が示すように、リモートセンシングによるNPPの推定は精度が高く、特に自然・野生の植生におけるNPPの推定精度は98.5%に達し、実測結果とほぼ一致する。



◎図4 日本・紀伊半島の2001年の年平均NPP分布図

(3) 鉱物情報のリモートセンシングによる抽出

鉱物調査は識別が難しく、発見が難しいという特徴を持つ。自然資源が次第に枯渇しつつある状況の下、地質資源を素早く確実に手に入れるため、空間情報分析、図形・画像処理、デジタル地質図作製等に対する地質関係者の要求は非常に差し迫ったものとなっている。伝統的な地表面調査、物理探鉱等の技術は絶えず進歩しているが、コストが非常にかさむ。現在、国と企業は技術者に対し、目的を持ち、的を絞って投資を行い、比較的小さな投資で最大のリターンを得よう求めている。交通の便が悪く、人跡まれで、自然条件が悪く、地質研究の水準が高くない地域で鉱物の情報識別と探査を行う場合、リモートセンシング技術は経済的で簡便な良い方法を提供することになる。リモートセンシング画像の各波長域における鉱物のスペクトル特徴とスペクトル差異を利用すれば、岩石と鉱物の情報を効果的に識別することがで



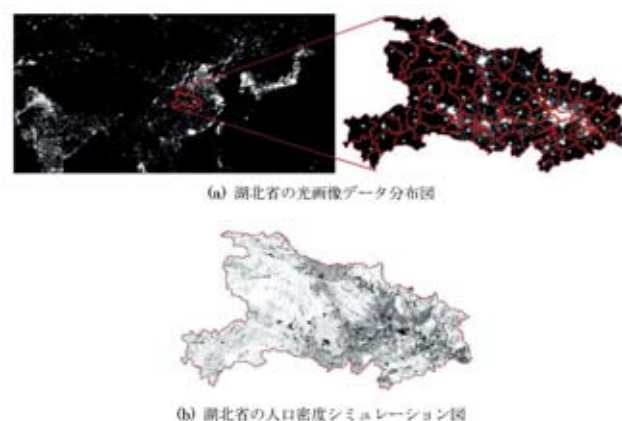
◎図5 ミネバダ (Nevada) 地域の鉱物調査図

きる。ハイパースペクトル画像は一般のマルチスペクトル光学画像に比べ細部が鮮明であり、特殊な診断的特徴をよりよく探ることができる。図5はAVIRISのハイパースペクトル画像を利用して探査したミネバダ地域の鉱物資源分布図である。

(4) 人口調査

人口情報はその国の経済・社会の発展と資源の利用に直接影響するものであり、人口の分布を正しく認識することは人口資質、資源と環境の総合管理能力を高める上で重大な意義を持つ。統計部門による伝統的な人口データ取得方法は大量の人力、物資と時間を費やす必要があり、特に広範囲の人口情報に対する統計は大きな困難を伴う。

リモートセンシング技術の発展は人口情報取得のための新たな手段を提供することになる。リモートセンシング画像を利用すれば、住宅地の情報を直接抽出し、人口密度を推定することができる。例えば、米軍事気象衛星 Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) に搭載されている Operational Linescan System (OLS) センサは、夜間の都市部の灯りを検知し、さらには小規模な住宅地、車の流れ等から発せられる弱い光を捉えることができる。このデータを利用すれば、大きなスケールで素早く人口密度を推定し、都市計画の意思決定に参考となる根拠を提供できる。図6は抽出した2000年の湖北省各県・市のDMSP/OLS夜間光画像データ及びこのデータを使ってシミュレーションした人口密度分布図である。



◎図6 2000年の湖北省各県・市のDMSP/OLS夜間光画像データ及び人口密度シミュレーション図

現在、リモートセンシング技術は多くのプラットフォーム、多くの時相により、動的に素早く、高い分解能で観測データを提供できる新たな段階に入っており、その応用分野は絶えず広がりを見せ、効果と効率が著しく向上した。中国政府は既に遠くない将来、自前の高分解能対地観測システムを完成させることを決めており、その時には各種の運用衛星が100基を超えることになろう。リモートセンシング技術の急速な発展に伴い、人類は立体化・多段階・多方位・全天候型対地観測の新たな時代に入るであろうと予見できる。

衛星レーザー通信端末機の追跡・照準精度測定装置の研究

•Profile•



王 建民 Wang Jianmin ● 北京大学情報科学技術学院 量子情報・測量教育部重点实验室 准教授

1967年6月生まれ。1998年ハルビン工業大学卒業。博士号取得。主に衛星レーザー通信、精密測定及び画像処理分野の研究に従事。これまでに国家863、国家自然科学基金、国防予備研究基金、国防背景プロジェクト等の多くのプロジェクトを主宰。

1 前書き

衛星レーザー通信はデータ速度がはやく、セキュリティに優れ、電力消費が低く、コンパクトで軽い等の長所を備えているため、世界の多くの国々から重視されている^{[1][2]}。衛星レーザー通信の中核技術はPAT技術、即ち照準・捕捉・追跡技術である。特に難しいのはマイクロラジアン^[3]の測定レベルにおける追跡・照準技術であり、これは国内外の各研究機関が追求する努力目標となっている。衛星レーザー通信端末機の開発に成功したら、正式な送信に先立ち、その性能について試験と評価を行う^{[4][5]}必要があり、その中で端末機の追跡・照準精度は重要な項目となる。一般的な衛星レーザー端末機の追跡・照準精度は数マイクロラジアンに到達しなければならないが、試験を繰り返す基準に基づき、追跡・照準精度試験装置の精度は1マイクロラジアン以内とすべきであり、試験装置は高い要求を突き付けられることになる。現在、わが国は衛星間リンクに関するレーザー通信システムの開発を進めており、開発完成後の通信端末機の追跡・照準性能について試験を行うことは重要な実用的価値を持ち、これには疑問を差し挟む余地がない。

国内では、上海光学精密機械研究所の衛星レーザー通信研究チームが文献^[6]と^[7]の中で追跡・照準精度試験の数値モデルを論述するとともに、文献^[8]と^[9]の中でコリメータと光ビームスキャナーの組合せに基づく通信端末機の追跡・照準性能試験装置を提案した。この装置は衛星軌道シミュレーション走査機構、精密光ビームスキャナー、二重焦点距離レーザー送/受信コリメータで構成される。その試験方法はコリメータの走査鏡を用いて衛星プラットフォームの振動をシミュレートし、バイプリズムの回転によって光ビームのスキャンを行い、CCDデバイスを通じて光スポットの位置を検出し、追跡・照準精度の指標を得るというものだ。一方、国外を見ると、欧州はSILEX計画の中で、システム全体の様々な特性を検証するため、幾つかの専用試験プラットフォーム^{[10][11][12]}を開発した。例えば、STB試験プラットフォームは光学ヘッ

ドの段階における照準・捕捉・追跡性能検証システムであり、OHTS光学ヘッド試験システムは光学式バックプレート^[13]の試験に用いられる。また、TTOGSE端末試験設備は、空気又は真空条件下での集積化された端末の光学性能試験に用いられる。端末機の追跡・照準精度の試験を行う時は、STBプラットフォームを採用するが、これは光学アンテナを取り去る状況で行うものであり、本体に対する大口径光ビームの試験を行うことができない。文献^[13]を見ると、日本のNASDA技術スタッフは有名なOICETS衛星レーザー通信プロジェクトの中で、その通信端末機のLUCSシステムに着目し、GOALと呼ばれる検出システムを開発した。このシステムは多くの端末機性能指標の試験を行うことができ、追跡性能の試験もその中に含まれる。この試験システムは光学アンテナ、レーザー光源及び検出器等から成り、相手方の通信端末機から来る光ビームをシミュレートし、その追跡・照準性能について試験を行うことができる。しかし、試験の具体的なプロセスと原理が文献の中に詳しく記述されていない。日本のKeizo I Inagakiは文献^[14]の中で長焦点距離レンズを採用した追跡・照準試験案を打ち出した。その原理はレンズの焦点面における変位を射出光ビームの振動に変換し、光電センサによって相手方の通信端末機からフィードバックされる光ビームの偏向を確定し、追跡・照準精度を得るというものである。しかし、文献には原理案が示されているだけで、この試験案の具体的な実験データはない。

上記文献の分析結果からわかるように、国内であれ国外であれ、追跡・照準精度の試験については、試験の原理、プランを記述するだけで、必要な実験データに欠ける。中には衛星からの送信角度に基づき、非常に高価で複雑な地上検証システムを開発し、性能諸指標の試験を行っている国もある。しかし現実には、構造が簡単で、操作しやすく、精度要求を満たすことのできる追跡・照準精度測定装置が必要となるケースが多い。

実際の必要に基づき、我々は衛星レーザー通信端末機

の追跡・照準精度について試験を行うことのできる装置を設計・開発した。以下、試験装置の構造、原理及びパラメータの設計について詳しく説明する。

2 通信端末機の追跡・照準精度試験案及びパラメータ設計

2.1 通信端末機の追跡・照準精度試験案

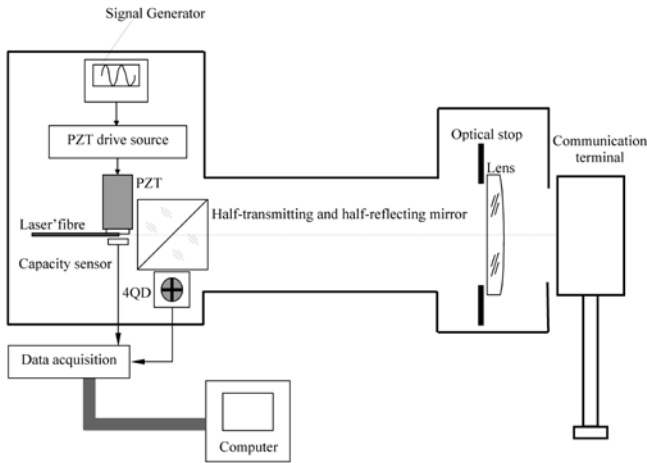


図1 端末機の遠方からの追跡・照準精度試験案原理図
Fig.1 Schematic diagram of tracking and pointing accuracy measurement

図1は試験装置全体の原理図である。この装置は長焦点距離レンズ、点光源、PZTマイクロ変位デバイス及びその高出力駆動電源、信号発生器SG、4QD光電デバイス、キャパシティセンサ、半透過半反射鏡、データ取得カード、コンピュータ及びそのデータ処理システム、シーリングパイプ・ボックスで構成される。そのうち、点光源は半導体レーザーから射出される光ビームが単一モード光ファイバに結合することで形成される。試験の基本プロセスは次の2つの段階に分けることができる。①調整段階。この段階は主に点光源をレンズの焦点面に調整するもの。②試験段階では信号発生器を利用し、一定周波数の波形を生成し、PZTマイクロ変位デバイスの電源を制御し、出力増幅後の駆動信号を発生させ、PZTデバイスを駆動し、光軸に垂直の方向に沿って一定の変位振動を作り出す。単一モード光ファイバとPZTデバイスは1つに固定されており、このため、点光源は光軸に垂直の方向に沿って一定の変位振動が形成される。光ビームは長焦点距離レンズの視準を経て、平行ビームを形成し、被測定端末機に入射する。被測定端末機は振動する光ビームを受信した後、この光ビームを追跡し、1束の光をフィードバックする。この光は長焦点距離レンズを通過して4QDデバイスに集束する。4QDデバイスは光スポットの位置を測定し、位置に関する電気信号をデータ取得カード経由でコンピュータに伝送し、処理が行われる。PZTデバイス

はヒステリシス効果を備えており、点光源の変位を正確に評価するため、我々は高精度のキャパシティセンサを採用し、PZTの実変位値を測定するとともに、この変位値の信号をデータ取得カード経由でコンピュータに伝送した。4QD光電センサの測定結果と対比すれば、追跡・照準の誤差が得られる。

2.2 4QD光スポット重心位置調整アルゴリズム

一般の文献に示されている4QD光スポット重心位置調整アルゴリズムはいずれも光スポットを円形だと仮定している^[15]。しかし、実験測定の過程で、我々は光スポットを完全な円形に調整するのが難しく、常に一定の楕円性を帯びることを発見した。即ち光スポットは実際には楕円形であり、伝統的な位置調整アルゴリズムは使うことができない。以下、光スポットが楕円形である時の重心アルゴリズムの公式を導き出すこととする。

光電検出の原理によれば、光強度が均一に分布している時、各象限から出力される電気信号（電流）の強さとこの象限検出器の感光面が受信する光エネルギーの量は一致する。このため、4QDの楕円光スポット位置調整に対する重心座標（X、Y）の計算式は次のようになる。

$$X = K_x \cdot \frac{S_I + S_{IV} - S_{III} - S_{II}}{S_I + S_{II} + S_{III} + S_{IV}} = K_x \cdot \frac{S_I + S_{IV} - S_{III} - S_{II}}{\pi \cdot a \cdot b} \quad (1)$$

$$Y = K_y \cdot \frac{S_I + S_{II} - S_{III} - S_{IV}}{S_I + S_{II} + S_{III} + S_{IV}} = K_y \cdot \frac{S_I + S_{II} - S_{III} - S_{IV}}{\pi \cdot a \cdot b} \quad (2)$$

誤差信号を規格化すると次のようになる。

$$E_x = \frac{S_I + S_{IV} - S_{III} - S_{II}}{\pi \cdot a \cdot b} \quad (3)$$

$$E_y = \frac{S_I + S_{II} - S_{III} - S_{IV}}{\pi \cdot a \cdot b} \quad (4)$$

式の中のa、bはそれぞれ楕円光スポットの長軸と短軸の長さである。4QDによる楕円光スポットの受信状況は図2に示す通りであり、 K_x 、 K_y の値を以下の手順で導き出した。

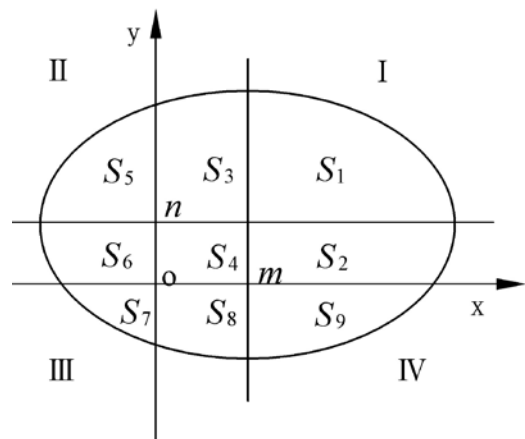


図2 4QDによる楕円光スポットの受信
Fig.2 Elliptical spot accepted by 4QD

図2に設けた o は4QDの中心であり、4QD検出器の座標系を xoy とした。重心の実際の偏移量を (m, n) と仮定する。議論上の便宜のため、我々は1～9の単位を設けた。図からわかるように、各象限の光照射面積は次のようになる。

$$S_I = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$$

$$S_{II} = S_5 + S_6$$

$$S_{III} = S_7$$

$$S_{IV} = S_8 + S_9$$

その中で、直線 $x=m$ 、 $y=n$ とし、楕円を4つのブロックに均等分割した。

$$S_I = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = S_5 + S_6 + S_7 + S_8 = S_2 + S_9 = \pi * a * b / 4$$

また次の式がある。

$$S_I = m * n$$

$$S_1 = S_4 + S_5 = \int_0^m \left\{ b * \sqrt{1 - (x/a)^2} \right\} dx$$

$$S_2 = S_3 + S_6 = \int_0^n \left\{ a * \sqrt{1 - (y/b)^2} \right\} dy$$

従って次のようになる。

$$S_I = \pi * a * b / 4 + \int_0^n \left\{ a * \sqrt{1 - (y/b)^2} \right\} dy + \int_0^m \left\{ b * \sqrt{1 - (x/a)^2} \right\} dx + m * n$$

$$S_{II} = \pi * a * b / 4 - \int_0^n \left\{ b * \sqrt{1 - (x/a)^2} \right\} dx + \int_0^n \left\{ a * \sqrt{1 - (y/b)^2} \right\} dy - m * n$$

$$S_{III} = \pi * a * b / 4 - \int_0^n \left\{ a * \sqrt{1 - (y/b)^2} \right\} dy - \int_0^m \left\{ b * \sqrt{1 - (x/a)^2} \right\} dx + m * n$$

$$S_{IV} = \pi * a * b / 4 - \int_0^n \left\{ a * \sqrt{1 - (y/b)^2} \right\} dy + \int_0^m \left\{ b * \sqrt{1 - (x/a)^2} \right\} dx - m * n$$

これにより、誤差信号を規格化すると、次のようになる。

$$E_x = \{ 2 * \arcsin(m/a) + \sin[2 * \arcsin(m/a)] \} / \pi \quad (5)$$

$$E_y = \{ 2 * \arcsin(n/b) + \sin[2 * \arcsin(n/b)] \} / \pi \quad (6)$$

規格化した誤差信号 (E_x, E_y) と実際偏移量 (m, n) の関係と比較し、光スポットを均一にすると、係数 K_x 、 K_y の値は次のようになるはずだ。

$$K_x = \pi * m / [2 * \arcsin(m/a) + \sin(2 * \arcsin(m/a))] \quad (7)$$

$$K_y = \pi * n / [2 * \arcsin(n/b) + \sin(2 * \arcsin(n/b))] \quad (8)$$

2.3 パラメータ設計

2.3.1 レンズ焦点距離の確定

通信端末機の追跡・照準試験精度 $d\theta$ は以下の簡単な公式で推定することができる。

$$d\theta = dl / f \quad (9)$$

式の中の dl は光スポット位置調整の精度であり、 f は長焦点レンズの焦点距離である。上記の式からわかるように、追跡・照準試験精度と焦点距離は反比例しており、

言い換えるなら、焦点距離が長くなるほど、試験精度は高くなる。しかし、焦点距離が長過ぎると、ランダムな誤差による影響が大きくなり、且つ実験場所に対する要求も高いものとなる。光電センサの光スポット位置調整精度は $1 \mu m$ より優れている。この点を考慮し、試験精度を $0.1 \mu rad$ に到達させるため、レンズの焦点距離は10m前後とするのがよい。さらに実験場所の問題を考慮して、最終的に焦点距離 $f=9.5m$ とした（実際の仕上げ結果は $9.47m$ となる）。通常、衛星レーザー通信の光学アンテナの口径は $100mm \sim 250mm$ 前後であるが、加工コスト及び収差等の要素を考慮して、光を通すレンズの有効口径を $240mm$ とし、 F の数値は 39.6 とした。波長は $800nm$ の帯域で、視野設計は $\pm 0.25^\circ$ となる。軸上の点における球面収差をなくすため、非球面の平凸レンズの構造形式を採用した。ZEMAX光学設計ソフトを用い、構造パラメータの最適化を進めた。設計の結果が示すように、波の収差は $1/20$ 波長より優れている。レイリーの判断基準に基づき、結像品質は試験要求を完全に満たすことができる。

2.3.2 点光源の寸法確定

実際の所、点光源は常に一定の大きさがあり、それぞれの点から発せられる光は長焦点レンズの焦点面で1つの独立した回折スポットを形成する。このため、観察した像はもはや理想的なエアリースポットでなく、互いにずれた無数の回折スポットが重なり合っている。点光源の寸法がある数値より大きくなり、各回折スポットのずれ量が一定の限度を超えたなら、像の回折リングの細部が消えてしまうだろう。回折リングの幅に基づく理論的推定と実験結果によれば、点光源の最大許容角直径 α_{max} はエアリースポット第1ダークリングの角半径 θ_1 の2分1に等しくなるはずだ。

$$\alpha_{max} = \theta_1 / 2 \quad (10)$$

エアリースポットの光強度分布から次のような式になる。

$$\theta_1 = \frac{0.61\lambda}{h} = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (11)$$

従って次のようになる。

$$\alpha_{max} = \frac{0.61\lambda}{D} \quad (12)$$

上記の D は光学入射ひとみの直径であり、 λ は光源の波長である。

点光源は焦点距離 f の長焦点レンズの焦点面に置かれており、このため、点光源の最大許容直径は次のようになる^[16]。

$$d_{max} = \alpha_{max} f = \frac{0.61\lambda}{D} f \quad (13)$$

波長 $850nm$ の光源について試験を行うため、我々は単一モード光ファイバを用いて点光源を作り上げた。即ち単一モードの半導体レーザーから射出される光ビームを

単一モード光ファイバに結合したのである。公式 (13) に基づき、口径が $D=100\text{mm}$ の時、点光源の最大寸法は $49.2\mu\text{m}$ となり、 $D=50\text{mm}$ の時は $98.3\mu\text{m}$ となる。最終的に選択した光ファイバのコア径は $5\mu\text{m}$ である。

2.3.3 その他素子のパラメータ設計

実験用の平面反射鏡（後で説明）については、その面精度をとした。キャパシティブセンサについては、その試験の分解能を $0.01\mu\text{m}$ とした。レンズの焦点距離が長く、口径が大きいことから、気流の外乱が試験に与える影響は無視できないものであり、気流の影響を出来るだけ少なくするため、我々は光路用ロングパイプ及びシーリングボックス全体を密閉した。

3 実験結果

我々が設計した端末機追跡・照準精度試験装置を異なる視点から検証するため、測定対象となる具体的なレーザー通信端末機がない状況の下で、以下の3つの実験を行った。これにより、我々の装置は一定の測定精度、帯域幅、測定範囲で追跡・照準精度の試験を行うことができると証明できる。その方法は高精度の平面反射鏡を用い、図1の通信端末機に代替させることである。光源から射出された光ビームは長焦点距離レンズの視準及び平面反射鏡の反射により、再びこのレンズを通して集束し、最終的に4QDが光スポット信号を受信する。PZTの信号発生器と駆動電源を調整すれば、点光源が異なる振幅と周波数で振動する時の光スポット位置調整状況を測定し、システム全体の試験精度を確定することができる。実験データは次の通り。

3.1 同じ振幅・異なる周波数での試験

信号発生器SGの出力正弦波の振幅を 10V とし、正弦波周波数を異なる値にして、口径が異なる状況の下、キャパシティブセンサと4QDの測定結果を対比し、図3、図4に示す曲線が得られた。

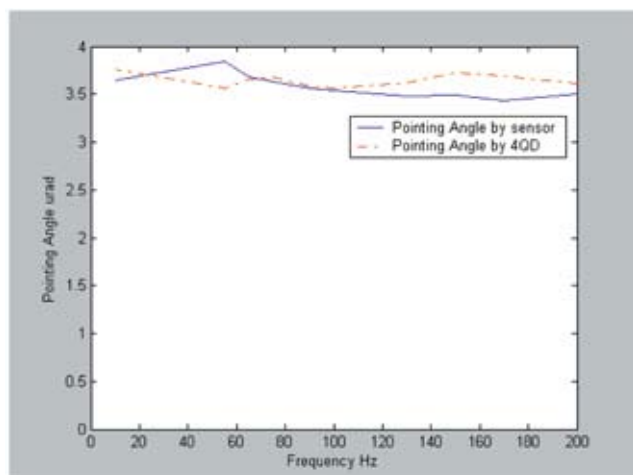


図3 光ビームの口径を50mmにした時の測定結果
Fig.3 Measuring results of 50mm aperture

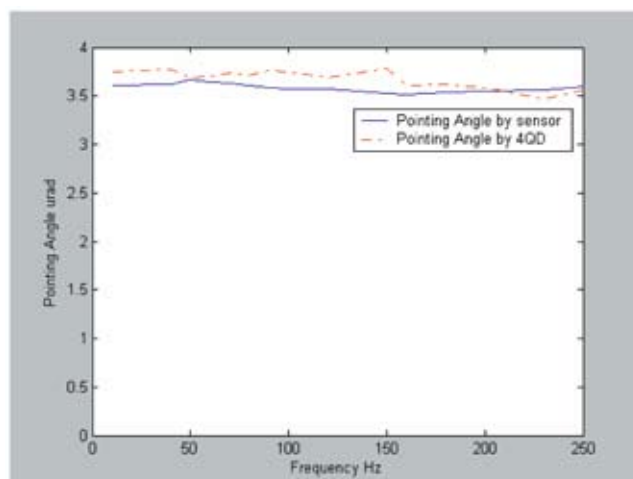


図4 光ビームの口径を100mmにした時の測定結果
Fig.4 Measuring results of 100mm aperture

図3の中で、4QDの角度測定誤差の標準偏差は $\sigma = 0.1571\text{urad}$ となり、角度測定誤差の最大値は $\text{error}_{\text{max}} = 0.2811\text{urad}$ となる。

図4の中で、4QDの角度測定誤差の標準偏差は $\sigma = 0.1258\text{urad}$ となり、角度測定誤差の最大値は $\text{error}_{\text{max}} = 0.2681\text{urad}$ となる。

3.2 同じ周波数・異なる振幅での試験結果

信号発生器の出力正弦波の周波数を 100Hz とし、正弦波の振幅を異なる値に変え、口径が異なる状況下での測定結果を得た。図5、図6に示す通り。

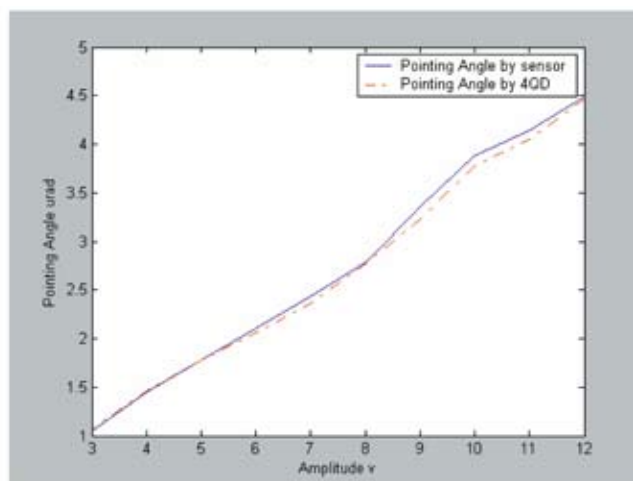
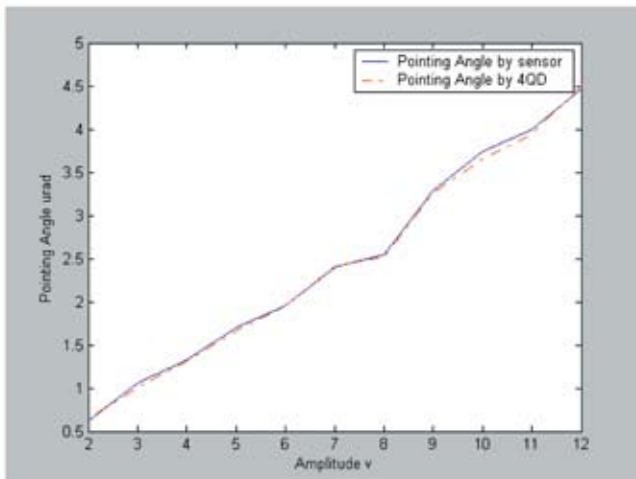


図5 光ビームの口径を50mmにした時の測定結果
Fig.5 Measuring results of 50mm aperture

図5の中で、4QDの角度測定誤差の標準偏差は $\sigma = 0.0664\text{urad}$ となり、角度測定誤差の最大値は $\text{error}_{\text{max}} = 0.1248\text{urad}$ となる。

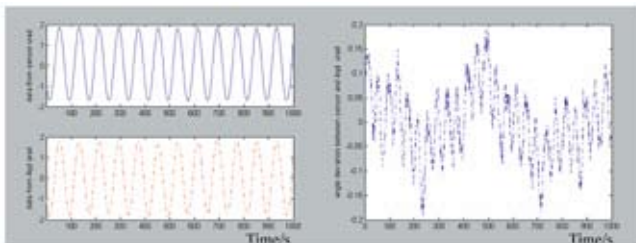


◎図6 光ビームの口径を100mmにした時の測定結果
◎Fig.6 Measuring results of 100mm aperture

図6の中で、4QDの角度測定誤差の標準偏差は $\sigma = 0.0418 \mu\text{rad}$ となり、角度測定誤差の最大値は $\text{error}_{\max} = 0.0939 \mu\text{rad}$ となる。

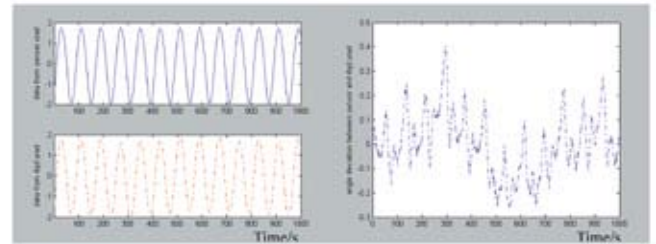
3.3 正弦波のリアルタイム追跡・照準精度の測定実験

信号発生器SGを利用して一定周波数の正弦波を発生させ、衛星プラットフォームの振動をシミュレートした。4QD光電デバイスとキャパシティセンサの位置調整結果を対比し、誤差曲線が得られた。図7と図8は100Hz正弦波の測定結果であり、横座標は時間軸とする。



◎図7 光ビームの口径を50mmにした時の測定結果
◎Fig.7 Measuring results of 50mm aperture

口径 $D = 50\text{mm}$ の時、誤差の標準偏差は $\sigma = 0.0722 \mu\text{rad}$ となり、精度は標準偏差の3倍で $0.2166 \mu\text{rad}$ となる。誤差の最大値は $\text{error}_{\max} = 0.1943 \mu\text{rad}$ である。



◎図8 光ビームの口径を100mmにした時の測定結果

口径 $D = 100\text{mm}$ の時、誤差の標準偏差は $\sigma = 0.1243 \mu\text{rad}$ となり、精度は標準偏差の3倍で $0.3729 \mu\text{rad}$ となる。誤差の最大値は $\text{error}_{\max} = 0.2585 \mu\text{rad}$ である。

上記の実験データは選択した一部の実験結果にすぎず、何度も測定を行った。開発した試験システムの精度指標を以下に示す。

Accuracy (μm)	0.22 μrad (50mm) 0.38 μrad (100mm)
Band width	>250Hz
Measurement range((μrad))	4.5
Wave length	850nm

◎表1 測定システムの精度
◎Table 1 Accuracy of measurement

4 結論

実験データからわかるように、本論文が提示した端末機の追跡・照準精度測定装置案は実行可能なものである。その測定精度は光ビームの口径を100mmとした場合、 $3\sigma = 0.37 \mu\text{rad}$ に到達し、測定帯域幅は250Hz、測定範囲は $4.5 \mu\text{rad}$ に及び、一般的なレーザー通信端末機の試験要求を満たすことができる。

参考文献

- 1 Toni Tolker-Nielsen, Gotthard Oppenhaeuser. In Orbit Test of an Operational Intersatellite Link Between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[J]. Free-Space Laser Communication Technologies XIV, Proc. SPIE, 2002, 4635:1-15
- 2 潘衛清、劉立人、魯偉、朗海濤、王吉明. 結像光通信に基づく時間-空間スプレッド・スペクトラム混合光符号分割マルチアドレスのコード体系[J]. 光学学報, 2006, 26(2): 181-186
- 3 劉錫民、劉立人、孫建鋒、奚慶新. 衛星間レーザー通信における複合軸システムの帯域幅設計研究[J]. 光学学報, 2006, 26(1): 101-106
- 4 Gotthard Oppenhauser. SILEX Program Status-a Major Milestone is Reached[J]. Free-Space Laser Communication Technologies IX, Proc. SPIE, 1997, 2990: 2-22
- 5 K. Pribil, J. Flemming. SOLACOS System Implementation[J]. Free-Space Laser Communication Technologies VII, Proc. SPIE, 1995, 2381:143-150,
- 6 Liu Liren, Wang Lijuan, Luan Zhu, Sun Jianfeng, Li Anhu, Liu De'an. Physical basis and corresponding instruments for PAT performance testing of inter-satellite laser communication terminals. Free-Space Laser Communication Technologies VI, Proc. SPIE, 2006, 6304: 63040C
- 7 劉立人、王利娟、樂竹、孫建鋒、劉德安. 衛星レーザー通信光追跡検出の数理基礎[J]. 光学学報, 2006, 26(9): 1329-1334
- 8 劉立人. 衛星レーザー通信技術Ⅱ 地上検出・検証技術, 中国激光, 2007, 34(2): 147-155
- 9 李安虎、孫建鋒、劉立人. 衛星間レーザー通信光ビーム追跡・照準性能検出装置の設計原理, 光学学報, 2006, 26(7): 975-979
- 10 G. Planche, B. Laurent and et al. SILEX Final Ground Testing in-Flight Performance and Assessment[J]. Free-Space Laser Communication Technologies IX, Proc. SPIE, 1999, STHZ3615:64-77
- 11 Gotthard Oppenhauser. Silex Program Status—a Major Milestone is Reached[J]. Free-Space Laser Communication Technologies IX, Proc SPIE, 1997, 2990:2-9
- 12 Bernard LAURENT, Gilles PLANCHE. SILEX Overview After Flight Terminals Campaign[J]. Free-Space Laser Communication Technologies IX, Proc SPIE, 1997, 2990:10-22
- 13 Morio Toyoshima, Shiro Yamakawa, Toshihiko Yamawaki. Reconfirmation of the optical performances of the laser communications terminal onboard the OICETS satellite[J]. Acta Astronautica, 2004, 55:261-269
- 14 Keizo I Inagaki, Tetsuya Miyazaki, and Masayuki Fujise. High-speed tracking target simulator for fine tracking mechanisms[J]. Free-Space Laser Communication Technologies III, Proc SPIE, 1994, 2123:304-315
- 15 張文濤、李賢、胡渝. 空間光通信検出技術における象限検出器(QD)の研究[J]. 量子電子学報, 2003, 20(1): 114-117
- 16 蘇大圖、沈海竜ほか. 光学測定とイメージ品質検定, 北京: 北京工業学院出版社, 1988.53

海底資源探査機の開発と応用

●Profile●



三輪 哲也 みわ・てつや ●独立行政法人海洋研究開発機構 海洋工学センター 先端技術研究プログラム基盤技術研究グループリーダー

1964年2月生まれ。1991年東京工業大学大学院理工学研究科化学工学専攻、博士（工学）。1991年新技術事業団創造科学技術推進事業 永山たん白集積プロジェクト研究員。1995年東京大学大学院工学系研究科応用化学藤嶋昭研究室（光化学）助手。1998年海洋科学技術センター深海環境フロンティア研究員。2003年同グループリーダー。2008年から 海洋工学センター先端技術研究プログラム基盤技術研究グループリーダー。明治大学大学院理工学研究科客員教授（連携大学院）。横浜市立大学大学院生命ナノシステム科学研究科客員教授（連携大学院）。

1. はじめに

最近の経済・社会情勢の変化に伴い、これまで開発が進まなかった海底資源に再び注目が集まるようになってきた。海底資源とは一般的に、エネルギー資源・金属鉱物資源を指すことが多いが、近年では生物・ゲノム資源も視野に入れられつつある。エネルギー資源とは、石油、天然ガス、メタンハイドレートである。石油、天然ガスはすでに採掘生産にまで達しているのに対し、日本近海海底資源としてもっとも多いメタンハイドレートは、ようやく採掘が試験的に始められようとしている。金属鉱物資源とは、マンガン団塊、コバルトリッチクラスト、熱水鉱床である。マンガン団塊、コバルトリッチクラストは採掘生産に向けて活発に調査されてきたが、存在する水深が深いことから、その可能性が見出されず、次世代の技術が必要であると指摘されている。日本近海では熱水鉱床が、世界に比べ圧倒的に浅い場所に存在する。これは活発な火山活動が存在する地理条件に起因するが、それゆえ採掘生産に向けての本格的展開を推し進める必要がある。生物・ゲノム資源はようやく始まってきた分野であり、工業利用を前提とする極限環境微生物や、海底や大型動物などに対する共生生物らが、サンプリング培養および、ゲノム解析結果と共に急速に展開しようとしている。これらは先進的な知的財産としての価値が高く、新規生物資源の開拓の一躍を担おうとしている。

火山帯が分布する環境にある。このような特異な海底を有することから、日本では海底探査を行うため、特に大深度探査を行うための機器開発が積極的に行われてきた。深海底探査には水圧という空中利用技術にはない特殊な環境変化があるため、動力ならびに電力、画像入力などの基盤的要素において開発の必要があった。

海底探査において、船と探査機器が結ばれている有索での探査と、探査機が単独で行動する無索での探査があり、それぞれについて探査手法の特徴がある。有索では、供給電源量の限界や、浮力の制限が無い場合、自由な設計思想のもと、重量物の設置や回収なども含め、様々な探査機が開発できた。係留系のようなもののほか、曳航体（ディープトウ）やROV、クローラタイプのものまで、多様な展開ができ、資源開発においても小型探査から重機まで、そのラインナップは多い。しかし、有索であるため、ケーブルの重さや強度などの特性が探査機の限界を上回ってしまうと、探査機の操作ができなくなる。ケーブルが長くなると潮流などによる海水の複雑な動きに対応できなくなり、大深度探査には向いていない。また、近年の漁具や情報技術の発展で、海底でのケーブルの放置や生活情報網が張り巡らされている現在、ケーブル同士絡まりも大きな問題である。さらには、有索では、船舶から鉛直直下にケーブルが出るため行動範囲が狭く、入り組んだ海底や流水の下など、探査できない条件も多い。

無索の探査機は、有人潜水船やAUVなどがあり、近年の技術進展は目覚ましいが、いまだ実用に至っていないものも多い。無索の探査機は、その行動範囲が極めて広くなり、探査方位の自由度が増すことが特徴である。資源探査において、未知の探査には行動範囲の広さは最大の利点である。このため、資源探査の初期にはこの無索タイプの探査機が有効である。しかし、無索であるため、利用できる電力は電池に頼らざるを得なくなり、利用できる電力に限りがある。しかし、電力は近年の蓄電池の著しい発展により、軽量大容量の2次電池が製品化され、動力利用の省電力化とあいまって、その問題意識が低くなってきた。

資源項目		採取目標	
エネルギー資源	石油	天然ガス	メタンハイドレート
金属鉱物資源	マンガン団塊	コバルトリッチクラスト	熱水鉱床
生物・ゲノム資源	大型生物	(極限環境)微生物	ゲノム配列情報

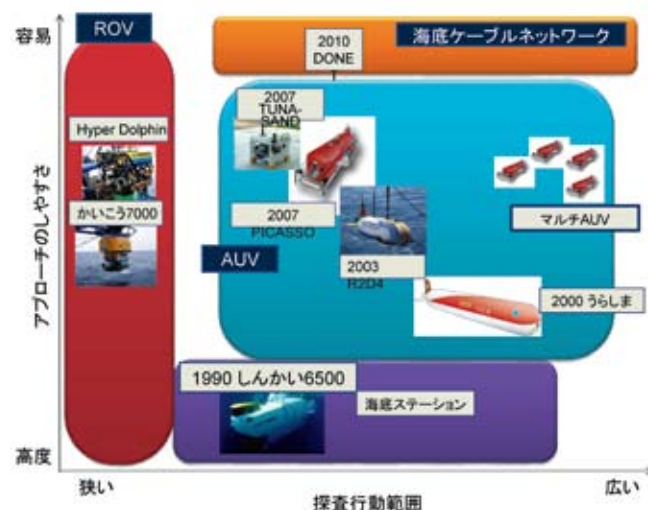
◎表1 海底資源になるべき物質

2. 深海と海底探査機

日本周辺の北西太平洋は、地殻が沈み込む海溝構造が発達し、日本海溝や千島海溝、小笠原海溝など、8,000mを超える大深度エリアが点在する。一方、乗り上げる地殻では背弧海盆の発達が著しく、琉球や南海に大きな海盆を有している。そして海盆を縦断するように地震帯や

深海探査に使う無索の探査機は、必ず最後に自力で浮き上がる必要があり、浮力材の開発が必要である。特に大深度に対応するためには、この浮力材の性能向上が最大の技術的課題であり、均質で粒系の小さいマイクロバルーンの利用が必要である。優秀な浮力材は、探査機を小型化でき、機動性に優れるようになる。一方、潜航手段においては、おもり（バラスト）をかかえ、調査終了時に投棄する形式が一般的である。この形式は単純で良いが、必ず回収しなければならず、繰り返しの調査には弱い。そして無索であるがため最大に重要な部分が、情報を判断し次の行動を決定するプロセッサの開発である。有人の場合、これらは人が一緒に潜航することで行うが、安全対策を十分に講じる必要がある。コンピューター技術やロボティクスの発展により、自立自動化されたシステムを導入した探査機（AUV）が実現可能になってきており、今後の海底資源探査の大きな柱となっていくとしているが、研究開発すべき課題は多い。一方、運用コストはかかるものの、人間の判断が直接必要な事例も多く、双方の技術のハイブリッドな開発が、今後しばらくは必要であると思われる。

これまでに開発されてきた探査機は、有索のものは、「ドルフィン3K」から「かいこう7000II」「ハイパードルフィン」「ABISMO」へ、無索のものは、有人潜水船の「しんかい2000」から「しんかい6500」、AUVは「PICASSO」「うらしま」や東京大学生産技術研究所の「R2D4」などがあり、多くの探査機プラットフォームが使える状態にある。



◎図1 深海海底の探査ツール

3. 海底資源の可能性と探査の難しさ

海底資源の中でも熱水鉱床、いわゆる熱水性金属硫化物は、EEZ内に火山活動の多い日本にとって有望視される資源である。熱水性金属硫化物は海水が地殻中の断層にそって流入し、循環する過程において海水が数百度に加熱され臨界状態を超えると、地殻中の金属成分を溶か

しこむ。これらは再び海底に噴出されると、噴出孔付近に金属硫化物として析出し、チムニーとして成長し鉱床を形成する。さらには多くの特殊な微生物・生物を生育させている。したがって金属資源と共に、生物・ゲノム資源の宝庫である。日本近海、とくにトカラ列島、沖縄背弧海盆、火山列島（伊豆小笠原）周辺においては、継続的な熱水活動域がいくつか報告されており、水深も比較的浅い。しかし、浅いといっても深海中に存在する。

音響技術の発展から、現在ではかなりの精度で船上からの地形調査が可能になった。したがって海底資源が存在すると思われる地形調査は、格段の精度向上を果たしているが、船上からの探査では、波の影響や気泡混入などでその分解能に限界がある。一方、AUVなどの航行型の探査機では、長距離を安定して、海表面の影響を受けずに地形調査ができ、その探査解像度は格段に向上する。また、海底面近傍での音響探査は、分解能向上と共に、熱水プルーやハイドレートの気泡液胞の発見にも有効で、資源探査の大きな希望となっている。しかしリアルタイム性に欠けるため、状況に応じての効率的かつ重点的な調査は今後の課題である。音響での地形探査に加え、サブボトムプロファイラーなどの堆積層の解析、重力や電磁場の調査からも、海底資源の場所の推定が可能となってきている。しかし、これらの装置は、深海で使えるような耐圧設計や、電力の供給方法、データの記録容量、装置全体の重量など、基盤的部分での開発要素が多く、コストもかかりやすい。その部分の配慮が十分に必要である。

化学物質の直接的な検出も、探査機においては重要な要素である。センシングを行いそれを動力に反映させれば、より効率的な探査ができるが、センシングデバイスの開発は、残念ながら遅れている。それはセンサーが何を求めているかで、多様に変化するためである。現在は、温度、電気伝導度、溶存酸素濃度などを計測しているが、さらに実用レベルとして、pH、ラドン、さらにはCO₂やメタンなどの直接センシングも試みられている。今後は光学分析手法や、電気化学分析手法と共に、生物化学分析手法や質量分析など、マイクロケミストリーの発展と共に、小型省電力化が進むであろう。

4. 海底資源開発における環境アセスメント

海底資源の開発において、特にエネルギー資源や金属資源において、周辺の掘削や碎石採取などにより、生物付着層、および泥の飛散などにより周辺に堆積し、海底生物の生存環境を変えてしまう可能性が指摘されている。海底近傍での掘削や採取が、どの程度の周辺環境に影響を与えるのかは、いまだ多くの国が未経験の分野である。直接的に水産資源の減少に繋がってはいけなし、環境の汚染は多くの国で望んでいないことである。また、活発な火山や熱水活動がある地域では、海底の場合、生

物相が固有で、オアシスのように密集していることもわかってきた。生物の固有度が高いということは、小規模の開発で固有種を絶滅に至らせる可能性があり、開発と周辺環境アセスメントは、困難を伴う場合でも順次行っていく必要がある。やむを得ず開発を行い状況においても、元の状況に回復するかどうかの予測をきちんと立てなければならない。そのためには生物相の活性が高い、熱水活動域での開発は避け、すでに熱水活動が終わった鉱床の発見が急務であり、それらを見つけるための研究と技術開発が必要である。

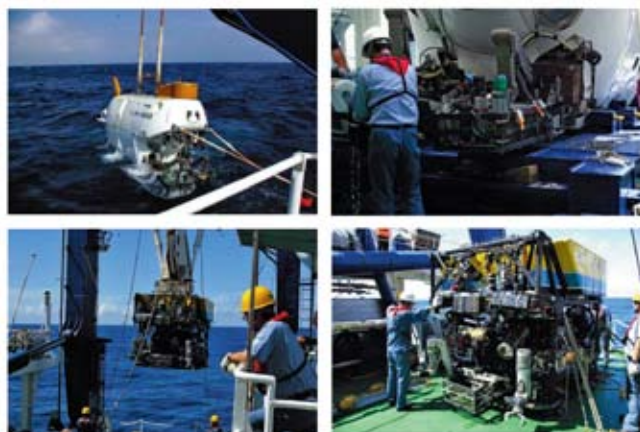
5. 資源探査における探査機器の意義と課題

海底の資源は、電波では観察できないところが、最も難しい点である。そのため、海底探査機という基盤ツールにおいて、その機器の特性にそった探査手段を適合させていくべきであろう。これまで海底での活動を目的とした機器開発が大きな目標であった。それは自動車開発にいて。動力とそれを運転するための技術が必要であり、運転者に対するインターフェースが成熟してこない、真に使いやすい機器とは言えない。たいてい探査機の基本的な運動性能は、ほぼ達成された感のある今、走るためではなく、快適に、安全に、効率よく機能する探査機に変貌を遂げないといけない。有人探査機は、その運用コストと安全運用の面から敬遠されがちであるが、その場で判断でき、観察者の感性に訴える点で、大きな利点がある。また、先端的なセンサーやデバイスの導入、現場での分析機器の導入には、機器のオペレーションが近くで行えたほうが、はるかに良い。海底資源の探査は、よりリアルタイムに、広範囲に、高感度に、経時的な過程を、効率よく、が求められる。有人の場合は現行の探査機のモデルを大幅に変え、より先端機器の導入ができるような体制を整えるべきであろう。

ROVなどの有索の探査機は、長時間の稼働や重量物など、実際の採掘生産に繋がる個別のシステム構築を行い、安全で安価で、ルーチンワークに適したものへとになっていかなければいけない。AUVなどの自動航行タイプのもは、位置の制御が最も難しいが、長距離で、安定性があり、自動航行のさらなる高精度化が求められると共に、複数個の同時運用における並列的な探査や、有人機やROVとの連携を備えたものへと発展すべきであろう。さらには、海底資源の探査という目標のはっきりした調査においては、そのセンシングをするデバイスの開発を加速させる必要がある。海洋におけるセンシングデバイスの開発は、他の先端機器開発に比べると、かなり遅れている。ナノテクノロジーやバイオエンジニアリングなどに使われる高感度で先進的で、微量検出できる分析装置やセンサー開発は、今後多様に進めるべきである。

6. おわりに

海底資源のための探査機は、歴史こそ古いですが、まだ十分に成熟しているとは言えない。機器の開発やその研究もさることながら、なかなか表現しにくい部分に、運用システムの構築がある。運用は経験とノウハウの蓄積が必要であり、これらがこれまでは個別に展開されている。機器の開発と、それを使うチームとの一体的な利用が、最大限の性能を生むことはよく知られていることであり、海底資源の探査機の開発と応用についても、十分に加味すべき点である。



●図2 海底探査機 有人潜水調査船(上段)「しんかい6500」と(下段)

ROV「ハイバードルフィン」の外観と探査装置を乗せるペイロード。「しんかい6500」は2か所に分けてペイロード上に機器が設置できるが、電源供給に制約がある。

電磁波による海底資源の新しい探査法の開発

•Profile•



後藤 忠徳 ごとう・ただのり ●京都大学大学院工学研究科 准教授

京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻准教授1968年6月生まれ。1997年 京都大学大学院博士後期課程理学研究科地球物理学専攻、博士（理学）。日本学術振興会特別研究員、愛知教育大学教育学部助手、(独) 海洋研究開発機構技術研究員などを経て、2009年より現職。種々の海底観測装置や探査法の開発に従事。専門は物理探査学、地球電磁気学。

海底資源と電磁探査

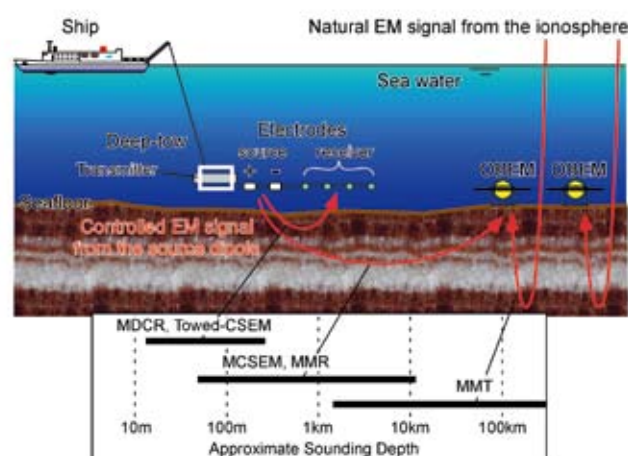
近年、海底下に埋没している化石燃料や金属資源といった、海底資源に世界中からの注目が集まっている。このような海底資源は陸上に比べて未知数の部分が多いためリスクが大きく、新しい技術開発と多くの費用がかかると予想される。にもかかわらず海底資源が注目されている理由は、近年の世界経済（特に中国・インドなどの工業化が急速に進む国々）の成長に伴って、資源需要が拡大しているためである。2008年に起きた世界的な経済危機の影響で原油価格や金属価格は下落したが、開発途上国の資源需要は今後も拡大し続けると予測されている。

海底資源の分布規模などを調査する際には、陸上の資源開発と同様に物理探査（＝物理的現象を測定・分析して地下の状況を探査する技術）および試掘を実施する。この物理探査のうち、近年は特に電磁波を用いた物理探査に注目が集まっている。その理由は海洋資源そのものの電気的特性に因っている。例えば石油・ガス・メタンハイドレートを含む堆積層の比抵抗（＝単位断面積1m²、長さ1mの物質電気抵抗）は数十Ωm以上とされており、通常海底堆積物や海底玄武岩の比抵抗（1-3Ωm程度）よりも高い。また海底鉱物資源のうち、硫化物鉱床は0.2Ωm程度の比抵抗であり、標準の堆積物や海底玄武岩あるいは海水自体（0.3Ωm程度）よりも低い。従って、海底下の電気的構造を調査する物理探査を実施すれば、これらのターゲットの海底下の分布を明らかにすることができ、海底資源発見や量的評価が容易となるため、最終的には海底資源の商業採掘を推し進めることへと繋がる。そこで本稿では電磁波を用いた海底探査について、その種別や動向を概説する。本稿の一部は後藤他（2009）に寄っており、詳細な議論はそちらをご参照頂きたい。

海底で電磁場を測定して、海底下の比抵抗情報や比抵抗構造（断面図）を得る電磁探査を「海底電磁探査」と呼ぶが、大別すると自然の電磁気信号を用いる場合と、人工的に発生させた電磁気信号を用いる場合がある（図1）。前者の代表例は海洋MT（Magnetotelluric）探査であり、複数の海底電位差磁力計（Ocean Bottom Electromagnetometer: OBEM）によって海底での自然の

電磁場変動を測定し、地下情報を得る電磁探査の一つである（図1）。自然の地磁気変動が海底に作り出す誘導電場の大きさは、その変動周波数と地下の比抵抗に依存する。また低周波数の電磁場変動ほど地下深くまで浸透する。従って様々な測定周波数で電磁場変動を測定すれば、海底下浅部～深部の比抵抗構造の情報を得ることができる。海洋MT探査はすでに油ガス調査に適用されており、例えばKey et al.(2006)では、メキシコ湾において海洋MT探査を実施し、石油貯留層生成に関与する岩塩を海底下1～5kmに分布する高比抵抗体としてイメージしている。

ただし海洋MT探査の場合は、海底直下の地下比抵抗構造の情報を得ることは難しい。海洋MT探査で利用する自然の電磁場変動は電離層起源であるため、高周波の電磁場変動は海水中で減衰してしまい、海底まで届かない。一方、低周波の電磁場変動は海底まで届くが海底直下で急速に減衰しないために、海底下深く（数km）までの平均的な比抵抗情報が得られることとなる（図1）。従って海底下数kmよりも浅部を探査するためには、海底付近に比較的高周波の人工電磁場信号源を設置し、人工電磁探査を行う必要が生じる。



◎図1 三種類に大別される海底電磁探査。

MMT＝海洋MT探査、MCSEM、MMR＝海洋CSEM探査およびMMR探査、MDCR、Towed-CSEM＝海底電気探査、曳航式CSEM探査。MMT探査は電離層起源の自然の電磁場信号を利用し、その他は人工信号を利用する。大まかな探査深度も図として示した。

人工信号源を用いた海底電磁探査

人工信号を用いた海底電磁探査には大きく二種類あり、その一つは受信部分を海底へ設置して送信部を調査船で曳航する手法である。代表例は、海洋CSEM探査やMMR探査である。海洋CSEM探査（Controlled Source Electromagnetic sounding）とは、深海曳航型の人工電流送信装置から海底付近を曳航されている2つの送信電極間に交流電流を流し（図1）、このとき海底に発生する電場・磁場信号を離れたOBEMなどの海底に設置された装置で受信する電磁探査法である。一方、MMR探査（Magnetometric Resistivity sounding）は海洋CSEM法と似通っているが、水平ダイポールではなく鉛直ダイポールを用いて人工電流を送信している点が異なっている。

