アジア・太平洋総合研究センター
Asia and Pacific Research Center

中国の先端研究者から見た次世代蓄電池の研究開発動向

R&D Trends in Next-Generation Batteries from the Perspective of Leading Chinese Researchers

2022 年 3 月

国立研究開発法人科学技術振興機構

2021 年 4 月に発足した国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）のアジア・太平洋総合研究センター（Asia and Pacific Research Center：APRC）は、調査研究、情報発信、交流推進を 3 本の柱として、アジア･太平洋地域における科学技術分野の連携･協力を拡大･深化し、我が国のイノベーション創出の基盤構築に貢献することを目指します。

本報告書は、アジア・太平洋地域における科学技術イノベーション政策、研究開発動向、および関連する経済・社会状況について調査・分析を行う調査研究の一環としてまとめたものとなります。政策立案者、関連研究者、およびアジア・太平洋地域との連携にご関心の高い方々等へ広くご活用いただきたく、APRC ホームページおよびポータルサイトにおいて公表しておりますので、詳細は下記ホームページをご覧ください。

（APRC ホームページ）
https://www.jst.go.jp/aprc/index.html

（調査報告書）
https://spap.jst.go.jp/investigation/report.html

エグゼクティブ・サマリー

本報告書は、国立研究開発法人科学技術振興機構 アジア・太平洋総合研究センターが令和３年度に公益社団法人科学技術国際交流センター（JISTEC）に調査委託した「中国の先端研究者から見た次世代蓄電池の研究開発動向」の成果をまとめたものである。カーボンニュートラルの実現が問われる今、本調査では大きな市場拡大が想定され、かつ成長産業分野でもある次世代蓄電池に関する産業政策と研究開発動向を調査することを目的とし、中日両国の気鋭の専門家を組織し、それぞれの専門的視点からの分析を集めて報告書に取りまとめる方式を採用した。

第１章では、中国社会科学院の趙英研究員が、中国のエネルギー産業全体の発展について、経済成長の鈍化、産業構造の変化、新産業の成長などの視点からその背景を説明し、エネルギーの供給構造、発電電力量の状況と構成と特徴を最新のデータで解説・分析している。また、中国のエネルギー貯蔵産業の現状、特徴と課題を詳しく分析し、「ダブルカーボン (カーボンピークアウトとカーボンニュートラルの２つを指す)」の目標に向けて、今後の中国経済、エネルギー貯蔵産業の発展目標と方向を展望している。

第２章では、中国科学院科学技術戦略研究院の李恵敏副研究員が、中国のエネルギー構造転換の促進、エネルギー産業発展の推進などに関する施策の重要な法的根拠となる「省エネルギー法（1997 年）」、「再生可能エネルギー法（2005 年）」、「エネルギー法（2020 年）」といった「エネルギー三法」に関する歴史的経緯、法律の中身と特徴、関連制度の役割などを分析している。また、エネルギー貯蔵技術及び次世代蓄電池技術の関連政策について、中国の国家基本政策である国民経済と社会発展「第 13 次５カ年計画 (2016-2020)」と「第 14 次５カ年計画 (2021 － 2025) と 2035 年長期目標綱要」の比較分析を行っている。さらに、エネルギー貯蔵、省エネ及び蓄電池技術開発と利用に関する産業発展、技術開発、業界標準化などに関する中央省庁と地方レベルの最新政策の解説と分析をしている。

第３章では、上海市科学学研究所の周少丹フェローが、中国の蓄電池技術に関する量的分析について、Web of Science Core Collection と中国の特許データベース CPRS からそれぞれ中国の論文と特許データを抽出し、蓄電池の駆動方式、正極、電解質、負極、添加剤及び現象解析・構造解析などのカテゴリーにわたる 30 分野の技術分析を行っている。また、研究機関と企業に分けて、中国の国家研究助成プログラムの解説と分析をしている。

第４章では、中国科学院大連化学物理研究所エネルギーストレージ研究部李先鋒研究員兼副所長および鄭琼研究員が、中国における次世代ナトリウムイオン電池技術の研究開発の動向について、関連技術の研究開発の概要、産業発展の現状と動向、業界標準化の現状と展望などの内容を、代表的な研究事例などを通じて分析している。特に、2020 年、中国科学院物理研究所の胡勇勝らのチームは、ナトリウムイオン電池正極材の理論研究に関する研究成果が世界から注目を集め、基礎研究と産業化の両面において、いずれも世界の先頭を走っている。また、中国初のナトリウムイオン電池業界標準「ナトリウムイオン二次電池共通仕様」は、2021 年 12 月に中国科学院物理研究所により提起され、中科海鈉科技有限責任公司（HiNa Battery）、浙江鈉創新能源有限公司（Natrium Energy）、華為技術有限公司（Huawei）などの企業により起草されたことが、

今後の産業発展に影響する大きな出来事となっている。

第５章では、材料科学姑蘇実験室 G2116 プロジェクトの劉剛鋒総括兼 BOTREE 社 CTO 及び常娜娜研究員が、中国における次世代リチウム電池の電解液技術の研究開発の動向について、リチウム電池電解液の技術概要、研究特徴から、中国電解液産業の発展と現状まで、代表的な研究事例を通じて分析、解説している。基礎研究では、低温電解液、高電圧電解液、高濃度電解液、固体電解質などの分野における最新の研究動向と中国系研究者の研究成果を分析している。産業技術分野では、寧徳新能源（CATL）、東莞杉杉（DSBM）、新宙邦 (CAPCHEM)、比亜迪（BYD）、珠海冠宇（COSMX）、国軒高科 (GOTION)、珠海賽緯 (SW-ZH)、天賜材料 (TINCI)、国泰華栄 (GTHR) などの中国企業の技術開発力が計画的に強化されていることについて、その特徴を解説している。

第６章では、中国科学院青島バイオエネルギー・プロセス研究所の崔光磊研究員が、全固体リチウム電池分野における中国の研究機関や大学の基礎研究の現状と特徴、企業の発展動向に焦点を当てている。全固体リチウム電池のボトルネックとなっている課題について、商業化の潜在価値を持つさまざまな種類の固体電解質を中心に、中国科学院、清華大学、青島大学、中国科学技術大学、北京科学技術大学などの国内研究チームによる研究開発の進展度合いと成果を整理し、中国の固体電池業界における関連企業の発展と動向を分析している。

第７章では、三井物産戦略研究所の藤代康一研究員が、中国の次世代蓄電池の発展動向と展望について、カーボンニュートラルを巡る世界各国の動向と蓄電池との関連性を分析し、蓄電池の主要な用途別に世界と中国の最新動向を解説している。中国の電力部門と蓄電池の発展動向をまとめ、次世代蓄電池に関する課題と今後の展望について分析している。

巻末には、中国科学院物理研究所の陳立泉工程院院士の寄稿による「次世代蓄電池の研究開発の成果が中国と日本の電気自動車とエネルギー貯蔵産業の発展、国際交流・国際提携を促進し、カーボンピークアウトおよびカーボンニュートラルの目標が達成されるであろう」という展望を示している。

Executive Summary

This report summarizes the results of the survey " R&D Trends in Next-Generation Batteries from the Perspective of Leading Chinese Researchers" commissioned in FY2021 by the Asia and Pacific Research Center (APRC) of the Japan Science and Technology Agency (JST) and undertaken by the Japan International Science and Technology Exchange Center (JISTEC). The purpose of this project was to investigate industrial policy and R&D trends related to next-generation batteries, a growing industrial field with expectations for large market expansion, at a time when the realization of carbon neutrality is being called into question. The report was compiled by organizing experts from both China and Japan, and collecting analyzes from their respective professional perspectives.

Chapter 1 (Zhao Ying, Chinese Academy of Social Sciences) provides background on the overall development of China's energy industry from the perspective of slowing economic growth, changes in the industrial structure, the growth of new industries, etc. It explains and analyzes the energy supply structure, the status, characteristics of power generation based on the latest data. In addition, with detailed analysis of the current status, characteristics, and challenges of China's energy storage industry, it states the facts of power industry, background, power supply, power consumption, storage industry, which complies with the goal of "3060 Double Carbon" and prospects of future Chinese economy.

Chapter 2 (Li Huimin, National Research Center of Science and Technology for Development) describes the historical background of the "Three Energy Laws," including the Energy Conservation Law (1997), the Re-newable Energy Law (2005), and the Energy Law (2020), which provide an important legal basis for measures related to promoting China's energy structural transformation and energy industry development. It analyzes the content and characteristics of the laws and the role of related institutions. Also, the report provides a comparative analysis of China's national basic policies of national economic and social development, "The 13th Five-Year Plan (2016-2020)" and "The 14th Five-Year Plan (2021-2025) and the 2035 Long-Term Goal Program" for policies associated with energy storage technology, and next-generation battery technology. What' s more, it provides commentary and analysis of the latest industrial, research, and diffusion policies at the central and local levels accompanying industrial development, technology development, industry standardization for energy storage, energy conservation, and battery technology development and utilization.

Chapter 3 (Zhou Shaodan, Shanghai Institute for Science of Science) examines a quantitative analysis of Chinese battery technology by extracting Chinese articles and patent data from the Web of Science Core Collection and the Chinese patent database CPRS (Patent Search System in China) respectively, analyzing 30 areas of battery technology in categories such as drive method, cathode, electrolyte, anode, additive, phe-nomenon analysis and structure analysis. The report also outlines and analyses China's national research grant programs by research institutions and target companies.

Chapter 4 (Li Xianfeng, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences) analyzes trends in R&D of next-generation sodium-ion battery technology in China, including an overview of R&D of related technologies, the current status and trends of industrial development, and the current status and prospects of industry standardization, through relevant case studies. In particular, in 2020, the research results of a team from the Institute of Physics of the Chinese Academy of Sciences on theoretical research on so-dium-ion battery cathode materials attracted world attention, leading both the areas of fundamental research and industrialization. In 2021, China's first sodium-ion battery industry standard, the Common Specification for Sodium-Ion Rechargeable Batteries, which was proposed by the Institute of Physics of the Chinese Academy of Sciences, drafted by companies such as HiNa Battery, Natrium Energy and Huawei. This is to be viewed as a major event that will affect the future development of the industry.

Chapter 5 (Liu Gangfeng and Chang Nana, GUSU Lab) describes and analyzes the trend of research and development of electrolyte technology for next-generation lithium batteries in China, from the technological overview and research characteristics of electrolyte for lithium batteries to the development and current status of China's electrolyte industry, through representative research cases. In fundamental research, it analyzes the latest research trends in the fields of low-temperature electrolytes, high-voltage electrolytes, high-concentration electrolytes, and solid electrolytes, as well as the research results of Chinese researchers. In the area of industrial technology, the report also describes the systematic strengthening of the technological development capabilities of Chinese companies such as CATL, Dongguan Shanshan, Shenzhen Capchem, BYD, COSMX, Gotion High Tech, Zhuhai Smoothway Electronic Materials, Guangzhou Tinci Materials, GTHR, etc.

Chapter 6 (Cui Guanglei, Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences) focuses on the current status and characteristics of fundamental research at Chinese research institutes and universities in the field of all-solid-state lithium batteries and the development trends of companies. While providing specific results of materials research on the bottlenecks in all-solid-state lithium batteries, the report analyzes the development and trends of related companies in China's solid-state battery industry, focusing on various types of solid-state electrolytes with potential commercialization value, with an emphasis on the current status and characteristics of fundamental research and R&D by domestic research teams from the Chinese Academy of Sciences, Tsinghua University, Qingdao University, University of Science and Technology of China, and University of Science and Technology Beijing.

Chapter 7 (Fujishiro Koichi, Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute) looks at the development trends and prospects for next-generation storage batteries in China, analyzes global trends in carbon neutrality and its relevance to storage batteries, and describes the latest trends in the world and China for each major ap-plication of storage batteries. The report summarizes development trends in China's power sector and storage batteries, analyzes the challenges and future prospects for next-generation storage batteries.

The final section (Chen Liquan, Chinese Academy of Engineering, Institute of Physics Chinese Academy of Sciences) concludes with overall comments stating that the results of research and development of next-generation batteries will promote the development of the electric vehicle and energy storage industries in China and Japan, international exchanges and partnerships, and achieve the goals of reducing peak car-bon emissions and carbon neutrality.

目 次

エグゼクティブ・サマリー…… i

Executive Summary…… iii

はじめに…… viii

1 中国のエネルギー産業の発展現状と展望…… 1

1.1 中国のエネルギー産業の発展現状…… 1

1.2 中国のエネルギー貯蔵産業の発展現状…… 4

1.3 中国経済とエネルギー産業の展望…… 5

2 中国の次世代電池技術の研究開発、産業形成を促進する関連政策と措置…… 11

はじめに …… 11

2.1 中国の「エネルギー三法」…… 11

2.2 中央政府の主要政策…… 16

2.3 地方政府の主要政策…… 27

3 中国の蓄電池技術に関する量的分析…… 33

3.1 研究論文から見た中国の蓄電池関連技術…… 33

3.2 特許からみた中国の蓄電池関連技術…… 40

3.3 中国における蓄電池技術の研究助成…… 52

3.4 まとめ…… 54

4 中国における次世代ナトリウムイオン電池技術の研究開発の動向…… 55

4.1 ナトリウムイオン電池技術の研究開発の概要…… 55

4.2 ナトリウムイオン電池技術の産業の現状…… 58

4.3 ナトリウムイオン電池の標準化の動向と展望…… 62

5 中国における次世代リチウム電池の電解液技術の研究開発の動向 …… 65
5.1 リチウム電池の電解液の概要 …… 65
5.2 電解液の成分と特徴 …… 65
5.3 中国における電解液の研究の進展 …… 70
5.4 中国における電解液産業の発展と展望 …… 76
6 中国における次世代全固体リチウム電池技術の研究開発の動向 …… 83
はじめに …… 83
6.1 硫化物系固体電解質の基幹材料の研究動向 …… 84
6.2 酸化物系固体電解質の基幹材料の研究動向 …… 86
6.3 ハロゲン化物系固体電解質の基幹材料の研究動向 …… 87
6.4 有機無機複合固体電解質の基幹材料の研究動向 …… 88
6.5 固体電池業界におけるスタートアップ企業の発展 …… 90
6.6 中国における次世代全固体リチウム電池技術の課題と展望 …… 92
7 中国の次世代蓄電池の発展動向と展望 …… 96
7.1 カーボンニュートラルを巡る足元の動向と蓄電池 …… 96
7.2 中国の次世代蓄電池の発展動向 …… 99
7.3 中国の次世代蓄電池に関する今後の展望 …… 102
おわりに …… 103
執筆者一覧・調査企画 …… 105

はじめに

中国は、世界最大の発電電力量、消費電力量を誇り、二酸化炭素排出量においても世界の3割を占める世界最大の排出国である。2021年3月に採択された「中華人民共和国の国民経済と社会発展の第14次5年計画及び2035年長期目標綱要」および国家発展改革委員会によるカーボンニュートラルに関する重点方針の提示を踏まえ、中国におけるカーボンニュートラルに関する研究開発が加速される見込みである。

カーボンニュートラルの実現のためには、再生可能エネルギーの系統安定化対策、各セクターにおけるエネルギーの有効利用及び次世代自動車の本格普及等の課題の解決が重要であり、なかでもエネルギー貯蔵技術、とりわけ次世代蓄電池はキーテクノロジーの一つであり、同時に大きな市場拡大が想定される成長産業分野でもある。中国は、次世代蓄電池の基礎研究と製造分野においても海外機関と共同で研究所を設置するなど勢いがみられる。そのため、本調査では、中国のエネルギー分野の現状、次世代蓄電池分野における産業政策と研究開発の動向を調査し、わが国の企業や研究開発機関におけるオープン・クローズ戦略へ資する情報提供を行うことを目的とした。

本調査では、多岐にわたる分析テーマに対応して、中日両国の気鋭の研究者を組織し、それぞれの専門的視点からの分析を集めて報告書に取りまとめる方式をとることとした。その結果、次世代蓄電池に関する研究および技術開発の現状および課題と今後の展望が浮き彫りになった。

2022年3月

1　中国のエネルギー産業の発展現状と展望

1.1　中国のエネルギー産業の発展現状

1.1.1 産業発展の背景

(1) 経済成長率の鈍化

中国の経済成長率は徐々に鈍化し、年平均 6% 前後の新常態（ニューノーマル）に入った。工業化は発展後期に差し掛かり、工業の市場規模拡大の余地は徐々に縮小している。今後は、経済成長と工業発展に対して、高品質かつ高水準の内包的（集約的）発展が求められる。

(2) 産業構造の持続的進化

持続的に進化し続ける中国の産業構造だが、特に国民経済の発展をリードしてきた工業の牽引力が弱まりつつある。2000 年以降、中国は工業主導の下で経済成長を促進してきたが、今では、第二次・第三次産業が次第に力をつけ、ともに経済成長を牽引している。

2020 年の中国の国内総生産（GDP）は 101 兆 5,986 億元に達し、前年同期比で 2.3% 増加した。為替レート（年平均）で換算すると、2020 年の世界の経済総量に占める中国の割合は 17% を超えている。そのうち、第一次産業の工業増加値（付加価値額）は 7 兆 7,754 億元（前年同期比 3% 増）、第二次産業は 38 兆 4,255 億元（前年同期比 2.6% 増）、第三次産業は 55 兆 3,977 億元（前年同期比 2.1% 増）であった。GDP に占める工業増加値の割合は、第一次産業が 7.7%、第二次産業が 37.8%、第三次産業が 54.5% となった。第三次産業では、インターネットを中心とした新規産業が中国の経済成長の推進力となり、大きな力を発揮した。

2020 年の第一次産業への投資は 1 兆 3,302 億元（前年同期比 19.5% 増）、第二次産業は 14 兆 9,154 億元（前年同期比 0.1% 増）、第三次産業は 35 兆 6,451 億元（前年同期比 3.6% 増）であった。[1] 同年のエネルギー多消費型の 6 大産業（鉄鋼・非鉄金属・建材・石油化学・化学工業・電力）が GDP に占める割合は 33% であった（アメリカは約 20%）。エネルギー多消費型が工業に占める割合は約 30% であるが、工業のエネルギー消費に占める割合は約 70% にまで上る。[2] また、中国の資源やエネルギーは主に中西部地域に集中しているが、電力消費は東部地域での割合が高く、この不均衡な構造こそが中国各地の炭素強度（CO_2 排出量）がアンバランスになる状況を生み出す主たる要因である。

産業構造の偏重、エネルギー産業への高い投資比率が原因となり、中国の GDP あたりのエネルギー消費量は OECD（経済協力開発機構）加盟国の約 3 倍、世界平均水準の 1.5 倍に達している。低減する余地は依然として大きいものの、いくつかの困難と課題に直面しており、それらを解決する必要がある。

(3) CO_2 排出量ピークアウトとカーボンニュートラル

中国は「CO_2 排出量ピークアウト」「カーボンニュートラル（炭素中立）」の目標達成を国際社会に向けて誓約した。2020 年 9 月、習近平国家主席は第 75 回国際連合総会（国連総会）の演説の中で、「中国は国としての自主的貢献度を高め、より強力な政策と措置を講じ、2030 年までに CO_2 排出量をピークアウトさせ、

[1] 中国国家統計局「中華人民共和国 2020 年国民経済・社会発展統計公報」、2020 年 2 月 28 日

[2] 中国電子科学研究院、中国企業連合会、国務院発展研究センター「産業構造調整による炭素強度低下の戦略経路」、2021 年 10 月

2060 年までにカーボンニュートラルを実現することを目指す」と宣言した。この目標は、中国の工業発展の具体的な方向性、計画、政策に具現化されつつあり、ハイテク産業の発展、従来型産業の構造転換と高度化を大きく促進するものである。[3]

(4) 新産業の持続的成長

中国の新産業[4]は持続的に成長し続けており、一定規模以上の工業において 2020 年のハイテク製造業の工業増加の割合は、前年同期より 7.1% 増加した。これは一定規模以上の工業全体の 15.1% を占める。設備製造業の工業増加の割合は前年同期比 6.6% 増、全体に占める割合は 33.7% であった。ハイテク産業への投資は前年同期より 10.6% 増加した。また、新エネルギー自動車（NEV）の通年の生産台数は、前年同期比 17.3% 増の 145 万 6,000 台を達成した。

中国の経済社会の基本的な発展動向は、エネルギー・電力の持続的成長のための基盤を築き、その方向性を描き出し、エネルギー・電力産業の未来に決定的な影響を与えるであろう。

1.1.2 中国のエネルギー供給の現状

(1) エネルギーの供給構造

2021 年、中国のエネルギー生産は安定的な増加傾向をみせている。原炭、原油、天然ガス、電力の生産量はそれぞれ前年同期比で 4.7%、2.4%、8.2%、8.1% 増加した。

原炭・原油・電力の生産は前年より加速したものの、天然ガスの生産は伸び率が鈍化した。それぞれの年間生産量は、原炭が 40.7 億 t（前年同期比 4.7% 増、2019 年比 5.6% 増）で、2 年間の年平均成長率は 2.8% であった。原油は 1 億 9,898 万 t（前同期比 2.4% 増、2019 年比 4% 増、年平均成長率 2%）、天然ガスは 2,053 億 m^3（前年同期比 8.2% 増、2019 年比 18.8% 増、年平均成長率 9.0%）となった。

2021 年の電気の発電電力量は 8 兆 1,122 億 kWh（前年同期比 8.1% 増、2019 年比 11% 増）で、年平均成長率は 5.4% であった。中国の発電電力量は世界で最も多く、2021 年の発電電力量、消費電力量はともに過去最高を記録した。[5]

発電電力量を種類別にみると、新エネルギーが急速な発展を続ける一方で、火力発電は依然として中心的な役割を担っている。2021 年の火力発電電力量は前年同期比 8.4% 増の約 5 兆 7,703 億 kWh で、中国の総発電電力量に占める割合は最大の約 71.1% となった。なかでも、全省を通して山東省の火力発電電力量は 5,217.3 億 kWh と最も多く、続いて内モンゴル自治区の 4,863 億 kWh、江蘇省の 4,836 億 kWh、広東省の 4,629 億 kWh である。[6]

[3] 新華社 HP: 工業情報化部公布「『14 次 5 カ年計画』工業グリーン発展計画」、2021 年 12 月 3 日、http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/03/5655701/files/4c8e11241e1046ee9159ab7dcad9ed44.pdf

[4] 中国では、新産業とは新しい科学技術成果、新興技術を応用して、一定規模の新型経済活動を形成するものを指し、具体的には新技術の応用の産業化が直接生み出した新産業、従来型産業が現代の情報技術を取り入れて形成した新産業などをいう。この新産業に含まれるハイテク産業は「バイオ及び新医薬技術、新材料及び応用技術、先進的な製造技術、航空宇宙技術、海洋技術、原子力の応用技術、新エネルギーや省エネルギー技術、環境保護の新技術、現代的農業技術、その他の伝統的な産業の改造に応用可能な新技術等」を関連する諸産業分野を指している。

[5] 国家エネルギー局：「2021 年全国電力統計データ」、https://news.bjx.com.cn/html/20210617/1158624-2.shtml

[6] 国家エネルギー局：「2021 年全国電力統計データ」、https://news.bjx.com.cn/html/20210617/1158624-2.shtml

火力発電に続き、2 位の水力発電の発電電力量は 1 兆 1,840 億 kWh で、全体の約 14.6% を占めた。しかし、一部の地域で夏季の降雨量が例年を下回り、複数の水力発電ユニットがフル稼働できなかったため、2020 年と比べて 2.5% 減少している。広東省の水力発電電力量は前年同期比 22.8% 減、山西省は 21.2% 減、河南省は 20.9% 減、青海省は 16.7% 減、広西省は 15.4% 減となった。甘粛省・江西省・貴州省・湖南省などの減少幅も 10% を上回っている。

続く 3 位の風力発電の発電電力量は、5,667 億 kWh（前年同期比 29.8% 増）に達し、全体に占める割合は 6.99% に上昇した。その次の原子力発電は 4,075 億 kWh（前年同期比 11.3% 増）で全体の 5.02% を占めた。太陽光発電は 1837 億 kWh（前年同期比 14.1% 増）で全体の 2.26% を占めた。

2021 年、中国の再生可能エネルギー発電の設備容量は、10 億 kW を突破するという歴史的な前進を遂げた。2015 年末から倍増し始め、2021 年 11 月末時点で、前年同期比 9% 増の約 23.2 億 kW を達成した。これは中国の総発電電力量の 43.5% を占める。このうち、風力発電の設備容量は、前年同期比 29% 増の約 3 億 kW、太陽光発電は 24.1% 増の約 2.9 億 kW である。水力発電、風力発電、太陽光発電、バイオマス発電の設備容量は、いずれも世界のトップである。

(2) 発電電力量の現状と構成

2020 年の中国の総発電電力量は 7 兆 6,200 億 kWh と、前年同期より 4% 増加している。第 13 次 5 カ年計画期間中は年平均 5.8% 増であった。2011 年から 2021 年にかけて、中国の総電力消費量は年々増加の一途をたどっている。これは主に、第一次・第二次・第三次産業と家庭の電力消費量がそれぞれ増加したことに起因する[7]。なお、発電電力量の構成をみると、新エネルギー（原子力・風力・太陽光）を利用した発電電力量が持続的に増加し、全体における割合が次第に高まっている（表 1-1）。

表 1-1　中国の発電電力量の構成（2011 ～ 2020 年、単位：億 kWh）

（年）	火力発電	水力発電	原子力発電	風力発電	太陽光発電
2011	38,337	6,989	864	703	6
2012	38,928	8,721	974	960	36
2013	42,470	9,203	1,116	1,412	84
2014	44,001	10,729	1,325	1,600	235
2015	42,842	11,303	1,708	1,858	395
2016	44,371	11,841	2,133	2,371	665
2017	47,546	11,979	2,481	2,972	1,178
2018	50,963	12,318	2,944	3,660	1,769
2019	52,202	13,044	3,484	4,057	2,240
2020	53,303	13,552	3,663	4,665	2,611

出典：中国国家統計局、国家エネルギー局、中国電力企業連合会[8]

[7] 趙英『第 4 次産業革命における中国のロボット産業と自動車産業』、研究報告、中国社会科学院工業経済研究所、2022 年 1 月

[8] 中国国家統計局：http://www.stats.gov.cn/tjsj/、国家エネルギー局：http://www.nea.gov.cn/、中国電力企業連合会：https://www.cec.org.cn/

(3) エネルギー産業の発展特徴

① エネルギー・電力産業の生産能力と規模の拡大には、依然として市場の大きな成長余地がある。

② エネルギー・電力構成の調整と最適化、クリーンエネルギー・クリーン電力の規模拡大が持続する。

③ 省エネ・排出削減は、エネルギー・電力産業の発展動向の主軸となる。エネルギー・電力産業における資源の利用効率、エネルギー・電力システムの稼働率は徐々に上昇し、質・安定性・耐久性を向上する。

④ エネルギー・電力産業のデジタル化、ネットワーク化、スマート化は着実に高度化する。

⑤ エネルギー貯蔵産業は急速かつ持続的な発展を遂げ、新エネルギー・新電力システムを支える重要な保障となる。

1.2 中国のエネルギー貯蔵産業の発展現状

1.2.1 エネルギー貯蔵産業の発展の特徴

中国のエネルギー・電力産業の持続的成長、産業の構造転換と高度化、中国政府の掲げる「カーボンピークアウト」および「カーボンニュートラル（炭素中立）」の戦略目標に合わせて各種のエネルギー・電力産業は高速発展を遂げてきた。これに伴い、エネルギー貯蔵産業に成長の余地が生まれ、発展期へと突入した。

業界では、2021 年は「中国のエネルギー貯蔵の規模化発展元年」と呼ばれている。「ダブルカーボン（双碳：カーボンピークアウトとカーボンニュートラル）」の発展目標の指導の下、適時に奨励政策が打ち出され、各省の風力・太陽光発電とエネルギー貯蔵を組み合わせた重点政策が、次々と実施された。第 14 次 5 カ年計画期間が終了する頃には、中国のエネルギー貯蔵設備容量は 50 ～ 60GW に到達し、市場規模は約 1 兆元を実現する見通しである。また、同年における中国のエネルギー貯蔵産業は、商業化初期から大規模発展の段階へと移行した。その主な理由は、第一に、エネルギー貯蔵設備容量が大幅に増加したことである。第二は、さまざまなエネルギー貯蔵技術がブレイクスルーを遂げたことであり、第三は支援政策が次々と打ち出されたことが挙げられる。そして第四として、系統連系とアンシラリーサービスの市場において、エネルギー貯蔵企業が電力企業から独立した市場主体として、独自の役割を明確化したことである。

中関村エネルギー貯蔵産業技術連盟（CNESA）の概算統計[9]、2021 年末時点で稼働しているエネルギー貯蔵プロジェクトの累計設備容量（物理的エネルギー貯蔵、電気化学的エネルギー貯蔵、溶融塩蓄熱など）は、前年同期比 29% 増の 4,570 万 kW に達した。注目すべきは、電力貯蔵設備容量で、前年同期比 220% 増という目覚ましい成長をみせている。その中で、揚水式エネルギー貯蔵の設備容量は最大規模の 805 万 kW であった。次に続く電気化学的エネルギー貯蔵の設備容量は 187 万 kW に達し、建設中（未稼働）の設備容量についても、2,000 万 kW を超える計画である。一方、新規に稼働した設備容量は 1,010 万 kW に達した。なかでも、圧縮空気エネルギー貯蔵の新規設備容量は 17 万 kW で、2020 年末時点から 15 倍増と大幅に上昇した。新規設備容量を引き上げた主要因は、電源側に新エネルギー利用の貯蔵設備、独立したエネルギー貯蔵設備を配置したことなどが挙げられる[10]。

[9] http://esresearch.com.cn/#/main

[10] これらのデータは中関村エネルギー貯蔵産業技術連盟（CNESA）の基礎統計であり、正式なデータは 2022 年 4 月『エネルギー貯蔵産業研究白書』（2022）にて発表される

新エネルギーを利用した発電設備の規模拡大に伴い、エネルギー貯蔵は新型電力システムの構成には欠かせない存在となった。電源側・送電網（グリッド）側・ユーザー側などのさまざまなシーンで広く応用され、その市場潜在力は軽視できなくなるであろう。一方で、エネルギー貯蔵技術、活発な資本市場、地方政府の支援政策が次々と登場し、エネルギー貯蔵の安全性・経済性の持続的向上が促進された。将来的には、エネルギー貯蔵の価値が、電力システムにおいて十分に発揮されることが期待される。

1.2.2 エネルギー貯蔵産業の発展の方向性と課題

2021 年、ダブルカーボン目標の指導の下、エネルギー貯蔵産業は技術に対する共通認識を形成しつつある。さまざまなシーンにおいて、物理的・化学的エネルギー貯蔵技術の融合による高度化や長期エネルギー貯蔵技術（LDES）が次第に注目されている。短期的にみると、リン酸鉄リチウムと揚水式エネルギー貯蔵が発展の指標となる。長期的には、ナトリウムイオン電池、圧縮空気、水素エネルギーなどの各種技術は既存システムを補完し、より多くの選択を創出する。

業界関係者は、エネルギー貯蔵とそのシステムを単に電池セルとは違うものとしており、エネルギー貯蔵産業はシステムにより深く注目すべきで、セル管理のスマート化・精密化、安全設計のシステム化こそがエネルギー貯蔵システム全体の安全性の保障を強化し、ひいてはエネルギー貯蔵産業の健全な発展を保障すると考えている。

エネルギー貯蔵技術の種類は数多く、応用シーンが複雑である。2021 年、エネルギー貯蔵産業では、電力市場の新ルールに従い、多くのビジネスモデルが試行された。また、「電源・ネットワーク・負荷（源－網－荷）」の融合による新型システムの模索が徐々に進められている。[11]

2021 年は、エネルギー貯蔵産業の安全性の問題が高い注目を集めた。一方で、多発する火災事故の影響は、依然として業界全体に暗い影を落としている。業界関係者は総じて、エネルギー貯蔵システムの安全性はことのほか重視しなければならないと認識している。エネルギー貯蔵システムの安全性は、セル～モジュール～システム集積、構造～電気～制御などの複雑なシステム工学に支えられており、「高安全性」を目標に、技術・製品をアップデートする必要がある。一方で、エネルギー貯蔵業界が抱えている投資回収メカニズムの不足、運転管理メカニズムの不完全、業界標準体系の未確立などの課題も早急に解決しなければならない。

1.3 中国経済とエネルギー産業の展望

1.3.1 中国経済の展望

第 14 次 5 カ年計画の期間中、中国経済は 6% 前後の成長率を維持するが、第 15 次 5 カ年計画や第 16 次 5 カ年計画と進むにつれ、成長率はそれぞれ約 5%、4.5% と徐々に鈍化することが予想される。2035 年以降はさらに低下し、4% 台まで落込むとみられている。その一方で、中国経済の発展の質は持続的に向上し、省エネ・排出削減はますます重要視されるようになった。

次に挙げる中国経済の今後の発展動向は、電力・エネルギー産業の形態と構造に深く影響し、その発展を内側から大きく変えるであろう。

[11] 9 と同じ

(1) 第一次・第二次・第三次産業の発展は協調に向かう。第二次産業の GDP に占める割合はほぼ安定し、第三次産業は依然として、経済発展において重要な役割を果たす。
(2) ハイテク産業は急成長が続き、独自の研究開発能力は持続的に向上する。デジタル経済・デジタル産業の発展はより顕在化し、産業との融合がさらに高度化する。
(3) 産業チェーンとサプライチェーンは整備され、安全性が向上する。
(4) 工業製品の輸出は、特に「一帯一路」の対象地域においてさらに拡大する。サービス輸出も着実に向上する。
(5) 独自の研究開発能力が持続的に向上し、コア技術・基幹部品・基幹原料の保障のレベルが大幅に上昇する。
(6) 2035 年をめどに、「工業大国」から「工業強国」への転換を実現する。

1.3.2 エネルギー産業の展望

中国の最終エネルギー消費量の需要は、2025 年までは緩やかに増加し、2025 ～ 2030 年にピークを迎え、2030 年以降は減少傾向をたどると予想される。2035 年に 34 ～ 38.2 億 t（標準炭換算）の最高値に達するが、2050 年に 28.4 ～ 33.7 億 t、2060 年には 23.5 ～ 30.6 億 t（標準炭換算）まで低減するとみられている。[12]

中国政府の「CO_2 排出量ピークアウト」「カーボンニュートラル」の目標の遂行と省エネ・排出削減政策の公布にともない、重化学工業は規模拡張を停止し、工業部門は構造調整と技術水準を向上させる。工業の多くが内包的発展を遂げ、産業は構造転換と高度化を加速する。その結果、工業部門のエネルギー消費が最終エネルギー消費構成に占める割合は着実に低下する。2025 年に 53 ～ 54%、2035 年前後には 45% を下回り、2060 年には 34 ～ 35% にまで抑えられる見通しである。

消費者の多様化、住宅消費のグレードアップの影響を受け、建設部門のエネルギー消費が最終エネルギー消費に占める割合は、一旦は上昇してからマイナスに転じるであろう。また、2025 年は 26 ～ 27% の間で推移し、2060 年には 34 ～ 37% まで上昇するといわれている。

交通部門は人々の移動の増加、交通運輸構造の変化、交通手段のテクノロジー革命の影響を受け、最終エネルギー消費に占める割合は小幅に上昇した後に低下する。2025 年に 17 ～ 18%、2050 年に 27 ～ 30% に達するが、2060 年には 25 ～ 29% に低下するといわれている。

当面の間は、化石燃料は新規資源を支える基礎的資源として利用される。2020 年から 2025 年にかけて、石炭に代わる他の燃料への代替が加速し、最終エネルギー消費に対する石炭の需要・割合は着実に低下し、石炭の割合は 2035 年に 11 ～ 13%、2060 年には 3% を切る見通しである。[13]

石油製品や天然ガスも同様に、最終エネルギー消費への需要・割合が低下する。石油製品の割合は、2030 年前後に 24 ～ 25% とピークに達し、2060 年には 17% まで下がる。天然ガスは 2040 年前後に 19% のピークに達する。石油製品は天然ガスより早期に停滞期に入るが、最終的にはともに低下が加速するとみられる。[14]

[12] 国網能源研究院有限公司『中国エネルギー電力発展展望』(2020)
[13] 予測について、通常・電化の加速・排出削減の強化という 3 つの状況下での予測を行った。筆者の研究によると、中国政府は最近石炭のクリーン利用を再重視した一連の政策を打ち出した。筆者の研究成果は通常の状況下での比較的保守的な予測結果を支持しており、ここではその通常の状況下の予測結果を採用する。
[14] 国網能源研究院有限公司『中国エネルギー電力発展展望』(2020)

水素エネルギーについては、2030 年前後に自動車産業を中心に大規模に応用される[15]。最終エネルギー消費において、電気エネルギーは次第に中心的な地位を占めるようになる。電気エネルギーの最終エネルギー消費に占める割合は上昇し続け、2025 年には石炭を抜いて最も主要な品目となる。2035 年に 37 ～ 45%、2050 年に 45 ～ 60% まで上昇し、2060 年には 50 ～ 70% に達する見込みである[16]。

クリーンエネルギーの設備容量は増加の一途をたどる。2019 年には 8.2 億 kW 程度であったが、2025 年に 15 ～ 17.7 億 kW、2035 年に 27.5 ～ 33.1 億 kW、2050 年に 39.3 ～ 49.3 億 kW、そして 2060 年には 41.6 ～ 49.3 億 kW に到達する見通しである[17]。電源構成における割合は、現在の約 41% から、2050 年に約 82%、2060 年には約 86% と持続的に上昇する。

通常モデルの場合で、陸上風力発電の設備容量は、2050 年に 11.9 億 kW、2060 年に 12.4 億 kW に達する。洋上風力発電は 2050 年に 1.4 ～ 1.7 億 kW、2060 年に 1.5 ～ 2 億 kW に達する。太陽光発電は 2050 年に 14 億 kW、2060 年に 14.7 億 kW に達する。太陽熱発電は 2050 年に 1.5 ～ 1.7 億 kW、2060 年に 2 ～ 2.5 億 kW に達する。石炭火力発電の設備容量は、2050 年に約 6.8 億 kW、2060 年に約 4 億 kW に低下する。天然ガス発電は 2050 年に約 2.1 億 kW、2060 年に約 2.2 億 kW となる。原子力発電と水力発電の設備容量は、2050 年にそれぞれ約 2.2 億 kW、約 4.1 億 kW に達し、2050 年以降は安定を維持するといわれている[18]。

1.3.3 エネルギー貯蔵産業の展望

中国の経済発展にともない、経済の高品質発展、産業の高級化、持続的な都市化、人民の生活水準の向上が実現した。また、「CO_2 排出量ピークアウト」「カーボンニュートラル」の戦略の実施は、中国のエネルギー・電力産業とエネルギー貯蔵産業が成長する上で、広大かつ多様な市場ニーズと発展余地を生み出した。

ハイテク産業の発展、デジタル経済の推進は、エネルギー貯蔵産業に技術基盤を提供し、それを活用するエコシステムを構築した。

新エネルギーとクリーン電力は、エネルギー・電力構成の中で次第に中心的な地位を占めるようになり、エネルギー貯蔵産業の直接的かつ強力な推進力となる。「ダブルカーボン」の目標の下、クリーンで低炭素、安全で高効率な現代エネルギーシステムを構築するためには、「新エネルギー発電」と「最終エネルギー消費」をひとつにまとめることが必然となる。エネルギー・電力供給システムの従来モデルは、化石燃料を利用した集中型・統一型送電が主体である。一方、新しいモデルは、新エネルギー利用の貯蔵設備、クリーン・再生可能エネルギー発電設備、電気設備（需要家レベルの電気使用設備）を統合し、「電源・ネットワーク・貯蔵・負荷（源－網－儲－荷）」の一体化を実現する。これは、エネルギー・電力産業の革命の方向性となるであろう。

エネルギー貯蔵設備の大規模な建設や稼働により、発電・送電・供給・使用を同時に完成する電力の特性は変化する。需給間のリアルタイムな連結は時間帯を跨いだ連結に切替り、電力の需給バランスの調整方法が充実し、送電網の耐久性・安定性が高まり、送電効率は向上する。エネルギー貯蔵設備は、そのインタラクティブ性を活かし、電力システムのピークシフトと周波数変調、新エネルギーの消費管理、新エネルギーの交通システム運行を支持・保障する。

[15] 趙英『第 4 次産業革命における中国のロボット産業と自動車産業』、研究報告、中国社会科学院工業経済研究所、2022 年 1 月
[16] 国網能源研究院有限公司『中国エネルギー電力発展展望』（2020）
[17] 国網能源研究院有限公司『中国エネルギー電力発展展望』（2020）
[18] 国網能源研究院有限公司『中国エネルギー電力発展展望』（2020）

電力システムの電源の中でも、水力・風力・太陽光発電に対して、エネルギー貯蔵は電力を調整する役割を多いに発揮する。中国の水力発電所、特に西部地域においては、その運転過程で、電力消費のオフピーク時に発生する大規模な電力ロス（棄電）の問題が依然として未解決のままである。風力・太陽光発電はその技術駆動型の経済の特徴から、エネルギー貯蔵装置に依存しているが、水力・風力・太陽光発電の出力や消費管理の難しい課題は、まだ明らかな改善が見込めない状況である。2018 年の中国の「3 棄」（棄風・棄水・棄光）の電力ロス量を合わせると、世界最大の水力発電である三峡ダム水力発電所の発電電力量を超えるほどである。将来的に、クリーンエネルギーやグリーン電力が主体の送電網の安定稼働を実現するには、安定性と効率の高いエネルギー貯蔵システムに依存しなければならないであろう。

中国の新エネルギー自動車は、7 年連続で生産・販売台数ともに世界一となり、2021 年の販売台数は約 352 万台で、輸出台数は前年同期比 3 倍の 31 万台を達成した。そのうち、新車の販売台数は世界シェアの 61% を占めている。一方、電気自動車は、政府が制定した「2025 年までに中国自動車市場シェア 20% を獲得する」という目標を、2022 年に前倒しで達成することが期待されている。[19]

新エネルギー自動車の構成は常に変化し続けている。2019 年の中国の新エネルギー自動車の構成は、純電気自動車（BEV）が 97.2 万台、プラグインハイブリッド車（PHEV）が 23.2 万台、水素自動車が 2,737 台で、それぞれ全体の 80.6%、19.2%、0.2% を占めた。純電気自動車とハイブリッド車は主に乗用車分野に集中し、水素自動車は商用車分野を中心にテスト走行を実施している。

遅くとも 2030 年を目処に、中国の自動車産業は、製品の主体を従来のガソリン車から新エネルギー自動車へと完全にシフトする。[20] 新エネルギー自動車の発展は、エネルギー貯蔵産業へ広大な市場を切り開いただけでなく、エネルギー貯蔵技術の多様化を促進した。さらに、エネルギー貯蔵産業のエコシステムに対し、例えば自動車用エネルギー貯蔵装置とグリッド（送電網）との接続、カーバッテリーのカスケード利用など、新たな課題を提起した。

中国の電力貯蔵設備は依然として揚水発電所が中心であり、2021 年の揚水式エネルギー貯蔵の設備容量は約 805 万 kW で、2035 年に 1.2 億 kW、2060 年には 1.7 億 kW に達する。しかし、技術の成熟とコストの低減が進むにつれ、電気化学的エネルギー貯蔵などの新型エネルギー貯蔵が発展期を迎える。2040 年をめどに、新型エネルギー貯蔵は揚水式を抜いて、電力システムのエネルギー貯蔵形態の主体となると予想される。新型エネルギー貯蔵の総設備規模は 2035 年に約 7,000 万 kW、2060 年には 4.2 億 kW にまで達すると見込まれている。また、華北・西北・華東・南方などの地域には、エネルギー貯蔵重点地区が指定され、新エネルギー発電基地や負荷調整センターなどを配置したエネルギー貯蔵都市が建設される。将来的にはリチウムイオン電池と鉛蓄電池がエネルギー貯蔵の主体となり、そのほかは補完的技術として使用される。二次電池のカスケード利用も、電力システムのエネルギー貯蔵を構成する重要な要素となる。

2021 年、国家発展改革委員会と国家エネルギー局は、「新型エネルギー貯蔵発展の推進加速に関する指導意見」[21]を公布し、2025 年をめどに、新型エネルギー貯蔵を商業化初期から大規模発展へ移行することを打出した。新型エネルギー貯蔵技術のイノベーション能力、コア技術・設備の自律制御水準を大幅に向上させ、設備規模は 3,000 万 kW 以上を実現する。そして、2030 年をめどに、新型エネルギー貯蔵の全面的な市場化発展を掲げている。新型エネルギー貯蔵のコア技術・設備は自律制御を可能にし、技術イノベーションと産業水準は世界トップクラスの地位につく。標準体系、市場メカニズム、ビジネスモデルは成熟化・健全化し、

[19] 中国乗用車市場情報連合会（乗連会、CPCA）予測、2021 年 12 月 27 日

[20] 趙英『第 4 次産業革命における中国のロボット産業と自動車産業』、研究報告、中国社会科学院工業経済研究所、2022 年 1 月

[21] https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202107/t20210723_1291321.html?code=&state=123

電力システムの各段階と高度な融合発展を遂げる。設備容量は新型電力システムに相応の需要量をほぼ満たす。新型エネルギー貯蔵はエネルギー分野の CO_2 排出量ピークアウト、カーボンニュートラルを達成するための重要な柱のひとつとなる。

これらの目標の実現とともに、中国のエネルギー貯蔵産業は、エネルギー・電力システムの効率的な安定稼働、交通運輸の効率的かつクリーンな運行のために、国民経済の発展を促進し、その過程で重要な役割を果たす。

表 1-2 中国の経済とエネルギー産業の展望

	2019 年	2035 年	2050 年	備考（予測機関）
総人口/億	14.0	14.3	13.95	国家衛生健康委員会。
都市化率/%	47.3	70.0	80.0	2035 年 中国発展研究基金会。2050 年 中国社会科学院。
GDP/兆ドル	14.4	32	53	2035 年 北京大学光華管理学院。 2050 年 ゴールドマン・サックス。
第三次産業比率/%	53.9	70	80	2035/2050 年 中国社会科学院
一次エネルギー消費量 /億 tce	48.6	40.0	25.0	2035 年 国家エネルギー局。 2050 年 エネルギー移行委員会。
石炭比率/%	57.7	40	8	2035 年 国家発展改革委員会。 2050 年 国家技術経済研究院。
再生可能エネルギー比率/%	12	40	70	2035 年 国網能源研究院。 2050 年 エネルギー移行委員会。
電力消費量/兆 kWh	7.2	9.6	15.0	2035 年 国網能源研究院。 2050 年 エネルギー移行委員会。
発電電力量における再生可能エネルギー比率/%	26	40	100	2050 年 電力部門の完全脱炭素化、エネルギー移行委員会。
CO2 排出量/億 t	88.9	72.7	4.3	2050 年 植樹造林、CO_2 捕集・封じ込めなどの措置を講じてネットゼロ（ネットゼロ CO_2 エミッション）を実現。

出典：『エネルギーデータ 2020』P20[22]

[22] https://www.efchina.org/Attachments/Report/report-lceg-20210430-3/2020 能源数据 .pdf

参考資料・文献

1. 中国エネルギー貯蔵研究会, 中関村エネルギー貯蔵産業技術連盟（2019）「エネルギー貯蔵産業発展白書（2019）」, 中国石化出版社
2. 中国エネルギー貯蔵研究会, 中関村エネルギー貯蔵産業技術連盟（2021）「エネルギー貯蔵産業発展白書（2021）概要版」 https://news.bjx.com.cn/html/20211109/1186657.shtml
3. 国網能源研究院有限公司（2020）「中国エネルギー・電力産業の発展展望（2020）」, 中国電力出版社 http://wbmngo.oss-cn-beijing.aliyuncs.com/images/companyNewsImages/1607274099342. 中国能源电力发展展望 2020.pdf
4. 研究院有限公司（2021）「2021 中国電力需給分析報告」, 中国電力出版社
5. 国網能源研究院有限公司（2021）「2021 中国新エネルギー発電分析報告」, 中国電力出版社
6. 趙英（2022）「第 4 次産業革命における中国のロボット産業と自動車産業」, 研究報告, 中国社会科学院工業経済研究所
7. 国家エネルギー局「2020 年全国電力工業統計データ」 http://www.nea.gov.cn/202101/20/c_139683739.htm
8. 国家エネルギー局「2021 年全国電力工業統計データ」 http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310441589.htm
9. 国家統計局「2021 年中国経済統計データ」 http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202202/t20220227_1827960.html
10. 智研コンサルティング「2021 ～ 2027 年中国電力工学産業の発展動態及び投資戦略計画報告」
11. 前瞻産業研究院「中国電力業界市場の展望と投資戦略計画の分析報告」
12. 国家発展改革委員会 , 国家エネルギー局「新型エネルギー貯蔵発展の推進加速に関する指導意見」, 2021 年公布 https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202107/t20210723_1291321.html?code=&state=123

2　中国の次世代電池技術の研究開発、産業形成を促進する関連政策と措置

はじめに

改革開放以来、中国は急速に発展する経済社会のニーズに応じて、エネルギーの全面的かつ協調的で持続可能な発展を推進してきた。今や中国は世界最大のエネルギー生産・消費国へと成長し、そのエネルギー利用効率は世界最速で上昇している。中国共産党第十八回全国代表大会の開催を経て、中国の発展は新しい時代を迎え、中国のエネルギー発展も新時代に突入した。

2014 年 6 月に習近平国家主席が打ち出した「四つの革命、一つの協力」というエネルギー安全保障の新戦略は、新時代を迎えた中国のエネルギー発展の方向性を示し、特徴のあるエネルギー発展への新たな道を切り開いた。中国は「革新（イノベーション）」「協調」「グリーン」「開放」「共有」からなる新しい発展理念を堅持し、「高品質発展」の促進をテーマに掲げた。供給側構造改革の深化を主軸とし、エネルギー消費方式改革の全面的な推進、多元的でクリーンなエネルギー供給体系の構築、革新駆動型の発展戦略の実施、エネルギー体制改革の持続的深化、エネルギー分野における国際提携の継続的な推進により、中国のエネルギーは質の高い発展を促す新たな発展段階に入った。

しかし、一方ではコア技術、産学官連携、革新体制、戦略計画などの面で、世界のエネルギー科学技術強国として、エネルギー革命を牽引する国家としての要件には依然として大きな開きがある。企業はイノベーション主体として十分にリードできておらず、イノベーション活動と産業ニーズが一貫しない状況にあり、科学技術革新を推進する上で市場の役割を強化する必要がある。中国は今、世界的なエネルギー構造の高度調整、気候変動への世界的対応の加速化、国家間の技術競争の激化、中国経済の新常態（ニューノーマル）の到来、資源・環境制約の継続的強化などの試練に直面している。次のステップとして、全面的な戦略計画を強化し、エネルギーの消費・供給・技術・体制の改革を促進しなければならない。世界の主要国は、エネルギー技術を新たに到来する科学技術革命や産業革命の突破口としてみており、発展の優位性を獲得しようと各種の政策・措置を制定し、国際競争力の強化とトップクラスの地位の維持に努めている。こうした背景の下、中国もまた法規制や政策・措置を相次いで打ち出し、エネルギー科学技術革新と産業発展の加速化を目指している。

2.1　中国の「エネルギー三法」

中国は現在、近代的な法治国家建設の過程にあり、法律施行の効果を高めるため、法制度の体系化を絶えず推し進めている。エネルギー産業分野において、「省エネルギー法」「再生可能エネルギー法」「エネルギー法（意見募集稿）」は、中国のエネルギー構造転換の促進、エネルギーシステムの構築と完備化、エネルギー産業の発展の推進などに関する政策・措置の重要な法的根拠となる。その重点や位置づけは三者でそれぞれ異なり、「省エネルギー法」「再生可能エネルギー法」は、省エネや再生可能エネルギー分野の単行法に属する。「エネルギー法」は単一分野の法律でなく、中国のエネルギー分野の綱領的法律に属する位置づけである。同法は「エネルギー憲法」と呼ばれ、中国のエネルギー発展の方向性・戦略性・総体性に関わる問題を明確化し、各エネルギー単行法の間の関係性を統率、調整している。

2.1.1 省エネルギー法（1997 年）[23]

1990 年代中後期、中国の主要工業製品のエネルギー消費量は先進国より 30 ～ 60% も高く、エネルギー利用効率は 30% 前後であった。しかし、当時の中国の経済発展と国民の生活水準向上のスピードは比較的速く、次第にエネルギー供給の逼迫が顕著化し、エネルギー不足は経済発展を制約する要因となった。そこで、エネルギー不足を解決するにあたり、新エネルギー発掘による生産能力増加、省エネによる生産効率化の両面から、節約と開発を同時並行して推し進める必要があった。こうした背景の下、省エネ活動を促進する基本法律の制定の必要性が客観的に求められるようになった。

1997 年 11 月 1 日、第 8 期全国人民代表大会常務委員会第 28 回会議で「中華人民共和国省エネルギー法」が可決され、翌年 1 月 1 日から正式に施行された。その後も中国政府は同法に対し、発展情勢から生まれる新たなニーズに沿って、2007 年、2016 年と相次いで 2 度の改正作業を実施した。2016 年～ 2018 年 10 月 26 日にかけて改正作業が行われ、第 13 期全国人民代表大会常務委員会第 6 回会議で可決されたものが最新である。

ここからは、2018 年の最新版について紹介する。

「省エネルギー法」は全 7 章 87 条で構成され、総則、省エネルギー管理、合理的使用と省エネルギー、省エネ技術の進歩、奨励措置、法律責任などの内容が含まれる。総則は全 10 条からなり、立法目的（第 1 条）、概念定義（第 2 条～第 3 条）、基本戦略（第 4 条）、関連主体の職責の位置づけ（第 5 条～第 10 条）をそれぞれ明記している。同法の具体的内容については、次の 3 つに要約できる。

(1) 立法目的と基本国策

同法は「社会全体の省エネの推進」、「エネルギー利用効率の向上」、「環境の保護と改善」、「経済社会の全面的で調和のとれた持続可能な発展の促進」を目的としている。さらに、「資源の節約は中国の基本国策である。国は節約と開発を同時並行して推進し、節約を最優先に、エネルギー発展戦略を実施する」と明記し、国家政策とエネルギー発展戦略における省エネの重要性を明確化した。

(2) 具体的な管理と措置

① 省エネ目標責任制度、省エネ審査評価制度を実施する。省エネ活動を地方政府の審査・評価体系の中に組入れる。

② 健全な省エネ標準を体系化する。強制力のあるエネルギー使用製品・設備エネルギー効率基準、高エネルギー消費製品（生産中）の単位製品あたりのエネルギー消費制限基準を制定する。

③ 固定資産投資プロジェクト（新築・改築・増築）の省エネ評価と審査制度を実施する。

④ 旧式でエネルギー消費が顕著なエネルギー使用製品･設備、製造技術を対象とした淘汰制度を実施する。

⑤ 高エネルギー消費製品（生産中）に対し、単位製品あたりのエネルギー消費制限基準を適用する。

⑥ 工業、建築、交通運輸、公共機関などに関連する省エネ規定を明確化する。発展戦略を実施する」と明記し、国家政策とエネルギー発展戦略における省エネの重要性を明確化した。

[23] 中華人民共和国省エネルギー法 _ 中国人大網（npc.gov.cn）

(3) 省エネルギー技術革新の奨励

省エネ技術の性質を明確化し、「技術的に実行可能、経済的に合理的であり、かつ環境・社会的に許容可能な措置」を講じる。

① 中央財政と省級地方財政は、省エネ特別事業資金を創設し、省エネ技術の研究開発などを支援する。
② 電力、鉄鋼、非鉄金属、建材、石油加工、化学工業、石炭など、主要エネルギー消費業界の企業が有する省エネ技術の改造を重点的に促進する。
③ 熱電併給（コージェネレーション）、余熱余圧利用、クリーン・コール・テクノロジー、エネルギー使用の先進的監視制御など、製造企業がこれらの技術を採用することを奨励する。
④ 省エネ技術、省エネ製品の普及目録を公布し、税収優遇などの支援政策を実施する。
⑤ 財政補助を通じて、省エネ照明器具などの省エネ製品の普及と使用を支援する。
⑥ 税収などの政策を運用して、先進的省エネ技術・設備の輸入を奨励する。エネルギー消費が高く、製造過程における汚染度の高い製品の輸出を規制する。
⑦ 中国政府は省エネ製品認証証明書を取得した製品・設備を優先的に購入する。
⑧ 金融機関を指導して、省エネプロジェクトへの貸付支援を拡大する。
⑨ 省エネ科学研究の重大プロジェクトなどを発足・実施し、バイオマスエネルギー、太陽エネルギー、風力エネルギーなどの再生可能エネルギーの利用技術を普及させる。

2.1.2 再生可能エネルギー法（2005 年）

1990 年代以降、経済の急成長に伴い、エネルギー資源の不足、不合理な構造、深刻な環境汚染などの問題が日増しに顕在化し、石油の対外依存度は止まることを知らず、エネルギーの安全保障問題も徐々に浮彫となった。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、海洋エネルギーなど、再生可能エネルギーの開発利用の加速化は、中国のみならず、国際的な潮流となっている。再生可能エネルギー資源が非常に豊富な中国は､開発の大きな潜在力を持つといえる。長期的にみて、再生可能エネルギーの開発利用の加速化は、エネルギー構造の改善、生態環境の保護、エネルギーの安全保障にとって重要な意義がある。再生可能エネルギーの開発利用を推進し、現状の法律・政策上の障害を克服することを目的に、「中華人民共和国再生可能エネルギー法」が第 10 期全国人民代表大会常務委員会第 13 回会議、第 14 回会議の審議を経て、2005 年 2 月 28 日に可決され、翌年 1 月 1 日から施行された。

同法は、総則、資源調査と発展計画、産業指導と技術支援、普及と応用、価格管理と費用分担、経済的奨励と監督措置、法律責任、附則の全 8 章 33 条で構成されている。全体的にみて、「国家責任と社会全体の支持」「政府指導と市場運営」「今の需要と長期的発展」の 3 方面での互いの結びつきが立法の原則として反映されている。行政規制や市場への奨励措置を通じて、再生可能エネルギーが通常のエネルギーと公平に競争できる市場環境を創造するため、各種の経済主体を再生可能エネルギーの開発利用に積極的に参加させるよう誘導、奨励する。それは、中国の再生可能エネルギーの開発利用の歩みを効果的に加速化することにもつながっており、同法の重要な法制度は次の通りである。

(1) 再生可能エネルギーの総量目標制度

同法は、国務院エネルギー主管部門に対し、中国における再生可能エネルギーの開発利用に関する中長期総量目標を制定・公表する権限を授け、地方政府とともに、各行政区画における再生可能エネルギーの開発利用の中長期目標を確定し公表する。再生可能エネルギーの開発利用に関する計画は、中長期目標に基づい

て作成される。先に目標を設定してから計画を作成することで、計画作成の主たる目的が中長期目標の達成であることを明確にし、計画は総量目標制度を構成する一部となる。

(2) 再生可能エネルギーによる系統連系型発電の審査と全量買取制度

同法において中国国家は、再生可能エネルギーを利用した系統連系型発電（グリッド接続型発電）を奨励・支持するとしている。行政許可を取得あるいは出願した再生可能エネルギー系統連系型発電プロジェクトで発電される電力は、電力網企業が全て買い取ること、また電力網企業は系統連系の接続サービスを提供することについて規定されている。これは独占的地位にある電力網企業に対する法律義務で、現行の再生可能エネルギーが抱える系統連系の難しい問題を解決する助けとなる。また、再生可能エネルギー電力の規模化発展に欠かせない前提条件であり、再生可能エネルギー電力企業が生き残り、エネルギー市場での競争力を徐々に向上させるための重要な措置でもある。

(3) 再生可能エネルギーの電力価格と費用分担制度

同法では、風力発電、太陽光発電、小水力発電、バイオマス発電など、技術の種類と各地の状況に応じて、それぞれ異なる電力価格を規定している。価格決定の原則にもとづき、電力価格の基準は、各地区の平均発電コストに合理的な利潤を乗せて確定するものとする。この価格決定の仕組みにより、再生可能エネルギー発電の投資家たちは、比較的安定的かつ合理的なリターンを得られるため、彼らを再生可能エネルギー発電分野の投資へと誘導することができる。全体的にみて、再生可能エネルギー発電の電力の買取価格が、通常のエネルギーの平均買取価格を上回る場合、その差額分は消費者への電力販売価格に分配して上乗せされるが、具体的な措置は国務院価格主管部門によって制定される。

(4) 財政による奨励措置

再生可能エネルギーの開発利用にかかる投資コストが現段階で比較的高いことを考慮すると、技術開発と市場形成の加速化には、やはり国家による支援が必要である。そこで同法では、再生可能エネルギー発展特別事業資金の設立、再生可能エネルギー開発利用プロジェクトに対する利子補給の優遇貸付措置、再生可能エネルギー産業発展指導目録に組み込まれたプロジェクトに対する税制優遇などの財政支援措置について、それぞれ規定している。

2.1.3 エネルギー法（意見募集稿）（2020 年）

「中華人民共和国エネルギー法」は、中国のエネルギー分野における綱領的法律で、「エネルギー憲法」とも呼ばれている。その中核となる目的は、中国のエネルギー管理を法治化の軌道に乗せることである。中国のエネルギーに関する法体系には基本法が欠如していたが、同法の公布はそれを補うことになる。エネルギー分野の単行法の制定・改正に対して法的根拠を提供するだけでなく、エネルギー単行法同士、またはエネルギー単行法とほかの法律との間を調整し、統一する助けとなる。そして、国家による強制力を基盤に、エネルギー戦略の実施やエネルギー経済の安全保障を得ることができる。

1980 年代初期、国務院は国家エネルギー委員会を設立し、「エネルギー法研究プロジェクトチーム」を結成した。エネルギー法の法体系の枠組みに関する研究を通じて、エネルギー業界が共同で遵守する総合的な法規範の制定が期待されたものの、エネルギーの行政管理の分散化が進み、エネルギーの立法はほぼ棚上げ状態となった。2005 年までこの状態は続いたが、当時中国国家発展改革委員会に所属していた元エネルギー

局による提言と推進の下、2006年初めに「エネルギー法」の起草作業が再開した。翌年2月1日、「エネルギー法（意見募集稿）」が公布され、一般社会に向けた意見募集（パブリックコメント）が行われ、その後も継続して研究と起草が繰り返されている。

2014年6月13日、習近平国家主席は中央財経指導チーム第6回会議において、「四つの革命、一つの協力」というエネルギー安全保障の新戦略を打ち出した。これは、中国のエネルギー業界の発展を牽引し、新しい時代へと移行させる。この新戦略を貫徹するため、エネルギー管理システムの健全化・完備化、エネルギー管理能力の現代化を行い、エネルギーの高品質発展を促進する。2017年からは、国務院法制弁公室と司法部の指導の下、国家発展改革委員会と国家エネルギー局は、専門家グループと作業専門チームを結成し、「中華人民共和国エネルギー法（送審稿）」の改正稿にさらなる改正・整備を行い、新しい「中華人民共和国エネルギー法（意見募集稿）」を作り上げた。2020年4月10日、国家エネルギー局により、「中華人民共和国エネルギー法（意見募集稿）」に関する意見募集の公告が公開された。

今回の「エネルギー法（意見募集稿）」は全11章117条で構成される。エネルギー戦略と計画、エネルギー開発と加工・転換、エネルギー供給と使用、エネルギー市場、エネルギー安全保障、科学技術の進歩、国際提携、管理監督、法律責任などを網羅し、適用範囲、戦略と体制、構造の最適化などを規定している。主な内容は次の通りである。

(1)「エネルギーの市場化」発展の方向性を提起

意見募集稿は、総則の中で「エネルギーの市場化」の原則を明確に打ち出し、競争が有効に行われる市場の構造と仕組みを構築し、競争的分野において、主として市場によってエネルギー価格が決定される仕組みの形成を求めている。また、第5章「エネルギー市場」の中で、市場主体、市場体系、価格メカニズム、市場管理監督などのエネルギー市場要素について、専門的かつ詳細に規定している。これは、法律という形式を通じて「エネルギーの市場化」が認められ、エネルギー分野の計画と市場との間の論争に終止符が打たれたことを意味し、エネルギー市場化改革のさらなる深化のための基礎を築く。

(2) エネルギーの普遍的サービスとその補償原則を重視

エネルギーは国家の経済と人民の生活に関わる。国民一人ひとりが基本的なエネルギー供給およびサービスを受けられるよう保障するため、エネルギー関連サービスはその普遍的サービスの原則を重視する必要がある。意見募集稿では、電力などのエネルギー供給を請け負う企業は、国家の関連規定にもとづき、相応の普遍的サービスの義務を履行しなければならないと提起している。エネルギーの普遍的サービスを補償する具体的方法は、国務院エネルギー主管部門が、財政部門、価格主管部門などの関係部門と共同で制定し、国務院の承認を得たのちに公布し、施行する。

(3) 化石燃料・非化石燃料の関係性を協調化

意見募集稿はエネルギー構造の最適化を明確に打ち出している。化石燃料に関する項目には、「合理的開発」「クリーンで効率的な利用」「低炭素発展」というような控えめの表現を使用し、規制などのネガティブな内容にははっきりと言及していない。非化石燃料に関する項目には、「発展の加速」「比率の向上」「開発支援」といったポジティブな内容を提起し、再生可能エネルギーの消費管理保障制度、企業の保障義務を具体的に細分化して示している。化石燃料と非化石燃料の関係性は、どちらが上でどちらが下という対立関係でなく、一方が良いとされれば、もう一方はそれを上回ろうとする協調性・統一性のある関係とする。

(4) エネルギー安全保障戦略を国家戦略へ導入

国家はエネルギーの安全保障を統制・調整し、エネルギー安全保障戦略を国家の安全保障戦略に組入れる方針を打ち出している。また、第 6 章「エネルギー安全保障」では、エネルギー施設と場所の安全保護、ネットワークと情報セキュリティ、エネルギー備蓄、予測・早期警報、緊急時対応制度を詳細に規定し、エネルギー安全保障能力を全面的に高めるとする。

2.2 中央政府の主要政策

2.2.1 国家レベルの主要政策の分析

2021 年 3 月に開催された全国両会（全国人民代表大会・全国人民政治協商会議）において、「中華人民共和国国民経済・社会発展第 14 次 5 カ年計画及び 2035 年遠景目標綱要」（以下「第 14 次 5 カ年計画」とする）[24]が公布された。これは中国の社会主義現代国家の全面的建設へ向かう新たな道を開くための壮大な青写真を描き、2035 年の社会主義現代化の基本的な実現に向けた道しるべとなる。5 年前の 2016 年 3 月に公布された「中華人民共和国国民経済・社会発展第 13 次 5 カ年計画綱要」（以下「第 13 次 5 カ年計画」とする）と比較すると、中国の発展情勢はますます複雑に入り組んできたにもかかわらず、第 14 次 5 カ年計画綱要では、中国の国家戦略の意図が非常に明確で、政府活動の重点も明瞭かつ秩序的に示されている。さらに、今後 5 年ないし 15 年の発展目標に対する確固たる実施方策が盛り込まれている。

(1)「社会主義現代化国家の全面的建設」の実現、経済成長とグリーン発展の同時並行推進に注力する戦略目標とその発展段階

第 13 次 5 カ年計画と比較すると、第 14 次 5 カ年計画綱要は、中国の近代化の重要性をより重視し、中国が社会主義現代化国家の全面的建設へ向かう新たな道につくことを明確にしている。第 14 次 5 カ年計画期間の趣旨は、社会主義近代化国家の全面的建設に向けて、有利となる局面を切り開き、良いスタートを切ることにある。経済発展、政治発展、文化発展、社会発展、エコ文明発展に関する全体的な計画を統一して推し進め、社会主義近代化国家の全面的建設の推進と調和させる。経済発展の近代化のニーズに応えなければならないが、グリーンで持続可能な現代化の道も堅持する必要があることを強調している。「エコ文明建設における新たな進歩の実現」を、第 14 次 5 カ年計画期間の経済社会発展の主要目標に定めることを明確にし、GDP（国内総生産）あたりのエネルギー消費量、CO_2（二酸化炭素）排出量をそれぞれ 13.5%、18% 引き下げるという発展目標を打ち出した。

第 13 次 5 カ年計画期間中、各級政府は小康社会の全面的建設の完成という目標のもと、未曾有の経済成長のプレッシャーに直面していた。そのため、グリーン発展戦略は適度なスピードで、経済成長と歩調を合わせながら着実に前進していたものの、実際には経済の発展が優先されていた。2020 年 9 月、習近平国家主席は国連総会で、「中国は国としての自主的貢献度を高め、より強力な政策と措置を講じ、2030 年までに CO_2 排出量をピークアウトさせ、2060 年までにカーボンニュートラル（炭素中立）を実現することを目指す」と宣言した。第 14 次 5 カ年計画綱要に、「CO_2 排出量ピークアウト」と「カーボンニュートラル」という 2 大目標の行動計画が盛り込まれた (表 2-1)。

[24]（両会が権限を受けて公布）中華人民共和国国民経済・社会発展第 14 次 5 カ年計画及び 2035 年遠景目標綱要（xinhuanet.com）

今の中国には、この2つの目標を達成する決意があるだけでなく、達成するための基盤もある。すでに「全面的小康」はほぼ実現し、経済基盤も充足しており、2010年には世界第2位の経済国へと成長した。これに加え、2020年に突然発生した新型コロナウイルス感染症により、経済データはもはや社会の発展を判断する唯一の参考基準ではなくなり、グリーン発展の重要性が一層高まってきている。第14次5カ年計画綱要の第11編のテーマは、「グリーン発展の推進、人と自然の調和的共生の促進」である。この理念を貫き通すことは、経済成長とグリーン発展の同時並行推進を意味する。「国内大循環」の角度からいえば、経済成長がグリーン発展を成し遂げ、グリーン発展が経済成長を牽引しなければならないのである。

(2) エネルギーシステムの全面的発展を促進する具体的措置

① 現代エネルギーシステムの構築、クリーンエネルギーと原子力発電の発展へのさらなる重視

第14次5カ年計画は、第13次5カ年計画の中の「現代エネルギーシステムの構築」に関わる核心的な内容を保持している。文字数こそ減少したものの、発展の全体的な方向性に変化はなく、むしろより重きが置かれている。非化石燃料の開発の加速化、集中型と分散型の同時並行推進の堅持、多エネルギー相互補完型のクリーンエネルギー基地の建設を掲げ、総エネルギー消費量に占める非化石燃料の割合を約20%に引き上げるという。「現代エネルギーシステム構築プロジェクト」は、「大型クリーンエネルギー基地」と「沿岸原子力発電」が比較的上位の重要な位置をキープしており、中国のカーボンニュートラルの重要目標と呼応している。クリーンエネルギーの消費管理と貯蔵能力、遠隔地域への送配電能力を向上させ、石炭火力発電の柔軟化を推し進め、揚水発電所の建設と新型エネルギー貯蔵技術の規模化応用を加速化する。

② 技術革新駆動型発展の堅持、技術のエネルギー産業に対する牽引力の向上、戦略的新興産業の壮大な発展

第14次5カ年計画は、依然として科学技術革新を非常に重視している。エネルギー技術革新を積極的に促進し、現代エネルギーシステムなどの重大イノベーション分野にフォーカスした国家実験室を設立すると言及した。同時に、技術革新の産業に対する牽引力についても一層強調している。

電力設備や新エネルギーという分野において、産業チェーン全体の競争力を揺るぎないものに向上させるため、将来的な産業変革の方向性に一致する完成品を手始めに、戦略的かつ包括的な産業チェーンの構築に着手する。また、新エネルギー、新エネルギー自動車、グリーン・環境保護などの戦略的新興産業に照準を定め、重要なコア技術の革新と応用を加速、資源供給の保障を強化する。壮大な発展を成し遂げるための新たな原動力となるビジネスを育て、産業体系の新しい柱を構築する。一方、水素エネルギーやエネルギー貯蔵などの最先端科学技術と産業変革の分野では、未来産業のインキュベートとその加速計画、一連の未来産業の配置計画を作成するなど、将来を見据えた産業づくりを画策する。その一方で、デジタル化の発展目標に溶け込ませ、5Gベースの応用シーンと産業エコシステムを構築し、スマートエネルギーなどの重点分野で応用モデルの試行を展開する。

③ エネルギー貯蔵技術への高度な重視

エネルギー貯蔵技術とは、新型電力システムを構築することであり、「CO_2排出量ピークアウト」、「カーボンニュートラル」の2大目標を達成するキーテクノロジーのひとつである。第14次5カ年計画では、前後して何度もエネルギー貯蔵技術に言及し、「揚水発電所の建設、新型エネルギー貯蔵技術の大規模応用の加速化」を明確に提起している。

表 2-1　中国の第 13 次 5 カ年計画と第 14 次 5 カ年計画の比較

比較項目	第13次5カ年計画	第14次5カ年計画
発展段階	「第1編のはじめに」：小康社会の全面的建設の最終段階。	「第1編のテーマ」：社会主義現代化国家の全面的建設へ向かう新たな道につく段階。
マクロ的発展目標	「第1編のはじめに」：小康社会の全面的建設の完成を確実に保証する。	「第1編第2章第1節」：社会主義近代化国家の全面的建設に向けて、有利となる局面を切り開き、良いスタートを切る。
エコ建設目標	「第1編第3章」：生態環境の質を全体的に改善する。CO_2総排出量を効果的に抑制する。	「第1編第3章第2節」：エコ文明建設における新たな進歩の実現。単位GDPあたりのエネルギー消費量、CO_2排出量をそれぞれ13.5%、18%引き下げる。
現代エネルギーシステムの構築	「第7編第30章のテーマ」	「第3編第11章第3節のテーマ」
エネルギー重大プロジェクト(専欄)	「第7編第30章第2節の専欄11」：スマート電力システム、石炭火力発電、再生可能エネルギー、原子力発電、非在来型石油・天然ガス、エネルギー輸送ルート、エネルギー備蓄施設、エネルギーの基幹技術・設備	「第3編第11章第3節の専欄6」：クリーンエネルギー、原子力発電、電力対外輸送ルート、電力システムの調整、石油・天然ガスの貯蔵・輸送能力
エネルギー貯蔵技術	「第5編第23章第1節」：高効率エネルギー貯蔵と分散型エネルギーシステムを大いに推進する。	「第3編第9章第2節」:水素エネルギーやエネルギー貯蔵などの最先端科学技術と産業変革の分野で、未来産業のインキュベートとその加速計画、一連の未来産業の配置計画を作成する。揚水発電所の建設、新型エネルギー貯蔵技術の規模化応用を加速化する。

出典：第 13 次 5 カ年計画[25], 第 14 次 5 カ年計画[26]

[25] http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm
[26] http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm

2.2.2 省庁レベルの主要政策の分析

(1)「エネルギー技術革命イノベーション行動計画（2016 ～ 2030 年）」（国家発展改革委員会、国家エネルギー局）[27]

2016 年 6 月、国家発展改革委員会と国家エネルギー局は共同で、「エネルギー技術革命イノベーション行動計画（2016 ～ 2030 年）」（以下、「イノベーション行動計画」とする）を公布し、2016 ～ 2030 年の間に、次の 15 分野のエネルギー技術において、技術的ブレイクスルー（技術突破、飛躍的前進）を達成する方針を打ち出した。

① 石炭無害化採掘技術
② 非在来型油ガス、深層・深海石油ガス開発技術
③ 高効率クリーン・コール・テクノロジー
④ CO_2 回収・利用・貯留技術
⑤ 先進的原子力技術
⑥ 使用済み核燃料処理技術、高放射性廃棄物安全処理技術
⑦ 高効率太陽エネルギー利用技術
⑧ 大型風力発電技術
⑨ 水素エネルギーと燃料電池技術
⑩ バイオマス・海洋・地熱エネルギー利用技術
⑪ 高効率ガスタービン技術
⑫ 先進的エネルギー貯蔵技術
⑬ 現代電力グリッド（電力網）のキーテクノロジー
⑭ エネルギーインターネット技術
⑮ 省エネ・エネルギー効率向上技術

イノベーション行動計画は 2020 年までの目標として、エネルギーの自主イノベーション能力の大幅な向上、一連のキーテクノロジーのブレイクスルー、エネルギー技術の設備や基幹部品・材料の対外依存度の大幅な引き下げ、エネルギー産業の国際競争力の顕著な向上、エネルギー技術イノベーション体系の基本構築を掲げている。そして 2030 年までには、エネルギーの自主イノベーション能力の全面的向上、国情に適した整ったエネルギー技術イノベーション体系の完成、エネルギー技術の全体水準を国際先進レベルに引き上げること、エネルギー産業と生態環境の調和のとれた持続可能な発展を支えること、世界のエネルギー技術強国の仲間入りを果たすことを目標としている。

その中で、「先進的エネルギー貯蔵技術イノベーション」という重点任務について、太陽熱利用の高効率な高温蓄熱技術、分散型エネルギーシステムの大容量蓄熱（冷）技術、電力網のピークシフト効率化や地域のエネルギー供給への応用に向けた物理的エネルギー貯蔵技術、再生可能エネルギーの系統連系型･分散型･マイクログリッド･電気自動車への応用に向けたエネルギー貯蔵技術などの研究に言及している。エネルギー貯蔵技術の各段階における重要なコア技術を確立し、モデル検証を完了させ、技術の全体水準を世界トップレベルまで引き上げ、世界のエネルギー貯蔵技術と産業発展をリードする。また、高密度で低保温コストの

[27] 国家発展改革委員会、国家エネルギー局による「エネルギー技術革命イノベーション行動計画（2016 ～ 2030 年）」の通達―国家エネルギー局（nea.gov.cn）

エネルギー貯蔵技術、新概念のエネルギー貯蔵技術（液体電池、マグネシウム電池など）、超伝導磁気・電気化学をベースとする多機能新型ハイブリッドエネルギー貯蔵技術において、積極的な模索と研究を重ねてブレイクスルーを目指す。

イノベーション行動計画では、「蓄熱蓄冷」「物理的エネルギー貯蔵」「化学的エネルギー貯蔵」の3つを、先進的エネルギー貯蔵技術イノベーションの戦略の方向性としている。2020年には、高温蓄熱の材料スクリーニングと装置設計技術、圧縮空気エネルギー貯蔵のキーパーツ設計・製造技術、化学的エネルギー貯蔵のコア技術（各種新材料の調製、エネルギー貯蔵システムインテグレーション、エネルギー管理など）において、ブレイクスルーの達成を目指す。また、超臨界圧縮空気エネルギー貯蔵システム（1万kW/10万kWh）、フライホイールエネルギー貯蔵アレイユニット（1000kW/1000MJ）、全バナジウムレドックスフロー電池エネルギー貯蔵システム（10万kW級）、ナトリウム硫黄電池エネルギー貯蔵システム（1万kW級）、リチウムイオン電池エネルギー貯蔵システム（10万kW級）など、成熟しつつあるエネルギー貯蔵技術を試験的に普及させる。

2030年には、戦略の方向性として重点を置いている先進的エネルギー貯蔵技術を全面的に確立する。さまざまな規模でモデル検証を行うと同時に、エネルギー貯蔵技術の比較的整った標準体系、完備した産業チェーンを構築する。エネルギー貯蔵技術の大部分を適用分野にて全面的に普及させ、技術の全体水準が国際先進レベルに追いつき、追い越すという目標を達成する。さらに、2050年の展望として、新しい材料・方法の積極的な模索、優位性のある先進的エネルギー貯蔵技術の蓄積を掲げ、高密度で低保温コストの熱化学的エネルギー貯蔵技術、新概念の電気化学的エネルギー貯蔵技術（液体電池、マグネシウム電池など）、超伝導磁気・電気化学をベースとする多機能新型ハイブリッドエネルギー貯蔵技術において、ブレイクスルーを遂げ、材料・装置・システムなどの各段階におけるコア技術の完全な確立を目指す。エネルギー貯蔵技術体系の全面的な構築を完成させ、その全体水準を世界トップレベルまで引き上げ、世界のエネルギー貯蔵技術と産業発展をリードする。

(2)「エネルギー生産と消費革命戦略（2016～2030年）」（国家発展改革委員会、国家エネルギー局）

2016年12月、国家発展改革委員会と国家エネルギー局は共同で、「エネルギー生産と消費革命戦略（2016～2030年）」を公布した。これは中国のエネルギー革命に対して、今後15年にわたる全面的な戦略的配置を行うもので、現実的意義と長期的意義の両側面に重要性がある。

中国のエネルギー発展は、総量の拡大から品質と効率を向上させる発展へと転換する新たな段階に入っていると同戦略は指摘している。これは供給側構造改革と経済の高品質発展への需要を反映しており、資源・環境制約からの解放、大気・水質汚染の改善、エコ文明建設の推進、気候変動への積極的対応を通じて、長期的かつ持続可能な発展の実現が求められていることを意味する。さらに、エネルギー公共サービスが増加し、全人民に恩恵がもたらされるような現代化国家の建設の加速化への期待の表れでもある。すでに公布されている「エネルギー発展『第13次5カ年計画』」[28]を基礎とし、同戦略はさらに進んだエネルギー革命の目標を打ち出した。

2030年の目標として、再生可能エネルギー・天然ガス・原子力エネルギーの利用を継続的に増加し、高炭素・化石燃料の利用を大幅に低減することを掲げている。総エネルギー消費量に占める割合を、非化石燃料は20%前後、天然ガスは15%以上に引き上げるとしており、すなわち、低炭素エネルギーとしての割合は35%を上回るようにしている。新エネルギーの需要を満たすには、主として低炭素エネルギーやクリーンエネルギーに頼るところとなる。化石燃料のクリーンで効率的な利用を促進し、2030年前後、あるいはそれより早期にCO_2排出量をピークアウトさせることを目指す。実際、単位GDPあたりのエネルギー消費量は、現時点ですでに世界平均水準に到達している（2015年の中国の単位GDPあたりのエネルギー消費量

[28] http://www.nea.gov.cn/135989417_14846217874961n.pdf

は世界平均水準の 1.5 倍)。エネルギー科学技術の水準も世界上位に入るレベルである。そして、2050 年の展望としては、「総エネルギー消費量を基本的に安定させ、非化石燃料の占める割合を半分以上にする」ことを目指し、グリーン・低炭素・高効率という現代化したエネルギーシステムを完成させる。

同戦略は、エネルギー供給革命を「クリーンかつ低炭素化の新システムの構築」と総括している。具体的な戦略として、分散型天然ガスや分散型再生可能エネルギーを中心とするエネルギーの利用方法を推進する。さらに、「インターネット＋(互聯網＋)」によるスマートエネルギーネットワークを全面的に構築することで、エネルギーと現代情報テクノロジーの高度な融合を促進する。また、新規エネルギー、エネルギー貯蔵、フレキシブルネットワークやマイクログリッドなどの技術に頼ることで、分散型エネルギーを効率的かつ柔軟に接続できるようになり、生産と消費の一体化を実現する。「電源・電力ネットワーク・負荷・貯蔵・使用（源－網－荷－儲－用)」の一体化を促進し、統合型・相互補完型のエネルギーインターネットを構築する。

関連技術のイノベーションの促進に関しては、スマートエネルギー技術の高度化に力を入れる方針を打ち出している。分散型エネルギー技術、先進的なグリッド（電力網）技術、エネルギー貯蔵技術とインターネットとの高度な融合を促進する。なかでも、エネルギー貯蔵技術については、可変速揚水エネルギー貯蔵技術の進化、フライホイール、高パラメータ高温蓄熱、相転移、新型圧縮空気などの物理的エネルギー貯蔵技術の研究開発と応用、高性能燃料電池や電気二重層コンデンサ（スーパーキャパシタ）などの化学的エネルギー貯蔵技術の進化に力を入れるという。また一方で、プラグアンドプレイ（PnP）や柔軟性の高いトランザクションに適応する分散型エネルギー貯蔵設備の研究と開発を行う。

(3)「エネルギー貯蔵技術及び産業発展の推進に関する指導意見」（国家発展改革委員会）

2017 年 10 月、国家発展改革委員会や国家エネルギー局など 5 部門は共同で、「エネルギー貯蔵技術及び産業発展の推進に関する指導意見」[29]（以下「指導意見」とする）を公布し、中国のエネルギー貯蔵技術と産業発展を促進する重要な意義、全体要求、重点課題、保障措置を明確化した。指導意見では、スマートグリッドや再生可能エネルギーの割合が高いエネルギーシステム、「インターネット＋」によるスマートエネルギーにとって、エネルギー貯蔵はその重要な構成要素であり、それを支えるキーテクノロジーであると指摘している。また、従来の電力システムの柔軟性・経済性・安全性を向上する重要な手段であり、化石燃料から再生可能エネルギーへ主要エネルギーの交替を促すキーテクノロジーでもある。さらに、エネルギーインターネットの構築、電力体制改革の推進、エネルギー新業態の発展促進における核心的な基礎である。ここ数年、中国のエネルギー貯蔵は多元的発展の良好な姿勢を呈しており、全体的にみて、産業化の基盤をほぼ築いているといえる。

指導意見では、エネルギー産業の全局、長期的発展のニーズに着目し、エネルギー貯蔵技術と産業発展の促進を重視している。メカニズムのブレイクスルー（飛躍的進展）に重点を置き、技術革新を基盤に、応用モデルを手段とし、「インターネット＋」のスマートエネルギーを大いに発展させる。エネルギー貯蔵技術設備の研究開発モデルをはじめ、エネルギー貯蔵による再生可能エネルギーの利用率上昇の応用モデル、エネルギー電力システムの柔軟性・安定性向上の応用モデル、エネルギー使用のスマート化向上の応用モデル、そして、エネルギー貯蔵の多元化応用で支えるエネルギーインターネット応用モデルなど、これらの重点課題の推進に注力しなければならないとする。「クリーンかつ低炭素化、安全かつ高効率」を目指す現代エネルギー産業を体系化するため、中国のエネルギー業界における供給側構造改革、エネルギー生産・利用方式改革を推進して新たな貢献をする。同時に、産業チェーンにおいても、材料調製からシステムインテグレーションまでの全体的な発展を牽引し、産業発展の水準向上、経済社会の発展推進へ新たな原動力を提供する。