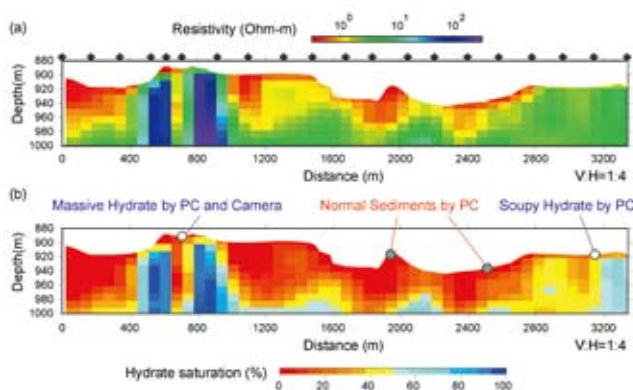
海洋CSEM探査は1970年頃から海底下数km～10kmの深さの海洋地殻の構造調査に適用されてきたが、2000年頃からは油ガス調査を目的とした商業ベースでの適用事例が急増しており、成果を上げている。例えばConstable and Srnka (2007)は油ガス層をターゲットとした海洋CSEM探査を3例紹介している。このうち西アフリカ沖での2事例では海底下1～3kmにある油ガス層を50Ωm以上の高比抵抗層として検出できている。一方、別の西アフリカ沖の1事例では高比抵抗層を検出できなかったが、この油ガス候補層は実は塩水で満たされていたことが分かった。地震波探査のみからは油ガス層と思われたので掘削したのだが、結果はハズレであったのだ。すなわち海洋CSEM探査を用いることで、このような掘削リスクを減らせる可能性が示された。これらの成果を踏まえて、海洋CSEM探査は油ガス探査を主目的として現在世界各地で行われている（山根, 2008）。

人工電流源を用いた海底電磁探査としては、送信装置・受信装置を一体化して共に海底付近を曳航する探査法も利用される。その代表例としては、曳航式CSEM探査や海底電気探査が挙げられる（図1）。海洋CSEM探査では探査深度が浅い場合（数百m以下）には送受信間距離などの測位誤差が問題となるが、曳航式CSEM探査や海底電気探査では送受信装置が一体化されているために大きな問題にはならず、海底下極浅部の探査に優れている。また送受信装置一体化には、探査時にリアルタイムの電磁探査データをモニターできるメリットもある。曳航式CSEM探査は、海底下のメタンハイドレート調査などに適用され始めている。また海底電気探査は地下水調査などを目的とした浅海域（水深50m程度以下）での適用例が多いが、下記に記すように深海での資源探査での適用例も報告され始めている。

海底下メタンハイドレートの海底電磁探査例

ここでは人工電磁探査の一例として、日本海上越沖のメタンハイドレート分布域上で実施された海底電気探査の結果を紹介する（Goto et al. 2008; 後藤ほか, 2009）。こ

の海底電気探査システムは、深海曳航体とその後方の長さ160mの送受信ケーブルから成っており、これらを海底から高度5-10mを保ちながら曳航することにより、海底下100m程度までの比抵抗構造を得ることが可能となる。2005年8月の海域調査により得られた送受信データを解析し、最終的に得られた海底下比抵抗構造を図2(a)に示す。これみると、海底地形の高まり部分では海底直下～海底下100mまで高い比抵抗値を示しており（5Ωm以上）、水平位置600m地点付近の比抵抗値は100Ωm以上と特に高い。また測線全体を通じて、海底下60-80mより地下には3Ωm以上の高比抵抗層が広がっている。この地域でピストンコアラーによる海底堆積物の採取を行ったところ、海底直下に高比抵抗体が認められる地域ではメタンハイドレートやその溶解物が採取され、さらにその周辺海底をカメラ曳航体で観察したところ、100m程の幅で海底変色域が認められた。一方、海底直下が1Ωm程度の地域では通常の堆積物が採取され、海底変色域も認められなかった。以上のことから、海底電気探査で示された高比抵抗体はメタンハイドレートあるいは付随するメタンガスに関連するものと考えられる。さらに、堆積物の間隙は海水とメタンハイドレートで満たされていると仮定して、得られた比抵抗構造から堆積物中のメタンハイドレート飽和率を求めたところ（図2(b))、海底表層付近～海底下100m程度まで部分的に50%を超えるメタンハイドレート飽和率が推定された。また測線下には共通して、海底下60-80mより下に50%を超えるメタンハイドレート飽和率の層が広がっているように見える。このように、海底電気探査によって、メタンハイドレート層と思われる高比抵抗体の深さ分布（特に上面の分布）を詳細に知ることが可能であることが示された。



◎図2 日本海上越沖の海底下比抵抗構造(a)と、そこから推定されたメタンハイドレートの間隙飽和率分布(b)（後藤他 2009）。

海面からの深さで表示。菱形＝構造解析に用いた送受信データの取得位置。白丸＝ピストンコアリング（PC）や海底カメラ観察などで、メタンハイドレートが海底面上に分布すると思われる地点。灰色丸＝PCによって通常の堆積物が採取された地点。

海底熱水鉱床のための新たな物理探査

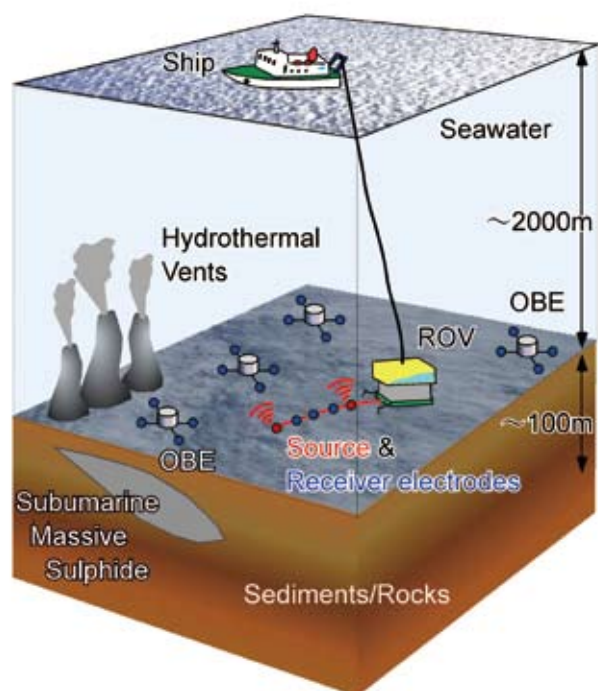
化石燃料の調査だけではなく、金属資源の調査にも海底電磁探査は用いられ始めており、特に海底熱水鉱床に注目が集まっている。海底熱水鉱床は、マグマ活動などにより熱せられた上昇してきた地下水が、海底面で海水により急速に冷却された結果、地下水中に溶けていた銅・鉛・亜鉛・鉄などの金属が沈殿して生成された鉱床である。これらにはいわゆるレアメタルが含まれており、将来有望な資源とされている。海底熱水鉱床の開発については、世界各国が技術開発を始めつつあり、カナダの企業等はパプアニューギニアの領海などで鉱床探査をすでに開始している。世界6番目の経済開発可能海域面積を誇る日本も、国として新しい探査・開発技術の開発に乗り出し始めた。その一例は文部科学省が2008年から実施しているプロジェクト「海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラム」であり、海底熱水鉱床をターゲットとした磁気・電磁気・地震波・重力などによる地下探査技術などを現在開発中である。このうち、東海大学・京都大学などが進めている「遠隔操作型探査機（ROV）を用いた海底電気探査」の概念図を図3に示した。すでにプロトタイプの開発は終了しており、2009年末には実海域での機器試験、2010年には熱水鉱床域での試験探査を予定している。同時並行して開発が進められている自律型無人探査機（AUV）による磁気探査についても、最近実施された海域試験で良好な結果を得たと聞いており、

近い将来に複数の物理探査による海底熱水鉱床の地下構造可視化が達成されると思われる。

今後の課題とまとめ

以上紹介したように、人工電流源を用いた電磁探査による海底下の資源探査の事例は今後ますます増えると予想される。ただし探査手法についてはより高度化が必要がある。例えば電磁探査単体では、シャープな地層境界をイメージすることは困難であるため、地震波探査との統合解析を行い、層中（地震波反射面の間）の比抵抗を精度よく求める技術が必要となっている。このような統合的解析方法は、ある地層の地震波速度・比抵抗などの複数の物性値を得ることも可能とするため、資源量評価をより適正に行える道にもつながる。さらに、物理探査が海底資源開発の事前調査に行われるだけでなく、採掘中にも行われる事例が増えている。いわゆる物理探査による海底下モニタリングであり、資源残存状況の把握による開発作業の効率化や、資源開発に伴う環境保全評価を目指している。このようなモニタリング技術は二酸化炭素貯留や放射性廃棄物地層処分の際にも必要であるため、地球温暖化対策やエネルギー問題の側面でも注目されている。

以上のような、海底資源調査を目的とした海底電磁探査については、国内外の研究者間での技術開発競争（あるいは共同研究）が今後増すであろう。また、海底電磁探査による資源調査は試験フェーズから実用フェーズに部分的に移行しつつあるが、民間への技術移転が実際にどの程度進むかは重要な課題であり、それを見越した研究開発が必要であると考えている。



◎図3 海底熱水鉱床近辺における海底電気探査の概念図。

ROV＝遠隔操作型無人探査機、OBE＝海底電位差計、Submarine Massive Sulphide＝硫化物堆積物（レアメタルなどを含む）。ROVから伸びた長さ数10mのケーブルから人工電流を送信し（赤）、それをROVやOBEの受信電極（青）で受信し、地下比抵抗構造を解析する。

引用文献

- Constable, S., and Srnka, L. J. (2007): An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration. *Geophysics*, 72, WA3-WA12.
- Goto, T., et al. (2008): Marine deep-towed DC resistivity survey in a methane hydrate area, Japan Sea. *Exploration Geophysics*, 39, 52-59; *Butsuri-Tansa*, 61, 52-59; *Mulli-Tansa*, 11, 52-59.
- 後藤忠徳ほか (2009): 海底電磁探査による海底下メタンハイドレータの検出, 地学雑誌, 印刷中.
- Key, K., et al. (2006): Mapping 3D salt using 2D marine MT: Case study from Gemini Prospect, Gulf of Mexico. *Geophysics*, 71, B17-B27.
- 山根一修 (2008) : 油ガス田探鉱における海洋電磁法の適用可能性. 石油・天然ガスレビュー, 42, 55-73.

資源探査における衛星リモートセンシング技術の進歩

●Profile●



三箇 智二 さんが・ともじ ●日鉱探開(株) 地質部勤務情報地質担当部長

昭和36年4月生まれ。昭和62年3月秋田大学大学院鉱山地質学専攻科 修了。職歴：昭和62年 4月日本鉱業(株) 入社。昭和62年 6月豊羽鉱山(株)出向 探査課勤務。平成 6年 5月日鉱探開(株) 出向 地質部勤務技師長。現在日鉱探開(株) 出向地質部勤務情報地質担当部長。主なプロジェクト：地表踏査等の資源開発業務に携わり、90年代より今回紹介したような衛星データ処理の技術開発を手がけている。現在では開発した技術を南米等の乾燥地域に適用し、地表踏査への応用、あるいは、鉱区評価に利用している。現在は、植生に覆われた地域において鉱床評価を行うために、標高値データ(DEM)を利用した地形解析手法の開発を手がけている。これ以外に、衛星データ処理技術の転用として、レーダーデータ (PALSAR) と標高値データを用いた山間部でのバイオマス量推定手法の開発に携わる。レーダーデータではこれまで平地でのみバイオマス量が推定できた。開発中の手法はDEMを併用することによりレーダーデータから地形情報を消去するもので、山間部、特に熱帯林などでバイオマス量を推定できる新しい手法である。資源開発業務以外には、これまで蓄積してきた地形解析手法を基礎として、超長期間の地形変化推定手法の開発に携わっている。

1. はじめに

銅・亜鉛等の非鉄金属資源は世界的規模で消費量が増大しており、国内調達が難しい我が国はその供給のほとんどを海外に依存している。我が国経済の維持・発展のためには、これらの資源の安定的な供給を確保する必要から、海外における非鉄金属資源探査が長年にわたり実施されている。

しかしながら、新たに発見・開発される非鉄金属鉱床は潜頭化・深部化が進み、これまで浅部で開発されてきた鉱床に比べ、既存の探査技術による新鉱床発見は次第に難しくなっている。このような状況から、効率的な新探査技術の1つとしてリモートセンシング技術が進歩してきた。

リモートセンシング技術の初期段階では衛星データは主に写真地質学的に利用され、これは現在でも重要な作業として引き継がれている。このような利用方法に加え、近年では、資源探査への応用としてリモートセンシングデータによるスペクトル解析が主流となっており、さらに、衛星から作成される標高データ(DEM)を用いた構造(リニアメント)解析などが行われるようになった(三箇ほか、2005)。

スペクトル解析は、地表面で反射した太陽光の反射スペクトルを衛星に搭載された観測波長域(以下、バンドと呼ぶ)の異なる複数のセンサにより観測し、波長の特徴から地表を構成する物質などを推定する方法である。

資源探査では鉱床に伴って形成された変質帯等の鉱徴現象を正確に捉え、マッピングすることが重要な作業の1つである。この変質帯とは鉱床形成に関連して流動した熱水と岩石との反応により、ある種の特別な組み合わせの変質鉱物が存在する範囲を指し、斑岩銅鉱床などの非鉄金属鉱床はその鉱床および鉱床上部を中心として性質の異なる変質帯が同心円状に配列を示すことが多い(図1)。このため、衛星データを用いて変質帯を安価かつ迅速にマッピングする方法について研究・開発が続けられて

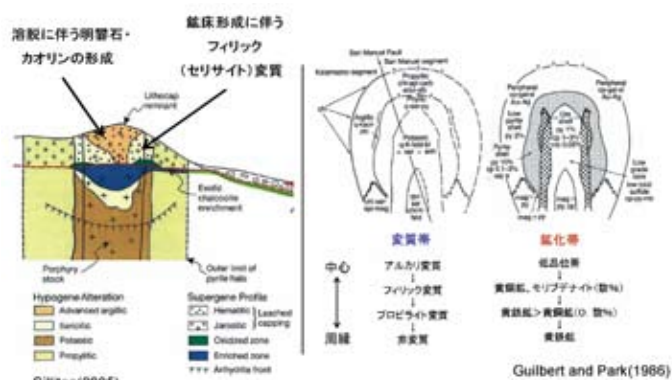


図1 斑岩銅鉱床に伴う変質帯の構造

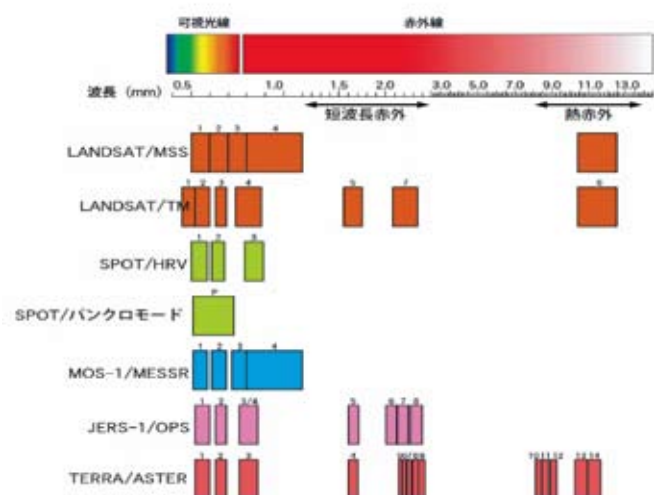
きた。

リニアメント解析の分野では、これまでは写真地質学的手法によりリニアメント等の判読を行い、潜在する構造規制を考察することにより、鉱床胚胎場などの検討が行われてきた。これに対し、最近の地形情報を利用したリニアメント抽出方法は、過去に判読者が注目してきたリニアメントの地形特徴・組織を数量として定義・認識することにより、再現性のある解析結果が得られることが特徴である。

衛星によるリモートセンシングの特徴は、広域データが瞬時に取得できること、自由にどの地域でも観測できること、データが繰り返し取得できることにある。この特徴を生かした変質帯マッピングについてその開発の歴史を概観し、最新のマッピング手法について述べる。

2. 衛星データ利用方法の変遷

資源探査を目的とした衛星データが民間で利用できるようになったのは1980年代初頭である。初期のLANDSAT 1～3には可視・近赤外域に3～4バンドを持つ光学センサー(MSS)が搭載され(図2)、主として写真地質学的な解析が行われてきた。このセンサは可視域から近



◎図2 おもな地球観測衛星の観測波長域

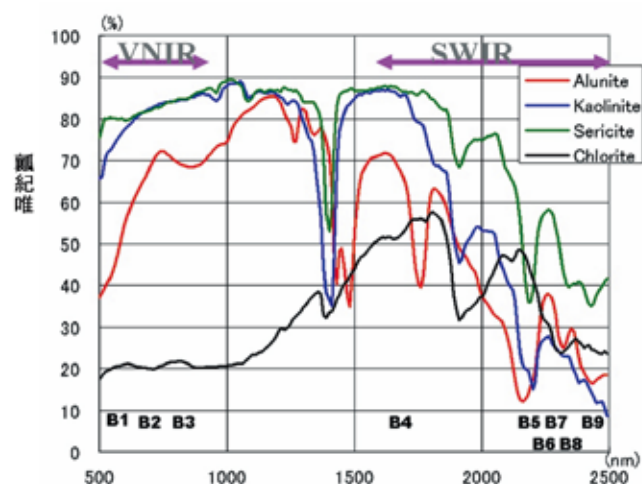
赤外域にのみ複数のバンドを持つ設計であったため、変質帯抽出における利用は限られていた。そのため、利用例としては、斑岩銅鉱床に伴われる黄鉄鉱帯（地表付近では風化し鉄酸化物となっている）の抽出に留まっていた。

この後打ち上げられたLANDSAT 4～5では、より高い空間分解能で0.5～2.5 μm を観測できる高性能のTMセンサが搭載された。これにより、この波長域に特徴が現れるカオリン・明礬石を含む酸性変質帯や絹雲母を含むフィリック変質帯を識別することが可能となった。ただし、変質帯を形成する明礬石、カオリンおよび絹雲母などの変質鉱物を識別することは困難であった。

日本の地球観測衛星としては、資源探査を主目的とした「ふよう1号」が1992年に打ち上げられた。この衛星には短波長赤外域に3バンド(全7バンド)を持つJERS-1センサが搭載され、変質帯のより詳細な解析が可能となった。1999年には可視～熱赤外波長域(0.5～11.6 μm)に14バンドを備えたASTERセンサが搭載された米国の地球観測衛星TERRAが打ち上げられた(菱田ほか、2005)。ASTERは2.0～2.5 μm で5つの波長域を観測できるセンサで、この波長域における反射スペクトル特徴の違いにより、さらに複数の変質鉱物の識別が可能となった。また、反射スペクトルの変化から含有量比の推定が可能となり、変質鉱物の含有量マップや変質鉱物の組み合わせなどの検討も行えるようになった。このASTERデータの出現により、これまでの変質帯の定性的な解釈が、変質鉱物の空間分布の変化などの定量的な解釈へと大きく変化し、鉱床探査に重要な情報を提供することが可能となった。ここでは、マルチスペクトルデータを用いた変質鉱物の識別と定量手法について紹介する。

3. 変質鉱物同定手法

変質鉱物はMg、Fe、AlとOHの結合により2.1～2.3 μ



◎図3 おもな変質鉱物の反射スペクトル

B1～B9はASTER観測バンド

VNIR: 可視近赤外域 SWIR: 短波長赤外域
Alunite: 明礬石
Kaolinite: カオリン Sericite: 絹雲母 Chlorite: 緑泥石

m付近に吸収がある特徴的な反射スペクトルを示すことが多い(図3)。このことから、反射スペクトルから変質鉱物を識別するためには、観測された反射スペクトルの吸収特徴と変質鉱物の吸収特徴とを比較する方法が一般的なアプローチとなる。両者の類似度を計測するためには、Spectral Angle Mapper(SAM)法(Kruse et al., 1993)や相互相関法などがある。

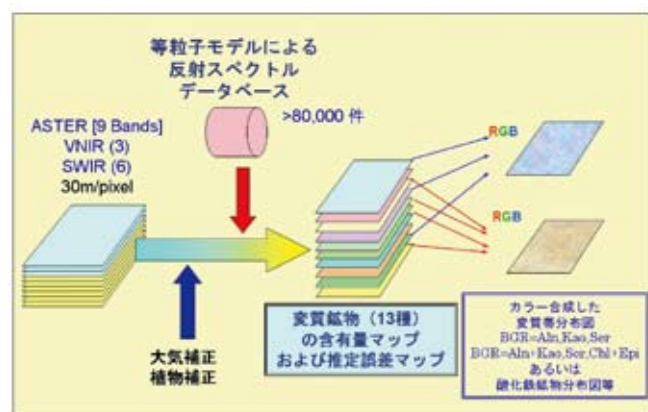
SAM法ではバンド数に相当するn次元のベクトルとして表現し、これと最小角をなす変質鉱物を解として出力する。相互相関法は反射スペクトル間の相関係数から評価する方法であり、この場合も最も高い相関係数となる変質鉱物を解とする。いずれの場合も、類似度がある閾値以上となる条件を組み合わせる方法が一般的であり、1つの反射スペクトルから原則1種類の変質鉱物が推定される。

これら方法の問題点として、地表に分布する岩石は通常複数の鉱物から構成されており、変質を受けている場合でも、明礬石やカオリン、緑泥石と絹雲母など複数の変質鉱物が存在することが挙げられる。一方、上述の方法では最も多く含まれる変質鉱物、あるいは、明礬石などの吸収特徴が明瞭な変質鉱物が解として出力される。鉱床探査の場合には、卓越する変質鉱物のマッピングも必要であるが、その生成環境を推定するための変質鉱物の組み合わせを明らかにすることが重要である。例えば、高温・酸性の熱水と反応して生成されるパイロフィライトなどの変質鉱物は、含有量が少なくとも変質帯を分類する際には重要となる。

このような観点から変質帯を解析する際には、混合物の反射スペクトルから構成される変質鉱物の種類(組み合わせ)と含有量とを推定する必要がある。このような混合物の反射スペクトルからその構成鉱物比を精度よく求め

るモデルとして等粒子モデル(Hiroi and Pieters, 1992)がある。このモデルは、粘土鉱物のように反射スペクトルが強い吸収を示す鉱物の混合において、その反射率変化をうまく説明できる。したがって、このモデルから逆解析することによって、観測された1つの反射スペクトル(衛星画像の1メッシュ、ASTERでは30m四方)の鉱物構成比が推定され得る。

衛星データから鉱物の識別および定量は、以下の手順で解析される(図4)。



◎図4 鉱物同定プロセス

Aln：明礬石 Kao：カオリン Ser：絹雲母 Chl：緑泥石 Epi：緑簾石

- (1)大気補正および植物補正
- (2)混合物のミキシングシミュレーション
- (3)反射スペクトルによる鉱物構成比の推定
- (4)構成比・構成鉱物による変質マッピング

(1)大気補正

大気補正は衛星データを扱う上で不可欠な作業である。衛星データは大気を通過した光を観測するため、大気中に含まれる水蒸気やダストの影響を受ける。この影響は波長によって異なることから、バンド毎に大気の影響を補正する必要がある。不正確な補正では(4)の鉱物構成比を正しく推定できない。最も正確な大気補正方法は、現地において地表の反射スペクトルを測定し、測定地点と同一地点の衛星データの反射スペクトルを測定値と一致させる方法である。現地での反射スペクトルが入手できない場合には、MODTRAN等の大気補正モデルを用いる方法があるが、水蒸気は日々変化するためにある程度の補正誤差が含まれ、解析精度が低下することはやむを得ない。

(2)混合物のミキシングシミュレーション

混合物の反射スペクトルは、混合比と反射スペクトル変化が必ずしも線形で対応しない。図5は赤と青のガラス球を混合させた例である(Hiroi et al., 1992)。波長 $0.5\mu\text{m}$ では、混合比に対して反射率はほぼ比例的な関係にある。一方、 $0.4\mu\text{m}$ では青のガラス球を75%程度まで加えても反

射率はそれほど上昇しないが、75%以上になると反射率は急速に上昇しており、波長によって反射率の変化が異なることがわかる。

このような混合物の反射スペクトルは、前述の等粒子モデルを用いて推定することができる。この際に必要なパラメータは鉱物毎の波長別の内面・外面反射率および吸収係数であり、これらは鉱物の粒子サイズを仮定すれば鉱物の屈折率と反射スペクトルから計算できる。次に、鉱物毎の構成比を10%ごとに変化させ、混合物の構成比と反射スペクトルのデータベースを作成する。なお、ASTERデータから鉱物同定を行う場合には、ASTERの観測波長に合わせた9バンドの反射スペクトルデータベースを作成する。この際に反射スペクトルは正規化(単位ベクトル化)しておく。

(3)反射スペクトルによる構成鉱物比の推定

大気補正されたASTERデータを1メッシュ分(30m四方)読み込み、反射スペクトルを正規化(単位ベクトル化)する。これは、同じ物質であっても斜面の向きによって明るさが変化するためである。この反射スペクトルと(2)で作成したシミュレーションデータベースとを逐次比較し、データベースの反射スペクトルとの差の自乗和を算出する。データベースの中から差の自乗和が最も小さいデータが、このメッシュの反射スペクトルと最も類似していることになる。実際の解析では差の自乗和の小さい順に5つまでを抽出し、この平均構成比を解として出力している。また、この時の差の自乗和(推定誤差)を出力し、推定結果の信頼性評価に使用している。

(4)構成比・構成鉱物による変質マッピング

(3)の作業を全てのメッシュについて実施すれば、変質鉱物含有量のマップが作成される。ASTERデータからは現在13鉱物種の同定を行うことができる。したがって、(3)の結果、13鉱物の含有量マップと推定誤差の14種類のマップが出力される。なお、緑泥石や黒雲母のように吸収特徴の不明瞭な鉱物は、正確な同定が困難で、明瞭な吸収特徴を持つパイロフィライトや明礬石などに比較して信頼性は低い。

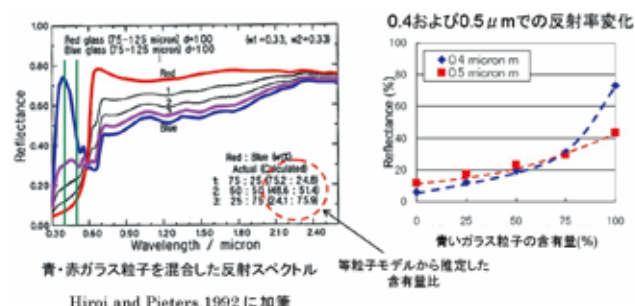
出力された含有量マップをGISなどに読み込み、鉱物組み合わせや含有量から、プロピライト変質、フィリック変質、高度粘土化変質など、通常の地表踏査によって作成される分類定義に従い変質分帯図を作成する。衛星データには地表の岩石以外に雪、雲、水および植物などの反射スペクトルが記録されている場合があり、このような地点では推定誤差が大きくなるために解析結果から除外する。また、(2)の作業で準備した鉱物以外が分布する地点でも推定誤差が大きくなるために解析結果から除外するが、塩湖など特殊な地点を除きほとんどの地点の反射スペクトルは13鉱物の混合で説明可能である。なお、植物が繁茂している地点では、岩石(土壌)と植物との混合した反射スペクトルが観測される。この場合、植物被覆量

と植物の反射スペクトルを推定することで岩石の反射スペクトルを推定することが可能なため、植物の被覆率が40%以下についてはこの補正を行っている。

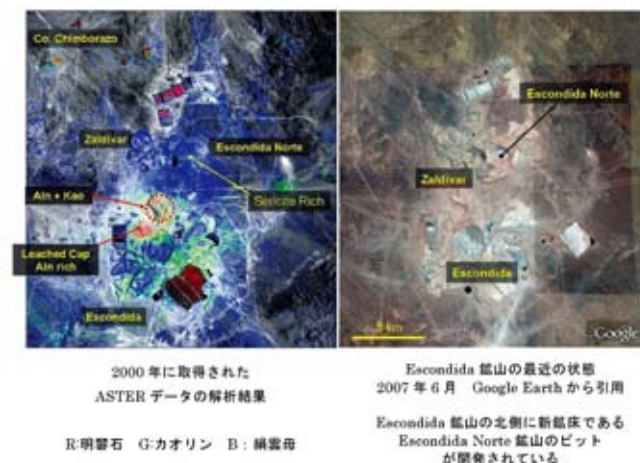
4. 解析事例

ASTERを用いた変質鉱物のマッピング例として、チリ共和国北部のEscondida鉱山近傍の解析結果を図6に示した。Escondida鉱床は1981年に発見(Escondida annual report, 2006))された世界最大級の斑岩銅鉱床である。なお、鉱山名はスペイン語で「隠された」という意味を持ち、鉱体は地下100mに位置している。衛星データは2000年に取得されたASTERを用いており、この時点で既にEscondida鉱山は露天掘りで操業が開始されていた。

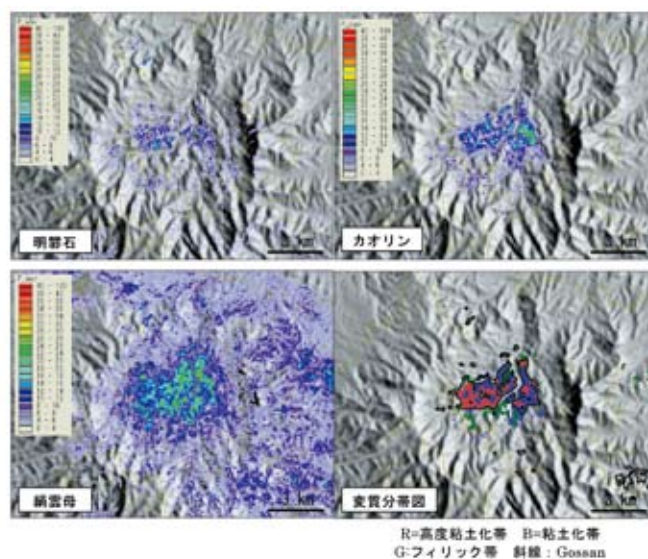
左の図では、変質鉱物の含有量マップのうち、明礬石を赤で、カオリンを緑で、絹雲母を青で表現した。色の鮮やかさは含有量に対応し、鮮やかな地域ほど含有量が多いことを示す。中間調の地点、例えば黄色で表現された地域は、明礬石(赤)とカオリン(緑)の両者が共存する地域を表している。鉱体が位置する露天掘り(以下、ピットと呼ぶ)内部は濃い青(絹雲母)で示され、鉱体周辺に絹雲母が多く分布していることがわかる。図1で示した



◎図5 着色ガラス球を用いた混合物反射スペクトルの変化
右のグラフは0.4および0.5 μm での混合比と反射率の関係を示す



◎図6 Escondida鉱山周辺の鉱物同定結果



◎図7 斑岩銅鉱床が推定される地域の解析結果

ように、斑岩銅鉱床の変質モデルでは、鉱体および鉱体の周縁部は絹雲母からなるフィリックス変質からなる。鉱体の上部にはカオリンや明礬石からなる高度粘土化変質(Advanced argillic)が形成されるが、Escondida鉱山ではこの部分はすでに開発に先立ち剥土されており、ピット周辺に残土として堆積されている状況が読み取れる。ピット北西側には小高い山が現在も残されており、この山は明礬石やカオリンからなる高度粘土化変質帯であることが解析図からわかる。

Escondida鉱山の北側約7km付近には、直径3km程度の絹雲母を多く含む円形の変質域が明瞭に示されている。この解析時点では未公表であったが、この地下に新鉱床(Escondida Norte)が発見されており、この円形の変質帯は鉱床上部に形成されるフィリックス変質帯に相当している。右の図は2007年6月のGoogle Earthの画像であり、左の図のフィリックス変質のほぼ中心に新鉱床のピットが構築されていることがわかる。このように、斑岩銅鉱床の周辺に形成される変質帯の特徴を、ASTERデータから明瞭に把握することが可能である。

図7は斑岩銅鉱床の賦存が推定される地域における解析例である。カルデラ様の地形の中心部に明礬石やカオリンからなる高度粘土化変質帯が位置し、この周囲に絹雲母を主体とする直径3km程度の大規模なフィリックス変質帯が分布している。右下は解析結果によるマッピング例であり、フィリックス変質の中心(上部)に高度粘土化変質帯やヤケ(Gossan)と呼ばれる酸化鉄帯が重複して存在し、図1で示したような斑岩銅鉱床の特徴を有する大規模な変質帯であることを示している。なお、現地調査では、この地域に斑岩銅鉱床の鉱徴が認められ、今後の探鉱結果に期待が持たれる地域の1つである。

5. おわりに

今回、紹介した解析技術は(財)資源・環境解析センターと日鉱探聞(株)の技術陣が開発した成果の一部である。リモートセンシング技術は日進月歩しており、大気補正が正確に実施できない場合などで、不十分な解析結果しか得られないケースがあることや、吸収特徴が不明瞭な変質鉱物の同定精度が悪いなど、今後も改善が必要である。

また、4～15バンドを観測するマルチスペクトルに対

し、可視～短波長赤外域まで約200バンドの連続的な反射スペクトルを観測するハイパースペクトルが計画されており、2013年度の衛星打ち上げを目指してセンサが開発中である。このハイパースペクトルでは、より詳細なスペクトル変化が捕捉できることから、より高度な変質鉱物の識別や、反射スペクトルの吸収の深さや吸収位置の移動から変質鉱物の結晶度やFe/Mgなどの固溶体組成の推定などが期待されている。

参考文献

- 三箇 智二、荒川 泰(2005)：地形特徴によるリニアメント認識(演旨),情報地質,16,2,128-131,日本情報地質学会
- 菱田 元、大岡 隆、縫部 保徳(2005)：金属鉱物資源探査技術の開発と適用,資源と素材,121,7,310-317,資源・素材学会,
- Guilbert J. M. and Park, C. F. (1986): The geology of ore deposits, W. H. Freeman, p.985
- Hiroi, T. and Pieters, C. M. (1992) : Effects of grain size and shape in modeling reflectance spectra of mineral mixtures. Proceeding of Lunar and Planetary Science, 22, 313-325.
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.W., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J., and Goetz, A.F.H. (1993), "The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data", Remote Sensing of Environment, Vol. 44, pp. 145-163.
- Sillitoe, R. H. (2005): Supergene Oxidized and Enriched Porphyry Copper and Related Deposits. Economic Geology 100th Anniversary Volume, pp.723-768.

日中資源探査用ロボット機器の研究の進展

•Profile•



鄧 明聰 Deng Mingcong ●岡山大学工学部システム工学科 准教授

1964年4月生まれ。専門は非線形制御、ロボット制御、システム故障診断の研究。1997年熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。熊本大学工学部知能生産システム工学科助手、イギリスUniversity of Exeter研究員、NTTコミュニケーション科学基礎研究所研究員を経て2002年より現職。岡山大学工学部勤務。この間、(社)電子情報通信学会英文誌A編集委員、計測自動制御学会中国支部役員を歴任。現在は計測自動制御学会論文編集委員会委員およびInternational Journal of Advanced Mechatronic Systems編集委員長。

はじめに

科学技術の急速な発展に伴い日本、中国におけるロボット工学の研究も大いに進んでおり、特に資源探査用ロボットの研究開発が注目されている。本稿では、日中両国における資源探査用ロボットの研究開発、主に海洋資源探査用ロボットの研究開発について述べる。

資源といえば、近年、地下・深海（海底）・宇宙といった領域まで開発対象となっており、その資源探査用ロボットも上述の環境において様々に開発されている。地下の資源開発については、すでに金属鉱物資源・非金属鉱物資源・レアメタル・核燃料鉱物資源・エネルギー資源に対して地球物理探査・地化学探査・試錐に関する様々な先端技術が開発されており、実用化されている。該当分野でのロボット開発といえば、採掘作業のロボット化とその応用が広く期待されてより、宇宙探査においては、日本の無人探査機「はやぶさ」が小惑星イトカワに到達し、画像認識技術によって、自律的な着陸およびサンプル採取に成功した。特に宇宙開発基本法が成立し、今後の宇宙開発への取り組みが議論されている。このような中、日本のロボット技術は世界最高水準にあり、月・惑星探査ロボットの開発など、世界的にも宇宙活動への応用が期待されている。一方、中国では、2003年10月15日、甘粛省の酒泉衛星発射センターから長征2Fロケットを使い、初の有人宇宙船「神舟5号」の打ち上げに成功した。これは旧ソ連とアメリカについて3番目の成功であった。楊利偉宇宙飛行士は高度343kmの円軌道で地球を14周(飛行距離は60万km)し、21時間23分の飛行の後、16日に無事帰還した。また、国策として月探査を進め、2007年11月に月周回機「嫦娥1号」を打ち上げ、その後、同周回機による月面の撮影に成功した。今後の宇宙探査計画では、2011年に月周回機「嫦娥2号」を打ち上げた後、2013年には月面ローバー「嫦娥3号」を着陸させる予定で、月サンプルリターンミッションを計画している。そのため、輪ロッカー・ボギー懸架ロボット、ユニクランク・スライダ懸架ロボットなどの車輪型惑星探査ロボットも開発されている。

つぎに、海洋資源探査用ロボットの研究開発について

述べる。大陸棚や深海底には豊富な資源が存在してより、日本では2007年に海洋基本法を施行し、2008年には海底鉱床の採掘などを基本とする海洋基本計画を策定している。日本近海の鉱床には金や銅、コバルトなどが存在し、浅い海底鉱床分だけでも70兆～80兆円の市場価値があると見られていて、それらを調査し、採掘するための大型の海中ロボットの開発が期待されている。海底資源が世界最高水準のロボット技術で採取可能となればエネルギー問題も解決する。中国でも近年、海洋資源開発用の海中ロボット、特に自律型無人探査機(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)の研究開発が盛んになっている。なお、海中では10m深度を増すごとに1気圧ずつ圧力が高まるため、水圧に耐えられる構造が要求される。海中の塩分により電磁波を通さないため、地上と同様の通信は困難である。さらに、空気もないエンジンなどの地上で一般的な動力源もそのままでは適用できず、陸上における技術をそのまま適用することは不可能である。実質的には、宇宙分野よりも難しい技術が要求されると言われている。また、海中ロボットについては、単純な観測活動であれば全自動でこなすことが可能となりつつあるが、周辺環境の認知能力が限られているため、音響による地形調査といった、障害物回避をあまり考慮しない動作に限られている。たとえば、調査船とケーブルでつないで操縦することで自動潜航するような海中ロボットがある。

探査用ロボット

海洋研究開発機構(JAMSTEC)では、船舶や有索調査船等が近づき難い場所において調査を行うため、自力で航行観測する自律型無人探査機(AUV)「うらしま」を開発している。「うらしま」は、機体にコンピュータを内蔵した自律型海中探査ロボットで、あらかじめ設定したシナリオに従って、自身の位置を計算しながら航走できる。本機の開発は1998年から始まっており、2001年には深度3,518mという潜行に成功している。また、2005年には燃料電池を搭載したAUVとして世界記録となる連続航走317kmを達成し、大きな注目を集めている。



「うらしま」の写真

さらに、「うらしま」を起伏のある海底に追従できるように改良し、探査機に搭載した音響測深機等の精度を向上させ、2007年5月に、沖縄トラフの熱水噴出域の熱水マウンド及びチムニー群の詳細な形状と分布のイメージングに成功した。また、最大3,000mまでの潜航が可能な探査機「ハイパードルフィン」や10,000m級の探査能力を持つ探査機「ABISMO」等、海中・海底で観測やサンプリング等を実施できる遠隔操作型無人探査機（ROV: Remotely Operated Vehicle）が開発されている。



「ABISMO」システム構造

東京大学生産技術研究所海中工学研究センターでは、中型の自律型海中ロボット「r2D4」を開発している。平成17年度および19年度には伊豆・小笠原海域の明神礁やベヨネース海丘のカルデラ内に潜航させ、小型の現場型マンガン分析装置、サイドスキャンソナー、テレビカメラなどで観測することに成功している。

一方、中国科学院瀋陽自動化研究所は、1985年に中国の水中ロボット第1号「HR-01号」を設計し、さらに深海ロボット「CR-01」や「CR-02」を開発している。2008年には、水中ロボット「北極ARV」が第3回中国北極科学考察の氷下試験に参加し、北緯84度で氷下実験を行った。



「r2D4」の写真

また、2008年3月20日には、水深6,000mで作業を行うロボット「CR-02」が南シナ海での試験に成功している。現在、中国では水深6,000m級の無人潜水艇や7,000m級の有人潜水艇の開発を進めている。中国においても海底資源の利用には力を入れており、2007年5月には、南シナ海の海底から、将来的に重要なエネルギー源になると期待されているメタンハイドレードの採取に成功している。



「CR-01」の写真



「CR-02」の写真

終わりに

日中両国の研究者は資源探査用ロボットの研究開発において多大な成果を収めており、これらの成果を踏まえて、新たな計画も立てられている。今後の東アジア地域における資源開発、および探査用ロボットがどのように

展開されるべきか、互恵の精神を持つことによって、さらなる発展が生まれると期待できる。最後に、資料の提供などに協力された本学矢納 陽先生、大学院博士後期課程姜 麗華さんに謝意を表する。

引用文献

1. <http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/urashima.html>
2. 海洋鉱物資源の探査に関する技術開発のあり方について（中間とりまとめ案）、海洋開発分科会海洋資源の有効活用に向けた検討委員会、2009年4月
3. http://news.searchina.ne.jp/disp.cgi?y=2008&d=0321&f=national_0321_009.shtml
4. http://dailynews.yahoo.co.jp/fc%2Fworld%2Fchina_space_exploration%2F#backToPagetop
5. <http://underwater.iis.u-tokyo.ac.jp/top/sado/sado.html>



環境・エネルギー

Part 1 — 低炭素社会づくりを目指す

環境

はじめに

地球温暖化の原因となる二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスを極力排出しない「低炭素社会」と「低炭素経済」は、今や全世界的な取り組みとなっています。大量生産・大量消費型社会から循環型社会への脱却には、行政の舵取りが重要ですが、そこではさまざまな温暖化対策技術の開発とその普及が不可欠となります。

今回ご紹介する特集では、地球温暖化緩和のためにど

のような技術が存在し、またどのような技術開発がなされているのか、今後の展望はどのようなものであるか、日本と中国の一流の専門家によって詳細かつ最新の報告を取り上げました。

今回の特集が、読者の皆様のご参考になりましたら幸いです。

中国総合研究センター

持続可能な発展と日中の役割

●Profile●



小宮山 宏 こみやま・ひろし ●株式会社三菱総合研究所理事長

1944年12月生まれ。1972年東京大学大学院工学系研究科化学工学専攻博士課程修了（工学博士）。専門：化学システム工学、地球環境工学、知識の構造化。職歴：1988.7.1東京大学工学部教授。1995.4.1東京大学大学院工学系研究科教授。2000.4.1東京大学大学院工学系研究科長・工学部長。2003.4.1東京大学副学長。2004.4.1国立大学法人東京大学理事。東京大学副学長兼務。東京大学大学院工学系研究科教授兼務。2005.4.1国立大学法人東京大学総長。2009.4.1 国立大学法人東京大学総長顧問。2009.4.1株式会社三菱総合研究所理事長。著書：「地球持続の技術」（岩波新書1999年）。「知識の構造化」（オープンナレッジ 2004年）。「東大のこと教えます」（プレジデント社 2007年）。「課題先進国」日本（中央公論新社、2007年）。「知識の構造化・講演」（オープンナレッジ 2007年）。「Vision 2050: Roadmap for a Sustainable Earth」（Springer 2008年）ほか多数

1. 21世紀のパラダイム

私の考える21世紀のパラダイムは、「有限の地球、高齢化する社会、爆発する知識」この3つである。最初に「有限の地球」。地球は膨張した人類の活動量に対して相対的に小さくなっている。20世紀の膨張に耐えられなくなった地球上で、環境問題、エネルギー問題、パンデミック（感染症）などが発生しているのである。次に、「高齢化する社会」。日本は2006年に既に人口のピークを迎え高齢化社会に突入しているが、中国も2030年ごろにピークを迎える。インドも2050年以前にはピークアウトとなるだろうと言われている。2050年までに全世界が高齢化社会を迎えると考えていい。最後に、「爆発する知識」。20世紀に知識の量が爆発的に増えたことで、様々なことができるようになったが、あまりにも知識が増えすぎて、誰にも全体像が把握できなくなったという問題がある。以上3つのパラダイムは21世紀が抱える困難であるが、逆にそれが潜在的な需要でもある。

2. ビジョン2050

2050年が地球と人類にとって大きな岐路となることは間違いない。私は、1990年以前よりそう確信しており¹⁾、拙著「地球持続の技術」²⁾の中で「ビジョン2050」を提案した。これは、途上国の成長と先進国の生活水準の維持、エネルギー資源問題、地球環境の保全、そして科学技術の可能性と限界を視野に入れた総合的ビジョンである。

「ビジョン2050」の結論を要約すれば、①エネルギー効率を3倍にすること、②物質循環システムを構築すること、③自然エネルギーの利用を2倍に引き上げること、以上3点である。これらの目標は理論的、技術的に実現可能であるが、同時に国際的な合意を必要とするものである。

理論的、技術的に可能なことを、例をあげて説明する。ガソリン1リットルで何キロ走れるかというレースがある。20年前500キロ、10年くらい前で1500キロ。最近では5,000キロを超えている。横軸に車の重量をとり、縦軸に燃費の逆数（1km走るのに何リットルのガソリンを使うか）をとって、車の重さと燃費の関係をみると、技術が同じなら理論的には直線に並ぶ。事実、米欧車、日

本車は概ね直線状に並んでいる。しかも、同じ重さでは日本車は米欧車より20%ガソリン消費量が少なくなっている。今後、車の軽量化が進み、車の重さが半分程度になり、電気自動車普及すれば、車の消費するエネルギーは10分の1になってしまうのである。将来、世界の車の台数が今の3倍に増えたとしてもガソリンの消費量が10分の1になれば、消費エネルギーは3分の1となるのである。

エネルギー効率化ができないものもある。例えばセメントである。日本は1トンのセメントを生産するのに消費するエネルギーを1960年から30年の間に約半分に減らしてきた。これは日本のセメント会社が必死に生産プロセスの改良をしたからである。すでに、理論的なエネルギーの限界の1.6倍まできており、これ以上減らすのは困難というところまで減らしている。他のモノづくりでもほぼ同じ状況である。日本はエネルギーのほとんどを輸入に依存している。エネルギー価格が高いために逆にエネルギー効率の高い国になったのである。

今、世界のセメントの半分は中国で生産されている。中国がセメントを使うのは都市や高速道路を建設するためであり、これを止めることはできない。しかし、一番効率のよい方法で作ってくれば、中国のセメントを作るエネルギーは40%に減るということである。

「ビジョン2050」は、自動車の数が世界で増える、都市が増える、これを否定していない。しかし、効率を3倍にすれば今と同じ量のエネルギーで済む、また、非化石系エネルギーを倍にすることで、CO₂の発生量を抑えようという考え方である。

このときに、先進国、途上国はどのようなことになるかというと、先進国では、すでに2人に1台、自動車を持っているので、これ以上、自動車が増えることはない。したがって、自動車のエネルギー効率が3倍になれば、エネルギー消費量も3分の1になる。そして、太陽電池、風力、バイオマスなどの非化石系エネルギーを必死で倍まで増やせば、CO₂を発生する化石資源の部分が8割減るというのが、2050年に8割エネルギーが減るというモデルである。一方、途上国では、なりゆきにまかせるのではなく、良い技術、効率の高い技術を使って、CO₂の発生量を抑え

てくださいと要求することが、地球を守るための最適な方策である。これが途上国と先進国とが、合意可能なぎりぎりの線なのでないかと思う。

現在の中国は確かにここでいう途上国ということになる。しかし「中国は果たしていつまで途上国なのか」という問題がある。中国の今の経済成長率でいけば、6年後には1人当たりGDP（国内総生産）が日本の6割に達する。ここまでくれば先進国と言っていい。急速な成長でありここに歪みが出ることを斟酌する必要もあるが、先進国に仲間入りすれば、先進国のモデルが要求されることになる。

3. CO2の25%削減とプラチナシティ・ネットワーク構想

鳩山首相は国連気候変動首脳級会合で2020年までに日本の温暖化ガスの排出を1990年比で25%削減すると表明した。産業界からは危惧の念が寄せられているが、要はやり方次第なのである。確かに、日本の製造業は石油ショックや公害問題の克服のための努力を行い、世界一のエネルギー効率を達成しており、これ以上の効率化は厳しいかもしれない。では、25%削減は不可能化かというと、そうではない。製造業においても効率向上の不断努力が必要だが、製造業以外の部分に大きく削減可能な部分がある。以下では、その内容を明らかにしていきたい。

日本のエネルギー消費は、家庭、オフィス、輸送の「日々の暮らし」が55%、素材、自動車、家電など「ものづくり」が45%を占める。「日々の暮らし」で80%削減、これは我が家をエコハウスにすることですでに実証済みである。すなわち日本全体で44%削減が可能である。しかし、2020年までに全ての家をエコハウスにするのは難しい。進行率を4分の1として11%の削減を目指す。既にエネルギー効率の高い「ものづくり」に過度の負担を求めるのは得策でない。5%と想定する。原子力発電の稼働率を国際レベルまで高め、これに風力発電などを合わせて4%。森林保全による吸収源拡大、海外での省エネや新エネ投資などで5%。こうすれば、排出権購入によらず、25%削減の自力達成が可能である。

この試算結果を検証するため、東京大学と三菱総合研究所のメンバーで様々なデータを用いて精査したところ、「日々の暮らし」のうち、住宅・オフィスで6%、輸送部門で6%、両者合わせて12%となった。また、残りについては、発電・送電部門で、5%、森林の適正な手入れや耕作放棄地の緑肥生産などで5%、そして残る3%を「ものづくり」での省エネ努力という結果となった。さらに、海外CDM（クリーン開発メカニズム）の実施により5%の削減が見込まれ、合計で30%削減可能という結果が得られている。

いずれにしても、「日々の暮らし」での大幅な削減を実現することが重要なことは間違いない。また、「日々のく

らし」での大きな削減は、省エネ、創エネの先端機器やサービスの購入を意味し、それが「ものづくり」のマーケットを育て、雇用を創出し、21世紀の世界が必要とする新産業を日本から生み出すことを可能にする。今こそ、前向き志向が必要なのである。

日本は課題先進国であり、温暖化のみならず多くの困難を抱えている³⁾。これらを同時に解決するために、所得倍増計画、日本列島改造論に代わる新たな国づくりの方向性を示すビジョンをつくる必要がある。しかも、それは、政府が産業を興し国民の暮らしをよくするという従来のものではなく、地域で暮らしをよくすることで新たな産業を興すという先進国型モデルでなければならない。私は、このような考え方を基本として地域ごとに快適なくらしを実現しようとする社会をプラチナ社会とよんでいる。「プラチナ」にはエコ（グリーン）と高齢者（シルバー）、さらに生態系にもマッチした、様々な輝きを帯びた社会であるとの思いをこめた。

プラチナ社会の実現に向けて全国の自治体と協働でまちづくりの実験を行なうのが、「プラチナシティ・ネットワーク構想」である。日本中に、エコでバリアフリー、ひとづくりと雇用で快適なまちを作っていくのである。すでに、青森県、福井県、千葉県柏市などが動き始めており、多くの都市から参加したいという声が寄せられている。国が動くのを待っている間に合わない。地方のまちづくりから始めよう。各地のプラチナシティが共有する課題も多いと考えられるので、ネットワークづくりも大切だ。これにはITの活用が欠かせない。各地域の実験結果を要素分解して、全国各地で活用可能なものとしてプールし、自由にアクセスできるような環境を整備していこう。東京大学とフューチャーデザインセンターがその役割を果たす予定である。

日本は小さな国ではあるが南北に長く、しかも中央に山脈があるために、各地で多様なくらしが営まれている。したがって中国とほぼ同緯度に位置する日本の多様なプラチナシティは、必ずや中国各地の都市にとって良いモデルを提供することができる。各自治体が中国をはじめアジアの各地の都市と姉妹都市提携を結び、21世紀の生活スタイルを率先して海外に提供することが可能となるのである。

20世紀の生活向上のモデルはハリウッド映画だった。世界各地の人々がハリウッド映画をみて、豊かなアメリカの生活にあこがれ、アメリカの製品を求めるようになった。映画のイメージがアメリカのスタイルを世界中に広めるけん引役となった。これからは、日本がプラチナシティを通じて世界の人々に21世紀の理想の生活スタイルを提供することが大切である。日中で姉妹都市をつくることによって情報交換を行い、21世紀の新しいまちづくりをアジアで実現しようではないか。

参考文献

1. 「地球環境化問題ハンドブック」小宮山宏監修（アイピーシー 1990年）
 2. 「地球持続の技術」（岩波新書1999年）
 3. 「『課題先進国』日本」（中央公論新社、2007年）
小宮山(こみやま) 宏(ひろし)
-