[29] http://www.nea.gov.cn/2017-10/11/c_136672015.htm

また、各種関係機関に対し、「政府の指導、企業の参与」「イノベーションの牽引、モデルの先行」「市場の主導、改革の後押し」「統一的計画、協調的発展」という基本原則にもとづき、組織・統率の強化、政策・法規の整備、応用モデルの試行、補償の仕組みの構築、社会投資の誘導、市場改革の促進などの措置を通じて、エネルギー貯蔵技術と産業発展を的確に促進しなければならないと求めている。

第13次5カ年計画期間中の実施計画には、さまざまな種類の技術と応用例からなる応用モデル試行プロジェクトの発足、重要なキーテクノロジーとコア設備の研究開発、エネルギー貯蔵の重点技術の標準化・規格化、普及可能なビジネスモデルの模索、競争力のある市場主体の育成などが盛り込まれている。エネルギー貯蔵産業を商業化初期の発展段階に入るよう促進し、エネルギーシステムの構造転換において、エネルギー貯蔵の重要な役割がその姿を現し始めた。一方、第14次5カ年計画期間中の実施計画では、比較的整った産業体系の構築、世界トップレベルのエネルギー貯蔵のキーテクノロジー・コア設備の全面確立、比較的完備した技術・標準体系の構築、国際競争力のある市場主体の形成、電力・エネルギー市場にもとづく多種のエネルギー貯蔵ビジネスモデルのスピード成長、エネルギー貯蔵産業の大規模開発などを掲げている。エネルギー変革やエネルギーインターネットの発展を促進する上で、エネルギー貯蔵の役割が全面的に浮かび上がってきた。

指導意見の遂行に向けて、2019年6月25日、国家発展改革委員会、科学技術部、工業情報化部、国家エネルギー局の4部門は共同で、「『エネルギー貯蔵技術及び産業発展の推進に関する指導意見』を遂行する2019～2020年行動計画」[30]を制定した。次の6項目において、4部門のおもな機能と具体的な役割分担を明確化している。

① 先進的エネルギー貯蔵技術の研究開発の強化、スマート製造のアップデートの強化
② エネルギー貯蔵技術と産業発展を促進する政策の完備、実行
③ 揚水エネルギー貯蔵の発展の推進
④ エネルギー貯蔵プロジェクトの応用モデルの推進
⑤ 新エネルギー自動車用動力電池へのエネルギー貯蔵化応用の推進
⑥ エネルギー貯蔵の標準化の推進加速化

(4)「新型エネルギー貯蔵発展の推進加速に関する指導意見」（国家発展改革委員会、国家エネルギー局）

2021年7月23日、国家発展改革委員会と国家エネルギー局は、「新型エネルギー貯蔵発展の推進加速に関する指導意見」[31]を公布し、エネルギー貯蔵技術の多元化を堅持する方針を打ち出した。リチウムイオン電池などの比較的成熟した新型エネルギー貯蔵技術の継続的なコスト削減、商業化に向けた応用を促進する。また、圧縮空気やレドックスフロー電池などの長期エネルギー貯蔵技術（LDES）は、商業化初期の発展段階に入り、フライホイールエネルギー貯蔵やナトリウムイオン電池などの技術は、モデル試行の大規模展開を加速化する。需要を見据えて、水素貯蔵や蓄熱、およびその他の革新的エネルギー貯蔵技術の研究と試行運用を模索するといった内容である。

指導意見では、エネルギー貯蔵の特別事業計画を統一的に展開するため、次の3つを提起している。第一に、各地区の規模と事業の配置を行い、関連計画との整合性を的確に図る。第二に、送電網側（発電設備側）のエネルギー貯蔵配置の合理化を積極的に促進する。要となるノードを介して送電網側のエネルギー貯蔵を配置し、大規模・高割合の新エネルギーを接続した後のエネルギーシステムの柔軟な調整能力と安全性・安定性の水準を向上させる。第三に、ユーザー側のエネルギー貯蔵の多元化発展を積極的に支持する。分散型新エネルギー、マイクログリッド、ビッグデータセンター、5G基地局、充電設備、インダストリアル・パークなどの

[30] http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-07/01/5457986/files/cd749b80b90a452590406bdf1e544912.pdf
[31] http://www.sanmen.gov.cn/art/2021/8/5/art_1229323656_3727153.html

他のエンドユーザーを巡り、エネルギー貯蔵との融合発展から生まれる新たな応用例の模索を奨励する。

その一方で、指導意見の主な目標として、2025 年をめどに、新型エネルギー貯蔵の商業化初期から大規模発展への移行を実現することを掲げている。新型エネルギー貯蔵技術のイノベーション能力、コア技術設備の自律制御水準を大幅に向上させ、高安全・低コスト・高信頼性・長寿命などの面において短期間で飛躍的な進歩を遂げる。標準体系をほぼ整備し、産業体系も日増しに完全なものにする。市場環境とビジネスモデルはおおむね成熟し、設備容量は 3000 万 kW 以上に達する。エネルギー分野の CO_2 排出量ピークアウト、カーボンニュートラルを推進する上で、新型エネルギー貯蔵は目覚ましい作用を発揮する。そして、2030 年をめどに、新型エネルギー貯蔵の全面的な市場化発展を実現すると掲げている。新型エネルギー貯蔵のコア技術設備は自律制御を可能にし、技術革新と産業水準は世界トップクラスの地位につく。標準体系、市場メカニズム、ビジネスモデルは成熟化・健全化し、電力システムの各段階と高度な融合発展を遂げる。設備容量は新型電力システムに相応する需要量をほぼ満たす。新型エネルギー貯蔵はエネルギー分野の CO_2 排出量ピークアウト、カーボンニュートラルを達成するための重要な柱のひとつとなる。

(5)「国家工業省エネルギー技術推薦目録（2021 年）」（工業情報化部）

2021 年 12 月 9 日、工業情報化部は「国家工業省エネルギー技術推薦目録（2021）」[32]を公布した。同目録には、鉄鋼業界、非鉄金属業界、建材業界、石油・化学業界、エネルギー貯蔵、再生可能エネルギー、スマートエネルギー管理、余熱余圧利用などエネルギー効率を高める省エネ技術、8 種類合計 69 件が組み込まれている。そのうち、エネルギー貯蔵と再生可能エネルギーに関するものは、主に次の 6 種類である。

① 高電圧・高出力の固体電気蓄熱炉プラント

あらかじめ設定された送電網のオフピーク時間、あるいは風力発電の発電停止時間帯に、自動制御システムで高圧スイッチギア（開閉装置）をオンにする。66kV の高圧送電網から高電圧発熱体に電力が供給され、高電圧発熱体は電気エネルギーを熱エネルギーに変換しながら、高温蓄熱室に絶えず吸収される。高温蓄熱室の温度が設定温度の上限に達した時、あるいは送電網のオフピーク時間が終了した時、自動制御システムは高圧スイッチギアをオフにし、高圧送電網からの電力供給は停止され、高電圧発熱体の動作が停止する。高温蓄熱室と高温熱交換器の間には熱出力制御装置があり、高温熱交換器は高温蓄熱室に蓄えられた高温熱エネルギーを熱水・熱風・蒸気などに変換して出力する。この技術は、エネルギー貯蔵のピークシフト、クリーン熱供給の分野に適用できる。

現在の普及率：15%、2024 年までの予測普及率：30%

② フライホイールエネルギー貯蔵による発電機の電力補償と省エネ技術

フライホイールエネルギー貯蔵装置を直流母線に並列接続し、負荷がエネルギーを放出すると、負荷の重力による位置エネルギーは、パワーエレクトロニクス装置を通じて、フライホイールの運動エネルギーに変換して貯蔵することができる。負荷のエネルギー消費が上昇すると、フライホイールは高出力かつ迅速にエネルギーを放出し、発電機の電力の出力不足を補い、ディーゼル発電機はスムーズに出力できるようになる。こうしてシステムの余剰エネルギーを利用することで、ディーゼル発電機の設備容量を低減し、ディーゼル燃料の消耗を抑え、省エネ効果の増強という目的を達成する。この技術は、発電機の電力補償の省エネ技術革新に適用できる。

現在の普及率：1% 以下、2024 年までの予測普及率：2%

[32] 中華人民共和国工業情報化部公告（miit.gov.cn）

③ ユーザー側分散型スマートエネルギー貯蔵のキーテクノロジー

高効率・長寿命のリン酸鉄リチウム電池を中核に、バッテリー管理システム（BMS）、分散型エネルギー管理システム（EMS）、自動消火システム（AFS）を基盤とし、エネルギー貯蔵インバータ（PCS）、IPSCP クラウドプラットフォームと合わせて、「リアルタイム監視、双方向通信、スマート制御」のスマートエネルギー貯蔵システムを構築する。各分散型エネルギー貯蔵設備は、4G 移動通信ネットワークを介して、IPSCP クラウドプラットフォームとリアルタイムで接続する。クラウドプラットフォームはデータの収集・分析・保存などの機能を確立し、アプリを通じて表示する。この技術は、エネルギー情報化の技術革新に適用できる。

現在の普及率：1% 以下、2024 年までの予測普及率：20%

④ 時分割で実現する周波数制御と電力品質管理技術

時分割（タイムシェアリング）で周波数制御と電力品質管理を行える技術で、高圧周波数変換器プラットフォームをベースに開発する。周波数変換と無効電力補償の 2 種類の動作モードを備え、その場のニーズに応じて動作を遂行し、モーターに対する周波数制御、電力網に対する無効電力補償の両方を実現する。この技術は、モーターの周波数制御の省エネ技術革新に適用できる。

現在の普及率：1% 以下、2024 年までの予測普及率：20%

⑤ 新エネルギーの接続に向けた高効率電力品質管理装置

同期符号化スイッチ技術を採用して、ゼロクロス点（電圧がゼロを通過すること）で自動的に切り替わるコンデンサを設計し、電圧の低い配電エリアに応用する。高調波補償、無効電力、三相平衡の調節を通じて、線路損失と変圧器損耗の低減という目的を達成し、電力品質と給電品質が向上する。この技術は、風力発電や太陽光発電などの新エネルギーを利用したマイクログリッドシステム分野に適用できる。

現在の普及率：2%、2024 年までの予測普及率：5%

⑥ 電気集塵機（ESP）の新型省エネ高周波・高圧給電と制御技術

三相の商業電源周波数を整流して直流電流を生成し、インバータ回路により高周波交流電流を生成、そして再度昇圧・整流した後、高周波脈動電流を生成して集塵器に供給する。これにより、動作周波数は 20 ～ 50kHz、集塵効率は 99.99% を達成できる。また、IGBT とインバータ回路を通じて、動的無効電力補償、高調波除去を行うことで、電力網の力率は 0.98 以上に上昇し、既存電源のエネルギー消費を大幅に低減できる。この技術は、静電式電気集塵機の省エネ改造に適用できる。

現在の普及率：35%、2024 年までの予測普及率：55%

(6) 国家重点研究開発計画「エネルギー貯蔵とスマートグリッド技術」重点特別プロジェクト

2021 年 12 月 9 日、科学技術部により、国家重点研究開発計画「エネルギー貯蔵とスマートグリッド技術」重点特別プロジェクトの「2021 年度立案予定プロジェクト公示リスト」[33]が公布された。その中、エネルギー貯蔵に関わる技術は、プロジェクトの実施期間はいずれも 3 ～ 4 年、以下に示す計 8 件に上る (図 2-1)。

① GWh 級リチウムイオン電池エネルギー貯蔵システム技術（基盤キーテクノロジー）

主導企業：寧徳時代新能源科技股份有限公司（CATL）

[33] http://www.ncsti.gov.cn/kjdt/tzgg/202112/P020211209618603048649.pdf

技術要件：MWh 級リチウムイオン電池エネルギー貯蔵システム（単セル）のサイクル寿命 ≥15000 回、耐用年数（想定）≥25 年、リチウムイオン電池エネルギー貯蔵システムの出力容量 ≥1GWh、同等のエネルギー効率での電力コスト ≤0.1 元 /kWh

② MWh 級本質安全固体リチウムイオンエネルギー貯蔵式電池技術（基盤キーテクノロジー）

主導企業：天津栄盛盟固利新能源科技有限公司

技術指標：電池（単セル）のサイクル寿命 ≥15000 回、10MWh 級固体エネルギー貯蔵型リチウムイオン電池システムの開発研究、システムのサイクル寿命 ≥12000 回、同等のエネルギー効率での電力コスト ≤ 0.2 元 /kWh

③ 本質安全・金属硫化物エネルギー貯蔵式電池の研究開発

主導機関：上海交通大学

技術要件：100kWh 級金属硫化物エネルギー貯蔵式電池システムの研究開発、システムのエネルギー変換効率 ≥80%、サイクル寿命 ≥12000 回、システムコスト ≤0.6 元 /Wh

④ 低コストのハイブリッド型スーパーキャパシタ（電気二重層コンデンサ）の基幹材料・技術および MW 級システムモデル（基盤キーテクノロジー）

主導企業：烯晶碳能電子科技無錫有限公司

技術要件：単体エネルギー ≥15Wh、比エネルギー ≥70Wh/kg、充放電 10 秒の比出力 ≥10kW/kg、実測最大比出力 ≥30kW/kg。放電容量 80% のサイクル寿命 ≥20 万回、-40℃・5C レートのエネルギー維持率 ≥60%、基準を満たす安全性。エネルギー貯蔵システム ≥200kWh、電力応答 ≥1MW、最適充放電エネルギー効率 ≥95%。15 分間のエネルギー貯蔵作動状況下のシステムコスト ≤1 元 /W、1 分間のエネルギー貯蔵作動状況下のシステムコスト ≤0.4 元 /W 。

⑤ 大規模エネルギー貯蔵システムクラスターのスマート協調制御のキーテクノロジーの研究と応用（基盤キーテクノロジー）

主導企業：中国長江三峡集団有限公司

評価指標：大規模エネルギー貯蔵システムクラスターのスマート協調制御ポリシーの研究。大規模エネルギー貯蔵システム電力網の能動的サポート能力の評価指標の体系化。大規模エネルギー貯蔵の配置、稼働管理の規格化。大規模エネルギー貯蔵クラスターのスマート協調制御プラットフォームの研究開発（接続する制御対象はエネルギー貯蔵発電所 30 基以上、容量規模 0.5GW 以上）。大規模エネルギー貯蔵と多種電源を組み合わせた稼働の最適化、安定性の高い連携サポート機能、クリーンエネルギーの対外輸送と補助サービスに対する限界費用（マージナルコスト）の定量分析などの確立。エネルギー貯蔵クラスターの制御精度 ≥1%、エネルギー貯蔵クラスターの制御命令応答時間 ≤5s、緊急出力制御応答時間 ≤300ms。

⑥ エネルギー貯蔵式電池の劣化加速解析と寿命予測技術の研究（基盤キーテクノロジー）

主導企業：中国電力科学研究院有限公司

評価指標：高精度電池熱力学状態評価方法の開発、SOC-OCV（開回路電圧 / 充電状態）曲線から予測される電池容量の絶対誤差 ≤1%。電解液の消費・浸潤・残留、電池の膨張率、電池内のガス発生などの重要な減衰要因に対する定量評価方法および評価装置・プラットフォームの確立、測定相対誤差 ≤2%。装置に

使用する電池の健康状態（SOH）、充電状態（SOC）、温度分布、膨張などに対するアナログ･シミュレーション結果の精度 ≥90%。電気化学アルゴリズムを利用して寿命予測メカニズムモデルを構築し、寿命実測データ（電池単セル 3 か月、電池モジュール 1.5 か月）から予測した信頼性の高い電池システム減衰マップ（25 年以上）を実現する。

⑦ エネルギー貯蔵リチウムイオン電池のスマートセンシング技術（基盤キーテクノロジー）

主導機関：北京理工大学

技術指標：エネルギー貯蔵リチウムイオン電池容量（500 サイクル）に対する埋め込み型センサーの影響 ≤5%。埋め込み型センサーに対する電解質環境の影響 ≤5%。多種の信号伝送のサンプリング周波数 ≥100Hz。内部温度の測定範囲 -40 ～ 60℃、精度 ± 0.2℃。内部ひずみの測定範囲 3000 μ ε、誤差 ≤5 μ ε。内部気圧の測定範囲 2MPa、精度 0.1MPa。内部発生ガス測定は 2 種類以上、精度は 0 ～ 100%（体積パーセント）。内部電圧の測定範囲 2.3 ～ 6.0V、誤差 ≤5%。内部電流の測定誤差 ≤5%。電池の内部・外部センサーの取得するセンシング信号と、電池外部の電気化学的特性および熱暴走との関係性を確立する。統合センシングのエネルギー貯蔵スマート制御システムは単体のセンシング信号をリアルタイムで収集、有線あるいは無線伝送を実現、制御ユニットで自動分析されたセンシング情報にもとづく早期警報を発令する。

⑧ リチウムイオン電池エネルギー貯蔵システムのライフサイクルを応用した安全技術（基盤キーテクノロジー）

主導企業：南方電網調峰調頻発電有限公司

評価指標：GWh 級に適用するエネルギー貯蔵ビッグデータ監視制御システムの開発、15 分前に事故を知らせる早期警報を発令。リチウムイオン電池エネルギー貯蔵システムの先進的消火技術の研究開発、火災警報信号の発令から 5 秒以内に電池の初期消火を完了、24 時間以内の再燃火災を防止、カバー範囲 ≥1MWh。

図 2-1　国家重点研究開発計画［エネルギー貯蔵とスマートグリッド技術］重点特別プロジェクトに採択された機関の位置

(7)「第 14 次 5 カ年計画の新エネルギー貯蔵発展実施案（2022 年）」（国家発展改革委員会とエネルギー局）

2022 年 2 月、国家発展改革委員会とエネルギー局は、第 14 次 5 カ年計画の新型エネルギー貯蔵発展実施案[34]を公布した。

エネルギー貯蔵産業をさらに発展させるため、「国民経済・社会発展第 14 次 5 カ年計画及び 2035 年長期目標綱要」と国家発展改革委員会及び国家能源局が作成した「新型エネルギー貯蔵の発展加速に関する指導意見」に基づき、同実施計画が策定・公表された。

その主な発展目標は下記の通りである。

2025 年までに、新型エネルギー貯蔵産業は商用化の初期段階から大規模な商用化段階に発展させると同時に、新型エネルギー貯蔵技術の革新能力とコア技術と設備の自主開発能力を大幅に向上させ、規格・基準の構築体制はほぼ完成させ、ビジネスモデルも成熟させる。

その中で、電気化学エネルギー貯蔵技術の性能をさらに改善するため、関連エネルギー貯蔵システムのコストは 30％以上削減すると明記した。一方、火力発電や原子力発電ユニットの蒸気によるエネルギー貯蔵技術などの従来の電力に依存している新型エネルギー貯蔵技術に関しては、100 メガワット級の圧縮空気のエネルギー貯蔵技術の実用を達成する。さらに、水素エネルギー貯蔵技術、熱（冷）エネルギー貯蔵技術など長い時間スケールのエネルギー貯蔵技術に関しては画期的な突破を実現する。

2030 年までに、新型エネルギー貯蔵産業は全面的に市場化する。 その際、新型エネルギー貯蔵のコア技術と設備はすべて自主開発となり、技術革新と産業レベルは着実に世界最高レベルに達する。また、市場メカニズム、ビジネスモデル及び規格・基準を成熟させ、すべての側面で電力システムと深く統合し、新しい電力システムのニーズを満たす。[35]

2.3 地方政府の主要政策

2.3.1 直接的な補助金政策

2021 年は「中国エネルギー貯蔵政策の当たり年」と呼ばれている。国から地方まで、各行政レベルで公布されたエネルギー貯蔵に関する政策は 200 件以上に上り、市場取引ルール、電力価格の仕組み、直接的な資金援助、建設計画など各方面に及んでいる。地方レベルで打ち出された関連政策の主な支援方法には、次の 4 つが挙げられる。

2021 年になり、中国の 12 の省･直轄市･自治区では、エネルギー貯蔵の直接的な補助金政策が公布された。これまでの政策と比較し、補助金の支援規模と形式の上で飛躍的な進展がみられる。補助金の形式は投資支援と運営支援を主体とし、現地のエネルギー貯蔵プロジェクトの経済性を効果的に高める。また、現地の電力市場改革やエネルギー使用の需要と結びつき、多元的なビジネスモデルの開拓を可能にする。

浙江省では 2021 年 11 月、浙江省発展改革委員会が「浙江省新型エネルギー貯蔵モデルの応用加速に関する実施意見」[36]を公布した。年間利用時間数 600 時間以上のピークシフトプロジェクトに対して容量補償を行うとし、補助期間は暫定 3 年、補償基準は 200 元 /kW、180 元 /kW、170 元 /kW と 1 年ごとに減額する。火力発電との連合ユニットによる電周波数変調モデルプロジェクトに対しては､KPD 値（総合性能調節指標）

[34] https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/P020220321550104020921.pdf

[35] http://www.tepia.co.jp/tepiamonthly/pdf/tepia-monthly20220323.pdf

[36] 浙江省発展改革委員会、浙江省エネルギー局が公布した「浙江省新型エネルギー貯蔵モデルの応用加速に関する実施意見」（zj.gov.cn）

が 0.9 を超えた場合、エネルギー貯蔵容量に応じて、毎月 20 万 kWh/MW の周波数変調奨励金を交付する。これは新型エネルギー貯蔵の補助金に明確に言及した省レベルでは初となる政策である。

2021 年 12 月 17 日、浙江省海寧市発展改革委員会も「新型エネルギー貯蔵発展の推進加速に関する実施意見（意見募集稿）」[37]を公布した。新型エネルギー貯蔵を市場化することで、全ライフサイクルにわたる稼働を実現するとし、その市場化を支持・指導する。市場化への過渡期に、年間利用時間数 600 時間以上、かつ一元管理を受け入れるピークシフトプロジェクトに対して容量補償を行うとし、補償基準は暫定で 200 元 /kW、180 元 /kW、170 元 /kW と年々減額してゆく。なお、すでに省から補助を受けたプロジェクトは、重複して補助を受けることはできない。また、2021 年 7 月 28 日、浙江省楽清市政府も文書にて、「楽清市政府はすでにエネルギー貯蔵に電力価格を適用する補助金政策を打ち出しており、現在の金額をベースに 0.89 元 /kWh を補償する」[38]と発表した。このほか、江蘇省[39]、広東省[40]、陝西省[41]、遼寧省[42]、天津市[43]、青海

[37] http://www.haining.gov.cn/art/2021/12/17/art_1688518_160977.html

[38] https://www.in-en.com/article/html/energy-2306457.shtml

[39] 2019 年 3 月、蘇州工業園区管理委員会は「蘇州工業園区グリーン発展特別事業指導資金管理弁法」を公布。同弁法では、グリーン発展プロジェクトへ補助金を交付することを明確にしている。工業園区内で登録・実施を行い、かつすでに系統連系の稼働を開始している分散型タービンプロジェクトやエネルギー貯蔵プロジェクトに対し、プロジェクト稼働後から 3 年間、発電量（放電量）に応じて 0.3 元 /kWh を事業主体に交付する。2021 年 11 月末、蘇州市は「蘇州市呉江区分散型太陽光発電の大規模開発実施案」を公布。江蘇省初となるエネルギー貯蔵補助金を組み入れた県全体にわたる太陽光発電実施案で、中国の県レベルでは支援力が最も大きい分散型太陽エネルギー貯蔵システムへの補助金政策でもある。太陽エネルギー貯蔵プロジェクトに対する補助金の最高額は 1.1 元 /kWh である。また、2021 年 6 月 16 日、江蘇省南京市財政局は「南京市 2020 年度充電施設建設運営の財政補助金弁法」を公布。太陽光発電の設備容量 100kW 以上、貯蔵電力量 500kWh 以上の公共充電施設の運営に対し、補助金 0.2 元 /kWh を交付する方針を打ち出した。

[40] 2021 年 9 月、広東省肇慶市は「肇慶高新区製造業発展の節電による製造業支援に関する若干措置」を公布した。高新区内において、区内の企業がエネルギー貯蔵や氷蓄熱プロジェクトを発足する場合、建設完成後の稼働開始から 150 元 /kW の補助金、企業別に最高 100 万元の補助金が交付される。電力貯蔵負荷はピークシフトの電力消費の負荷指標と相殺することができる。自家消費型太陽光発電プロジェクトの場合、稼働開始から 300 元 /kW の補助金、企業別に最高 100 万元の補助金が交付される。太陽光発電の一部の負荷は、ピークシフト時の消費電力の負荷指標に含まれない。また、2021 年 5 月以降、広東省仏山市順徳の各地区では、エネルギー貯蔵設備を購入・リースすることで多額の補助を受けることができる。勒流・容桂では最高 30 万元、大良・竜江・均安では最高 20 万元、北滘では最高 10 万元の補助を受けられる。このほか、広東省広州市工業情報庁は「広州市仮想発電所実施細則（意見募集稿）」を公布し、ユーザーをピークカット・ピークシフトへ誘導すると、ピークカットは最高 5 元 /kWh、ピークシフトは最高 2 元 /kWh（補助金費用＝有効応答電力量×補助金基準×応答係数）を交付すると打ち出した。

[41] 2021 年 5 月 21 日、陝西省発展改革委員会は「2021 年陝西省電力需要対応業務方案」を公布。エネルギー貯蔵のピークシフト実施を奨励し、緊急性ピークカットの需要対応で 1 回あたり最高 35 元 /kW、経済性非居住者の需要対応で 1 回あたり最高 15 元 /kW の補助金を交付する。また、2020 年 12 月 25 日、陝西省西安工業情報化局は「太陽光発電産業の持続的かつ健全な発展のさらなる促進に関する意見（意見募集稿）」を公布。2021 年 1 月 1 日～ 2023 年 12 月 31 日に新設する太陽エネルギー貯蔵プロジェクトに補助金 1 元 /kWh を交付し、年間交付額の上限を 50 万元とする方針を打ち出した。

[42] 2021 年 4 月、遼寧省瀋陽市人民政府は「瀋陽市新エネルギー自動車産業の革新発展及び普及応用の加速の実施案（意見募集稿）」を公布し、太陽エネルギー貯蔵充電モデルステーションに対して、投資額の 10% を奨励、1 基あたり最高 50 万元を上限とする方針を打ち出した。

[43] 2021 年 2 月、天津市工業情報化局は「2021 年度電力需要対応業務の展開に関する通知」を公布した。500kW 以上のエネルギー貯蔵発電所はピークカット・ピークシフトの補助金制度を申請できるとし、ピークシフトの補助金は固定制 1.2 元 /kWh、変動価格制 1.2 ～ 2 元 /kWh、ピークカットは固定金額制を採用する。

省[44]、寧夏回族自治区[45]、新疆ウイグル自治区[46]、山東省などの省や自治区[47]も相次いでエネルギー貯蔵ピークシフト補助金政策を公布した。

2.3.2 強制的なエネルギー貯蔵設備の配置政策

新エネルギープロジェクトは一定の電力比率に従い、発電側のエネルギー貯蔵設備の配置を行わなければならない。2021 年、中国ではすでに 20 余りの省・直轄市・自治区が「風力・太陽光・貯蔵の一体化」建設を打ち出し、17 の省・直轄市・自治区で、新エネルギーにはエネルギー貯蔵の一定比率による配置が必須であると要求している。その割合は 5 ～ 20% が基本だが、多くの省ではさらに、新エネルギー発電所の新設には 10 ～ 20% の配置、2 時間の貯蔵能力のあるエネルギー貯蔵システムの設置が求められている。

2021 年 6 月 21 日、河南省発展改革委員会は「2021 年風力発電・太陽光発電プロジェクト建設に係る事項の通知」[48]を公布し、「全省新エネルギー電力消費管理ガイドライン」を制定した。ガイドラインでは、I 類エリア[49]の消費管理規模を 300 万 kW、新エネルギー設備の配置割合 10%、2 時間の正常稼働が可能なエネルギー貯蔵能力を要件としており、エネルギー貯蔵の総規模は 30 万 kW/60 万 kWh である。II 類エリア[50]の消費管理規模は 100 万 kW、新エネルギーの配置割合 15%、2 時間の正常稼働が可能なエネルギー貯蔵能力を要件とし、総規模は 15 万 kW/30 万 kWh と予測される。III 類エリア[51]の消費規模は協議を通じて規定され、新エネルギー貯蔵設備の配置割合 20%、2 時間の正常稼働が可能なエネルギー貯蔵能力が求められる。

2021 年 6 月 7 日、天津市発展改革委員会は「2021 ～ 2022 年風力発電・太陽光発電プロジェクトの開発・建設と 2021 年保障性系統連系に係る事項の通知」[52]を公布した。これは、単体容量 5 万 kW 超のプロジェクトに対して、一定割合のエネルギー貯蔵施設を付帯建設することや、相応のピークシフト能力を提供することを約束させている。太陽光発電プロジェクトのエネルギー貯蔵比率は、設備容量の 10% 以上（連続エネルギー貯蔵時間 1 時間以上）を確約し、風力発電プロジェクトは 15% 以上を確約するものとする。エネルギー貯蔵施設は、発電プロジェクトにおいても、2021 年保障性系統連系規模に統一管理されなければならない。

[44] 2021 年 1 月、青海省発展改革委員会、科学技術庁、工業情報化庁、エネルギー局は共同で、「エネルギー貯蔵産業の発展を支持する若干措置（試行）の通達」、「エネルギー貯蔵産業の発展を支持する若干措置（試行）」を公布した。新設の新型エネルギー貯蔵の配置プロジェクトに対して、0.1 元 /kWh の補助金を交付し、省内発電のエネルギー貯蔵電池を 60% 以上使用するプロジェクトに対して、0.05 元 /kWh の補助金の追加を打ち出した。

[45] 2021 年 11 月、寧夏回族自治区発展改革委員会は「エネルギー貯蔵プロジェクト実験地域の試行に関する意見募集稿」を公布した。新設の新型エネルギー貯蔵の配置プロジェクトに対して、0.8 元 /kWh の補助金を交付する。

[46] 2020 年 5 月、新疆ウイグル自治区発展改革委員会は「新疆地域発電・エネルギー貯蔵管理暫定規則」を公布した。新設の新型エネルギー貯蔵の配置プロジェクトに対して、0.55 元 /kWh の補助金を交付する。

[47] 2021 年 4 月、山東省発展改革委員会は「山東省エネルギー貯蔵モデル応用の実施意見」を公布した。新設の新型エネルギー貯蔵の配置プロジェクトに対して、0.2 元 /kWh の補助金を交付する。

[48] https://www.pvmeng.com/2021/09/18/21380/

[49] 中国のⅠ類エリアは主に直轄市、省と自治区レベルの県庁所在地を指す。

[50] 中国のⅡ類エリアは主に市レベルの県庁所在地を指す。

[51] 中国のⅢ類エリアは主に県レベルの県庁所在地を指す。

[52] https://www.china5e.com/news/news-1130486-1.html

各地域における新エネルギー貯蔵設備の設置は急増し、エネルギー貯蔵市場の急速な発展を促した。中国エネルギー新聞の統計[53]によると、2021 年上半期の中国国内における新規の新エネルギー貯蔵プロジェクトは 257 件、エネルギー貯蔵規模は 1180 万 kW となり、前年同期比はそれぞれ 1.6 倍、9 倍であった。また、稼働を始めた新規プロジェクトの規模は 30.4 万 kW/62.4 万 kWh、10 万 kW 超のプロジェクトは前年同期の 8.5 倍となった。2021 年の「風力発電＋太陽光発電」の総設備容量は 1.27 億 kW を上回り、そのエネルギー貯蔵の設備容量を 10% として計算すると、実際の設備容量は 1,200 万 kW を上回ると予測される。

2.3.3 優先的な支援政策

エネルギー貯蔵能力を備える新エネルギープロジェクトに対し、一定の電力比率による発電側エネルギー貯蔵の配置への奨励と合わせて、プロジェクトの審査認可や系統連系の面でも政策や待遇の上で重点を置くとし、その発展を優先的に支援する有効な奨励案を打ち出している。

河南省では、2021 年 6 月 15 日、全省にわたる新エネルギー電力消費管理ガイドラインを発行するとともに、「河南省エネルギー貯蔵施設建設の推進加速に関する指導意見」[54]を公布し、新エネルギープロジェクトのエネルギー貯蔵設備の付帯建設を奨励している。エネルギー貯蔵の配置割合が 10% 以上、連続エネルギー貯蔵時間が 2 時間以上の新エネルギープロジェクトに対し、同等の条件下で風力・太陽光資源の開発権を優先的に獲得でき、電力網企業の優先的な系統連系、優先的な消費管理保障が約束されている。

天津市[55]では、単体容量 5 万 kW 超のプロジェクトに対して、エネルギー貯蔵施設の建設比率が最低要求をクリアするか、相応のピークシフト能力を提供した場合に 20 点を獲得すると約束している。さらに比率が 1% 増加するごとに 2 点が加わり、最高 30 点まで加点される。連続エネルギー貯蔵時間 1 時間以上、システム稼働寿命 10 年以上の基準にもとづき、エネルギー貯蔵設備を配置する必要がある上、発電プロジェクトの条件下においても、2023 年までに系統連系を完成させ、稼働を開始しなければならない。

また、広西省[56]は 2021 年度の風力発電・太陽光発電の競争的配置採点方法により、エネルギー貯蔵設備の配置プロジェクトは最高 15 点を獲得できるとしている。山東省[57]は集中型の風力発電や太陽光発電プロジェクトの新設に対し、原則としてエネルギー生産施設の建設・リース費用を 10%以上とし、2 時間以上の連続充電時間を保障する必要がある。また、風力発電･太陽光発電プロジェクトに対しては、配置割合に応じて、エネルギー貯蔵施設の建設・リースのモデルプロジェクトを開始し、優先的な系統連系、優先的な消費管理への統合が実施される。

2.3.4 モデルプロジェクトの推進

地方のエネルギー貯蔵の奨励措置の一部はまだ発展の初期段階にあるため、モデルプロジェクトの推進や経済的手段の模索（ピーク時の価格差の向上、電力価格の設定）なども、往々にしてその普及や支援の重要な手段となる。

[53] http://mm.chinapower.com.cn/xw/gnxw/20220303/136681.html
[54] https://chuneng.bjx.com.cn/news/20210618/1158872.shtml
[55] https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202108111509398948_1.pdf?1628689514000.pdf
[56] https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202108111509398948_1.pdf?1628689514000.pdf
[57] https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202108111509398948_1.pdf?1628689514000.pdf

山東省では2021年5月6日、山東省エネルギー局が「2021年度エネルギー貯蔵モデルプロジェクト」の出願を受け付け、翌月6月21日に「2021年度エネルギー貯蔵モデルプロジェクトリスト」[58]を公示した。ピークシフトプロジェクト5件、周波数変調プロジェクト2件が選ばれ、エネルギー貯蔵の総規模は520MW/1041MWhに達した。初回となるこれらのエネルギー貯蔵発電所モデルは、半年間の建設を経て、今ではほぼ完成して稼働を始めている。山東省エネルギー局はまた、2022年2月10日に「2022年度エネルギー貯蔵モデルプロジェクトライブラリの募集活動の展開に関する通知」[59]を公布した。募集範囲はエネルギー貯蔵のピークシフトプロジェクトを主体とし、技術的にはリチウム電池、圧縮空気、レドックスフロー電池、石炭火力発電蓄熱、水素の製造・貯蔵などが含まれる。ピークシフトプロジェクトでは、エネルギー貯蔵の手段として、アルミニウムイオン電池、ナトリウムイオン電池、重力エネルギー貯蔵などの低コスト・長時間・大容量の新テクノロジーが採用されている。また、「浙江省再生可能エネルギー発展『第14次5カ年計画』」の中でも、「エネルギー貯蔵モデルプロジェクトの展開を奨励し、エネルギー貯蔵のコア技術におけるブレイクスルーを支援する」と明確に言及している。「再生可能エネルギー＋エネルギー貯蔵」モデルを推進するとともに、「風力・太陽光電力・水力・貯蔵の一体化」を具現化した再生可能エネルギーモデル拠点を建設し、新技術と新方式を応用したモデルプロジェクトの試行を奨励している。

参考資料・文献

1. 「新時代の中国エネルギー発展白書」, 中国政府網, http://m.xinhuanet.com/2020-12/21/c_1126887608.htm
2. 中国エネルギー統計年鑑 2021(中国能源年鉴 2021)(2021) 经济管理出版社, 1287p.
3. 全球能源互聯網発展合作組織 (2021)「中国 2060 年前カーボンニュートラル研究報告」(中国 2060 年前碳中和研究报告), 中国电力出版社,186p.
4. 発展改革委員会（2016）「エネルギー生産と消費革命戦略（2016-2030）」公開公布稿, https://www.ndrc.gov.cn/fggz/zcssfz/zcgh/201704/W020190910670685518802.pdf
5. 「浙江省省エネルギー・消費削減とエネルギー資源最適化配置『第14次5カ年計画』」 https://yhp-website.oss-cn-beijing.aliyuncs.com/up《浙江省节能降耗和能源资源优化配置“十四五”规划》_1631500569902.pdf
6. 「浙江省再生可能エネルギー発展『第14次5カ年計画』」 https://yhp-website.oss-cn-beijing.aliyuncs.com/up 浙江省可再生能源发展“十四五”规划 _1632063271858.pdf
7. 「山東省再生可能エネルギー発展『第14次5カ年計画』」 http://www.shandong.gov.cn/module/download/downfile.jsp?classid=0&filename=ebb835039a1646119831a23f5daa7b0c.pdf
8. 李柏洲, 尹士, 邢澤宇, 羅小芳（2019）「進化ゲームに基づく中国エネルギー貯蔵産業の協同発展メカニズムと政策研究」, 工業工程管理, 24巻3号, pp.171-179.
9. 王文, 賈晋京, 胡倩榕, 許林, 郭方舟, 劉思悦, 趙越, 孫超（2021）「今後五年 中国改革の増分はどこに？」, 「『第14次5カ年計画』と『第13次5カ年計画』綱要の高度比較」, 中国発展観察, Z2号, pp.47-53, p.69.
10. 李俊峰（2020）「中国エネルギー『第13次5カ年計画』回顧と『第14次5カ年計画』展望」, 中国電力企業管理, 31号, pp.71-75.