低炭素社会実現のためのエネルギーシステムの構築

●Profile●



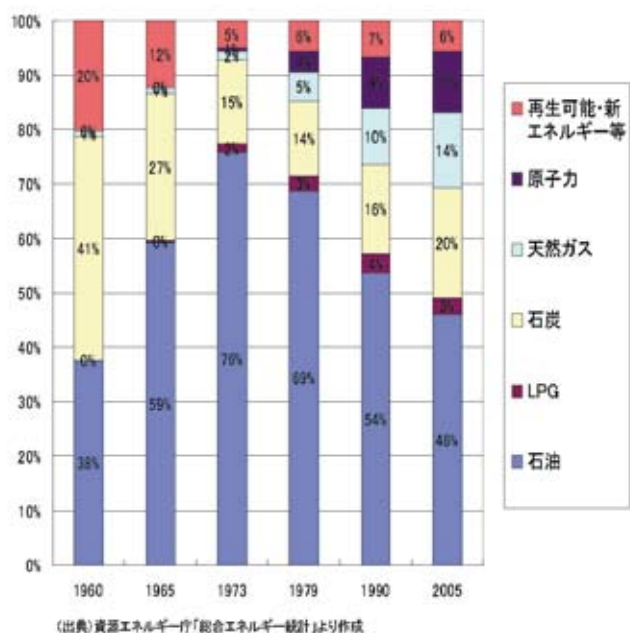
山地 憲治 やまじ・けんじ ●東京大学・工学系研究科 教授

1950年2月生まれ。1972年東京大学工学部原子力工学科卒業、1977年同大学院工学系研究科博士課程修了後、(財)電力中央研究所(経済研究所技術経済研究部)入所。1987年(財)電力中央研究所経済研究所エネルギー研究室長、1993年(財)電力中央研究所経済社会研究所研究主幹を歴任。1994年から東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻・教授、新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻・教授へ配置換えを経て、現職。2008年より、東京大学エネルギー工学連携研究センター兼任。この間、1999年6月～国際応用システム分析研究所(IIASA)日本代表理事、2001年9月～グリーン電力認証機構委員長(現在、グリーンエネルギー認証センター・運営委員会委員長)、2005年10月～日本学術会議会員を務める。専門は、エネルギー技術評価・地球温暖化対策評価などのエネルギーシステム工学。日本エネルギー学会副会長。「原子力の過去・現在・未来」(コロナ社)、「エネルギー・環境・経済システム論」(岩波書店)など著書多数。

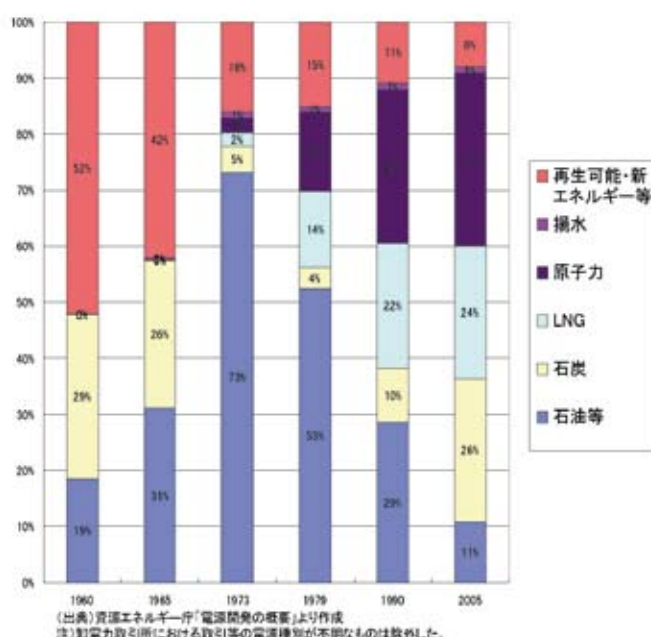
低炭素社会に向けた最近の日本の動き

2008年7月に「低炭素社会づくり行動計画」が閣議決定された。この中で、2050年までを視野に、革新的技術開発として21の技術領域を特定し「クールアースエネルギー革新技術計画」を推進していくことを打ち出した。また、既存先進技術の普及として、具体的な目標値もあげられている。一つは、2020年をメドに、原子力と再生可能エネルギーの割合を50%以上にするという、「ゼロエミッション電源」へのアプローチである。さらに、太陽光発電の導入量を、2010年までに現在の10倍、2030年には40倍にするという目標も掲げた。

わが国のエネルギー供給の変遷を振り返ると、図1に示されているように、第一次オイルショックの1973年には石油が8割ぐらゐを占めていた。それが今や、50%を切るようになり、石油シェアの低下分は、天然ガス、原子力で代替し、石炭についても国産から輸入炭に変わり、石油代替に寄与してきた。特に発電エネルギーのシェア



◎図1 わが国の一次エネルギー供給シェアの推移



◎図2 わが国の発電電力量シェアの推移

では、図2に示すように、より顕著な変化が生じた。1960年ころは「水主火従」の時代で、水力が半分以上を占めていたが、その後は石油依存の時代になり、1973年に8割近くが石油依存だったものが、急減に原子力とLNG、最近では輸入石炭に置き換えられている。現在の電源構成は、石炭、天然ガス、原子力がそれぞれ同じぐらゐで、全部合わせて約80%。残りの10%ずつを石油と水力が供給している。このように、電源には、エネルギー源の選択・転換を短期間でできるという技術特性がある。そのため、低炭素社会形成ということになると、まず電力部門が注目されることになる。

その後、2009年4月には麻生首相(当時)が「新たな成長に向けて」の中で、2020年には、太陽光発電の規模を「低炭素社会づくり行動計画」の2倍の水準になる2020年までに現在の20倍(2800万kW)とし、エネルギー消費に占める再生可能エネルギーの比率を20%まで引き上げるという目標を発表した。また、

2009年7月には、革新的技術開発と非化石エネルギーの導入拡大および化石資源の高度化利用を3本柱とする「エネルギー供給構造高度化法」が成立した。この法律の下で、11月からは太陽光発電の余剰電力をkWhあたり48円（住宅用太陽光発電の場合）で買取の制度が導入された。

2009年9月には民主党の鳩山首相への政権交代が起こり、鳩山首相は2009年9月22日の国連気候変動首脳会合において、地球温暖化対策の中期目標として「1990年比で言えば2020年までに25%削減」を表明した。同時に、「世界のすべての主要国による、公平かつ実効性のある国際枠組みの構築」と「すべての主要国の参加による意欲的な目標の合意」が、この我が国の国際社会への約束の「前提」であることも述べている。これに先立って、麻生前首相は6月10日に2020年の温室効果ガスの排出量を2005年比15%削減するという中期目標を決定していた。新しい中期目標は2005年比では30%減になる大幅なものであるが、麻生前首相の中期目標がわが国の温室効果ガスの排出量だけを対象とした削減目標（いわゆる「真水」）であるのに対し、鳩山首相の新しい中期目標は、森林吸収や排出量取引などを含めたものであるといわれている。わが国の新しい中期目標は、世界の地球温暖化対策をリードするものとして欧州首脳を中心に世界各国から賞賛されているが、現実はこの目標を達成するには極めて厳しい対策が必要である。

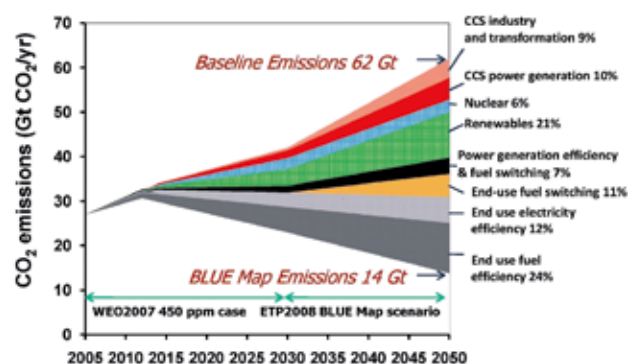
温室効果ガス半減への技術シナリオー電力部門の大きな役割ー

世界全体としては長期的な地球温暖化対策として、G8サミットなど世界の政治指導者の間で、気温上昇を産業革命以前の水準から2℃の上昇に押さえ、そのために2050年までに世界の温室効果ガスの排出量を半減する目標が表明されている。

では、世界の温室効果ガス排出半減に向けて、どのような技術シナリオが描けるのだろうか。図3は、IEAが2008年の洞爺湖サミットに合わせて発表した、2050年温室効果ガス半減に向けた技術シナリオを示している。なお、これはエネルギー起源のCO₂だけを対象としている。

このシナリオでは、2005年で280億トン弱だったCO₂排出量を、2050年までに半減し、約140億トンにする。この目標を達成する技術シナリオは、現在の努力を継続した場合に想定される2050年の排出水準（これをベースラインという）から現状の半減にまで削減する必要があるということに注意しなければならない。IEAのシナリオの2050年のベースラインの排出量は約620億トンである。これを140億トンに削減するわけだから、2050年半減を実現するには約480億トンという大きな削減を実現しなければならないのである。

図3にはこの約480億トンの削減の内訳が図示されている。エネルギーの供給サイドでは、とくに電力部門の役割が重要になる。まず、再生可能エネルギーを増やし、原子力を増やし、CO₂回収・貯留（CCS）設備を備えた火力発電を増やすことで大きな削減が期待されている。また発電以外でも、セメント生産や石炭利用で同じくCCSを適用することを想定し、発電効率の向上にもかなりの寄与を期待している。一方、デマンドサイドでは、末端での電化や水素使用、照明の効率など電力利用効率を高めること、さらに、自動車の燃費向上など徹底して燃料全体の利用効率を高めることが、非常に重要な役割を果たすことが示されている。



◎図3 IEA（国際エネルギー機関）によるCO₂半減の技術シナリオ

出所:IEA/OECD:“Energy Technology Perspectives 2008” (2008)

このような低炭素社会形成に組めた技術シナリオにおいて特に注目されるのは、電力部門の大きな役割である。電力は多様なエネルギー源から生産可能だから、低炭素化しやすいという特長をもっている。しかも、いったん電力に変えると、利用時には非常にクリーンで、大気汚染物質も出さず、制御性にも優れるので非常に高効率なエネルギー利用を実現できる。とりわけ空調や給湯など、100℃以下の低温熱供給の場合には、ヒートポンプを使えば空気や水・地中などの環境中にある熱エネルギーを高効率で利用することができる。また、石油製品が独占していて低炭素化の難しい輸送部門でも、電気自動車やプラグインハイブリッド車の導入によって、電気を利用することで低炭素化が実現できる。

省エネルギーへの期待と課題

このような温室効果ガス排出削減の技術的可能性を実現するには、きめ細かく多様な取組を組み合わせなければならない。CO₂排出に価格をつけて温暖化の環境費用を経済システムに取込む（これを環境外部コストの内部化いう）ことは重要ではあるがこれだけでは十分ではない。対策技術の採用においては、技術に関する情報が周知さ

れなければならないし、将来に実現する技術導入の効果を現在の投資コストと比較するために必要となる割引率についても考慮しなければならない。地球温暖化対策のような公益的対策において使用されるべき割引率は、利益を追求する市場で用いられる割引率より小さいが、これを社会各層に伝えるのは大変難しい。割引率が低いほど多くの対策が経済合理性を持つようになるのだが、現実には資金力に乏しい個人や発展途上国ではきわめて高い割引率が適用されている。つまり、長期的には経済合理性があるにも拘らず、至近の投資額が大きいために見送られる対策が多々ある。IPCC報告においても、この問題は経済的可能性と市場的可能性のギャップとして指摘されている。このギャップを解消するには、対策技術の開発だけでなく、情報の普及や技術支援とともに資金的な援助を工夫する必要がある。

また、家庭や業務など民生部門の省エネルギー分野におけるCO₂削減ポテンシャルは大きく、特に経済性に優れた対策が多いことが知られている。この中には全く費用が掛からない、あるいは経済的にはむしろベネフィットがあると評価されるにも拘らず現在実行されていない対策も含まれている。これは、経済的には合理的であっても情報不足や生活文化的要因などの見えないバリアーのために現実にはその削減可能性が実現していないことを示している。省エネルギー分野の対策には種々多様な技術があるが、多くに共通して見られる課題は現実の市場への普及段階におけるバリアーの克服である。

省エネルギー対策の経済性評価では、省エネ設備への投資がエネルギーコスト節約等によって一定期間内に回

収できれば経済的に実現可能と評価する。しかし、民生部門の省エネ投資は家庭など多数の意思決定者によって行われており、人々の行動原理について深い理解が必要である。現実の人々の行動は歴史的に形成された生活文化に根ざしており、家計レベルでの投資の意思決定は必ずしも経済合理的ではなく、また、情報不足のために費用効果の高い省エネ投資が見逃されることも多い。経済合理的な省エネ対策の普及を妨げるバリアーとして、情報不足のほかにも資金不足、設備の投資者と利用者の乖離（オーナー・テナント問題）、投資回収リスクなどが挙げられる。このような通常の経済性評価では捉えきれない普及段階の見えないバリアーを克服するには、ラベリング制度などによる情報提供をはじめ、わが国の「トップランナー基準」のように、消費者の選択に依存せずに高効率機器の普及を図るなど、消費者の行動を理解して、きめ細かい政策を展開することが重要である。

地球温暖化対策は科学と政治が連携して対応すべき長期課題である。特に対策の長期目標は科学だけでは決められない価値判断を含むものであり、科学と政治の連携の重要性が際立っている。ここで鍵となるのは不確実性の扱いであろう。不確実性には2つのタイプがある。自然の理解に伴う科学上の不確実性と、未来の選択を行う人間社会の不確実性である。このような不確実性に対処しつつ適切な地球温暖化対策を実施するためには、未来に対する長期的なビジョンを皆が共有する必要がある。地球温暖化問題への社会的関心の高まりを絶好の契機とし、人類の持続可能な発展への展望を拓かねばならない。

参考文献

山地憲治監修：「新・地球温暖化対策教科書」、オーム社（2009年）

地球温暖化の対応策について

•Profile•



秋元 圭吾 あきもと・けいご ● (財)地球環境産業技術研究機構 (RITE) システム研究グループリーダー

1970年6月生まれ。1999年横浜国立大学大学院工学研究科電子情報工学専攻（工学博士）。2009年東京大学公共政策大学院非常勤講師。専門はエネルギー・地球環境を中心としたシステム、政策の分析・評価。麻生政権の中期目標検討ワーキングチームおよび鳩山政権の地球温暖化問題に関する閣僚委員会・副大臣級検討チーム・タスクフォースのメンバー。1997年国際応用システム分析研究所（IIASA）Peccei賞受賞。著書に「低炭素エコノミー―温暖化対策目標と国民負担」（日本経済新聞出版社、共著）などがある。地球温暖化問題に関する講演も毎年多く行っている。

1. はじめに

地球温暖化問題は長期でグローバルな問題であり、また、近代文明の基礎となっているエネルギー利用に伴っているため、その解決は容易ではない。更には、多くの意思決定者がいる中で、持続的に排出削減を続け、かつ長期的には大幅な排出削減を行っていく必要がある中で、その解決は想像以上に難しい課題である。これを何とか解決していくためには、さまざまな技術、対策、方策を総動員しなければならないだろう。温暖化対策技術の面で言えば、省エネルギーのみならず、エネルギーの脱炭素化を進めていくことが求められる。そして、できる限り安価な費用で排出削減を実現できるように、さまざまな温暖化対策技術の技術開発および広範な技術普及を進める必要がある。本稿では地球温暖化の対応策について方向性を論じることとしたい。

2. 地球温暖化緩和のために求められる技術進展

昨今、先進国首脳会議（G8）などにおいて排出削減目標もしくはビジョンとして2050年までに世界の排出量を半減するという目標が議論に上がっている。現在、温室効果ガス排出は、先進国と途上国はほぼ半々であるため、仮に先進国が排出をゼロにしても、途上国は2050年に現状レベルに排出を抑制しなければならないことを意味する。そして、技術進展の視点からこの目標を見てみると、1970年頃からは、世界はCO₂排出原単位（GDPあたりのCO₂排出量）を年率1.2%程度で改善してきた。それは、通常期待されるGDPから数%以内のGDPロスに留めてこれを実現するにはCO₂排出原単位の改善率（産業構造の変化を含んだ技術の進歩率）を過去の実績の4倍近くに引き上げる必要があることを意味する。逆に、過去の排出原単位改善率と同程度であれば2050年までの世界のGDP成長率はほぼゼロにしなければならない、これでは世界が協力して持続的に排出削減に取り組むことは不可能である。仮に2050年に現状の排出レベルにするとすると、排出原単位の改善率は過去の2.5倍程度に高める必要があり、いずれにしても温暖化対策の劇的な技術進展が不可欠である。

なお、過去のCO₂原単位の改善率である年率1.2%の内訳は、エネルギー効率の改善が年率0.9%、エネルギーあたりのCO₂排出量の改善が年率0.3%である。大幅な排出削減のためには、省エネルギーの一層の推進のみならず、エネルギーの脱炭素化（エネルギーあたりのCO₂排出量の大幅な改善）、すなわち、化石燃料から原子力、再生可能エネルギーへの燃料転換、そして、二酸化炭素回収貯留（CCS：Carbon Dioxide Capture and Storage）などが不可欠と見られる。

温暖化緩和を強力に進めるには、温暖化緩和効果が大きい対策技術を国内外に広く普及させることが重要である。日本の場合、世界で最も優れたエネルギー効率を達成しているので、それらの技術を世界的に広く移転し、普及させる役割が重要である。そして、今後も環境先進国として世界の先頭を走るためには、長期的な展望に立つて、省エネルギーおよびエネルギーの脱炭素化に関する革新的技術の技術開発を進めることが必要である。

3. CO₂排出削減技術の技術展望

CO₂の削減技術としては、大きく分ければ、①CO₂排出そのものを抑制する技術・方策、②CO₂が大気へ放出される直前に回収する技術、③大気中に出てしまった、もしくは存在するCO₂を吸収させる技術に分けられる。①は、さまざまな省エネルギー、化石燃料間の燃料転換、原子力の利用促進、再生可能エネルギーの促進などであり、②は二酸化炭素回収貯留技術（CCS）、③は植林などによってCO₂吸収を拡大する方策などである。しかし、ほぼすべての技術には長所と短所があり、温暖化対策として切り札となる技術はなく、これらさまざまな種類の技術・方策について費用効果性を考えて適切に組み合わせることが重要である。

図1は、世界をエネルギー資源の賦存量や各国の経済成長の違いなどを考慮するために世界を詳細な地域に分割し、また温暖化対策技術を詳細にモデル化したエネルギー・CO₂排出削減評価モデルを用いて、2050年に世界のCO₂排出量を現状から半減するための費用効果的な排出削減を試算した一例である。各国においては、エネ

ギー資源の賦存量などの違いから、それぞれ適した削減対策が異なっている場合もあるが、少なくとも世界全体で見ると、この分析でもわかるように、さまざまな部門でさまざまな技術を適切に組み合わせることが費用効果的であることが示されている。

省エネルギーについては、とりわけ世界的に見ると、エネルギー効率の高い設備・機器が十分に普及していない実態がある。例えば、エネルギー多消費産業の鉄鋼部門を見てみると、粗鋼生産の代表的なプロセスである転炉鋼生産におけるエネルギー効率は図2のように各国間で大きな差異がある。日本や韓国のエネルギー効率は高いが、ロシアは4割ほど効率が悪い状態にある。米国も

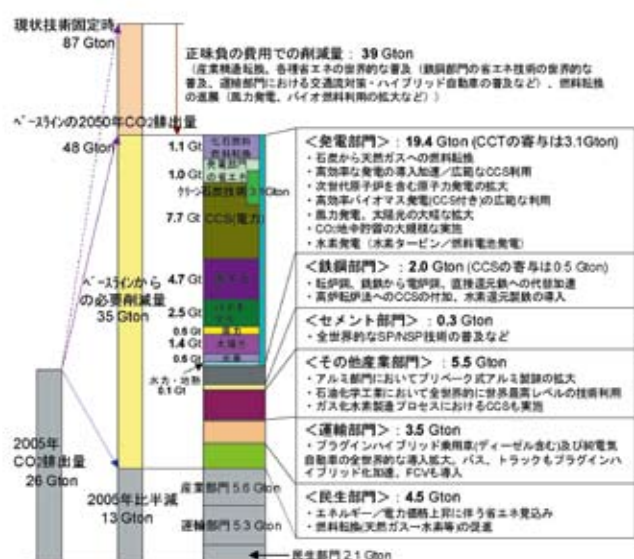
3割ほど劣っていると見られる。中国は生産量の急激な拡大に伴い新規の技術導入が進み、2000～2005年にかけて比較的大きな改善が見られる。日本では、コークス乾式消火（CDQ）、高炉炉頂圧発電（TRT）といった技術を導入し、エネルギーの回収・有効利用を徹底的に行い、高いエネルギー効率を達成している。このような高いエネルギー効率を有する粗鋼生産技術を世界に広く普及することによって、大きな排出削減を期待することが可能である。

また、原子力発電の利用拡大は比較的安価に排出削減を行うことが可能であり、重要な対策と見られる。例えば、国際エネルギー機関（IEA）の「エネルギー技術展望」²⁾によると、2050年に世界の排出量を半減するとしたBLUE Mapシナリオでは、世界の原子力発電電力量は2005年の実績では2770 TWh/yrであるが、2050年には3倍以上になる9860 TWh/yrに増大させるシナリオとして描かれている。しかしながら、安全性・社会的受容性、核廃棄物処理、核不拡散の問題などがあり、原子力発電による排出削減効果は大きいとはいえ、原子力発電のみで温暖化問題を解決することが難しいことも認識する必要がある。

再生可能エネルギーの拡大も大変重要である。持続可能なエネルギーという点でも、やはり再生可能エネルギーに注力を傾けていくべきだろう。同じく、IEAの「エネルギー技術展望」のBLUE Mapシナリオでは、風力発電は2050年には世界全体で5170 TWh/yr、太陽光発電は4750 TWh/yrを見込んでいる。これは、2050年に見込んでいる総発電電力量42340 TWh/yrのそれぞれ1割を超える量であり、大幅な拡大が求められることになる。しかし、その実現のためには、発電コスト、出力の間欠性などの課題を解決していく必要がある。

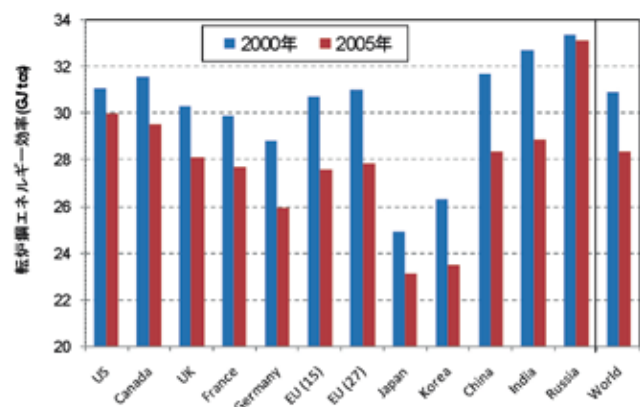
図1でも見られるように、それ以外にも大きな削減効果が期待できる温暖化対策技術としてCCSが挙げられる。これは、発電所や製鉄所などの大規模なCO₂発生源においてCO₂を分離・回収し、地中深くに貯留する技術である。2008年の北海道洞爺湖サミットでは、2010年までに世界的に20の大規模なCCS実証プロジェクトを開始することが合意され、2009年イタリア・ラクイラサミットにおいても、改めてこの合意の確認がなされており、世界各国はこの技術の重要性を強く認識している。IEAのBLUE MapシナリオでもRITEの分析と同様に、CCSによる大きな排出削減が見込まれている。課題としては、実証試験を通して課題を克服しつつ技術の確立を目指すことが何よりも重要と見られるが、現在、1トンCO₂を分離・回収するのに4000～5000円程度要すると見られるCO₂分離・回収コストを低減することや、地中のCO₂挙動の観測・予測手法の更なる進展などをあわせて図っていくことが必要であろう。

先述のように、製鉄プロセスにおいては、日本では利



◎図1 2050年世界のCO₂排出量半減のための技術方策例（RITEによる試算例、ただし、植林などによるCO₂吸収拡大についてはこの分析では評価していない。）

注) CCT: クリーンコールテクノロジー、SP/NSP: サスペンションプレヒーター/ニューサスペンションプレヒーター付キルン、FCV: 燃料電池自動車



◎図2 2000年および2005年における粗鋼生産（転炉鋼）におけるエネルギー効率の国際比較（RITEによる推定¹⁾）

用できるエネルギーをほとんど利用しつくしている。しかし、鉄を作るには、酸化鉄の還元で石炭由来のコークスを利用するため、大きなCO₂排出が不可避となっている。このコークスの一部を水素に置き換えることによってCO₂の大幅な削減を目指す取り組みも始まっている。このプロセスでもCCSを合わせて利用することが想定されている。ただし、水素還元製鉄の技術的な難易度は高いと見られ、少し長い時間軸の中でこの技術の進展に期待したい。

また、品種改良によって半乾燥地などにも適した植物を開発しCO₂吸収固定量を増す方法や、バイオ燃料生産に適した植物の開発、多様なバイオマスからの効率的なバイオ燃料生産技術の開発なども温暖化対策として重要である。

4. CO₂削減技術のシステム化とコベネフィットの追求に向けて

前節ではそれぞれのCO₂排出削減技術の役割について見てきたが、個別の技術のみならず、さまざまな技術をシステムとして働かせ、価値を高めることも重要である。例えば、CCSにしても先進的な原子力発電にしても、これらによって大幅に低炭素化された電力は、電力を利用する技術の温暖化対策効果を高め、例えばプラグインハイブリッドや電気自動車、ヒートポンプなどの価値が更に高まる。また、太陽光や風力発電のように間欠性の高い電源の価値を高めるには、安価で大容量の革新的な電力貯蔵技術の開発が重要になる。

また、温暖化対策としてだけではなく、別の付加価値をつけることを念頭にいた技術開発も求められる。仮に温暖化影響の低減という役割を抜きに考えれば、エネルギーの低炭素化というだけでは同じエネルギー量が高いコストで利用することでしかなく、基本的には社会効用は低減してしまう。温暖化対策にもなり、同時に広い消費者の効用を大きく高めることができるシステム技術を創造し、その技術開発にも注力すべきである。ITと結びついた交通流対策は渋滞の緩和や交通事故の低減などと同時にCO₂排出削減にもつながるし、また、快適で住み

やすい都市の再開発を、省エネルギー都市の構築、植林による緑化などと同時に進めることなどは、こういったコベネフィット追求によるCO₂削減対策の例として挙げられる。米国のグリーンニューディールも温暖化対策の面以上にエネルギーセキュリティを高めるという点に重きがおかれていていると見ることもでき、これもコベネフィットの追求とみなせる。こうすることによって、実質的により小さな削減費用で温暖化対策が実現可能になる。

また、制度面の整備を含めて革新的技術の開発・普及を促す様々な社会基盤整備もあわせて考えることも忘れてはならないだろう。

5. おわりに

地球温暖化緩和のために求められている排出削減は、温暖化対策技術の劇的な進展、社会の大変革を必要としている。そして、CO₂排出削減のためには、さまざまな種類の技術・方策を費用効果性を考えて適切に組み合わせることが重要であり、既存の費用対効果の高い省エネルギー技術の広範なる普及とともにエネルギーの脱炭素化を図っていくこと必要である。また、個別技術の技術革新、技術進展が必要であるとともに、それらをシステム的に利用する対策も追求していくことも重要である。

革新的温暖化対策技術は、長期の技術開発投資が必要でリスクも大きく、また開発に成功したとしても適正なリターンが企業にもたらされないリスクもある。そのため、技術開発に対する財政的な支援や長期的な技術開発を促す安定的な制度の立案など、政府の役割は重要であることは指摘しておかなければならない。

人類は過去に驚くべき知恵を出し、技術進歩を成し遂げてきた。楽観的になることは危険であるが悲観的になってもいけない。温暖化問題も人類は必ず克服できるはずである。しかし、そのためには全体を俯瞰した上でのバランスの良い技術ポートフォリオと政策ポートフォリオが必要である。地球温暖化問題という人類につきつけられた大変困難な問題に対し、適切な温暖化対策技術の技術展開と革新的な技術の技術開発戦略をもって、これにあたっていくことが求められる。

参考文献

- 1) RITEシステム研究グループ、「2005年時点のエネルギー効率の推計（鉄鋼部門）」(2009) <http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/systemken.html>
- 2) IEA, Energy Technology Perspectives 2008, OECD/IEA (2008)

何故ソフトエネルギーへの移行と省エネか

●Profile●



藤井 石根 ふじい・いわね ●明治大学名誉教授

1936年1月生まれ。1966年東京工業大学理工学研究科原子核工学専攻 工学博士。専門は熱工学で、熱応力・伝熱・蓄電関係の研究に従事。現在はNPO法人太陽光発電所ネットワーク代表理事、逗子市環境審議会会長、財団法人日本科学振興財団評議員などを務める。主たる著書に「太陽熱の動力化概論」(IPC)、「新太陽エネルギーハンドブック」(編著:日本太陽エネルギー学会)、「21世紀のエコロジー社会」(編著:セツ森書館)、「2050年自然エネルギー 100%」(監著:時潮社)、「原発で地球は救えない」(原水禁)など多数。

1. はじめに

世界の気候に対する熱帯雨林の影響の大きさや果たしている役割の貴重さが取り沙汰されている中で、とりわけブラジルのアマゾン川流域の広大な熱帯雨林の乱開発は少なからず世界の不安と懸念を集めている。そもそも国家の概念に従えば、例えばこの問題にしてもどう対処しようが主権を持つブラジルの意思次第で、外からは要請程度のことはできてもそれ以上のことはできないのが実情である。しかし健全な自然環境は地球上に住む生物全体の共有財産という観点に立てば、最早、主権云々で対処すべき問題ではないのではないかと。少なくとも共有という感覚を大切にすることは必要である。実際、今や地球の環境すら大きく変えてしまう程の技術を手にし、活動も巨大化させている人類が今後も生き延びていくためには勝手気ままな振舞いがある程度は制限し、判断基準や観点も改められなければこの先の生存の可能性は縮小していくばかりであろう。

先程、デンマークで開催されたCOP15でも依然として二酸化炭素(以下CO2と略記)の排出削減は経済活動に悪影響を及ぼすとの強い意志が働き、尚も各国は随所でCO2排出削減を譲り合っている。しかも他方では環境の悪化で各国はこれまで以上に種々の自然災害に見舞われ、大きな経済的な損失を被っている。一体、この辺の経済的な関連性をどう考えるのか。無関係者への災害の波及という人道上の問題も含め大きな課題が残っている。しかし、この度は京都議定書に関し消極的な態度を取り続けていた世界で二番目のCO2排出国、アメリカも具体的な削減目標値を示して当該削減のテーブルに付いたことは一歩前進と言える。加えてこれまで先進国の責任論を終始、強く主張し削減量の話に乗らなかったCO2の最大の排出国、中国もエネルギー利用効率の改善を数値化(2020年までに2005年比で40～45%削減)して見せた。インドも同様の動きを見せた事は地球レベルの問題には各国が協調して解決しようとする機運が芽生えつつあることの一つの証で歓迎すべき事と言える。何れにしろ、地球という同じ船に乗り合わせている者同士、己の利のみを強く主張し、他を顧みないことで結果的に船を沈めてしまっ

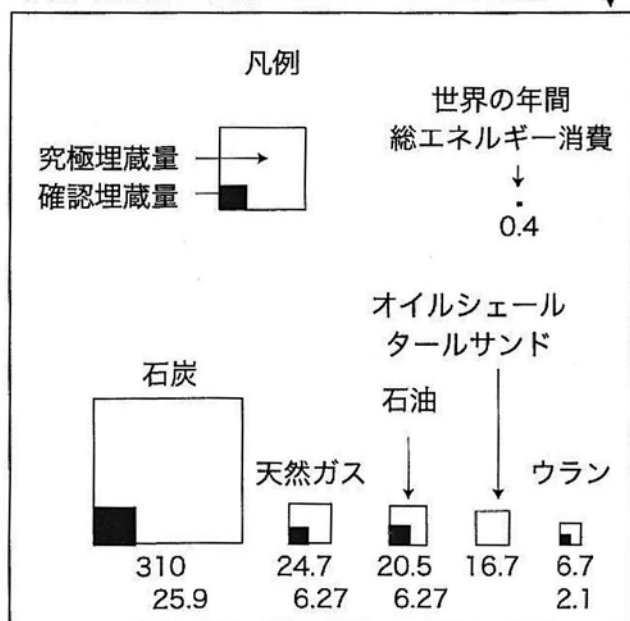
ては経済どころか元も子も無いというものであろう。

2. 所詮は一時凌ぎのハードエネルギー依存戦略

既に述べたように世界の各地で異常気象による災害が頻発し、その具体的な対策が強く求められるようになってきている。その一つが化石燃料使用量の削減要求である。各国政府はできるだけ実質的なエネルギー使用量を減らさずにCO2の排出量は抑えたいとして腐心している。その具体的な対応策がカロリーベースでCO2の発生量の少ない天然ガスを石炭や石油の代替として使う方法や発電時にCO2を排出しないことを理由にした原子力発電への依存等である。確かにこれらの対応策は当座の策としてはそれなりの意味を有するであろう。しかし持続性の点では甚だ心許無い存在である。具体的には先ず資源量の問題で、その実態を図1が明らかにしている。この図の外枠で囲まれた部分の広さは一年間に地球に届く太陽エネルギー量、具体値としては5,400兆GJなるエネルギー量を意味している。それに対して石炭や石油などの究極もしくは確認埋蔵量はこの中に同じく正方形の大きさで画かれている。この図から一体、何が見えてくるだろうか。改めて言うまでもなく、たとえ天然ガスやウランにエネルギー供給の活路を求めても数拾年という一時凌ぎの策でしかないということである。「それならば量の多い石炭に」ということにすれば元に戻ってしまうことになり、ここにはCO2排出削減という重い課題が背負わされている。技術的には石炭を液化もしくはガス化して炭素分を減らして使う方法が無い訳ではないが、そこで要するエネルギー消費で本来の目的に使えるエネルギー量はその分、減ってしまうことになる。しかも、化石燃料を使うことで排出されるCO2を液化して地中など地球の然るべき処に埋蔵しておくという論もあるが、これで完全に事が済まされるという保証は何所にも無い。しかもこうした過程でも多くのエネルギーが費やされることになる。

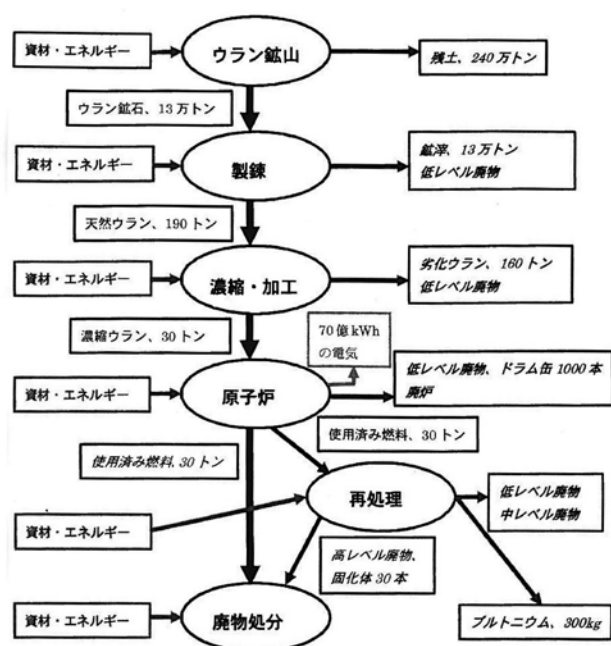
原子力についても同様である。世界の多くで再度、原子力発電(以下、原発と略記)に関心を示し始めているが、先ずその燃料になるウランの資源量は既に図1で見えてきた通りである。その上、原発を動かせばその川上、川下

図の外枠として使っている四角は、1年間に地球に到着する太陽エネルギー量(5400) →



◎図1 再生不能エネルギー資源の埋蔵量^[1]

で莫大な手間と諸々の資源が必要、それに多くのエネルギーも費やす必要があることを知らねばならない。しかもこうしたエネルギー消費によるCO₂の排出に加えて放射能という厄介な代物にも対峙しなければならない。この辺の状況を100万kWの原発を例に分り易く示している図が図2である。これ程までの資材とエネルギーを使い、他方で放射性廃棄物という負の遺産を大量に産み出して、この場合に手にできる電力はたったの70億



◎図2 100万kWの原子力発電所を動かすために必要な作業の流れ^[2]

kW時、これでエネルギー経済的に見て辻褄が合うのか否か、よく検討してみる必要があろう。おまけに廃炉の処理や高レベル放射性廃棄物などの処分・保管の問題も未解決の儘になっている。

このような現実をつぶさに観れば化石燃料やウランなどハードエネルギー資源への依存は一時凌ぎであるばかりか安全面や環境への影響の程を考えれば到底ありえない話である。言い換えれば持続性は不可能であり、環境が大きく犠牲になることを容認しなければ成り立たない話でもある。

3. 希薄な未来世代への配慮

先だつての地球上で1秒間のうちに消えていく天然林地の広さは5,100平方メートル(テニスコート20面分)、放出されるCO₂の量は39万立方メートル(体育館32棟分)大気から失われてゆく酸素量は710トン(140万人の人達が日に必要とする酸素量)、そして砂漠化している農地や牧草地の面積は1,900平方メートルと言われていた[3]。数年前の話である。現在もこの状況は一向に改まっていないし、むしろ悪化の度合いを強めていよう。こうした不合理な事が世界でまかり通る最大の原因は「環境はタダ」という認識が尚もまかり通っているからである。しかし一旦、破壊されてしまった環境を復元・修復するには如何に大きな手間と費用を要するか、また如何に難しいかをこれまで経験した諸々の公害が教えている。例えば日本では水俣湾の有機水銀汚染による公害が典型的なそれである。しかし、いま国際的な場で議論されているCO₂排出による地球温暖化や嘗てのチェルノブイリ原発事故の様な広範な放射能汚染という事態ともなれば最早、当事国の国内問題として処理できる代物ではない。地球レベルで未来の世代の生きる可能性すら縮小させるものである。加えて原発は常時、環境を放射能で汚染し続けると同時に「死の灰」と比喻される負の遺産を末長く後世に残す。しかも高レベル放射性廃棄物に至っては百万年もの間、その管理・保存に当たらなければならないとアメリカの環境保護庁は警告している[4]。こうした厄介物の保管の任を原発の恩恵を全く受ける事のない人達にひたすら果たすことを強いることの理不尽さを考えてみたことがあるだろうか。このようにハードエネルギーに頼る行為はかかる理不尽な側面も兼ね備えていることを知らねばならない。

4. 持続性を保障するソフトエネルギー

図1が示すエネルギー資源量の状況から見て、早晚、人類は太陽エネルギーなどソフトエネルギーに今後の活路を見出さざるを得ない事態に追い込まれる事は明白である。それならばできるだけ早くその方向に政策の舵を切り、着々とその準備を進めていく方が賢明と言える。無論、たとえ太陽エネルギーそのものの量は世界の年間

総エネルギー消費量に比べて頗る大きいとは言え、全て利用できる訳でもないし、他の多くの生物を差し置いて独り占めにする事も許されない。当然、省エネルギーの習慣は今後も持ち続けていかなければならない。また、ソフトエネルギーを効果的にかつ上手く使いこなす技術開発にも引き続き力を注いで行かなければならない。もしこの努力が実ればエネルギー供給の持続性は保障されるし、環境への負荷も大きく軽減させることができる。よく自然が用意してくれるエネルギーは気紛れで量の制約もあって頼りにならないとの論もあるが、それに対する適切な対応策を考えるべく知恵を絞ることも人間の人間たる所と言えよう。自然からの贈り物には常に限度があることも心得ておかないと取り返しのつかない事態を招く。必要だからと限度以上の収奪を行えば何れは持続性が失われることになる。その典型的な実例が薪や炭を採ることによる自然林の縮小・消失である。バイオマスエネルギーもソフトエネルギーの代表的な資源の一つであるが、自然林の消失はソフトエネルギー資源の一角を損なうことに加えて、間接的には水力の利用や気候の面にも大きな影響を及ぼすことになる。しかもその損失の程には計り知れないものがある。本稿の冒頭で触れた熱帯雨林の乱開発による縮小もこの面では同じ意味合いを持っている。

こうして見るとソフトエネルギーの代表格と目される自然エネルギーの殆どは健全な自然環境が保証されない限り、その安定的な利用は覚束ないことになる。唯一、地熱は余り環境の変化に直接、影響を受けそうにないが、地下水との関係もあってその程は必ずしも定かでない。しかしそうは言うもののソフトエネルギーは我々にとって結局は救世主のような存在と言っても過言ではない。

5. おわりに

いま、世界は社会システムの変革を逼られている。こ

れまで化石燃料を主体として築き上げられた社会システムをソフトエネルギー主体の環境負荷の少ないシステムへ変える変革である。その動機付けには既に述べた化石燃料枯渇への懸念と世界共有の財産に当たる「健全な環境」という掛け替えのない建物が壊れかかっている事の不安がある。従って、もしこれらの不安が解消されれば必然的に社会の持続性も担保されることになる。しかし、これからの大きな課題は如何にしてこの改革を円滑かつ小さな抵抗で成し遂げるかであり、ここに人類の英知と力量が問われている。

世界には種々の国が存在している。財力や技術力を培っている先進国と目される国がある一方で、その対極にある後進国と呼ばれている国々もある。また、その中間に位置する中進国とか開発途上国と言われる国々もあるが、後進国以外、これらの国々も結局は大なり小なり先進国と同じような変革を余儀なくされることになる。違いは変革の程度の差だけである。その場合、どの状況の国がよりスムーズに移行できる立場にあるだろうか。やはり先進国だろうか。見方を変えれば中進国や開発途上国の方が有利と言うこともできる。その理由に先進国は進んでいた分、旧来の社会システムを多く抱え込んでい。従って、その分、舵を大きく切らざるを得ず慣性力も大きいという訳である。おまけに社会のインフラもより多く変更もしくは再生せざるを得ず、詰る所はより多くの手間と大きな負担が強いられるからである。その点では中進国や開発途上国はその負担の程は相対的に少なく、舵の方向変えも小さく済ませることができる。後進国に至っては変更の要は殆ど無く新たな船出と言うところかもしれない。

何れにしてもこの変革は産業革命にも匹敵する大きな変革である。しかも人類の命運も掛っている。その点でもお互いに足らざるを補い合いつつ、協力して事を運ぶことも肝要である。

参考文献

- [1] 小出裕章、「古くて新しい原発の話」（京都コンソーシアム、集中講義資料、2008年8月）頁10
- [2] 同上、頁7
- [3] 藤井石根監著、フォーラム平和編、「2050年自然エネルギー 100%」（時潮社、2005年）
- [4] 末田一秀、「あなたの町に核のごみがやってくる!？」（原水爆禁止国民会議、2007年）

「一石多鳥」を目指す中国版グリーンニューディール政策—中国の低炭素経済政策

•Profile•



周 璋生 Zhou Weisheng ●立命館大学政策科学部教授 立命館サステナビリティ学研究センター長 立命館孔子学院院長

学歴：1982.07浙江大学工学部熱物理工学科 工学学士学位取得。1986.07大連理工大学大学院動力工学科 工学修士学位取得。1995.05京都大学大学院物理工学科専攻 工学博士学位取得。職歴：1995.09～1998.03新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）産業技術研究員として（財）地球環境産業技術研究機構（RITE）に勤務。1998.04～1999.03 RITE地球環境システム研究室 主任研究員。1999.04～2000.03立命館大学法学部 助教授。2000.03～2002.03立命館大学政策科学部 助教授。2002.04～現在に至る 立命館大学政策科学部教授。2003.04～2004.3（財）地球環境産業技術研究機構（RITE）研究顧問。2003.12～2008.03日本テピア総合研究所 所長（兼任）。2004.04～2009.03 立命館国際機構副機構長（中国担当）。2005.10～現在に至る 立命館孔子学院院长、副理事長。2007.01～現在に至る 立命館サステナビリティ学研究センター長。2007.06～2008.3大阪大学特任教授

1. 緒言

一昨年の世界金融危機以降、英国、米国、日本、中国や韓国など多くの国々が、大規模な「環境・エネルギー政策」への拠出によって、気候変動、石油資源枯渇などの危機も同時に克服して世界経済危機から脱出しようとする政策、いわゆる「グリーンニューディール」（A Green New Deal）を打ち出した。この流れは環境分野への投資が経済成長を抑制しかねないという従来型のイメージとは逆に、エネルギー・環境分野に投資することで雇用を創出できる、という成長分野として再定義するものであり、新しい経済社会構築への期待が大きい。しかし、各国の成果は未だあいまいな面も多く、十分に評価できる段階ではない。ここでは、「一石多鳥」を目指す中国版グリーンニューディール政策のひとつである低炭素経済政策について、その内容、現状と課題を探りたい。

2. 中国問題の特徴：貧困、公害と地球温暖化のジレンマ

日本を含めた先進国は経済発展、公害問題、地球温暖化など地球環境問題を順に経験してきたが、中国はこの三つの課題に同時に直面している。一般に環境問題で緊急性の高いのは、大気汚染、水質汚濁、廃棄物など、都市化に伴う国内的な課題であることが多く、地球温暖化問題対策の優先順位はどうしても低くなる。だが、中国が直面している国内環境問題と地球環境問題は相反する課題ではない。例えば酸性雨問題と地球温暖化は、ともに化石燃料の消費により発生する物質に起因するため、両者の同時解決に寄与する対策の実施が可能である。

また、温室効果ガスは長期的な影響力をもつため、途上国側も有効かつ適宜な対策を講じなければ手遅れになることから、中国が直面しているこの三つの課題に同時に対応することが求められている。すなわち中国には、今回の世界的な金融危機が起きていなかったとしても、環境保全と経済発展を両立できるような政策、いわゆる

「グリーンニューディール」政策のひとつである低炭素経済政策の構築と実施が強く求められている。

3. 中国における低炭素経済社会の構築

1) 低炭素経済の位置づけ

昨今、「低炭素経済」（low-carbon economy）という用語が中国で頻繁に聞かれるようになった。表1は、中国における「低炭素経済」関係の最新の動きを示す。07年6月に中国初の温暖化防止計画である「気候変動に対する国家プラン」を公表し、同9月には「再生可能エネルギー中長期発展計画」を策定し、08年10月に中国政府が初の気候変動問題の白書となる「中国の気候変動に対する政策と行動」を公表して国内外に中国の取組みをアピールした。中国における気候変動問題への対策と低炭素経済の発展は、省エネルギー化と再生可能エネルギーの普及が中心となっており、今回の白書は、それらの近年の取組みの成果を強調する内容となっている。

昨年9月22日の国連気候変動サミットでの演説で、中国の胡錦濤国家主席は、2020年までに全エネルギー消費に占める非化石エネルギーの割合を15%に高め、GDP当たりCO2排出量を05年の水準より著しく減らす方針を明言した。さらにCOP15の直前である11月26日には、具体的な数値目標は避けられたが、中国政府は05年比40～45%削減する、との自主目標を公表した。COP15の場で温家宝首相は、この自主目標は、付加条件（前提条件）のない、かつ他の国の削減目標や行動の如何とは関係のない、国内に法的拘束力があるものであると公言している。著者は、「共通だが差異ある責任」原則に基づいて、気候変動枠組みにおける世界を3つの地域とそれに対応する3つの責任段階に分けるべきであると提案している（W. ZHOU, How Developing Countries Can Engage in GHG Reduction: A Case Study for China, Sustainability Science, Vol.1, No.1, 2006.6）。第1段階は自発的段階（数

時 期	概 要
2006 年 1 月	「再生可能エネルギー法」を発効し、関連する規定や技術基準を打ち出した。
3 月	「第 11 次 5 年計画」を公表し、2010 年の GDP 当たりエネルギー消費量を 05 年比で 20%前後引下げる、など環境制限目標を設定。
12 月	中国初の「気候変動評価報告」を発表。
2007 年 4 月	温家宝首相を本部長とした「国务院省エネ・排出削減本部」を設立
6 月	中国初の「気候変動対策国家計画」を制定。 「省エネルギー・汚染物質排出削減に関する総合プラン」を公表。 国家科学技術部は「気候変動対策の技術に関する行動計画」を公表。
7 月	胡錦濤主席は「APEC 第 15 回非公式首脳会議」で、「低炭素経済」を発展することを初めて明言。
8 月	「再生可能エネルギー中長期発展計画」を公表。
10 月	「原子力発電中長期計画」を公表し、2020 年の計画目標は 4%と設定。
2008 年 1 月	清華大学は「低炭素経済研究院」を設立。
3 月	国会にあたる「全人大」で、「低炭素経済」建設を初めて提案。 「再生可能エネルギー開発第 11 次 5 年計画」を公布し、2010 年までの再生可能エネルギーの具体目標を提示。
8 月	中国初の「気候変動白書」：「中国の気候変動政策と行動」を発表。 北京市と上海市で、排出取引市場を設立。
9 月	天津市で、排出取引市場を設立。
10 月	「気候変動対応政策と行動」白書を発表。
11 月	約 56 兆円の景気回復対策を公表し、2010 年末まで環境・省エネルギー分野に約 3 兆 3600 億円を投資。
2009 年 1 月	「循環経済促進法」を公布。
6 月	「2009 年中国持続可能な発展戦略報告」を発表し、20 年をメドに、GDP あたりエネルギー消費量を 05 年比 40%～60%まで削減し、GDP あたりの CO ₂ 排出量は 50%前後削減する目標を公示。
7 月	31 省（自治区、直轄市）省レベルの気候変動対応案の編制が完成し、多くの省は既に実施段階に入っている。
9 月	「国連気候変動サミット」で、胡錦濤主席は、2020 年までに全エネルギー消費に占める非化石エネルギー（水力を除く）の割合を 15%に高め、GDP 当たり CO ₂ 排出量を 2020 年までに 05 年の水準より著しく減らす方針を明示。
10 月	国連は天津に低炭素経済センター設立を表明。 2009 年「気候変動白書」を公表。 環境保護部は低炭素製品の認定制度導入検討を開始。 清華大学、ケンブリッジ大学と MIT の 3 者による「低炭素エネルギー大学コンソーシアム」を設立（北京で）。
11 月	中国政府は、2020 年までに GDP 当たり CO ₂ 排出量を 05 年比で 40～45%減らす新たな行動目標を発表。 中国政府主催第 1 回「世界低炭素大会」並びに「低炭素博覧会」を開催、「低炭素南昌宣言」を発表。
12 月	COP15 に温家宝総理が出席し、2020 年までに GDP 当たり CO ₂ 排出量を 05 年比で 40～45%減らす自主目標を新たに表明。

●表 1 中国における「低炭素経済」関係の主な動き

値目標は持たないものの、自発的に削減方策を講じる。～2012年）、第2段階は自主的段階（法的拘束力のない数値目標を自主的に設定する。2013～2020年）、第3段階は強制的段階（法的拘束力のある数値目標を負う。2020年～）とする。COP15の成果に対する評価は分かれているが、中国の自主目標の公表はその成果の一つといえよう。

2) 低炭素経済の特徴と戦略

中国は低炭素経済の発展をチャンスと挑戦が共存しているとみている。中国の構築する低炭素経済の特徴としてつぎの4つが挙げられる。①エネルギー消費量とCO₂排出量を引き下げ、CO₂排出増加率の低減を達成し、CO₂の排出削減と経済成長が両立する低炭素経済を発展させる。②内外の資源エネルギー条件を生かし、低炭素経済の実現を加速する。③主要産業、特に、クリーン石炭発電とコジェネレーション技術など、「節能減排」（省エネ・排出削減）技術と低炭素技術を向上させ、製品の

国際競争力を高める。④国際的な気候レジームの交渉と低炭素ルール策定の参画し、気候変化の緩和と適応に努める（中国科学院持続発展戦略研究組、2009年中国持続発展戦略報告、科学出版社、2009）。

また、中国の低炭素経済の実現のための戦略として4点が挙げられる。①気候変動に対応する法律・法規を制定し、マクロ管理体制を整備する。②低炭素発展の長期的かつ効果的な体制を築き、低炭素経済発展の秩序化を進める関連政策を打ち出す。③国内外の協力を強化し、低炭素技術システムを整備する。④利益関係者の協力体制を築き、全社会の各方面における積極性を十分に発揮し、宣伝、教育、研修などを通じて、気候変動に対応する意識と能力を向上させ、低炭素社会構築の共通認識を確立する（中国科学院持続発展戦略研究組、2009年中国持続発展戦略報告、科学出版社、2009）。

3) これまでの低炭素経済社会構築に対する行動と効果

① 経済構造の調整、技術進歩の加速、エネルギー利用効率の向上

中国は1991年から2005年まで、年平均5.6%のエネルギー消費成長率によって、年平均10.2%という国民経済成長率を支えてきた。1990年に2.68トン標準石炭だった1万元あたりのGDPエネルギー消耗は、2005年には1.43トン標準石炭まで減少し、減少率は年平均4.1%であった。

② 低炭素エネルギーと再生可能エネルギーの発展、エネルギー構造の改善

中国の第一次エネルギー（石炭・石油・天然ガスなどの化石燃料および水力、原子力、地熱・薪炭など主に未加工の状態で供給されるエネルギー）消費において、石炭の占める割合は1990年の76.2%から2005年には68.9%まで低下した。中国の再生可能エネルギー利用量は2005年に1億6600万トン標準石炭に達し、エネルギー消費量全体の約7.5%を占め、これは3億8千万トンの二酸化炭素（CO₂）削減に相当する。

③ 植樹造林の推進、生態建設・保護の強化

第6回全国森林資源精査によると、中国の人工林保存面積は5400万ヘクタール、蓄積量は15億500万立方メートルにそれぞれ達し、人工林面積は世界トップに立った。1990年初めに13.92%だった森林被覆比率は、2005年には18.21%に増加した。専門家の推計によると、1980年から2005年までの中国の造林活動によるCO₂吸収量は累計約30億6千万トンである。

④ 計画出産の実施、効果的な人口増加抑制

中国はすでに世界の低出生率国の仲間に入っている。計画生育政策によって、2005年までに約3億人の人口縮減を達成した。これは、国際エネルギー機関(IEA)統計による世界1人当たり排出量に基づく計算で、2005年の1年間だけで約13億トンのCO₂排出量削減に相当する。

⑤ 気候変動対策関連法律、法規、政策の制定の強化

中国政府は、ここ数年に生じた新しい問題に対して、

「科学発展観」（科学的発展観）と「和諧社会」（調和のとれた社会）の構築という重大戦略構想の確立を打ち出し、資源節約型・環境友好型社会の建設を加速させ、一連の気候変動対策関連政策措置の制定に一層力を入れてきた。（参考：気候変動白書、中国社会科学院、2009年）

4) 低炭素経済の実証事業

低炭素経済の実証事業として、多くの都市を低炭素経済モデルとして、低炭素経済の発展を図ろうとしている。2008年1月、WWF（世界自然保護基金）は北京で正式に“中国低炭素都市発展プロジェクト”をスタートさせ、上海市と保定市（河北省）が、その最初の試験都市に選ばれた。WWFは現時点で、低炭素都市発展への取り組みとして、中国の5都市をモデルプロジェクト都市に選定している。この5都市とは、上海（生態建築物モデル都市）、広州（持続可能な交通モデル都市）、攀枝花（バイオディーゼルオイル発展都市）、伊春（生態保護・低エネルギー消耗発展都市）、保定（新エネルギー製造業都市）である。それ以外に、珠海、杭州、貴陽、吉林、南昌、広元、カン州、無錫などの都市は“低炭素都市”構想をみずから出している。上海は崇明島などで炭素のゼロ排出を志向する「低炭素経済実践区」の建設を進めており、低炭素経済の発展推進をはかっている。天津経済技術開発区は循環型経済モデル地域・国家生態工業モデル地域として、循環型、低炭素経済の構築に取り組んでいる。「低炭素」環境経済目標は中国の第12次5ヵ年計画の重点の一つとなりそうである。

さらに、中国は炭素排出の強制的な審査制度を試行し、温室効果ガスの排出制御に関する体制とメカニズムを模索し、特定の地域又は産業で試験的に炭素排出権取引を展開するとしている（中国科学院持続発展戦略研究組、2009年中国持続発展戦略報告（中国語）、科学出版社、2009）。中国は内需拡大と経済成長促進策及び関連産業振興計画により、経済構造の調整と産業構造のアップグレードを推進している。そのなかで、グリーン経済と低炭素経済の発展に関する政策と措置を制定し、グリーン経済への投資を増加させ、グリーン消費を提唱し、グリーン経済の成長を促進している。このような低炭素排出を特徴とする新たな経済成長点を育成し、省エネを強化、エネルギー消費効率を高め、クリーン石炭、再生可能なエネルギー、先進的な原子力等低炭素とゼロ炭素の排出技術についての研究・開発と産業化を推進し、低炭素排出を特徴とする工業、建築と交通システムの構築に拍車をかける方針である。

5) 今後の低炭素経済政策とエネルギー発展計画

中国のエネルギー開発方式は、①単純に経済発展のための基本要求を満たす目標から、基本要求を満たすと同時に環境配慮型の目標にすること。すなわち経済、社会、環境の調和あるエネルギー政策へ、②政府主導から、政府の誘導の下での市場原理に基づいた開発方式へ、③国

内市場と国際市場を十分に生かし、最終的には自給戦略をとるといった方向へ転換しつつある。具体的な実施として、①省エネ政策と技術革新の優先実施、②エネルギー構造の多元化、分散化、③環境にやさしいエネルギーの導入などが挙げられる。

(1) エネルギー・環境に関わる景気回復対策

08年末、中国は2010年末までに4兆元（約56兆円）を投資する景気対策を発表し、そのうち、環境、省エネルギー分野に2100億元（約3兆3600億円）を投資する。投資分野としては、主に①都市の汚水・ゴミ処理施設建設、②重点流域の汚染防止、③重点防護林・天然林資源保護事業の実施、④省エネ・主要汚染物質排出削減事業の実施などがある。

(2) 新エネルギー発展計画

09年6月に中国国務院に提出され、いまだ審議中のこの計画は、風力エネルギー、太陽エネルギー、生物質エネルギー、バイオマスエネルギーなどの新エネルギーの活用と従来型エネルギーの効率的な利用を共に推し進めていくためのものである。主として、金融危機への対応、雇用の創出、経済成長の維持、エネルギー安全の保障、大気汚染や酸性雨汚染などの環境問題の解決、二酸化炭素の排出量の削減など、一石多鳥の効果を狙っている。投資計画（2020年まで）では、投資は総計3兆元（約42兆円）以上となる見通しである（その内訳は、風力発電は1兆元、太陽光発電は3,000億元、原子力発電中長期計画の総投資額は7,500億元に上る）。

(http://www.cs.com.cn/cqzk/03/200911/t20091119_2261288.htmを参照されたい)。

(3) 2020年までに原発30基新設

中国は2020年までに原子力発電所を新たに30基建設し、原発の合計発電能力を現在の5倍以上の3600万キロワットへ拡大する。現在は石炭火力が大半だが、地球環境問題に配慮しながら需要増に対応するねらいから沿岸部に原発を増やして発電能力を高める。原発設備メーカーの事業機会を拡大するとともに安全対策にも注目が集まりそうである。

現在、浙江省と広東省で9基の原発が稼働しており発電能力の合計は700万キロワットである。江蘇省で2基建設中で、これらを含めて2020年までに沿岸部で出力が100万キロワット前後の発電施設を約30基建設する。設備投資額は合計で3—4兆円に上る可能性がある。

中国核工業集団などの国有発電会社が外資から資金や技術、設備を導入しながら建設する。電力不足が深刻な南部の沿岸地域に立地する見通しで、なお建設費用の4割程度を外資に依存する模様である。上海では、現在年間4-6基の100万キロワット級一次系压力容器と蒸気発生器をはじめ、プラントと制御棒駆動装置8-10基、100万キロワット級の二次系主要設備4-6基を製造する能力を擁する世界最大級の原発関連設備の製造基地を建設中である。

(4) 風力発電設備パーク

風力発電は、中国が重点的に開発に取り組んでいる再生可能資源の一つである。中国の風力発電容量は2008年、1200万キロワットに達した。国の計画によると、風力発電の総設備容量（出力）は2010年に500万kwまで増え、20年には3000万kwに達する。事例として、揚州市では、地元産業の強みを生かして、パークを国内一流の風力発電設備製造産業基地に築き上げ、2年で100億元（1元＝約15円）規模にし、2015年には300億元の規模にすることをめざす風力発電設備科技園（サイエンスパーク）プロジェクトを09年6月に正式に始動した。また、吉林省でも、投資総額が100億元（約1500億円）にのぼる「風力発電産業パーク」プロジェクトが09年7月に正式に起工した。

上述した計画を達成できれば、中国政府は2020年までに全エネルギーに占める再生エネルギー（水力を除く）の割合を15%に引き上げる目標を達成する見通しとなる。

終わりに

中国は、気候変動枠組みにおいては、かつての「抵抗段階」（1997年：COP3京都会議まで）から「学習段階」（1997－2005年：京都議定書発効まで）を経て、「協力段階」（2005年以後）に至った。温暖化対策、特にCO2削減対策の大半は国内対策でもあり、いわゆる「一石多鳥」の相乗便益効果がある。低炭素社会の実現は先進国のみならず途上国を含めた人類社会が追求すべき将来像で、持続可能な社会の必要条件であることが各種の学習により次第に認識された。現在は、むしろ「気候変動」という「外圧」と「内圧」を国発展の駆動力としてうまく利用する動きさえみえる。

本稿は、(独)科学技術振興機構 中国総合研究センター主催の「第24回 CRC研究会」にての講演原稿と論文「ポスト京都を巡る中国の動きと今後の見通し」（政策科学誌、2010年2月号）とを加筆したものである。

中国のクリーンエネルギー技術の研究進展

Profile



黄 偉光 Weiguang HUANG ●中国科学院クリーンエネルギー技術発展センター主任

中国科学院工程熱物理研究所副所長、中国科学院クリーンエネルギー技術発展センター主任。1962年12月生まれ。1991年九州大学、応用力学専攻、工学博士取得。中国科学院工程熱物理研究所研究員、常務副所長（法人代表）、所長を経て、2007年より現職。インペラ機械空気熱力学応用の基礎的な研究活動に長年従事。主な研究分野は全三次元粘性流動の数値シミュレーションとメカニズム研究、非定常状態における動翼と静翼の相互作用に関する研究、翼列内における複雑な流動特性及びロスのメカニズムに関する研究、合成ガス燃焼室の理論と実験研究、フレキシブル燃料の低公害燃焼技術等。国内外の国際会議で、また、刊行物に100編近くの学術論文を発表。1997年に中国科学院青年科学者2等賞、2000年に国家科学技術進歩2等賞、2002年に国家自然科学2等賞、2007年に中国石油・化学工業協会科学技術進歩1等賞、2008年に山東省科学技術進歩1等賞、2009年に国家科学技術進歩2等賞を受賞。北京熱物理・エネルギー工学学会理事長、中国語学術刊行物「航空学報」常務編集委員、英語雑誌「Journal Thermal Science」編集長、国際ガスタービン会議（IGTC）国際委員、アジアガスタービン会議（ACGT）国際委員。

近年、経済が急成長を遂げた中国はエネルギー供給と環境保護の二重の圧力に直面している。中国は膨大なエネルギー生産・供給システムを築く一方、エネルギーの生産と消費がもたらす環境への影響にますます注目するようになった。「国連気候変動枠組み条約」と「京都議定書」に調印したのに続き、今年9月22日にニューヨークで開かれた国連気候変動サミットの席上、胡錦濤国家主席は、中国は今後、気候変動への対応を経済・社会発展計画に組み入れ、省エネに力を入れ、エネルギー効率を向上させていくと約束した。また、再生可能エネルギーと原子力を大いに発展させ、低炭素経済と循環型経済を積極的に発展させると言明した。2009年11月26日、中国政府は二酸化炭素排出削減の数値目標を示し、単位国内総生産（GDP）当たりの二酸化炭素排出量を2020年までに05年比で40～45%削減すると発表した。

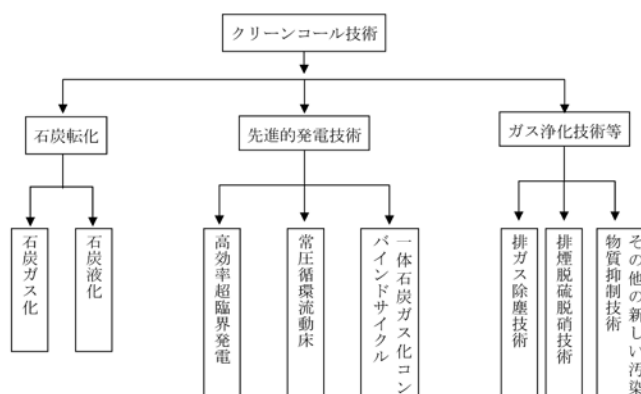
中国の一次エネルギー構成（生産と消費）比において、石炭は常に2/3以上の割合を占めており、世界の一次エネルギー消費構造とは明らかに異なる。石炭のクリーン利用の水準が低いため、その燃焼で大量の汚染物質が生じ、深刻な環境公害を引き起こした。国民経済第11次5カ年計画期（2006～2010年）の5年間で、単位GDP当たりのエネルギー消費を20%前後引き下げ、主要汚染物質の排出総量を10%削減するとの目標を実現するため、クリーンコール技術（CCT）の研究開発と普及は、高効率・クリーン・安全なエネルギー保障システムを築く上での最も重要な任務となる。同時に、1993年に石油の純輸出国から純輸入国に変わって以来、中国は今や世界第3位の石油輸入国となり、世界のエネルギー資源市場での「中国ファクター」効果がますます顕著になっていることにも目を向けなければならない。長期安定したエネルギーの生産と供給を確保するため、先進的で安全な原子力、再生可能エネルギー及びその他の代替エネルギーを成長させることは、クリーンエネルギー技術の進展におけるもう1つの重要な目標である。

以下、クリーンコール技術、先進的原子力技術、再生

可能エネルギー技術を例に、中国のクリーンエネルギー技術進展の概要を紹介する。

一、クリーンコール技術

クリーンコール技術（CCT）は多くの業種、分野、学問に及ぶ巨大なシステム工学である。CCTはその生産と利用のプロセスに基づき、石炭転化技術、先進的発電技術、排ガス浄化技術の3種類に分けることができる。本論文では前2種類の技術の進展状況を重点的に紹介する。



1. 第1類は燃焼前の石炭転化技術であり、石炭ガス化、石炭液化等である。

1) 石炭ガス化技術

華東理工大学、山東兗礦集団、天津天辰化学工程公司 は第9次5カ年計画期（1996～2000年）に新しいタイプの石炭水スラリー（CWS）ガス化技術を開発した。この技術の主な特徴はマルチノズル対向型CWSガス化工程を採用したことであり、炭素転化率は98%を上回り、有効ガス成分は82%を上回る。2005年7月、山東兗礦集団で工業化実証運転に入り、その石炭処理量は1,050t/日であった。現在、この技術は化工、電力業界で広く応用されており、

最大石炭処理量は2,000t/日に達する。

中国科学院山西石炭化学研究所は1980年から灰溶融集塊流動床による微粉炭ガス化技術の研究開発を進めてきた。その原料となる炭種の範囲は褐炭、瀝青炭、無煙炭、石油コークス等をカバーしており、高灰融点炭、高灰分炭、高硫黄炭に対する適応性が高い。現在、河北省と山西省で加圧条件下における石炭処理量500t/日の工業化実証運転が行われている。近年、この技術を踏まえ、流動床・気流床複合の加圧微粉炭ガス化技術の方針が打ち出された。

西安熱工研究院有限公司が開発した二段式乾燥微粉炭加圧ガス化技術は、第10次5カ年計画期（2001～2005年）に建設された石炭処理量36t/日の二段式乾燥微粉炭ガス化工程パイロットプラントを基礎としたものであり、2005年に試験研究が完了した。この技術の工業化実証は中国華能集団の「グリーン石炭発電」プロジェクトとタイアップして進められる。石炭処理量2,000t/日とし、2009年に完成する予定である。

2) 石炭液化技術

A. 石炭直接液化技術

中国は1970年代末から石炭直接液化技術の研究開発を進めてきた。第8次（1991～1995年）、第9次両5カ年計画期のたゆまぬ努力を経て、第10次5カ年計画期に、石炭科学研究総院北京石炭化工研究分院は自らの知的財産権を持つ活性の高い石炭直接液化専用触媒を開発した。合成油年産100万tの直接液化実証プラントで工業化のための実証作業が行われる予定である。

神華集団は石炭投入量6t/日の直接液化パイロットプラントを上海に建設した。自主的に研究開発した石炭直接液化の基幹技術と専用触媒を採用しており、周期の長い連続した安定運転が何度も実現された。神華集団の石炭直接液化商業化実証プラントは第1期工事が2008年に完成し、稼働を始めており、石油製品の設計年産量は100万tとなる。

B. 石炭間接液化技術

中国科学院山西石炭化学研究所は1950年代から石炭間接液化技術の研究に取り組んでおり、Fe基固定床二段法合成プロセス（略称MFT）とスラリー床/固定床二段法合成プロセス（同SMFT）を開発した。高効率のFe基触媒を開発することに既に成功しており、スラリー床反応器の技術面でも突破口が開かれた。この技術に基づく山西潞安集団の合成油年産16万t工業化実証プラントは2008年12月から稼働している。

山東兗礦集団は2003年に万t級石炭間接液化技術のパイロットプラント研究を完成させた。浙江工業大学は2006年初めに中国神華集団と共同でFe基フィッシャー・トロプシュ合成技術を開発した。現在、触媒の研究開発段階にある。

2. 第2類は石炭のクリーン・高効率燃焼技術であり、主にはクリーンコール発電技術となる。国が決めた主な研究分野は超臨界ユニット+脱硫脱硝技術、循環流動床燃焼技術、一体石炭ガス化コンバインドサイクル技術（IGCC）である。

1) 超臨界ユニット+脱硫脱硝技術

中国は2005年から非超臨界発電所ユニットの建設を停止している。2020年には、全国の発電設備容量が13億3,000万kWに達し、そのうち火力発電が70%以上を占め、超臨界及び超超臨界（USC）発電ユニットが主力ユニットになると予想される。超臨界発電技術の研究は主に「技術導入、共同設計、国内製造」の方式に従って進めなければならない。材料面での主な進展は中国科学院金属研究所の耐熱鋼とUSCフェライト耐熱鋼が基本的に一致したことであり、その性能基準は既に国際水準に到達している。

中国はこれまでに世界の主流をいく全ての火力発電排煙脱硫技術を導入し、実証に取り組んできた。しかし、設備投資、水資源、ランニングコスト等の原因から、国の環境保護政策の誘導と圧力の下、大規模な商業ベースの普及・応用が実施されているのは湿式脱硫技術しかない。規模が大きく、水の消費が少なく、ランニングコストが低い乾式、半乾式脱硫技術は将来、火力発電の排煙脱硫問題を根本的に解決する上でのネックになることが予想され、全国の関係科学研究機関及び企業はいずれも高効率の乾式、半乾式脱硫技術の研究開発と実証を強力に進めている。

2) 循環流動床燃焼技術（CFBC）

循環流動床技術は重要なクリーン燃焼技術であり、その発展の重点は大型化と高パラメータ化にある。この技術は窒素酸化物の排出が少なく、燃料の適応性が広く、燃焼効率が高く、炉内脱硫を実現でき、排出された灰の総合利用が容易で、負荷の調節範囲が大きい等の際立つ利点を備えている。

中国科学院工程熱物理研究所、清華大学、浙江大学等が研究開発した容量75～130t/hの循環流動床ボイラはそれぞれ1990年代に相次いで運転を開始した。2002年、西安熱工研究院石炭クリーン燃焼国家工学センターが設立され、高パラメータ・大容量循環流動床ボイラ技術の研究に正式に加わった。初の国産大型100MW級CFBボイラ及びその関連システムは2003年6月、江西省分宜発電有限责任公司で実証に成功した。2006年7月、コンパクト型分流アッシュ・リターン熱交換器を持つ200MW級CFBボイラが江西省で稼働に入った。現在、200MW超高压再熱CFBボイラ技術は既に工業化のための実証が終わり、商業ベースの普及段階に入っている。また、国の第11次5カ年計画期の863計画で支援を受けた600MW超臨界CFBボイラ技術の研究開発も設計と試験が既に完了し、工業化のための実証に移りつつある。

3) 一体石炭ガス化コンバインドサイクル (IGCC)

一体石炭ガス化コンバインドサイクル (IGCC) は複数の学問分野と業種に跨る複雑な統合システムである。中国のIGCC発電技術は20年余りにわたる研究開発を経て、幾つかの単一技術、例えば石炭ガス化、空気分離設備、合成ガス浄化、排熱回収ボイラ等で一定の技術的基礎が蓄積された。西安熱工研究院のリーダーシップの下、国内の11の部門が結集し、国の第9次5カ年計画期の難関攻略プロジェクト「IGCC基幹技術研究」及び、第10次5カ年計画期における863計画課題「IGCC設計統合・動特性」を完成させた。

中国科学院工程熱物理研究所は中国でのIGCCの発展を提唱し、推進してきた主要な科学研究機関である。1990年代末からこれまでの間に、IGCCシステムのモデル構築、パラメータの最適化等の基礎研究を進め、IGCCシステムの設計技術、高効率・低公害合成ガス燃焼技術等の研究開発を完成させた。第10次5カ年計画期に、山東兗礦集団は石炭水スラリー (CWS) ガス化技術に基づく中国初のIGCC実証発電所を建設した。ガスタービン-蒸気タービンのコンバインドサイクルによる発電容量は60MWで、年産24tのメタノールを併給できる。これは典型的なCo基コージェネレーション/IGCC商業化実証システムである。

現在、国が認可したIGCCシステムには中国華能集団が天津に建設中のグリーン石炭発電プロジェクトがある。このプロジェクトは西安熱工研究院が自主開発した二段式乾燥微粉炭加圧ガス化技術を採用する予定であり、ガスタービン-蒸気タービンのコンバインドサイクルによる設備容量は250MWとなる。

二、原子力技術

2000年以降、中国の原子力発電は年平均22%の伸びを示している。2008年の原発発電量は692億1,800万kWhで、そのうち電力網に送られたのは653億2,500万kWhとなる。現在、中国には7つの原子力発電プロジェクトがあり、建設中の原発ユニット22基の総設備容量は22,900MWである。2020年には70,000MW前後に達し、全国の電力使用量の5%を賄う見通しである。

中国はGW級加圧水型炉原子力発電所の自主設計能力を基本的に備え、60%のモジュールが国内で生産されている。出力300、600、700、1,000MWの各級原発を建設する技術を全面的にマスターしており、その炉型には加圧水型炉、重水炉、ガス冷却型炉、高速炉等がある。2007年8月、中国は遼寧省で全国最大規模の原発プロジェクトとなる4,320MW紅河原子力発電所の建設に着手した。4基のユニットはいずれも自主開発したCPR1000技術を採用している。

10MW高温ガス冷却型炉が2003年1月に電力網に組み込まれ、発電を行ったことは中国が自らの知的財産権を持

つ高温ガス冷却型炉の技術をマスターしたことを示すものである。中国は既に同炉型原発の実証プロジェクトの実施段階に入っている。

中国初の実験高速増殖炉は2008年末に最終的な据付け・調整試験段階に入った。計画では2009年に臨界に達し、2010年に電力網に組み込まれ、発電を行うことになっている。また、2015年に実証規模の高速増殖炉を完成し、商用化を実現する計画である。同プラントの熱出力は65MWで、正味発電出力は20MWとなる。

三、再生可能エネルギー

この数年来、中国は再生可能エネルギーの技術研究、装置生産及び市場への投入面で急速な伸びを見せている。現在、太陽エネルギーの設備容量と製造水準は世界一であり、風力発電の設備容量は世界第4位にある。第10次5カ年計画後期からクリーンエネルギーの発展を大いに重視するようになり、エネルギー立法に力を入れた。1995年の「電力法」、2007年の「エネルギー節約法」、1997年の「建築法」、2000年の「大気汚染防止法」、2002年の「クリーン生産促進法」等はいずれも再生可能エネルギーの発展問題に言及している。2005年には「再生可能エネルギー法」が正式に公布された。

2007年9月、国家發展改革委員会は「再生可能エネルギー中長期發展計画」を公布した。同計画は、中国は一次エネルギー消費に占める再生可能エネルギーの割合を引き上げ、2010年に10%に到達させ、2020年までに15%に到達させると規定している。計画は又、再生可能エネルギー発電の設備容量を1億2,000万kWに到達させるよう要求し、これには3,000万kWの風力発電と3,000万kWのバイオマス発電が含まれると述べている。

2009年9月、「再生可能エネルギー法」の改正案について社会から広く意見を求めた。同法は2006年1月の正式な発効から3年余りしか経っておらず、再生可能エネルギーの発展に対する中国の主体性を十分に見てとることがができる。これは世界の中で最も急進的な立法であり、電力業界に対し、魅力のある固定価格を提示し、再生可能エネルギーで起こした全ての電力を買い取るよう求め、これに伴う超過コストは全消費者に均等分担させるとしている。再生可能エネルギー電力の全量買い取りを確実にするため、改正案は全国の再生可能エネルギー発電量の年度買取目標を定め、電力網企業が達成すべき同発電量の最低割当目標を策定・公表することを盛り込んでいる。同時に又、再生可能エネルギーの開発利用とネット化の科学技術研究を支援し、再生可能エネルギーの発展を図る上でネックとなっている電力網への接続問題を根本から解決するため、特定目的基金を設立する予定である。

1. 太陽エネルギー

中国の3分の2の地域は太陽エネルギー資源が豊かであり、特に西北地区、チベット、雲南の年平均照射水準は

1m²当たり60億ジュールを超える。地表から毎年吸収される太陽エネルギーは約1兆3,000億tの標準炭に相当する。

1) 太陽光発電

中国の太陽電池総生産量は2007年に1.088GW、2008年には2GWに達した。いずれも世界一である。シーメンス法を改良した中国の多結晶シリコン生産能力は2008年時点で既に8万t/年に達しており、2009年には10万t/年となる見通しである。現在、多結晶シリコン材料の生産量は世界一であり、その変換効率は国際標準となっている。世界の5大太陽エネルギー企業のうち、中国は2社を占める。約10社の太陽電池企業が国外で上場を果たし、また、多くの上場企業が太陽電池産業に参入しており、国際的な産業クラスターが作り上げられた。インバータ、アキュムレータ等の各種付帯製品及び付帯工程・技術も発展している。現在、多結晶シリコンの生産能力は過剰となっており、中国政府はこの産業に対し、効果的な管理を実施している。国際経済の低迷、材料の製造コスト低下により、多結晶シリコンの1kg当たり価格は既に3～4年前の約300ドルから50～60ドルまで下がった。中国は原材料と労働力のコストが比較的低く、高純度の精製技術が世界レベルにあり、先進的設備の国産化も実現されつつある。このため、製造コストはまだ引き下げる余地があり、多結晶シリコンの1kg当たり価格の最低ラインを20～30ドルの間に設定することができる。中国は今後、多結晶シリコン材料の絶対的な供給国になるものと予想される。

多結晶シリコン材料は大幅に値下がりしたが、第二世代の薄膜太陽電池は依然として最も有望な高効率・低コストの太陽電池と見られている。これにはアモルファスシリコン (a-Si)、銅/インジウム/ガリウム/セレン (CIGS)、テルル化カドミウム (CdTe)、多結晶シリコン (C-Si薄膜) 等の電池がある。中国企業はアモルファスシリコン電池に十分な自信を持ち、50社近くの民間企業が既に産業プロセスに参入している。その高い技術水準は国内の自主的技術、国外からの人材と技術の導入、生産ライン設備・技術の購入によるものである。中国は変換効率の高いアモルファス/微結晶シリコン薄膜電池を調製する先進的技術を既に持っている。中国は貴金属・希少金属で有利な立場にあり、このため、米国のFirst Solar社は内蒙古にテルル化カドミウム電池の生産拠点を設けることを決定した。中国では既に10社近くの民間企業が産業化に取り組んでいる。銅/インジウム/ガリウム/セレン薄膜電池は調製工程が複雑だが、効率が高く、毒性が低いため、広く関心を集め、投資を呼び込むことができ、10余りの機構が既に真空法及び非真空法による産業化を進めている。

2) 太陽熱発電

太陽熱発電はディッシュ式、トラフ式、タワー式等の集光システムで太陽の熱エネルギーを集め、タービン発

電設備によって熱エネルギーを電気エネルギーに変換する発電方式を採用している。即ち伝統的な石炭ボイラを太陽エネルギーボイラに変えて発電を行う技術である。太陽熱発電は稼働中の実証発電所がまだ中国には1つもない。中国科学院電子工学研究所の太陽エネルギー光熱実証発電所はアジア初のMW級タワー式太陽熱発電プロジェクトである。その目標は容量1MWのタワー式実験発電所を建設し、完成後、太陽熱発電の実験・実証拠点を築くことである。計画によれば、発電所は2010年2月に主タワーが完成し、同年末から正式に発電を行う。同プロジェクトを通じ、中国はエネルギーの階段式利用に基づくタワー式太陽熱発電所の基本設計技術といった世界の先進水準をいくコア技術を手に入れることになる。これにより、太陽光の間欠性が発電システムの安定性に及ぼす影響、通常の蓄熱における高い熱損失等の問題を解決したいとしている。

2009年12月、投資総額176億元で建設される「太陽熱発電研究・産業基地」の定礎式が山東省濰坊市峡山区で行われた。この基地は完成後、世界で規模が最も大きく、範囲が最も広い太陽熱発電の研究・産業拠点、国際技術普及・産業化拠点、国際技術教育・訓練拠点になると言われる。

材料の研究面では、中国科学院金属研究所と電子工学研究所がタワー式太陽熱発電所用の空気吸熱器の研究開発を共同で進め、1,400℃の下で使用できる発泡炭化シリコン吸熱体を開発した。また、金属研究所が開発した融解浸透の反応調製を制御できる高性能・低コスト発泡炭化シリコン及び緻密炭化シリコンのセラミック技術は現在、1,000t/年級でのエンジニアリング研究が進められている。半導体研究所は3kW高効率集光太陽電池発電システムの原理モデルを開発することに成功した。

2. 風力発電

中国気象科学研究院の推計によれば、中国で利用可能な陸上の風力資源は2億5,300万kWとなり、世界一である。また、近海（水深10m以下）で利用可能な潜在的風力資源は7億5,000万kWとなる。現在、風力発電は同じコストで比較した場合、効率が最も高い再生可能エネルギーである。中国の風力発電プロジェクトは1980年代に建設が始まった。第10次5カ年計画期間中、風力発電プロジェクトの建設が盛んに行われ、その総設備容量は2000年の350MWから2006年の2,600MWへと急増した。急速な発展を遂げたとは言え、中国の風力発電設備容量はまだ潜在的風力資源の0.1%でしかない。風力発電は4年連続して倍増しており、2008年末の全国の設備容量は12,500MWに達した。

3. 水力発電

水力発電は中国の最も重要な再生可能エネルギーであり、資源分布はかなり広範囲にわたる。水利電力部門のデータによれば、中国の水力資源で開発可能な水力は約

5億4,000万kW、経済的に開発可能な設備容量は4億200万kWとなり、これは石炭に次ぐ通常エネルギーである。2008年末、三峡発電所の26基の70万kW級水力タービン発電ユニットが全て稼働に入り、その年間発電量は847億

kWhに達する。同年末現在、全国の水力発電の設備容量は世界第1位の1億7,200万kW、また、年間発電量は5,633億kWhに達し、それぞれ全国の電力設備容量の21.6%、年間発電量の16.4%を占めた。

中国における太陽エネルギー利用技術の開発 および産業の現状

•Profile•



苗 蕾 Miao Lei ●中国科学院・広州エネルギー研究所太陽エネルギー研究室 主任

1972年6月生まれ、中国科学院・広州エネルギー研究所太陽エネルギーチームの研究主任、および日本精密セラミック研究センター材料技術研究所の客員研究員。博士コース担当教員。2004年3月、名古屋工業大学都市循環システム工学専攻博士学位取得。主に酸化物質半導体の熱電変換や光電機能材料の研究や開発に従事。2003年以降、応用物理や材料表面の研究に関する国際的な学術雑誌に合せて73本以上の論文を発表（SCI論文59本およびEI論文44本）。代表的な論文は、Adv. Mater., Appl. Phys. Lett., J. Appl. Phys., Chem. Mater.といった雑誌において、300回以上引用（SCIにおける引用333回、引用著者数1056回）。ナノ光電材料分野における国際学会で招待講演（Invited）12回。共著書を3冊出版、日本における特許2件および中国における発明特許6件取得。このほか、日本工業新聞社の主催する2002年先端技術大賞における学生部門特別賞、日本育英会奨学金、名古屋工業大学学長賞、日本学術振興会外国人特別研究員など受賞。2009年には、材料研究分野における成果が評価されアメリカの「Who's Who in the world」全集に収録。【MARQUIS, Who's Who, 26 edition, P1562】。

一、序文

エネルギー、環境、持続可能な経済成長の「トリレンマ」が近年ますます顕著になっている。加えて電力、石炭、石油といった再生不能エネルギーの有限性に関する警鐘が頻繁に鳴らされている。このような状況に伴い、ますます多くの人々が新エネルギーや再生可能エネルギーの利用に関心を示すようになってきている。エネルギー問題は、世界各国において社会や経済の成長を制約するボトルネックとして、いよいよ顕著になっている。太陽エネルギーは再生可能エネルギーの一つとして、ますます多くの人々から注目されている。バイオマスエネルギーは世界的に見てもわずかししか利用されていない。国際的な生物の均衡、自然の均衡、地域的要素といった制約ゆえに、バイオマスエネルギーを効果的に近代的な方法で利用しようとする、量が限られてしまう（中国：標準石炭約7億トン分に相当）。水力発電の利用も多くはなく、風力発電に至っては年間の利用可能時間さえ限られている（中国：標準石炭数億トン分に相当）。原子力は安定したエネルギー供給源である。加えて資源量の面で言うと、原子核融合さえ可能であれば、エネルギー供給は尽きることがない。しかし放射能汚染、核拡散、放射能廃棄物の処理といった技術的または政治的な障害や課題を解決する必要がある。

さまざまな資源のうち、真の意味で再生可能エネルギーだと言える最大のものが、太陽エネルギーである。2005年における全世界のエネルギー消費は 3.0×10^{20} ジュール/年だったが、地上に照射される太陽エネルギーは、世界のエネルギー消費の1万倍に相当する 3.0×10^{24} ジュール/年もある。太陽エネルギーを地球に住む数十億人のための、ひいては将来地球に住むことになる百億人のためのエネルギー源として利用することがもっとも理想的である。これまでに開発された太陽エネルギー利用技術には、太陽光発電、太陽熱温水器、太陽熱発電、ソーラーハウス、

ソーラー調理器、太陽冷却、太陽冷暖房システムなどがあ

る。図1で示す資源分布からも分かるように、中国には豊富な太陽エネルギー資源が存在しており、同エネルギーの利用の余地が十分にある。中国が2007年に消費した一次エネルギーは、標準石炭26.5億トン分に相当する。これに対し中国の地表面に照射される太陽エネルギーは、標準石炭1700億トン分に達する。エネルギー消費量の600倍以上である。中国の太陽エネルギー産業は世界一の規模に達している。また太陽熱温水器の生産量や使用量で世界最大であり、世界有数の太陽電池生産国でもある。地球温暖化や原油価格の変動によって、中国でも新エネルギーや再生可能エネルギーの開発ブームが生じている。中国における科学技術分野の最高学術機関であると同時に、自然科学や先端技術の総合研究・発展センターでもある中国科学院は、2009年1月12日に「太陽エネルギー行動計画」をスタートさせた。同計画の最終的な目標は、2050年くらいまでに太陽エネルギーを重要エネルギーとする

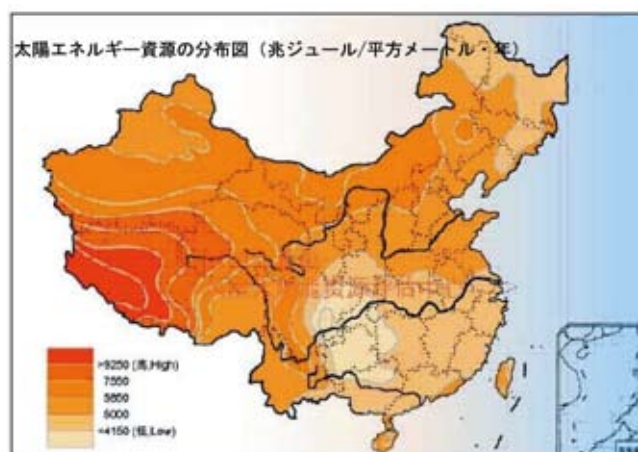


図1 中国における太陽エネルギー資源の分布

ことである。そのために2015年に部分的な利用、2025年に代替利用、2035年に本格利用を実現するという3段階の目標も制定している。太陽光発電、光熱、光化学、光生物といった太陽エネルギーの主な利用方法に関する科学的重要課題を足掛かりとして、中核技術の開発、応用モデル、転換・転用などの分野において太陽エネルギー行動計画が実施される。中国科学院は同計画の実施のために同院の力を結集すると共に、関連する国内の科学技術力とも連携していくつもりである。特に新原理、新方法、新材料、新技術の発見や開発を重視している。また産業、大学、研究機関の連携を推進し、太陽エネルギーが一日も早くコスト的に大規模利用が可能なエネルギーとなるよう努力していく。

1978年に発足した中国科学院・広州エネルギー研究所の太陽エネルギーチームは、主に「太陽エネルギーの利用のための重要材料と技術」に関する基礎研究や応用研究に従事している。同チームは、中国で初めて太陽熱の利用に関する研究を開始した国家レベルの科学研究機関であり、「中国一」の称号を与えられている。太陽エネルギーの光熱転換材料やシステム、太陽光発電に関する新材料やシステム、太陽エネルギーに関する機能材料（輻射制御材料や熱反射塗料など）の開発と応用、省エネ新建材の開発と応用などが主な研究テーマである。同チームの研究における主な特色は、太陽エネルギーのさまざまな利用方法を組み合わせている点にある。例えば光と熱の利用（太陽エネルギーの光熱転換材料や太陽光発電に関する新材料とシステム）、直接利用（太陽エネルギーの光熱転換材料や太陽光発電に関する新材料とシステム）と間接利用（太陽エネルギーに関する機能材料や省エネ建材）の融合などである。新エネルギーや再生可能エネルギーの研究を専門的に行う国家レベルの科学研究機関として、太陽エネルギーのさまざまな利用方法に関する研究を総合的に展開している。

二、太陽光発電に関する研究および産業の現状

2.1 太陽光発電の基本原理と研究開発の現状

第一世代の太陽電池における基本物理過程は、光励起半導体材料の形成する光電子と正孔によって生じる。半導体のp-n接合における電場作用によって、光電子と正孔の分離と移動が実現する。この過程で重要なのは、太陽光の吸収率、光励起による光電子と正孔の発生率、有効に光電子と正孔の移動を促進する方法である。太陽電池における太陽光発電技術を大まかに分類すると3種類になる。第一世代は結晶シリコン太陽電池であり、単結晶シリコン太陽電池と多結晶シリコン太陽電池がある。第二世代は半導体を利用した薄膜太陽電池であり、アモルファスシリコン(a-Si)、ガリウム砒素(GaAs)、カドミウムテルリド(CdTe)、銅・インジウム・ガリウム・セレン(CuInGaSe)がある。第三世代は新型太陽電池であり、色素増感、広

帯域スペクトル、多層構造多結晶、量子ドットやナノ、有機電池といった多種多様の新型電池がある。太陽電池の研究において課題となっているのは、効率、コスト、寿命の3要素を同時に考慮しなければならない点である。

第一世代太陽電池は中国で盛んに生産されているが、技術面では改善の余地を残している。第二世代太陽電池は諸外国において産業化が実現しつつあるが、中国ではアモルファスシリコン太陽電池のみが産業化生産に移行できる状態である。ただし多くの解決すべき科学的重要課題を残している。第三世代太陽電池は、中国における多くの大学や研究所で研究が進められている。効率と寿命をいっそう向上させることが、科学的な課題となっている。理想的な太陽電池の効率は40%以上である。豊富な基質材料、低消耗、安価な薄膜化、柔軟な構造、クリーンな製造技術などが必要である。中国の大学や科学研究機関は、目下以下に記す六つの分野を中心として太陽電池に関する研究を展開している。

- (1) 低消耗、低コスト、大規模な太陽電池向け多結晶シリコンの精錬技術。
- (2) 第一世代結晶シリコン太陽電池の効率を高める新構造。
- (3) 結晶シリコン薄膜太陽電池に関する研究。
- (4) 高効率で安価な化合物半導体を利用した薄膜太陽電池。
- (5) 第三世代太陽電池に関する新概念や新構造。
- (6) 高効率かつ高寿命な新材料を利用した色素増感太陽電池に関する研究。

2.2 中国における太陽光発電政策、市場と産業

中国は「京都議定書」に加盟しているだけでなく、「再生可能エネルギー法」を制定し2006年1月1日から施行している。中国政府は2010年までに中国における太陽光発電システムの設置総数を450メガワット(MW)にまで増加させると公約している。しかし2006年の時点では85MWしかなかったため、毎年38%の増加幅で設置を続けなければならない。太陽光発電は将来的に中国における重要なエネルギー供給源となる。中国政府による最新の計画によると、2010年までに太陽光発電システムの累積設置数を300MWにするという。次いで2020年までに1.8GW、2050年までに600GWという目標がある。

1971年、中国は人工衛星の東方紅2号に太陽電池を応用することに初めて成功した。1973年からは太陽電池を地上で応用するようになったが、コストが高いために市場の発展は緩慢であった。2002年に国家計画委員会は「西部地域の村落に対する電力供給計画」を発動した。太陽光発電や小型風力発電によって、西部地域の七つの省や自治区（チベット自治区、新疆ウイグル自治区、青海省、甘肅省、内モンゴル自治区、陝西省、四川省）にある700余の未電化村落に電力供給を行うことにした。同計画による太陽光発電の使用量は15.3MWに達した。2000年以

市場の種類	累計設置数 (MW)	市場シェア (%)
農村電化	180	51
通信・工業	45	13
太陽光発電製品	32	9
実用発電 (BIPV)	73	21
実用発電 (砂漠発電所)	20	6
合計	350	100

◎表1 2010年における中国の太陽光発電市場

市場の種類	累計設置数 (MW)	市場シェア (%)
農村電化	400	22
通信・工業	300	11
太陽光発電製品	200	17
実用発電 (BIPV)	700	39
実用発電 (砂漠発電所)	200	11
合計	1800	100

◎表2 2020年における中国の太陽光発電市場

降、「光明工程」、「GEFと世界銀行によるREDP」、中国とオランダの共同事業である「シルクロード」といったプロジェクトが相次いで実行に移され、太陽光発電システムによって中国西部の未電化村落に対する電力供給問題を解決する動きが活発になった。

中国における在来型エネルギーは極めて不足しており、将来の電力供給も保証されていない。中国は太陽光発電をエネルギー戦略の基軸にすべきである。政府の掲げている2010年と2020年の達成目標に基づき、表1と表2に太陽光発電市場の分布状況を示す。

中国における太陽光発電産業は1970年代に始まり、1990年代の半ばに安定成長の段階に入った。太陽電池や構成部品の生産量は毎年着実に増加している。30年以上にわたる苦労を経て高度成長段階を迎えている。「光明工程」先導プロジェクトや「村落に電力供給」プロジェクトといった国家プロジェクトや国際的な太陽光発電市場に牽引され、中国の太陽光発電産業は急速に発展した。2007年末には太陽電池の生産量で世界シェア27%を実現し、日本やヨーロッパを抜いて世界一となった。また原材料の生産から太陽光発電システムの建設に至る各工程を網羅した産業ネットワークが確立されつつある。特に多結晶シリコンの生産は著しい発展を遂げており、年間生産量が1万トンの大台を突破した。太陽電池の原材料生産に関連したボトルネックが解消されたことで、中国における太陽光発電産業の大規模化のための基礎が据えられた。中国で応用されている太陽エネルギー製品には、街灯、信号灯、公園灯、電卓、玩具などがある。輸出需要や労働集約型産業であるといった要素のため、珠江デルタ地域、福建省、浙江省といった沿岸地域に一群の太陽エネルギー消費財メーカーが設立されている。中国は太陽エネルギー消費財や応用製品の分野で世界最大の生

産国となっている。また太陽電池の使用量は年間20MWに達しており、輸出も非常に盛況である。

中国における太陽エネルギー産業と市場の発展状況には顕著な格差が存在しており、市場は産業の発展に遠く及ばない。主な原因は中国における太陽エネルギー産業の急速な発展が、外国（特にヨーロッパ）の太陽エネルギー市場に牽引されているためである。外国における太陽エネルギー市場の急速な発展は、関連各国の厳格かつ効果的な法規や政策に支えられている。しかし中国では太陽エネルギー産業化と規模化の発展を加速するため、2009年7月になり初めて「金太陽モデルプロジェクトの実施に関する通知」が出され、総合的な財政補助、技術サポート、市場浮揚政策が決定したばかりである。加えて中国の太陽エネルギー産業には、輸出も輸入も海外に依存した構造、原材料価格の変動、無秩序な競争といった問題が存在する。中国における太陽エネルギー企業は製品の98%を輸出しており、原材料の90%以上を輸入している（2009年からは変化が見られる）。加工方法、技術、設備などもすべて輸入に頼っている。2008年5月の時点で、高純度シリコンの精製を行うメーカーが全国に34社存在した。加えて37社が開業の準備を行っており、すべてが操業を開始すれば生産能力の合計が6.8万トンに達する。この数字は需要をはるかに上回るものであり、倒産するメーカーも出てくることだろう。中国には500余の太陽エネルギー関連企業が存在する。このうち40社が材料、70社がシリコンインゴットやシリコンウェハー、30社が電池ユニットを取り扱っている。海外市場に上場している企業が10社あるほか、多くの国内上場企業も太陽エネルギー業界に参入している。

2.3 中国における多結晶シリコン産業

中国における多結晶シリコン産業は1950年代に興った。1960年代末には峨眉半導体材料研究所（国営第739工場）、洛陽単結晶シリコン工場（同第740工場）、華山半導体工場（同第741工場）などが操業していた。1970年代に多結晶シリコンの精製ブームが起り、上海や武漢を含む各地で多結晶シリコン工場が建設された。しかし電力消費、材料ロス、コストが高いことや競争力の欠如といった原因で倒産が相次ぎ、洛陽、峨眉、上海棱光などに小規模工場が残るのみとなった。2004年になって太陽エネルギー産業が活況となり、世界中で多結晶シリコンの需要が爆発的に増加した。多結晶シリコンメーカーは生産規模を拡張したが、急な需要に追いつくことができない状態であった。最近の5年間に多くの工場が拡張または新設されてきた。2008年における中国の多結晶シリコン産業を見てみると、生産能力が2万トン、生産量が約4000トン、建設中の工場における生産能力が約8万トンであった。業界は2009年における多結晶シリコンの生産量を1万7000トンと予測している。3.5GW分の太陽電池を生産するために、3.5万トンの多結晶シリコンを消費する必要がある。

る。国内生産分を差し引くと、1万トンを超えて海外から輸入しなければならない。

2.4 中国における太陽電池製造業の現状

中国における太陽電池の生産には以下のような特徴がある。

- (1) 爆発的な勢いで成長している。2005年に多くの工場が新設されたことにより、生産能力が一気に過去の総額を越えた。
- (2) 市場の需要が旺盛で、大手メーカーでは2年先までラインが埋まっている。
- (3) 原材料が不足しているため生産能力が十分に発揮されていない。また監督制度に難があり、質の悪い原材料が市場に流入している。
- (4) 導入技術を消化吸収することにより、太陽電池の生産技術は世界最先端の水準に達している。
- (5) 企業の総合的な技術力や人材が依然として不足しており、技術革新や開発力が欠如している。

代表的な太陽電池メーカー：江蘇無錫尚徳太陽エネルギー電力有限公司、中電電気南京光伏科技有限公司、欧貝黎、江蘇林洋、天威英利、阿特斯、常州天合、晶澳、雲南天達光伏科技股份有限公司、江蘇順風光電、台州索日、江蘇天保光伏、杉杉尤利卡、無錫尚品、江陰浚鑫寧波太陽能電源有限公司、上海交大泰陽綠色能源公司等10余の大手メーカー。図2は最近5年における中国の太陽電池総生産量を示す。

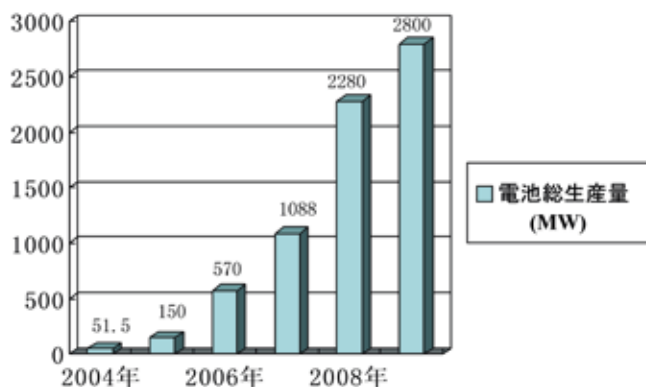


図2 2004-2009年における中国の太陽電池総生産量(単位:兆ワット)

三、太陽熱の利用に関する研究および産業の現状

3.1 太陽エネルギーの中低温利用：温水器

1970年代後半に始まった中国の太陽熱温水器産業は、長年にわたる発展を経て、総合的な産業チェーンが形成されるようになってきている。原材料の加工から温水器製品の製造、販売、サービスに至るまで、総合的かつ調和のとれた発展が実現している。生産高や設置数を見ると、中国はまさに生産大国また応用大国とすることができる。2006年の時点で全国に1300社以上の太陽熱温水器メー

カーがあった。設置済み太陽熱温水器における集熱面積は、標準石炭で約1200万トン分に相当する9000万平方メートルに達している。年間の生産能力は1800万平方メートルである。使用量と年間生産量は共に世界シェア50%以上となっている。2020年までに集熱器の面積が3億平方メートルに達する見込みである。2007年に中国における太陽熱温水器の生産量は、前年比30%増となった。また太陽熱温水器市場の売上高は約320億元であった。生産高が1億元を超えるメーカーは20社余だった。太陽熱温水器の輸出額は、約28%増となる約6500万米ドルだった。輸出先はヨーロッパ、アメリカ大陸、アフリカ、東南アジアなどを包含する50余の国や地域である。業界内で目下問題となっているのは、厳格な業界参入基準や建築業界を考慮した基準の不足である。広州エネルギー研究所の太陽エネルギーチームの開発した中低温選択吸収被覆を利用した製品と性能指数を図3で示す。我々はマグネトロンスパッタ法を採用し、銅製の基質に高吸収率かつ低放射率の高性能選択吸収被覆を施している。すなわち、W - Al_2O_3 。

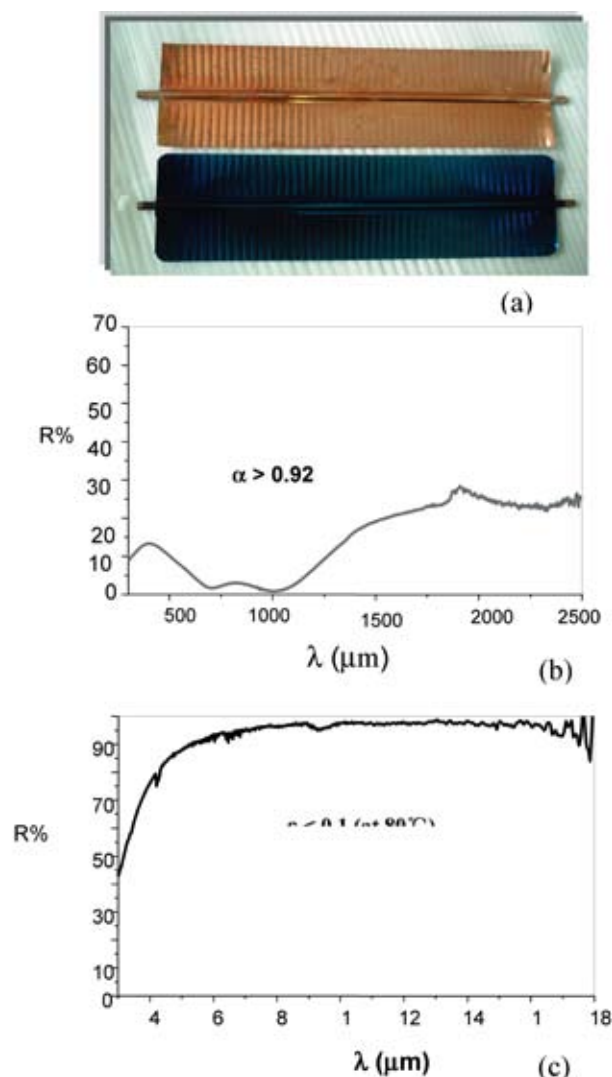
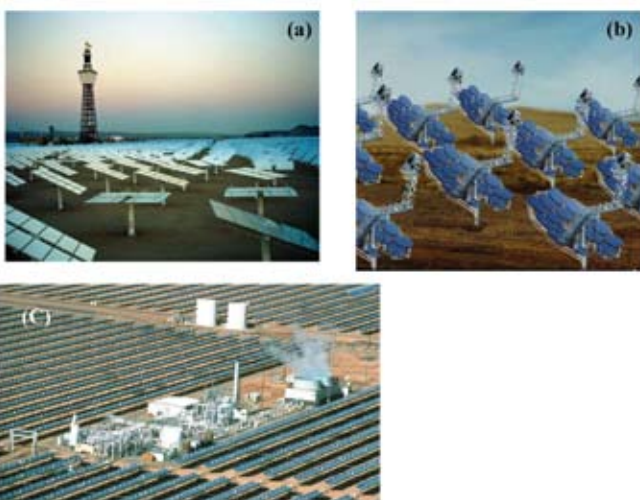


図3 代表的な中低温選択吸収被覆の製品と性能

3.2 太陽熱の中高温利用：熱発電

太陽熱発電は重要な太陽エネルギーの利用方法の一つである。太陽光発電のコストが非常に高い中であって、太陽熱発電技術には特に重要な意義がある。太陽熱発電とは、集光集熱器を利用し太陽の放射エネルギーを熱エネルギーに変換し、熱力学サイクルによって持続的に発電する技術である。1980年代にアメリカ、日本、イスラエル、ドイツ、イタリア、ロシア、オーストラリア、スペインなどの国々が相次いで多種多様なモデル装置を開発したことにより、太陽熱発電技術の発展が促進された。アメリカのSunlab共同実験室の研究によると、2020年位までに太陽熱発電のコストが約0.05米ドル/ KWhになるといふ。その際には、高出力発電によって従来型エネルギーからの転換を実現する最も経済的な手段の一つとなるだろう。

目下各国で応用されている主な太陽熱発電システムは、図4で示すタワー式、ディッシュ式、トラフ式の3種類である。このうちトラフ式システムは1990年代初めに商業化が実現しているが、他の2種類は依然として商業化に向けた実証段階にある。2007年末における太陽熱発電システムの設置容量は、全世界で464MWだった。加えて目下建設中または計画中の太陽熱発電容量は3717MWである。IEAは2010年における太陽熱発電の容量を、市場シェアの5%となる1025TWh/aと予測している。また2020年までには市場シェアが10%に達すると予測している。国際エネルギー機関(IEA)が2005年に予測した集光型太陽熱発電のコストは次のとおりである。トラフ式は2012年に0.05米ドル/ KWh、タワー式は2018年に0.04米ドル/ KWh、ディッシュ式は2025年に0.06米ドル/ KWh。