[58] http://nyj.shandong.gov.cn/art/2021/6/21/art_100393_10288142.html?xxgkhide=1

[59] http://nyj.shandong.gov.cn/art/2022/3/1/art_59960_10291692.html

11. 王明遠（2007）「『見える手』は中国再生可能エネルギー産業の輝かしい空を支えるか？」,「『中華人民共和国再生可能エネルギー法』に基づく分析」, 現代法学，6 号，pp.155-166.
12. 韓敏（2006）「『中華人民共和国再生可能エネルギー法』公布 太陽エネルギー業界が迎える新たなチャンス」, 電器，2 号，p.45.
13. 薛恵鋒, 王海寧（2010）「『中華人民共和国再生可能エネルギー法』実施 回顧と展望」, 中外能源, 15 巻 3 号, pp.33-36.
14. 丁宣昇, 曹勇, 劉瀟瀟, 劉紅光, 許萍, 蔣姍, 楊寧（2021）「エネルギー革命の顕著な効果 迅速で着実なエネルギー転換」,「中国エネルギー『第 13 次 5 カ年計画』回顧と『第 14 次 5 カ年計画』展望」, 当代石油石化，29 巻 2 号，pp.11-19.
15. 張忠利（2018）「気候変働背景下『省エネルギー法』が直面する試練とその思考」, 河南財経政法大学学報，33 巻 1 号，pp.132-139.
16. 高超（2017）「中国の典型的エネルギー法体系の進化解析及び実施効果の評価研究」, 山東大学
17. 張杰（2019）「中国エネルギー法の立法研究」, 東北林業大学

3　中国の蓄電池技術に関する量的分析

20 世紀にはいってから、中国政府は自主的イノベーションを目指して、2006 年に「国家中長期科学技術発展規画綱要（2006-2020 年）」[60]を、2008 年に「国家知的財産権戦略綱要」[61]を発表し、研究開発及び知財の推進に注力しはじめた。これをきっかけに発展し、現在は世界 1 位の研究論文発表数と特許｀出願数[62]に至っている。本章では、2010-2021 年の研究論文及び特許データに基づいて、中国の蓄電池技術の研究開発の状況を把握する。

なお、蓄電池とは電気エネルギーを蓄え、充電を行うことにより繰返し使用することが出来る電池のことであり、これからの低炭素社会に必須の技術として注目を集めている。現行のリチウムイオン電池のエネルギー密度を高めようとすると発火するなど、安全性の面で問題があることが指摘されている。そこで、駆動方式、正極、負極、電解質、添加剤に注目をした次世代蓄電池が研究開発や普及に関する関心が、中国や日本のみならず主要国においても非常に高く、プロジェクトの新設や研究基盤の増強が進んでいる。

3.1　研究論文から見た中国の蓄電池関連技術

中国の大学や研究機関などには、Science Citation Index（SCI）に収録されるジャーナルに投稿した英語論文は、優れた研究として認められる文化がある。そのため、本節では SCI サービスを提供する Web of Science Core Collection データベースから、期間を 2010 − 2021 年に、領域分野を「化学」「材料科学」「燃料」「工学」「その他の技術」「物理学」「電化学」「結晶学」「ポリマー科学」「数学」「自動制御システム」「計算機科学」、論文タイプを英語のレビュー論文と研究論文に絞り、蓄電池（Energy Storage Battery）および関連技術で論文情報を検索し、下記のデータを得た。

3.1.1　中国の蓄電池技術に関する論文数の推移

蓄電池技術関連論文において、現在、中国は圧倒的な存在感を示している。図 3-1 のように、2011 年までに、中国の論文数は米国に次いで 2 位だったが、その後、堅調に増加し、2021 年には 5,369 本に増加した。これは、米国（1,190 本、2 位）の約 2.5 倍、日本（257 本、8 位）の 15 倍以上となっている。この背景には、2012 年、2013 年あたりから中国の太陽光発電電力量が急増し（341 万 Kw → 1,589 万 Kw）、新型蓄電池に関するニーズが急増した要因が大きい。

[60] http://www.gov.cn/jrzg/2006-02/09/content_183787.htm

[61] http://www.gov.cn/zwgk/2008-06/10/content_1012269.htm

[62] WIPO「世界知的財産指標 2019」によると、特許出願数は 2018 年に 333 万件に達した。その内、国・地域における特許出願数をみれば、中国が 154 万件ともっとも多く、世界の出願数の 46.4% を占める。

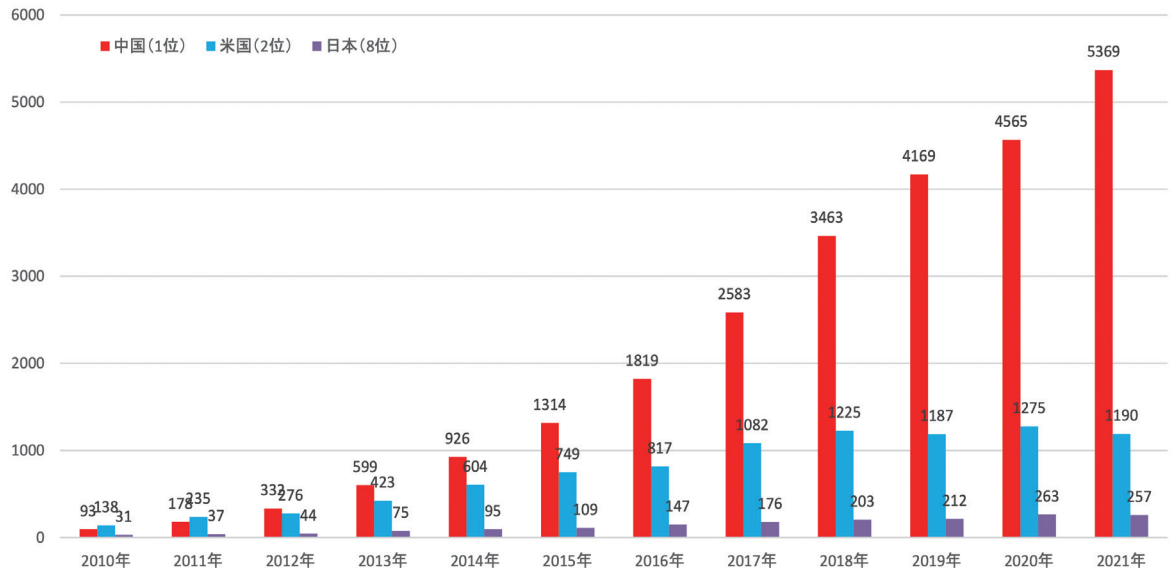


図 3-1　蓄電池に関する論文本数の国際比較（2010 - 2021 年）

出典：Web of Science Core Collection より筆者作成

3.1.2 蓄電池技術研究関連の中国トップ研究機関

2010 – 2021 年の間に投稿された中国の論文数は累計 25,409 本となっている。著者の所属順で整理した結果を、表 3-1 に示す。中国科学院は 6,735 本で第 1 位、清華大学（2,272 本）は第 2 位、中国科学院大学（1,939 本）は第 3 位、中国科学技術大学（1,782）は第 4 位である。特に、3 位も 4 位も中国科学院系の大学であり、中国科学院系でカウントすると、全論文数の 4 割を占めている。なお、複数の機関に所属している著者も含まれるため、表 3-1 は投稿論文数およびシェアは必ずしも一致しない。

表 3-1　蓄電池技術関連研究における上位 20 機関 (2010-2021 年)

順位	機関名	論文数	シェア(%) (/25,409)	地域
1	中国科学院	6,735	26.51	全国
2	清華大学	2,272	8.94	北京市
3	中国科学院大学	1,939	7.63	北京市
4	中国科学技術大学	1,782	7.01	安徽省
5	南開大学	1,260	4.96	天津市
6	北京理工大学	1,259	4.95	北京市
7	華中科学技術大学	1,259	4.95	湖北省
8	浙江大学	1,222	4.81	浙江省
9	天津大学	1,220	4.80	天津市
10	ハルピン工業大学	1,197	4.71	黒竜江省
11	上海交通大学	1,115	4.39	上海市
12	武漢理工大学	1,035	4.07	湖北省
13	山東大学	1,018	4.01	山東省
14	復旦大学	1,000	3.94	上海市
15	鄭州大学	998	3.93	河南省
16	吉林大学	951	3.74	吉林省
17	北京大学	948	3.73	北京市
18	南方科学技術大学	935	3.68	広東省
19	湖南大学	932	3.67	湖南省
20	中南大学	882	3.47	湖南省

出典：Web of Science Core Collection より筆者作成

いずれの研究機関も化学や材料系が強く、大半の研究機関は、京津冀都市圏、長江デルタエリア都市圏、ビッグベイエリア、武漢都市圏四大都市圏に位置している (図 3-2)。また、上位 20 位の機関には企業が入っていないことは、蓄電池のような材料系先端技術の研究開発において、国有企業の中央研究所の論文数は研究機関や大学よりも少ない。

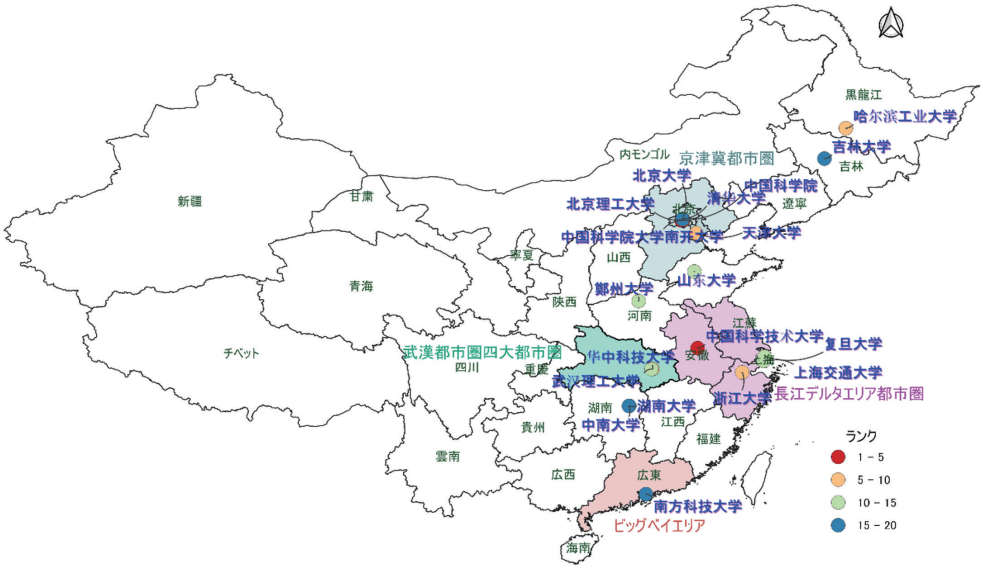
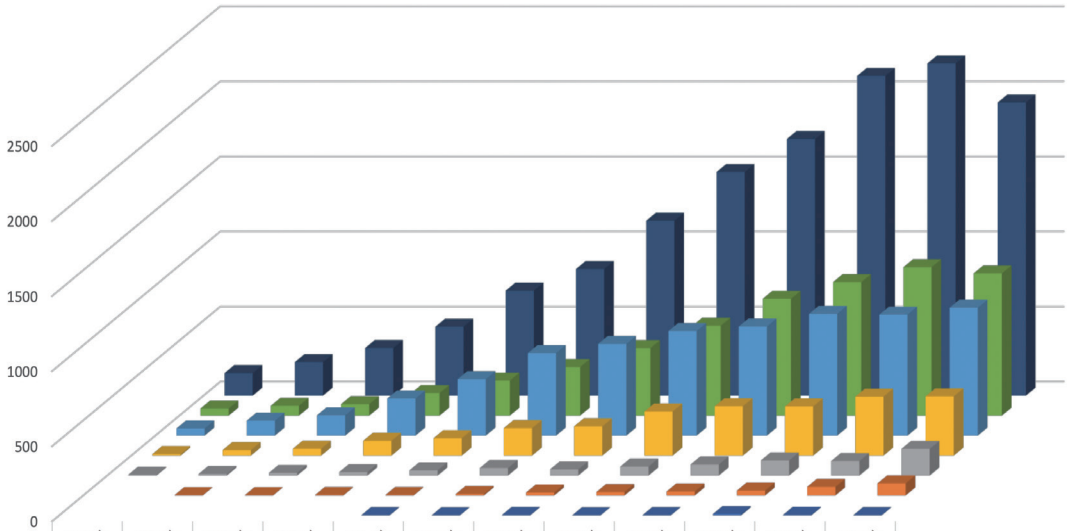


図 3-2　蓄電池関連研究における上位 20 機関

3.1.3 中国の分野別蓄電池技術関連論文の特徴

電子の流れは，陰イオン→陽極→陰極→陽イオンの一方通行であり、電池では、イオンになりやすい方の金属などが－極に電子を残して溶けだし、電子は－極から導線を通って＋極へ移動し、陽イオンと結びつく。こうした陰イオンの種類が多く、ここでは「多価イオン電池」「アニオン電池」「フッ化物電池」「レドックスフロー」「リチウムイオン電池」「インターカレーション」「コンバージョン」という 7 種の駆動方式に分けて、関連蓄電池論文数を整理した。



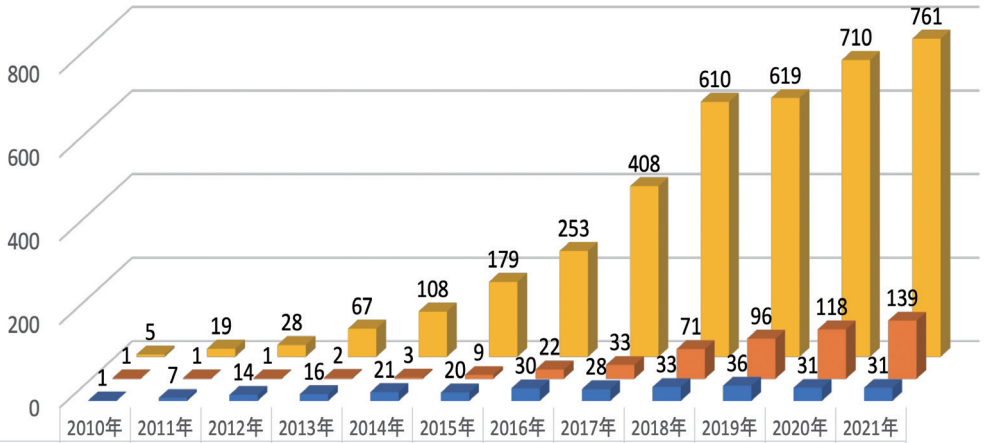
	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
多価イオン電池					2	1	3	1	2	9	4	2
アニオン電池		2	2	3	3	9	19	22	26	32	57	80
フッ化物電池	5	10	17	22	34	49	40	59	73	100	96	177
レドックスフロー	9	36	45	98	115	182	194	293	328	327	392	394
リチウムイオン電池	47	99	135	247	375	549	610	696	726	810	805	851
インターカレーション	47	65	76	150	233	323	449	598	778	889	988	947
コンバージョン	150	223	317	459	699	843	1165	1489	1709	2129	2212	1952

図 3-3　駆動方式からみた中国における蓄電池関連の論文数（2010-2021 年）

出典：Web of Science Core Collection より筆者作成

図 3-3 に示すよう、駆動方式においてコンバージョン、インターカレージョン、リチウムイオン電池はこれまで中国の研究の主流であり、レッドクスフロー、フッ化物電池、アニオン電池は 10 年ほど前には少なかったが、最近、大幅に増えてきた。多価イオン電池に関する研究は 2014 年にスタートしたばかりで、いまだ年に数本程度の発表となっている。

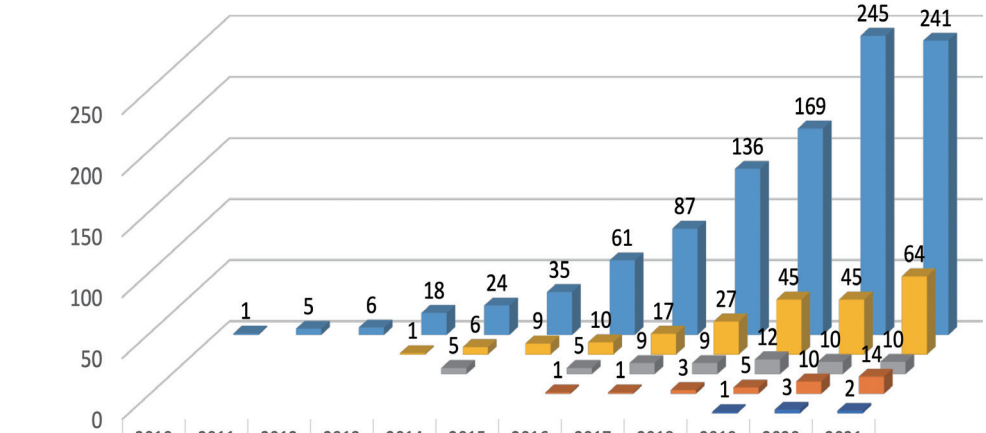
次に、蓄電池の正極に注目し、「リチウム空気電池」、「亜鉛空気電池」、「リチウム硫黄電池」の分野別に論文発表数を整理した。図 3-4 で示すように、リチウム硫黄電池は主流的な研究であり、亜鉛空気電池関連論文はこの 6 年間で大きく増えてきた。リチウム空気電池関連論文は、ある程度増えてきたものの、近年は横ばいとなっている。



	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
リチウム空気電池	1	7	14	16	21	20	30	28	33	36	31	31
亜鉛空気電池	1	1	1	2	3	9	22	33	71	96	118	139
リチウム硫黄電池	5	19	28	67	108	179	253	408	610	619	710	761

図 3-4　正極分野における中国の蓄電池関連論文数

出典：Web of Science Core Collection より筆者作成

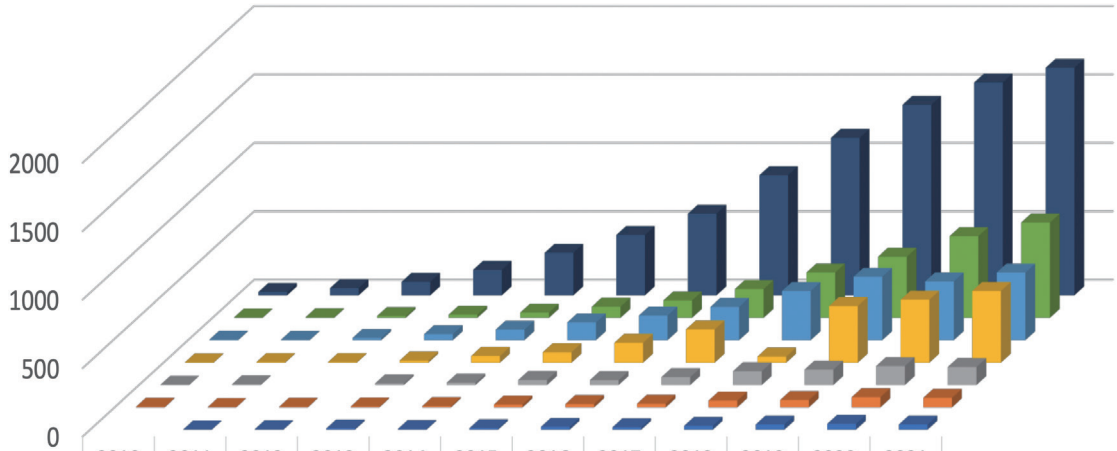


	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
フッ化物型全固体電池										1	3	2
硫化物型全固体電池							1	1	3	5	10	14
酸化物型全固体電池					5		5	9	9	12	10	10
濃厚電解液				1	6	9	10	17	27	45	45	64
ポリマー電解質	1	5	6	18	24	35	61	87	136	169	245	241

図 3-5　電解質分野における中国の蓄電池関連論文数（2010 － 2021 年）

出典：Web of Science Core Collection より筆者作成

また、電解質に注目し、フッ化物型全固体電池、硫化物型全固体電池、酸化物型全固体電池、濃厚電解液、ポリマー電解液に関する中国の蓄電池関連論文を整理すると、図 3-5 のような結果となる。中国ではポリマー電解液に関する研究は主流であり、濃厚電解液に関する研究もこの数年間で急に増えてきており、酸化物型電解質、硫化物電解質、フッ化物電解質に関する研究は、徐々に増加する傾向となっている。



	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
シリコン負極電池		1	3	9	5	11	21	18	28	38	43	38
マグネシウム金属電池	4	1	4	6	9	20	24	26	49	53	74	69
黒鉛負極電池	1	4		11	16	36	35	57	100	112	138	131
ナトリウム金属電池	2	4	4	15	48	75	144	242	44	413	459	523
酸化物負極電池	4	3	16	44	77	130	180	243	359	463	429	494
金属負極電池	2	4	13	23	38	81	126	210	331	446	596	696
リチウム金属電池	25	53	99	187	311	441	597	878	1151	1392	1555	1663

図 3-6　負極分野の中国蓄電池関連論文数（2010 − 2021 年）

出典：Web of Science Core Collection より筆者作成

現在、多様な負極材料が実験され、リチウム金属は最も利用されている。第 2 グループには、金属負極、酸化物負極、ナトリウム金属に関する論文は年間 500 本程度増加してきた。第 3 グループには黒鉛負極、マグネシウム金属負極、シリコン負極に関する論文は 2010 年より増えてきたものの、近年は横ばいとなっている (図 3-6)。

図 3-7 に示すよう、電池の添加物には主に結着剤、導電助剤、分散材などがある。これらの分野における中国の研究について、結着剤分野の論文数は蓄積されているが、導電助剤や分散剤分野の論文数はまだ多くない。

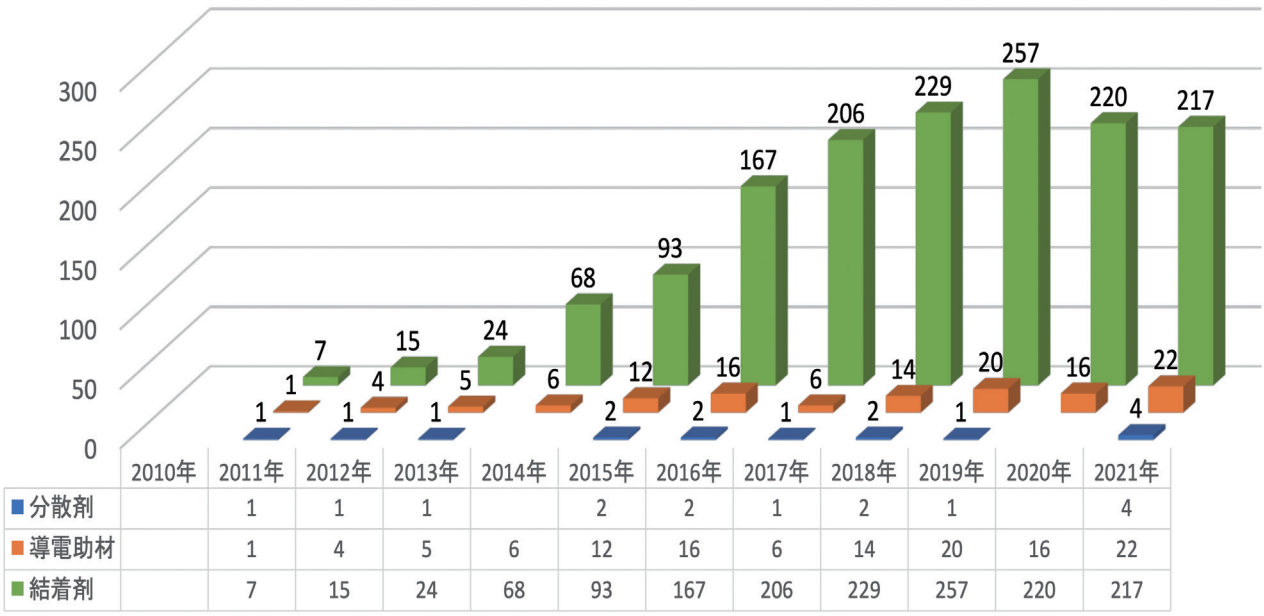


図 3-7　電池添加物に関する中国の研究論文数（2010 − 2021 年）

出典：Web of Science Core Collection より筆者作成

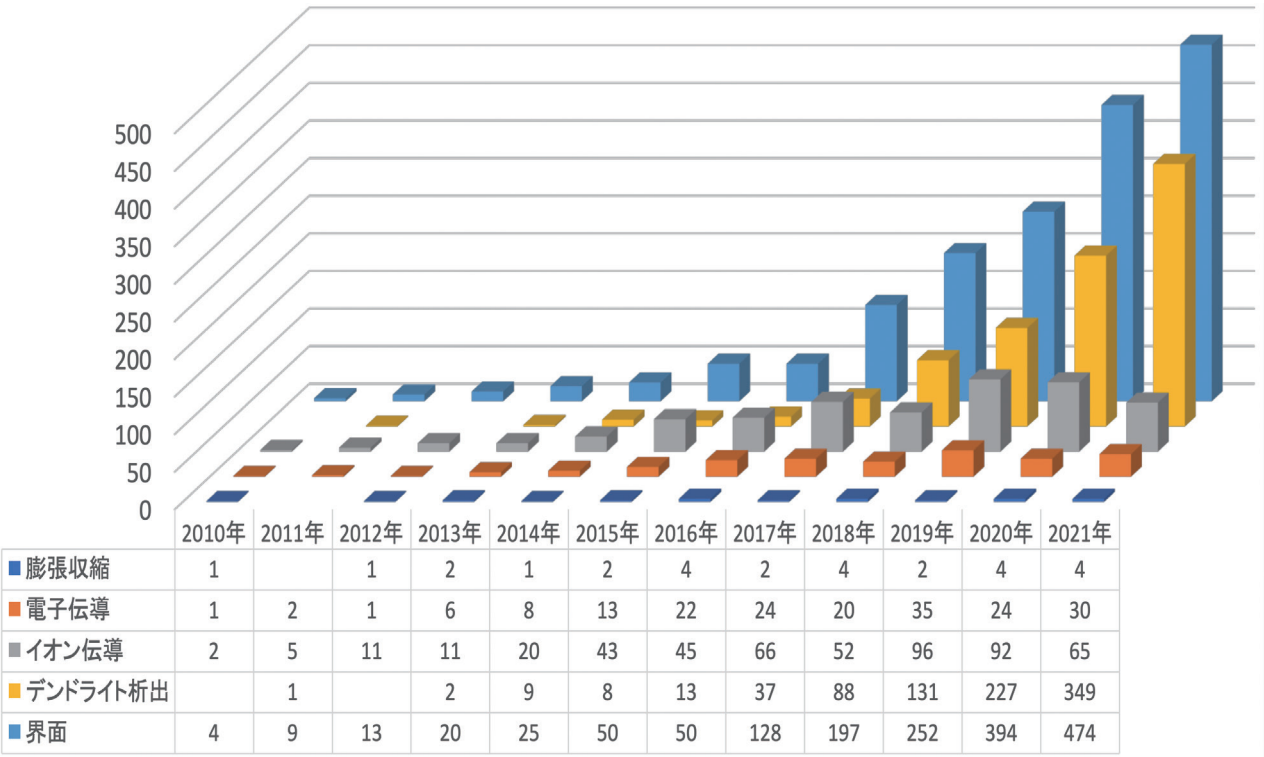


図 3-8　現象解析・構造解析に関する中国の研究論文数（2010—2021）

出典：Web of Science Core Collection より筆者作成

図 3-8 に示すよう、蓄電池の安定性、安全性や効率などにかかわる諸現象について、デンドライト析出、界面（インターフェイス）に関する研究が多い。イオン伝導や電子伝導研究の数も少なくはないが、膨張収縮に関する論文がまだ少ない。

3.2 特許からみた中国の蓄電池関連技術

3.2.1 中国の蓄電池技術関連特許の特徴

中国の蓄電池技術関連特許は、2010 年ごろに数件規模であったが、2021 年現在、特許出願数は 637 件、取得数は 256 件となっている。関連特許の出願数は 2015 年から、取得数は 2018 年から急増している (図 3-9)。

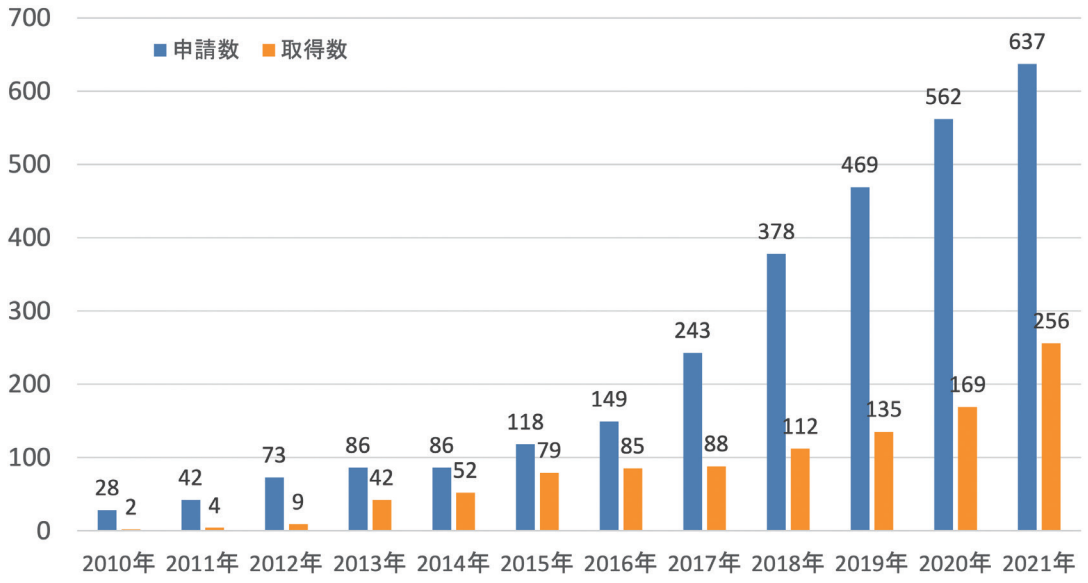


図 3-9 中国の蓄電池に関する特許（2010 － 2021 年）

出典：CPRS[63] データベースより筆者作成

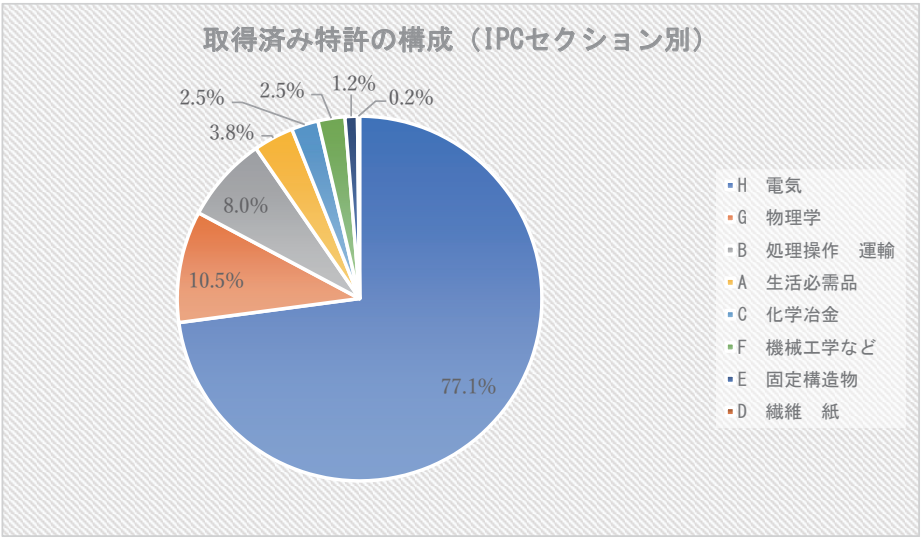


図 3-10 取得特許の構成（IPC セクション別）

出典：CPRS データベースより筆者作成

中国の取得特許の分野構成をみると、電気セクション（77.1％）、物理セクション（10.5％）、処理操作・運輸セクション（8.0％）は全体の 95％以上を占めている (図 3-10)。

[63] 中国の特許データベース https://cprs.patentstar.com.cn/

表 3-2　蓄電池関連の特許出願人状況（Top10）

順位	出願人	特許取得数	地域
1	国家電網有限公司	209	北京市
2	無錫同春新能源科技有限公司	97	江蘇省、無錫市
3	国家電網中国電力科学研究院有限公司	61	北京市
4	上海動力儲能電池系統工程技術有限公司	39	上海市
5	合肥華宇智航動力能源有限公司	36	安徽省、合肥市
6	中国科学院大連化学物理研究所	29	遼寧省、大連市
7	上海交通大学	26	上海市
8	中国華能集団 グリーンエネルギー技術研究院有限公司	25	北京市
9	北京漢能光伏投資有限公司	24	北京市
10	国家電網上海市電力公司	24	上海市

出典：CPRS データベースより筆者作成

図 3-11　蓄電池関連の特許出願（Top10）の位置

表 3-2 に示すよう、蓄電池関連の特許出願人をみると、国家電網有限公司（State Grid）は 209 件で第 1 位となっている。また、同社傘下の中央研究院である中国電力科学研究院（61 件で第 3 位）、上海支社である上海電力公司（24 件で第 10 位）を含むと、国家電網系は中国で最も多い 294 件の蓄電池関連特許を取得

している。続いて、2 位、4 位、5 位は民間企業である。また、6 位以降は、中国科学院大連化学物理研究所（29 件）、上海交通大学（26 件）、国有会社傘下企業の中国華能集団グリーンエネルギー技術研究院（25 件）、北京漢能光伏投資有限公司（24 件）である。図 3-11 に企業の所在地を示す。

3.2.2 中国の分野別蓄電池技術関連特許の特徴

蓄電池技術に関する中国の各分野の技術力の状況について、蓄電池の「駆動方式」「正極」「電解質」「負極」「添加剤」「現象解析・構造解析」にフォーカスし、2010 － 2021 年の特許データで分析する。個別の技術は蓄電池関連特許でない場合、その技術の電池分野全般の特許を統計し、当該技術の「裾の部分」をとらえることにより、ポテンシャリティを分析する。

表 3-3　駆動方式からみた中国の電池関連特許取得数（2010-2021 年）

タイプ	合計	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
多価イオン電池（電池一般）	0（2）	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(1)	(1)	-
アニオン電池（電池一般）	0（5）	-	-	(3)	-	-	-	-	-	-	-	(2)	-
フッ化物電池（電池一般）	0（4）	-	-	(1)	-	-	-	-	-	-	(1)	(1)	(1)
レドックスフロー（電池一般）	155	-	2	5	8	4	5	15	17	15	27	19	38
レドックスフロー（蓄電池関連）	12	-	-	-	3	1	1	1	1	0	2	-	3
リチウムイオン電池（電池一般）	11,908	95	119	201	279	450	830	1,234	1,132	1,193	1,419	2,148	2,808
リチウムイオン電池（蓄電池関連）	47	-	-	1	5	-	5	6	3	8	6	5	8
ナトリウムイオン電池（電池一般）	944	0	0	0	0	4	17	20	72	102	161	260	308
ナトリウムイオン電池（蓄電池）	54	0	0	0	0	0	0	2	3	6	10	14	19
インターカレーション（電池一般）	3	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	1
コンバージョン(電池一般)	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

※（）は特許出願数
出典：CPRS データベースより筆者作成

表 3-3 に示すよう、2010 － 2021 年の間、中国では、リチウムイオン電池とナトリウムイオン電池技術の蓄積が厚く、蓄電池関連の特許も数多く取得されている。一方、多価イオン電池、アニオン電池、フッ化物電池、コンバージョン分野については、電池一般向けの特許は多少出願されているが、蓄電池関連の特許取得数はまだない。前述のように、これらの技術に関する研究論文も少なく、この分野の技術はまだ蓄積が薄く、レドックスフローについても、技術蓄積も少ない状況である。

表 3-4　正極分野の中国の電池関連特許取得数（2010 − 2021 年）

タイプ	合計	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
リチウム空気電池（電池一般）	232	-	1	3	2	10	17	37	25	21	32	36	48
リチウム空気電池（蓄電池関連）	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
亜鉛空気電池（電池一般）	90	-	-	-	-	-	5	3	5	11	13	19	34
亜鉛空気電池（蓄電池関連）	4	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	2
リチウム硫黄電池（電池一般）	1,115	2	2	7	8	11	38	56	81	96	166	267	381
リチウム硫黄電池（蓄電池関連）	58	--	--	--	1	3	3	-	10	3	9	11	18

出典：CPRS データベースより筆者作成

表 3-4 に示すよう、中国のリチウムイオン電池関連特許数が多く、蓄電池関連の数も最も多い。リチウム空気電池や亜鉛空気電池関連の特許は近年、徐々に増加している。

表 3-5　電解質分野の中国の電池関連特許取得数（2010-2021 年）

タイプ	合計	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
フッ化物型全固体電池（電池一般）	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
硫化物型全固体電池（電池一般）	2(3)	-	-	-	-	-	-	(1)	-	(2)	1	-	1
酸化物型全固体電池（電池一般）	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
濃厚電解液（電池一般）	11	-	-	1	-	-	1	1	2	2	2	1	1
厚濃度電解液（蓄電池関連）	0(1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(1)
ポリマー電解質（電池一般）	634	13	14	16	19	31	30	67	47	51	86	100	160
ポリマー電解液（蓄電池関連）	17	-	-	-	1	-	1	1	2	2	3	5	2

※（）は特許出願数
出典：CPRS データベースより筆者作成

表 3-5 に示すよう、全固体電池の電解質において、硫化物電解質、酸化物電解質に関する電池全体の特許は数件程度取得されているが、蓄電池関連の特許はない。フッ化物型全固体電池の特許は、出願数も取得数も 0 となっている。電解質分野において、ポリマー電解液の特許は最も多く、そのうち、17 件の蓄電池関連特許も取得されている。高濃度電解液の特許数は少なく、蓄電池関連の特許は 1 件のみ出願されているが、特許取得数はまだない。

表 3-6　負極分野の中国の電池関連特許取得数（2010-2021 年）

タイプ	合計	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
シリコン負極電池（電池一般）	94	-	-	2	1	-	1	7	2	6	14	14	47
シリコン負極電池（蓄電池関連）	2	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-
マグネシウム金属電池（電池一般）	15	-	-	-	1	-	2	1	1	-	2	2	6
マグネシウム金属電池（蓄電池関連）	2	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-
黒鉛負極電池（電池一般）	245	3	-	1	3	16	17	23	27	25	25	39	66
黒鉛負極電池（蓄電池関連）	8	-	-	-	-	-	-	1	-	2	-	3	2
ナトリウム金属電池（電池一般）	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2
ナトリウム金属電池（蓄電池関連）	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
酸化物負極電池（電池一般）	44	-	1	-	2	1	2	6	8	5	7	9	3
酸化物負極電池（蓄電池関連）	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
金属負極電池（電池一般）	159	1	-	-	-	2	3	7	7	1	13	39	86
金属負極電池（蓄電池関連）	10	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	2	6
リチウム金属電池（電池一般）	85	-	-	-	-	-	-	-	-	2	8	18	57
リチウム金属電池（蓄電池関連）	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-

出典：CPRS データベースより筆者作成

表 3-6 に示すよう、中国では黒鉛負極電池、金属負極電池の関連特許は近年急に増えており、そのうち 10 件程度は蓄電池関連の特許である。他のシリコン負極電池、マグネシウム負極電池、酸化物負極電池、リチウム金属電池の場合、特許の本数が徐々に増加し、蓄電池関連特許も数件程度の取得である。

表 3-7　添加剤分野の中国電池の特許取得数（2010-2021 年）

タイプ	合計	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
分散剤（電池一般）	1,121	6	14	20	27	51	85	113	123	109	117	214	242
分散剤（蓄電池関連）	31	-	-	-	1	1	-	1	2	4	9	6	7
導電助材（電池一般）	99	-	-	1	1	2	5	11	15	17	11	17	19
結着剤（電池一般）	2,751	20	23	43	59	82	166	234	298	239	320	531	736
結着剤（蓄電池関連）	123	-	-	-	4	3	10	12	15	10	13	23	33

出典：CPRS データベースより筆者作成

表 3-7 に示すよう、電池の添加剤において、結着剤や分散剤に関する特許の蓄積が多く、そのうち蓄電池関連の特許も多数取得されている。導電助剤においては、特許取得数がまだ少ない。興味深いことに、導電助剤の中国特許の大半は日本企業の現地法人 (上位 3 社を例として、日産自動車株式会社、株式会社半導体エネルギー研究所、トヨタ自動車株式会社) が取得している。

表 3-8　現象解析・構造解析分野の中国の電池関連特許取得数（2010 － 2021 年）

タイプ	合計	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
膨張収縮	46	-	-	2	3	2	4	2	7	5	4	5	12
電子伝導（電池一般）	225	2	2	1	7	9	12	20	13	22	23	56	58
電子伝導（蓄電池関連）	20	-	-	-	2	1	1	3	2	-	1	5	5
イオン伝導（電池一般）	347	6	5	6	15	15	26	27	31	29	38	56	93
イオン伝導（蓄電池関連）	14	-	-	1	1	1	2	1	1	2	-	2	3
デンドライト析出（電池一般）	672	10	6	15	11	16	14	27	41	43	73	137	279
デンドライト析出（蓄電池関連）	28	-	-	-	-	-	1	2	3	1	3	7	11
界面（電池一般）	63	-	-	-	-	-	3	7	6	5	12	12	18
界面（蓄電池関連）	1	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-

出典：CPRS データベースより筆者作成

表 3-8 に示すよう、中国では、電池の安定性、安全性及び効率にかかわる諸現象の解析において、デンドライト析出に関する特許取得数が最も多く、そのうち蓄電池関連の特許も取得されている。電子伝導やイオン伝導において、電池全体の関連特許はある程度蓄積されているが、蓄電池関連の特許は 20 件程度にとどまっている。電池の膨張収縮現象に関する特許取得数はまだ少ない。

また、上記の 30 要素技術領域において、蓄電池関連の「リチウムイオン電池」、「ナトリウムイオン電池」、「リチウム硫黄電池」、「結合剤」、「分散剤」、「デンドライト析出」など 25 件以上の特許が蓄積されている領域を抽出し、関連出願人情報を整理する。

表 3-9 リチウムイオン電池特許における出願人状況（Top10）

順位	出願人	機関別	特許取得数
1	上海動力儲能電池系統工程技術有限公司	民間企業	9
2	上海空間電源研究所	国有企業	6
3	深圳市貝特瑞新能源材料股份有限公司	民間企業	4
4	江蘇峰谷源儲能技術研究院有限公司	民間企業	3
5	東方醒獅儲能電池有限公司	民間企業	2
6	南開大学	大学	2
7	国家電网有限公司	国有企業	2
8	無錫同春新能源科技有限公司	民間企業	2
9	浙江南都電源動力股份有限公司	民間企業	2
10	上海大学	大学	1

出典：CPRS データベースより筆者作成

図 3-12 リチウムイオン電池特許における出願状況（Top10）の位置

表 3-9 に示すよう、中国の蓄電池用のリチウムイオン電池に関する特許は、主に民間企業が所有している。2 位の上海空間電池研究所は、中国航天科学技術集団有限公司（国有企業）の傘下にあり、衛星用電池の研究開発からスタートした研究所である。第 7 位の国家電網は蓄電池全体において存在感を示しているものの、リチウムイオン電池において特許取得数はまだ少ない。図 3-12 に所在地を示す。

表 3-10 ナトリウムイオン電池特許における出願人状況（Top10）

順位	出願人	機関別	特許取得数
1	中南大学	大学	6
2	華中科学技術大学	大学	3
3	陝西科学技術大学	大学	3
4	上海交通大学	大学	2
5	上海紫剣化工科学技術有限公司	民間企業	2
6	中国科学院化学研究所	国研	2
7	北京化工大学	大学	2
8	北京理工大学	大学	2
9	南開大学	大学	2
10	呂宜媛	個人	2

表 3-10 に示すよう、中国の蓄電池用のナトリウムイオン電池に関する特許は、5 位の民間企業を除いて、主に大学と研究機関が所有している。図 3-13 に所在地を示す。

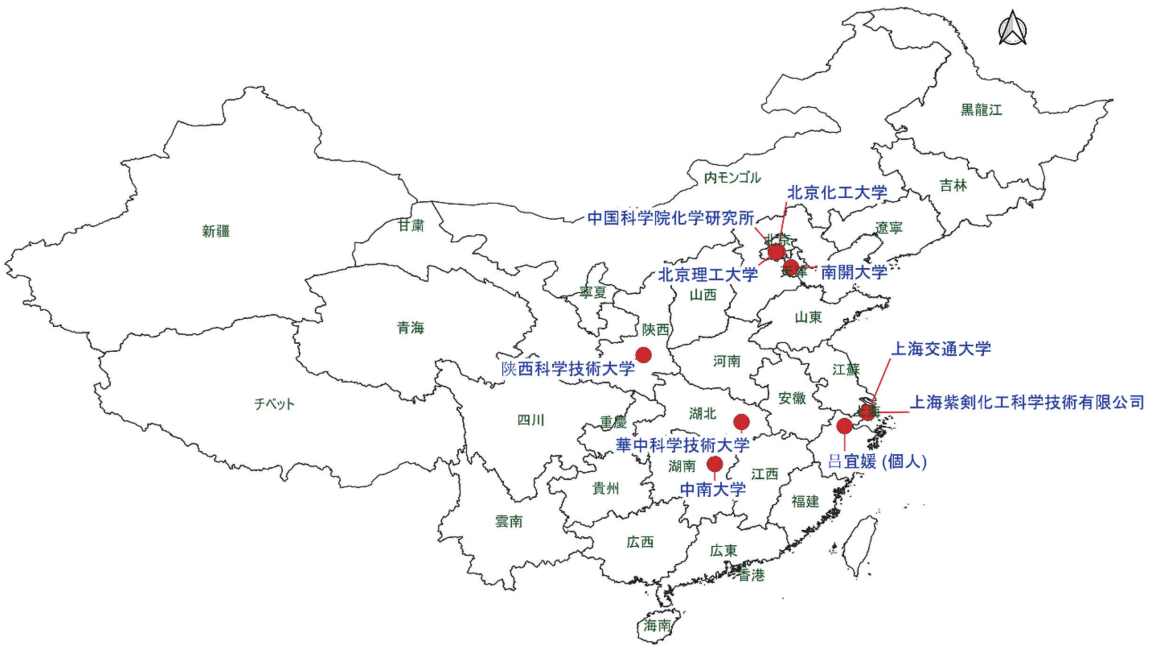


図 3-13　ナトリウムイオン電池特許における出願人（Top10）の位置

表 3-11　リチウム硫黄電池関連特許における出願人状況（Top10）

順位	出願人	機関別	特許取得数
1	北京理工大学	大学	8
2	華南師範大学	大学	3
3	大連理工大学	大学	3
4	浙江理工大学	大学	3
5	中南大学	大学	2
6	中国科学院金属研究所	国研	2
7	中国科学院青島生物能源と過程研究所	国研	2
8	中山大学	大学	2
9	合肥国軒ハイテク動力能源有限公司	民間企業	2
10	陝西科学技術大学	大学	2

出典：CPRS データベースより筆者作成

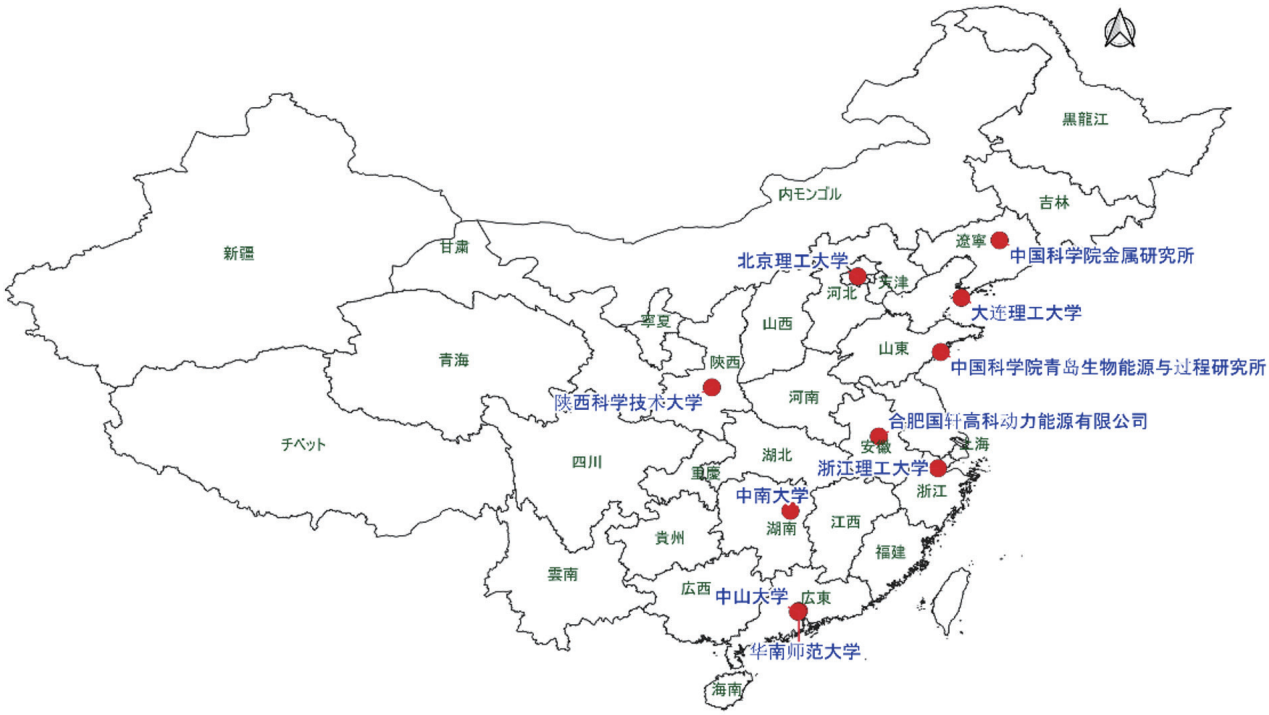


図 3-14　リチウム硫黄電池関連特許における出願人（Top10）の位置

表 3-11 や図 3-14 に示すよう、中国の蓄電池用リチウム硫黄電池の開発は、主に大学と国立研究機関で行われている。

一方、表 3-12、13、14 で示すよう、蓄電池用結着剤、分散剤、デンドライト析出の関連特許は、主に民間企業が所有している。図 3-15、16、17 に、それぞれの所在地を示す。

表 3-12　蓄電池用結着剤関連特許における出願人状況（Top10）

順位	出願人	機関別	特許取得数
1	寧夏漢堯グラフェン儲能材料科技有限公司	民間企業	8
2	南開大学	大学	5
3	寧波中車新能源科技有限公司	国有企業	5
4	寧夏航漢グラフェン技術研究院	民間企業	4
5	寧徳時代新能源科技股份有限公司（CATL）	民間企業	4
6	中国科学院大連化学物理研究所	国研	3
7	北京化工大学	大学	3
8	北京好風光儲能技術有限公司	民間企業	3
9	北京理工大学	大学	3
10	天目湖先進儲能技術研究院有限公司	民間企業	3

出典：CPRS データベースより筆者作成

図 3-15　蓄電池用結着剤関連特許における出願人（Top10）の位置

表 3-13　蓄電池用分散剤関連特許における出願人状況（Top10）

順位	出願人	機関別	取得特許数
1	吉林省凱禹電化学儲能技術発展有限公司	民間企業	3
2	寧夏漢堯グラフェン儲能材料科技有限公司	民間企業	3
3	中南大学	大学	2
4	上海大学	大学	1
5	上海工程技術大学	大学	1
6	上海玖銀電子科技有限公司	民間企業	1
7	中信国安盟固利動力科技有限公司	国有企業	1
8	中国工程物理研究院レーザ核融合研究センター	国有企業	1
9	先進儲能材料国家工程研究センター	国有企業	1
10	協鑫集成科技股份有限公司	民間企業	1

出典：CPRS データベースより筆者作成

図 3-16　蓄電池用分散剤関連特許における出願人（Top10）の位置

表 3-14　蓄電池のデンドライト析出関連特許における出願人状況（Top10）

順位	出願人	機関別	取得特許数
1	北京好風光儲能技術有限公司	民間企業	6
2	海洋王照明科技股份有限公司	民間企業	2
3	深圳市海洋王中王照明工程有限公司	民間企業	2
4	深圳市海洋王照明技術有限公司	民間企業	2
5	中南大学	大学	2
6	中国科学院物理研究所	国研	1
7	中国科学院蘇州ナノ技術とナノバイオニック研究所	国研	1
8	華中農業大学	大学	1
9	華南理工大学	大学	1
10	協能済（北京）儲能科技有限公司	国研	1

出典：CPRS データベースより筆者作成

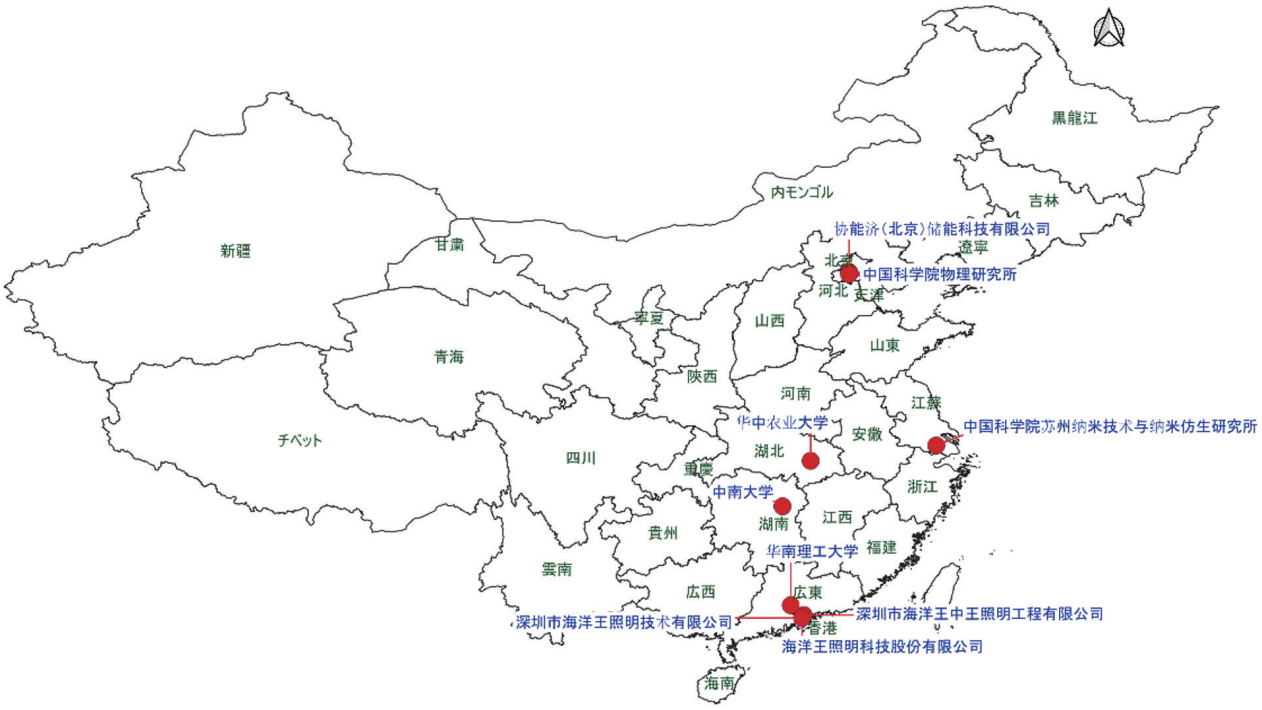


図 3-17　蓄電池のデンドライト析出関連特許における出願人（Top10）の位置

3.3 中国における蓄電池技術の研究助成

3.3.1 研究機関を中心とする研究助成プログラム

前述したように、中国の蓄電池関連の研究開発は盛んに行われ、2010 － 2021 年で中国からは 25,204 本の研究論文が投稿されており、そのうち、ほとんどが大学や中国科学院などの研究機関によるものである。なお、これらの研究を推進しているのは、下記表 3-15 のような研究助成プログラムである。

表 3-15 中国の蓄電池研究関連の研究助成プログラム

助成プログラム	論文数	シェア
国家自然科学基金（NSFC）	17,947	70.6%
国立大学科学研究補助金	3,068	12.1%
国家重点研究開発計画	2,094	8.2%
国家重点基礎研究発展計画（973 計画）	1,737	6.8
中国ポスドク科学基金	1,728	6.8%
江蘇省自然科学基金	873	3.4%
中国科学院	789	3.1%
国家留学基金（教育部）	678	2.7%
教育部 111 プロジェクト	606	2.4%

出典：Web of Science Core Collection より筆者作成

そのうち、日本学術振興会（JSPS）の科研費に相当する中国国家自然科学基金（NSFC）は、研究全体の 7 割を支援している。その他は、教育部と科学技術部の関連プログラムと地方自然科学基金及び中国科学院からの支援となっている

3.3.2 企業を中心とする研究助成プログラム

近年、中国はカーボンニュートラルの目標を掲げ、イノベーションの創出を目指す戦略的研究プログラムである「国家重点研究開発計画」において、蓄電池関連着技術の助成を行われている。2021 年から実施されたこの重点計画は、1 プロジェクトあたり 3 － 4 年で、合計約 3,000 万元（6 億円）程度が支援される。支援対象は、表 3-16 および図 3-18 に示すように企業が中心である。

表 3-16　国家重点研究開発計画（蓄電池関連技術助成）

課題番号	研究テーマ	研究機関	期間
2021YFB2400100	Gワット級リチウム蓄電池システム	寧徳時代新能源科技股份有限公司	4年
2021YFB2400200	Gワット級リチウム全固体蓄電池システム	天津栄盛盟固利新能源科技有限公司	4年
2021YFB2400300	安全な金属硫化物蓄電池	上海交通大学	4年
2021YFB2401500	ドライ式直流キャパシター電解質膜材料	清華大学	4年
2021YFB2401800	蓄電池老化分析及び寿命予測技術	国家電網中国電力科学研究院有限公司	4年
2021YFB2401900	リチウムイオン電池のセンシング	北京理工大学	4年

出典：国家重点研究開発計画関連 HP により筆者作成

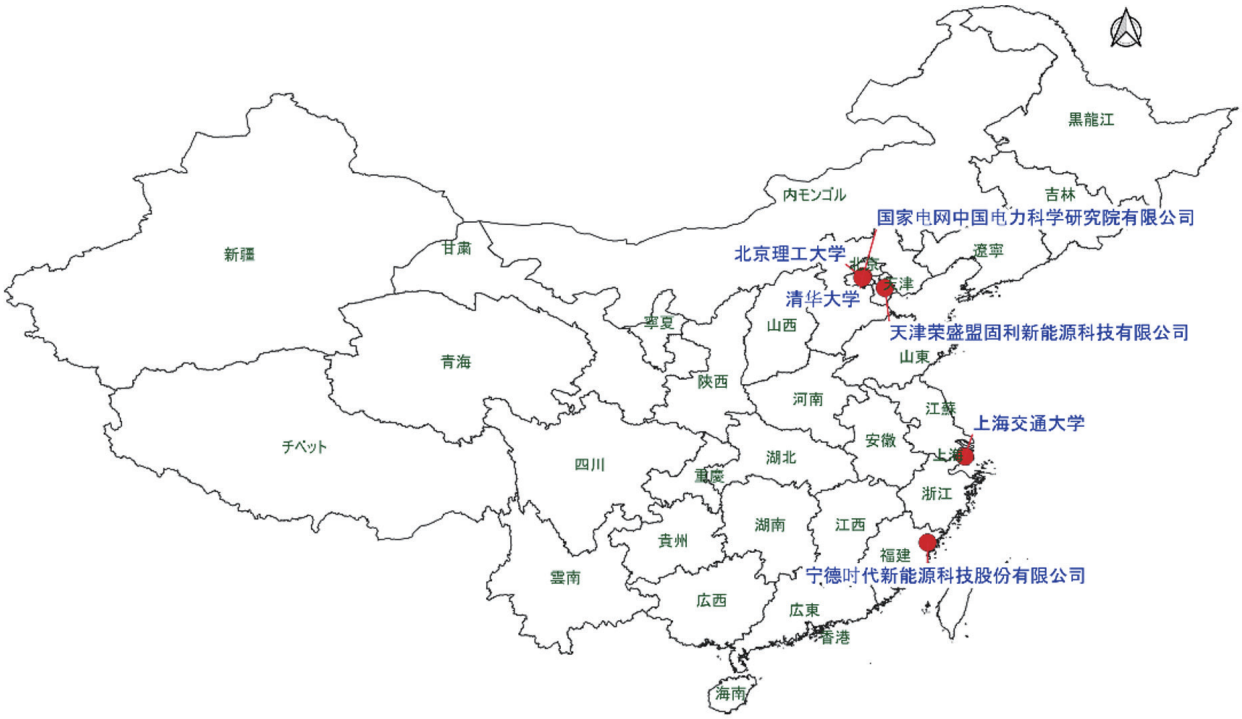


図 3-18　国家重点研究開発計画（蓄電池関連技術助成）の位置

3.4 まとめ

本章では、中国の蓄電池関連技術の研究開発状況について、2010 – 2021 年の論文と特許データによる量的分析を行った。中国の論文数急増の背景には、表 3-14 のような国家研究助成プログラムが数多く実施されている影響が大きい。

中国科学院や南開大学、北京理工大学、上海交通大学などのトップ大学は、論文数と特定領域の特許数とも多く、産学連携による技術移転やスタートアップが活発に行われている。関連技術領域の特許数をみると、各種蓄電池システムにおいて、国有企業と民間企業の間でトップを争っており、リチウム硫黄電池のような先進材料系領域では、大学の方は開発力が強い。

中国は、2060 年までにカーボンニュートラル目標の実現にむけて、再生エネルギーの普及を力強く推進していく中、巨大な蓄電池市場の創出が期待されている。どのタイプの蓄電池が最終的に主流になるのかがまだ明確ではないが、中国の発展動向は世界に大きな影響を与えるに違いない。

参考資料・文献

「国家重点研究開発プログラム エネルギーストレージとスマートグリッド技術助成リスト」
http://www.cnqingdan.com/index.php?m=information&a=fileview&id=6326&infoid=6050&cate=2

4　中国における次世代ナトリウムイオン電池技術の研究開発の動向

4.1　ナトリウムイオン電池技術の研究開発の概要

4.1.1 ナトリウムイオン電池の概要

1970 年代末、リチウム電池の研究と時を同じくして、ナトリウムイオン電池技術の研究もすでに行われていた。ナトリウムイオン電池はリチウムイオン電池と同じく、電解液、正極材・負極材、セパレータで構成されている。また、両者は類似したイオンの挿入・脱離メカニズムを有し、充放電の過程で、ナトリウムイオンがロッキングチェアのように正極／負極間を行き来し、電子が外部回路を移動することで、化学エネルギーと電気エネルギーの相互転化を実現した。ナトリウムイオン電池のエネルギー密度はまだリチウムイオン電池には及ばないが、その豊富な埋蔵量と安価なコストという利点は、大規模なエネルギー貯蔵の発展に大いに役立つ。なにより、資源の埋蔵量とコストの優位性のほか、ナトリウムイオン電池は次の点においてもリチウムイオン電池より優れている。

（1）集電体材料

リチウムとアルミニウムは低電位で合金化反応が生じるため、リチウムイオン電池は集電体に銅を選択するほかない。しかし、ナトリウムとアルミニウムの場合は低電位で合金化反応を起こさないので、ナトリウムイオン電池は安価なアルミニウムを集電体に採用することができ、全体コストをより低減できる［1］。

（2）界面のイオン拡散能力

ナトリウムイオンの溶媒和自由エネルギーはリチウムイオンより低いため、界面でのイオンの拡散能力がより優れている。

（3）イオン導電率

ナトリウムイオンのストークス径はリチウムイオンより小さいため、同濃度の電解液はリチウム塩電解液よりもイオン導電率が高い。

（4）高低温特性

現時点での基本的な高低温試験結果によると、ナトリウムイオン電池の高低温特性はリチウムイオン電池よりも優れている。

（5）安全性

ナトリウムイオン電池の内部抵抗はリチウムイオン電池よりやや高いが、短絡（ショート）が生じた場合の瞬間的発熱量が少なく、温度上昇が小さいため、安全性がより高い。

他の電池に比べて、ナトリウムイオン電池にはもうひとつ欠かせないアドバンテージがある。それは、ナトリウムイオン電池の構造と動作原理がリチウムイオン電池と類似しているため、リチウムイオン電池の成熟した製造技術を活用して、その発展と応用を加速化できる点である。ナトリウムイオン電池は、リチウムイオン電池の関連分野を補完する役割を十分に担うことができる。特に、中低速電気自動車（EV）、大規模なエネルギー貯蔵（民間用通信基地局、データセンター、バックアップ電源、ユーザー側の家庭用エネルギー

貯蔵、電力網側の大型エネルギー貯蔵）などの分野で、その強みを発揮することが期待されている。

近年、中国のナトリウムイオン電池の研究開発の進展は非常に速く、学術界と産業界の参加熱が高まってきている。学術界では、2010 年からナトリウムイオン電池の研究が再び見直され、関連論文の発表数が急増した。その主な理由は 2 つ考えられ、第一に、リチウムイオン電池材料の研究が日増しに成熟していることが挙げられる (図 4-1)。当時の研究は主に材料の応用・改善および電気化学過程の高度な分析に集中しており、新材料の開発難度は明らかに高まっていた。そのため、多くの研究者がナトリウムイオン電池の材料の模索に転向したのである。第二に、世界的なリチウム資源不足への懸念、新しい大規模エネルギー貯蔵への応用ニーズである。これらの要因もまた、研究者に新規の電池システムの開拓を促した。リチウムイオン電池分野に蓄積された豊富な研究開発の成果をもとに、ここ数年、ナトリウムイオン電池は急速に進歩しており、さまざまな正・負極材や電解質などが次々と報告されている。

報告に挙がった正極材は、おもに層状・トンネル状の遷移金属酸化物、ポリアニオン化合物、プルシアンブルー類似体（PBA）、有機材料などである。負極材には、炭素材料、合金、リン化物、有機カルボン酸塩などが挙げられる。新材料の研究に加え、ナトリウムイオン電池自体についても低コスト化・実用化に向けた研究開発に取組んでいる。

一方、2011 年に駒場ら［2］が、世界で初めてハードカーボン ‖ NaNi0.5Mn0.5O2 フルセル（全電池）の性能について報告を行った。この成果によって、産業界では同年、世界初のナトリウムイオン電池会社として、イギリスに Faradion 社が設立された。2013 年、アメリカの Goodenough 社など［3］が、高電圧かつレート特性に優れたプルシアンホワイトを使用した正極材を打ち出した。2014 年には、胡勇勝ら［4］が、層状酸化物中に Cu3+/Cu2+ 酸化還元対の電気化学活性を初めて発見し、低コストの Cu 系正極材を設計および調製した［5］。続いて 2016 年にも胡ら［6］は、安価な無煙炭で調製したナトリウムイオン電池負極用の非晶質炭素材を発表した。こうした正・負極の基幹材料の研究開発成果をもとに、2017 年、中国初となるナトリウムイオン電池の研究開発および製造会社である中科海鈉科技有限責任公司（HiNa Battery）を設立し、世界初のナトリウムイオン電池を搭載した低速電気自動車、ナトリウムイオン電池を利用した 1MWh エネルギー貯蔵発電所を相次いで発表した［7］。それと同時に、大型エネルギー貯蔵システム用のナトリウムイオン電池の安全性を高める研究開発も並行して行っている。また、有機電解液の代わりに水系電解液と固体電解質をそれぞれ使用した水系ナトリウムイオン電池、固体ナトリウムイオン電池の開発を進めている。

中国において、新型エネルギー貯蔵技術は、新型電力システムを構築する重要な技術および基礎設備であり、「CO_2 排出量ピークアウト」「カーボンニュートラル」の目標を達成するための重要な支えとなっている。中国科学技術部はスマートグリッド重点特別プロジェクトのエネルギー貯蔵方向性に関する第 13 次 5 カ年計画において、ナトリウムイオン電池を「新型エネルギー貯蔵装置の基礎科学と将来技術研究」[64]の最重要項目としている。2021 年 7 月、国家発展改革委員会と国家エネルギー局は、「新型エネルギー貯蔵発展の推進加速に関する指導意見」[65]を公布し、エネルギー貯蔵産業体系の強化発展、ナトリウムイオン電池技術の大規模なモデル試行とその加速化など、科学技術イノベーション能力の向上に向けた方針を強く打ち出した。

[64] http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm

[65] https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202107/t20210723_1291321.html

第 13 次 5 カ年計画以降、中国の新型エネルギー貯蔵業界は、研究開発モデルから商業化初期への移行の過程にあり、技術設備の研究開発、モデルプロジェクトの建設、ビジネスモデルの模索、政策体系の構築などの面で実質的な進展を遂げている。新型エネルギー貯蔵の応用市場規模は着実に拡大し、エネルギー転換を支える役割を果たし始めた。前述した第 14 次 5 カ年計画の新型エネルギー貯蔵発展実施案の中で、新型エネルギー貯蔵のコア技術・設備のボトルネックを解消するため、ナトリウムイオン電池を第 14 次 5 カ年計画期間における重要な方向性のひとつとし、ナトリウムイオン電池による新型エネルギー貯蔵技術のモデル試行を要求する方針を打ち出した。このことから、ナトリウムイオン電池技術はすでに中国の国家発展の重大な戦略的需要となっていることが分かる。

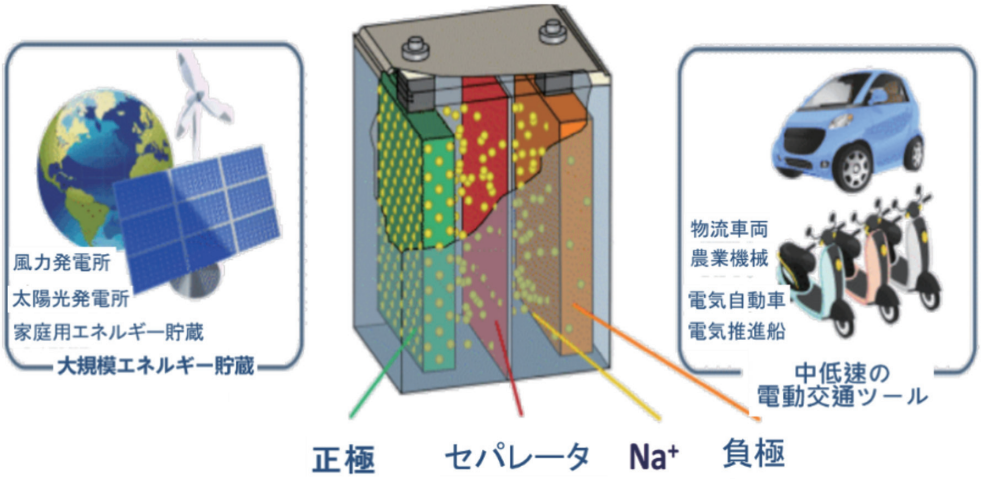


図 4-1　ナトリウムイオン電池の構造と主な応用分野

出典：中科海鈉科技有限公司[66]のサイトを基に一部改変して筆者が作成

4.1.2 主要なナトリウムイオン電池システム

現在、産業化の潜在力を持つナトリウムイオン電池システムは比較的多く、中国では多くの研究が進められ、多種の材料が並行して進歩している。正極材は層状酸化物［8-10］、ポリアニオン化合物［11］、プルシアンブルー・ホワイト類似体［12］などが主体で、代表的な層状酸化物は、銅・鉄・マンガン、ニッケル・鉄・マンガン、ニッケル・チタン・マンガンなどのおもに三元系材料である。ポリアニオン化合物には、リン酸バナジウムナトリウム、フッ素リン酸バナジウムナトリウム、複合リン酸鉄ナトリウム、硫酸鉄ナトリウムなどがあり、プルシアンブルー・ホワイト類似体は、鉄、マンガンなどが主となる。負極材はハードカーボン、ソフトカーボン、複合型非晶質炭素材などが主体である［13-15］。一方、電解質材料の溶媒・添加剤の構成要素はリチウムイオン電池と類似しているが、電極材によって整合する電解質溶媒が異なる。溶質の種類には NaClO4、NaPF6、NaFSI、NaTFSI などがあり、よく使われるのは NaPF6 である［16-17］。

[66] https://www.hinabattery.com/index.php?catid=12

4.2 ナトリウムイオン電池技術の産業の現状

4.2.1 ナトリウムイオン電池の産業化の状況

ナトリウムイオン電池は基礎研究から応用の段階へと徐々に移行しており、すでに世界の 20 社以上の企業がナトリウムイオン電池の産業化に向けた計画を実施し、飛躍的な進展をみせている。ナトリウムイオン電池の世界の主要企業・機関の中で代表的なのは、イギリスの Faradion、フランスの Tiamat、日本のキシダ化学株式会社、中国では中科海钠科技有限责任公司（HiNa Battery, 以後、中科海鈉とする）、浙江钠创新能源有限公司 (以後、鈉創新能源とする)、寧德時代新能源科技（CATL, 以後、寧德時代新能源とする）、中国科学院（CAS, 以後 CAS とする）大連化学物理研究所などである［18］。企業によって採用する材料の種類が異なり、正極材にはおもに酸化物、プルシアンブルー、ポリアニオン化合物の 3 種類が使用されている。

Faradion 社は、Ni-Mn-Ti 系の層状酸化物をベースに 10Ah ソフトパック電池の試作品を開発した。比エネルギーは 140Wh/kg を超え、放電深度（DOD）80% のサイクル試験による寿命予測は 1,000 回を上回る。中科海鈉は CAS の物理研究所を後ろ盾とし、層状酸化物をベースにナトリウムイオン電池の製品シリーズを開発した。比エネルギーは 140Wh/kg を超え、低速電気自動車、100kWh エネルギー貯蔵発電所、1MWh 太陽エネルギー貯蔵スマートマイクログリッドシステムに応用している。鈉創新能源が調製した Na［Ni1/3Fe1/3Mn1/3］O2 系層状酸化物を用いたナトリウムイオンソフトパック電池は、比エネルギーは 100 ～ 120Wh/kg、1,000 サイクル経過時の容量維持率は 92% を上回った。寧德時代新能源が 2021 年 7 月に発表したプルシアンホワイト系セルの比エネルギーは 160Wh/kg に達した。Tiamat 社は、5 分で急速充電が可能なフッ素リン酸バナジウムナトリウム系セルを開発した。比出力は 2 ～ 5kW/kg に達するが、比エネルギーは 90Wh/kg とやや低い。ここ数年、CAS 大連化学物理研究所はリン酸塩系ポリアニオン化合物正極にもとづき、比エネルギー約 127Wh/kg のリン酸バナジウムナトリウム系ソフトパック電池、比エネルギー 143Wh/kg 以上かつ 6 分で急速充電可能なフッ素リン酸バナジウムナトリウム系ソフトパック電池を相次いで開発した。さらに、48V/10Ah リン酸塩ナトリウムイオン電池を利用したエネルギー貯蔵システムを構築し、低速電気自動車のバッテリーへの応用に成功している。

なかでも特筆すべきは、前述した CAS 物理研究所の胡勇勝が率いる研究開発チームが、ナトリウムイオン電池の基礎研究と産業化の両面において、世界のトップレベルに肩を並べつつある点である。ここ数年で一連の研究は飛躍的に前進し、とくに 2020 年には、ナトリウムイオン電池正極材の理論研究にて大きなブレイクスルーを成し遂げた。「陽イオンポテンシャル（Φ cation）」という可変パラメータを設定することで、O3 型・P2 型構造間の競争的相互関係を把握し、この 2 つの構造を識別できる「状態図」を作成した。これは、層状酸化物正極材の仮説を立て設計する新しい方法で、低コストかつ高性能の正極材開発へ理論的根拠を提供する。この研究成果は、「Rational design of layered oxide materials for sodium-ion batteries」[67]と題し、Science 誌に掲載された。創刊 100 年あまりを経て、同誌が初めてナトリウムイオン電池分野に関する論文を掲載したことは、世界の主流の科学界がこの技術的ブレイクスルーを重視しているほかならないだけでなく、ナトリウムイオン電池の最先端研究および技術が世界トップレベルに肩を並べたことを意味する (図 4-2)。

[67] https://www.science.org/doi/10.1126/science.aay9972

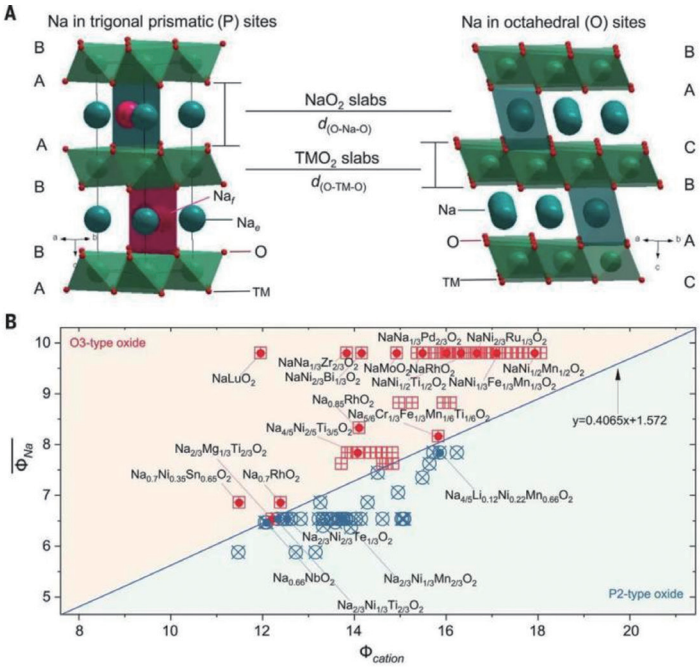


図 4-2　陽イオン電位とナトリウムイオン層状酸化物における応用[68]

これまでに開発した層状酸化物正極材、無煙炭系負極材、ナトリウムイオン電池技術に基づき、2021 年 6 月 28 日に胡の研究チームはナトリウムイオン電池を使用した 1MWh 太陽エネルギー貯蔵スマートマイクログリッドシステムを完成し、山西省・太原市の国家総合改革モデル区で正式に稼働を開始させた (図 4-3)。[69] このシステムは、CAS 物理研究所が独自に開発したナトリウムイオン電池をエネルギー貯蔵の中核に置き、商用電源、太陽光発電、充電施設を組み合わせてマイクログリッドを構成し、自己制御・保守・管理を確立したものである。柔軟な運行モデルとディスパッチ（給電指令）能力を持ち、大規模な電力網に組み入れても、独立した運行でも可能である。これは中国がナトリウムイオン電池技術の産業化において、世界の先頭を走りはじめていることを示すと同時に、ナトリウムイオン電池の商業化への応用をさらに促進する。

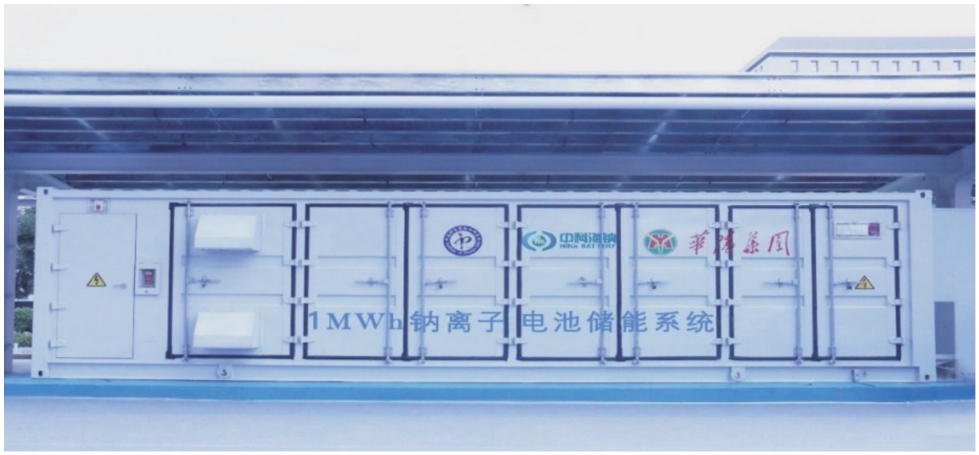


図 4-3　世界初の 1MWh ナトリウムイオン電池エネルギー貯蔵システム[70]

[68] Zhao et al., (2020) : Rational design of layered oxide materials for sodium-ion batteries, SCIENCE, Vol.370, Issue 6517, pp.708-711.
[69] http://www.iop.cas.cn/xwzx/snxw/202106/t20210628_6118350.html
[70] https://www.hinabattery.com/index.php?id=181

4.2.2 ナトリウムイオン電池の産業チェーン企業

新規電池の技術ルートとして、ナトリウムイオン電池の産業チェーンは、資源開発企業及び電池材料・セルメーカーなどで構成される。具体的な機関を下記に示す (図 4-4)。

(1) ナトリウムイオン電池の技術開発型企業：寧徳時代新能源、北京中科海鈉、浙江鈉創新能源、遼寧星空鈉電、鵬輝能源、猛獅科技、聖陽股份、武漢中原科技、欣旺達など
(2) ナトリウムイオン電池企業の持株会社または投資会社：華陽股份、浙江医薬、新築股份など
(3) ナトリウムイオン電池材料の技術開発・製造企業：負極材メーカーの翔豊華、正極材メーカーの容百科技、アルミ箔メーカーの鼎勝新材、南山鋁業、明泰鋁業、万順新材など
(4) ナトリウム資源の開発企業：中塩内蒙古化工、南風化工、百合花など

図 4-4　ナトリウムイオン電池の産業チェーン企業の位置

4.2.3. ナトリウムイオン電池が目指す応用市場

ナトリウムイオン電池は、エネルギー密度への要求がそれほど高くないシーンで、幅広く応用できると見込まれている。特に、現在のリン酸鉄リチウム電池が優位に立つ使用シーン、例えば、電動二輪車（電動自転車・電動バイクなど)、低速電気自動車、エネルギー貯蔵発電所、家庭用エネルギー貯蔵製品について、ナトリウムイオン電池が大規模に商業化すると、それらの市場の一角を占めることになる。

エネルギー貯蔵、電動二輪車、A00 クラス自動車の 3 つのシーンは、ナトリウムイオン電池の応用の将来性が高い分野で、この 3 大分野の 2025 年の中国における電池需要は合わせて 123GWh に達する見通しである。エネルギー貯蔵の設備容量、電動二輪車のバッテリー容量、A00 クラス自動車の動力バッテリー容量に対し、2020 年の電池需要はそれぞれ約 17GWh、32GWh、7GWh であったが、2025 年には、それぞれ 48GWh、41GWh、34GWh に到達すると推定される。この 3 大分野で、いずれもリン酸鉄リチウム電池が使用されると想定した場合、2021 ～ 2025 年の市場規模はそれぞれ 408 億元、510 億元、545 億元、532 億元、

537 億元（約 1 兆円）規模となる見通しである。[71]

現在のナトリウムイオン電池の技術成熟度と製造規模を考慮すると、まず、低速電気自動車分野の応用市場から開発を切り込むのが良いとみられ、その後、製品技術の成熟度の向上、産業のさらなる規範化・標準化に伴い、ナトリウムイオン電池の応用と産業化は急速な発展期を迎え、そこでエネルギー貯蔵分野の応用市場へ段階的に進出する。また、産業チェーンの不完全さ、製造コストの高さなどの要因で、目下、ナトリウムイオン電池の実際に発生する生産コストは 1 元 /Wh を上回っている。産業化が順調に進み、生産能力が GWh レベルに到達した時、ナトリウムイオン電池の設備投資を減価償却できるため、本来の材料コストが低いという利点が顕在化する（正極材・負極集電体材の価格優位性から、ナトリウムイオン電池の材料コストはリン酸鉄リチウム電池より約 30% 低い）。エネルギー貯蔵、電動二輪車、A00 クラス自動車などの分野で、ナトリウムイオン電池はリン酸鉄リチウム電池の代替となることが期待されている。

4.2.4 ナトリウムイオン電池の開発が直面する課題

ナトリウムイオン電池の構造と動作原理は、リチウムイオン電池と類似しているため、規模拡大と産業化において、リチウムイオン電池の製造工程を参考にすることができる。そのため、産業化の段階に入るまでの期間が短いといえる。しかし、両者にも異なる点は多く、例えば、ナトリウムイオン電池の負極材にはアルミ箔による集電体などを用いるなど、電極材の種類に大きな違いがあり、ナトリウムイオン電池の産業化の過程には、依然として数多くの問題点や課題が存在している。

(1) 正・負極材の最終的な統一基準が決定されていない問題がある。正極材は酸化物・ポリアニオン化合物・プルシアンブルーの 3 種類が主体で、それぞれに属する正極の種類も多い。各種材料は早急に解決すべき問題を抱えている。例えば、酸化物は大気中の貯蔵安定性がやや劣るという問題点があり、プルシアンブルーはその合成過程で不具合や結合水の問題が発生しやすく、いずれも電池性能に影響を及ぼす。負極によく用いられるハード・ソフトカーボン材は、中国の製品性能指標が低すぎるために、日本やフランスなどが開発した非晶質炭素材に比べて、電池の初期使用効果と比エネルギーが非常に低い。負極材の研究開発力をさらに強化する必要性がある。
電解質の場合は、溶媒や添加剤の構成要素はリチウムイオン電池と似ているものの、材料ごとに整合する電解液が異なる点を考えると、やはり基準となる設計指導原則が欠けている問題がある。とくに、溶媒和構造の観点から、それぞれの電解液の電池界面での電気化学反応、脱溶媒和過程と電池性能との構造活性相関（SAR）に対する理解が不足している。
(2) ナトリウムイオン電池に使用する電極材と関連補助材は、リチウムイオン電池の使用材料とすべて一致するとは限らないため、両者の単セル集成やシステム集積のプロセスにはいくらかの違いがある。システムの研究をさらに積み重ねる必要性がある。
(3) ナトリウムイオン電池の産業化の推進と加速には、整った産業チェーンの構築が必要となる。しかし、現状は、電解質や炭素系負極などに関わる段階が依然として規模化レベルが低く、不十分である。
(4) ナトリウムイオン電池の応用市場における位置づけをさらに細分化する必要がある。さらに、さまざまなエネルギー貯蔵システムの応用モデルを試行し、ナトリウムイオン電池の信頼性を検証することが急務である。

[71] http://www.dzzq.com.cn/bond/44627521.html

4.2.5 ナトリウムイオン電池の研究発展の方向性

これまで述べてきた問題点や課題について、ナトリウムイオン電池技術の重点的な発展の方向性は次の通りである。

(1) ナトリウムイオン電池の基幹材料（正・負極、電解液など）と基幹装置、システムインテグレーションなどの技術の研究開発力を強化する。比エネルギー・比出力・長寿命・安全性を高める基幹材料の合成技術と規模拡大化技術、高整合性・高信頼性の大容量セル組立技術、高エネルギー効率・高信頼性の 100kWh ～ 100MWh 級エネルギー貯蔵システムのシステム集積とスマート制御技術など、各種技術においてブレイクスルーを達成する。
(2) 各種の電極材を用いたナトリウムイオン電池をエネルギー貯蔵システムへ応用し、検証の推進を加速化する。各種の技術ルートを適切な分野に応用し、そのコストパフォーマンスと信頼性を比較する。ナトリウムイオン電池の応用分野に適した正・負極電極材、適合する電解液をスクリーニングする。
(3) ナトリウムイオン電池の正・負極、電解液、関連補助材の規模化レベルを高める。新エネルギー分野に関連するナトリウムイオン電池のエネルギー貯蔵応用モデルのニーズに応える。
(4) ナトリウムイオン電池技術に関する標準を制定する。業界と市場の規範化、製品の品質向上、市場の普及促進に力を入れる。ナトリウムイオン電池の産業化を推進し加速化する。

4.3 ナトリウムイオン電池の標準化の動向と展望

4.3.1 標準制定の必要性

ナトリウムイオンとリチウムイオンは、電池システムにおいて類似した挿入・脱離メカニズムを有する。ナトリウムイオン電池の研究開発が進み、リチウムイオン電池の代替となれば、リチウムの資源不足で新エネルギー電池の発展が制限されてしまう状況を緩和することができる。現時点では、エネルギー密度などの面でリチウムイオン電池とはまだ差があるものの、低速電気自動車や大規模エネルギー貯蔵への応用においては、コストと寿命の方がエネルギー密度より重要な指標である。そのため、ナトリウムイオン電池は低速電気自動車、大規模エネルギー貯蔵、5G 通信基地局、データセンターなどの応用分野で、リチウムイオン電池よりも市場の競争優位性が大きいと判断できる。近年、これらの応用分野は高度成長の様相を呈しており、ナトリウムイオン電池の独自の優位性により、その研究と産業化はかつてないチャンスを迎えている。ナトリウムイオン電池がターゲットとする各分野でのモデル応用に次々と成功し、関連製品も徐々に市場に参入し、関連産業は勢いを増している。こうした状況下において、ナトリウムイオン電池に関する基準を取り決めることが重要視されるのは明らかである。

しかしながら、ナトリウムイオン電池はまったく新しい化学的電源システムである一方で、市場に投入される際、中国のみならず、世界で使用可能な現行の製品標準や規範がまだない。これはナトリウムイオン電池の技術の進歩、産業の発展を大幅に制約する足枷となる。そこで、業界標準（デファクトスタンダード）とその対象国を制定し、ナトリウムイオン電池製品の検査の規範化、品質の標準化、市場秩序の適正化を行い、ナトリウムイオン電池技術の進歩を促進する必要を迫られている。

4.3.2 ナトリウムイオン電池の標準化の発展と展望

2021 年 12 月末、ナトリウムイオン電池の最初の業界標準「ナトリウムイオン二次電池共通仕様」[72]が正式に公布された。これは、中国科学院（CAS）物理研究所により提起され、中関村エネルギー貯蔵産業技術連盟（CNESA）標準委員会の審査を経て立案された。CAS 物理研究所を筆頭起草機関とし、中科海鈉科技有限責任公司（HiNa Battery）、上海交通大学、浙江鈉創新能源有限公司、CAS 大連化学物理研究所、国家電網北京市電力公司電力科学研究院、華為技術有限公司（Huawei）、寧徳時代新能源科技股份有限公司（CATL）、河南省法恩莱特新能源科技有限公司（Faenlaite）、湖南立方新能源科技有限責任公司、南方電網電力科技股份有限公司などが起草に参加した。本標準では、ナトリウムイオン電池の型番命名、技術要件、試験方法、検査規則・指標、包装、輸送・貯蔵などの共通した要求事項を規定している。業界専門用語が規格化され、企業は共通の概念や意識を持つことができ、大規模化によるコスト低減を実現し、市場ニーズを満たすなど、業界を牽引する役割を果たす。

今後は、ナトリウムイオン電池の標準体系、例えば、材料製品、電池製品、検査方法、維持管理、信頼性評価、安全、回収などの基準をより完全なものにしなければならない。とくに、安全基準は製品の品質をコントロールする重要な基準であり、市場秩序を適正化し、技術進歩を促進する重要な手段でもある。ここ数年、リチウムイオン電池技術が原因で発生した電気自動車の事故の報告が多く、安全性はリチウムイオン電池の市場参入において考察すべき重要な指標のひとつとなった。また、中低速電気自動車分野での今後の普及が期待され、ナトリウムイオン電池の安全性に対する要求はさらに高まっている。そのため、関連する標準を制定し、市場に流通するナトリウムイオン電池製品の品質の確保と適正化がことさら重要となる。

参考資料・文献

[1] Baure A, Song J, Vail S. et al. (2018) "The scale-up and commercialization of nonaqueous Na-ion battery technologies", *Advanced Energy Materials*, 8 (17), doi: 10.1002/aenm.201702869.