◎図4 3種類の太陽熱発電方式(a)タワー式(b)ディッシュ式(c)トラフ式

中国における太陽熱発電技術の研究は歴史が浅く、1970年代になって初めて基礎研究が始まった。「第7次五年計画」の期間中に湘潭電機工場がアメリカ・スペース・

エレクトロニクス社と提携し、2ユニット5kwの放物面鏡を利用した集光型太陽熱発電機を開発した。しかし高価格だったほか、工法、材料、部品、関連技術などの面で根本的な問題解決に至らなかったため、販売や実用は実現しなかった。アメリカカリフォルニア州にあるLUZトラフ式太陽熱発電所が首尾よく操業を開始したことは、中国でも広く注目を集めた。そして当該ユニットを導入し、チベット自治区のラサに35 MWのLUZトラフ式太陽熱発電所を建設することが計画された。当時実施されたフィージビリティスタディーによると、当該発電所の電力コストが約1.1元/ KWhで、運営コストが0.1元/ KWhだった。ラサ地区の石炭火力発電所の電力コストである0.8元/ KWhと比較してもメリットがあると判断できた。2005年に中国河海大学、南京春輝公司、イスラエルのEDG社が提携して、南京に70KWの空気冷媒を利用したタワー式発電所を建設した。2006年に設立された上海工電能源科技有限公司が、タワー式熱発電所の研究に従事するようになった。同じく2006年にアメリカの企業（中国語による社名表記は「新霓虹」）と西藏花冠公司が提携し、天津に空気伝熱発電の試験装置が作られた。熱による電力は1000KWを超えた。2007年、ドイツのソーラー・ミレニアム社と内蒙緑能公司がオルドスに1000MWの発電所を建設することで合意した。そのうち第1期プロジェクトは50MWである。同じく2007年に南京市は東南大学によるトラフ式システムの開発を支援することを決めた。2008年に広東省科学技術庁は、東莞康達機電グループによる100KWのトラフ式熱発電プロジェクトを支援するための特別予算を計上した。この分野における中国科学院の研究は、電工研究所が担当しており、中国初の太陽熱発電所の研究や建設を目標としている。発電所は2010年に完成し送電を開始する予定である。

総合的に評価すると、中国における太陽熱発電分野の研究は依然として遅れており、国際水準に遠く及ばない。

四、結論

以上のことから現段階における太陽エネルギーの利用状況について、二つの特徴を挙げることができる。第一の特徴は、技術力の向上に伴いさまざまな方式が試されていることである。原子力発電と比較すると太陽エネルギー技術は簡単そうに見えるかもしれないが、現状では標準石炭数十億トンに相当する大きなエネルギーを生じさせることはできず、画期的な新技術の開発が不可欠である。第二の特徴は、化石燃料やその他のエネルギー技術の継続的なコスト上昇の後に本格的な利用が始まるという点である。太陽エネルギーの利用に関する発展傾向については次のように述べるができる。太陽エネルギーの利用は、その他のエネルギーと比較した直接的な生産コストおよび間接的な環境負荷（気候変動や炭素）に左右される。前者の軽減や後者の増大が進むことによ

り、太陽エネルギーの利用促進が合理的なものとなる。この過程は時間を要するものだが、人類がエネルギーや気候変動に関する問題を解決する上で、太陽エネルギーの利用が重要な選択肢となることに間違いはない。

2009年12月7日、12日間にわたる「国連気候変動枠組条約」第15回締約国会議および「京都議定書」第5回締約国会議がデンマークの首都コペンハーゲンで開催される。コペンハーゲン気候会議に先立ち中国政府は、2020年までにGDPあたりの二酸化炭素排出量を2005年比で40～45%削減することを発表した。これは中国政府が温室効果ガスの排出量削減に関して初めて公表した具体的な数字である。費用や技術面に関するフィージビリティス

タディーによると、温室効果ガスの排出量削減目標を実現するためには、GDP1%に相当する代価が必要となる。中国は「再生可能エネルギー法」を制定し施行することにより、太陽エネルギー産業の発展を政策面で支えている。京都議定書の批准、環境保護政策の推進、国際社会に対する公約などは、太陽エネルギー産業にとってチャンスとなるだろう。また西部大開発によっても太陽エネルギー産業に巨大な国内市場が形成されている。さらに中国政府によるエネルギー戦略の調整も、再生可能エネルギーの開発に対する支援を増大させている。これらすべてが中国における太陽エネルギー産業に絶好の機会をもたらしている。

中国における低炭素社会づくりの取り組み

●Profile●



大野木 昇司 おのぎ・しょうじ ●日中環境協力支援センター有限会社 取締役社長

1972年生。1995年、京都大学工学部衛生工学科卒業。1998年、京都大学大学院エネルギー科学研究科修士課程修了、同年中国留学開始。2002年、北京大学環境学院修士課程修了。天津日中大学院専任講師、国土環境(株)北京事務所技術渉外主任、(社)海外環境協力センター客員研究員を歴任した後、2005年に日中環境協力支援センター(有)を設立し、取締役社長に就任。2008年からは桜美林大学・北東アジア総合研究所の客員研究員や科学技術振興機構・中国総合研究センターの社会科学系ステアリングコミッティ委員、国立奈良先端技術大学院大学産学連携アドバイザーを兼任。その他、立命館サステナビリティー学研究センター客員研究員、中国環境産業協会循環経済委員会の諮問委員、中国エネルギー研究会『中外能源』雑誌編集委員なども兼任。

1. COP15をめぐる国際情勢と課題

デンマーク・コペンハーゲンで開かれた、国連気候変動枠組み条約第15回締約国会議(COP15)は、会期を1日延長した12月19日、日米欧中印等主要26カ国がまとめた拘束力を持たない「コペンハーゲン協定」の「留意」決議を採択し閉幕した。米国や一部途上国も同様の目標を定めることを視野に入れた新しい枠組み作りを目指す先進国と、あくまでも先進国が主たる責任を負う現行の延長が望ましいと主張する新興国・途上国との間の激しい衝突が繰り返された。中国は、途上国グループのリーダーとして、最後まで「共通だが区別ある責任」の主張を曲げず、削減目標は打ち出すがあくまでも自発的なものであり、第三者による検証は受け入れられないとして、削減目標を明記した政治合意を拒否した。CO2総排出量が世界第1位、経済力でも第2位に躍り出ながらも、途上国のリーダーとしての地位を手放さず、強硬姿勢で同会議を決裂寸前にまで追い込んだ同国への批判の声は強い。

COP15で留意採択された同協定を基に、ポスト京都枠組み作りへの議論は続き、中国を含む途上国も排出削減行動の報告がなされることになるが、中国に対しては自国だけでなく、そのインパクトから国際社会においても責任を果たすことが強く願われている。

2. 中国政府の気候変動対策の基本姿勢と低炭素への関心の高まり

中国政府は2007年、それまで気候変動対策に消極的だった姿勢を転換し、国際社会で積極的な行動をするようになった。2007年に途上国で初となる「中国気候変動対策国家方案」を国内外に向けて公布し、第11次五カ年計画期間(2006～2010)の気候変動対応の基本原則や政策措置を明確にし、2008年には「中国気候変動対応政策と行動」白書を発表し、中国気候変動活動と実施に関する国家方案による成果を系統的に紹介した。これらは国際社会に向けたものであるが、国内的には、第11次五カ年計画で2010年までに単位GDP当たりエネルギー消費の20%削減、再生可能エネルギーの割合を現在の7%未満から10%への引き上げを国家目標にした。2007年に再生可能エネ

ルギー中長期発展計画を発表し、2020年までに再生可能エネルギー割合を15%まで引き上げるという数値目標を打ち出した。2009年に入ってから、中国の国家指導者も政策策定に当たって「低炭素」を強調するようになるなど、低炭素社会・低炭素経済の概念が広まりつつあり、COP15の報道でその関心はさらに高まった。

3. 具体的政策と取り組み

先の目標達成に向けて、省エネ、新エネ、自動車対策、林業、CCS、国際協調とCDM、低炭素都市プロジェクトといった領域別に、政策、法制、計画、技術開発、優遇、実証事業などの面から、様々な取り組みを進めている。これらについて俯瞰的にまとめた。

3.1. 省エネ分野の政策と取り組み

第11次五カ年計画で、中国は単位GDP当たりエネルギー消費量を20%削減するという強制目標を定めた。報道によれば2009年10月現在、累計13%以上削減したといい、同目標は達成される見通しである。また、国家发展改革委員会は2006年に第11次五カ年計画10大重点省エネ事業を発表し、2010年末までに石炭換算2.4億トン分の省エネ目標を定めて各事業を進めている。この対象事業は、石油節約・代替事業、工業用石炭ボイラー改造事業、区域コージェネ事業、余热余圧利用事業、電機システム省エネ事業、エネルギーシステム改善事業、建築省エネ事業、グリーン照明事業、政府機関ビル省エネ事業、省エネモニタリング事業である。2009年4月までに、10大事業に150億元を投入し目標達成率は62.5%となった。さらに2009～2010年で、4000億元以上の投入を予定している。また同委員会は、2006年より企業1000社省エネアクションプランを打ち出し、鉄鋼、非鉄金属、石炭、電力、石油、化工、建材、紡績、製紙等高エネルギー産業における高エネルギー消費企業を約1000社選び、石炭換算1億トンの省エネ実現に向けて省エネ指導を進めてきたが、現在までに同目標の達成が報じられており、五カ年計画の省エネ目標を2年前倒しで達成した。

更に、エネルギー利用効率を向上させるため、旧式生産能力の淘汰が進められ、中国政府は発展が遅れている

地域に対し、2008年中央財政から62億元を投じ整理を行った。通年で発電所325基の小型火力発電ユニット1669万kW分を閉鎖・停止させ、旧式セメント生産能力5300万トン分を淘汰させるなどした。2009年上半年期でも、引き続きエネルギー効率の低い小型火力発電ユニット1989万kW分を淘汰し、累計で小型火力発電所5407万kW分を整理した。これにより、第11次5ヵ年計画期間における5000kW閉鎖の目標が1年半前倒しで達成された。

産業全体に対してだけでなく、製品に対する省エネの取り組みとして、2005年から実施されたエネルギー効率ラベル制度は4年間で家電・工業・照明等の15品目6万製品に適応が広がり、累計で石炭換算3000万トン余の省エネを達成した。このほかに省エネ認証ラベル制度を普及させ、この認証を取得した製品について「省エネ政府調達リスト」に組み入れ、リスト入りした省エネ型製品を優先的に購入する政府調達制度も進められ、省エネ製品の普及を後押ししている。その他、ESCO事業については、中国は立ち遅れてはいるものの、北京や上海等の大都市を中心に支援法制が進んだ。

3.2. 新エネの政策と取り組み

2006年に施行された再生可能エネルギー法や、2020年までの各電源の計画目標を示した再生可能エネルギー中長期発展計画に基づき、2008年以降、系統連系補助金、モデル事業補助、新エネの建築利用への推進、優遇税制等の政策が定められたほか、技術開発支援の対象にするなど、国内の再生可能エネルギー発展を後押ししている。

〔中国再生可能エネルギー発電の発展状況〕

	2008	2007	成長率(%)
水力発電 (億 kW)	1.72	1.45	19.6
風力発電 (億 kW)	1217	604	101.5
太陽光発電 (万 kW)	15	10	50
太陽熱温水器 (億㎡)	1.25	1.1	13.6
バイオマス発電 (万 kW)	315	300	5
バイオ燃料エタノール (万トン)	160	120	33.3

出典：「2050 中国エネルギーと炭素排出報告」

水力発電では、2008年末までに水力発電の導入量は1億7200万kWに達し、年間5633億kWh発電し、年間発電量の16.3%に上り、水力発電導入・発電量は長きにわたり世界一を守っている。

風力発電では、2005年2月の『再生可能エネルギー法』公布以降、急成長を遂げ、3年連続で倍加成長している。2008年だけでも614万kWの新規導入量があり、同年末の累計導入量は1217万kWとなり、全発電容量の1%を占め(発電量では0.38%)、世界第4位となった。2009年末には2628万kWになる見込みで、米国を抜いて世界一となる日も近づいている。

太陽エネルギー利用については、太陽光発電と太陽熱

利用とに分けられる。2008年末までに、中国の累計太陽光発電容量は15万kWとなった。中国の結晶シリコン型太陽電池製品の生産量は1573MWで世界一になり、世界総生産規模の25%を占めるまでになっている。しかし中国国内市場需要を大幅に上回り、生産コストの高さから国内では普及せず、太陽電池の95%以上が輸出されているため、国内累計導入量は世界全体140MWの1%にも満たない。これを打開するため、2009年7月に金太陽(ゴールデンソーラー)計画を定め、太陽光発電プロジェクトに補助金を支給することとなった。一方、太陽熱利用分野では、設置面積が2008年末までに累計1億2500万㎡に達し、世界の太陽熱温水器総使用量の60%以上を占め世界一の座を確固たるものとしているほか、生産量・輸出货量も世界一である。

バイオマスエネルギー推進については、農林水産廃棄物・生活ゴミ・工業廃棄物や燃料用作物など様々な種類の原料を利用し、焼却発電やメタンガス化・固形燃料化、燃料エタノール・バイオディーゼル等のバイオ液化燃料生成といった多岐にわたる利用が進められている。2010年、2020年にそれぞれ、バイオマス発電導入量を550万kW、3000万kW、メタンガス年間利用量を190億㎡、440億㎡、非食糧作物系エタノール年間利用量を200万トン、1000万トン、バイオディーゼル年間利用量を20万トン、200万トンにするという中長期目標が設定されている。食糧作物利用禁止やくずわら価格の高騰、石油価格下落、多企業参入による競争激化など課題も多いが、今後の伸びに対する期待は高い。

地熱利用は、近年急速に発展しており、2008年の地熱開発による経済効果は71億元にも上り、CO2排出を596万トン削減した。現在地熱資源は主として暖房、発電、温泉、水産養殖、温室栽培などに活用されている。

原子力発電については、2008年には原子炉11基が稼働し、導入量が910万kWとなり、発電容量の1.3%を占めている。2008年に、100万kW級原子力発電14基建設の認可が下り、建設中の24基も含めた発電容量は2540万kWに上る。2007年に発表された中長期発展計画によれば、2020年までに原子力発電容量4000万kW、年間発電量2600～2800億kWhを目指している。

2008年末までに中国における再生可能エネルギー及び原子力発電の年間利用量は石炭換算で約2.5億トンとなり、一次エネルギー消費の8.9%を占めている。天然ガス消費量は789億㎡で、石炭換算1.1億トン相当となり、一次エネルギー消費量の3.8%を占めている。

このように、再生可能エネルギーは様々な政策的支援を受けながら発展をしているが、電源開発に比べ電力網建設が遅れている。再生可能エネルギーで発電された電力は全て系統連系する規則があるにもかかわらず、電力網側がその変動の激しい電力の流入によるダウンを恐れて一定量以上系統連系させない。このため蓄電装置やIT

を活用したスマートグリッドの整備による問題解決が期待されている。また多くの企業が再生可能エネルギー分野に参入しており、その生産能力過剰が懸念されている。2009年には太陽光発電と風力発電を生産能力過剰産業に指定し、新規参入に当たってのマクロ調整を行う流れになっている。

3.3. 自動車の対策と取り組み

近年の自動車台数の急増に対し、政府は小排気量自動車の消費税率引き下げによりエコ自動車の購入を奨励する等の産業推進策を打ち出しているほか、北京・上海・重慶等の13都市で公共サービス分野の省エネ・新エネ自動車(ハイブリッド、電動自動車、燃料電池自動車)普及実証事業を進めている。中国の新エネ自動車産業はここ数年で伸びてきており、中国独自で純電動自動車、ハイブリッド自動車、燃料自動車の開発を進めている。2007年には、長安汽車が独自開発した中国初のハイブリッド車が量産開始した。2010年には、一部都市でバイオディーゼル対応自動車の販売が始まる他、新エネ自動車発展計画が公布される予定である。

3.4. 林業によるCO2吸収

大規模植林によるCO2吸収の取り組みも積極的に行われている。中国の森林面積率は、建国当初10%にも満たなかったがずっと植林を続けてきた。2000年以降、中国の森林面積は大幅に増えてきており、今や砂漠化・土地劣化よりも植林のスピードの方が速くなり、砂漠化面積は減少に転じている。世界的に総森林面積が減少している中で、中国一国がアジア全体の森林面積増加量を押し上げている。特に、1998年の長江大洪水を受けて林業政策を転換し、2000年以降6大林業プロジェクト(①天然林資源保護、②退耕還林(傾斜耕地を森林・草地に戻す)、③三北(東北、華北、西北部)・長江中下流域防護林体系建設、④北京・天津風砂源整備事業、⑤重点地区における早生多収獲用材林基地建設、⑥野生動植物保護及び自然保護区建設)が本格化した。これにより、2010年目標である森林面積率20%を2年前倒して達成した。このような林業分野の取り組みは、中国のCO2吸収に大きな役割を果たしている。

3.5. CCSの政策と取り組み

世界的に注目される技術の一つにCO2回収貯留技術(CCS)が挙げられる。IEAの予測によれば、中国のCCS技術は2030年頃までに大きく進展し、2050年には利用が世界最多となるという。現状では、技術の未成熟、新エネやエネルギー代替につながる技術ではないこともあり、取り組みは限定的といえよう。現段階で中国には関連法規や管理体系枠組みがないが、同プロジェクトの影響は後代に渡り続くため、長期有効な枠組みが必要となる。

3.6. 国際協調とCDM

低炭素社会への取り組みは、もはや中国一国の問題ではない。そのため、中国政府は、国連気候変動サミット

やG8、APECなどを始めとした様々な国際的な舞台で国際社会との協調をしている。APECでアジア太平洋森林回復・持続的管理ネットワークを提唱したほか、2国間関係では、中豪、中韓、米中等で共同声明や協力協定等を結んだ。

中国は、CO2取引量ベースで84%を占める最大のCDMプロジェクトホスト国である。2009年9月までに中国による国連へのCDMプロジェクト申請数は632件に達し、これらプロジェクトの年間予想CO2排出削減量は1.88億トンとなる。全国では省級CDM技術サービスセンターが26ヶ所設置し1万人近くに研修を行うなど、国内CDM活動の開発や能力建設を進めている。国内批准プロジェクト2174件(2009年6月時点)のうち、批准件数トップ3省は、水力・風力資源が豊富で経済的に遅れている雲南、四川、内蒙古である。

3.7. 低炭素都市プロジェクト

2008年1月、上海市と河北省保定市は第1次「低炭素型都市発展プロジェクト」モデル都市として選ばれ、低炭素都市の実現に向け、WWFによる支援を受けて、建築省エネ、再生可能エネルギー、省エネ製品の生産・利用などの分野で、低炭素発展ソリューションを模索し、実行可能モデルを総括し、全国に波及させていく他、北京で低炭素発展に役立つ政策研究、プロジェクト総括・普及などを行っている。

4. 中国都市低炭素発展に向けて

現在中国では、日米欧等の事例を参考にしながら、選択すべき「低炭素発展」の方向性に関する議論を積極的に進めている。省エネ排出削減、エネルギー利用効率向上、化石燃料低炭素化、再生可能エネルギー開発、炭素・環境税整備、技術開発支援、エネルギー国際協力などを通じた低炭素社会建設をいかにして進めていくかに注目が集まる。

中国は新興国として、環境問題に配慮しながらも経済発展しなければならないという立場を貫いている。その「低炭素型発展」モデルを作り上げるためには、発展そのものを低炭素化していかなければならない。産業ばかりでなく、市民生活においても、経済発展に伴う都市部の大量消費浪費型生活スタイルが形成されつつあるが、これを早期に低炭素型に切り替えるよう宣伝教育を強化していくことも重要である。増え続ける自動車台数を抑える経済政策を導入し、公共交通を主とする交通体系を整え、省エネ家電・建築・製品を優遇普及させるなどの政策を継続させていく必要がある。

5. まとめ

気候変動をめぐる中国の立場は、新興国の一代表国であると同時に、温室効果ガス排出量世界一の大国でもあるため、その言動には常に世界の目が光っている。今回

のCOP15に先立ち、初めて削減目標を提示したことは、先進国の示す新枠組みへの新興国の歩み寄りの先鞭となるのではないかという点で大きな関心を集めた。

中国は、低炭素社会実現に向けて、省エネ・新エネ・林業等さまざまな取り組みを進め、具体的な数値目標を達成・改善するなどの成果も上がってきている。しかし省エネ・新エネ技術は目先の効果ばかりが注目されるものの、ライフサイクル全体で見たときの環境効果は意識さ

れないことが多く、果たして本当に地球・地域環境の改善になっているのか、全体として低炭素型社会実現に向かっているのかという、専門的な分析評価はなされないまま、バブル的ブームとして持て囃されている感は否めない。重要な問題として世界が認識を一つにし、注視している現在だからこそ、盲目的な新エネ・省エネバブルから一歩立ち止まり、検証していくことが必要であろう。

参考文献

-
- 「中国気候変動対応政策と行動―2009年度レポート」, 国家発展改革委員会, 2009年11月
「2050中国エネルギーと炭素排出報告」, 2050中国エネルギー・炭素排出研究課題チーム, 科学出版社, 2009年7月
「中国気候変動対応政策と行動白書」, 国家発展改革委員会, 2008年10月
「原子力発電中長期発展計画」, 国家発展改革委員会, 2007年10月
「再生可能エネルギー中長期発展計画」, 国家発展改革委員会, 2007年8月
-



環境・エネルギー

Part 2 — 低炭素社会実現に向けた新技術の開発

環境

はじめに

周知の通り、地球温暖化対策として鳩山由紀夫首相は二酸化炭素などの温室効果ガスの排出量を「2020年（平成32年9までに1990年比で25%削減）」という中期目標を掲げています。

日本がこの目標をクリアしていくためには、低炭素社会実現に向けた新技術の開発が欠く事はできません。今回の特集で日本側の論者は、現在の日本の「新技術」の中心である水素と太陽電池に関する詳細な論考を提供しています。

一方、2008年時における発電量・発電設備容量の約8割

が火力を占め、さらに火力発電に使用される燃料の中心がいまだに石炭である中国にとっての「新技術」のあり方は日本と異なります。石炭燃焼に伴うCO₂排出の削減に技術開発が注がれている様子が、今回の中国側の論文から読み取れるものと思います。今回の特集で、日本と中国、それぞれ条件の異なる国々での「新技術」のあり方を紹介いたしました。読者の皆様の理解の一助となりましたら幸いです。

中国総合研究センター

バイオマス発電システムのエネルギー貢献度

Profile



趙 黛青 Zhao Daiqing ●中国科学院広州エネルギー研究所エネルギー戦略センター主任/教授

1958年04月生まれ。1997年日本国東北大学熱エネルギーコース専攻卒業。工学博士。東北大学と名古屋大学での研究を経て、2002年に中国科学院の「100人計画」（海外の優れた人材を選出する計画）に選ばれ、中国科学院広州エネルギー研究所に勤務。現在中国科学院広州エネルギー研究所所長補佐、エネルギー戦略研究センター主任、燃焼実験室主席研究員、広東省政府発展研究センター特約研究員。主に新エネルギーの発展戦略と低汚染燃焼技術などの分野に従事。研究内容はそのほかに再生可能エネルギーの発展戦略と政策研究、エネルギー発展の背景分析、エネルギー技術の環境コスト分析、クリーンな発展メカニズムを推進する能力の建設、再生可能エネルギーの技術的ライフサイクル総合アセスメント、高効率低汚染の燃焼技術、マイクロ燃焼工学など。発表研究論文は100編以上、7冊の専門書の編集に参加（『中国のエネルギーと持続可能な発展』、『中国の2050年までのエネルギー科学技術発展ロードマップ』など）、日本語翻訳専門書（『燃焼汚染物の生成と抑制』）も1冊。また、ソフトエネルギー科学研究会の報告も40回以上。

共著者：李莉 廖翠萍 林琳 馬隆竜 吳創之

摘要：

バイオマスエネルギーは重要な再生可能エネルギーの一つであり、近年ますます注目されてきている。しかし、バイオマスエネルギーの開発と利用が社会へのエネルギー供給の増加にどれほど貢献しているのかについては、さまざまな議論がある。そこで、本稿は典型的なバイオマス原料と発電システムを研究対象とし、ライフサイクルアセスメント理論に基づいてバイオマス発電システムのエネルギー収支モデルを研究するものとする。これによって、バイオマス発電システムが社会へのエネルギー供給の増加にどれほど貢献するのかを分析する。分析の結果、次の通り明らかになった。すなわち、バイオマス発電システムの純エネルギー生産率はバイオマス発電システムの効率と原料の種類によって決定され、全ライフサイクルにおけるエネルギーの収支比は14～20である。また、エネルギーの再生度指標は概ね95%～96%である。このことから、農作物の茎を原料とするバイオマス発電は、高いエネルギー貢献度とエネルギー再生性を備えていると言えるであろう。

研究の背景

バイオマスエネルギーはクリーンな再生可能エネルギーの一種であるが、2006年の開始と共に、農林バイオマス併合発電が急速に発展してきた。対応エネルギーの欠点と気化による変化という二大問題はああるものの、中国は農民の就業先を増やし、農民の収入を向上させ、新しい農村の建設を促進することを目指してバイオマス発電を発展させようとしたのである。しかし、同程度の熱効率を持つ発電メカニズムと比較するとバイオマスエネルギーの密度は低く、バイオマス発電の燃料消費率は火力発電に比べ非常に高い。さらに、バイオマスエネルギーの資源は分散していることから、発電過程に入る前の資源作物の収集、梱包または破碎処理、保管、運搬などの過程でのエネルギー投入も非常に大きい。これらはバイ

オマス発電が社会へのエネルギー供給に果たす貢献度を増大させることに直接影響するものである。そこで、バイオマス発電を規模的に発展させる初期段階においては、バイオマス発電のライフサイクルにおけるエネルギー投入量と生産量を算定しておく必要がある。この問題に関する研究と報道は海外において非常に多くなされているが、発電システムの規模、バイオマスの種類、農業の機械化の水準が異なることから、本稿では中国の代表的なバイオマス発電システムを5つ取り上げることとする（発電システムデータについては表1を参照されたい）。方法としてはライフサイクルリスト分析法を採用し、エネルギーの投入と生産を分析してバイオマス発電のライフサイクルにおけるエネルギー消費の主要影響要素を明らかにしたい。また、バイオマス発電システムのエネルギー貢献度を評価する基準値を提示して、バイオマス発電のシステム最適化と技術を選択するに当たっての一助となることを目指したい。

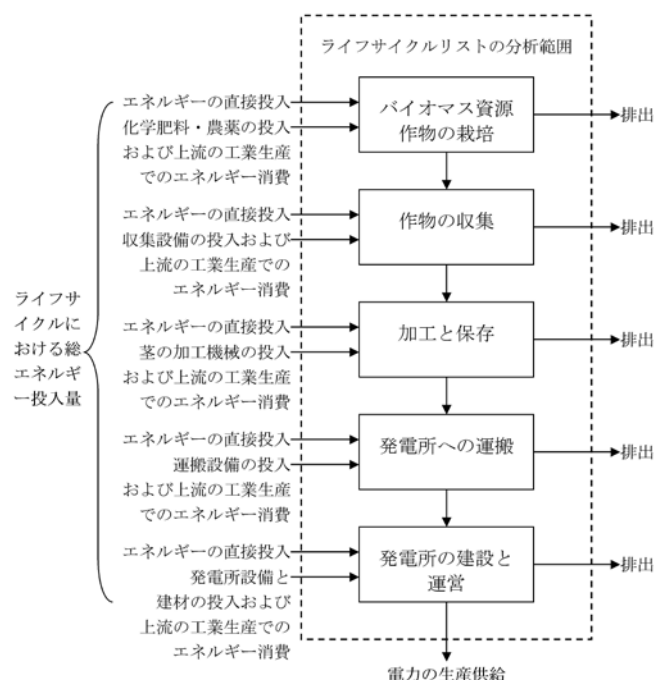
技術類型	直接燃焼		気化発電		混合燃焼
設備規模	25MW	24MW	6MW	3MW	60MW
茎の種類	とうもろこしの茎	とうもろこしの茎	とうもろこしの茎	とうもろこしの茎	とうもろこしの茎
茎の基本熱量値	15472kJ/kg	15472kJ/kg	15472 kJ/kg	15472 kJ/kg	15472 kJ/kg
ボイラーの基準値	高温高压	中温中压	コンバインド	ガス燃焼発電	超高压
	9.2MPa、540℃	3.822 MPa、450℃	サイクル ガス燃焼発電 5MW 蒸気発電 1MW	3MW	13.73MPa、540℃
発電ユニットの配置	25MW	2×12MW	5MW+1MW	3MW	140MW
年間利用時間	6500	6500	6500	6500	6500
発電所使用電力	11%	11%	10%	7%	9%
年間発電量	162500 MWh	156000 MWh	39000 MWh	19500 MWh	390000 MWh
年間供給電量	144625 MWh	138840 MWh	35100 MWh	18135 MWh	354900 MWh
発電効率	31.5%	24.5%	28%	21.5%	36.5%
茎の消費率	0.739kg/kWh	0.950 kg/kWh	0.831 kg/kWh	1.082kg/kWh	0.637kg/kWh
茎の年間消費量	120033t/年	148154 t/年	32409 t/年	21103t/年	248615t/年
平均運搬距離	35km	40km	20 km	15km	50km

表1 バイオマス発電システムデータ一覧

1. バイオマス発電システムのエネルギー均衡モデルに関する研究

1.1 リスト分析の範囲

本研究はバイオマス用の農作物の茎を農業栽培の副産物と位置づけ、研究範囲に農業栽培を含むものとする。また、バイオマス発電のライフサイクルをバイオマス資源作物の栽培、作物の収集、加工と保管、発電所への運搬、発電所の建設と運営という5つの過程に区分するものとする。ライフサイクルでのエネルギー投入について、各ライフサイクル過程において直接投入される形式で消費されるエネルギー（例えば、発電所への運搬という過程での運搬用軽油の消費や発電所の発電過程でのバイオマス燃料の消費）だけでなく、各ライフサイクル過程に関連する燃料生産にいたる工業生産過程(上流)で消費されるエネルギー（例えば、バイオマス資源作物の栽培に投入される窒素肥料の生産過程でのエネルギー消費や発電所建設に必要な原料の生産過程でのエネルギー消費）も計算することとした。これに関しては、図1を参照していただきたい。



◎図1 バイオマス発電システムライフサイクルリストの分析範囲

1.2 計算モデル

計算モデルには主にバイオマス資源作物栽培モデル、作物収集モデル、加工保管モデル、発電所運搬モデル、発電所エネルギー均衡モデル、設備原材料の消費量統計モデルがある。

1.2.1 バイオマス資源作物栽培モデル

茎の生産量は農作物の生産量と穀粒・茎葉比から推定する。バイオマス資源作物の栽培過程で消費される農機

具の軽油、化学肥料、農薬、生産物の排出は茎と農作物製品の価値に比例させて分配する。計算公式は以下の通りである。

$$Q_{biomass} = Q_{product} \times r \quad (1)$$

$Q_{product}$: 農作物製品生産量 (kg/hm²)

$Q_{biomass}$: 農作物の茎の生産量 (kg/hm²)

r : 農作物の穀粒・茎葉比

農作物の茎の物質とエネルギー消費は次のように比例分配する：

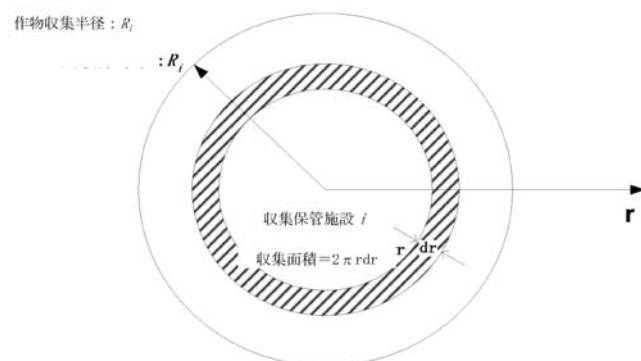
$$\frac{Q_{biomass} \cdot p_{biomass}}{Q_{biomass} \cdot p_{biomass} + Q_{product} \cdot p_{product}}$$

$p_{product}$: 農作物製品の市場価格 (元/kg)

$p_{biomass}$: 農作物の茎の市場価格 (元/kg)

1.2.2 作物収集モデル

作物収集モデルにおいては、図2で示すように作物収集区域を円形に設定し、円の中心に収集保管施設があるものとする。また、茎の収集範囲において同一種の茎の単位面積当たりの生産量は等しく、均等に分布しているものと仮定する。すなわち、農作物と非農作物が土地を占める割合は区域全体において等しいものとするのである。



◎図2 作物収集モデル概略図

作物収集モデルの相関変数の定義と計算公式は以下の通りである。

q : 単位耕地面積当たりの茎の生産量 (t/hm²)

k_1 : 耕地面積が土地面積に占める割合

k_2 : 茎収集係数

k_3 : 茎利用可能係数

r : 農作地から収集保管施設までの距離 (km)

Q_i : 第*i*収集保管施設の担当茎農作物収集量 (t/y)

R_i : 第*i*収集保管施設の茎農作物収集半径 (km)

TV_i : 第*i*収集保管施設の茎農作物収集運搬量 (km·t)

第*i*収集保管施設の担当茎収集量 Q_i と農作物収集半径 R_i は、次の関係を満たす。

$$Q_i = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot q \cdot \pi R_i^2 \quad (2)$$

第*i*収集保管施設の茎農作物収集運搬量は次の通りである。

$$TVI = \int_0^{R_i} k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot q \cdot 2\pi r^2 dr = \frac{2}{3} \pi R_i^3 \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot q) \quad (3)$$

農作物収集過程の運搬燃料の消費の計算公式は次の通りである。

$$FC_{collecting,y} = \sum \frac{4}{3} R_i \cdot Q_i \cdot \frac{FCR_{tractor}}{100} \cdot 0.85 \quad (4)$$

$FC_{collecting,y}$: 農作物収集過程の燃料消費量 (kg/y)

$FCR_{tractor}$: 小型トラクターの燃料消費率 (L軽油/100t・km)

1.2.3 加工保管モデル

茎を加工・保管する過程には、茎の破碎または梱包、場内中継搬送、積み重ね保管、取り出し、運搬車積み込みなどの工程がある。この過程の直接エネルギー消費は加工処理設備でのエネルギー消費であり、エネルギーの種類は主に電力と軽油である。

設備のエネルギー消費の計算公式は次の通りである。

$$EC_{treating\&storing,y} = \sum_j \left(\sum_k CF_k \cdot FCR_{k,j} + 0.1229 \cdot DP_j \right) \times WH_{j,y} \quad (5)$$

$EC_{treating\&storing,y}$: 加工保管過程の直接エネルギー消費量 (kgce/y)

CF_k : 燃料kの標準炭換算係数 (kgce/kg)

$FCR_{k,j}$: 加工保管過程における機械jの燃料k消費率 (kg/h)

DP_j : 加工保管過程における機械jの電力駆動仕事率 (kW)

$WH_{j,y}$: 加工保管過程における機械jの年間運行時間数 (h/y)

1.2.4 発電所運搬モデル

発電所運搬モデルはある種の平面物流システムであり、バイオマス発電所が物流の中心となる。加工後の茎燃料は収集保管施設から発電所に運ばれるため、収集保管施設は発電所周辺の郷・鎮・村落に分布することになる。発電所運搬過程の物質とエネルギーの消費および排出は、主に運搬機材の使用によるものである。このモデルは次のように設定される。

① 運搬機材を統一し、中型トラクターを使用することにしその基準値を採用するものとする。

② 燃料の消費については空載と満載を区分せず、燃料消費量の平均を取る。

発電所に茎を運搬する過程のエネルギー消費計算公式は次の通りである。

$$FC_{transp-plant,y} = 2 \times \frac{0.85}{100} \cdot FCR_{tractor} \cdot D_{transp-plant,y} \cdot Q_{transp-plant,y} \quad (6)$$

$FC_{transp-plant,y}$: 発電所運搬過程の燃料消費量 (kg/y)

$FCR_{tractor}$: 中型トラクターの燃料消費率 (L軽油/100t・km)

$D_{transp-plant,y}$: 発電所運搬過程の平均運搬距離 (km)

$Q_{transp-plant,y}$: 発電所へ運搬する茎の量 (t/y)

1.2.5 設備原材料の消費量統計モデル

ライフサイクル過程は機械設備の投入とその上流の工業生産過程によってエネルギーを消費しているものである。そこで、本研究は作物収集、加工保管、発電所運搬

の各過程での設備投入に関して、主に鋼材の消費とその上流で鋼材を生産する際のエネルギー消費について考慮することとした。複数の過程での鋼材の消費量の計算公式は次の通りである。

$$M_{steel,i,y} = \sum_j \frac{W_{i,j}}{1000} \times \frac{BF_{i,j,y}}{P_{i,j} \cdot WH_{i,j,y}} \times \frac{WH_{i,j,y}}{LH_{i,j}} \quad (7)$$

$M_{steel,i,y}$: 過程iでの鋼材の消費量 (t/y)

$W_{i,j}$: 過程iでの機械jの重量 (kg)

$BF_{i,j,y}$: 過程iで機械jの需要を満たすためのバイオマス燃料の総量 (t/y)

$P_{i,j}$: 過程iでの機械jの加工処理能力 (t/h)

$WH_{i,j,y}$: 過程iでの機械jの年間運行時間数 (h/y)

$LH_{i,j}$: 過程iでの機械jの使用年限 (h)

2 バイオマス発電システムのエネルギー収支分析

25MWバイオマス直接燃焼発電を例として検討してみると、バイオマス発電のライフサイクル各過程におけるエネルギー収支の計算結果は表2の通りとなる。

まず、本研究では次のように定義するものとする。すなわち、(純エネルギー生産率)=(エネルギー投入量)/(エネルギー生産量)である。これはバイオマス発電システムのエネルギー貢献度を反映させるために用いられる。この定義におけるエネルギーの投入は化石燃料によってなされ、エネルギーは電力として生産される。また、中国の火力発電が発電する際のエネルギー消費は377kgce/MWhであることを参考にして、相当する化石エネルギーのエネルギー量に換算する。

また、本研究では次のようにも定義する。すなわち、(エネルギー再生可能性)=(全ライフサイクルにおける総エネルギー投入量-全ライフサイクルにおける化石エネルギー投入量)/全ライフサイクルにおける総エネルギー投入量

	ライフサイクル過程	エネルギーの直接投入 (kgce/MWh)	上流の工業生産におけるエネルギー消費 (kgce/MWh)	合計 (kgce/MWh)
(1)=1.1+1.2	資源作物の栽培	2.44	6.55	8.99
	1.1 化学肥料の施用	0.00	6.28	6.28
	1.2 農業用軽油の使用	2.44	0.27	2.71
(2)	作物の収集	0.38	0.18	0.56
(3)=3.1+3.2+3.3+3.4	加工と保管	1.73	3.45	5.18
	3.1 茎の梱包	1.37	3.11	4.47
	3.2 場内中継搬送	0.05	0.13	0.19
	3.3 積み重ね保管	0.04	0.09	0.13
	3.4 取り出しと運搬車積み込み	0.27	0.13	0.40
(4)	発電所への運搬	4.32	0.52	4.84
(5)	発電所の建設と運営	0.21	0.55	0.76
(6)=(1)+(2)+(3)+(4)+(5)	化石エネルギーの投入量	9.08	11.25	20.33
(7)	バイオマスエネルギーの投入量	438.71 kgce/MWh		
(8)	総エネルギー投入量	459.04 kgce/MWh		
(9)	エネルギー生産量	1MWh、化石燃料 377kgce に相当		
(10)=(9)/(6)	純エネルギー生産率	377/20.33=18.57		
(11)=[(8)-(6)]/(8)	エネルギー生産可能度	(459.04-20.33)/459.04=0.96		

◎表2 25MWバイオマス直接燃焼発電のライフサイクル別エネルギー収支リスト分析system

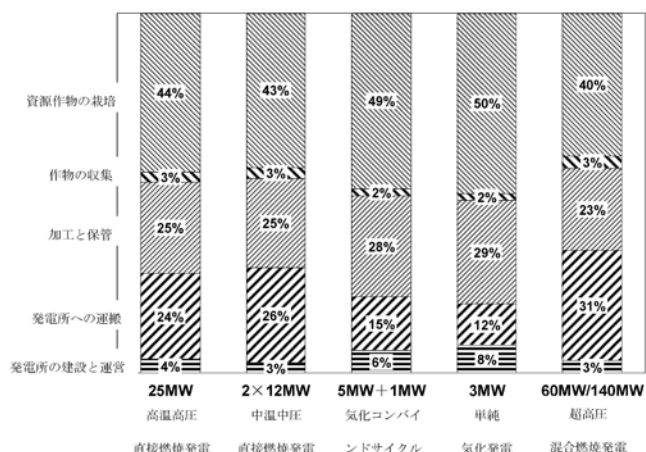
ギー投入量) / (全ライフサイクルにおける総エネルギー投入量) である。これはバイオマス発電システムに投入されたエネルギーの再生可能性を反映させるために用いられる。

表3はバイオマス発電のライフサイクル別エネルギー収支リストを、技術コースごとに分析してまとめたものである。これによると、バイオマス発電のライフサイクル別総エネルギー投入量は、技術的コースごとに大きく異なっていることがわかる。しかし、あるライフサイクルにおける化石エネルギー投入量がそのライフサイクルにおける総エネルギー投入量に占める割合は、すべて概ね4%~5%であり、エネルギー再生可能指標も概ね95%~96%である。このことから、農作物の茎による発電システムへのエネルギー投入は、非常に高い再生可能性を備えていると言うことができる。

技術ルート		高温高压 直接燃焼	中温中压 直接燃焼	気化コンバイ ンドサイクル	単純気化	20%混合燃焼
バイオマス発電容量		25MW	24MW	6MW	3MW	60MW
発電ユニットの配置		25MW	2×12MW	5MW+1MW	3MW	140MW
化石エネルギー の投入 (kgce/MWh)	資源作物の栽培	8.99	11.56	10.01	12.61	7.59
	化学肥料の施用	6.28	8.07	6.99	8.80	5.30
	農業用軽油の使用	2.71	3.49	3.02	3.81	2.29
	作物の収集	0.56	0.78	0.40	0.44	0.63
	加工と保管	5.18	6.66	5.76	7.26	4.37
	茎の梱包	4.47	5.75	4.97	6.27	3.77
	場内中継搬送	0.19	0.24	0.21	0.26	0.16
	積み重ね保管	0.13	0.16	0.14	0.18	0.11
	取り出しと 運搬車積み込み	0.40	0.51	0.44	0.56	0.33
	発電所への運搬	4.84	7.11	3.08	2.91	5.83
	発電所の建設と運営	0.76	0.77	1.27	1.90	0.65
合計	20.33	26.88	20.52	25.12	19.07	
バイオマスエネルギーの投入量 (kgce/MWh)		438.71	564.06	488.07	615.12	370.29
総エネルギー投入量 (kgce/MWh)		459.04	590.94	508.58	640.24	389.36
エネルギー生産量		1MWh、化石エネルギー377kgceに相当				
純エネルギー生産率		18.6	14.0	18.4	15.0	19.8
エネルギー再生可能性		95.57%	95.45%	95.97%	96.08%	95.10%

◎表3 バイオマス発電の技術ルート・ライフサイクル別エネルギー収支リスト分析結果

まず、化石エネルギーの投入比率はバイオマス資源作物の栽培過程で最大であり、約40%~50%である。これは主に施用する窒素肥料を川上で工業生産する際のものである。次に、加工保管過程の化石エネルギー投入比率は約25%~30%であるが、これは主に茎の梱包工程において機械でエネルギーを消費した際のものである。また、発電所運搬過程の化石エネルギー投入量と平均運搬距離は正比例の関係にある。バイオマス発電の規模が大きいほど年間茎消費量も大きく、平均運搬量が大きいほど発電所運搬過程の最終化石エネルギー投入比率も大きくなるのである。これらについては表2と図3を参考にされたい。



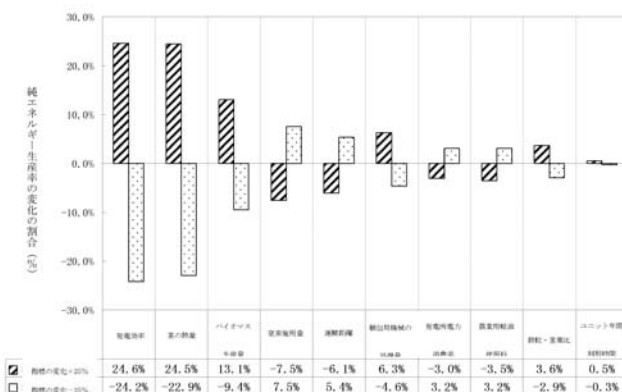
◎図3 バイオマス発電の技術ルート・ライフサイクル別化石エネルギー投入比率

3 結果の分析と討論

本研究はバイオマス発電システムのエネルギー貢献度について、エネルギー収支モデルに基づいて評価することを目指したものである。そこで、まず10の主な指標(投入指標)を選択し、モデルの1つの指標が改変されるとモデル全体の結論にどのような影響が及ぶのかということを確認することとした。主な指標は数値範囲内の変化であり、対応する純エネルギー生産率の変化の割合については、表4を参照されたい。各指標が単独で±25%の変化の範囲にあるときの純エネルギー生産率の変化の割合については、図4を参照されたい。

指標	指標 数値	下限値	下限 振幅	対応エネ ルギー純 生産率の 変化の振 幅	上限値	上限 振幅	対応エネ ルギー純 生産率の 変化の振 幅
バイオマス生産量 (kg/hm ²)	10574	7906	-25.2%	-13.2%	14320	35.4%	13.4%
茎の熱量(kJ/kg)	15472	12545	-18.9%	-18.5%	15890	2.7%	2.5%
穀粒・茎葉比	2	1	-50.0%	-7.3%	3	50.0%	5.8%
窒素肥料施用量 (kg/hm ²)	203	183	-9.9%	3.0%	223	9.9%	-3.0%
農業用軽油使用量 (kg/hm ²)	79.65	49.65	-37.7%	5.3%	109.65	37.7%	-4.8%
ユニット年間利用時間 (h)	6500	5500	-15.4%	-0.3%	7500	15.4%	0.2%
発電効率	31.50%	25%	-20.6%	-20.3%	35%	11.1%	10.7%
発電所電力消費率	11.00%	8%	-27.3%	3.3%	15%	36.4%	-4.6%
運搬距離(km)	35	30	-14.3%	3.5%	40	14.3%	-3.3%
梱包用機械の処理量(t/h)	4.05	3.6	-11.1%	-2.8%	5	23.5%	4.3%

◎表4 モデルの主な投入指標の数値と数値範囲



◎図4 バイオマス発電システムの純エネルギー生産率感度分析結果

計算結果は以下の通りである。

1) 農業用軽油の使用量、発電所電力消費率、穀粒・茎葉比、ユニットの年間利用時間の4つの指標が単独で±25%の範囲で変化するとき、純エネルギー生産率の変化の割合は±5%の範囲内である。このことから、この4つの指標がバイオマス発電システムのエネルギー貢献度に与える影響は大きなものではなく、またこの4つの指標の数値範囲内の変化は研究の結論に影響しないとみなすことができる。

2) 窒素肥料施用量、運搬距離、梱包用機械の処理量の3つの指標が単独で±25%の範囲で変化するとき、純エネルギー生産率の変化の割合は±5%の範囲を超過する。しかし、実際の数値範囲内で対応するこれらの純エネルギー生産率の変化の割合はすべて±5%の範囲内である。このことから、これら3つの指標の数値範囲内での変化は研究の結論に影響しないとみなすことができる。ただし、3つの指標がバイオマス発電システムのエネルギー貢献度に与える影響は比較的大きい。

3) 発電効率、茎の熱量、バイオマス生産量の3つの指標が純エネルギー生産率の計算結果に与える影響は非常に大きい。

まず、発電効率はバイオマス発電システムのエネルギー貢献度に影響を与える主要要素である。バイオマスの種類が同じという条件下で5つの代表的技術ルートの純エネルギー生産率の計算結果を比べてみると、発電効率は純エネルギー生産率に対して決定的な作用を及ぼすことがわかる。発電効率が高いほど純エネルギー生産率も高くなるのである。

次に、茎の熱量とバイオマス生産量はバイオマスの種類という要素に属するが、バイオマスの種類はバイオマス発電システムのエネルギー貢献度に影響を与えるもう一つの主要要素である。そこで、単位当たりの茎の熱量に対応する資源作物の栽培過程でのエネルギー消費量を用いて、バイオマス種類要素の影響を分析してみよう。表5は中国の代表的な農業作物の茎の種類を比較したデータである。この中で綿の茎、小麦のわら、水稻のわらの単位当たりの熱量の茎の栽培過程でのエネルギー消費量は、あきらかにとうもろこしのそれよりも高い。その意

味するところは次の通りである。すなわち、発電効率が等しいという条件下では、綿の茎、小麦のわら、水稻のわらを利用した発電のライフサイクルにおける化石エネルギーの投入量は、とうもろこしの茎を利用した発電のそれよりも高い。このことから、とうもろこしの茎を利用した発電のエネルギー貢献度は、綿の茎、小麦のわら、水稻のわらを利用した場合のそれよりも高いということが言えるのである。

4 結論

農作物の茎を原料とするバイオマス発電システムの純エネルギー生産率指標は約14～20であり、エネルギー再生可能指標は概ね95%～96%である。このことから、農作物の茎による発電はエネルギー貢献度が非常に高く、かつそのエネルギー投入には非常に高い再生可能性が備わっていると言われている。農作物の茎による発電を発展させることは、社会へのエネルギーの供給増加に対して肯定的な作用を及ぼすのである。

バイオマス発電は、技術的ルートによってライフサイクルの総エネルギー投入量が比較的大きく異なってくる。しかし、その化石エネルギー投入比率は概ね約4%～5%である。まず、バイオマス資源作物の栽培過程で投入される化石エネルギーがその中では最大であり、約40%～50%となっている。これは主に施用する窒素肥料を川上で工業生産する際のものである。次に、加工保管過程での化石エネルギー投入比率は概ね25%～30%であるが、これは主に茎の梱包工程で機械が消費するエネルギーである。また、発電所への運搬過程での化石エネルギー投入比率も小さくなく、バイオマス発電の規模が大きいほど発電所運搬過程の化石エネルギー投入比率も大きくなっている。

発電効率とバイオマスの種類は、バイオマス発電システムのエネルギー貢献度に影響を及ぼす二大要素である。社会へのエネルギー貢献度を高めるという観点から考えると、発電効率の高いバイオマス発電技術を発展させ、農作物の茎による発電ではとうもろこしの茎という資源を燃料として多く利用するべきである。

システムの合理化という観点から考えると、茎の発電所への運搬距離を最適化し、梱包機械の処理量を高めることが有効かつ実行可能な方法である。梱包機械の処理量を高めるには、農業用機械技術の水準を高めなければならない。茎の発電所への運搬距離を最適化するには、発電所を建設する前に必ずバイオマス資源の量的分布との最適な位置関係について検証してから、発電所建設地や収集保管施設の建設地の選定に当たらなければならない。

茎の種類	(1ムーは約1/15ヘクタール)						栽培時のエネルギー消費・茎の熱量	
	穀物生産量 ①	穀粒・茎葉比 ②	茎の生産量 ③	窒素肥料施用量 ④	軽油消費量 ⑤	栽培時のエネルギー消費 ⑥	茎の熱量 ⑦	エネルギー消費・茎の熱量 ⑧
	kg/hm ²		kg/hm ²	kg/hm ²	kg/ムー	kgce/t	kJ/kg	kgce/kgce
綿の茎	1129	3	3387	215	3.73	14.03	15890	0.026
水稻のわら	6260	1	6260	196	9	8.92	12545	0.021
小麦のわら	4275	1	4275	177	6.12	14.12	14635	0.028
とうもろこしの茎	5287	2	10574	203	5.31	7.51	15472	0.014

◎表5 バイオマス種類要素対比データ
(1ムーは約1/15ヘクタール)

参考文献

-
- [1] 中華人民共和国農業部市場・經濟情報司. 2007年全国農業統計年大要[EB/OL]. <http://www.agri.gov.cn/sjzl/nongyety.htm>.
 - [2] 陳勇. 中国のエネルギーと持続可能な発展[M]. 北京: 科学出版社, 2007, 224.
 - [3] 李家康、林葆、梁国慶ほか. 中国の化学肥料使用の背景についての分析[J]. 植物の栄養と肥料学報, 2001, 7 (1): 1-10.
 - [4] 林琳、趙黛青、李莉. バイオマス発電システムの環境に及ぼす影響に関する分析—ライフサイクルアセスメントに基づいて—[J]. 太陽エネルギー学報, 2008, 29 (5): 618-623.
 - [5] 国家發展改革委員会. 省エネルギー中長期専門計画[EB/OL]. http://www.ndrc.gov.cn/xwfb/t20050628_27571.htm, 2004-11-25.
 - [6] 国家統計局工業交通統計司、国家發展改革委員会エネルギー局. 中国エネルギー統計年鑑2007[Z]. 北京: 中国統計出版社, 2008.
-

CCS発展の現状と冶金化工における 省エネ・排出削減技術

•Profile•



袁章福 Yuan Zhangfu ●北京大学工学院教授

北京大学工学院教授、博士課程院生指導教官、東京大学客員教授。1963年7月生まれ。1993年、北京科技大学冶金工程専攻修士、博士。1997年、九州工業大学工学部講師、客員研究員。2001年、中国科学院プロセス工程研究所、教授。2007年、東京大学客員教授。2008年より現職。省エネルギー技術と産業界の低炭社会と資源循環促進の研究に従事。これまでに150編近くの研究論文を発表、そのうち120編余りがSCI、EIに収録。23件の特許。著書出版4冊、省部級以上の奨励賞受賞3回。

一、はじめに

二酸化炭素の回収と貯留 (CCS: Carbon Capture & Storage) について短期間に世界的な注目が集まっているのは、全世界が気候の変化という課題に直面しているためである。19世紀末以降、地球の平均気温は0.3~0.6℃上昇している。ここ10年間は地球の平均気温の上昇幅が特に大きく、過去110年間で最高となった。国連環境計画と世界気象機関の研究によれば、来世紀地球の表面温度は10年に約0.3℃の速さで上昇し、2100年には地球の平均気温は3℃上がって、過去1万年間の速度を大きく上回ると予想される。人類社会に対する地球温暖化の直接的影響は、天候システム、生態系に対するその間接的影響に比べると小さいが、その影響は根深く、ともすれば取り返しがつかないものである。一般的に、気候変化の影響は多方面、全方位、多層にわたり、プラスとマイナスの影響がともにある。しかしそのマイナスの影響が特に注目されており、それは主に生態環境、経済社会、国家安全への影響として現れている。

世界銀行年刊『リトルグリーンデータブック2007』中のレポートによれば、世界のCO₂排出量の現状は、京都議定書で計画された目標にははるかに遠い。レポートによると、1990年以降地球全体でCO₂排出量は19%増えており、これは京都議定書の目標より25%多い。議定書で提唱された目標は1990年のレベルより5.2%下げるというものである。この変化は、中国 (73%)、インド (88%)、アメリカ (20%)、日本 (15%) 等各国のCO₂排出量が激増したことによる。CO₂排出量は中国とインドで上昇傾向にあるが、両国の1人当たり排出量は欧米諸国に比べるとはるかに少ない。中国の1人当たり排出量はアメリカの6分の1に満たないし、インドはアメリカの6%に過ぎない。このような状況の下、中国は2009年11月26日に温室効果ガス排出抑制のための行動目標を対外的に正式発表し、国内総生産単位あたりの二酸化炭素排出量を、2020年までに2005年の水準から40%~45%引き下げると決定した。中国は発展途上国に対する「パリ・ロードマップ」の要求をはるかに

に超える、明確な数値目標を打ち出した。これは中国がコペンハーゲン環境会議で成功を得た真摯な態度を堅持し、人類のために気候の変化に対応していくという重要な約束を示すものである。

調査によると、中国では火力発電、セメント、鉄鋼、精油、エチレン、合成アンモニウム、エチレンオキシド、水素製造の8業種の製造工程が主な排出源であり、そのうち火力発電、セメント、鉄鋼企業の総排出量は約91.7%を占めている。鉄鋼冶金工業は国民経済の支柱となる産業で、同時にCO₂の主な排出源の一つでもあり、排出量は約10%を占める。このため鉄鋼工業のCO₂排出量を減らすことは、中国が温室効果ガス削減目標を達成し、世界経済、社会、環境の持続可能な発展を促していくためにも、非常に重要で現実的な意義がある。本文では、二酸化炭素の回収技術と冶金分野におけるその応用の最新状況について紹介する。

二、CCS技術の概要と展望分析

CCS技術とは主にCO₂の回収、運搬、貯留の3段階^[1]のことである。CO₂の回収は石油・石油化学企業ではすでに商業応用されており、現在までに発達しているものとしては、圧力スイング式吸着法、溶剤吸収法等の技術があり、最近進歩してきたものには膜分離法、イオン性液体の獲得等^[2-4]の技術がある。

気体膜による分離技術の基本的原理は、混合気体中の各成分が圧力に押されて膜を通過する際の拡散速度が異なるために、分離の目的を果たすことができるというものである。膜材料の化学的性質と膜の構造が膜分離の性能に決定的な影響を持つ。現在、気体分離に用いられる膜材料は主に、高分子ポリマー、無機物、金属の3種類である。膜分離法を採用することで、CO₂ / CH₄を効率的に分離することができる。これは当初、油井ガスからCO₂を分離するために用いられ、CO₂を利用して採油を強化するためのリインジェクション用のガス源とされた。現在日本の宇部社やアメリカのPermea社等では、CO₂膜の材

料と装置をすべて備えており、工業応用に投入している。気体膜分離技術には、投資が少額、エネルギーが小さい、操作が便利といった利点がある。現在、中国の気体膜分離に関する研究は主に膜材料に偏重しており、材料、装置、工程改良等の研究は少ない。

イオン性液体を利用するCO₂固定とは、主にイオン性液体を溶剤としてCO₂を吸収する、又はイオン性液体を吸着剤としてCO₂を吸着して、CO₂を固定・分離するというものである。従来のCO₂吸着方法と似て、このCO₂固定でもやはり溶剤吸着法を採用し、吸着剤はイオン性液体である。イオン性液体には非揮発性と独特の溶解能力があって、ある種のCO₂固定変換反応では高効率の触媒作用又は触媒補助作用が現れることも確認されているため、新型のCO₂吸着剤として選ばれており、イオン性液体中でのCO₂の吸着変換一体化についても研究が行われている。イオン性液体によるCO₂固定には以下の特徴がある。(1) CO₂を資源化利用し、従来の廃棄法に代える、(2) イオン性液体は性質が安定しており、揮発せず、循環使用できる、(3) 工程では水を用いないため二次汚染を避けるとともに、設備の腐食を防ぐ。

以上をまとめると、CO₂回収技術はこれまでに省エネ、低コスト、高循環性の方向へと発展してきている。

CO₂の貯留地点と方法の違いによって、CO₂の貯留方法は地中隔離、海洋隔離、炭酸塩固定、工業利用固定等に分けられる。その貯留方法ごとに具体的な技術内容は異なる。現在研究対象として注目されているのは、地中隔離と海洋隔離だが、貯留技術が未熟、一般に十分に認識されていない、プロジェクトへの投資が多額、技術コストが高い等の特徴により、現段階で単純に地下や海中に貯留する方法は実施が難しい。しかしCO₂ガスを利用して油や気体を取り除きガス田の採集率を高めることは、一挙両得の手法だと言える。CO₂の工業利用貯留もつまりはCO₂の変換である。現在研究が盛んなのは、吸着したCO₂ガスをその場でメタノール、炭酸ジエチル、エチレングリコール等の重要な化学工業材料に触媒・変換するというもので、これは、イオン性液体がCO₂を吸着した後にイオン性液体の媒介によって原位触媒変換を行うというものである。生物CO₂固定方法も近年幅広く研究されている。持続的発展という角度から言うと、生物CO₂固定技術とりわけ微小藻によるCO₂削減技術は、地球上最も中心的で最も有効な炭素固定方法であり、炭素の循環において決定的な役割をもつ。微小藻は高密度の立体化培養が可能であり、工業面でも実用が容易で、各国研究者から高い注目を集めている。しかし、対応できるCO₂濃度が低い、高濃度のCO₂のもとでは生長が遅く炭素固定効率が低い等の問題があり、工業面での応用には制限がある^[5]。

地球全体から見ると、CO₂排出削減情勢の研究は急を要する。上述の方法はまだ研究段階にとどまっているため、CO₂回収方法の工業面での応用は、現段階では比較的發展

の進んだ圧力スイング式吸着法と溶剤吸着法に集中している。

三、鉄鋼冶金分野での省エネ・排出削減

鉄鋼業はエネルギー集中型の業種であり、CO₂排出量が多い。当然それに見合う義務を負わなければならない。中国の鉄鋼業界で毎年排出されるCO₂の量は10億トン以上になり、全国の約10.44%を占めてCO₂の主要排出業の一つになっている。日本の鉄鋼業によるCO₂排出量は日本全国の排出量の15%近くを占め、次いで化学工業の6.9%、3位がセメント業の5.3%である。日本のJFEスチールで毎年排出されるCO₂は6014万トンに上り、新日鉄と住友金属がそれに次ぐ2位と3位で、それぞれ排出量は5928万トンと2214万トン^[6]である。日本の鉄鋼業による鉄鋼1トンあたりのCO₂排出量は1800kgだが、ヨーロッパでは電気炉製鋼の割合が高いため、最善のレベルで1300kgになっている。したがって、鉄鋼冶金の工程でのCO₂温室効果ガス排出量をどのように下げるか、特にCO₂排出削減のための工法や技術を開発していくことは、環境改善と持続可能な発展の実現にとって重要な意義をもつ。

鉄鋼企業によるCO₂排出削減には以下の措置をとることができる。(1) 鉄鋼製造工程を調整する。一部の高炉・転炉工程の代わりにCO₂排出量の低い鉄スクラップ・電気炉工程を採用する。一部の高炉製鉄工法の代わりに高炉溶解によらない製鉄工法を採用する。高炉・転炉工程で投入する鉄スクラップを増やす。(2) 炭素エネルギーの代わりに環境負荷の小さいエネルギーを利用する。水素冶金など^[7]。(3) 鉄鋼製造工程でのCO₂回収・分離を強化する。しかし(2)の措置については、この30年間に今の製鋼工程から完全に転換できていない。(3)の措置だけが現在の世界の製鋼工学の特徴と結びつき、目的の定まった応用と基礎的な科学研究の対象とすることができる。物質流・エネルギー流構造への留意、製造工程の調整、CO₂回収・分離の強化、余熱と余剰エネルギーの回収利用、省エネとエネルギー消費の削減が、現在のCO₂排出削減にとって現実的な活路であり、代替エネルギーの使用は補助的、応急的な措置に過ぎない。

転炉(BOF)・高炉(BF)ガスは製鋼工程で重要な二次エネルギーであり、その成分は表1に示した。転炉・高炉ガスの回収量を増やすことで、製鋼の生産コストを効率的に引き下げて「負のエネルギーによる製鋼」実現のための基礎ができるだけでなく、製鋼過程での汚染物質排出総量を大幅に引き下げ、クリーナープロダクションの実現にもつながる。つまり「転炉・高炉ガスの回収利用」は、現代の製鋼業における重要な技術となっている。筆者は、転炉製鋼でのCO₂のスラグ噴射による炉体保護の採用と、転炉・高炉ガスのCO₂循環利用という新しい発想と方法を初提唱する^[8]。

転炉製鋼の工法では、MgO含有量が飽和量に達する、

又は飽和量を超える転炉製鋼で最終的に出るスラグを出鋼後に利用して、適当なコークス粉、粉炭、添加剤を加え、流動性の高い高温のスラグになるよう調整する。N₂ガスを多孔酸素ランスによる超音波流に通過させ、炉の内壁表面にスラグを吹きつけて融点の高いスラグ層を形成し、炉内に粘着、硬化させて反応を起こし、スラグの固体層が炉内を覆うようにして炉内を保護する。ここで従来のN₂に代えてCO₂を利用しスラグによる炉の保護をすれば、ガスの回収ができるとともにCO₂の循環利用が実現できる。従来のN₂スラグと比べてとき、CO₂ではさらに転炉ガスの組成を調節することもできる。スラグによる炉の保護ではCO₂と高温スラグ中の炭素との化学変化によりCOを生成し、転炉ガスの化学吸着用に独自に設計した装置を利用してCO₂を回収利用する。転炉ガスから分離させたCO₂は、スラグ保護炉のガス源として利用し、廃ガスを転炉製鋼現場で循環利用できるようにして、CO₂の排出を下げる。

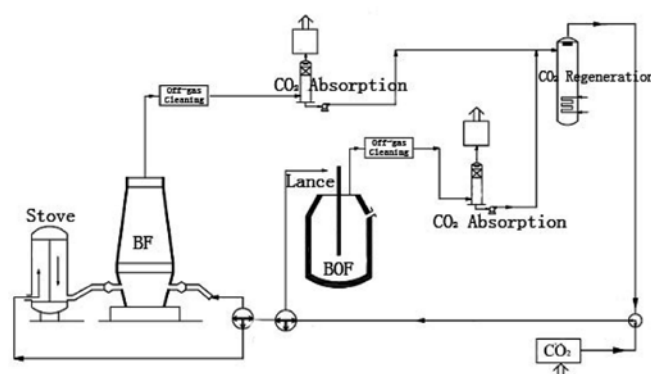
種別	化学成分(%)				
	CO ₂	CO	O ₂	N ₂	H ₂
転炉ガス	18~22	70~90	0.1~0.5	10~20	1~2.5
高炉ガス	15~20	25~30	—	40~60	—

◎表1 鉄鋼冶金工業の転炉・高炉ガス組成

鉄鋼冶金におけるCO₂循環利用の主要工法の流れは図1に示した。高炉から出るガスと転炉から出るガスは、それぞれまずガス処理システムに入り、除塵され温度が下げられる。除塵後の高炉と転炉のガスは、加圧された後にそれぞれ吸着塔の最下部から入る。ガスは其中を下から上へと流動し、吸着塔上部から入る吸着液と逆流接触を起こし、CO₂を十分に吸着する。CO₂を取り除かれた高炉ガスと転炉ガスは、冶金の重要なエネルギーとして熱風炉の空気予熱、コークス炉、ボイラー、圧延加熱炉等に用いられる。CO₂を吸収した溶液は加圧されて上部から再生塔に入る。再生塔内には煮沸器が備わっており再生塔内でCO₂が脱着される。分離されたCO₂と補充された外来CO₂は、圧縮機、気体切替弁、三方弁を通過した後、熱風炉、燃料吹付けシステム、転炉酸素ランスシステムに入り、高炉製鋼と転炉スラグ保護炉を循環して用いられ、高炉・転炉ガスが工場内で循環利用できる。

転炉・高炉ガス中ではCO₂の分圧が低いという特性（表1参照）に基づき、この装置では化学吸収法を選択している。この方法によるCO₂の脱着は、実質的にはアルカリ性吸着剤溶液を排煙中のCO₂と接触させ化学反応を起こし、不安定な塩類を形成するというものである。塩類は一定の条件下（再加熱、瞬間蒸発等）で逆に分解されCO₂を放

出して再生する。これによってCO₂を排煙内から分離させることができる。化学吸収法でCO₂を分離するために通常用いられる吸着剤には、アミン溶剤、強アルカリ溶液、熱苛性ソーダ溶液等がある。吸着剤を選ぶ場合は、高い吸収率、高い吸収負荷、低い再生エネルギーという原則を守り、そのほかに吸着剤の抗酸化性と低腐食性についても考慮する必要がある。この装置ではMEA（モノエタノールアミン）を基本とする複合アミン溶液を用いる。これには抗酸化剤と腐食防止剤の働きがあり、吸収が速いというMEAの特長を引き継いでCO₂に対する溶液の高吸収能力を保つとともに、溶液の再生エネルギーの消費を減らし設備の腐食を防ぐ。



◎図1 鉄鋼冶金でのCO₂循環利用模式図

鉄鋼冶金工程でのCO₂の循環利用は、鉄鋼冶金の生産技術向上、鉄鋼企業の省エネと、環境に優しく持続可能な発展の促進にとって重要な意味を持つ。このプロジェクトの応用研究を通じ、転炉ガスの回収利用に限っては、鉄鋼1トンあたり10.5Nm³のCO₂が分離・循環利用でき、CO₂を分離する転炉ガスの熱量を大幅に高められることが分かっている。

四、まとめ

CO₂排出は地球の気候に甚大な影響を与えており、人類社会の生産、消費、ライフスタイル、生存空間など、社会・経済発展の各分野にまで関わる重大な問題である。長い目で見れば温室効果ガス問題を根本的に解決する方法は、エネルギー構造を調整し、石炭などの化石燃料に代わる新たなエネルギーを開発することである。排出削減の厳しい現状にとって、CCS技術は温室効果ガス排出緩和のための最新技術であり、最も速く有効な手段であるといえる。その応用規模、コスト分析を総合してみると、単純な地質隔離や海洋隔離は短期間に幅広く応用することは難しいが、CO₂の工業利用固定方法は発達しており、コストが比較的低く、現段階で排出削減のため、最も望ましい方法である。新たなCCS技術を開発すると同時に、異なるCO₂ガス供給源と分離される気体の組成に

ついて、その工法の技術パラメーターの研究・設計を行うことも、重要な意義のある任務の一つである。

鉄鋼冶金は工業の中でも排出量が多い部門であり、ガス中のCOとCO₂を回収分離し、CO₂循環利用のための新

技術を開発することで、CO₂排出を効果的に削減できる。これは環境負荷を引き下げると同時に大きな経済的利益をもたらすもので、冶金工業の今後の発展にとって非常に深い意味をもつ。

O₂/CO₂燃焼方式における煤塵生成および制御に関する研究の進展

•Profile•



姚 洪 YAO HONG ● 华中科技大学・石炭燃焼国家重点実験室教授/博士課程教員

1968年生まれ。2002年 豊橋技術科学大学環境・生命工学専攻 博士学位取得。中国石化公司省エネセンターエンジニア、豊橋技術科学大学JSPS 研究員、COE研究員を経て、2005年より华中科技大学教授。2006年にはカナダAlberta大学 客員教授。研究分野は固体燃料の燃焼および汚染物質の制御。100余の論文を発表。

概要：

O₂/CO₂燃焼方式は、石炭燃焼に伴うCO₂の排出を抑制する効果的な技術的手段の一つになると見なされている。CO₂がN₂の代わりとなることを考えると、同燃焼方式によって汚染物質である煤塵が生成されるメカニズムおよび制御技術に関する高度な研究が期待される。本論文では本研究チームがO₂/CO₂燃焼方式における煤塵生成および制御に関して実施した実験室レベルの基礎研究を紹介する。実験や研究を通して、O₂/CO₂燃焼条件では煤塵のうちPM_{1.10}やPM₁の生成濃度が低下することが明らかになった。また鉍物の気化が抑制されることも分かった。難溶解性元素の気化が、揮発性元素に増して抑制されるようだ。O₂/CO₂燃焼条件では、O₂濃度が高くなるに伴い、温度や還元性雰囲気の影響を受ける鉍物の気化量は、まず減少し後に増加する過程をたどる。実験において、石炭中に天然アルミノケイ酸塩吸着剤を添加し、石炭配合による燃焼方式を採用した場合に、石炭燃焼過程における煤塵の排出を効果的に減少することができた。燃焼する石炭に天然カオリン吸着材を添加すると、カオリンと揮発性元素の化学反応によって、PM₁の排出濃度が抑制される。燃焼温度が上昇するに伴い、化学反応とカオリンの持つ物理活性性能の相互作用によって、カオリン吸着材の揮発性元素に対する吸着効果は、まず増加し後に減少する過程をたどる。瀝青炭と褐炭を混合し燃焼すると、瀝青炭に含まれるアルミノケイ酸塩と褐炭の燃焼過程で生成される揮発性元素の相互作用によって、PM₁の生成が抑制される。この種の抑制は石炭の成分や混合比率によって決まる。O₂/N₂燃焼方式と比較すると、O₂/CO₂燃焼方式では、石炭混合による燃焼によって鉍物の相互作用が低下し、PM₁の生成抑制効果も減少する。

1. 背景

化石燃料を燃焼すると温室効果ガスであるCO₂が大量に排出され、地球温暖化や気候変動を引き起こすことは明らかになっている。温室効果ガスの排出を効果的に抑制

することは、人類社会の持続的な発展を左右する重大な課題である。将来的に再生可能エネルギーが主要なエネルギー源となり、CO₂排出問題が根本的に解決されるかもしれない。しかし化石燃料の中でも特に石炭は、将来のエネルギー源の中でも、最も安価かつ安全なエネルギー源であり続けることだろう。また再生可能エネルギーへの移行前においては、最も主要なエネルギー源である^[1]。石炭は地球上の化石燃料の中で最も豊富に存在する。また中国をはじめとする国々において、最も主要な一次エネルギーとなっている。高効率でクリーンな石炭の燃焼技術を開発することによって、石炭燃焼発電に伴うCO₂の排出量を制御し減少させることができる。このことは中国だけでなく全世界の持続可能な発展を実現する上で、緊急で価値のある課題となっている。

CO₂の主要な排出源となっている石炭火力発電所をはじめとする化石燃料を利用した発電所において、CO₂回収技術を応用しCO₂の収集や貯蔵を行うことは、人類活動によるCO₂の排出量を抑制するための重要な手段であると見なされている。各国政府はCO₂の回収・貯蔵技術の開発のために人材や資金をふんだんに投入している。化石燃料を利用した発電所におけるCO₂回収技術は、3種類に分けることができる^[2]。第一類は燃焼後にCO₂を分離する方法である。つまり通常の空気燃焼によって発生した煙からCO₂を分離し収集する技術である。第二類は燃焼前にCO₂を収集する方法である。気化によって燃料をCOやH₂を含む合成ガスに変化させる。次いで水性ガスシフト反応を利用し、COをCO₂に変換した上で収集する。H₂は燃料として火力発電などに用いる。第三類はO₂/CO₂燃焼(Oxy-fuel combustion)方式である。空気分離によって得られた酸素を従来の空気に変えて燃焼すると、排気ガスの主な成分が高濃度CO₂となり、CO₂の収集が容易になる。燃焼システムの温度を制御するため、一般的に排ガス再循環を採用することから、酸素/再循環ガス燃焼とも呼ばれる。これら3種類の技術の開発が全世界で進められている。前述した三つのCO₂回収技術のうち、微粉炭火力発電所に応用

が可能なのは、第一類と第三類である。当該技術に関する数多くの経済性評価によると、 O_2/CO_2 燃焼技術のために通常要する総費用が、空気燃焼下における CO_2 分離技術に比べ非常に安価である^[3-6]。加えて汚染物質の排出が少なく燃焼効率が高いという利点もある^[7-9]。汚染物質の排出を限りなくゼロに近づけることも可能だ。現在稼働中のものを含めた従来型石炭火力発電所の CO_2 排出量を抑制する技術として、極めて優れた競争力や将来性を備えていると言えることができる。

石炭火力発電のよって排出される汚染物質には、煤塵(PM)、 SO_x 、 NO_x 、重金属(水銀)などが含まれる。石炭の O_2/CO_2 燃焼も例外ではない。石炭の O_2/CO_2 燃焼によって排出される汚染物質(SO_2 や NO_x)について、一部の単一汚染物質に対する研究が国内外で進められている。しかし進行中の研究は、 O_2/CO_2 燃焼における汚染物質の生成に関するものに集中している。 NO_x に関する研究から、 O_2/CO_2 燃焼が NO_x の生成量を著しく低下させることが分かっている^[9-12]。その主なメカニズムは、再循環ガスに含まれる NO_x が燃焼室に戻った後、再燃焼に類似した過程が生じることである^[10,11]。実際のところ、 O_2/CO_2 燃焼における高濃度 CO_2 といった排ガス条件および微粉炭燃焼過程の変化が、燃料の NO_x 生成反応を複雑にしているのである。また SO_2 に関する研究から、 O_2/CO_2 燃焼における再循環の作用により、排気ガスに含まれる SO_2 の濃度が著しく高くなると共に^[9,12,13]、 SO_2 の生成量が一定程度抑制されることが分かっている^[9]。高い SO_2 濃度は、石灰吹込み脱硫などの技術による SO_2 除去に寄与する^[14]。 O_2/CO_2 燃焼において SO_2 生成量が減少する原因は、簡単に言えば SO_2 と石灰灰の作用による^[9]。石灰灰の特性が、石灰灰に含まれる鉱物質などの無機質の特性や燃焼過程を決定する。その特性が O_2/CO_2 燃焼における SO_2 の生成特性に与える影響は十分に理解されていない。別の点として、高い SO_2 濃度が排気ガス中の SO_3 濃度を上昇させるが、それが SO_2 生成の抑制に及ぼす影響についても、いっそうの理論的探求が必要である。これまでに本研究チームは、微細煤塵などに対する基礎研究にも従事したことがある。同研究によると、 O_2/CO_2 が石灰灰に含まれる主な鉱物質の変化生成物に与える影響は小さいということが明らかになった。しかし石灰灰に含まれる主な鉱物相の相対含有量には大きな影響を及ぼす。特に微細煤塵の生成には顕著な影響がある^[15-17]。Suriyawongら^[18]の研究が示すように、 O_2/CO_2 燃焼は煤塵の生成量を減少させるが、煤塵の大きさが小さくなる。我々の研究^[16]からも同様の結論が得られた。また我々の研究^[15,17]からは、 O_2/CO_2 がサブミクロン粒子の形成、つまりサブミクロン粒子の生成過程に顕著な影響があることも明らかになっている。

以上のことから、 O_2/CO_2 燃焼過程における反応条件の変化が、汚染物質の生成過程や生成量を複雑にすることが明らかである。汚染物質の生成過程に関する定量的記

述が求められている。また燃焼過程における汚染物質の生成を効果的に抑制する必要もある。これらの必要に応えるため、燃料特性、 O_2/CO_2 燃焼、石灰燃焼過程などを結び合わせた上で、汚染物質の生成過程および制御に関する徹底的かつ系統的な研究を行わなければならない。以上の点を念頭に置き、本論文では本研究チームの進める O_2/CO_2 燃焼方式における煤塵生成および制御に関する研究結果の一部を紹介する。

2. O_2/CO_2 燃焼方式における煤塵生成および制御に関する研究

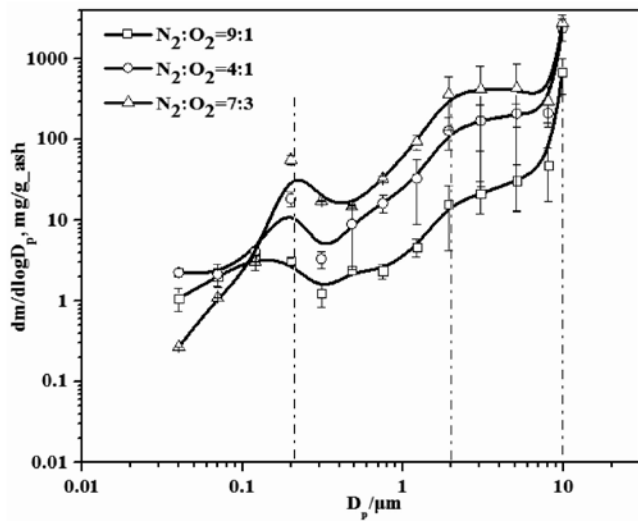
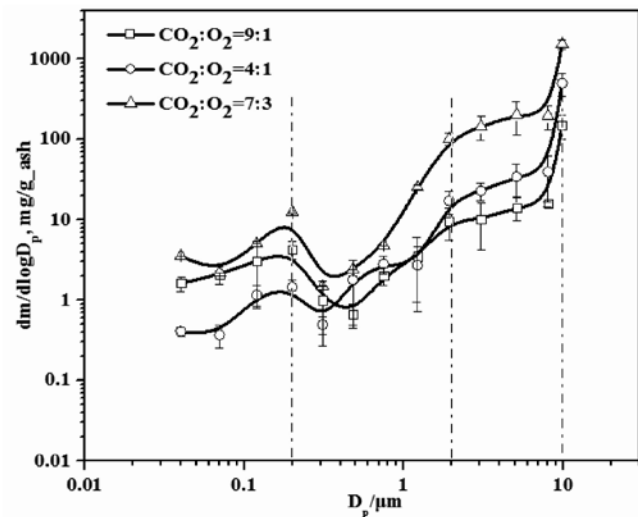
2.1 O_2/CO_2 燃焼方式における煤塵生成

典型的な O_2/N_2 燃焼方式における煤塵生成のメカニズムについては、国内外の学者によって幅広い研究が進められている。主な研究内容は以下のとおりである。(1) 無機鉱物の気化-凝固^[19-21]。(2) 含有鉱物の重合^[22-23]。(3) コークス粒子の粉砕^[24-25]。(4) 外部鉱物粒子の粉砕^[26,27]。このうち無機鉱物の気化-凝固は、微小モード粒子(1マイクロメートル未満)の主要な形成メカニズムである。また含有鉱物の重合や外部鉱物粒子の粉砕は、粗大モード粒子(1マイクロメートル以上)の主要な発生源である。燃焼条件の変化は石灰燃焼過程における煤塵の生成特性に影響するものと思われる。

O_2/N_2 または O_2/CO_2 燃焼雰囲気において異なる O_2 濃度が、煤塵の粒径分布、質量濃度、化学組成に与える影響を比較研究するため、本研究チームは、 O_2 濃度が10%、20%、30%の場合の O_2/N_2 または O_2/CO_2 燃焼雰囲気において、落下型管状炉を用いた燃焼実験を行った。実験温度は1300℃、試料供給量は0.25g/minとした。10 μ m未満の粒子は、収集段階を13に設定したDLPIで収集した。各レベルの煤塵の元素組成は、エネルギー分散型蛍光X線装置を用いて分析した。

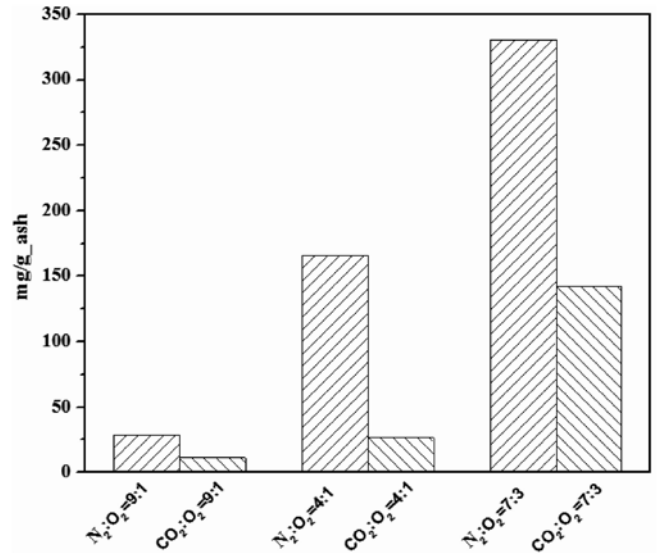
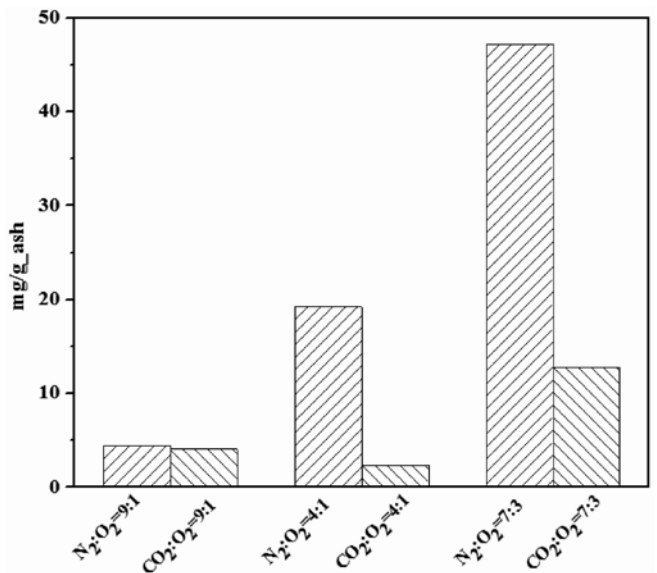
異なる実験条件においてDLPIが収集した煤塵 PM_{10} の粒径分布は図1で示すとおりである。超微小モード(0.2 μ m前後)や粗大モード(8 μ mを超える)を除き、すべての粒径分布が2 μ m前後で明らかな変曲点が見られる。これは我々が以前行った研究^[28-30]およびLinakら^[31, 32]またはSeamesら^[33]の発見した中間モードと類似した特徴である。図1から、 O_2/N_2 燃焼方式と比べて、 O_2/CO_2 燃焼方式における各モードの煤塵分布は、変化が少ないことも分かる。しかし煤塵の生成濃度に対する影響は比較的大きい。

図2が示すとおり、 O_2 濃度が同じであれば、 O_2/CO_2 燃焼雰囲気は O_2/N_2 燃焼雰囲気と比べて、煤塵における PM_{1-10} (空気動力学径1-10 μ m)と PM_1 (空気動力学径1 μ m未満)の生成濃度が少ない。Suriyawong^[18]ら、およびKrishnamoorth^[34]らの研究と比較してみると、前述の結果の主な原因として次の点を挙げることができる。1) CO_2 中における O_2 の拡散速度は、 N_2 中における O_2 の拡散速度

(a) O₂/N₂(b) O₂/CO₂

◎図1 異なる燃焼雰囲気における煤塵の質量と粒径分布(a: O₂/N₂, b: O₂/CO₂)

よりも低い。(D_{O₂/CO₂}=1.3×10⁻⁴m²/s, D_{O₂/N₂}=1.7×10⁻⁴m²/s)。このためO₂/CO₂雰囲気においてO₂がコークス粒子表面まで拡散する速度が低くなる。結果としてコークスの燃焼程度や燃焼温度が低下し、PM₁₋₁₀とPM₁の生成量が減少する。2) O₂/CO₂燃焼雰囲気において、粒子表面のCO/CO₂比率が増大するため、鉍物質の気化が減少し、PM₁の生成量が減少する。図2からは、O₂/CO₂燃焼雰囲気におけるPM₁₋₁₀の生成濃度は、O₂濃度の上昇に伴い増加することも分かる。またPM₁の生成濃度は、O₂濃度の上昇に伴い、まず減少し後に増加する過程をたどる。O₂濃度が20%の際に生成されるPM₁は、O₂濃度が10%または30%の場合よりも少ない。Leeら^[35]の研究によると、CO濃度の増大は鉍物質の気化を大いに促進するという。O₂/CO₂燃焼雰囲気においてCO+O₂→CO₂ およびC+CO₂→COという反応が起こり、O₂濃度が低下するほど、CO₂濃度が上昇する。こう

(a) PM₁₋₁₀(b) PM₁

◎図2 異なる雰囲気におけるPM₁₋₁₀ (a)とPM₁ (b)の生成濃度

して炉内で生成される排ガスのCO含有量や還元雰囲気が増大し、鉍物質の気化が促進される。またO₂濃度が継続的に増加すると、煤塵の燃焼が激しくなり、燃焼温度も上昇する。この点も鉍物質の気化に寄与する。

図3はO₂濃度が20%の場合におけるPM₁₋₁₀(a)とPM₁(b)に含まれる一部の元素について、O₂/N₂およびO₂/CO₂燃焼雰囲気における含有量分布を示したものである。図から明らかとなおり、O₂濃度が同じであれば、O₂/N₂燃焼雰囲気とO₂/CO₂燃焼雰囲気の違いが煤塵におけるPM₁₋₁₀の元素組成に及ぼす影響は大きくない(図3a)。しかし煤塵におけるPM₁の元素組成には大きな影響を与える(図3b)。O₂/N₂燃焼雰囲気と比べて、O₂/CO₂燃焼雰囲気で生成されるサブミクロン粒子に含まれる揮発性元素Na、K、Sな

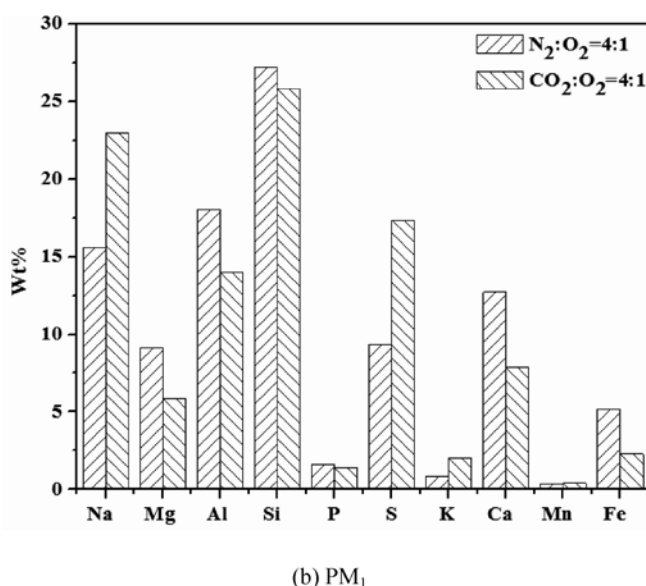
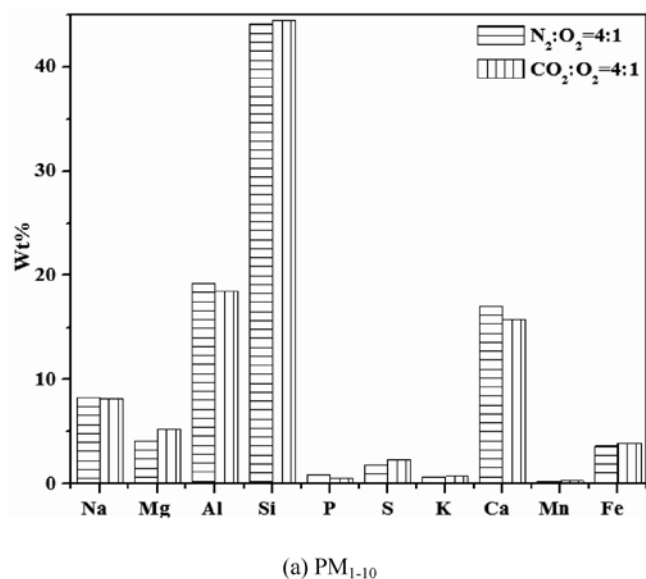


図3 O₂/N₂およびO₂/CO₂燃焼雰囲気におけるPM₁₋₁₀(a)とPM₁(b)の元素組成

どの含有率が上昇する。また難溶解性元素Si、Al、Mg、Ca、Feなどの含有率が低下する。図2と図3に基づく計算によると、O₂/CO₂燃焼雰囲気中で生成されるサブミクロン粒子における各元素の絶対量は一様に減少する。すべての元素の気化が抑制されるのである。以上のことから、O₂/CO₂燃焼雰囲気においては、難溶解性元素の気化が揮発性元素に増して抑制されるということが推測できる。その主な原因は、難溶解性元素の気化温度が揮発性元素よりも高いために^[36]、難溶解性元素が揮発性元素以上に温度による影響を受けやすいからである。O₂/N₂燃焼雰囲気と比べて、O₂/CO₂燃焼雰囲気におけるコークス粒子の燃焼温度が低く、難溶解性元素の気化が揮発性元素に増して抑制されるのである。以上の理由でO₂/CO₂燃焼雰囲気中で生成されるサブミクロン粒子のうち、揮発性元素であるNa、K、Sの含有率が上昇し、難溶解性元素であるSi、Al、Mg、Ca、Feの含有率が低下する。

2.2 石炭燃焼に伴う微細煤塵の制御

Gale^[37]らの研究によると、高温下において多くの気化した元素(Na、K、Ca、Fe、Mgなどや一部の重金属)は、石炭に含まれるアルミノケイ酸塩(カオリンなど)と化学反応を起こし、安定した化合物として粗大粒子中に留まる。こうして気化した元素の微細煤塵への変化が抑制されるため、集塵装置の収集効率が向上する。Naruseと筆者による^[38-40]以前の研究によると、アルミノケイ酸塩(カオリンなど)は、石炭やスラッジの燃焼過程で排出される微細煤塵の一部を減少させる。また微細煤塵に含まれるPbやCdをはじめとするアルカリ金属や重金属の量を抑制することができる。本研究では前述した制御技術を応用し、O₂/CO₂燃焼方式におけるカオリンの添加が、煤塵の生成特性に与える影響を調べた。

中国は火力発電大国であり、エネルギー源の70%以上を火力発電に依存している。石炭資源の減少に伴い、一部の発電所で購入している石炭が、ボイラー設計当初における石炭の種類とは一致しないようになっている。またボイラーの燃焼を安定させるために混炭を採用する場合も多くなっている。不完全なデータではあるが^[41]、中国における1年間の混炭使用量は、2000万トン以上に達している。火力発電所において混炭が使用される比率は、最高で50%強になる。石炭混合には、瀝青炭に無煙炭、非粘結炭、褐炭などを加える方式が含まれる。燃焼過程で気化した元素とアルミノケイ酸塩の直接的な作用として、微細煤塵の生成が抑制される。このため本研究チームは、微細煤塵の生成抑制を目的とした石炭混合の応用の可能性を探るため、揮発性元素の含有量が高い石炭およびアルミノケイ酸塩の含有量が高い石炭を用いて、さまざまな混合比率における実験を行った。

カオリン吸着材の添加と石炭混合という二つの面から、煤塵制御に関する本研究チームの研究成果を以下に紹介する。

2.2.1 カオリン吸着材の添加

褐炭を落下型管状炉で燃焼させ煤塵を収集する実験を行った。燃焼温度は900℃、1100℃、1300℃、燃焼雰囲気はO₂/CO₂=1/4、カオリンの添加比率は石炭/カオリン=100/5(wt%)とした。

図4はO₂/CO₂燃焼雰囲気中で石炭にカオリンを添加する前後におけるPM₁の排出量を示している。図からカオリン添加前後の物理的な平均値(Cal.)と実験値(Exp.)を比較することができる。物理的な平均値とは、燃焼過程にあるカオリンが石炭に含まれる鉱物質と化学反応を起こさず、それぞれ独自に煤塵を生成すると仮定し、混合比率から計算したものである。物理的な平均値と実験値を比較すると、カオリン添加後の燃焼における実験値が物理的な平均値をはるかに下回っていることが分かる。このことはカオリンと石炭に含まれる鉱物質の相互作用を明確に裏付けている。カオリンと石炭に含まれる揮発性元素の

作用によりPM₁の生成量が減少するのである。本実験における三つの異なる温度を比較すると、温度が高くなるに伴い、カオリンが石炭に含まれる揮発性元素に及ぼす作用が、まず上昇し後に下落するという傾向にあることが分かる。カオリンが石炭に含まれる揮発性元素に及ぼす作用が最も強いのは1100℃の時である。

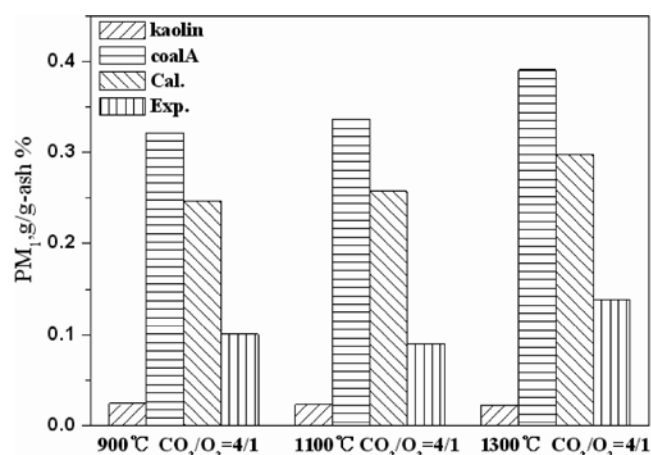


図4 石炭のみの燃焼とカオリン添加後の燃焼におけるPM₁の生成量

このことはIkyooら^[42]の研究におけるカオリンのセシウム(Cs)やストロンチウム(Sr)に対する吸着実験の結果と類似している。異なる燃焼条件におけるカオリンの物理特性や吸着能力に及ぼす影響を研究するため、カオリンを落下型管状炉で燃焼させた後のサンプルを収集し、比表面積や平均細孔径の分析を行った。表1は異なる燃焼条件におけるカオリンの比表面積や平均細孔径を示している。

	BET surface area (m ² /g)	Average pore size(nm)
Raw kaolin	22.19	19.47
kaolin at 900℃	20.41	18.31
kaolin at 1100℃	8.59	16.03
kaolin at 1300℃	3.46	14.56

表1 カオリンの比表面積と平均細孔径

表1が示すとおり、O₂/CO₂燃焼条件において温度が上昇するに伴い、カオリンの比表面積や平均細孔径が縮小する。物理特性や拡散メカニズムから見ると、このような縮小がカオリンと石炭に含まれる揮発性元素の吸着に不利な影響を与える。またカオリンと金属蒸気の気固反応は、温度が上昇するほどに反応速度が増す。燃焼温度を900℃から1100℃に上昇させると、反応速度が非常に遅くなり、すべての過程に影響する主要素が形成される。こうして燃焼過程におけるPM₁生成に対するカオリンの抑制作用が強くなる。燃焼温度を1100℃から1300℃に上昇させると、カオリンの物理特性が変化するため、拡散メカニズムが全過程において決定的な要素となる。Ikyooら^[42]の研究も示しているように、反応温度が上昇するに伴い、カオリンの揮発性元素に対する化学吸着の増強とカ

オリン自体の活性低下の間で競争が生じる。このことは本論文の結論とも一致する。

2.2.2 石炭混合

燃焼実験のサンプルには、揮発性元素を豊富に含む褐炭(XLT)、アルミノケイ酸塩を豊富に含む瀝青炭(DT)、両者を混合した混炭が含まれる。石炭サンプルの基礎特性に関する分析データは、表2で示すとおりである。褐炭XLTには、S、Ca、Feが豊富に含まれている。また瀝青炭DTの灰は、AlやSiが主体である。混合比率は褐炭と瀝青炭の質量比で、9:1、7:3、1:1、3:7、1:9とした。O₂/N₂またはO₂/CO₂雰囲気、混炭燃焼における煤塵の生成特性に及ぼす影響を研究するため、実験条件としてO₂濃度20%のO₂/N₂雰囲気およびO₂/CO₂雰囲気を採用した。燃焼温度は1300℃とし、落下型管状炉燃焼実験テーブルとDLPIを用いて煤塵を収集した。

	Proximate analysis, wt%, ad						Ultimate analysis, wt%, ad				
	M	A	V	FC	C	H	N	S	O*		
褐炭 XLT	15.5	15.6	45.8	23.1	44.2	5.7	1.2	3.2	14.6		
瀝青炭 DT	1.8	27.8	26.6	43.8	55.0	3.3	0.9	1.6	9.6		
Ash composition, wt%											
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	
褐炭 XLT	2.0	2.8	10.0	14.2	0.8	43.1	0.4	20.5	0.0	6.2	
瀝青炭 DT	0.1	0.3	33.7	42.8	0.3	18.0	0.1	0.9	0.1	3.7	

M: Moisture, A: Ash, V: Volatile matter, FC: Fixed carbon, *By difference

表2 石炭サンプルの基礎特性に関する分析

異なる混合比率における煤塵の生成濃度は図5で示すとおりである。図5から分かるように、石炭混合の実験によって生成される煤塵は、物理的な平均値と比べて、いずれの場合も一定程度減少している。混炭の燃焼によって、異なる石炭に含まれる鉱物質の相互作用が起こり、微細煤塵の生成が抑制されたことを示している。混合比率が煤塵の生成特性に与える影響を研究するため、O₂/N₂およびO₂/CO₂燃焼時の各混合比率における理論計算値と比較したPM₁の減少率を図6に示す。図からわかるように、混炭における瀝青炭の比率が高くなるに伴い、PM₁の減少量は、まず増加し後に低下する過程をたどる。この実験において混炭における瀝青炭の比率が30%の時に、O₂/N₂あるいはO₂/CO₂燃焼雰囲気に関わらず、PM₁の減少量が最大値に達した。混炭における瀝青炭の比率が増加するに伴い、褐炭の生成する揮発性元素が減少し、瀝青炭の燃焼過程で生成されるアルミノケイ酸塩が増加する。混炭の燃焼によって生成される揮発性元素とアルミノケイ酸塩の比率が、反応の化学量論比に近づいた際、混炭燃焼によるPM₁の抑制効率が最大になる。また図6は次の点も明らかにしている。混合比率が同一の場合、O₂/CO₂燃焼雰囲気の混炭燃焼におけるPM₁の減少量は、O₂/N₂燃焼雰囲気と比べて小さい。その主な原因は、O₂/CO₂燃焼雰囲気において気化元素の生成が減少するため、気化元素とアルミノケイ酸塩の相互作用も低下することにある。実験温度において拡散が重要な作用だからである。またO₂/

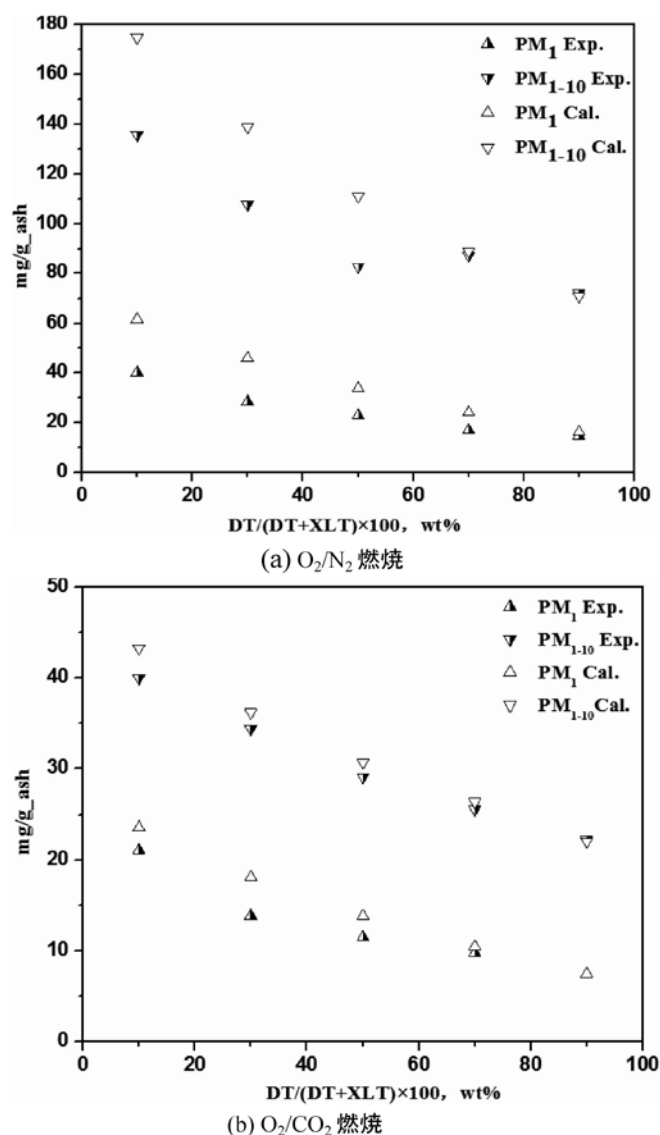


図5 異なる混合比率における煤塵の生成濃度 (a:O₂/N₂燃焼, b: O₂/CO₂燃焼)

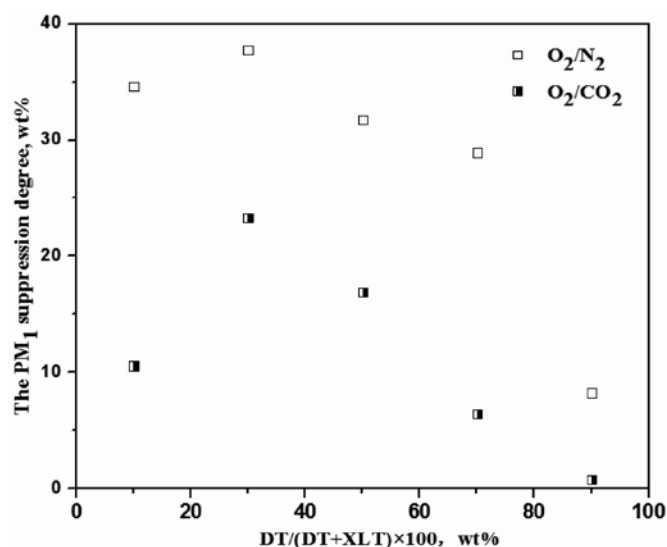


図6 異なる石炭混合比率におけるPM₁の減少量

CO₂燃焼雰囲気において還元作用が増大するため、灰に含まれているアルミノケイ酸塩の融解特性が変化し、金属蒸気を吸着させる活性度が低下する。関係するメカニズムについては、いっそうの研究や探究が必要である。

3. 結論

本論文はO₂/CO₂燃焼条件における煤塵生成メカニズムおよび制御に関する研究を紹介した。本研究チームが煤塵生成および制御に関して実施した研究を検討すると、以下のような結論を導き出すことができる。

- 1) O₂濃度が同じであれば、O₂/CO₂燃焼雰囲気はO₂/N₂燃焼雰囲気に比べて、PM₁₋₁₀やPM₁の生成濃度が低下する。O₂/CO₂燃焼雰囲気において、O₂濃度が増加すると、PM₁₋₁₀の生成濃度は上昇し、PM₁の生成濃度はまず低下し後に上昇する過程をたどる。O₂/CO₂燃焼雰囲気は、PM₁の元素組成に対して大きな影響を及ぼし、鉍物元素の気化が抑制される。また難溶解性元素の気化が揮発性元素に増して抑制される。鉍物質の気化は、温度や還元性雰囲気の制約を受け、まず減少し後に増大する過程をたどる。温度は難溶解性元素の気化において主導的な作用を及ぼす。
- 2) カオリン吸着材を添加すると、カオリンと揮発性元素の化学吸着作用により、PM₁の生成が抑制される。燃焼温度の上昇に伴い、化学反応やカオリン自体の物理活性性能の影響を受け、揮発性元素に対するカオリンの作用は、まず増大し後に低下する過程をたどる。約1100℃の時に効果が最大となる。
- 3) 瀝青炭と褐炭を混合し燃焼させると、瀝青炭に含まれる豊富なアルミノケイ酸塩と褐炭の燃焼過程で生成される揮発性元素の相互作用によって、PM₁の生成が抑制される。混炭の混合比率は、PM₁生成に対する抑制程度を左右する重要な要素である。O₂/CO₂燃焼雰囲気では、O₂/N₂燃焼雰囲気と比べて、混炭の燃焼による鉍物質の相互作用が低下するため、PM₁生成に対する抑制効果も減少する。