[2] Komaba S, Murata W, Ishikawwa T. et al. (2011) "Electrochemical Na insertion and solid electrolyt interphase for hard-carbon electrodes and application to Na-ion batteries", *Advanced Functional Materials*, 21 (20), pp.3859-3867.

[3] Wang L, Lu Y, Liu J. et al. (2013) "A superior low-cost cathode for a Na-ion battery", *Angewandte Chemie International Edition*, 52 (7), pp.1964-1967.

[4] Xu S Y, Wu X Y Li Y M. et al. (2014) "Novel copper redox-based cathode materials for room-temperature sodium-ion batteries", *Chinese Physics* B, 23 (11), p.118202.

[5] Mu L, Xu S, Li Y. et al. (2015) "Prototype sodium-ion batteries using an air-stable and Co/Ni-free O3-layered metal oxide cathode", *Advanced Materials*, 27 (43), pp.6928-6933.

[6] Li Y. Hu Y S. Oi X. et al. (2016) "Advanced sodium-ion batteries using superior low cost pyrolyzed anthracite anode: towards practical applications", *Energy Storage Materials*, 5, pp.191-197.

[7] Lu Y X, Rong X H, Hu Y S. et al. (2019) "Research and development of advanced battery materials in China", *Energy Storage Materials*, 23, pp.144-153.

[72] http://www.iop.cas.cn/xwzx/snxw/202106/t20210628_6118350.html

[8] Xu S Y, Wu X Y, Li Y M. et al. (2014) "Novel copper redox-based cathode materials for room-temperature sodium-ion batteries", *Chinese Physics B*, 23 (11), doi: 10.1088/1674-1056/23/11/118202.

[9] Mu L Q, Xu S Y, Li Y M. et al. (2015) "Prototype sodium-ion batteries using an air-stable and Co/Ni free O3-layered metal oxide cathode", *Advanced Materials*, 27 (43), pp.6928-6933.

[10] Wang H, Liao X Z, Xie Y. et al. (2016) "Design and investigation on portable energy storage device based on sodium-ion batteries", *Energy Storage Science and Technology,* 5 (1), pp.65-68.

[11] Liu Z, Hu Y, Dunstan M T. et al. (2014) "Local structure and dynamics in the Na ion battery positive electrode material Na3V2 (PO4) 2F3", *Chemistry of Materials*, 26 (8), pp.2513-2521.

[12] Lu Y H, Wang L, Cheng J G. et al. (2012) "Prussian blue: A new framework of electrode materials for sodium batteries", *Chemical Communications*, 48 (52), pp.6544-6546.

[13] Li Y M, Hu Y S, Li H. et al. (2016) "A superior low-cost amorphous carbon anode made from pitch and lignin for sodium-ion batteries", *Journal of Materials Chemistry A*, 4 (1), pp.96-104.

[14] Meng Q S, Lu Y Q, Ding F X. et al. (2019) "Tuning the closed pore structure of hard carbons with the highest Na storage capacity", *ACS Energy Letters*, 4 (11), pp.2608-2612.

[15] Li Y M, Hu Y S, Qi X G. et al. (2016) "Advanced sodium-ion batteries using superior low cost pyrolyzed anthracite anode: Towards practical applications", *Energy Storage Materials*, 5, pp.191-197.

[16] Xu K. et al. (2004) "Nonaqueous Liquid Electrolytes for Lithium-Based Rechargeable Batteries", *ChemRev*, 104 (10), pp.4303-4417.

[17] Ponrouch A, Marchante E, Courty M. et al. (2012) "In search of an optimized electrolyte for Na-ion batteries", *Energy & Environmental Science,* 5 (9), pp.8572-8583.

[18] 周権等「ナトリウム電池の標準制定の必要性」(钠离子电池标准制定的必要性), エネルギー貯蔵科学と技術 (储能科学与技术), 9 巻 5 号. (In Chinese)

5　中国における次世代リチウム電池の電解液技術の研究開発の動向

5.1　リチウム電池の電解液の概要

リチウムイオン電池は、電解液、正極材・負極材、セパレータで構成されており、電解液はリチウムイオン電池の「血液」として機能する。正極 / 負極間でイオンを輸送して電子を遮断し、正極 / 負極間の電流経路を形成することで、スムーズに充放電を行うことができる。電解液は電池の作動反応のメカニズムにおいて決定的な役割を果たし、電池の比容量、レート特性、サイクル安定性、安全性に直接影響を与える［1］。リチウムイオン電池の電解液は状態別に、液体電解質（有機液体・イオン液体）、ゲルポリマー電解質、固体電解質（固体ポリマー･無機固体）と大きく 3 つに分けられる。リチウムイオン電池の理想的な電解液は、次のような特徴を備えている［2-4］。

（1）化学的安定性に優れ、電池の正・負極材、集電体、セパレータなどと基本的には反応しない。
（2）広い電位窓で電気化学的に安定し、電気分解することなく、広範な電圧範囲で電池を正常に作動させる。
（3）広範な温度範囲で高いイオン導電率を有し、リチウムイオンの移動率が極めて高く、粘度が低い。
（4）造膜性、熱安定性に優れている。
（5）引火点・発火点が高く、安全性に優れている。
（6）低毒性で環境に優しい。

なかでも、長期にわたって研究が行われている有機液体電解質は、最も高度化が進んでいる。固体やゲル状の電解液はイオン導電率が低く、レート特性に劣るなどの欠点があるため、中国市場では、現状のリチウムイオン電池のほとんどが有機液体電解質を採用している。

5.2　電解液の成分と特徴

中国のリチウムイオン電池の有機液体電解質は、一般的にリチウム塩、有機溶媒、添加剤からなる。リチウム塩に最もよく用いられるのは、六フッ化リン酸リチウム（ヘキサフルオロリン酸リチウム：$LiPF_6$）である。有機溶媒はおもに炭酸エステル系、エーテル系、カルボン酸エステル系に分けられる。添加剤は機能別に、導電助剤、造膜助剤、過充電防止剤、難燃剤など多種に分類される。

5.2.1 電解質：リチウム塩

電解質のリチウム塩は、電池性能の優劣を大きく左右する。実際の応用に向けたリチウムイオン電池のリチウム塩は、次の要件を満たさねばならない［5］。
（1）高い導電率、広い電位窓を有する。
（2）化学的安定性、熱安定性に優れている。
（3）有機溶媒への溶解度・解離度が高く、溶解性に優れている。

(4) 環境との親和性が高く、分解生成物の環境への影響が比較的小さい。

(5) 調製・精製が容易で、生産コストが低い。

中国のリチウムイオン電池分野にて、現状で最も多く使用されているリチウム塩は $LiPF_6$ である。純粋な $LiPF_6$ は白色結晶をしており、正・負極材との相溶性が良い、アルミニウム箔を腐食しない、有機溶媒中で適度な溶解度と高導電率を有するという長所があり、そのうえ低コストである。しかし、熱安定性にやや劣るという欠点があり、熱で分解されて五フッ化リン（PF_5）を生成しやすい。PF_5 は炭酸エステル系溶媒と反応して CO_2 を生成し、SEI 被膜を破壊して、電池のサイクル安定性に深刻な影響をもたらす。また、有機溶媒中の不純物、例えば微量の水などと瞬時に反応して、POF_3 や HF といった猛毒ガスを発生する［6］。

したがって、新規なリチウム塩の開発こそが、高性能リチウムイオン電池の電解液の研究開発における今後の重要な方向性となる。高い耐酸化性や熱安定性を有する有機リチウム塩は、中国の研究者からも広く注目されつつある。新規な有機リチウム塩、例えば、リチウムビス（オキサレート）ボレート（LiBOB）、リチウムジフルオロ（オキサレート）ボレート（Lid FOB）、リチウムビス（フルオロスルホニル）イミド（LiFSI）、リチウムビス（トリフルオロメタンスルホニル）イミド（LiTFSI）、リチウムビス（ペンタフルオロエチルスルホニル）イミド（LiBETI）などと $LiPF_6$ の長所・短所の比較は表 5-1 のとおりである。

表 5-1　$LiPF_6$ と新規有機リチウム塩の長所・短所比較

有機リチウム塩	熱分解温度（℃）	導電率（mS/cm）	長所	短所
六フッ化リン酸リチウム（$LiPF_6$）	125	10.8	高導電率、比較的良好な溶解性、生産コストが低い	熱や水で分解しやすい
リチウムビス（オキサレート）ボレート（LiBOB）	275	14.9	高導電率、良好な熱安定性・造膜性	溶解度がやや低い
リチウムジフルオロ（オキサレート）ボレート（LiDFOB）	200	8.58	広い電位窓、良好な造膜性・高低温サイクル特性	生産コストが高い
リチウムビス（フルオロスルホニル）イミド（LiFSI）	200	9.73	高導電率、良好な熱安定性、広い電位窓	アルミ箔への腐食電位がやや低い（4.2V）
リチウムビス（トリフルオロメタンスルホニル）イミド（LiTFSI）	360	9	高導電率、高い溶解度、良好な熱安定性、加水分解しにくい	アルミ箔への腐食電位が低い（3.7V）
リチウムビス（ペンタフルオロエチルスルホニル）イミド（LiBETI）	250	11.1	高導電率、熱安定性・造膜性が良好	生産コストが高い

5.2.2 電解液：有機溶媒

有機溶媒には、有機炭酸エステル系がよく用いられる。その融点・誘電率・粘度などのパラメータは電池の使用温度を大きく左右し、酸化還元電位は電池の作動電圧にとって極めて重要な要素である。沸点や引火点もまた、電解液の安全性に深刻な影響を与える。そこで、電解液の溶媒を選ぶ際には、次の条件を考慮しなければならない［7-8］。

（1）高誘電率で、電解液のイオン導電率を上昇させる。
（2）粘度・融点が比較的低い。
（3）互いに化学反応を起こさず、リチウム塩とも反応しない。
（4）熱に強く、耐熱性に優れている。
（5）無毒で環境に優しく、低コストである。

一般的に使用されている有機炭酸エステル系溶媒の物理化学的性質は、表 5-2 のとおりである。

表 5-2　一般的な有機炭酸エステル系溶媒の物理化学的性質（25℃）

溶媒	凝固点（℃）	引火点（℃）	密度（g/cm^3）	誘電率 $C^2/(N{\cdot}M^2)$	粘度（mPa·s）
炭酸エチレン（EC）	36.4	152	1.321	89.78	1.85
炭酸プロピレン（PC）	-48.8	132	1.206	64.92	2.53
炭酸エチルメチル（EMC）	-55	23	1.006	2.958	0.65
炭酸ジメチル（DMC）	4.6	65	1.069	3.107	0.65
炭酸ジエチル（DEC）	−74.3	25	0.975	2.805	0.75
酢酸エチル（EA）	−83.6	-4	0.90	6	0.426
酪酸メチル（MB）	−84	53	0.898	5.5	0.6
酪酸エチル（EB）	−93	19.4	0.886	5.2	0.71
炭酸フルオロエチレン（FEC）	18	120	1.454	-	-

炭酸エステル系には、炭酸プロピレン（PC）、炭酸エチレン（EC）などの環状炭酸エステルと、炭酸ジメチル（DMC）、炭酸ジエチル（DEC）、炭酸エチルメチル（EMC）などの鎖状炭酸エステルがある。環状炭酸エステルには大きな極性、高い誘電率という長所があり、電解液の主要な溶媒としてよく用いられる。しかし、粘度が高い、分子間力が強いという欠点により、単一溶媒にした場合のリチウムイオンの移動速度がやや遅く、最終的には電池のレート特性・低温特性の低下を招く［4］。一方、鎖状炭酸エステル系の有機溶媒は誘電率が低く、リチウム塩の溶解力が弱いものの、低粘度で流動性に優れており、リチウムイオンの移動速度を促進する。しかし、充放電時の還元生成物（アルキルカルボン酸エステル）が安定せず、電極表面に安定性の高い SEI 被膜を形成することができない［9］。また、極度の放熱状態では燃焼・分解しやすく、電池の安全性に大きな影響を及ぼす。

エーテル系の有機溶媒には、2,2- ジメトキシプロパン（DMP）、ジメトキシメタン（DMM）、エチレングリコールジメチルエーテル（DME）などの鎖状エーテルと、テトラヒドロフラン（THF）、2- メチルテトラヒド

ロフラン（2-Me-THF）などの環状エーテルがある［2］。エーテル系溶媒は、炭素鎖が長いほど化学的安定性に優れるが、粘度も高くなり、リチウムイオンの移動速度は低減する。エチレングリコールジメチルエーテル（DME）は、六フッ化リン酸リチウム（$LiPF_6$）と反応して比較的安定した $LiPF_6$-DME キレート錯体を生成し、リチウム塩の溶解力が強く、電解液に高い導電率をもたらす。しかし、化学的安定性にやや劣るため、負極材表面に安定性の高い不動態被膜を形成することができない。

有機溶媒は、単一溶媒としては、電解液に求められる導電率の高い基準に満たない。そこで、高性能電解液のニーズに応えるため、通常は複数の溶媒を混合する方法を採用しており、溶媒の可燃性･揮発性の低下、溶媒分解の抑制といった面から電解液の総合的な性能向上を図っている。

5.2.3 電解液：添加剤

少量の添加剤で顕著な効果を出すということが、リチウムイオン電池の性能を向上させる経済的かつ実用的な方法である。リチウムイオン電池の電解液に少量の添加剤を加えることで、可逆容量、電極 / 電解液の相溶性、サイクル特性、レート特性、安全性などの電池性能が向上する。リチウムイオン電池において、添加剤は非常に重要な役割を担う。リチウムイオン電池の電解液に理想的な添加剤は、次のような特徴を備えている［10］。

（1）有機溶媒への溶解性が高い。
（2）少量の添加で、ひとつまたは複数の特性を大幅に向上させる。
（3）電池の他の組成成分と有害な副反応を生じず、特性に影響しない。
（4）低コストで、無害または毒性が低い［11］。

添加剤は機能別に、導電助剤、過充電防止剤、難燃剤、造膜助剤、正極保護剤、$LiPF_6$ 安定剤、およびその他の機能の添加剤に分類される［12］。

(1) 導電助剤

導電助剤には、添加剤分子が電解質イオンに配位することで、リチウム塩の溶解・電離の促進、リチウムイオンの溶媒和半径を縮小する作用がある［13］。こうした配位子（リガンド）添加剤は、電解液中の電解質イオンとどう作用するかにより、カチオン（陽イオン）性配位子、アニオン（陰イオン）性配位子、中性配位子に分かれる［14］。

カチオン性配位子はおもに Li^+ への優先的な溶媒和、Li^+ の溶媒和半径の縮小を可能にする。カチオン性配位子には小分子アミン系、クラウンエーテル系、クリプタンド系などがある。一般的にドナー数が比較的大きく、リチウムイオンと強いキレート効果を発揮するため、溶媒和リチウムイオンの移動性が大幅に向上し、電解液の導電率は広範囲で顕著に上昇する［15］。

アニオン性配位子はアニオンレセプター（受容体）という化合物で、おもにリチウム塩アニオンと錯体を形成、Li^+/ アニオン間の相互作用を低減、Li+ 移動数を増加、アニオンの移動性・電気化学的活性を低下、アニオンの電極界面での酸化・還元を統制することができる。また、中性配位子は、電子豊富なグループ結合と電子不足の原子 N あるいは B で形成される化合物で、アザエーテル系化合物やアルキルホウ素系化合物などがある［16］。これらは電解質イオンとの共同作用により、電解液中のカチオン・アニオンの導電性を高め、ひいては電解液の導電率が著しく向上する。

(2) 造膜助剤

リチウムイオン電池の初回充放電時、電解液は電極表面で電気化学的反応を起こし、その反応生成物が電極表面に堆積して不動態被膜を形成する。この被膜は「固体電解質界面（Solid Electrolyte Interphase）」、略して「SEI 被膜」[9, 17] と呼ばれ、固体電解質の特性を有し、リチウムイオンをスムーズに脱離させ、電子の通過を阻止する役割を果たす。SEI 被膜の化学組成や構造安定性などは、リチウムイオン電池の安定性を決定づけるカギである。SEI 被膜の特性の最適化は、リチウムイオン電池の発展における重要な方向性のひとつで、電解液 / 電極の相溶性を良好にし、電解液の種類の拡大を実現する [17, 18]。

造膜助剤は機能メカニズムにより、電気化学的還元型、化学反応型、SEI 被膜修飾型に分かれる。電気化学的還元型添加剤は、還元電位が電解液中の有機溶媒に比べて高く、電極表面で電気化学的還元反応が優先して生じ、特性の優れた SEI 膜を形成する。電気化学的還元型添加剤には、炭酸ビニレン（VC）、アクリル酸ニトリル、SO_2、CS_2、多硫化物（S_x^{2-}）などがある [19]。一方、化学反応型添加剤は、充放電時に有機溶媒の還元生成物の中間体とのラジカル反応、または最終生成物との化学反応により結合し、より安定性の高い SEI 被膜を生成する。SEI 被膜修飾型添加剤は、電解液中で還元分解せずに電極表面に被膜を形成する。しかし、SEI 被膜修飾型には強力なイオンのキレート力があり、電解液中のリチウムイオンと優先して溶媒和し、リチウムイオンと溶媒分子を効果的に分離することができる。それにより、溶媒和リチウムイオンの黒鉛層（グラファイト層）への挿入を抑え、電極界面への到達時の反応強度が弱まり、SEI 被膜の構造が最適化され、電解液 / 炭素系負極の相溶性が向上する。

(3) 過充電防止剤

過充電は電池の安全性に関わる重要な問題である。リチウムイオン電池を過充電すると、電池の分極が増大し続け、正・負極活物質に不可逆変化が生じる。同時に正極表面の電圧が徐々に上昇し、電解液の激しい酸化分解を引き起こして、一瞬で大量のガスと熱を発生する。その結果、電池内部の圧力と温度が急激に上昇し、電池が燃焼、最悪の場合は爆発さえも起こり得る [7]。この問題の一般的な解決策は、外部回路を制御するか、あるいは過充電防止剤を添加することである。過充電防止剤は機能メカニズムにより、レドックス（酸化還元）対と電解重合の大きく 2 つに分かれる。

① レドックス対添加剤

通常の充電条件下では、レドックス対はあらゆる化学反応にも一切関わらずに電解液中で安定して存在している。しかし、電圧がカットオフ電圧（規定値）に到達すると、レドックス対は正・負極のそれぞれで酸化還元された後、対極まで拡散してさらに酸化還元される。そうすることで、電池の電圧をカットオフ電圧の範囲内に収める。よく使用されるレドックス対は、芳香族化合物、メタロセン化合物、ポリピリジン錯体などである。

② 電解重合添加剤

電池内部にポリマー（重合体）の単量体を加えると、電池が一定電圧まで充電された時、単量体は正極表面で重合反応を起こし、導電性ポリマー膜を生成する。この導電性ポリマー膜が負極と一定の点接触を起こすことで、電池内部に微短絡（マイクロショート）を生じさせ、電池をゆっくりと安全な状態に戻す。中国市場で普及している添加剤は、おもにビフェニル、チオフェン、フラン、およびその誘導体などである。

(4) 難燃剤

リチウムイオン電池の電解液の溶媒には、アルキルカーボネート系有機化合物が多く採用されているが、一般的に引火点が低くて非常に燃焼しやすい。リチウムイオン電池は、短絡（ショート）、過充放電、長期間の大電流放電などの条件下では、加速度的なラジカル連鎖反応が生じやすく、燃焼や爆発を招く結果となる［20］。安全性の問題は、すでに中国のリチウムイオン電池の重要課題となり、とくに電気自動車分野においては、より高度かつ最新のリチウムイオン電池が求められている。

難燃剤を加えることで、有機電解液は可燃性から難燃性または不燃性に変化し、電池の発熱量・自己発熱率は低減、電池そのものの熱安定性が向上する。これにより、過熱状態にある電池の燃焼や爆発を回避できる［21］。難燃剤の機能メカニズムは大きく 2 つあり、ひとつは気相と凝集相の間に遮断層を作り、気相と凝集相の燃焼を阻止することである。もうひとつは、燃焼反応中のラジカルを捕捉し、ラジカル連鎖反応を停止させ、気相間の燃焼反応を阻止する。難燃剤の種類には、リン系難燃剤、ハロゲン系難燃剤、複合難燃剤などがある。

5.3 中国における電解液の研究の進展

5.3.1 低温電解液

リチウム電池は、室温下では大容量で卓越したサイクル安定性を有するものの、低温下では容量損失が非常に大きく、放電電圧も著しく低下する［22］。この低温特性により、リチウム電池の応用シーンが大きく制限されてしまうのは必至である。中国ではここ数年、電池の低温特性の向上を目指し、研究者らが数多くの研究を重ね、一定の進展が得られている。

例えば、Li ら［23］によると、1M LiPF6 EC/PC/EMC/FEC 系を用いた四元系電解液が検討されている。研究結果によると、-40℃で FEC ベース電解液を使用した電池の場合、電池容量は室温下の 5% に相当し、-40℃で MCMB/Li 電解質を使用した半電池の場合は、放電容量は室温下の 91% に達した。ちなみに、従来の電解液（$LiPF_6$/EC+DMC（1:1、v/v））の場合、-40℃での放電容量は 0 に近い。一方、Liao ら［24］によると、添加剤も電池の低温特性を向上させることを明らかにした。添加剤のおもな目的は溶媒組成を変化させることで、低温下でも電解質はリチウムイオンのより良い移動性・導電性を保証する。

溶媒の成分や配合比を変えるほかにも、電池の低温特性を改善する方法がある。リチウムイオン電池にリチウムイオンを供給するリチウム塩、そのアニオン（陰イオン）も同様に、電解液の物理的・化学的特性に変化をもたらす［25］。中国の商用電解液に用いられるリチウム塩は LiPF6 だが、低温下では電解液の導電率が顕著に低下し、イオンの移動速度が遅くなる。この問題の解決に向けて、張昇水（Zhang）ら［26］は LiBOB と LiBF4 のリチウム塩を混合使用し、それぞれの長所で不足を補い合うことで、電池性能を最適化した。その結果、0.9M $LiBF_4$ + 0.1M LiBOB を溶解させた電解液の場合、電池は -50℃で常温下の 30% の放出が可能だが、LiBOB の含有量が増えると放電電圧は著しく低下する。また、0.98M $LiBF_4$ + 0.02M LiBOB を溶解させた電解液に、正極にニッケル酸リチウム、負極にリチウムシートを使用した場合、電池は -30℃で常温下の 85%、-40℃では 65% を放出することを示した。これらの結果から、電池の低温特性が向上していることは明白である。

5.3.2 高電圧電解液

リチウムイオン電池の安全性とエネルギー密度の向上にとって、高電圧電解液の開発は有効なアプローチである。中国の現状の商用リチウムイオン電池に使われている電解液は、$LiPF_6$ 電解質を溶解させた有機溶媒からなる。通常の電圧下では、電解質は電極間のリチウムイオン輸送を確実に保証する。しかし、4.3V 以上の作動電圧では、一般的に用いられる有機炭酸塩系の電解質は激しい酸化分解を起こし、電極 / 電解質界面間の界面抵抗が増加して、電池性能の深刻な低下を招く結果となる［27］。

この問題を解決すべく、耐高圧性の新規電解液を巡って、数多くの研究者の間で一連の研究が進められている。現時点では主に 2 つの技術的アプローチがあり、高い耐酸化性を有する新規溶媒（ニトリル系、スルホン系、フッ素系溶媒、室温イオン液体など）を用いて、既存の炭酸エステル系溶媒［28］の一部または全部を代替することである。もうひとつは、電解液に高電圧添加剤を少量加え、正極界面の不働態被膜の生成作用を促す方法である。

(1) ニトリル系溶媒

高い酸化電位を有するニトリル系溶媒は、濃化して正極表面での電解液と正極の接触を低減することで、電解液の酸化分解を抑制する。しかし、黒鉛（グラファイト）やリチウム金属などの低電位負極との相溶性がやや劣るため、負極表面で重合反応が極めて起こりやすく、その生成物が Li^+ の脱離を阻止してしまう。

Wang ら［29］によると、3- メトキシプロピオニトリルは、溶媒 / 電極間の界面反応を低減し、Li+ イオンの脱溶媒和を加速するため、電極 / 電解質界面の電荷移動過程が改善される。また、アジポニトリル（ADN）は、正・負極表面に安定性・有効性の高い保護膜を形成し、容量維持に有利に働く［30］。一方、Li ら［31］は 5V 高電圧対応の正極材のニーズに応えるため、高電圧電解液に LiDFOB-DEC/EC/AND 系を選択し、XPS と理論計算の結果を分析した。その結果、ADN は正極材の表面改質により電解液の分解の進行を阻止し、さらに保護性に優れた不動態被膜を形成することで、高電圧特性を向上できることが判明した。

(2) スルホン系溶媒

広い電位窓（>5.8V vs. Li+/Li）を有するスルホン系溶媒は、機能性電解液の添加剤として使用できる。そのほとんどが室温下では固体で存在し、他の溶媒と混合させなければ電解質を構成できない。スルホン系溶媒は負極との親和性がやや低いものの、例えば VC などのほかの添加剤と組合せて使用した場合、黒鉛表面に安定性の高い SEI 被膜を生成する。添加剤を利用することで、スルホン系電解液と黒鉛負極（グラファイト負極）との相溶性は高まり、電池のサイクル特性を向上させることができる。

Huang ら［32］によると、テトラメチレンスルホキシド（TMS）を加えると、リチウム塩の溶解性とイオン導電率が向上するとともに、イオン液体（PP14-TFSI）と電極との相溶性も高まることが判明した。その結果、0.5M LiDFOB/（60%）PP14-TFSI/（40%）TMS 混合電解質と $Li_{1.2}Ni_{0.2}Mn_{0.6}O_2$ 正極との相溶性は良好化し、電池のサイクル特性は向上した。しかしながら、スルホンは黒鉛負極に対する安定性が低く、粘度が高いため、リチウム電池の低温特性やハイレート特性に対してはマイナスに働く。そのため、スルホン系溶媒の使用範囲は制限されてしまう。

(3) フッ素系溶媒

フッ素原子の有する高い電気陰性度と弱極性の特性から、フッ素系溶媒は電気化学的安定性に優れる。現状では、フッ素系溶媒の多くが共溶媒または添加剤として、リチウムイオン電池の液体電解液に使用されて

いる。中国の従来のフッ素系溶媒の開発は、フッ素化系炭酸エステル、フッ素化系カルボン酸エステル、フッ素化系エーテルがメインであった。

Zhang ら［33］は、フッ素化した有機炭酸エステル系溶媒に関する一連の研究を進め、有機溶媒にフッ素を導入すると、酸化電位およびサイクル特性が著しく向上することが判明した。例えば、炭酸フルオロエチレン（FEC）、炭酸エチル -2,2,2- トリフルオロエチル（ETFEC）などの酸化電位は、フッ素化していない炭酸エチレン（EC）や炭酸ジエチル（DEC）をはるかに上回る［34］。しかし、フッ素原子に置換された水素原子の増加にともない、溶媒の LiPF6 に対する溶解度が大幅に低下するというデメリットもある。中国ではすでに FEC は商業化され、大規模な生産が行われている。FEC は引火点が高く、共溶媒として電解液に加えると、電解液の可燃性が大幅に低下するため、安全性の高い電解液の研究へ広く応用されている。

(4) イオン液体

「室温溶融塩」とも呼ばれるイオン液体（RTIL）は通常、有機カチオン（陽イオン）と有機・無機アニオン（陰イオン）で構成される［35］。イオン液体のカチオンには、ピロール塩イオン、第四級アンモニウム塩イオン、ピペリジン塩イオン、イミダゾリウム塩イオンなどがあり、アニオンにはハロゲン、FSI-、PF_{6-}、BF_{4-} などがある。これらのカチオン・アニオンは比較的体積が大きく、相互作用が弱いため、室温下では液体となり自由に移動できる。なかでも、ピペリジン塩系イオンやピロール塩系イオンをカチオンにして組成されたイオン液体は、電位窓が広く、電気化学的に安定しており、高電圧電解液の溶媒に適している。

イオン液体の長所は、熱安定性・低揮発性・難燃性に優れ、広い電位窓を有する点だが［36］、一方で、高粘度・低導電率という欠点もある。これは、イオン液体が将来的に発展する上でのボトルネックとなるであろう。さらに、還元電位が高く（～ 1.5V vs. Li^+/Li）、負極との親和性が低いため、黒鉛負極材には使用できないことや、非常に高価であるために大規模応用が困難であることも課題として挙げられる。したがって、中国の主流のリチウムイオン電池では、イオン液体を溶媒として単独使用するのでなく、従来の有機炭酸エステル系溶媒との混合使用が一般的である。

(5) 添加剤

高電圧電解液の添加剤のおもな作用は、炭酸エステル系溶媒に優先して正極表面で酸化し、保護膜を形成することである。その保護膜が正極表面と溶剤の接触を低減するため、電解液の酸化分解が抑制され、電池のクーロン効率とサイクル特性が向上する。現状でよく用いられる添加剤の種類は、ホウ素含有系、硫黄含有系、フッ素含有系、窒素含有系などに分類される。Hu ら［37］によると、LiDFOB を添加剤として使用した場合、$LiCoPO_4$ 正極は非常に優れたサイクル特性を発揮するといった結果が得られた。XPS と FTIR（ATR 法）の分析結果をみると、LiDFOB は相間膜の形成だけでなく、正極表面の不活性化にもプラスに働き、それにより電解液分解を一定程度抑制できる。

一方、Zhu ら［38］は、電解液の新規添加剤として、Diethyl（thiophen-2-ylmethyl）phosphonate（DTYP）を発表した。その結果、環境温度 60℃、1C レート・280 サイクル経過時のリチウムイオン電池の容量維持率は 85%（DTYP を加えない場合は 18%）を示し、DTYP が $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ 正極の高電圧サイクル安定性を著しく向上させた。同様に、Huang ら［32］も 4-（トリフルオロメチル）- ベンジルニトリル（4-TB）を新規添加剤として使用したところ、$LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ 正極のサイクル特性はめざましい向上を見せた。さらに、4-TB は優先して $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ 正極表面で酸化され、低抵抗保護膜を形成することで、電解液の酸化分解を阻止できる。

5.3.3 高濃度電解液

リチウム塩濃度の上昇にともない、カチオン・アニオン / 溶媒間の相互作用が強まり、遊離した溶媒分子の含有量が減少する。図 5-1 に示すように、リチウム塩濃度が閾値（通常 >3 ～ 5 M、塩・溶媒の種類で異なる）を超えると、遊離溶媒分子が消失し、Li^+ 周囲の溶媒和シースに加わるアニオンが増加する。それにより、「高濃度電解質」[39, 40] と呼ばれる特殊な三次元溶液構造の新しい電解質が形成される。

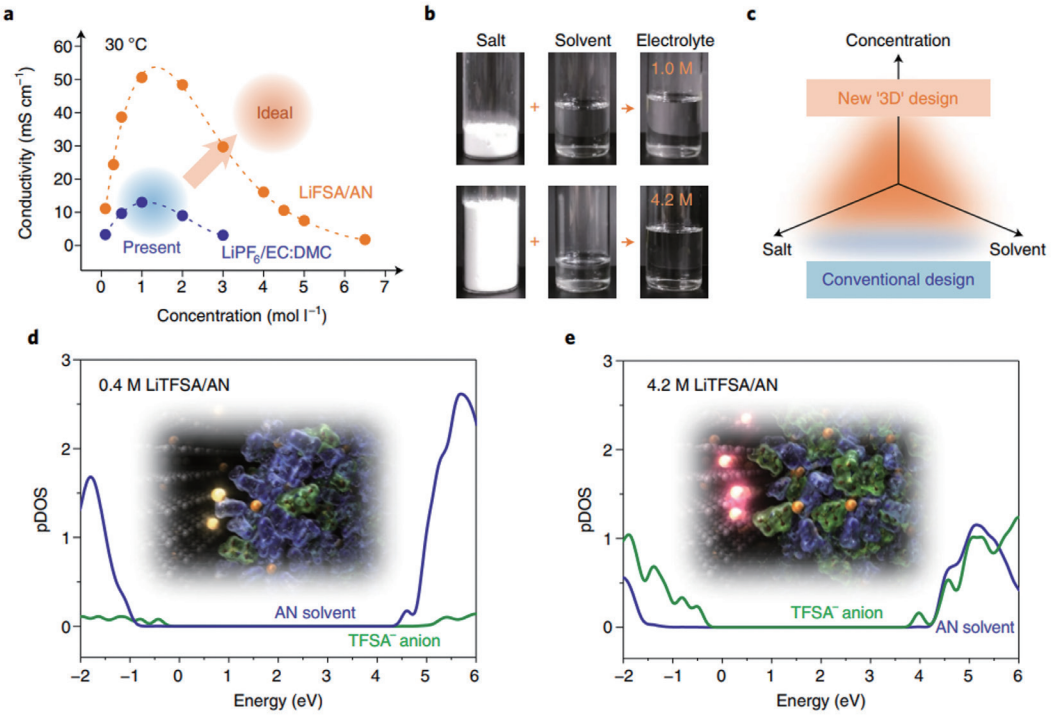


図 5-1　標準的電解液と高濃度電解液の総合比較[73]：
（a）濃度・イオン伝導の相関曲線、（b）異なる濃度の電解液、
（c）リチウム塩・溶媒・濃度の三次元電解液設計、（d）（e）異なる濃度の電解液中の電子構造［40］

溶媒 / リチウム塩間の強力な相互作用により、高濃度電解液は次のような独特の特性を有する。

（1）熱力学的安定性が良好で、Li^+ が黒鉛電極上で可逆的挿入・脱離反応を起こす。

（2）低電位負極の還元安定性と可逆反応を増強［41］、電気化学的安定性の電位窓を広げ、高電位の電解液の酸化分解を効果的に抑え、電池の安全性を向上させる。

（3）遊離溶媒を含まない溶液で、電極の腐食溶解を低減、Al 集電体の酸化安定性を高める［42］。

（4）無機成分を主とするアニオンの誘導で SEI 被膜を形成、イオノフォア（イオン透過担体）密度が比較的高く、リチウムイオン移動数を増加、界面における Li^+ の均等かつ高速な輸送を可能にする［43］。同時に、リチウムデンドライトの成長を抑制する。

次世代高性能リチウム電池において、高濃度電解液は非常に大きなアドバンテージになる（図 5-2）。例えば、Hu ら［44］は、アセトアミドと LiTFSI リチウム塩をモル比 4:1 で混合し、最低共晶点 -67℃ の室温溶融塩（Room temperature molten salts）を生成した。室温下のイオン導電率は 10^{-3}S/cm を上回り、電位窓は 0.7 ～ 4.4V（vs. Li^+/Li）を示し、リチウム電池の耐低温・耐高圧特性を大幅に向上させた。

[73] http://m.cbea.com/djy/201903/885296.html

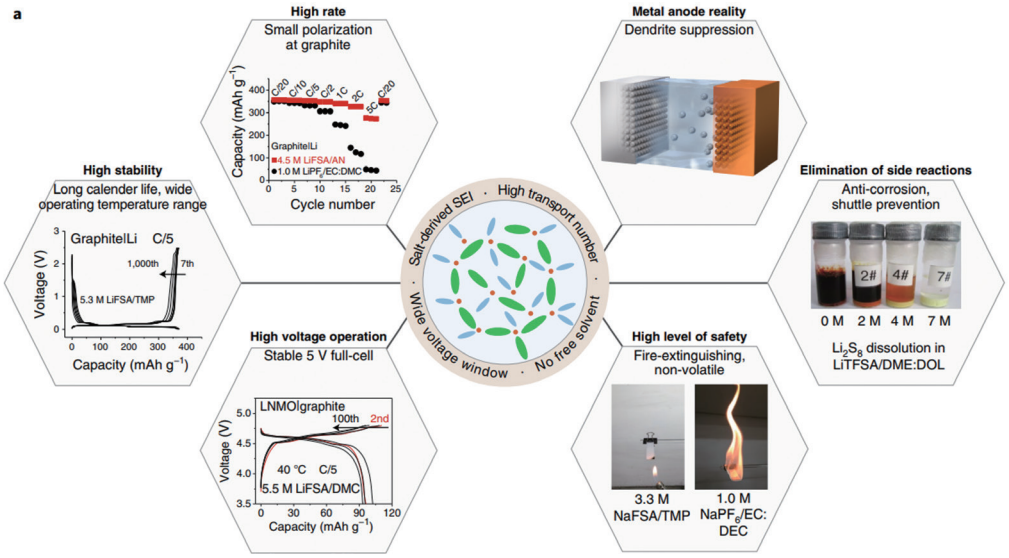


図 5-2　高濃度電解液の卓越した特性[74]：
高レート特性［40］、高安定性［45］、広い電位窓［44, 46］、高安全性［45, 47］、
デンドライト・副反応の低減［48］

しかしながら、高濃度電解液には、高粘度、低浸潤性、低イオン導電率、高コストなどの問題が往々にして立ちはだかり、大規模な商業化や普及・応用は非常に困難である。それを受け、ここ数年では、張継光（Zhang, J.-G）のプロジェクトチームである Zheng ら［49］が局所高濃度電解質という新概念を打ち出した。局所高濃度電解質とは、高濃度電解質中にリチウム塩を溶解しない低極性希釈剤を導入して局部的に高濃度状態にすることを指し、溶媒和構造を変えずに低粘度化し、浸潤性を向上させることができる［50］。この方法なら、高濃度電解質の特性を保証しつつ、さらなるコスト低減が可能である。したがって、局所高濃度電解液は、リチウム電池の研究分野ですぐに広く注目されるようになった。また、Perez Beltran［51］は、LiFSI をリチウム塩、炭酸ジメチル（DMC）を溶媒、2,2,2- トリフルオロエチルエーテル（BTFE）を希釈剤とする局所高濃度電解質により、リチウム金属電池の高電圧作動時の安定性を実現した。張および許武（X,W）ら［52］はさらに、LiFSI、エチレングリコールジメチルエーテル（DME）、1,1,2,2- テトラフルオロエチル -2,2,3,3- テトラフルオロプロピルエーテル（TTE）を使用して、局所高濃度電解液（LHCE）を調製した。LHCE は、$LiNi_{0.94}Co_{0.06}O_2$（NC）系の超ハイニッケル系正極表面にて、LiF を大量かつ均一に含む保護性の高いカソード電解質界面（CEI）を形成する。さらに、リチウム金属負極との相溶性も良好で、NC 正極は 3C 充電レートで約 209mAh g^{-1} もの高い可逆容量を有する。

Chen ら［53］は、LiFSI をリチウム塩、低粘度 DMC を溶媒、ビス（2,2,2- トリフルオロエチル）エーテル（BTFE）を希釈剤として、安定作動を保証する局部的高塩濃度状態の電解液を設計した。また、Jiang ら［54］は LiFSI、ビス（2,2,2- トリフルオロエチル）エーテル（BTFE）、エチレングリコールジメチルエーテル（DME）で組成された局所高濃度電解液を発表した。アニオンの優先的分解を通じて、黒鉛（グラファイト）表面に均一かつ強固な SEI 被膜を形成することで、エーテル系溶媒の共挿入反応を大きく抑制し、高可逆性かつ高速な Li^+ 挿入・脱離を可能にする。したがって、黒鉛 /Li 電池は、高速充電のポテンシャル（4C レート、220mAh g^{-1}）、群を抜いたサイクル安定性（4C レート・約 200 サイクル経過時の初期容量維持率 85.5%）、素晴らしい低温特性という将来性を提示している。

[74] http://m.cbea.com/djy/201903/885296.html

5.3.4 固体電解質

信頼性と安全性は、次世代リチウムイオン電池のシステム開発における最重要事項である。無機固体電解質を用いた全固体リチウムイオン電池は、今後の電気自動車や各種エネルギー貯蔵システムの最終目標のひとつとされている［55］。電解液やセパレータを固体電解質で代替する全固体リチウムイオン電池は、安全性が飛躍的に向上すると同時に、高電圧正極材と適合して電池のエネルギー密度を高める。

リチウムイオン固体電解質は、おもに有機ポリマー電解質と無機固体電解質（ガラスセラミックス電解質）に分かれる。ポリマー固体電解質［55-58］は、有機ポリマー（PEO、PVDF など）とリチウム塩（LiTFSI、LiClO4、$LiPF_6$）で構成されたリチウムイオン固体電解質で、ポリマーの特性により、独特で良好な展延性・柔軟性を有する。最も広く研究が行われているポリマー電解質はポリエチレンオキシド（PEO）系で、各種リチウム塩（LiTFSI など）と配位構造を形成し、リチウムイオンの高速伝導を可能にする。また、ポリマー固体電解質は、少量の無機材料（SiO_2、Al_2O_3、MgO、ゼオライト、モンモリロナイトなど）を導入した場合、無機充填材とポリマーが形成するハイブリッド構造を通じて、室温下のイオン導電率（10^{-4}-10^{-5} S/cm）を上昇させる。その上、無機充填材自体も、複合材料の作動電圧範囲と機械強度を一定程度引き上げる［59, 60］。

一方、無機固体電解質は、結晶質と非晶質（アモルファス）の 2 種類に分けられる［61］。結晶性固体電解質の結晶構造は、NASICON 型、ペロブスカイト型、ガーネット型の 3 大構造となっている。非晶質の一種であるガラス状態は、高温で溶融して均等に混ざった複数種の物質が、晶析温度を飛び越えて急冷されることで形成される。その電気化学的特性は物質の組成変化に応じて変化し、電気化学系によっては変化が大きいものの、室温下のイオン導電率については総じて結晶性固体電解質を下回る。ガラス状態のリチウムイオン電解質の種類は、おもに酸化物、硫化物、窒素酸化物などである。

固体電解質は次の長所を備えている［57, 60-62］。

(1) 高安全性

現状の商用有機電解液には、使用中の液漏れの危険性ともに、膨張による分極発生が存在する。そのため、容量・体積が比較的大きな動力電池（駆動用バッテリー）にとって、電解液は深刻な安全上の問題をもたらしかねない。一方、電解液を使用しない全固体電池は安全性が飛躍的に高まる。