O₂/CO₂燃焼雰囲気において、煤塵(PM)、SO_x、NO_x、重金属(水銀など)といった汚染物質を同時に制御する方法について研究が進められている。例えば多機能吸着材の研究が実験段階に入っている。O₂/CO₂燃焼における特殊な燃焼条件やCO₂ガスの循環技術などによって、類似した空気雰囲気における燃焼によって生成されるさまざまな汚染物質を結合させ、効果的に制御することが可能である。

謝意：

本研究に対する中国国家自然科学基金委員会(NSFC、支援番号：50721140649)および日本の科学技術振興機構(JST)の共同支援に感謝の意を表明する。

高効率クリーン燃料エンジンの開発

•Profile•



黄 佐華 Huon Zuohua ●中国西安交通大学教授

西安交通大学教授、工学博士、中国教育部「長江学者奨励計画」の特別招聘教授、国家自然科学基金委員会傑出基金獲得者。国際燃焼機関会議（CIMAC）評議員、中国内燃機関学会副理事長、中国工程熱物理学会理事兼燃焼委員会副主任委員、中国国家自然科学基金プロジェクト審査員を務める。Combust. Flame, Combust. Sci. Technol., Int. J. Hydrogen Energy等の国際刊行物に113編の論文を発表。

一、概説

中国は人口が多いが、石炭資源以外のエネルギーが不足していて、特に高度経済成長に伴い、この矛盾は問題になってきた。中国のエネルギー構成において、石炭に対する依存度は60%に達する。世界の先進国に比べ、わが国の設備と技術は立ち遅れており、このため、エネルギーの消費率と汚染物質の排出度も高い。現在、中国は石炭について直接燃焼以外の高効率・クリーンな転化・利用方式、例えば、石炭のガス化及び液化技術、コジェネレーション技術等を模索している。近年、中国では自動車工業が急速に成長し、車の保有台数が急増し、エネルギーに占める石油燃料の割合が増え続けている。2009年の国内自動車生産量は1,000万台を超えた。中国は石油資源に限りがあり、日増しに増大する石油消費需要を満たすのが難しく、石油の輸入は燃料を補充するためにやむを得ない。内燃機関では、燃料の高効率クリーン利用が省エネと汚染抑制の面で重要な分野となっており、燃料のエネルギー消費率低減が温室効果ガスCO₂の排出削減にも貢献することができる。中国に比べ、米国、日本、欧州（EU）等の先進国は燃料エネルギーの供給と利用の面で石油燃料が中心となっている。米国の97%の交通燃料は石油を使っており、そのうちガソリンエンジンが65%、ディーゼルエンジンが20%、タービンエンジンが12%を消費している。米国の研究報告は、動力装置の技術進歩により、エンジンの熱効率をさらに25～50%高めることができると予測している。中国の93%以上の交通エネルギーは石油起源であり、交通輸送分野で40%以上の石油が消費され、95%のガソリン、60%のディーゼル油、80%のケロシンが各種交通機関で使われている。中国では2010年の自動車の石油消費が全国の石油総消費量の43%を占め、2020年には67%に達するであろうとの研究予測がある。現在、中国の交通燃料の年間総消費量は米国に次ぐ世界第2位である。このため、交通分野における燃料の高効率・クリーン化は中国の経済・社会の持続可能な成長と環境保護に影響する重要なポイントとなっている。

対応の必要に迫られている石油燃料の高効率クリーン

利用問題を前に、中国の国家発展・改革委員会、科学技術部、国家自然科学基金委員会等は重点的に支援と資金を与え、また、プロジェクト資金助成により、研究・技術成果の転化と普及を図っている。例えば、科学技術部は国家「863計画」の重大特別プロジェクト「省エネ・新エネルギー自動車」において、自動車企業、大学、科学研究機関を結集し、石油燃料エンジン及び石油代替燃料エンジンに対する技術開発研究を進めている。その目標は一定規模のモデルとしての役割を果たし、普及を図ることであった。「973計画」の中の「内燃機関の低温・低公害燃焼理論とクリーン代替燃料の基礎研究」では主に大学を結集し、内燃機関の高効率クリーン利用の幾つかのカギとなる基礎理論問題についてフォーサイト研究活動を繰り広げ、その新技術開発を導く土台作りをした。一方、国家自然科学基金委員会は、広い範囲と方向において内燃機関の高効率・低公害利用に関する基礎問題研究に資金援助した。同委員会はプロジェクトへの資金助成の他、中国の大学の中で内燃機関研究イノベーション陣とそのリーダーを重点的に育成し、わが国の内燃機関基礎研究を代表するセンターを西安交通大学、上海交通大学、天津大学に設置した。

筆者は西安交通大学内燃機関燃焼研究チームの責任教授として、同大が近年進めてきた高効率・低公害・クリーン燃料エンジンの研究と関連する基礎的な研究活動を紹介し、合わせて中国のその他の主な大学の研究活動についても簡単に紹介することにする。

二、西安交通大学が進めてきた研究活動

1. 天然ガス／水素混合エンジンの研究

国家「973計画」のプロジェクト「天然ガスエンジンの低温燃焼と汚染物質抑制の基礎研究」で資金助成を受け、天然ガス／水素混合技術によってエンジンの低温・低公害燃焼を実現する道を探った。中国の天然ガス自動車は既に西安を含む幾つかの都市のバス・タクシーに使われており、車の排ガス汚染を減らす上で一定の効果を上げた。希薄燃焼（Lean burn）技術はエンジンの燃油経済性を向上させ、低温・低公害燃焼を実現する効果的な手段

だが、天然ガスエンジンは希薄燃焼の際に燃焼速度が遅く、燃焼サイクル変動率が大きくなるという問題を抱えており、エンジンの安定した運転に影響する。燃焼速度が速い水素を天然ガスに混入すれば、燃焼速度を高め、燃焼サイクル変動率を引き下げることが期待できる。こうした考えに基づき、西安交通大学は天然ガス／水素混合エンジンの研究活動を集中的に進めた。研究範囲は基礎的な燃焼現象の解明からエンジンの運転までである。まず、天然ガス／水素混合エンジンの燃焼と排出について研究し、その後、天然ガスに水素を混ぜた後の燃焼に関するいくつかの基礎的な問題に的を絞り、定容燃焼装置を採用し、予混合における球状火炎の成長に対する基礎研究を行った。そして最後に基礎研究で得られた結果に基づき、エンジンの最適化制御を導き出し、エンジンの低温・低公害燃焼を実現した。我々の研究により、次のような成果といくつかの基本的現象についての認識が得られた。天然ガスに水素を混ぜれば、エンジンの希薄燃焼能力を高め、希薄燃焼の条件下でエンジンのサイクル変動率を引き下げることができ、体積割合で10%の水素を天然ガスに加えると、エンジンの希薄燃焼能力が10%向上する。天然ガスに水素を混入した時、エンジンの燃焼・放熱時間が短縮され、有害排出物の一酸化炭素(CO)と未燃焼炭化水素(UHC)が低減した。水素の添加は一酸化炭素と未燃焼炭化水素の酸化を促進する重要なファクターだと考えられる。水素の混合で燃焼速度が高まるため、最大トルク(Torque)が発生する点火時期を遅らせる必要がある。理論混合比では、天然ガス／水素混合エンジンは窒素酸化物(NO_x)の排出が増加することになる。しかし、希薄燃焼能力が向上するため、このエンジンは希薄混合気の範囲内で安定した運転が可能となり、その低温燃焼条件により窒素酸化物の排出を効果的に低減することができる。天然ガス／水素混合燃焼方式は燃料中の炭素の割合を減らすため、エンジンの二酸化炭素の排出も抑えられる。水素は単位体積当たりの質量が小さいため、水素を混ぜると、混合気の体積発熱量が低下する。研究の結果、次のことがわかった。適度な水素混合比率の場合、燃焼に対するその改善効果は燃料発熱量の低下でもたらされる効果より大きく、このため、エンジンの動力性能を高め、排出を減らすのに役立つ。しかし、混合比率が一定の数値を超えると、燃焼に対する改善効果は燃料発熱量の低下と増加する伝熱損失によって相殺され、エンジンの出力は逆に低下する。混合比率が小さ過ぎる時の改善効果ははっきりとしていない。このため、適度な水素混合比率を選択して初めて、最良のエンジン性能を実現することができる。大量のエンジン試験を通じ、水素20%の体積混合比を選択した天然ガス／水素混合エンジンが最良の動力性能を示すことを発見した。西安交通大学は均質混合気天然ガス／水素混合エンジンとシリンダー内直接噴射成層燃焼エンジン

について試験を行い、どちらも最良の水素混合比率は20%という結果が得られた。これは最良の混合比率が混合気の形成方式と無関係であることを示している。

天然ガス／水素混合による燃焼速度の向上とサイクル変動率の引き下げは、排気ガス再循環(EGR)装置を採用し、エンジンの窒素酸化物排出を一段と低減することに道を開いた。理論混合比で混合気が燃焼した時、天然ガス／水素混合エンジンは窒素酸化物の排出を増やすことになるが、適度な割合のEGRを採用すれば、窒素酸化物の排出を低減することができ、エンジンの動力性能と熱効率にも影響しない。同じサイクル変動係数において、天然ガス／水素混合はより大きなEGR率を採用することができ、EGR率が大きい時、天然ガス／水素混合の変動係数に対する低減効果は一段と顕著になる。天然ガス／水素混合と適度な割合のEGRを結び付ければ、気体燃料エンジンの安定した低温燃焼を実現することができる。EGRの割合が20%の時、窒素酸化物の排出は大幅に低減され、このEGR率と20%の水素混合比率を組み合わせてもエンジンの動力性能、熱効率、COとUHCの排出に影響しない。エンジンは低温・低公害の燃焼過程が実現されることになる。



天然ガス／水素混合エンジン

火花点火エンジンは点火後に火炎が広がっていく燃焼方式を採用している。エンジンはシリンダー内の影響要因が多い。天然ガス／水素混合燃焼における基本現象の研究が法則に合うようにするため、西安交通大学は定容燃焼装置を採用し、予混合時の球状火炎の成長について多くの理論・実験研究を行った。メタン中の水素混合比率、圧力と温度、混合気の濃度及び模擬EGRの希釈比の条件下における燃焼の基本的特性の研究である。水素を混入した後、層流燃焼速度が高まり、火炎は層流火炎から乱流火炎に変わるタイミングが早まり、火炎構造は一段と不安定になり、燃焼速度を大幅に向上させた。天然ガス／水素混合エンジンが燃焼速度を高める原因

はここにある。化学反応動力学を用い、火炎の中間基 (Intermediate radicals) と反応過程について分析も行った。同時に、シンクロトロン放射光イオン化 (Synchrotron Photoionization) の測定手段を利用し、メタン-水素-酸素低圧層流予混合火炎の中間生成物のモル分率分布曲線について研究を進め、水素混合が火炎の主要生成物と中間生成物のモル分率に及ぼす影響を分析した。その結果、水素を混入した後、火炎中のHとOHのモル分率が上昇し、水素の強い拡散性と活性が火炎の化学反応速度を増大させ、水素混入後の実験で測定された火炎中間生成物のモル分率はいずれも大幅に低下していた。



クリーン燃料燃焼研究装置

シリンダー内直噴天然ガス/水素混合エンジンは定容燃焼装置を用い、燃料の噴流及び空気との混合過程について研究を行った。また、高圧噴射燃焼と均質混合気燃焼について対比分析を行い、混合気の成層と乱流が燃料噴射時の燃焼速度向上を促すカギとなる要因であることを発見した。噴射燃焼の燃焼速度は均質混合気燃焼よりも高く、希薄混合気の状態下において、乱流と成層が噴射燃焼の速度向上に及ぼす効果は一段と顕著なものであった。天然ガス/水素混合の均質混合気燃焼速度に対する向上効果は噴射燃焼速度に対する向上効果よりも大きい。噴射燃焼は乱流のランダム特性により、火炎核形成の初期にサイクル変動が存在するが、天然ガスに水素を混入すれば、火炎核形成初期と火炎成長過程におけるサイクル変動を効果的に抑え、気体燃料の安定した高速燃焼を実現することができる。燃焼パラメータと水素混合比率の間には非線形の関係が見られる。燃焼ボンベでの結果からエンジン内に存在する現象が検証され、エンジンの研究に理論的指針を与えた。エンジンの研究活動に合わせ、数値シミュレーションの手段を用い、天然ガス/水素混合エンジンの燃焼過程についてシミュレーションを行った。これは燃焼過程の細部を理解する上で補完的役割を果たすものである。

この他、西安交通大学はエタン/水素混合、プロパン/水素混合、ブタン/水素混合等の面で予混合層流燃焼の基礎研究を進め、低炭素燃料の水素混合燃焼についてかなり系統的な認識を得た。低炭素燃料に水素を混入した後の着火特性を理解するため、西安交通大学は衝撃波管 (Shock tube) を利用し、高温・高圧条件下での水素混合燃料の着火遅れ (Ignition delay) について研究を進めており、エンジン対策のための理論的サポートと基礎的データがえられている。

2. 酸素含有燃料を用いたクリーンエンジンの研究

酸素含有燃料を用いたクリーンな代替エンジンは西安交通大学が近年進めてきた主要な研究分野の1つであり、科学技術部の「973計画」及び国家自然科学基金プロジェクトの支援を受けた。この研究活動はエンジン本体に関係するだけでなく、噴霧と燃焼の基礎研究もカバーしている。エンジンはガソリンエンジンとディーゼルエンジンである。単一燃料はジメチルエーテル (Dimethyl ether) で、混合燃料にはガソリン/メタノール、ディーゼル油/メタノール、ガソリン/エタノール、ディーゼル油/エタノール、ディーゼル油/ジメチルエーテル、ディーゼル油/ジメトキシメタン (dimethoxymethane)、ディーゼル油/ジエチレングリコールジメチルエーテル (diglyme)、ディーゼル油/炭酸ジメチル (Dimethyl carbonate)、ディーゼル油/炭酸ジエチル (diethyl carbonate)、ディーゼル油/アジピン酸ジエチル (diethyl adipate) がある。ディーゼル油/バイオディーゼル油混合燃料エンジンについても研究が行われている。

ジメチルエーテルはディーゼル油に代替するクリーン燃料と見られており、石炭又は天然ガスから得られる。石炭が豊富にある中国にとって、石炭からジメチルエーテルを製造することは現実的な技術方法と言える。西安交通大学は1997年から米フォード基金の資金援助を受け、全国に先駆けてジメチルエーテルエンジンの研究を進め、中国初のジメチルエーテル車を開発し、路上走行試験を行った。ジメチルエーテルエンジンの燃焼と排出の面で系統的な研究を繰り広げた。ジメチルエーテルエンジンがカーボンスーツ (すす) を排出しない主な原因は酸素富化の条件下における拡散燃焼現象にあり、少量の予混合燃焼でエンジン燃焼過程での低騒音が実現された。急速な拡散燃焼がエンジンの熱効率を高める主な原因である。ジメチルエーテルエンジンの給油と燃焼システムを最適化するためのカギとなる技術を打ち出した。ジメチルエーテルエンジンは無煙燃焼を実現するものであり、排気ガス再循環を採用してジメチルエーテルエンジンのNO_x排出問題を解決し、エンジンの無煙燃焼と低NO_x排出の目標が達成された。ジメチルエーテルには粘度が低く、潤滑効果が劣るという欠点がある。このため、ディーゼル油80%/ジメチルエーテル20%混合燃料の案

を採用すれば、スモーク（炭素粒子）を効果的に低減すると同時に、比較的良好な燃料潤滑性を維持することができ、既存エンジンで使用するのに都合がよい。



西安交通大学が開発したジメチルエーテル車

ガソリン／メタノール又はガソリン／エタノール混合燃料をエンジンに使用することは原理と技術の面で既にかなり成熟している。混合比の薄いメタノール又はエタノールは良好な相互融解性を備えており、エンジンの動力性能と熱効率が若干向上し、一酸化炭素を低減することができる。しかし、混合比の濃いメタノール又はエタノールは助溶剤又は表面活性剤を添加し、ガソリンとアルコール燃料間の相互融解を実現する必要がある。アルコール燃料の発熱量はガソリンより低いため、濃い比率でアルコールを混入した後、エンジンは燃油消費率が高くなり、未燃焼のメタノールとホルムアルデヒドの排出が若干増えることになる。この問題は排気管上の酸化触媒反応器によって解決する必要がある。西安交通大学はガソリン／アルコール混合燃料エンジンについて低温始動過程の性能と排出を主に研究してきた。再生可能燃料とバイオ燃料の視点から考えると、発展の余地が大きいのはガソリン／エタノール混合燃料である。

炭素粒子（Smoke）と窒素酸化物はディーゼルエンジンの2大排出物である。噴霧制御を行う拡散燃焼は混合気の一部が過度に濃くなるため、炭素粒子が生じる。噴射圧力を高め、霧化を改善することは炭素粒子を低減する1つの方法であり、また、酸素含有燃料を採用し、燃焼中の酸素を補う方法もある。研究で次のことがわかった。燃料中酸素の炭素粒子に対する低減作用は空气中酸素よりもずっと大きい。酸素含有化合物を選択する時は、幾つかのカギとなるパラメータを考慮する必要がある、例えば酸素含有量、燃料のセタン価（Cetane number）、密度、沸点、ディーゼル油との相互融解性等である。上記パラメータを考慮した上で、西安交通大学はディーゼルエンジンの燃料となるディーゼル油／メタノール、ディーゼル油／エタノール、ディーゼル油／ジメチルエーテル、

ディーゼル油／ジメトキシメタン、ディーゼル油／ジエチレングリコールジメチルエーテル、ディーゼル油／炭酸ジメチル、ディーゼル油／炭酸ジエチル、ディーゼル油／アジピン酸ジエチルの性能、燃焼、排出について研究を進めた。研究で次のことが発見された。着火遅れは燃料の種類の影響を受ける。セタン価がディーゼル油より高い酸素含有化合物を用いた混合燃料は着火遅れが短縮され、シリンダー内の最大圧力と圧力上昇率が低下し、燃焼騒音が低減される。逆に、着火遅れが増大すると、シリンダー内の最大圧力と圧力上昇率が増大し、燃焼騒音が増大する。また、次のことが発見された。エンジンの燃焼パラメータと排出指標は燃料中の酸素の割合と関係があり、燃料の種類にはあまり関係がない。即ち酸素含有混合燃料には共性関係が存在する。エンジンの熱効率は混合燃料中の酸素含有化合物が増えるのに伴って改善されるが、これは燃焼時間の短縮と拡散過程燃焼の改善によるものである。ディーゼル油／酸素含有化合物混合燃料はエンジンのCOと煙の濃度を大幅に低減することができ、負荷の大きい状態の時、その低減効果は一段と顕著なものとなる。混合燃料中の酸素の質量割合が10%の時、エンジンの炭素粒子は40%低減する。ディーゼル油／酸素含有化合物は炭素粒子を低減させ、窒素酸化物の排出が増えることもない。ディーゼル油／酸素含有化合物の粒子分布は小粒径の方に向かい、粒子の数が幾らか増える。エンジンの研究活動に合わせ、定容装置を用い、ディーゼル油／酸素含有化合物の噴霧の特性を研究し、数値シミュレーションによって噴霧の特徴を分析した。

3. ディーゼル油／溶存気体の噴霧とエンジンの燃焼についての研究

一部の気体燃料を高圧下でディーゼル油に溶け込ませ、噴霧のフラッシュ・ボイリング（Flash boiling）現象を利用すれば、燃油の霧化を促進し、さらにはディーゼルエンジンの噴射圧力を高めない条件下でエンジンの性能を改善し、排出を低減することができる。西安交通大学は一定割合のメタンとプロパンをディーゼル油に溶け込ませ、ディーゼル油／溶存気体混合燃料の生成を試み、噴霧とエンジンの試験研究を行った。噴霧試験で次のことがわかった。ディーゼル油／溶存気体は燃油の霧化品質を著しく改善し、燃油と空気の混合を促進し、噴霧中の過度に濃い混合気ゾーンを減らすことができる。噴霧の粒径分布法則は小粒径の方向へ移動するというものであり、低粘度の燃油は燃油霧化に対する溶存気体の促進作用を強めるのに役立つ。また、エンジン試験で次のことがわかった。ディーゼル油に低沸点の燃料を溶け込めると、着火遅れが短縮され、予混合燃焼の占める割合が増え、拡散燃焼の占める割合が減り、燃焼時間が短縮され、エンジンの熱効率が向上し、未燃の炭化水素、一酸

化炭素、炭素粒子の排出が低減した。しかし、窒素酸化物の排出はいくらか増える。ディーゼル油に6%のプロパンを溶け込ませた時、エンジンの炭素粒子排出はディーゼル油だけの時に比べ、50%低減した。その後、炭素粒子に対する低減効果は弱まり、ディーゼル油に14%のプロパンを溶け込ませた時、エンジンの炭素粒子排出は65%の低減となった。即ち6%の時に比べ15%低減しただけである。このため、エンジンにディーゼル油／プロパン混合燃料を使用する場合は、10%以内を選択するのが比較的妥当だと言える。

4. 混合燃料の着火遅れについての研究

着火遅れはエンジンの性能に大きな影響を及ぼし、単一燃料については既にかなり広範囲のデータがある。しかし、混合燃料については着火遅れのデータがまだ不足している。西安交通大学が進めている混合燃料エンジンの研究に合わせ、衝撃波管装置を用い、混合燃料の着火遅れの測定を、多成分の気体燃料と液体燃料について行っている。着火遅れと燃料の組成割合との間には非線形の関係があり、このため、混合燃料の着火遅れの正確なデータを得るには実験で測定するしかない。着火遅れのデータは混合燃料の化学反応動力学を発展させるための検証的なデータとなるものであり、クリーン燃料エンジンの基礎研究にとって非常に重要である。



衝撃波管装置

5. 国際間の協力

西安交通大学は高効率・低公害クリーン燃料エンジンの研究において国際間の幅広い協力関係を確立した。Wisconsin大学エンジン研究センター、MITのSloan実験室、Princeton大学、日本の慶応大学、広島大学、群馬大学、岡山大学、英国のManchester大学、Birmingham大学等と共同研究している他、多くの二国間共同研究プロジェ

クト又は政府間協定プロジェクトを引き受け、学者間の相互訪問に力を入れ、国際会議を共同で手配してきた。実質的な国際協力は西安交通大学の高効率・低公害クリーン燃料エンジン分野の研究活動を促すものであり、中国の代表的な研究拠点となっている。

三、中国のその他大学が進めている高効率・低公害エンジンの研究活動

中国の大学は高効率・低公害クリーン燃料エンジンの研究でそれぞれの特色を持つ。天津大学の内燃機関燃焼国家重点実験室はディーゼルエンジンの均質圧縮点火、低温燃焼、ガソリンエンジンの均質圧縮点火に特色があり、特に高圧多重噴射ディーゼルエンジンの研究では大きな進展がある。清華大学はシリンダー内直噴方式を採用したガソリンエンジンの均質圧縮点火で良い燃油経済性基準が得られ、低排出を実現した。エンジン燃焼の数値シミュレーションでも一定の特色を持つ。上海交通大学はジメチルエーテルエンジン及びエンジンのクリーン代替燃料で多くの研究をし、また、燃料の組合せ方式を通じ、均質圧縮点火エンジンの着火制御と負荷拡大に関する研究を進めている。大連理工大学は噴霧の質を改善することに重点的に取り組み、北京理工大学は水素燃料エンジンの研究を集中的に進め、北京交通大学は主に天然ガスエンジンの研究を行い、吉林大学はエタノール燃料エンジンの研究を専門に進めてきた。国家「863計画」の支援の下、大学が繰り返し広げている研究はいずれも自動車企業やエンジン企業と提携して行われ、中国のクリーン車開発の一翼を担っている。中国科学技術部と国家自然科学基金委員会はクリーン燃料エンジン分野の基礎研究に対しても研究経費を助成した。中国の高度経済成長と直面する環境汚染問題は高効率・低公害エンジンの研究と開発にチャンスをもたらしていると言うことができ、大学は今後も研究活動を通じ、エンジンの省エネと汚染物質の抑制のため、理論と技術の両面からサポートするであろう。



西安交通大学のクリーン燃料エンジン研究チーム

グリーン石炭発電とCO₂回収技術

•Profile•



鄭 丹星 Danxing ZHENG ●北京化工大学化学工程学院 教授

北京化工大学、化学工程学院教授、博士研究員指導教官。1950年10月生まれ。1987年、東京工業大学（日本）、化学環境工学専攻、工学博士。主に化工熱力学及びそのエネルギー利用技術方面における教育と研究、特に流体熱物性、吸収式循環、ガス吸収及びCO₂回収、エネルギーシステム分析・集積等方面に従事。1990年、教育部優秀青年教師賞を受賞。20項目余りの国家發明特許を有する。200編余りの學術論文を国内外刊行物に発表、10部余りの論著と教材を發行。中国科学院工程熱物理學研究所客員研究員、国家エネルギー專業基準化技術委員會委員、中国工程熱物理學會理事等を兼任。

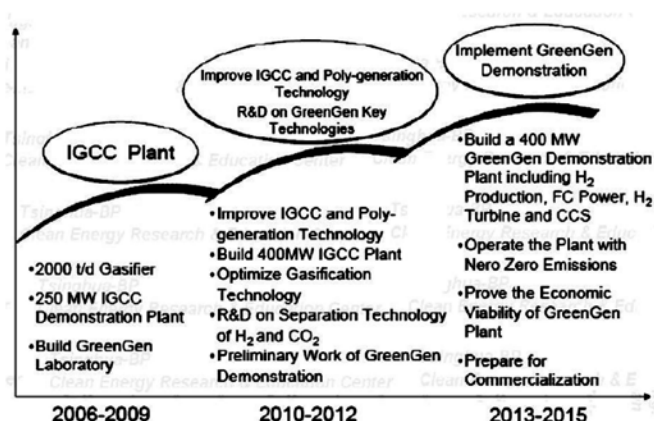
1. 前書き

中国は石炭を主要エネルギーとしている国である。2008年、中国の一次エネルギー構造における石炭の割合は69%であったが、2030年になっても、なお60%を占めることが予想されている。2008年末現在、中国の発電設備容量の中で石炭発電は75.87%を占めていた。2020年にも、石炭発電は依然として60%前後を占める見込みである。だが、現在、中国の石炭燃焼発電技術は相対的に後れている。2006年、中国の電力供給量当たりの石炭消費は366g/kWhであったが、同期の日本や欧米は299～303g/kWhであった。したがって、石炭燃焼発電機ユニットの発電効率を高め、電力供給の石炭消費を減らすことは、中国の電力工業の重要な任務の一つである。

気候変動は世界が関心を寄せている大きな問題である。報道によれば、現在、中国のCO₂排出総量はすでにアメリカに追い付き、さらにこれを追い抜き、世界第1位であるといわれる。また一方で、石炭燃焼発電所は温室効果ガスCO₂の主要な排出源である。2020年には、中国の発電によるCO₂排出が全国の工業排出総量に占める割合は70%以上にまで上昇すると見られており、今後、中国の発電によるCO₂排出の抑制という任務はますます困難なものとなるだろう。

したがって、高効率の環境に配慮したクリーンな石炭燃焼発電技術を加速的に発展させることは、中国の将来の電力工業発展のための必然的選択であり、根本的な解決の道である。2005年、中国の発電・石炭・投資の中核企業が共同で發起して、「グリーン石炭発電（GreenGen）」のプランを打ち出し、資本を投じて綠色煤電有限公司を組織・設立した。「グリーン石炭発電」は石炭の総合利用効率を高め、石炭発電の環境に対する影響を減らし、CO₂を含めた各種汚染物質の近ゼロエミッションを実現し、石炭発電の持続可能な成長などの諸問題を解決することに力を入れている。図1に示すように、「グリーン石炭発電」プランは3つの段階に分かれており、約10年の期間を使って、普及可能な近ゼロエミッションのグリーン石炭発電モデル発電所を開発する計画である。第1段階は、2011年までに、250MW級のIGCC（Integrated

Gasification Combined Cycle）モデル発電所を建設すること。第2段階は、グリーン石炭発電中枢技術の研究開発。第3段階は、2015年前後に400MW級のグリーン石炭発電モデル工事を完成させることである。このプランの中枢技術はすでに『国家中長期科学技術發展計画要綱』に組み込まれている。さらにこのプロジェクトは、世界銀行、アジア開発銀行、アジア太平洋のクリーン開発と気候変動に関する組織、国際的な幾つかの大きな環境保護基金組織などからも非常に注目されている。



◎図1 「グリーン石炭発電」プラン

「グリーン石炭発電」を発展させる重要な基盤の一つはIGCCである。これは今日の熱力発電システムの先進技術の集積であり、クリーンな石炭ガス化技術と高効率のガス・蒸気コンバインドサイクル発電システムを結合したものであり、高い発電効率だけでなく、極めて良好な環境保護性能を有し、世界で最もクリーンな石炭燃焼発電技術として認められている。現在の技術水準の下で、IGCCによる発電の正味効率は43～45%にも達し、しかもなお向上の潜在力を有しているが、その汚染物質の排出量は通常の石炭燃焼発電所のわずか1/10であり、消費水量は通常の発電所の1/2～1/3でしかない。さらに重要なのは、IGCCは炭素回収・貯留のCCS（Carbon Capture and Storage）技術を実施するのに便利だということであ

る。IGCCシステムが生み出すCO₂ガスを溶剤吸収法によって回収し、加圧液化を行い、安定した地質構造中に貯留することにより、理論上、CO₂のゼロエミッションを実現することが可能である。

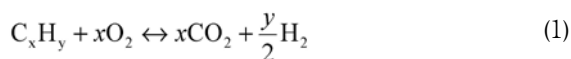
本文はIGCC及び物理吸収法によるCO₂回収技術の現状と研究の進展を振り返り、「グリーン石炭発電」プランの中国におけるプロジェクトの近況を紹介するものである。

2. CO₂回収技術とIGCC発電システム

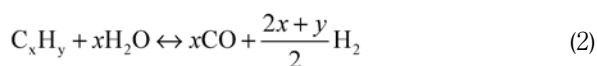
2.1 燃料燃焼によるCO₂の回収技術

現在、完成度の高いCO₂回収技術の主なものとして、燃焼前回収、燃焼後回収、酸素富化燃焼の3つがある。技術方針1は燃焼前回収技術で、燃料に対し燃焼前にまず前処理を行い、CO₂とH₂に転化させたうえで、CO₂をそこから取り除くものである。方針2は燃焼後回収で、燃料燃焼後の廃ガスの中からCO₂を回収するものである。方針3は代表的な酸素富化燃焼回収技術である。3つの方針の中では、燃焼後回収の技術が相対的に完成度が高く、一方、酸素富化燃焼は酸素富化粉炭ボイラーの応用面において優位性を具えている。しかしながら、最も魅力があるのは燃焼前回収である。このほか、いくつかの非常に潜在力のある新しい技術——例えば、化学ループ燃焼、膜分離により水素を製造するIGCC、膜分離により酸素を製造するIGCCなどは、まだ研究・開発の段階にある。

燃焼前回収の主な反応プロセスは以下の通りである。
燃料はガス化炉の中で部分酸化反応を起こす。



水蒸気と改質反応を起こす。



シフト反応器の中で、COと水蒸気が反応し、CO₂に転化する。

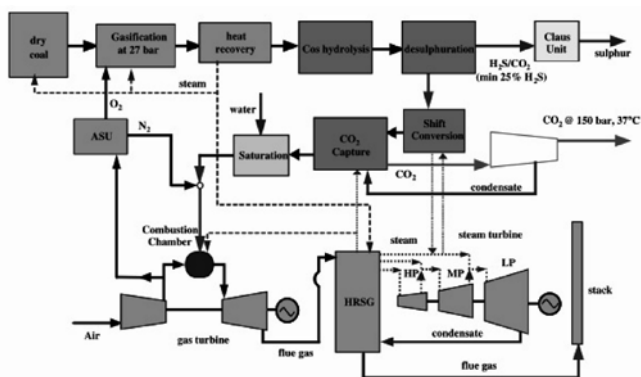


燃焼前炭素回収の優位性は第一に、燃焼前システムが現在広く応用されている完成度の高い技術を使用していることにあり、IGCC発電所はその代表的システムである。第二に、燃焼前システムの生み出すガス流は中圧CO₂富化ガス流であり、同じ脱炭負荷の下では、設備の体積が小さく、プロセスのエネルギー消費が著しく低減する。しかも、燃焼前システムはIGCC発電と化学品のポリジェネレーション——合成ガスからのメタノール、ジメチルエーテル、合成ガソリン等の製造を実現することができ、わが国の国情に合ったクリーンな石炭新技術を発展させるのに有利である。だが、わが国が近年大量の石炭発電所を新設してきたという現実からすれば、燃焼後回収技術の今後の研究開発もまた、必ずや大いに重視されるで

あろう。

2.2 炭素回収機能を具えたIGCC発電システム

IGCCの燃料は石炭、残油、石油コークス、バイオマスなどである。典型的な燃焼前炭素回収による石炭燃焼IGCC発電システムには、図2に示すように、石炭ガス化、空気分離、コンバインドサイクル発電、CO₂回収の4つのユニットがある。



◎図2 典型的な燃焼前炭素回収による石炭燃焼IGCCシステム

空気分離ユニットは酸素ガスを生み出してガス化炉に供給する。石炭はガス化炉の中で酸素ガス、水蒸気と部分酸化反応 (1) 及び改質反応 (2) を起こし、 H_2 とCOの混合ガス、すなわち合成ガスを生じる。合成ガスはシフト反応 (3) 器に入り、COは CO_2 に転化し、同時にさらに多くの H_2 を生じる。このときのガス流圧力は3～7MPaの範囲内にあり、 CO_2 モル濃度は40%以上である (いわゆる中圧 CO_2 富化ガス流)。脱炭ユニットに入った後、大部分の CO_2 は除去される。脱炭を経た H_2 富化ガス流がガスタービンに供給されて燃焼発電を行い、ガスタービンの排気余熱とガス化プラントの顕熱回収熱量が余熱ボイラーによる加熱給水を経て過熱蒸気を生み出し、蒸気タービンを駆動して再度発電を行う。IGCCは燃焼後炭素回収の方法を採用することも可能である。



◎図3 Wabash River IGCC発電所、アメリカ

IGCC関連技術は比較的完成度が高く、世界中にすでに少なからぬ商業的モデルプロジェクトがある。そのうち、単一容量が250MW以上の、代表性を具えたIGCC発電所はアメリカのWabash River (260.6MW、図3) とTampa (250MW)、オランダのDemkolec (253MW)、スペインのPuertollano (300MW)、イタリアのPortoscuso (450MW) などである。

3. IGCCの中圧CO₂富化ガス流からのCO₂分離

3.1 現有のCO₂吸収分離プロセス

CO₂吸収分離法は物理吸収と化学吸収の2つの基本方式に分かれるが、両者を結合することも可能である。物理吸収の代表的プロセスには低温メタノールを用いる方法 (Rectisol) とポリエチレングリコール・ジメチルエーテルを用いる方法 (Selexol) がある。物理吸収法はCO₂の分圧が高めで、浄化度の要求が低い場合に適しており、吸収剤再生時に加熱の必要がなく、フラッシュ蒸発またはストリップングを行うだけでよく、総エネルギー消費が化学吸収法に比べて小さい。化学吸収はCO₂と溶剤の間に発生する化学反応を利用して、混合ガス中のCO₂を固定する。化学吸収法はCO₂の分圧が低めで、浄化度の要求が高いガス流を処理するのに適しているが、ただし吸収剤の再生時に加熱が必要で、エネルギー消費がより大きい。その代表的なものはMEA (モノ・エタノールアミン) プロセスである。

Rectisol法はドイツのLinde社とLurgi社が共同開発した一種の酸性ガスの物理吸収浄化プロセスである。このプロセスはメタノールの-50℃という低温下では酸性ガスに対する溶解度が極めて大きいという物理的特性を利用して、CO₂などの酸性ガスを吸収するものである。このプロセスはガス中のNH₃及び水分含有量についてかなり高い要求を有しているため、吸収塔に入る前に必ず徹底的に除去しておかなければならない。低温操作は設備の材質に対する要求が高めである。また、その熱交換・冷凍設備の数が多いうえに複雑で、プロセスフローが冗長である。Selexol法はAllied化学会社が開発し、1982年にNorton社に技術移転された。現在、世界には40組のSelexolプロセス装置がある。そのプロセスフローは図4に示す通りである。Selexolプロセスの操作条件は、吸収温度が25～0℃で、真空フラッシュ蒸発を設けない場合、CO₂回収率は70%であり、ストリップングした空気を二段炉に戻した場合、CO₂回収率は95%にも達する。

活性化MEAはUOP社の特許であり、アメリカですでに数十年にわたる使用の歴史を持ち、現在、世界に数百組の装置がある。BASF社が打ち出したN-メチルジエタノールアミン (MDEA) 物理・化学吸収法は30年余りにわたって発展してきた方法で、新設の工場でもかなり多く使用されている。

IGCCの燃焼前回収システムにおいては、物理吸収法を

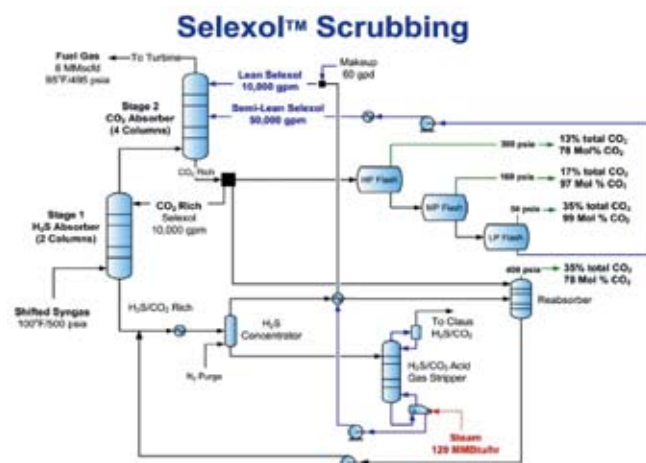


図4 Selexol脱硫脱炭フロー

選択すれば、ガス流圧力が比較的高く、CO₂濃度が比較的高いという特徴を十分利用することができ、設備の体積を減らし、循環吸収剤の使用量を減らす上で有利である。しかも、吸収剤の再生はフラッシュ蒸発によってすぐに実現でき、化学吸収法に比べて大量の脱着熱が節約でき、分離のエネルギー消費が著しく低減する。物理吸収剤は設備に対する腐食性が小さく、設備費とメンテナンス費を大きく低減できる。したがって、Selexol等のようなプロセスは多数のIGCCの燃焼前回収システム案とされている。

CO₂吸収分離プロセスは化学工業においても完成度の高い応用がなされてきたが、炭素回収技術としての使用は近年ようやく真剣に考慮され始めるようになった。様々な類似の石炭ベース発電システムの特大規模の工業炭素排出源を前にして、早急に解決の求められる多くの技術的問題が依然として存在している。それは例えば、CO₂の高効率吸収剤、エネルギー消費の低い分離プロセスの研究・開発などである。

3.2 新型吸収剤の開発

報道によれば、近年、Selexol溶剤はまた新たな進展を遂げ、Selexol II 溶剤はいちだんと優れた性能を有しているという。CO₂溶解度が増大し、溶液循環量が減少し、吸収のスピードが高まった。BASFはSelexol溶剤と似通った一種のポリエチレングリコール・メチルイソプロピルエーテルの混合溶剤を開発し、Sepasolv MPEプロセスと称し、現在すでに3組以上の装置が完成している。

郭亮らはブチルエーテルを物理吸収剤とすることを提起したが、その根拠は最大超過についてのギブス関数法である。CO₂-ブチルエーテルの気液平衡データを測定することにより、ブチルエーテルは蒸気圧が相対的に低く、CO₂に対して優れた吸収能力を具え、溶剤循環量とプロセスのエネルギー消費を著しく低減できることを発見した。フローシミュレーションの分析結果によれば、同じ条件下では、新しい吸収剤を採用したプロセスは、

Selexol法に比べエネルギー消費を大幅に減少することが明らかである。

日本RITEが開発した化学吸収剤RITE 5B、RITE 6C等は、優れた炭素回収能力を具えている。CO₂ 1t /dのmini plantによるシミュレーションの結果によれば、CO₂ 3000t /d規模の回収工場についてエネルギー消費の見積もりを行ったところ、吸収剤再生のエネルギー消費は2.5GJ/t CO₂ (RITE 6C) であった。同様の条件下では、MEA吸収剤を使用した場合に比べ、エネルギー消費が41.2%で済む。

イオン液体をCO₂吸収剤とするのは、一つの新しい研究方向である。Brenneckeらの研究により、イオン液体には非常に強いガス選択吸収特性があることが発見された。CO₂は比較的高い溶解度を有しているが、H₂、CO、N₂等はほとんど溶解しない。燃焼前のガス流の主な組成はH₂、CO₂、COであるので、この方法にはかなり魅力がある。イオン液体はほとんど揮発せず、CO₂脱着のエネルギー消費を低減するのに有利である。

4. 中国におけるグリーン石炭発電の新たな進展

4.1 華能集団のグリーン石炭発電プロジェクト

華能北京熱電所のCO₂回収モデル工事が2008年7月16日に正式に完成し、運転を開始したことは、中国の炭素排出削減技術が初めて石炭燃焼発電の分野で応用されたことを示している。この工事は西安熱工研究院が完成させ、自主知的財産権を有する、伝統的炭素燃焼発電所に適したアミン法低分圧CO₂回収技術を開発し、すべて国産設備を採用している。現在、CO₂回収率は86%を上回り、年間3000トンのCO₂を回収している。プロジェクトの完成後、華能北京熱電所は全国初の脱硫、脱硝、CO₂回収設備を装備した、都市中水を利用した熱電併給のクリーンで高効率な環境保護型グリーン発電所となり、各項環境保護基準がいずれも世界の先進水準に達した。このプロジェクトは中国・オーストラリア両国政府の2007年『気候変動とエネルギー問題に関する共同声明』の中の国際協力プロジェクトに組み込まれ、工事建設の過程でオーストラリア連邦科学工業研究機関の協力と支援を得た。また、華能集団が上海に建設中の毎年10万トンの炭素回収プロジェクトは、2009年末に完成・運転開始の見込みとなっている。

2009年7月6日、わが国が初めて自主的に開発・設計・製造し、建設を行うIGCCモデル工事（アジア開発銀行プロジェクト）——華能グリーン石炭発電天津IGCCモデル発電所が天津市臨港工業区で建設に着工した。知るところによると、この発電所はわが国初の25万kW級IGCC発電機ユニットを建設し、さらに華能集団が自主的に研究開発した2000t/d級の二段式微粉炭ガス化炉を採用するという。初の発電機ユニットは2011年に完成の予定で、その暁には同発電所はわが国で最も環境に優しい石炭燃焼

のモデル発電所となり、発電効率は48%、脱硫効率は99%以上に達することができる。プロジェクトの実施とにらみ合わせ、実際の工事データを採用して、CCSモデル工事の総合的リスク評価、サイト選定、融資メカニズム等の研究を行うとともに、これらに関連した能力確立活動を展開し、初めての比較的大規模な、全工程のCCSモデル工事を中国に建設するために、支援を提供することになっている。



◎図5 華能北京熱電所のCO₂回収装置



◎図6 華能グリーン石炭発電天津IGCCモデル発電所システム

4.2 中国・EU協力プロジェクト

2009年10月28～29日に開かれた、中国・EUの近ゼロエミッション石炭利用協力事業NZEC (China - EU Cooperation on Near Zero Emissions Coal) の第一段階総括会議と後続段階の協力展望報告会が北京で滞りなく閉幕した。2005年9月の中国・EU首脳会議期間中に、中国・EU双方はNZEC協力了解覚書に調印し、これを中国・EUの気候変動分野技術協力の一部分とした。その目標は、2020年には、中国とEUにおいて近ゼロエミッションCCSの先進的炭素技術のモデルを示すということである。中

国・イギリスのNZECプロジェクトは中国・EUのNZEC協力了解覚書の支えである。イギリスは三つの段階を経てNZECモデルの目標を実現する計画である。その第一段階は、中国でCCS技術のモデルを示し発展させるための実行可能なプランを研究すること。第二段階は、CCS技術の開発事業をさらに展開すること。第三段階は、2014年までにCCS技術のモデル発電所を建設することである。

4.3 中日協力プロジェクト

大慶油田の2007年の産油量は約4200万トンで、近年は産出量が減りつつある。聞くとところによると、CCS技術を活用して油田にCO₂を注入すると原油の粘度が低下し、原油産出量の増加に有利であるという。2009年から、中日両国政府は共同提携により、毎年、ハルビンなど多数の石炭燃焼発電所からCO₂ 300万トンを回収し、パイプラインで大慶に送り、油田に注入することを計画しており、年間約150万トンの増産という効果がもたらされることを見込んでいる。日本の日揮株式会社など、エンジニアリング技術方面の大型企業がこのプロジェクトに参加する。日本側はこれを地球温暖化解決のための貢献の一つにしたいと期待している。

4.4 中米協力プロジェクト

2008年6月、中米両国は『中米エネルギー・環境10か年協力枠組み』に調印した。2008年8月、中国華能集団とアメリカのデューク・エナジー社は協力覚書に署名し、再生可能エネルギーと、CCS及び石炭ガス化等のクリーン石炭技術によるクリーンエネルギー技術の共同開発を計画した。デューク・エナジー社が建設中の630MWのIGCC発電所は世界で最もクリーンな、最も規模の大きい、最も先進的な石炭燃焼発電所の一つで、2012年に運転を開始する見込みである。華能集団も中国のグリーン石炭発電技術を積極的に推進しているところである。

2009年11月17日、中米両国首脳が発表した『中米共同

声明』の「気候変動、エネルギー、環境」部分は、中米クリーンエネルギー共同研究センターが、クリーンエネルギーの共同研究開発に従事する両国の科学者とエンジニアリング技術者のために便宜を提供すること、今後5年間に、両国はこの研究センターに対し少なくとも1.5億米ドルを投入すること、双方は大規模なCCSモデルプロジェクト方面での協力をさらに促進することを表明した。中国神華集団とアメリカGEエナジー・グループの双方はすでに合弁会社設立合意書に署名し、協力して先進的石炭ガス化技術の中国の工業分野における応用を拡大し、IGCC技術の性能と経済性をいっそう高めるとともに、共同でCCS技術のIGCCへの商業的応用を推進することを発表している。

5. 結語

気候変動という重大な問題に対して、最近、中国はGDP当たりの温室効果ガス排出を40%削減することを承諾し、排出削減に対する中国政府の積極的姿勢を明らかにした。本文は中国の石炭燃焼発電所におけるCO₂回収技術の発展の最先端を紹介したものである。IGCCは燃焼前の炭素回収技術を採用するのに適しており、それが炭素回収の技術経済性を高め、国情に合った動力と化工品のポリジェネレーションを発展させる上で有利であると考えられる。また一方で、わが国が石炭発電を大量に新設してきたという既存の現実からすれば、燃焼後回収技術についての今後の研究開発もまた、必ずや大いに重視されるであろう。

謝辞

本論文の作業は国家高度技術研究発展計画(2008AA062301-04)による資金援助を得た。ここに謝意を表する。

水素エネルギー社会の構築を目指して —低炭素社会実現のために—

•Profile•



勝田 正文 かつた・まさふみ ●早稲田大学理工学術院環境・エネルギー研究科教授

1950年3月生まれ。1982年早稲田大学より工学博士受領。1977-1982東京電機大学工学部助手。1982-1984早稲田大学専任講師。1984-1989早稲田大学助教授。1989から同大学教授。現在日本機械学会フェロー、評議員、企画理事。日本冷凍空調学会参与、監事。日本伝熱学会元副会長。

1. はじめに

我が国では、1993年度に国の水素技術開発プロジェクト『水素利用国際クリーンエネルギーシステム』、略称WE-NET (World Energy Network) 第I期計画を新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のプロジェクトとして発足させた。本プロジェクトは、海外の未利用再生可能エネルギーを利用して液体水素を生産し、消費地に海上輸送して発電や自動車用燃料として利用することを最終目標としていた。第I期計画 (1993～1998) は、長期計画 (フィジビリティスタディ) としてスタートした。しかしこの間、エネルギーを取り巻く情勢が大きく変化したこと、それと時を同じくして、再生可能エネルギーをはじめとした新エネルギー (太陽電池や風力発電など) が、世界的にも (特に先進国を中心に) 普及の段階に入りつつあること、加えて固体高分子燃料電池技術の急速な進展等を考慮して、第II期 (1999～2003) では、これら技術開発動向を踏まえ、純水素固体高分子燃料電池、水素自動車燃料系システム、水素ステーションなど短期に実用化できる技術開発を優先して行うよう軌道修正された。すなわち1993年当時、『夢』の水素エネルギーにすぎなかった段階から、近い将来『現実』の世界となる段階へ到達したと判断したものである¹⁾。事実、その後、本プロジェクトは水素の安全利用に関する開発研究や燃料電池に係る技術開発に移行している。また、ごく最近『戦略技術ロードマップ』がNEDOにより策定され (<http://www.nedo.go.jp/roadmap/>)、その中の水素編で水素製造、貯蔵、輸送、供給に関する2020年までの技術開発ロードマップが紹介されている。このマップは2008年夏の洞爺湖サミットの際に提示されたクールアース50に反映されている (クールアース—エネルギー革新技術計画—経済産業省)。ここではより具体的な水素製造、貯蔵や供給の技術開発について言及すると共に飛躍的な低コスト化、例えば、2020年を目標に輸送コスト (高圧輸送7円/m³、液体輸送3円/m³) や水素価格40円/m³を求めている。成果普及に関する課題、とくに供給インフラでは、

「黎明期は、化石燃料改質器一体型の定置燃料電池やガソリンスタンドにおける水素スタンドの併設から利用が進展し、技術・需要の進展に合わせ、水素ステーションや低圧パイプラインを用いたローカル水素供給システムの活用が見込まれる。将来は、ローカル水素供給システムとコンテナ等による大規模生産拠点からの輸送との最適な組み合わせによって、全国規模の水素供給インフラが構築されることが期待される。」としている。これを受け、エネルギー供給産業の戦略としてマイクログリッド内に水素供給を考えるようになった。

(http://www.enecho.meti.go.jp/policy/coolearth_energy/coolearth-gaiyou.pdfを参照)

そこで本稿では、間近に迫る水素エネルギー社会のモデル構築をこれらのロードマップに先行して目指した研究開発の取り組み (本庄早稲田地域におけるG水素モデル社会の構築、環境省地球温暖化対策事業、『G水素プロジェクト』2003-2007) について紹介するとともに、本プロジェクトの成果および課題について述べる。

2. G水素による水素エネルギーモデル社会の構築

水素社会の実証事業モデルの概念図を図1に示す。ところで、水素が二次エネルギーとして期待される所以は、①原料に多様性があり、種々の一次エネルギーを使って造りだせるため資源的な制約がない、②燃焼生成物が水だけであるために環境破壊の心配がなくクリーンである、③サイクルが早いために、地球上の物質循環を乱さない、④水素は貯蔵が比較的容易である、⑤汎用性が高い。例えば、高効率で運用できる燃料電池での分散型発電、自動車や航空機の燃料、水素と金属あるいは合金との反応によるエネルギー変換機能を用いた電池等への利用などの特徴を有しているからであると、説明されている²⁾。新しい取り組みではさらに踏み込んで、可能な限り化石燃料による一次エネルギーに依存しない「脱化石資源」、「水素供給の多様化」を目標に、グリーン水素 (以降G水素と記す) を以下のように定義した。すなわちG水

素とは、

- I. 再生可能資源を活用して得られる水素ならびに再生可能資源を活用してアルミニウムやシリコン等を媒体として得られる水素、
- II. 一次～三次産業から排出される廃棄物（農林・畜産・水産・食物残渣等）を活用して得られる水素、
- III. 副生成物として回収される水素、
- IV. G水素社会として取り上げる水素（ⅢとⅣはエクセルギー、LCA評価による検討に基づく）。である³⁾。

このように水素エネルギーモデル社会の構築を最終目標に、なかでも水素資源の多様化の一環としてG水素を定義してこれを活用した「ゼロエミッション都市作り」を目指して、G水素の製造・輸送・貯蔵・利用に関する主要技術開発を『本庄・早稲田地区』で展開した。すなわち、ここに展開するプロジェクトは、『今世紀は、「脱化石資源」、「資源のエクセルギー評価に基づいた活用」、「水素資源供給の多様化および廃棄物の減量」を目指すことにより、持続性のある地球環境の保全が達成できる』という基本理念に基づく。

（http://e-tech.eic.or.jp/libra/lib_6/lib6.htmlを参照）次に、各タスクの考え方およびプロジェクト提案時の計画を順次述べる。

2.1 G水素の製造

既に述べたように二次エネルギーとしての水素は、再生可能エネルギー、原子力や夜間余剰電力などによって水電解あるいは天然ガス、メタノールそしてガソリンなどを改質して製造するのが一般に考えられている製造シナリオである。従って、燃料電池であれ、エンジンであれエネルギー変換プロセスでの相当な高効率化が必須であり、製造・変換過程での一次エネルギーをどこから供給するかによって、クリーンなエミッションである優位性を除いて、エネルギー変換過程での優位性が損なわれる懸念が生じる。

そこでG水素の製造については、一次～三次産業から副生する物質、エネルギーを原料とする、以下の技術開発を試行した。

- (1) 廃シリコンからの水素の製造
- (2) 廃アルミニウムからのG水素の製造
- (3) 水素発酵菌によるG水素の製造

(1) および(2)については、半導体製造・加工排水中の高純度シリコン切削・研磨屑を水酸化処理して高純度水素を製造する。同様にアルミニウムについても、アルミニウム屑、アルミニウムドロス等の水酸化処理で製造する。ここでは、アルミニウム・シリコンを媒体とし、再生利用可能資源を輸送して、消費地での水素ならびにエネルギーとして回収する考え方について、アルミニウムを例に述べる。二次産業からの副生水素としては、鉄鋼産業におけるコークス炉ガスからの改質、ソーダ産業からの塩分解の副生水素などがよく知られ、話題となっ