(2) 高エネルギー密度

固体電解質の比較的広い作動電圧範囲（最大 6V）は、電池の高電圧正極材と十分に適合し、エネルギー密度を高める。そのほか、固体電池は液体電池に比べて電解液分解の保護システムが少ないため、電池構造が簡素化し、より簡単に組立てられる。単純な重畳で大電流・高電圧が可能となり、質量・体積エネルギー密度が向上する。

(3) 長寿命

電解質の副反応の有無は、サイクル寿命を決定する重要要素のひとつである。固体電解質には電解液の酸化分解などの副反応が存在しない。

(4) 広範な作動温度

無機固体電解質は 300℃以上の高温に耐えうる。大容量全固体リチウムイオン電池の高温特性は比較的優れており、低温特性も界面問題を解決すれば向上の余地がある。

(5) フレキシブル・ウェアラブル

折り畳み性のあるポリマー電解質、柔軟性のある硫化物の実装方式は比較的簡単かつ安全である。そのため、全固体電池は製品ニーズに応じて、さまざまな形状の薄膜電池やフレキシブル電池を製造することができる。さらに、埋め込み型医療機器（インプラント）やスマートウェアラブルといった特殊ニーズへの電源供給も可能にする。

(6) 回収利便性

全固体リチウムイオン電池は、乾式粉砕で固体電解質を直接処理・回収でき、分離方法で処理する電解液に比べてはるかに簡単である。

5.4　中国における電解液産業の発展と展望

5.4.1 市場の現状

華経産業研究院[75]の統計によると、電解液は一般的に電池コストの約 7 ～ 12% を占めている。電解液の調製は、溶媒合成・材料混合・後処理の大きく 3 工程に分かれる。このうち、技術的障壁となるのは材料の混合段階の配合組成で、電池の種類ごとに電解液の組成がやや異なる。配合は基本的に下流のリチウム電池企業が主導しているが、一部の細分化したハイエンド消費財やハイニッケル系動力製品の電解液については、通常はリチウム電池企業と電解液企業が共同で研究開発をおこなっている。

2010 年以前の六フッ化リン酸リチウムの生産能力は、おもに日本のステラケミファ、関東電化、森田化学、韓国の厚成（フソン）などの企業に集中していた。2011 年時点で、中国企業の六フッ化リン酸リチウムの生産能力のシェアは 15% に満たなかったが、2011 年以降、天賜材料、新宙邦、国泰華栄などの企業が次々と技術的ブレイクスルーを起こし、大幅な生産拡大がスタートした。2020 年には、中国企業の市場シェアは 80% を上回るほどの増加をみせた（図 5-3）。

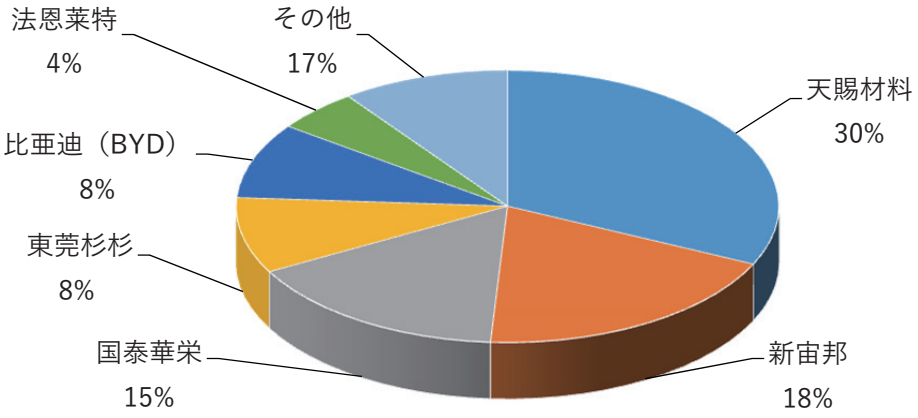


図 5-3　中国の電解液市場シェア（2020 年）
出典：前瞻産業研究院「2021 年中国電解液業界市場競争状況分析」[76]を基に作成

[75] https://www.huaon.com/about/index.html
[76] https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/210520-90603b27.html

高工産研リチウム電気研究所（GGII）[77]の調査研究の統計によると、2020 年の中国の電解液市場の出荷量は 25 万トンで、前年比 38% 増を記録した。また、国海証券（シーランド・セキュリティーズ）の予測では、2025 年までに世界のリチウム電池の需要量は約 1200GWh に達し、対応する電解液の需要量は約 132 万トン、この期間の年平均成長率（CAGR）は 35% に上るという。電解液市場にはまだ大きな発展の余地があるであろう。

5.4.2 リチウム電池用電解液分野の関連企業とその知的財産権帰属の分布

知的財産権の帰属の分布から、リチウム電池用電解液分野における関連企業の研究状況や技術レベルをある程度把握することができる。これには、技術分野での競合他社の位置づけ、科学研究の水準、技術の専門性が反映されている。

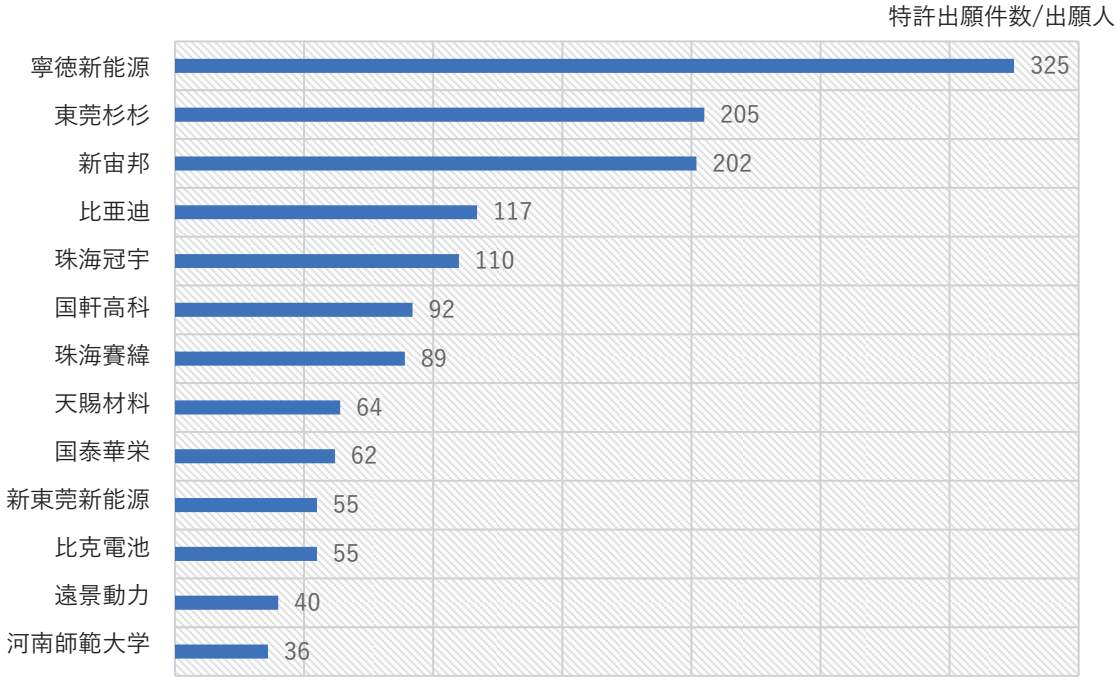


図 5-4　リチウム電池用電解液の関連特許の主要特許出願人

出典：Patsnap[78]

特許出願件数の統計による特許出願人（特許権者）の順位（図 5-4）をみると、リチウム電池用電解液分野でイノベーション成果を多く蓄積しているのは、寧徳新能源、東莞杉杉、新宙邦、比亜迪（BYD）、珠海冠宇（COSMX）、国軒高科、珠海賽緯、天賜材料、国泰華栄などである。一方、中国の大学所属の研究機関、例えば華南師範大学などの研究機関の研究開発力は相対的に弱い。このことは、中国のリチウム電池用電解液の理論研究はすでに十分な水準に達しており、実際の応用研究は企業が主導していることを示している。

[77] https://www.gg-lb.com/research.html
[78] https://analytics.zhihuiya.com/

5.4.3 今後の発展動向

リチウム電池の電解液の将来的な発展の方向性は、高電圧正極に適合する電解液の開発、シリコン・炭素系高容量負極との両立、サイクル過程でのシリコン負極の体積膨張が招くSEI被膜の破裂・再生の反復による電解液の過剰消費の回避といった問題が主体となる。電解液の浸潤性・難燃性・造膜特性などを顕著に左右させる添加剤は、電解液の核心価値であるとともに、高性能電解液の開発のカギとなる。

電解液の材料技術の発展路線と目標は次の通りである。

(1) 2025年：フッ化溶媒、少量のイオン液体の使用。単一$LiPF_6$から複合リチウム塩への代替。多機能添加剤の模索。高電圧（>5V）・高導電率（≥10^{-2} S/m）・低可燃性・高安全性の新規電解液を開発する。

(2) 2030年：高性能有機液体電解液、全固体無機固体電解質、固体ポリマー電解質の同時研究開発。高電圧（>6V）・高導電率（≥10^{-2} S/m）、長寿命、潜在的な安全上の問題のない固体電解質材料を重点的に開発する。

参考資料・文献

[1] Takeda, S.; Saito, Y.; Yoshitake, H. et al. (2020)"Restricted Diffusion of Lithium Ions in Lithium Secondary Batteries", *The Journal of Physical Chemistry* C, 124 (47), pp.25712-25720.

[2] Xing, L.; Li, W.; Wang, C.; Gu, F.; Xu, M.; Tan, C.; Yi, J. et al. (2009)"Theoretical Investigations on Oxidative Stability of Solvents and Oxidative Decomposition Mechanism of Ethylene Carbonate for Lithium Ion Battery Use", *The Journal of Physical Chemistry* B, 113 (52), pp.16596-16602.

[3] Aurbach, D.; Talyosef, Y.; Markovsky, B.; Markevich, E.; Zinigrad, E.; Asraf, L.; Gnanaraj, J. S.; Kim, H.-J. et al. (2004)"Design of electrolyte solutions for Li and Li-ion batteries: a review", *Electrochimica Acta*, 50 (2), pp.247-254.

[4] Kyle, M. D.; Eric, J. M.; Bryan, D. M. et al. (2017)"Promising Routes to a High Li+ Transference Number Electrolyte for Lithium Ion Batteries", *ACS Energy Letters*.

[5] Buket, B.; Tanmay, D.; Alberto, S.; Jennifer, L. S. et al. (2021)"Review—Electrolyte and Electrode Designs for Enhanced Ion Transport Properties to Enable High Performance Lithium Batteries", *Journal of The Electrochemical Society*.

[6] Xiaolu, T.; Yikun, Y.; Binren, F.; Pu, Y.; Te, W.; Pei, L.; Long, Q.; Mingtao, L.; Shanqing, Z. et al. (2020)"Design Strategies of Safe Electrolytes for Preventing Thermal Runaway in Lithium Ion Batteries", *Chemistry of Materials*.

[7] Qingsong, W.; Lihua, J.; Yan, Y.; Jinhua, S. et al. (2018)"Progress of enhancing the safety of lithium ion battery from the electrolyte aspect", *Nano Energy*.

[8] Huicong, Y.; Juan, L.; Zhenhua, S.; Ruopian, F.; Da-Wei, W.; Kuang, H.; Hui-Ming, C.; Feng, L. et al. (2020)"Reliable liquid electrolytes for lithium metal batteries", *Energy Storage Materials*.

[9] Ujwal Shreenag, M.; Libin, L.; Sushantha, M.; Paridhi, G. et al. (2021)"Solid Electrolyte Interphase (SEI), a boon or a bane for lithium batteries: A review on the recent advances", *Journal of Energy Storage*.

[10] Yunxian, Q.; Shiguang, H.; Xianshuai, Z.; Zhaohui, D.; Yuqun, X.; Zongze, C.; Yuanyuan, K.; Yuanfu, D.; Qiao, S.; Kang, X.; Yonghong, D. et al. (2018)"How electrolyte additives work in Li-ion batteries",

Energy Storage Materials.

[11] Haregewoin, A. M.; Wotango, A. S.; Hwang, B.-J. et al. (2016)"Electrolyte additives for lithium ion battery electrodes: progress and perspectives", *Energy & Environmental Science,* 9 (6), pp.1955-1988.

[12] Liao, X.; Huang, Q.; Mai, S.; Wang, X.; Xu, M.; Xing, L.; Liao, Y.; Li, W. et al. (2014)"Self-discharge suppression of 4.9 V LiNi0.5Mn1.5O4 cathode by using tris (trimethylsilyl) borate as an electrolyte additive", *Journal of Power Sources*, 272, pp.501-507.

[13] Wu, B.; Ren, Y.; Mu, D.; Liu, X.; Yang, G.; Wu, F. et al. (2014)"Effect of lithium carbonate precipi tates on the electrochemical cycling stability of LiCoO2 cathodes at a high voltage", *RSC Advances,* 4 (20), pp.10196-10203.

[14] Liao, X.-Q.; Li, F.; Zhang, C.-M.; Yin, Z.-L.; Liu, G.-C.; Yu, J.-G. et al. (2021)"Improving the Stabil ity of High-Voltage Lithium Cobalt Oxide with a Multifunctional Electrolyte Additive: Interfacial Analyses", 11 (3), p.609.

[15] Lee, J.-N.; Han, G.-B.; Ryou, M.-H.; Lee, D. J.; Jongchan, S.; Choi, J. W.; Park, J.-K. et al. (2011)"N-(triphenylphosphoranylidene) aniline as a novel electrolyte additive for high voltage LiCoO2 operations in lithium ion batteries", *Electrochimica Acta*, 56 (14), pp.5195-5200.

[16] Qin, Z.; Hong, B.; Duan, B.; Hong, S.; Chen, Y.; Lai, Y.; Feng, J. et al. (2018)"Tributyl borate as a novel electrolyte additive to improve high voltage stability of lithium cobalt oxide in carbonate-based electrolyte", *Electrochimica Acta*, 276, pp.412-416.

[17] Ortner, T. S. et al. (2021)"A granular look at solid electrolyte interfaces in lithium-ion batteries", *Communications Chemistry*, 4 (1), p.79.

[18] Türk, H.; Schmidt, F.-P.; Götsch, T.; Girgsdies, F.; Hammud, A.; Ivanov, D.; Vinke, I. C.; de Haart, L. G. J.; Eichel, R.-A.; Reuter, K.; Schlögl, R.; Knop-Gericke, A.; Scheurer, C.; Lunkenbein, T. et al. (2021)"Complexions at the Electrolyte/Electrode Interface in Solid Oxide Cells", 8 (18), p.2100967.

[19] Aurbach, D.; Gamolsky, K.; Markovsky, B.; Gofer, Y.; Schmidt, M.; Heider, U. et al. (2002)"On the use of vinylene carbonate (VC) as an additive to electrolyte solutions for Li-ion batteries", *Electrochimica Acta*, 47 (9) , pp.1423-1439.

[20] Wang, X.; Xing, L.; Liao, X.; Chen, X.; Huang, W.; Yu, Q.; Xu, M.; Huang, Q.; Li, W. et al. (2015)"Improving cyclic stability of lithium cobalt oxide based lithium ion battery at high voltage by using trimethylboroxine as an electrolyte additive", *Electrochimica Acta*, 173, pp.804-811.

[21] Kim, K.; Park, I.; Ha, S.-Y.; Kim, Y.; Woo, M.-H.; Jeong, M.-H.; Shin, W. C.; Ue, M.; Hong, S. Y.; Choi, N.-S. et al. (2017)"Understanding the thermal instability of fluoroethylene carbonate in LiPF6-based electrolytes for lithium ion batteries", *Electrochimica Acta*, 225, pp.358-368.

[22] Wotango, A. S.; Su, W.-N.; Haregewoin, A. M.; Chen, H.-M.; Cheng, J.-H.; Lin, M.-H.; Wang, C.-H.; Hwang, B. J. et al. (2018)"Designed Synergetic Effect of Electrolyte Additives to Improve Interfacial Chemistry of MCMB Electrode in Propylene Carbonate-Based Electrolyte for Enhanced Low and Room Temperature Performance", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10 (30), pp.25252-25262.

[23] Li, Q.; Lu, D.; Zheng, J.; Jiao, S.; Luo, L.; Wang, C.-M.; Xu, K.; Zhang, J.-G.; Xu, W. et al. (2017)"Li+-Desolvation Dictating Lithium-Ion Battery's Low-Temperature Performances", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9 (49), pp.42761-42768.

[24] Liao, L.; Fang, T.; Zhou, X.; Gao, Y.; Cheng, X.; Zhang, L.; Yin, G. et al. (2014)"Enhancement of low-

temperature performance of LiFePO4 electrode by butyl sultone as electrolyte additive", *Solid State Ionics*, 254, pp.27-31.

[25] Liao, L.; Zuo, P.; Ma, Y.; An, Y.; Yin, G.; Gao, Y. et al. (2012)"Effects of fluoroethylene carbonate on low temperature performance of mesocarbon microbeads anode", *Electrochimica Acta*, 74, pp.260-266.

[26] Zhang, S. S.; Xu, K.; Jow, T. R. et al. (2006)"Enhanced performance of Li-ion cell with LiBF4-PC based electrolyte by addition of small amount of LiBOB", *Journal of Power Sources*, 156 (2), pp.629-633.

[27] Yang, J.; Shkrob, I.; Liu, K.; Connell, J.; Dietz Rago, N. L.; Zhang, Z.; Liao, C. et al. (2020)"4- (Trime thylsilyl) Morpholine as a Multifunctional Electrolyte Additive in High Voltage Lithium Ion Batteries", *Journal of The Electrochemical Society*, 167 (7), p.070533.

[28] Yue, H.; Dong, Z.; Yang, Y.; Han, Z.; Wang, L.; Zhang, H.; Yin, Y.; Zhang, X.; Zhang, Z.; Yang, S. et al. (2020)"Fluorophosphorus derivative forms a beneficial film on both electrodes of high voltage lithium-ion batteries", *Journal of Colloid and Interface Science,* 559, pp.236-243.

[29] Wang, Q.; Zakeeruddin, S. M.; Exnar, I.; Grätzel, M. J. J. o. T. E. S. et al. (2004)"3-Methoxypropi onitrile-Based Novel Electrolytes for High-Power Li-Ion Batteries with Nanocrystalline Li4Ti5 O 12 Anode", 151 (10), A1598.

[30] Han, S.; Liu, Y.; Zhang, H.; Fan, C.; Fan, W.; Yu, L.; Du, X. J. S.; Analysis, I. et al. (2020)" Succinoni trile as a high-voltage additive in the electrolyte of LiNi0. 5Co0. 2Mn0. 3O2/graphite full batteries" , 52 (6), pp.364-373.

[31] Li, S.; Zhao, D.; Wang, P.; Cui, X.; Tang, F. J. E. A. et al. (2016)"Electrochemical effect and mecha nism of adiponitrile additive for high-voltage electrolyte", 222, pp.668-677.

[32] Huang, W.; Xing, L.; Wang, Y.; Xu, M.; Li, W.; Xie, F.; Xia, S. J. J. o. P. S. et al. (2014)"4- (Trifluoro methyl) -benzonitrile: a novel electrolyte additive for lithium nickel manganese oxide cathode of high voltage lithium ion battery", 267, pp.560-565.

[33] Zhang, Z.; Hu, L.; Wu, H.; Weng, W.; Koh, M.; Redfern, P. C.; Curtiss, L. A.; Amine, K. J. E.; Sci ence, E. et al. (2013)"Fluorinated electrolytes for 5 V lithium-ion battery chemistry", 6 (6), pp.1806-1810.

[34] Smart, M.; Ratnakumar, B.; Ryan-Mowrey, V.; Surampudi, S.; Prakash, G.; Hu, J.; Cheung, I. J. J. o. p. s. et al. (2003)"Improved performance of lithium-ion cells with the use of fluorinated carbonate-based electrolytes", 119, pp.359-367.

[35] Huizhe, N.; Le, W.; Ping, G.; Nan, Z.; Chaoren, Y.; Minling, D.; Xulong, G.; Tongtong, H.; Xiaoling, H. et al. (2021)"Recent Advances in Application of Ionic Liquids in Electrolyte of Lithium Ion Batteries", *Journal of Energy Storage*.

[36] Kexin, L.; Zhuyi, W.; Liyi, S.; Siriporn, J.; Shuai, Y. et al. (2020)"Ionic liquids for high performance lithium metal batteries", *Journal of Energy Chemistry*.

[37] Hu, M.; Wei, J.; Xing, L.; Zhou, Z. J. J. o. A. E. et al. (2012)"Effect of lithium difluoro (oxalate) borate (LiDFOB) additive on the performance of high-voltage lithium-ion batteries", 42 (5), pp.291-296.

[38] Zhu, Y.; Luo, X.; Zhi, H.; Liao, Y.; Xing, L.; Xu, M.; Liu, X.; Xu, K.; Li, W. J. J. o. m. c. A. et al. (2018)"Diethyl (thiophen-2-ylmethyl) phosphonate: a novel multifunctional electrolyte additive for high voltage batteries", 6 (23), pp.10990-11004.

[39] Zheng, J.; Lochala, J. A.; Kwok, A.; Deng, Z. D.; Xiao, J. J. A. S. et al. (2017)"Research progress to wards understanding the unique interfaces between concentrated electrolytes and electrodes for

energy storage applications", 4 (8), p.1700032.

[40] Yamada, Y.; Furukawa, K.; Sodeyama, K.; Kikuchi, K.; Yaegashi, M.; Tateyama, Y.; Yamada, A. J. J. o. t. A. C. S. et al. (2014)"Unusual stability of acetonitrile-based superconcentrated electrolytes for fast-charging lithium-ion batteries", 136 (13), pp.5039-5046.

[41] Yamada, Y.; Usui, K.; Chiang, C. H.; Kikuchi, K.; Furukawa, K.; Yamada, A. J. A. a. m. et al. (2014)"General observation of lithium intercalation into graphite in ethylene-carbonate-free superconcentrated electrolytes", 6 (14), pp.10892-10899.

[42] Yoshida, K.; Nakamura, M.; Kazue, Y.; Tachikawa, N.; Tsuzuki, S.; Seki, S.; Dokko, K.; Watanabe, M. J. J. o. t. A. C. S. et al. (2011)"Oxidative-stability enhancement and charge transport mechanism in glyme–lithium salt equimolar complexes", 133 (33), pp.13121-13129.

[43] Yamada, Y.; Yamada, A. J. J. o. T. E. S. et al. (2015)"Superconcentrated electrolytes for lithium bat teries", 162 (14), A2406.

[44] Hu, Y.; Li, H.; Huang, X.; Chen, L. J. E. c. et al. (2004)"Novel room temperature molten salt electro lyte based on LiTFSI and acetamide for lithium batteries", 6 (1), pp.28-32.

[45] Wang, J.; Yamada, Y.; Sodeyama, K.; Watanabe, E.; Takada, K.; Tateyama, Y.; Yamada, A. J. N. E. et al. (2018)"Fire-extinguishing organic electrolytes for safe batteries", 3 (1), pp.22-29.

[46] Wang, J.; Yamada, Y.; Sodeyama, K.; Chiang, C. H.; Tateyama, Y.; Yamada, A. J. N. c. et al. (2016)" Superconcentrated electrolytes for a high-voltage lithium-ion battery", 7 (1), pp.1-9.

[47] Qian, J.; Henderson, W. A.; Xu, W.; Bhattacharya, P.; Engelhard, M.; Borodin, O.; Zhang, J.-G. J. N. c. et al. (2015)"High rate and stable cycling of lithium metal anode", 6 (1), pp.1-9.

[48] Suo, L.; Hu, Y.-S.; Li, H.; Armand, M.; Chen, L. J. N. c. et al. (2013)"A new class of solvent-in-salt electrolyte for high-energy rechargeable metallic lithium batteries", 4 (1), pp.1-9.

[49] Zheng, J.; Chen, S.; Zhao, W.; Song, J.; Engelhard, M. H.; Zhang, J.-G. J. A. E. L. et al. (2018)"Ex tremely stable sodium metal batteries enabled by localized high-concentration electrolytes", 3 (2), pp.315-321.

[50] Zheng, Y.; Soto, F. A.; Ponce, V.; Seminario, J. M.; Cao, X.; Zhang, J.-G.; Balbuena, P. B. J. J. o. M. C. A. et al. (2019)"Localized high concentration electrolyte behavior near a lithium–metal anode surface", 7 (43), pp.25047-25055.

[51] Perez Beltran, S.; Cao, X.; Zhang, J.-G.; Balbuena, P. B. J. C. o. M. et al. (2020)"Localized high con centration electrolytes for high voltage lithium–metal batteries: correlation between the electrolyte composition and its reductive/oxidative stability", 32 (14), pp.5973-5984.

[52] Zhang, J.-G ; X,W.; Zou, L.; Cui, Z.; Jia, H.; Engelhard, M. H.; Matthews, B. E.; Cao, X.; Xie, Q.; Wang, C.; Manthiram, A. J. M. T. et al. (2021)"Stabilizing ultrahigh-nickel layered oxide cathodes for high-voltage lithium metal batteries", 44, pp.15-24.

[53] Chen, S.; Zheng, J.; Mei, D.; Han, K. S.; Engelhard, M. H.; Zhao, W.; Xu, W.; Liu, J.; Zhang, J. G. J. A. m. et al. (2018)"High-voltage lithium-metal batteries enabled by localized high-concentration electrolytes", 30（21）, p.1706102.

[54] Jiang, L.-L.; Yan, C.; Yao, Y.-X.; Cai, W.; Huang, J.-Q.; Zhang, Q. et al. (2021)"Inhibiting Solvent Co-Intercalation in a Graphite Anode by a Localized High-Concentration Electrolyte in Fast-Charging Batteries", 60 (7), pp.3402-3406.

[55] Liping, Y.; Jun, M.; Jianjun, Z.; Jingwen, Z.; Shanmu, D.; Zhihong, L.; Guanglei, C.; Liquan, C. et al. (2016)"All solid-state polymer electrolytes for high-performance lithium ion batteries", *Energy Storage Materials*.

[56] Shuai, T.; Wei, G.; Yongzhu, F. et al. (2020)"Advances in Composite Polymer Electrolytes for Lith ium Batteries and Beyond", *Advanced Energy Materials*.

[57] Penghui, Y.; Haobin, Y.; Zhiyu, D.; Yanchen, L.; Juan, L.; Marino, L.; Junwei, W.; Xingjun, L. et al. (2019)"Review on Polymer-Based Composite Electrolytes for Lithium Batteries", F*rontiers in Chemistry*.

[58] Hangchao, W.; Li, S.; Ghulam, Y.; Li, W.; Hong, X.; Xiangming, H. et al. (2020)"Reviewing the cur rent status and development of polymer electrolytes for solid-state lithium batteries", *Energy Storage Materials*.

[59] Marlena, U.; Viktor, E.; Patrick, B.; Martin, W. et al. (2017)"Ion dynamics in solid electrolytes for lithium batteries", *Journal of Electroceramics*.

[60] Fei, L.; Zhuyi, W.; Liyi, S.; Jiefang, Z.; Kristina, E.; Jonas, M.; Shuai, Y. et al. (2019)"Challenges and development of composite solid-state electrolytes for high-performance lithium ion batteries", *Journal of Power Sources*.

[61] Xinyou, K.; Yan, W.; Guofeng, R.; Chris, Y. et al. (2019)"Towards rationally mechanical design of in organic solid electrolytes for all-solid-state lithium ion batteries", *Energy Storage Materials*.

[62] Yun, Z.; Yuze, Y.; Jiahua, O.; Matthew, L.; Dan, L.; Haozhen, D.; Zhaoqiang, L.; Khalil, A.; Aiping, Y.; Zhongwei, C. et al. (2020)"A review of composite solid-state electrolytes for lithium batteries: fundamentals, key materials and advanced structures", *Chemical Society Reviews*.

6　中国における次世代全固体リチウム電池技術の研究開発の動向

はじめに

全固体リチウム電池は、その高い安全性とエネルギー密度の優位性から、次世代電池技術の発展の方向性の主流になりつつあり、世界各国の科学研究機関や企業が重点的な研究開発と産業化への展開を行っている。「中国固体電池業界市場の展望と投資戦略計画の分析報告」[79]によると、現在、世界で50社以上の企業が全固体リチウム電池の研究開発を手掛けており、中でも、日本のトヨタ自動車、韓国のサムスン電子といった世界大手は、固体電解質と全固体リチウム電池の研究開発を積極的に展開している。中国では、1978年から中国工程院の院士である陳立泉の指導の下で研究が行われ、40年あまりにわたるたゆまぬ努力を経て、中国の固体リチウム電池分野を飛躍的に発展させるための強固な基礎を築き上げてきた。

「自動車」と「エネルギー」の大国として、中国は目下の「ダブルカーボン」戦略、「自動車大国」から「自動車強国」を目指す信念、この二重の駆動力の下で全固体リチウム電池技術の開発を強力に推進している。第13次5カ年計画の中では、「新エネルギー自動車」「スマートグリッド技術と設備」「ナノテクノロジー」「材料ゲノム工学のキーテクノロジーと支援プラットフォーム」などの特別プロジェクトにおいて、全固体リチウム電池の基礎科学の研究、およびキーテクノロジーの開発を大々的に支持している。また、第14次5カ年計画では、「エネルギー貯蔵とスマートグリッド技術」などの重点特別プロジェクトにて、全固体リチウム電池の発展を支持する旨が引き継がれている。

中華人民共和国工業情報化部が制定した「新エネルギー自動車産業発展計画（2021～2035年）」[80]では、「固体動力電池技術の研究開発および産業化の加速化」を明確に要求している。全固体リチウム電池を「新エネルギー自動車のコア技術の難関攻略プロジェクト」として、全固体リチウム電池技術分野において、中国が国際的な先進水準に到達することを目指す。そして、2030年までに中国の液体電解質を固体電解質へと移行させる目標を打ち出し、固体電池の発展に関する問題を初めて国家レベルまで引き上げた。これにより、北京市・天津市・安徽省・山東省などの省や市は、固体電池の発展に注力する目標を明確化し、固体電池の先端技術は研究開発から産業化の段階へと移行が加速化している。

本章は公開された論文、特許および企業報告にもとづき、全固体リチウム電池分野における中国の科学研究機関や大学の基礎科学研究の進展、企業の発展動向に焦点を当てている。全固体リチウム電池のボトルネックとなっている問題について、商業化の潜在価値を持つさまざまな種類の固体電解質を中心に、中国国内の科学研究チームによる研究開発の進展度合いを整理し、中国の固体電池業界における関連企業の展開計画を分析した。

中国の全固体リチウム電池分野の発展計画の次の段階に向けて、また、世界各国が中国の全固体リチウム電池分野の発展過程を振り返るにあたり、本章は有意義な参考材料を提供するであろう。

[79] https://bg.qianzhan.com/report/keys/9b4cb24b.html

[80] http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm

6.1 硫化物系固体電解質の基幹材料の研究動向

6.1.1 中国科学院物理研究所

大気環境での大量調製に適した一段階気相合成法を高度化し、大気中で安定した硫化物系固体電解質（$Li_{4-x}Sn_{1-x}M_xS_4$）の調製に応用した。また、フッ素化ポリシロキサンの超疎水性がリチウムイオン伝導を促し、硫化物系 Li_6PS_5Cl 固体電解質の大気安定性が向上することを証明した［1, 2］。

産業化の面では、すでに質量としてキログラム規模の硫化銀ゲルマニウム鉱硫化物固体電解質のロット調製を行っている。湿式塗布による大面積の硫化物系固体電解質膜の調製技術を確立し、単層・多層積層シート型の硫化物系全固体ラミネート電池（パウチセル）の試作を完成して、現在は硫化物系全固体電池の少量製造ラインの建設を進めている。

6.1.2 中国科学院青島バイオエネルギー・プロセス研究所

硫化物系固体リチウム電池の劣化メカニズムと性能向上について研究を行った。In-situ 走査型透過電子顕微鏡法（In-situ STEM）・微分位相コントラスト（DPC）イメージング法を利用し、$LiCoO_2$|Li_6PS_5Cl 界面の電荷分布と変化の In-situ 可視化観察を実現した。不連続性強誘電体修飾層を形成することで、界面に生じる空間電荷層問題を解決し、界面リチウムイオン移動のダイナミクス、$LiCoO_2$|In-Li 全固体リチウム電池のレート特性を向上した［3］。電気化学的親和性が高く、低リチウムイオン移動障壁が低いリン酸ジルコニウムリチウム $Li_xZr_2(PO_4)_3$ 修飾層を $LiCoO_2$ 表面に形成することで、4.5V の $LiCoO_2$|In-Li 全固体リチウム電池の初期容量は 143.3mAh g^{-1}、100 サイクル経過時の容量維持率は 95.5% を達成した［4］。その一方で、シンクロトロン放射 X 線トモグラフィー（SRX-ray μ CT）、飛行時間型二次イオン質量分析法（TOF-SIMS）、有限要素解析（FEA）モデリング手法など、さまざまなキャラクタリゼーション技術を組み合わせて、$Li_{10}SnP_2S_{12}$ 全固体リチウム電池における電気エネルギー・化学エネルギー・機械エネルギーの融合メカニズムを解明した［5］。

現在すでにキログラム規模の硫化物系電解質の調製能力、硫化物・高分子複合電解質を量産化する調製能力を備え、硫化物系複合電解質の全固体電池の実用化に向けた試作を行っている。

6.1.3 中国科学院寧波材料技術・工程研究所

加圧高温焼結法で作製した緻密 Li_6PS_5Cl 薄膜シートは、室温イオン導電率 6.11mS cm^{-1}、限界電流密度 1.05mA cm^{-2} を実現した［6］。無水アセトニトリルを使用し、湿式研磨・加圧高温焼結法で調製したリチウム希薄・塩素過剰の硫化物系固体電解質 $Li_{6-x}PS_{5-x}Cl_{1+x}$（$0 \leq x \leq 0.8$）は、室温イオン導電率が 6.18mS cm^{-1} に達した［7］。金属リチウムへの安定性に優れ、室温イオン導電率 1.57mS cm^{-1} の低温相 $Li_7P_2S_8I$ を開発した［8］。

硫化物系固体電解質の大面積の成膜に対し、冷却ロールによる直接加圧成形、ボールミリング・加熱ロール加圧成形の成膜技術を高度化され、それぞれの膜厚は 35 μ m、30 μ m、室温イオン導電率は 0.2mS cm^{-1}、8.4mS cm^{-1} である［9, 10］。

6.1.4 清華大学

南策文のチームは、液相法（トルエンまたは酢酸エチルを溶媒に使用）で膜厚 120 μ m の自立型硫化物系固体電解質膜を調製し、さらに別途リチウム塩 LiTFSI を加えることで、硫化物系固体電解質膜のイオン導電率が上昇することがわかった［11］。$75Li_2S{\cdot}25P_2S_5$ の結晶度が全固体リチウム電池の性能に与える影響について研究を行い［12］、$Li_6PS_5Cl_{0.5}Br_{0.5}$・多層カーボンナノチューブを複合正極（非晶質活物質を In-situ 形成）、$Li_6PS_5Cl_{0.5}Br_{0.5}$ を固体電解質、InLi を負極とした全固体リチウム電池を開発し、室温環境で 1000 サイクル経過時の容量維持率 94%、容量 1.24mwah cm^{-2} を達成した［13］。

張興のチームは、湿式法で膜厚 65 μ m の自立型固体電解質複合膜を調製し、高電流密度（3.8mA cm^{-2}）、高負荷（4mAh cm^{-2}）の条件下で、Li-In 負極のデンドライト成長状況について研究を行った［14,15］。

張強のチームでは、Li_6PS_5Cl をセルロースフィルムに注入し、膜厚 60 μ m の自立型固体電解質膜を調製、室温導電率 6.3mS cm^{-1} を達成した。また、急速充電下での $Li_7P_3S_{11}$ 固体電解質の界面における電気化学的酸化還元メカニズムの研究を行った［16, 17］。

6.1.5 その他の科学研究機関

(1) 北京理工大学

ドーパントで $Li_7P_3S_{11}$ の結晶度を制御し、結晶度の高い $Li_7P_{2.9}Ce_{0.2}S_{10.9}C_{l0.3}$（3.2mS cm^{-1}）、大気中で安定した $Li_{6.95}Zr_{0.05}P_{2.9}S_{10.8}O_{0.1}I_{0.4}$（3.01mS cm^{-1}）を開発し、Li_2S 正極を用いた全固体リチウム硫黄電池に適用した［18, 19］。

(2) 燕山大学

In-situ 電子顕微鏡法（EM）により、$Li_{10}GeP_2S_{12}$ 固体電解質の化学的・機械的な劣化は固体電解質粒子の大きさに密接に関係し、粒子の亀裂や粉末化は臨界状態下の大きさで発生して劣化を招くことがわかった［20］。

(3) アモイ大学

固体電池において、単結晶･多結晶ハイニッケル系正極の電気化学的･力学的カップリング効果がハイニッケル系正極の完全な微細構造に及ぼす影響を比較した。その結果、単結晶の力学的安定性がより良好であるとわかった［21］。

(4) 中国科学院化学研究所

In-situ 電気化学原子間力顕微鏡法（EC-AFM）を利用し、$Li_{10}GeP_2S_{12}$ 全固体リチウム電池の Li、Li-In、In 負極の動的なリチウム挿入・離脱過程と SEI 被膜の変化をそれぞれ明らかにした。Li-In 二次合金、In 電極上で均一かつ柔軟な皺構造を形成する SEI 膜は、負極の保護と Li 適応度の制御に効果的であることを解明した［22］。

6.2 酸化物系固体電解質の基幹材料の研究動向

6.2.1 中国科学院物理研究所

断熱型加速速度熱量計を使用し、各種の酸化物系固体電解質と金属リチウムとの熱親和性について研究を行った。熱安定度は $Li_{1.5}Al_{0.5}Ge_{1.5}(PO_4)_3$ < $Li_{1.4}Al_{0.4}Ti_{1.6}(PO_4)_3$ < $Li_{3x}La_{2/3-x}TiO_3$ < $Li_{6.4}La_3Zr_{1.4}Ta_{0.6}O_{12}$ の順で高くなる。熱暴走のメカニズムについて、酸化物系固体電解質が金属リチウムと接触した後、高温下の界面で発生する化学反応で熱が生まれ、その熱が酸化物系固体電解質を分解して酸素が発生し、さらに金属リチウムと激しい反応を起こしてさらなる発熱を招くことを解明した［23］。In-situ 卓上走査型電子顕微鏡（SEM）を使用し、Li|$Li_{6.4}La_3Zr_{1.4}Ta_{0.6}O_{12}$|Ti 全固体電池システムにおけるリチウムデンドライトの成長、および電解質の亀裂進展の微視的過程に対する In-situ 観察に初めて成功した。また、In-situ 中性子深さ方向分析（NDP）により、金属リチウムの三次元構造電極における堆積挙動の定量的研究を行った［24］。

6.2.2 青島大学

基礎研究の面では、金属リチウムとリチウムランタンジルコニウム酸化物電解質との間に、電子絶縁イオンが導通するポリアクリル酸リチウム層を形成することで、固体電解質のリチウムデンドライトの成長を抑制し、室温環境、電流密度 1mA cm^{-2}（面積容量 1mAh cm^{-2}）の条件下で 400 回の安定した充放電サイクルを可能にした［25］。金属リチウムと $Li_7La_3Zr_2O_{12}$ との間に、イオン・電子を伝導させる $Li_{56}La_{24}Zr_{15}TiO_{96}$ または Li_3N-Cu 層を形成し、局部的な過電圧を制御することで、リチウムデンドライトの成長を抑制した［26, 27］。$Li_7La_3Zr_2O_{12}$ をドーパミンで被覆することで、大気安定性が向上し、$Li_7La3Zr_2O_{12}$ 粉体が凝集しやすいという問題を解決した［28］。

産業開発の面では、酸化物系固体電解質粉体の各種スケール（μm ～ nm）に合わせた調製を可能にし、室温イオン導電率 1mS cm^{-1} 以上の立方晶のガーネット型電解質の大量調製を行った。また、優れた分散性を有する超微粉体の電解質を調製した。高緻密化した酸化物セラミックス系固体電解質の加工ラインを設置して、ガーネット型電解質、NASICON 型電解質、ペロブスカイト型電解質、ナトリウムイオン伝導体など、顧客のニーズに応じてさまざまな種類・規格の酸化物セラミックス系固体電解質を大量に加工できる。

6.2.3 中国科学院上海珪酸塩研究所（SICCAS）

$Li_7La_3Zr_2O_{12}$ の LiF-LiCl 修飾層はリチウム親和性・電子絶縁性を兼ね備える三元架橋構造を持ち、それに Ta をドープすることで、毛管吸引作用によりリチウム金属と固体電解質の湿潤が促進され、$Li_7La_3Zr_2O_{12}$ は均一かつ堅固な界面を構築した。同時に、この修飾層の低導電性により、電子の界面通過を抑制し、リチウムデンドライトの界面浸透や内部形成を防止する［29］。大気環境で自発的に Ga_2O_3 を形成する Ga の特性を利用し、液体金属ガリウム Ga でガーネット型酸化物系固体電解質 $Li_{6.5}La_3Zr_{1.5}Ta_{0.5}O_{12}$ の表面をコーティングすると、その表面に均一なリチウム親和層が形成された。リチウム界面に対する接触抵抗率を 5 Ω cm^2 まで低減し、電流密度 0.2mA cm^{-2}、超低分極電圧値（± 10mV）の条件下、9,930 時間以上の安定したサイクル特性を示した［30］。そのほか、リチウム・ナトリウム共晶合金の緩衝層（バッファ層）は、Ta をドープした $Li_7La_3Zr_2O_{12}$ 固体電解質と金属リチウムとの浸潤性を向上することを発見し、サイクル安定性に優れた Li-Na|Ta-$Li_7La_3Zr_2O_{12}$|FeF_3 全固体リチウム電池の構築に成功した［31］。

一方、流延法をベースに、連続調製が可能なセラミックス系固体電解質膜の成膜技術を開発した。膜厚は 20 ～ 200 μ m の範囲で調整可能、膜密度は 98.0 ～ 99.9%、イオン導電率は 1mS cm^{-1} を上回った。

6.2.4 中国科学院化学研究所

中温環境（< 180 ℃）において、$Li_{6.4}La_3Zr_{1.4}Ta_{0.6}O_{12}$ 固体電解質を NH_4F と反応させ、表面の LiOH、Li_2CO_3 が NH_4F と反応して LiF を生成することで、大気安定性が向上するとともにリチウムデンドライトの成長を抑制できる［32］。曹安民のプロジェクトチームは、$Li_{6.5}La_3Zr_{1.5}Ta_{0.5}O_{12}$ 表面に Al_2O_3 ナノ薄膜を形成することで、Li との界面のインピーダンスを低減した。この固体電解質を用いた $LiNi_{0.83}Co_{0.07}Mn0.1O_2$|Li 全固体電池は、負荷量 4.8mg cm^{-2} の条件下で可逆比容量 201.5mAh g^{-1}、100 サイクル経過時の容量維持率 90.2% を実現した［33］。