ている。しかしながら、これらのガスはいずれも石油、石炭および電気を消費しており、真の意味でのG水素とは位置づけ難い。

①アルミニウムの例

アルミニウムは原料であるボーキサイト（酸化アルミニウム： Al_2O_3 ）を主成分に酸化鉄、酸化シリコンを含有する鉱石）を水力発電等による電気エネルギーによって還元して製造される。

②わが国では、このようにして製造されたアルミニウム地金を約240万トン/年輸入している。また、国内でのアルミニウムリサイクルによって回収されたアルミニウム屑は、電気エネルギーによって再生され、アルミニウム地金として約120万トン/年製造されており、国内では合わせて約360万トン/年のアルミニウムが流通している。このように大量に流通しているアルミニウムのなかには再生されにくい屑も発生しており、今後増加していくものと考ええられる。

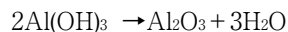
一方、アルミニウムをアルカリ溶液中で反応させると



$$\Delta H = -418.6 \text{ kJ/mol}$$

水素、水酸化アルミニウムと熱エネルギーが回収される。

③ $\text{Al}(\text{OH})_3$ は高温で焼成することにより



$$\Delta H = +19.0 \text{ kJ/mol}$$

となり、若干のエネルギーを付加することによりアルミニウムの原料となる。

つまり、アルミニウムに託した水力エネルギーを、先ずアルミニウム製品としてその機能を果たした後、水素と熱を回収して水酸化アルミニウムを得る。得られた水酸化アルミニウムに若干の熱を付加して酸化アルミニウムとした後、Al地金を輸入した帰り船に積み込む。このようにして、再生可能資源(水力発電等)はAlを媒体とした循環システムが構築される。この際、発電に化石燃料を使用していないことが重要で地球温暖化に寄与できると位置づけられる。

(3) では食品系残渣、排出物を原料とし、嫌気性水素生成細菌の利用を考えている。この方式では、有機性廃棄物をまず酸発酵によって有機酸に変換後、水素ガスと二酸化炭素として回収する。有機性廃棄物に水素生成細菌を適用することで効率的な水素生産が可能になり、環境浄化とエネルギー回収の双方に貢献が可能であると考える。なお、生成する二酸化炭素はカーボンニュートラルであるため、地球温暖化には寄与しない。この方法における課題は、有効な生成細菌を育成することおよび温度を適宜制御することで飛躍的に水素生成速度を向上させることにありと認識している（クールアース50においてもメタン発酵や水素発酵は、効率のよい発酵菌の

探索など、研究段階にあるとしていることを付言する)。

2.2 G水素の輸送・貯蔵

G水素エネルギーをモデル地区にスムーズに導入するためのインフラの大部分は、輸送と貯蔵技術にあるといっても過言ではない。水素の輸送・貯蔵手段として、液化方式、高压方式、水素吸蔵合金方式などが考えられる。最近の水素ステーション建設動向を見ると、国内での一般的な水素の輸送・貯蔵方式としては、圧縮方式が主流になりつつある。しかし、中長期的な候補としてその他の方式も視野に入れる必要性は、国際的(米国・EUのロードマップ)にも認知されている。そこで、水素吸蔵合金(MH)を中核物質として以下の3課題について、検討している。

- (1) HCS-MHの製造技術：水素化燃焼合成技術による活性化処理フリー水素吸蔵合金製造技術
- (2) SG化処理技術と水素精製機能を有した吸蔵装置の製作：シリコン樹脂をバインダーとしたMHの加工技術の確立と水素精製機能を備えた吸蔵装置の製作
- (3) MHを利用した水素貯蔵・輸送技術：地域への分散型供給を目指し、MHによる水素精製・輸送および貯蔵の最適化を図る

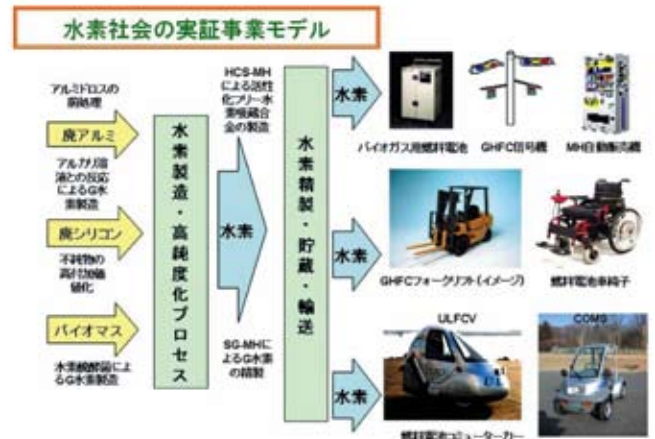
ここでは(1)と(3)について述べる。(1)の技術は、高压水素雰囲気下での燃焼合成技術であり、この方式によれば、大量の熱と時間を必要とする活性化処理が省略でき、加えて、同一合金組成にあって水素吸蔵量に優位性が認められる。第二次のWE-NET計画では3wt%を吸蔵量の目標値として掲げたが、はるかに高い値が見込まれる画期的な製造法である。将来予想される、個別分散型でのG水素エネルギー利用に対して有効な技術であると認識している。

(3)の技術は、(1)の高性能水素吸蔵合金によるモデル地区での水素貯蔵受入・供給システムの技術開発によって、各種燃料電池の実用化ならびに普及、燃料電池コジェネレーションシステムの実用化を促し、加えて開発予定の一人乗りFCコミュータ、交通制御システムなどモビリティ環境やヒートポンプシステムへの水素供給も可能とする水素輸送・貯蔵技術である。

2.3 G水素の利用技術

G水素の供給先については主に燃料電池を考えているが、利用技術では下記のような他に例を見ない、ユニークな応用を提案している。これらの技術はいずれも、実験室レベルの開発・研究段階を終了し、実証段階に至っている。(1)PEFCコジェネレーションシステムの開発、

(2)超軽量一人乗り自動車(カーシェアリング用)の開発、(3)カセット式燃料電池信号機システム、(4)FC駆動車椅子の開発、(5)MH利用の小型自動販売機(低温度差空調・冷凍装置)、(6)バイオマス由来のPEFCの開発である。



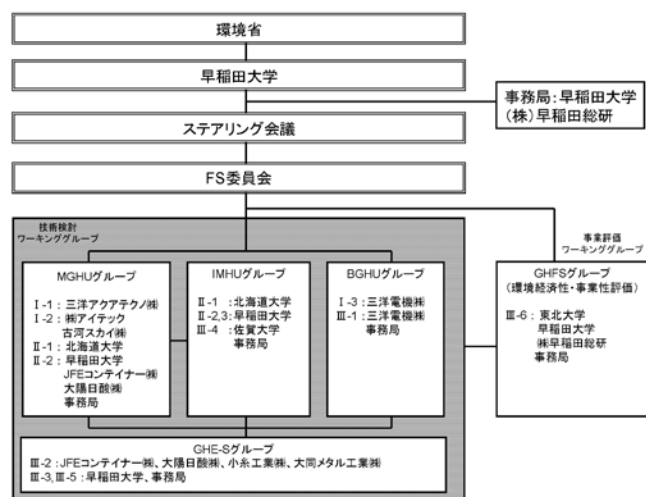
◎図1 水素社会の実証事業モデル(本庄・早稲田地域でのG水素社会の構築)

http://www.waseda.jp/rps/information/magazine/front/front_080527.html (参照)

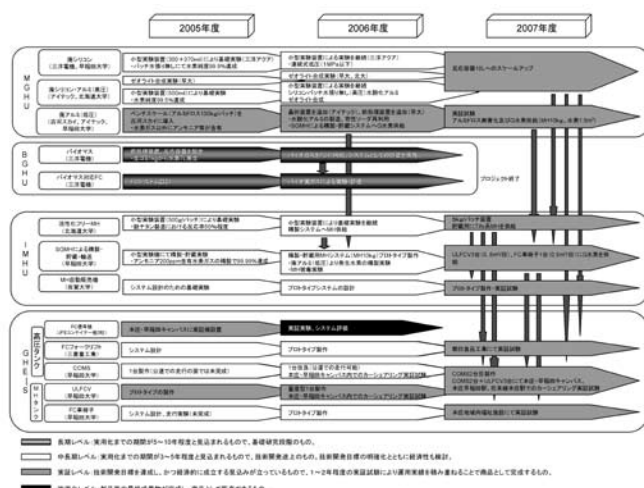
(1)と(6)は廃棄物由来のG水素やバイオ由来水素ガスを直接利用するための定置型燃料電池システム、とりわけ経済的なシステムを開発する。また、コジェネレーションシステムとすることで排熱の応用も期待される。さて一方、近年、大気環境の悪化や化石燃料の枯渇が深刻化し、自動車からの排出ガス低減が強く求められ各所で低公害車の実用化が強く求められている。このような状況を鑑み、(2)では、総合的な低公害化、充電時間の短縮を目的とし、一人乗り電気自動車をベースとして、既存技術を摘要した燃料電池ハイブリッド自動車を設計、製作する。このいわばコミュータカーは、健常者はもちろんのこと、今後迎える高齢者社会や身障者にも配慮して、大学での研究ならではの特徴を前面に出している。さらに2005年度以降において、試作車両に車両情報(車両位置、車速、燃費等)通信装置を搭載する。この情報を中央サーバーに送り管理する通信システムを構築する。最後に2006年度においては車両を複数台製作し、早稲田大学本庄キャンパスを対象地区とし、上記システムのフィジビリティスタディを実施し、(3)で新たに設置する新方式信号装置とサーバー情報を連携させることにより最適な交通流制御手法を提示する。

(4)では、高齢化社会を迎えるに当たって今後需要が増加するであろう電動車椅子のパワーユニットの燃料電池化と、インテリジェント化をさらに推し進め、障害者や高齢者にとって利用しやすい車椅子の提案につなげていく。以上のように全体では12課題を提案し、4大学・10企業が参加している。事業全体を概観する構成図を図2に、研究課題及び開発組織を図3に示す。

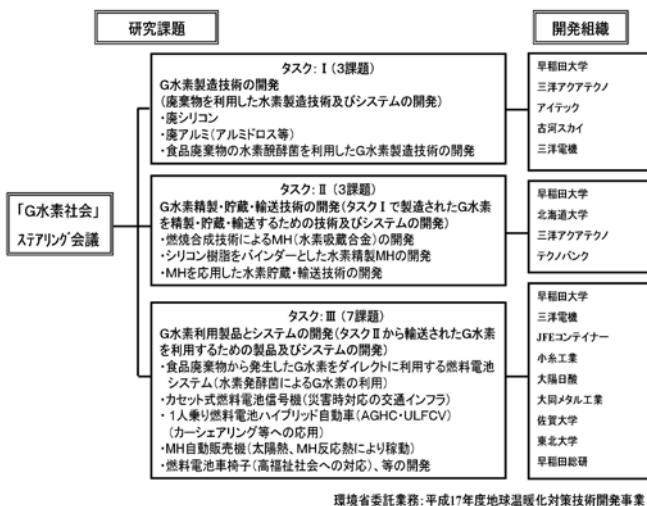
図2の中で、事業評価WGは、それぞれの技術検討グループに参加して各システムの基礎データ等を収集し、GHFS(Green Hydrogen Feasibility Study)グループにて環境経済性及び事業性の評価検討を行った。さらに、技術検討WG・事業評価WGでの議論を踏まえ、その評価等をプ



◎図2 技術開発の実施体制



◎図4 技術開発ロードマップ



◎図3 課題と組織

プロジェクトの展開に適正に反映させるため、FS委員会を設置して全体計画に関わる意思決定を行う仕組みを構築した。

3. 開発目標

FS委員会の評価を基に、各技術開発WGによる最終目標を以下のように設定した。また、研究開発の進捗状況を分類評価して、実用化までの時間及び経済性を考慮して、図4に示すロードマップを独自に作成した。

- MGHU: 低圧アルミ(アルミドロス処理800kg/day)、高圧アルミ・シリコン(35MPa、純度99.99%、水素6,000Nm³/y)
- BGHU: 1kgの生ゴミから20Lの水素製造、発酵残渣におけるBOD160mg/L、T-N120mg/L以下
- IMHU: 低コスト活性化フリーMH(TiFe)の製造、水素精製純度99.999%
- GHE-S: ULFCV5台、COMS3台、GHFC信号機1機、FC車椅子3台、FCフォークリフト1台

4. 事業成果

4.1 MGHU

(Metal-Green Hydrogen Utilization) システム

MGHUは、シリコン・アルミ等の金属を原料とする水素製造技術およびその周辺技術について検討するワーキングである。廃アルミの場合、効率的な反応を行うため予備処理を実施する。次に、アルカリ溶液にて水素化反応を行った後、低圧もしくは高圧で水素を回収する。水素と同時に発生するアンモニアの処理技術も検討している。生成物として水酸化アルミもしくはペーマイトを回収する。シリコンの場合も同様に、アルカリ溶液での水素化反応を行う。副生成物を高付加価値製品とするため、生成物である珪酸ソーダと廃アルミ(副生アルミを含む)処理溶液からの析出物を原料としてゼオライトの製造技術を開発する。廃アルミからのG水素製造では、①廃アルミからのG水素製造(低圧)において実証機設計、製作、試運転及び実証試験、装置特性把握を行った。また、②廃アルミからのG水素製造(高圧)(アイテック)において基礎実験、晶析試験及び装置改造、高圧・高純度水素回収試験を行っている。(図5～図8参照)。

4.2 BGHU(Bio- Green Hydrogen Utilization)

水素発酵菌によるG水素の製造では、①生ごみ前処理条件の検討と前処理装置の試作、評価、②生ごみ水素発酵の高効率化、③水素発酵残渣の排水処理を実施した。装置を用いて生ごみスラリーを前処理し、それを連続して培養槽に送り水素発酵させた。

培養した5日間の平均水素ガス発生量は430ml/h、平均水素分圧は23.5%であり、生ごみ1kg当たりの平均水素発生量は7.75Lであった。

4.3 IMHU(Innovative Metal Hydride Utilization)

水素化燃焼合成技術による活性化フリー水素吸蔵合金製造技術では、高圧水素雰囲気下で大きな発熱を伴うTiH₂合成を利用するTiFe合成法に挑戦し、そこで得られ



◎図5 廃アルミ（低圧）装置



◎図6 廃アルミ（高圧）装置



◎図7 廃シリコン装置



◎図8 廃シリコン利用ゼオライト

た合金はわずかな前処理で比較的容易に水素化した。シリコン樹脂をバインダーとしたMHの加工技術と水素精製機能を備えた吸蔵装置の製作・MH装置による水素精製・輸送・貯蔵技術では、繰り返し使用時において水素吸蔵合金は粉化し、伝熱特性が低下することが問題点として着目される。

この現象を軽減するためにシリコンゴム（SG）との混合および金属銅によるめっき処理の有効性を明らかにした。また、G水素に含まれるアンモニア等不純物を除去することを目的として、模擬ガスを使用して水素精製実験を実施した。その結果、水素精製実験では4N～5Nの高純度水素の回収に成功した。

4.4 GHE-S

（Green Hydrogen Equipment-System）

カセット式GHFC信号機の製造とシステム開発では、グリーン水素を燃料とした将来の水素社会への適応、災害時に長時間の安定電源供給による稼動が可能なカセット式GHFC信号機の製造とシステムを開発し、本庄地区での屋外実証試験による信頼性の検証を実施した。実証試験に際して、35MPa大型容器の開発、容器認定取得を行った。GHE-Sの製造とシステム開発は次の二課題からなる。

①小型FCV（COMS）の開発

FC、高圧水素容器などのコンポーネントを車両に搭載するとともに制御システムを構築し、走行試験が可能な車両を完成させた。走行に要する平均消費電力を三値制御の導入により制御し、特に平均消費電力の高い本庄モードでは、燃料電池の効率向上、バッテリーの充電損失低減により大幅な燃費の向上が可能となった。

②ULFCV

（Ultra light-weight Fuel Cell Vehicle）の開発

量産型ULFCVを設計し、1台を実際に製作した。環境負荷低減に効果的である量産型ULFCVをカーシェアリングとして運用していくことにより、水素社会構築の一端を担い、地域のシンボルとして貢献することが可能であることがわかった。これら車両は、各種展示会とりわけ水素EXPOなどに積極的に参加している。周辺諸国のニュースやホームページに紹介されるなど好評であった（図9参照）。

燃料電池搭載車椅子の開発では、車いす搭載機器の中で、燃料電池の部分の課題を最優先とし、ハイブリッドシステムの制御装置も改良した。2006年度中に開発したパワーユニットを軽量化車体に搭載して走行試験を行った。

5. G水素祭について

本プロジェクトの集大成として、2007年11月3日から18日にかけて、公開シンポジウムおよび燃料電池車によるカーシェアリング実証試験を中心にして、G水素祭を開



◎図9 ULFCVおよびCOMS

催した。本庄市地域住民や児童などに参加を要請し、将来の水素社会を垣間見せることに成功した。その他のイベントは、FC車両の展示（本庄祭 ほんじょう秋の祭にて）水素製造精製プラントの見学、科学実験イベント、各種デモンストレーションであり、参加人数は延べ190名にもぼった。概要及びカーシェアリングの様子を図及び写真に示す。

概要

期間：2007年11月3日～18日

実施内容

- ・ 展示（本庄祭・ほんじょう秋の花祭り）
- ・ 公開シンポジウム
- ・ G水素製造プラント見学会
- ・ 試乗会
- ・ デモンストレーション・展示
- ・ 科学実験イベント（小中学生対象）
- ・ 燃料電池車によるカーシェアリング実証試験
- ・ FC車いす実証試験

延べ参加人数：189名

6. まとめにかえて―プロジェクトのその後―

本G水素プロジェクトは2008年3月に終了したが、その後それぞれ新たに立ち上がった研究開発プロジェクトに移行して活動している。例えば、水素吸蔵合金では、『食品産業における省CO₂化のための廃熱・太陽熱利用による水素冷水機に関する技術開発（略称：イチゴプロジェクト）』（環境省地球温暖化対策）において、再び大学と企業、県が連携して水素吸蔵合金の新しい製造法や冷水機の開発を進めている。また、NEDOからの委託研究である『固体高分子型燃料電池内における熱・物質輸送現象』において、燃料電池膜の更なる効率化を目指して研究を

続けている。また、開発したFC車両の数々は、地域連携のためのイベントなどで（特に墨田区）活躍している。

研究開発ではないが、『デュアル対応国際（戦略）環境リーダー』（振興調整費）も人材育成において採用され、2009年4月より修士、博士両課程でスタートしている。この中で、本プロジェクトに協力された企業でのインターンシップや地域との連携への学生参加を計画している。



◎図10 2007年11月G水素祭の概要

カーシェアリング実証試験

期間：2007年11月5日～18日

※10, 11日を除く

実施場所：本庄市内指定区域

（本庄キャンパス～本庄市役所間）

実証機：WFCV2台、ULFCV2台
計4台

被験者数

ULFCV：23名

WFCV：20名



◎図11 FCカーシェアリングの本庄実証試験

なお、本原稿は2006年2月に行われた第21回環境工学連合講演会論文『本庄・早稲田地域でのG水素社会モデル構築』勝田正文 を参考に再編集したものであることをお断りいたします。

次世代高効率太陽電池の開発と展望

•Profile•



中野 義昭 なかの・よしあき ●東京大学先端科学技術研究センター 副所長

1982年東大・工・電子卒，1984年同大学院修士課程了，1987年同博士課程了，工博。同年東大・工・電子助手，1988年同講師，1992年同助教授，2000年同教授，2002年東大・先端科学技術研究センター教授，2008年同センター副所長，現在に至る。この間，化合物半導体の結晶成長とそれに基づく発光デバイス，光制御デバイス，光集積回路，太陽電池の研究に従事。

1. 高効率太陽電池の必要性

2050年に向けて，太陽光を人類の主要なエネルギー源とするためには，現在行われているような小規模分散型の太陽光発電だけでは間に合わず，大規模集中型の太陽光発電（メガ／ギガソーラー）が多数必要とされる。このような大規模太陽光発電は，当初は発電量あたりのセル製造コストが低い化合物薄膜型太陽電池を用いて展開されるものと考えられる。しかし発電規模の増大にともなって，この方法は限界を迎えることとなる。なぜなら，広大な面積にパネルを敷き詰める建設コストとメンテナンスコスト，およびこれらから電力を回収する電気ケーブルのロスが顕在化してくるからである。さらに，パネル上の配線である銀材料やパネルを保護するガラス材料には資源制約があり，パネル生産量の増加に従ってこれら部材の高騰が予想される。

従来の太陽電池技術開発は，大面積化を前提に，変換効率は犠牲にしても，セル単位面積当りの製造コストをいかに低減するかにその重点が置かれてきた。薄膜太陽電池や有機系太陽電池がその例である。しかしある程度セル単位面積当りのコストが低減できると，セル以外の部材やパネルの設置コストがコスト全体に占める割合が高くなり，これらのコストは面積に比例して増えるため，セルの単位面積当り製造コストをいくら下げても，全体のコストは下がらない。

一方，逆に設置面積は増やさずにエネルギー発生量を増やすには，光電変換効率の向上が必須であるが，従来の常識では，変換効率の高いセル（例えば化合物半導体単結晶多接合セル）は，セル単位面積当りの製造コストが効率の増分に見合う以上に高くなるため，宇宙用や軍事用などの特殊用途以外は利用できないものと信じられてきた。しかるに昨今，CSP（concentrating solar thermal power plant）などの太陽熱利用技術に関連して集光技術が進展し，この集光技術と太陽光発電を組み合わせると，上記の高コスト高効率セルを用いても，低コストな発電が可能である見通しが立ち始めている。

すなわち，集光倍率1000倍の光学系と組み合わせると，セル単位面積当りの製造コストを等価的に1/1000に下げ

られるのである。このような状況になると，もはやセルの製造コストはほとんど問題にならず，むしろ変換効率が1%でも向上すると，その分だけエネルギー製造コストが下げられることになる。またこのことは，従来技術の大きな問題であった原材料の資源制約からの解放をも意味する。つまり，セルモジュールの必要サイズが集光倍率分の一に減らせるため，セル原材料，電極材料，セル実装材料の必要量も集光倍率分の一になるからである。

さらには，ここで面積を占めるのは光学系だけなので，パネル間を電力ケーブルで繋ぐ必要もなく，ほとんど故障することもない。つまり建設コスト，メンテナンスコストも，薄膜セルのパネルを敷き詰める場合に比べ，面積が減る分以上に大幅に低減できる可能性がある。CSPとの親和性も高く，CSP設備をそのままPV（太陽光発電）設備に転用できる。この場合，光→熱→機械→電気のエネルギー変換プロセスを経ていたものが，光→電気の直接エネルギー変換プロセスになるので，著しい効率向上，エネルギーコスト低減の効果が得られる。加えて，集光タワーに設置されたPVモジュールだけを最新式に交換するだけで，プラントのアップグレードが可能で，技術の進歩に合わせ発電設備を最高性能に保つことができる。

以上のことから，太陽電池の研究開発の重点は今後，セル製造コスト低減から光電変換効率向上に移行すると考えられる。この流れを反映して，最近，化合物半導体単結晶セルによる高効率化競争が世界中で活発化している。現在の集光時変換効率の世界記録は，41.6%（364倍集光，米国Spectrolab/NREL）である。

さらに，化合物半導体量子ドット技術を導入して中間バンド型構造を形成すると，理論的には70%にせまる変換効率が予想されており，量子ドット電池による光電流の増加が実験室レベルですでに観測されている。このように，従来の変換効率限界を越えることのできる新型の太陽電池が出現してきたことは，太陽電池研究開発における大きなブレイクスルーと言うことができよう。しかもこれらの太陽電池を形成する材料は，従来，大電流の発光デバイス材料，パワー電子デバイス材料として使われてきた実績があり，集光時の強力な光に曝された際の信

頼性は初めから確保されている。大電力発電にまさにうってつけな潜在能力を有している。

このような背景のもと、経済産業省は2008年に「革新的太陽光発電技術研究開発」と称する7年間の研究開発国家プロジェクトをスタートし、東京大学・豊田工業大学を拠点として第三世代超高効率太陽電池（化合物半導体ヘテロエピタキシャル多接合太陽電池および量子ドット中間バンド型太陽電池）の研究開発を推進している。第三世代の高効率太陽電池に関して今後克服すべき課題は、光電変換効率のさらなる向上（50%を超え、70%を狙う）はもちろんのこととして、基板の大面积化、高倍率集光時・大電流動作時の信頼性の保証、熱放散・冷却構造の検討、広帯域無反射コーティングの開発、高信頼モジュール実装、低コスト高精度集光光学系および追尾系の開発などがあげられる。さらに重要な点は、従来の化合物半導体エピタキシャル成長技術が少量多品種生産の高コスト製造技術であったものを、大量生産の低コスト製造技術に転化する必要のあることである。そのため成長反応炉の抜本的見直し等が現在進められている。

以下では、前述の国家プロジェクトで行われている次世代高効率太陽電池開発の中で特に、III-V族化合物半導体によるタンデム太陽電池の効率向上に向けた筆者らの研究を紹介する。

2. III-V族タンデム太陽電池の現状と課題

太陽から地上に降り注ぐ光子は、図1に示すように可視から赤外に至る広範なエネルギー分布を持っている。このような光子を可能な限り多く吸収し、光子が持つエネルギーを低損失で電圧に変換するためには、異なるバンドギャップを持つ材料から構成されるpn接合を積層する、タンデム太陽電池が有効である。なかでも、化合物半導体の持つ多様な格子定数とバンドギャップの関係を活用したInGaP/GaAs/Geの3接合セルは、結晶格子の大きさが揃った高品位な単結晶がもたらす高変換効率が特徴であり、現在までに41%を超える変換効率が報告されている。InGaP、GaAs、Geで構成される3つのpn接合が直列に接続された状態となり、電流は単一セルで吸収する電流しか取り出せないものの、電圧は3セルの合計が取り出せる。

図1に示すように、各材料のバンドギャップの関係から、GaAsで捕集できる光子のフラックスが小さい。この結果、原理的にはGaAsセルからの電流出力が他より小さくなり、タンデムセル全体の電流出力を決定してしまう。より高効率なタンデムセルを目指すためには、中間セルにGaAsよりも狭バンドギャップの材料を用いる必要がある。しかし、図2に示すように、狭バンドギャップの材料はGeよりも格子定数が大きいため、エピタキシャル成長の最中に格子緩和を起し、転位によるキャリア輸送特性の劣化を招く。このような材料上の制約を打破する

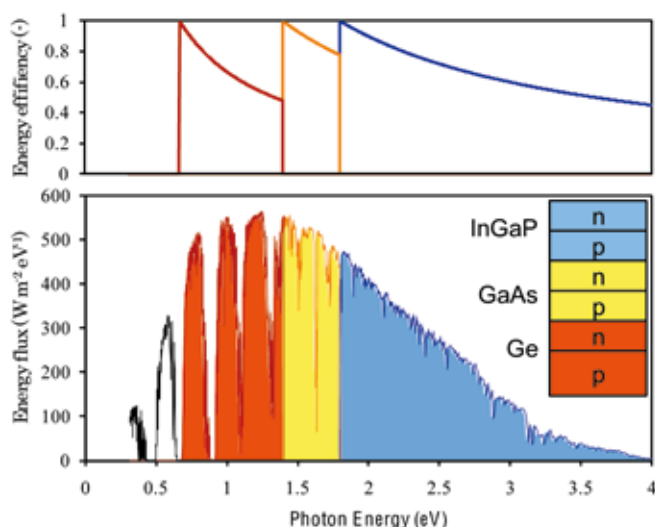


図1 太陽光のスペクトルと、現行の3接合セルで吸収される光子エネルギーの領域。上図には、各セルにおける光子エネルギーの最大利用効率を示す。

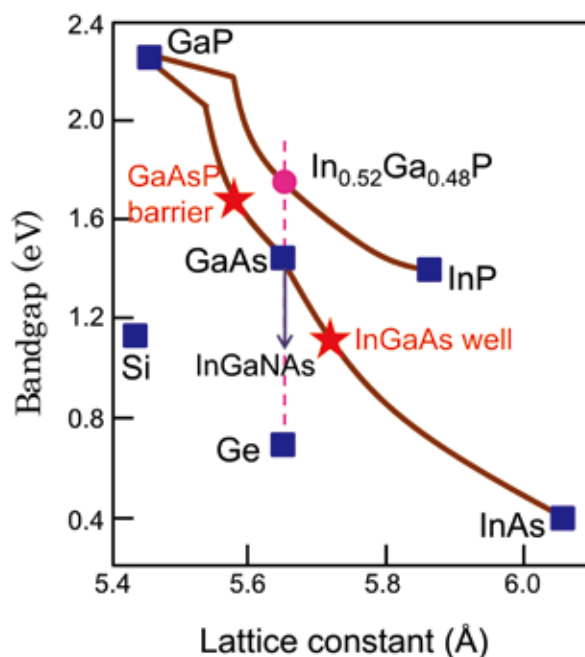


図2 III-Vタンデムセルに関する化合物半導体の格子定数とバンドギャップの関係

ためには、大きく分けて3つのアプローチがある。(1) Geに格子整合しつつ狭バンドギャップをもつ新材料を探索する、(2) Geと上層セルとの格子整合を諦め、セルの特性を左右するpn接合の近傍以外に格子緩和層を導入してエピタキシャル成長を継続する、(3) エピタキシャル成長による積層を諦め、ウエハ貼り合わせ等のプロセス技術によりタンデムセルを作製する。

現在もっとも成功しているアプローチは(2)であるが、我々は(1)に注目し、エピタキシャル成長の高度化による効率向上を目指している。結晶構造の他に、製造技術の

観点からの検討も重要である。集光下での利用を想定したIII-Vタンデム太陽電池であっても、年間1GWのモジュールを生産するためには、4 inch ウエハを年間2百万枚成長する必要がある。このような重要に対応するには、高スループットの有機金属気相成長（MOVPE）を用いる必要がある。現状のMOVPE技術により大面積成長可能なのは、InGaAs/GaAsP量子井戸である。したがって、我々は、MOVPEによるInGaAs/GaAsP歪み補償量子井戸の成長技術にフォーカスして研究開発を進めている。

3. InGaAs/GaAsP歪み補償量子井戸太陽電池

格子定数の異なる結晶を臨界膜厚以下で積層し、面内方向の格子定数を揃えて積層方向の格子間隔を変調させる擬格子整合成長は、半導体レーザ等の光デバイスに古くから用いられてきた。各層の歪みを層厚に関して加重平均した値をゼロに近づけると、格子緩和を回避し、転位を導入せずに多層の積層が可能になる。このような歪み補償量子井戸は、高出力半導体レーザやカスケードレーザなど多数の量子井戸を必要とする光デバイスに不可欠なものとして研究が進められてきた。太陽電池への応用には、十分な光吸収を得るため、とくに多層（50層以上）の積層が必要となるため、より精細な歪み制御を必要とする。

InGaAs/GaAsP量子井戸により1.2 eVの吸収端を得るためには、各層10 nm程度の厚さとして、In、Pともに0.2程度の組成を必要とする。Geとの格子定数差は1%強になる。この程度であれば、入念な成長条件の調整により多

層の量子井戸が成長可能である。図3は、試みに成長した $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ (7.6 nm) / $\text{GaAs}_{0.79}\text{P}_{0.21}$ (11.6 nm) 100層の量子井戸である。タンデムセルに量子井戸を導入する際にはGaAsのpn接合中に挿入することになるので、ここではGaAs基板上に成長している。X線回折から、平均歪みは-21 ppmと計算されている。精緻な歪み補償を用いれば、100層成長しても転位はまったく観察されないことがわかる。

4. 高効率化への展望

タンデムセルでは、結晶成長およびプロセス技術の制約のなかで接合数を増やすことにより効率向上が可能であるが、変換効率50%を超えることは難しい。この壁を超えるべく、いくつかの新原理に基づく太陽電池が提案されている。

(1) 中間バンドセル：バンドギャップの中央付近に孤立したエネルギー準位（中間準位）をつくり、バンド間遷移に加えて、伝導帯→中間準位→価電子帯という遷移を2つの光子で逐次的に行う。これにより、バンドギャップよりもはるかに低エネルギーの光子を、バンドギャップのエネルギーを持つ電子・正孔対にアップコンバージョンし、高変換効率を達成する。

(2) ホットキャリアセル：光吸収層の伝導帯端よりも一定値だけ大きなエネルギーを持つ電子を、エネルギーフィルタ層を通して電極に取り出す。透過帯域よりも大きなエネルギーをもつ電子は、過剰なエネルギーを伝導帯端付近の低エネルギー電子に伝達する。このような散乱過程により、伝導帯にあるエネルギー分布を持つ電子すべてをエネルギーフィルタ層を通して取り出し、バンドギャップよりも大きな出力電圧を得ることで、バンド端への緩和によるエネルギー損失をなくし、高効率を達成する。

(3) マルチエキシトンセル：バンドギャップよりもはるかに大きなエネルギーの光子により発生した電子・正孔がバンド端に緩和する際に、インパクトイオン化により別の電子・正孔対を生成する。すなわち、エネルギー保存則の範囲で1光子から複数の電子・正孔対を形成することで、高効率を達成する。

これらのセルは、キャリアの中間準位あるいは高エネルギー状態からの緩和が遅いことを利用している。したがって、離散的なエネルギー準位を持ちフォノン散乱による緩和が起こりにくいと言われるナノ粒子あるいは量子ドットの集合体により、これらの原理を実証するための研究が行われている。しかし、ナノ粒子の集合体に関しては粒子間のキャリア輸送に問題があり、キャリアの空間輸送に優れた量子ドットについてはドットのサイズと配列状態の制御が発展途上であるなど、超高効率セルを実現するためのナノ構造形成に多くの努力が割かれているのが現状である。

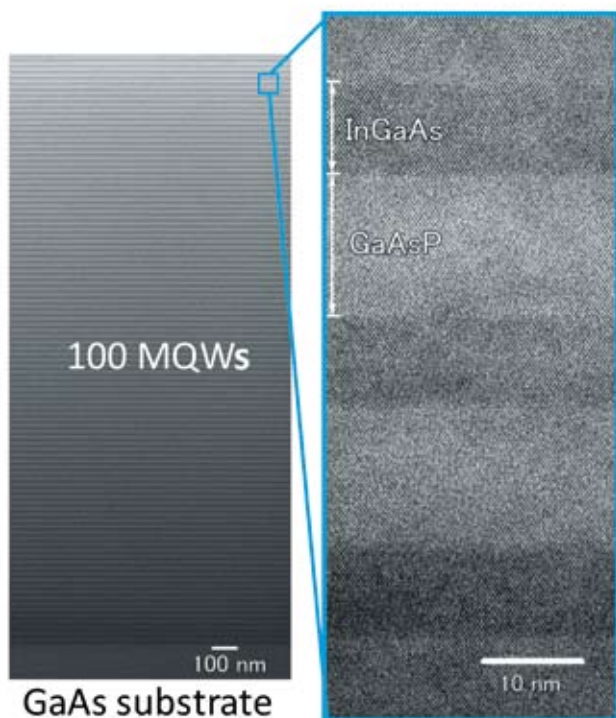


図3 MOVPEで作製したInGaAs/GaAs歪み補償量子井戸の断面TEM像

5. むすび

集光型の多接合セルを用いた大規模太陽光発電ステーションはすでに実用レベルに達しているが、その低コスト化の鍵を握る変換効率の向上には、非格子整合系の結晶成長、新材料や量子構造の導入、ウエハ接合や基板剥離など、基礎的な研究開発が不可欠である。なかでもIII-V族化合物半導体の結晶成長技術は、変換効率や生産性向上の中心課題である。

一段と高い効率を有する次世代セルに対する期待は大きいが、それを実現するための積層量子ドット構造形成技術の水準、さらに太陽電池に求められる生産性まで考慮したとき、本稿で紹介した量子構造多接合セルが近い将来の高効率セルの本命となる可能性は高いと思われる。最後に、共同研究者の杉山正和、種村拓夫、肥後昭夫、渡辺健太郎、杉田憲一の各氏に深謝して本稿を結ぶ。

低炭素社会実現のための自動車新燃料技術 —ジメチルエーテル（DME）の再考—

•Profile•



小熊 光晴 おぐま・みつはる ●独立行政法人 産業技術総合研究所 新燃料自動車技術研究センター 新燃料燃焼チーム主任研究員
1972年8月生まれ。2001年茨城大学大学院理工学研究科博士後期課程生産科学専攻。工学博士。研究分野：ディーゼルエンジンシステムの高効率低公害化を目的に、ディーゼル燃焼、新燃料利用システム、新燃料標準化等の研究開発に従事。第56回自動車技術会賞浅原賞学術奨励賞受賞（2006年5月）。

1. はじめに

2008年7月11日に147.27ドル/バレルという史上最高値の達した原油価格の高騰も一息ついているが、自動車ユーザの意識を変えるには十分なインパクトがあった。乗用車はハイブリッド車が人気を博し、半年以上納車待ちとの声も聞く。このような小型自家用車は、ハイブリッド、プラグインハイブリッド、電気、あるいは燃料電池へとパワートレインの変革が進むものと想像される。

一方、物流の根幹を担うトラックやバスといった大型自動車は、ディーゼルエンジンという優れたパワートレインに取って代わられる有望なものが現時点では存在しない。原油の需要に対する供給が追いつかなくなるオイルピーク後も、引き続き主流として利用していくと予想されるが、低炭素社会、すなわちCO₂排出量の少ない社会を実現するには、可能な限り原油の使用量を削減し、またそれよりもCO₂排出量の少ないエネルギーへと置き換えていく必要がある。前述の小型自家用車では化石エネルギー発電以外の電気を有効に利用する術があるが、大型輸送用自動車では燃費の向上により軽油の使用量を削減し、更に軽油よりもライフサイクルでCO₂排出量が少ない新燃料を導入していくことでCO₂排出量削減を目指すこととなる。また、供給量確保のため、図1に示すオイルサンド等

低品位オイルや石炭、天然ガス等非石油系エネルギーの液化利用等のバスも必要にならざるを得ない。

ここでは、大型輸送用自動車すなわちトラックやバス用新燃料の一つであるジメチルエーテル（DME）について、低炭素社会構築に対するその可能性を再考する。

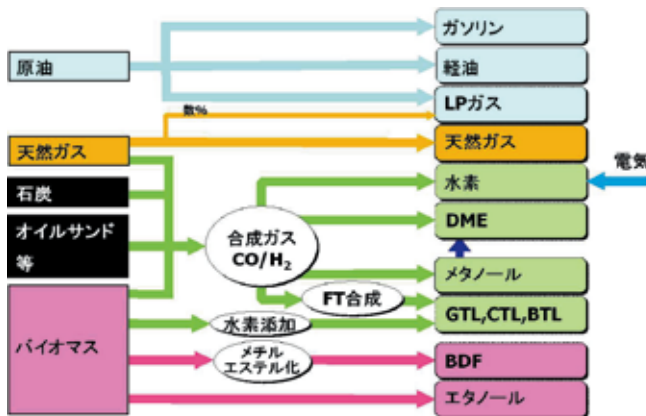
2. DME燃料利用に向けた国内外動向

DME（化学式：CH₃O-CH₃）は炭素間結合がなく含酸素のためディーゼル燃焼時に粒子状物質（PM）をほとんど排出しないクリーンな燃料である。LPガスよりも低い約6.1 kgf/cm²の加圧で液体となる液化ガスで、セタン価が軽油同等以上ありディーゼル燃料として利用する場合、PM対策が不要なため、燃焼温度低減による窒素酸化物（NOx）低減策が有効に適用可能で、高度な排気低減触媒システムを採用することなく厳しい排気規制をクリアすることが出来る。ここでは、DMEの燃料利用に向けた最近の動向を紹介する。

(1) 日本国内における動向

燃料製造に関する動向として、新潟市の燃料DME製造(株)による年産8万トンのDME製造能力を持つDME普及促進プラント（原料は天然ガス起源輸入メタノール）が2008年8月に完成した^①。また、資源エネルギー庁のDME燃料利用設備導入促進補助事業により一正蒲鉾(株)がボイラをDMEに燃転し^②、ボイラ燃料としてDMEを新潟にて利用を開始し、いよいよDMEが燃料としての流通をスタートしている（2008年12月）。また、代エネ法（石油代替エネルギー促進法）の改正およびエネルギー供給構造高度化法（エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用及び化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律）の成立^③により、LPガス業界の非化石エネルギー供給対応の対象としても、LPガスの主成分であるプロパンやブタンと蒸気圧の近いDMEに関心を寄せている。

DME自動車開発の動向としては、国土交通省「次世代低公害車開発・実用化促進事業」の一貫として交通安全



◎図1 資源と燃料

環境研究所主導のもと大臣認定によるDME車両の走行試験が実施されており⁽⁴⁾、図2に示すようにいすゞ中央研究所製の2トントラックは、総走行距離が10万キロを走破した（2009年9月）。これらの走行試験結果は、量産を可能とするDME自動車の技術基準策定のための同技術指針作成に反映される予定である。また、実証運行モデル事業として、2009年規制（ポスト新長期規制）に適合し緑ナンバー（営業用ナンバー）を大臣認定にて取得した中型DMEトラック（いすゞ中央研究所製）が、2009年11月17日に営業運行を開始した⁽⁵⁾。同トラックは2009年規制に適合しながら、CO₂排出量はベースの軽油ディーゼルエンジンよりも少なく、また同クラス天然ガスエンジン（三元触媒システム方式）との比較でCO₂排出量は同等以下を保ちつつ熱効率は上回る性能を持つ。



◎図2 いすゞ中央研究所製2t積載DMEトラック

（エコカーワールド2008、2008年6月@横浜赤煉瓦倉庫街に展示、筆者撮影）

(2) 海外の動向

ヨーロッパではスウェーデンでボルボによる開発車両を導入する計画⁽⁶⁾があり、ロシアではモスクワで10台程度のレトロフィット改造DME車が、学校給食の配送という形で走行試験を続け、近年中に数十台の実用走行を開始する予定⁽⁶⁾とのことである。中国ではすでにLPガス需要を補填するため、民生用LPガスにDMEが混合されて流通を開始している。また、輸送分野では上海市内の路線バスにおけるDME自動車の実証試験が進められている⁽⁷⁾。

スウェーデンではバイオDMEによる運輸部門の石油依存度大幅低減を目指している。この欧州バイオDMEプロジェクト^(8, 9)では、VOLVO等7社がEUおよびスウェーデンエネルギー省による総額2,840万ユーロ（約35億円）の資金を基に、製紙工場の黒液を原料にバイオDMEを製造し、図3のような14台のDMEトラックの実証走行試験を2012年まで行う予定である。このプロジェクトを開始するに際しては、VOLVOはあらゆる石油代替燃料についてライフサイクルを含めて比較評価し、次世代バイオ燃料

の筆頭としてバイオDMEを位置付けている。

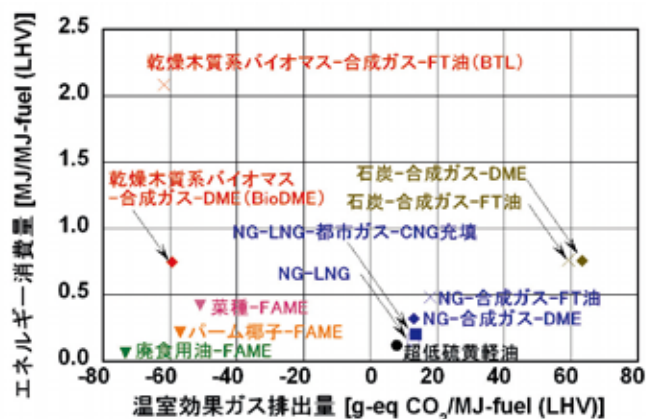


◎図3 ボルボDMEトラック

（Washington International Renewable Energy Conference、2008年3月4～6日@ワシントンに展示、筆者撮影）

3. ライフサイクルでのCO₂排出量の考察

図4はみずほ情報総研とトヨタ自動車による、日本における輸送用燃料製造（Well to Tank、すなわち、原料の採掘、採集から燃料製造、輸送を経て自動車の燃料タンクに供給される手前まで）を中心とした温室効果ガス（GHG: Green House Gas）排出量の試算結果⁽¹⁰⁾を基に、現在考え得る主な内燃機関用燃料として、従来型燃料、代替燃料および新燃料についてグラフ化した物である。例えば、従来燃料である超低硫黄軽油では1MJの燃料を製造するのに0.118 MJのエネルギー投入（消費）が必要で、このとき、Well to Tankで温室効果ガスを7.88 g（考慮している全GHGをCO₂等価として）排出する、と読む。この超低硫黄軽油よりも左に位置するものは発熱量等価の燃料を製造するときのGHG排出量は少なく、上に位置するものは同様に燃料を製造するときのエネルギー消費量が



◎図4 各種自動車燃料のWell to Tank温室効果ガス排出量

多く必要となることを意味する。バイオマスを原料とした場合、カーボンニュートラルの概念によりGHG排出量は削減できる。

(1) DMEのWell to TankでのCO₂排出量

スプレアの噴射剤等代替フロンとして利用され始めたDMEがエネルギー利用を検討され初めて十余年、当初はそのクリーンな燃焼特性のみが強調されてきた。地球温暖化対策による持続可能社会の構築が急務となっている昨今は、温室効果ガス低減に対しどれだけ寄与するかを評価せずに新エネルギーの普及は無いと言える。

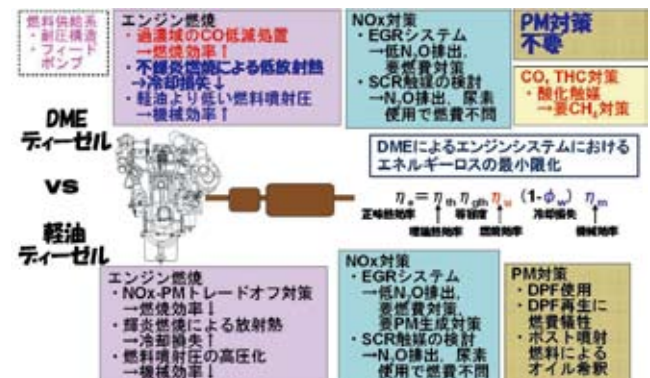
Well to TankでのGHG排出量について考えてみる。前述の図4によると、天然ガス（図中NGと標記）から合成ガスを経てDMEを製造する場合は、1MJのDMEを製造するのに0.322 MJのエネルギー投入（消費）が必要で、このとき、Well to TankでGHGを12.9 g排出する。同数値は、海外の天然ガス田で最も効率の良い直接合成法によりDMEに変換し、低温タンカーにより日本へ輸送してくる形態として算出されている。超低硫黄軽油には及ばないものの、エネルギー消費量は天然ガスからLNGとして輸入し、都市ガスインフラを経由してCNGとして自動車に充填する場合と比較してGHGの排出量は同等であることが示されている。石炭を原料とする場合はCO₂回収・貯留（CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage）技術との組み合わせは必須といえよう。また、木質系バイオマスから合成ガスを得てDME（Bio DME）を製造する場合は、最終形態をフィッシュアトロブシュオイル（FT油）とするよりもエネルギー消費量を半分以下にすることができる。現状の技術から鑑みると、資源量が限定的で製造コストも高いBio DMEを石炭や天然ガスを原料とする化石起源DMEに微量でも混合していくのが一つの策といえる。

(2) DMEのTank to WheelsでのCO₂排出量

次にTank to Wheels（すなわち自動車単体で見た場合）でのGHG排出量を考えてみる。図5はディーゼルエンジンのトータル効率に及ぼす各種要因および排出ガス対策について、軽油ディーゼルとDMEディーゼルの比較したものである。NO_x対策は、軽油もDMEも違いはないが、EGR（排気再循環）のみで後処理装置に頼らずNO_x低減を図る場合は温室効果ガスである亜酸化窒素（N₂O）の排出が少ないDMEに軍配が上がる。ただし、過剰なEGRは燃費悪化（すなわちCO₂排出の増加）を招くため燃費対策との両立が鍵となる。PM対策は、前述の通り燃料の性質として排出しないため、DMEの優位性は非常に高い。軽油ディーゼルの場合は燃焼自体での低減を努力するもDPF（ディーゼルパーティキュレートフィルタ）は必須であり、このDPFで捕集したPMを再生（フィルタに捕集されたPMを燃焼させる）するために一時的に燃料を過剰に投与するなど、少なからず燃費を犠牲にするシステムを搭載せざるを得ない。エンジン燃焼についてDMEと軽

油を比較すると、不揮炎燃焼による冷却損失の軽減や燃料噴射圧の高圧化が不要なことによる機械損失の軽減など、DMEはその燃料性状特有の可能性を秘めており、過濃運転領域でのCO低減により燃焼効率を常に高い状態を保つことでエンジンシステムとしてのトータル効率を軽油ディーゼルよりも向上し得る可能性がある。

燃費（熱効率）と排気性能を同時に向上させる場合、燃料性状の優位性は大きな効果を及ぼす。軽油ディーゼルの場合、エンジンシステムの高高度化を含めてもエンジンアウトでのNO_x排出量は、燃費との両立を図った場合1.5 g/kWhが限界（筆者所属チームの研究による）と考えられ、N₂O排出を伴うNO_x低減触媒を利用しないでシステムを成立させた場合には、DMEディーゼルへの期待は非常に大きい。



◎図5 ディーゼルエンジンシステムの効率に及ぼす各種要因および排出ガス対策の比較

4. DME燃料の市場導入に向けた標準化動向

燃料としてDMEを流通させるには、燃料品質定義のほか、品質管理のためのサンプリング方法や数量計測方法などの国際標準が必要である。これらがそろうことで国際間流通も可能となり、市場形成が期待される。ISOでは、TC28（石油製品および潤滑油）においてDMEを取り扱えるよう、2007年にスコープの変更が行われ、同年、品質やサンプリング方法等の議論が開始された。ここでは、ISOにおけるDME燃料の標準化の進捗を紹介する。

(1) ISO/TC28/SC4（石油、石油系・非石油系液化ガス燃料等の品質と分類）

SC4ではWG13「Standardization of DME Fuel」が2007年に設置され、燃料用DME品質基準の議論が進められている。DME燃料用途の対象は、Heating fuel（工業用ボイラや家庭用コンロ等、LPガスのように使用する一般燃料）とディーゼルエンジン用燃料であるが、これらとして使用するためのベースとなる燃料という趣旨で議論中である。よって、ディーゼル燃料とするときに必要な添加剤や着臭剤などについては、各国の事情もあるため除外されている。燃料品質は、DME製造プラント出荷時とエン

ドユーザ側の数値を並記する予定である。分析方法については、同じ液化ガスであるLPG、および天然ガスの分析方法を参考に、既存ISOや日本のLPG業界規格も参照して検討が進められている。

(2) ISO/TC28/SC5 (石油系・非石油系液化ガス燃料の計測方法)

SC5では、WG4「Sampling of refrigerated fluids」において2007年にDMEのマニュアルサンプリング方法の検討が開始され、2009年11月にISO 9945 “Refrigerated non-petroleum based liquefied gaseous fuels - Dimethyl ether (DME) - Method of manual sampling onshore terminals”として発行された。また、2010年にはWG3「Procedures for measurement and calculation of refrigerated fluids」においてDME船上計量方法の検討が開始される予定である。

5. おわりに

日本では2009年秋に政権交代が起こり、2009年9月22日

国連本部で開かれた国連気候変動サミットの開会式において、2020年までに温室効果ガスを1990年比で25%削減する日本の新たな中期目標を表明した。具合策として、①大企業に削減を課す国内排出量取引制度の導入、②再生可能エネルギーの固定買取制度の導入、③地球温暖化対策税（環境税）の導入を挙げている。各国の中期目標は2020年比で、米国0%、欧州連合（27カ国）20～30%、英国34%、ドイツ40%、ロシア10～15%、日本（前政権）8%である。1997年に議定した京都議定書では日本は6%削減であったが、2006年で逆に6.2%上回っていることから、現状から更に30%以上削減する必要がある。

国内年間3600万kLほどの軽油を消費する自動車分野も、当然この崇高な目標に向かって努力しなければならない。今後は未利用バイオマスの高効率利用技術やWell to Wheel評価など、分野を超えた技術融合・協力を進めながら、将来の自動車燃料は『何から何を作りますか?』というストーリー作りを行っていききたいものである。

参考文献

- (1) 燃料DME製造株式会社,
Web: <http://www.fueldme.com/>
- (2) DME普及促進センター,
Web: <http://www.dmeipc.jp/index.html>
- (3) 経済産業省資源エネルギー庁資料, “エネルギー供給構造高度化法について”
(Web: <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/koudoka/index.htm>), 2009年9月1日
- (4) 佐藤由雄ほか, “DME自動車の開発と実用化普及戦略”, 自技会講演前刷集No.49-08, pp.13-18, 2008
- (5) 国土交通省プレスリリースhttp://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha10_hh_000040.html
- (6) 小熊光晴, 後藤新一, “DME (ジ・メチル・エーテル) 燃料”, 日本設計工学会東海支部シンポジウム「石油に替わるこれからの自動車燃料」資料, pp.9-29, (2007)
- (7) Huang Zhen and Xie Xiaomin, “Pathways to DME in China”, 3rd International DME Conference (2008)
- (8) Henrik Landalv, “Development of DME trucks”, 欧州バイオDME勉強会資料 (2009)
- (9) Ingva Landalv, “Black Liquor to BioDME by converting Pulp Mills to Biorefineries”, 欧州バイオDME勉強会資料 (2009)
- (10) “輸送用燃料のWell-to-Wheel評価―日本における輸送用燃料製造 (Well-to-Tank) を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書―”, トヨタ自動車株式会社, みずほ情報総研株式会社, 2004年11月