$Li_{6.4}La_3Zr_{1.4}Ta_{0.6}O_{12}$ 固体電解質粒子の表面をポリアクリロニトリル層で均一に被覆して、超固体電解質を含有（94.3wt.%）する粉体を作製し、流延法により極薄（膜厚 <10 μ m）の固体電解質膜を調製した［34］。

6.3 ハロゲン化物系固体電解質の基幹材料の研究動向

6.3.1 国聯自動車動力電池研究院（Glabat）

湿式化学法で合成した高純度希土類ハロゲン化物系固体電解質、Li_3YCl_6、Li_3YBr_6、Li_3ErCl_6、Li_3ScCl_6 の室温イオン導電率は 1mS cm^{-1} に達した。また、合成したハロゲン化物系固体電解質 $Li_{2.556}Yb_{0.492}Zr_{0.492}Cl_6$ の室温イオン導電率は 1.58mS cm^{-1} に達し、これを用いた 4.3V の $LiNi_{0.83}Co_{0.12}Mn_{0.05}O_2$|Li 全固体リチウム電池の 0.1C レートでの初期比容量は 209.8mAh g^{-1}、1 サイクル目のクーロン効率は 91.5%、0.3C レートでの 100 サイクル経過時の容量維持率は 78% となった［35］。ハロゲン化物系固体電解質と金属リチウムとの間で生じる高反応活性のボトルネックを解決するにあたり、イオン導電率が高く（1.8mS cm^{-1}）、リチウム負極に直接接触させて使用するフッ化ハロゲン化物系固体電解質 $Li_3YBr_{5.7}F_{0.3}$ を合成した［36］。

6.3.2 中国科学技術大学

低コストかつ安定した新規塩化物系固体電解質 Li_2ZrCl_6 の設計・合成を行ったところ、相対湿度が最大 5% の大気中で、イオン導電率・結晶構造ともに変化はみられなかった。湿気に弱い塩化物系・硫化物系の固体電解質と比較し、はるかに容易に大量調製ができるようになると期待される。Li_2ZrCl_6 固体電解質、単結晶 $LiNi_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1}O_2$ 正極、Li-In 負極からなる全固体リチウム電池の比容量は、高電流密度 200 mA g^{-1} の条件下、200 サイクル経過時で 150 mAh g^{-1} とほとんど減衰していないことがわかった［37］。

6.3.3 中国科学院上海珪酸塩研究所（SICCAS）

低温イオン液体のフッ素化を用いたエネルギー損失の少ない合成方法で、ナノコンポジット構造のリチウム過剰フッ化物系固体電解質、Li_3GaF_6 と Li_3AlF_6 の調製に成功した。その特徴には、構造内部に開放性の高いイオンチャネルを持つこと、結晶粒界がイオン液体で修飾されていることがある。最適化した Li_3GaF_6 は、フッ素系固体電解質におけるイオン導電率の最高記録（室温下で 10^{-4} S cm^{-1} にほぼ到達）を達成し、

これをベースに構築した Li|$LiFePO_4$ 固体電池は、1C 高レートで 150 サイクル以上の作動に成功している［38］。

6.4 有機無機複合固体電解質の基幹材料の研究動向

6.4.1 中国科学院青島バイオエネルギー・プロセス研究所

基礎研究の面では、自立型三次元多孔質の無機固体電解質の構造体（$Li_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO_4)_3$、$Li_6PS_5Cl$）にポリエチレングリコールメチルエーテルの単量体をそれぞれ注入し、その場固化技術により、固 / 固界面が一体化した三相浸透流構造の複合固体電解質を設計した。固体核磁気と ^6Li 同位体トレーサーの組合せ法により、この三相浸透流複合電解質における Li^+ の輸送挙動を考察し、界面相 / 有機相 / 無機相での Li^+ の三相共同輸送メカニズムを明らかにした。2 種類の三相浸透流複合固体電解質と電極界面との卓越した親和性によって、$LiCoO_2$|Li および $LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O_2$|Li 全固体電池の高電圧下での室温作動が可能となる［39, 40］。

高安全性・高比エネルギーの高分子固体リチウム電池のその場固化による界面融合技術の分野で一連の進展を成し遂げ、さらに、固体電池の産業化にも成功している。エネルギー密度は最高 350Wh kg^{-1} に到達し、新エネルギー自動車で 1000km の走行テストの検証を行った。現在では、リチウム金属負極を使用し、セル単体エネルギー密度 520Wh Kg^{-1} の固体電池の最適化を図っている。

6.4.2 中国科学院物理研究所

LiTFSI-PEO 高分子系固体電解質と $LiCoO_2$ の間で発生する界面破壊のメカニズムについて研究を行った。PEO は 3.9V で酸化分解を開始し、$LiCoO_2$ の格子酸素イオンは 4.2 V で PEO を酸化して分解を促進した。しかしながら、$LiCoO_2$ を $Li_{1.4}Al_{0.4}Ti_{1.6}(PO_4)_3$ で被覆することで、高電圧下での PEO の分解を抑制できることを発見した［41, 42］。

大量調製が容易な超薄の複合固体電解質膜を開発した。$Li_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO_4)_3$ で被覆したポリエチレンセパレータを基体とし、PEO/LiTFSI 溶液を基体のセパレータの空隙に充填すると、乾燥後に連続的なリチウムイオン輸送チャネルが形成される。組立てられた $LiFePO_4$|Li 全固体電池の容量は、60 ℃環境、0.2C レートの条件下、200 サイクル経過時でも 60mAh g^{-1} に到達した［43］。

6.4.3 青島大学

一層は $LiNi_{0.6}Co_{0.2}Mn_{0.2}O_2$ に符合するポリアクリロニトリル（PAN）-$Li_{6.4}La_3Zr_{1.4}Ta_{0.6}O_{12}$ 膜、もう一層は金属リチウムとマッチする PEO-$Li_{6.4}La_3Zr_{1.4}Ta_{0.6}O_{12}$ 膜からなる二層の有機 / 無機複合固体電解質膜を設計した［44］。正極支持層への層 / 層塗布方式により、積層型の有機 / 無機複合固体電解質膜を形成した。具体的な方法は、正極に複合固体電解質（PAN 中の $Li_{6.4}La_3Zr_{1.4}Ta_{0.6}O_{12}$ 含量率 10%）をまず一層塗布し、さらに複合固体電解質（PEO 中の $Li_{6.4}La_3Zr_{1.4}Ta_{0.6}O_{12}$ 含有量 40%）を再度塗布する。組立てられた $LiFePO_4$|Li（高負荷 15.2 mg cm^{-2}）全固体電池は、0.1C レートでの初期容量 129mAh g^{-1}、室温環境での 150 サイクル経過時の容量維持率 80.6% を達成した［45］。

一方、エトキシ化トリメチロールプロパントリアクリラートのその場重合を、大面積の $Li_{6.4}La_3Zr_{1.4}Ta_{0.6}O_{12}$ 固体電解質シートに応用し、高性能な界面を有するフレキシブル固体リチウム電池を構築する［46］。

6.4.4 清華深圳国際大学院（清華 SIGS）

超高誘電率・緩和型強誘電性高分子材料のポリフッ化ビニリデン -co- トリフルオロエチレン -co- クロロトリフルオロエチレンと LiTFSI から新規高分子系固体電解質を調製し、室温イオン導電率 3.1×10^{-4}S cm^{-1} を達成した。組み立てた $LiFePO_4$|Li および $LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mo_{0.1}O_2$|Li 固体電池は、室温環境で安定したサイクル特性を有する［47］。最近では、$La_2Zr_2O_7$ ナノワイヤと PEO を使用して、正極にて、「固 / 高分子 / 固」を融合させた効率的・可変的なリチウムイオン輸送チャネルを形成した。そのイオン導電率は 4.56×10^{-6}S cm^{-1} 程度と低いものの、組立てられた $LiFePO_4$|Li 全固体電池は、室温環境での充放電サイクルは 1,400 回と安定し、しかも PVDF を用いた $LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mo_{0.1}O_2$|Li 全固体電池では 2,880 回に到達した［48］。

6.4.5 北京科技大学（USTB）

無溶媒法で調製した複合固体電解質膜を用い、ポリテトラフルオロエチレンと $Li_{6.75}La_3Zr_{1.75}Ta_{0.25}O_{12}$ を直接ロールプレスで三次元構造膜（基材はナイロンメッシュ）に加圧成形した後、スクシノニトリル -LiTFSI 共融混合物で充填する。こうして調製した難燃性複合固体電解質の室温イオン導電率は 1.2×10^{-4}S cm^{-1} と、$LiFePO_4$|Li および $LiNi_{0.5}Mn_{0.3}Co_{0.2}O_2$|Li 全固体電池に適用できる［49］。通常の安価な NaCl 粉体を犠牲鋳型として使用することで、$Li_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO_4)_3$ 多孔質イオン輸送構造体の斬新かつシンプルな合成スキームの開発に成功した。これに PEO-LiTFSI を注入して、複合固体電解質を調製する［50］。

6.4.6 その他の研究機関

(1) 中国科学院過程工程研究所

商品化しているシランカップリング剤、(3- クロロプロピル) トリメトキシシランを「架け橋」として利用し、$Li_{10}GeP_2S_{12}$ とポリエチレングリコールを化学結合させてリチウムイオンの高速輸送チャネルを形成した後、そこへ PEO と LiTFSI を加えて複合固体電解質を調製する。この複合固体電解質の室温イオン導電率は 9.83×10^{-4} S cm^{-1} と、従来の PEO の 10 倍の数値を記録した［51］。

(2) 中国科学院寧波材料技術・工程研究所

超薄型（10 μ m）、高引張強度（103MPa）、界面との良好な相溶性を有する固体高分子電解質を発表し、フレキシブル全固体リチウム金属電池に適用した。このうち、7 μ m のポリエチレンセパレータを支持体として選び、逆相法により、セパレータの両側に多孔質のポリメチルメタクリレート / ポリスチレン界面層を密着させる。無溶媒のポリエチレングリコールメチルエーテルアクリラートと LiTFSI を充填剤とし、その場熱硬化法により、変性ポリエチレンセパレータ内部に充填して、高速かつ連続的なリチウムイオン輸送チャネルを形成した［52］。

6.5 固体電池業界におけるスタートアップ企業の発展

6.5.1 輝能科技股份有限公司

固体電池分野で比較的急成長している輝能科技股份有限公司（輝能科技、PLG）は、すでに固体電池のプロトタイプの製造に成功している。負極にはリチウム金属を完全採用し、質量エネルギー密度 383Wh kg^{-1}、体積エネルギー密度 1,025Wh L^{-1}、充放電サイクルは 500 回に到達した。

2020 年 7 月、杭州市に中国の本拠点を建設し、海外の製造拠点の建設プロジェクトへの投資を行い、それには固体リチウムセラミックス電池セルの産業化プロジェクトも含まれている。プロジェクトの順調な推進に向けて、2021 年 4 月に D ラウンドで約 1 億ドルの資金調達を完了した。これまでに、軟銀中国資本（ソフトバンク・チャイナ・ベンチャーキャピタル、SBCVC）と丹豊資本（dGav Capital）から継続的な投資を受けている。

なお、2019 年には台湾・桃園市において、上海蔚来汽車（NIO）と戦略的提携協定に調印した。両社は共同で輝能 MAB 固体電池パックを搭載した試作車を製造したが、この固体電池の具体的な構造は公表されていない。

6.5.2 北京衛藍新能源科技有限公司

中国工程院院士である陳立泉のチームが率いるハイテク企業、北京衛藍新能源科技有限公司（衛藍新能源）は、おもに変性ハイニッケルの三元材料とシリコン系負極材料をベースに、固体電解質やイオン導電膜などを加えた固体電池の材料体系を公表した。これは酸化物系固体電解質とその場固化技術を組合せた固液混合電池に属する。

現在は 2GWh の固液混合固体動力電池の大規模な製造ラインを建設中で、350 ～ 360Wh kg^{-1} の新エネルギー自動車用動力バッテリーを中心に製造する予定である。自動車用動力電池分野において、300Wh kg^{-1} 以上のハイニッケル系三元正極を用いたハイブリッド固体電池の設計･開発をすでに完成し、貫通（釘刺し）･圧壊・過充電・ショートなどの濫用試験にも合格している。

6.5.3 清陶（昆山）能源発展有限公司

清陶（昆山）能源発展有限公司（清陶能源）は、中国科学院院士である南策文のチームが率いるハイテク企業である。実測値 368Wh kg^{-1} の固体動力電池は、「電気自動車用動力バッテリーの安全要求」（GB/T 38031-2020）などの国家強制認証を取得している。2020 年 7 月、E+ ラウンド融資を完了した。上汽資本がリード投資家となり、昆山国創投資集団、淮安市淮上英才創業投資から協調投資を受けている。また同じ頃、清陶能源が投資総額 55 億元を投じた宜春全固体リチウムイオン電池プロジェクトの第 1 期がスタートした。2019 年 8 月に着工した同プロジェクトは、年産 10GWh 規模の全固体リチウムイオン電池の製造拠点を建設する計画である。その第 1 期の投資額は 5.5 億元、年産 1GWh の固体動力リチウム電池の製造能力を持つ。第 2 期の投資額は 49.5 億元で、新たに 9GWh の製造能力を導入する予定である。

公式発表によると、清陶能源はガーネット型酸化物系電解質のリチウムランタンジルコニウム酸素に焦点を当て、固体電解質の量産化における技術的難題を解消し、すでに大規模な量産化を開始した。同時に、正極材料の表面被覆も行い、ハイニッケル系材料に対する固体電解質の被覆専用ラインを設置した。その一方

で、自動車メーカーの北京新能源汽車股份有限公司（北汽新能源）と提携し、2020 年に清陶能源の第 1 世代固体電池システムを搭載した純電気自動車（BEV）の試作車を完成し、試験調整を経てラインオフに成功した。また、合衆新能源汽車有限公司と提携し、電気自動車（EV）「Neta U（哪吒 U）」の共同研究開発および性能テストを約 2 年間にわたって実施した。2021 年末までに、固体電池を搭載した Neta U の 500 台の量産を計画していた。

6.5.4 浙江鋒鋰新能源科技有限公司

2017 年以来、浙江锋锂新能源科技有限公司（赣鋒鋰業）は、電池産業チェーンにおける自社の強みを発揮し、固体電池の展開を前倒しして進めてきた。赣鋒鋰業の固体電池には酸化物系厚膜が採用されており、固液混合電池を製造している。現在は、第 1 世代 2GWh 固体電池の試験ラインが順調に稼働している。エネルギー密度が 235-280Wh kg − 1 に達する第 1 世代固液混合電解質のバッテリー製品は、すでに複数の第三者検査機関による安全性試験や顧客のサンプルテストに合格した。また、自動車メーカーとの提携においては、東風汽車公司の東風テクノロジーセンターと江西赣鋒鋰電科技有限公司が正式に契約を結び、固体電池モデルの共同運用について協議し、東風汽車の「E70」へ搭載する固体電池モデルの普及促進協定に合意した。

赣鋒鋰業は NASICON 型リン酸チタンアルミリチウム、ガーネット型リチウムランタンジルコニウム酸素を用いた 2 種類の酸化物系固体電解質製品を発表した。そのうち、イオン導電率 0.8mS cm^{-1} のサブミクロン級 NASICON 型リン酸チタンアルミリチウムは、顧客のニーズに応じて、粉体･スラリー･緻密セラミックスシートの異なる形態での提供が可能である。また、多元素共ドープ技術を利用して、室温イオン導電率 1.1mS cm^{-1} という高イオン導電率を有する第 2 世代ガーネット型リチウムランタンジルコニウム酸素材の開発に成功した。

6.5.5 中国機械工業集団―桂林電器科学研究院有限公司

質量としてキログラム規模の硫化物系固体電解質粉体を開発し、そのリチウムイオン導電率は 3.0mS cm^{-1} を上回る。「動力電池薄膜イオン導電率の測定方法」（NB/T 10827-2021）の制定を主導し、これは硫化物系固体電解質のリチウムイオン伝導性に対する中国初の評価標準となった。

最後に、6.1 から 6.5 までに対応した機関の所在地を、図 6-1 に示す。

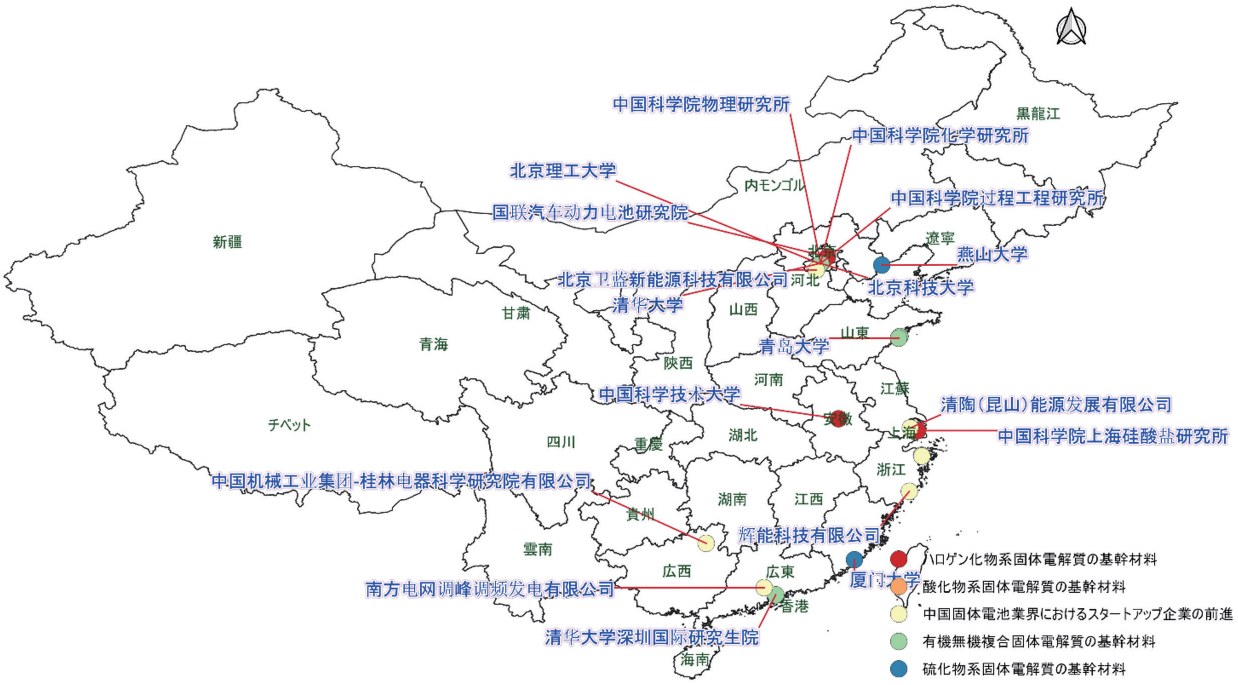


図 6-1 次世代全固体リチウム現地技術の研究機関の所在地

6.6 中国における次世代全固体リチウム電池技術の課題と展望

全固体リチウム電池の発展の見通しは明るいものの、まだ完全には解決されていないボトルネックが数多く存在する。コストや技術の成熟度という現況を鑑みると、企業が公表している技術路線は固液混合電池が主体となっている。全固体リチウム電池のエネルギー密度・レート特性・サイクル寿命の向上を図るため、科学研究機関や重要企業は、新規電解質材料の開発、界面改質、電池の劣化メカニズムなどの基礎科学の側面に注目するだけでなく、大気安定性の高い電解質材料の量産化技術、大面積超薄型固体電解質の連続調製技術、全固体リチウム電池の一体化製造技術など、実用化に向けたキーテクノロジーをますます重視するようになってきた。「ダブルカーボン」戦略目標、キーテクノロジーのブレイクスルーといった背景の下、中国の電池企業と自動車メーカーの協力モデルはより深いレベルへと進化し、新エネルギー自動車分野に新しい協力モデルが登場することとなるであろう。

リチウム電池技術の進歩の道筋、各種の国家計画と各企業の固体電池の展開計画からみて、中国の固体電池業界の発展は大勢の赴くところとなる。今後、固体電池の関連テクノロジーは常に進歩し続け、固体電池そのもののエネルギー密度・安全性・コスト面もさらに向上し、固体電池の量産化・商業化が実現する日もそう遠くない。

商機の波に乗っている中国の固体電池業界だが、自動車メーカー、動力電池メーカー、スタートアップ企業にとって、それは十分な潜在力を持つものの、競争力の高い新たな挑戦でもある。陳立泉院士曰く、「固体電池の発展が加速化すれば、『電動中国（中国の電動化）』を牽引する。政府の強い関心と社会資本の後押しで、固体電池が急速に発展する時代が早々に到来すると信じている」である。

参考資料・文献

[1] Lu, P. et al. (2021)"Superior All-Solid-State Batteries Enabled by a Gas-Phase-Synthesized Sulfide Electrolyte with Ultrahigh Moisture Stability and Ionic Conductivity", *Adv Mater,* 33 (32), p.e2100921.

[2] Xu, J. et al. (2021)"Water - Stable Sulfide Solid Electrolyte Membranes Directly Applicable in All - Solid - State Batteries Enabled by Superhydrophobic Li+ - Conducting Protection Layer", *Advanced Energy Materials*, 12 (2).

[3] Wang, L. et al. (2020)"In-situ visualization of the space-charge-layer effect on interfacial lithium-ion transport in all-solid-state batteries", *Nat Commun*, 11 (1), p.5889.

[4] Wang, L. et al. (2021)"Bidirectionally Compatible Buffering Layer Enables Highly Stable and Conduc tive Interface for 4.5 V Sulfide - Based All - Solid - State Lithium Batteries", *Advanced Energy Materials*, 11 (32).

[5] Sun, F. et al. (2022)"Clarifying the Electro - Chemo - Mechanical Coupling in Li10SnP2S12 based All - Solid - State Batteries", *Advanced Energy Materials*.

[6] Liu, G. et al. (2020)"Densified Li6PS5Cl Nanorods with High Ionic Conductivity and Improved Critical Current Density for All-Solid-State Lithium Batteries", *Nano Lett,* 20 (9), pp.6660-6665.

[7] Wu, L. et al. (2021)"Wet-Milling Synthesis of Superionic Lithium Argyrodite Electrolytes with Different Concentrations of Lithium Vacancy", *ACS Appl Mater Interfaces*, 13 (39), pp.46644-46649.

[8] Wu, L. et al. (2021)"Superior lithium-stable Li7P2S8I solid electrolyte for all-solid-state lithium batteries", *Journal of Power Sources*, 491.

[9] Liu, G. et al. (2021)"Ultra-thin free-standing sulfide solid electrolyte film for cell-level high energy density all-solid-state lithium batteries", *Energy Storage Materials*, 38, pp.249-254.

[10] Zhang, Z. et al. (2021)"Flexible Sulfide Electrolyte Thin Membrane with Ultrahigh Ionic Conductivity for All-Solid-State Lithium Batteries", *Nano Lett*, 21 (12), pp.5233-5239.

[11] Zhang, Y. et al. (2020)"Free-standing sulfide/polymer composite solid electrolyte membranes with high conductance for all-solid-state lithium batteries", *Energy Storage Materials*, 25, pp.145-153.

[12] Wang, S. et al. (2021)"Influence of Crystallinity of Lithium Thiophosphate Solid Electrolytes on the Performance of Solid - State Batteries", *Advanced Energy Materials*, 11 (24).

[13] Wang, S. et al. (2021)"Lithium Argyrodite as Solid Electrolyte and Cathode Precursor for Solid - State Batteries with Long Cycle Life", *Advanced Energy Materials*, 11 (31).

[14] Luo, S. et al. (2021)"Growth of lithium-indium dendrites in all-solid-state lithium-based batteries with sulfide electrolytes", *Nat Commun,* 12 (1), p.6968.

[15] Luo, S. et al. (2021)"A high energy and power all-solid-state lithium battery enabled by modified sulfide electrolyte film", *Journal of Power Sources*, 485.

[16] Zhu, G.-L. et al. (2020)"Interfacial redox behaviors of sulfide electrolytes in fast-charging all-solid-state lithium metal batteries", *Energy Storage Materials,* 31, pp.267-273.

[17] Zhu, G.L. et al. (2021)"A Self - Limited Free - Standing Sulfide Electrolyte Thin Film for All - Solid - State Lithium Metal Batteries", *Advanced Functional Materials,* 31 (32).

[18] Zhou, L. et al. (2021)"Strong Interfacial Adhesion between the Li2S Cathode and a Functional Li7P2.9Ce0.2S10.9Cl0.3 Solid-State Electrolyte Endowed Long-Term Cycle Stability to All-Solid-State Lithium-Sulfur Batteries", *ACS Appl Mater Interfaces*, 13 (24), pp.28270-28280.

[19] Khurram Tufail, M. et al. (2021)"Insight on air-induced degradation mechanism of Li7P3S11 to de sign a chemical-stable solid electrolyte with high Li2S utilization in all-solid-state Li/S batteries", *Chemical Engineering Journal*, 425.

[20] Zhao, J. et al. (2022)"Size-Dependent Chemomechanical Failure of Sulfide Solid Electrolyte Particles during Electrochemical Reaction with Lithium", *Nano Lett,* 22 (1), pp.411-418.

[21] Liu, X. et al. (2021)"Electrochemo - Mechanical Effects on Structural Integrity of Ni - Rich Cathodes with Different Microstructures in All Solid - State Batteries", *Advanced Energy Materials*, 11 (8).

[22] Wan, J. et al. (2021)"Micromechanism in All-Solid-State Alloy-Metal Batteries: Regulating Homoge neous Lithium Precipitation and Flexible Solid Electrolyte Interphase Evolution", *J Am Chem Soc*, 143 (2), pp.839-848.

[23] Chen, R. et al. (2020)"The Thermal Stability of Lithium Solid Electrolytes with Metallic Lithium", *Joule*, 4 (4), pp.812-821.

[24] Li, Q. et al. (2019)"In-situ visualization of lithium plating in all-solid-state lithium-metal battery", *Nano Energy*, 63.

[25] Huo, H. et al. (2021)"A flexible electron-blocking interfacial shield for dendrite-free solid lithium metal batteries", *Nat Commun*, 12 (1), p.176.

[26] Gao, J. et al. (2020)"Rational Design of Mixed Electronic - Ionic Conducting Ti - Doping Li7La3Zr2O12 for Lithium Dendrites Suppression", *Advanced Functional Materials*, 31 (2).

[27] Huo, H. et al. (2020)"Design of a mixed conductive garnet/Li interface for dendrite-free solid lithium metal batteries", *Energy & Environmental Science*, 13 (1), pp.127-134.

[28] Jia, M. et al. (2021)"Air-stable dopamine-treated garnet ceramic particles for high-performance composite electrolytes", *Journal of Power Sources*, 486.

[29] Ruan, Y. et al. (2020)"A 3D Cross - Linking Lithiophilic and Electronically Insulating Interfacial Engineering for Garnet - Type Solid - State Lithium Batteries", *Advanced Functional Materials*, 31 (5).

[30] Meng, J. et al. (2020)"Li2CO3-affiliative mechanism for air-accessible interface engineering of garnet electrolyte via facile liquid metal painting", *Nat Commun*, 11 (1), p.3716.

[31] Zhang, Y. et al. (2020)"Garnet-Based Solid-State Lithium Fluoride Conversion Batteries Benefiting from Eutectic Interlayer of Superior Wettability", *ACS Energy Letters*, 5 (4), pp.1167-1176.

[32] Duan, H. et al. (2020)"Building an Air Stable and Lithium Deposition Regulable Garnet Interface from Moderate-Temperature Conversion Chemistry", *Angew Chem Int Ed Engl*, 59 (29), pp.12069-12075.

[33] Guo, S. et al. (2022)"Coordination-Assisted Precise Construction of Metal Oxide Nanofilms for High-Performance Solid-State Batteries", *J Am Chem Soc*, 144 (5), pp.2179-2188.

[34] Chen, W.P. et al. (2021)"Bridging Interparticle Li (+) Conduction in a Soft Ceramic Oxide Electrolyte", *J Am Chem Soc*, 143 (15), pp.5717-5726.

[35] Xu, G. et al. (2022)"Origin of high electrochemical stability of multi-metal chloride solid electrolytes for high energy all-solid-state lithium-ion batteries", *Nano Energy*, 92.

[36] Yu, T. et al. (2021)"Superionic Fluorinated Halide Solid Electrolytes for Highly Stable Li - Metal in All - Solid - State Li Batteries", *Advanced Energy Materials*, 11 (36).

[37] Wang, K. et al. (2021)"A cost-effective and humidity-tolerant chloride solid electrolyte for lithium batteries", *Nat Commun*, 12 (1), p.4410.

[38] Hu, J. et al. (2020)"High-conductivity open framework fluorinated electrolyte bonded by solidified ionic liquid wires for solid-state Li metal batteries", *Energy Storage Materials*, 28, pp.37-46.

[39] Wang, Y. et al. (2021)"Facile Design of Sulfide - Based all Solid - State Lithium Metal Battery: In Situ Polymerization within Self - Supported Porous Argyrodite Skeleton", *Advanced Functional Materials*, 31 (28), p.2101523.

[40] Yan, Y. et al. (2021)"In Situ Polymerization Permeated Three-Dimensional Li (+) -Percolated Porous Oxide Ceramic Framework Boosting All Solid-State Lithium Metal Battery", *Adv Sci (Weinh)*, 8 (9), p.2003887.

[41] Qiu, J. et al. (2020)"Enabling Stable Cycling of 4.2 V High - Voltage All - Solid - State Batteries with PEO - Based Solid Electrolyte", *Advanced Functional Materials*, 30 (22), p.1909392.

[42] Nie, K. et al. (2020)"Increasing Poly (ethylene oxide) Stability to 4.5 V by Surface Coating of the Cathode", *ACS Energy Letters*, 5 (3), pp.826-832.

[43] Li, S. et al. (2022)"Solid Polymer Electrolyte Reinforced with a Li1.3Al0.3Ti1.7 (PO4) 3-Coated Separator for All-Solid-State Lithium Batteries", *ACS Appl Mater Interfaces*, 14 (1), pp.1195-1202.

[44] Mu, S. et al. (2021)"Heterogeneous electrolyte membranes enabling double-side stable interfaces for solid lithium batteries", *Journal of Energy Chemistry*, 60, pp.162-168.

[45] Bi, Z. et al. (2021)"Cathode supported solid lithium batteries enabling high energy density and stable cyclability", *Energy Storage Materials*, 35, pp.512-519.

[46] Bi, Z. et al. (2021)"Dual-interface reinforced flexible solid garnet batteries enabled by in-situ solidified gel polymer electrolytes", *Nano Energy*, 90, p.106498.

[47] Huang, Y.-F. et al. (2021)"A relaxor ferroelectric polymer with an ultrahigh dielectric constant largely promotes the dissociation of lithium salts to achieve high ionic conductivity", *Energy & Environmental Science*, 14 (11), pp.6021-6029.

[48] Ma, J. et al. (2022)"Constructing a highly efficient "solid–polymer–solid" elastic ion transport network in cathodes activates the room temperature performance of all-solid-state lithium batteries", *Energy & Environmental Science.*

[49] Jiang, T. et al. (2020)"Solvent - Free Synthesis of Thin, Flexible, Nonflammable Garnet - Based Composite Solid Electrolyte for All - Solid - State Lithium Batteries", *Advanced Energy Materials*, 10 (12), p.1903376.

[50] Wang, G. et al. (2022)"Composite polymer electrolyte with three-dimensional ion transport channels constructed by NaCl template for solid-state lithium metal batteries", *Energy Storage Materials*, 45, pp.1212-1219.

[51] Pan, K. et al. (2020)"A Flexible Ceramic/Polymer Hybrid Solid Electrolyte for Solid-State Lithium Metal Batteries", *Adv Mater*, 32 (17), p.e2000399.

[52] Wang, Z. et al. (2021)"10 mum-Thick High-Strength Solid Polymer Electrolytes with Excellent Inter face Compatibility for Flexible All-Solid-State Lithium-Metal Batteries", *Adv Mater*, 33 (25), p.e2100353.

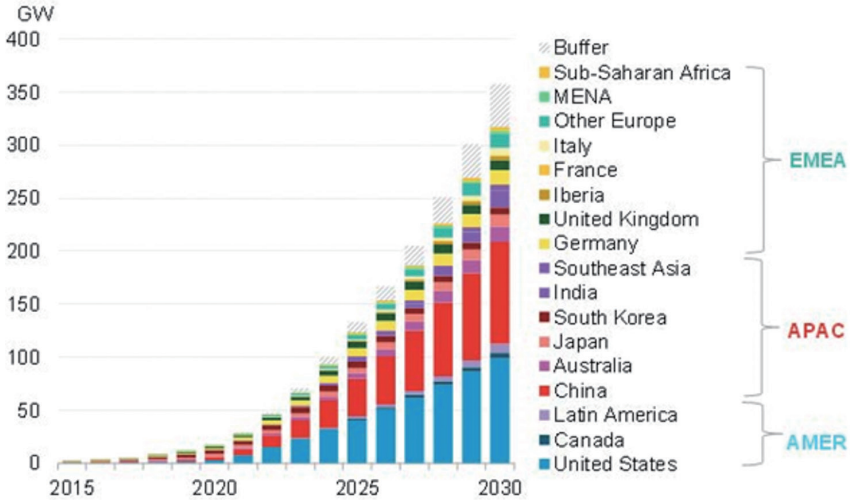
7　中国の次世代蓄電池の発展動向と展望

7.1　カーボンニュートラルを巡る足元の動向と蓄電池

7.1.1 世界のエネルギー貯蔵市場の動向

2021 年 11 月に開催された COP26 サミットの結論は、各国政府が自国の排出量削減目標を達成するために、製造部門や運輸部門の電化（Electrification）を奨励する措置をとることで、グリーンエネルギーへの移行を後押しするものとなった。この電化への流れに反応し、英国、カナダ、オランダなど 24 カ国、米 GM、米フォード、独メルセデスベンツなど自動車メーカー 11 社・団体、金融機関・投資家は、主要市場では 2035 年までに、世界全体では 2040 年までに、すべての新車を EV などゼロエミッションにする共同声明に署名し、発表した。[81]

エネルギーの電化における課題の一つに、電力エネルギー貯蔵の難しさがある。電力は石油などの化石燃料のように簡易に貯蔵できないため、蓄電池などのようにエネルギーの形態を変えて貯蔵する必要がある。このような動向を受け、世界の電力エネルギー貯蔵設備の市場予測では今後 10 年（2020 年 -2030 年）で、エネルギー貯蔵の設備容量が 2020 年 17GW/34GWh の 20 倍以上（2030 年 345GW/999GWh）、関連する投資額が 2,620 億ドル以上になる見込みが報告されている。[82] 同予測（図 7-1）によると、国別では米国と中国が 2 大市場で、2030 年までに世界のエネルギー貯蔵設備の半分を両国で占め、その他、主要市場としてインド、豪州、ドイツ、英国、日本が挙げられた。導入されるエネルギー貯蔵設備の 55% は、再生可能エネルギーへのシフト（グリーン電力の貯蔵用途）向けに提供される。



Source: BloombergNEF. Note: MENA = Middle East & North Africa. Buffer represents markets and use-cases that we are unable to forecast due to lack of visibility.

図 7-1 世界のエネルギー貯蔵設備の市場予測

出典：BloombergNEF（BNEF）[83]

[81] https://ukcop26.org/cop26-declaration-on-accelerating-the-transition-to-100-zero-emission-cars-and-vans/
[82] https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-set-to-hit-one-terawatt-hour-by-2030/
[83] https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-set-to-hit-one-terawatt-hour-by-2030/

この電力貯蔵設備は、カーボンニュートラルを受けて増加する太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの気象条件による出力変動を抑制し、安定した電力供給（需給調整）を実現する重要な設備となる。表 7-1 で示すとおり、電力エネルギー貯蔵設備には、蓄電池や揚水式水力、水素化など、様々な種類がある（今回の BloombergNEF の予測には揚水式水力は含まれていない）[84]。

米国エネルギー省によると、世界全体では約 158GWh が導入済み（日本は約 28GWh）で、揚水式水力は、引き続き有力なエネルギー貯蔵方法とされ、今後も新規の導入が見込まれている[85]。

表 7-1 エネルギー貯蔵設備の種類

蓄電池 ・ナトリウム硫黄電池 ・レドックスフロー電池 ・ニッケル水素電池 ・リチウムイオン電池 ・鉛蓄電池	圧縮空気貯蔵 (CAES：Compressed Air Energy Strage)
	液化空気貯蔵 (LAES：Liquid Air Energy Storage)
	フライホイール
揚水式水力	超電導電力貯蔵 (SMES：Superconducting Magnetic Energy Storage)
水素化 (Power to Gas)	電気二重層キャパシタ (EDLC：Electric Double Layer Capacitor)

出典：NEDO 技術戦略研究センターレポート TSC Foresight[86]

表 7-2 は、エネルギー貯蔵設備の各方式について、再び電力として取り出す場合の設備コストやサイクル効率などの定量的な比較である。設備コストは、方式により幅が大きく、同じ方式内でも規模、設置環境で幅があり、比較は簡単ではない。他方で、今後、揚水式エネルギー貯蔵以上に活用が注目されるのが蓄電池である。BNEF は技術開発と実用化、コストダウンが急速に進む蓄電池であり、今後、エネルギー貯蔵市場を牽引すると予測する。蓄電地は数 kW ～数百 MW の出力に対応できるなど、構成に柔軟性があることから、需要側、発電側で幅広く利用できることがメリットとして挙げられている。

[84] https://www.nedo.go.jp/content/100866310.pdf
[85] https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/12/f81/Energy%20Storage%20Market%20Report%202020_0.pdf
[86] https://www.nedo.go.jp/content/100866310.pdf

表 7-2 エネルギー貯蔵設備の方式

方式	ユニット容量					設備コスト [千円 /kWh]	設備コスト [千円 /kW]	エネルギー密度 [Wh/L]	サイクル効率 [%]	需給調整時間幅			
	100kWh	MWh	10MWh	100MWh	GWh					分	時	日	月
蓄電池	●	●	●	●		32-682	33-385	20-400	75-95	●	●	●	
揚水式水力				●	●	28-47	55-506	0.1-0.2	50-85	●	●	●	
水素化 (Power to Gas)			●	●	●	48-96 (変換のみ)	55-83	600 (200barの圧縮水素)	22-50		●	●	●
圧縮空気貯蔵 (CAES) ※地中式			●	●	●	7-14	55-165	2-6	27-70	●	●	●	
液化空気貯蔵 (LAES)			●	●	●	29-58	99-209	–	55-85	●	●	●	
フライホイール	●					858-968	14-55	20-80	90-95	●			
超電導電力貯蔵 (SMES)	●	●				77,000	14-57	6	90-95	●			
電気二重層キャパシタ (ELDC)	●					1,100	14-57	10-20	90-95	●			

出典：NEDO 技術戦略研究センターレポート TSC Foresight

7.1.2 畜電池の用途 / 運輸部門

上述の通り、世界で加速するカーボンニュートラルへの取り組みを要因に、蓄電池への役割期待が高まっている。蓄電池の主要な用途としては、①運輸部門、②電力部門でのエネルギー貯蔵設備、③ポータブル電源があり、そのうち、2030 年時点の市場規模としては、運輸部門が大きく、全体需要の 80% 以上を占めることが予想されている。[87]

自動車の世界出荷台数見通し（2021 年 11 月）をみると、2020-2030 年の年間平均成長率は 3% 程度で、2027 年頃からは年 1 億台を超える出荷の増加が見込まれている。構成比としては、EV を含む環境車の出荷台数比率は拡大し、2030 年には環境車の出荷比率は 50% を超える見通しとなっている。[88] 国際エネルギー機関（IEA）によると、EV 向け電池需要は、2020 年 155GWh に対し、2030 年に最大 3,200GWh と約 20 倍に急増する可能性があると発表している。[89] 加速要因としては、各国の環境規制・政策（ex. 欧州で 21 年の CO2 排出量 95g/km 規制、30 年の規制強化等）が挙げられる。

[87] https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020
[88] https://response.jp/article/2021/09/28/349845.html
[89] https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_Global_Renewables_Outlook_2020.pdf

7.1.3 蓄電地の用途 / 電力部門でのエネルギー貯蔵設備

このように、蓄電池市場は、2030 年に向けて車載用を中心に拡大し、2030 年以降に、再生可能エネルギーの大量導入に伴う出力変動の平準化用途として、エネルギー貯蔵設備向けが拡大することが見込まれている。その中でも、特にコストや安全性の面で優れるリン酸鉄リチウムイオン（LFP）電池が、エネルギー貯蔵用蓄電池として、今後、世界で多く使用されるとし、競合するナトリウムイオン（NMC）電池と共に 2030 年までエネルギー貯蔵設備で重要な役割を果たすと予測している[90]。2021 年春以降、世界のリチウムイオン電池メーカーは兆円単位の巨額を投資して、大幅な増産計画を相次いで発表している。2030 年以降は、運輸部門から、使用済みの蓄電池が大規模に発生するといわれており、これらの蓄電池の電力部門での再利用動向も注目されている。

さらに電力エネルギー貯蔵設備においては、蓄電池のみではなく、充放電を制御する PCS（パワーコンディショナ）などの付帯設備コストや流通コストも無視できない。図 7-2 は、国内における 2019 年度の業務・産業用蓄電システムの価格水準であるが、システム価格全体の約 47% が PCS や流通などの電池部分以外のコストとなる。特に PCS については、コストの他、充放電に伴う電力損失（エネルギー効率）にも影響することから、今後このような付帯設備を含めたシステムレベルでの競争力について注視する必要がある。

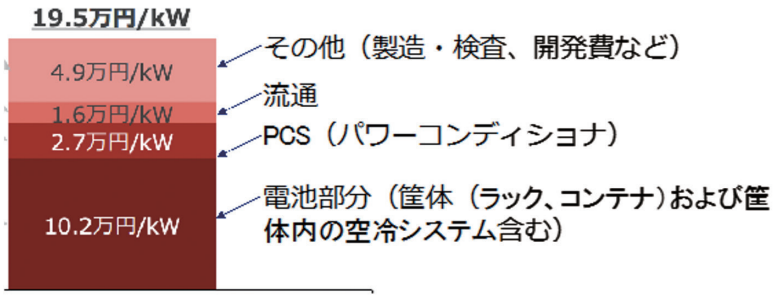


図 7-2 日本の業務・産業用蓄電システム価格
出典：経済産業省、定置用蓄電システム普及拡大検討委員会　第４回資料（2021 年 2 月）[91]

7.2 中国の次世代蓄電池の発展動向

7.2.1 中国の運輸部門と蓄電池動向

2021 年 11 月、月間販売台数としては、新記録となる 42.7 万台を達成するなど、中国は、EV 販売で引き続き、世界をリードしている。2021 年の世界の EV 総販売台数は 650 万台[92]で、その内、中国市場での販売が 352 万台[93]で、既に世界の 50% 以上の需要が中国市場発という状況にある。

[90] https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-set-to-hit-one-terawatt-hour-by-2030/
[91] https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/storage_system/pdf/004_04_00.pdf
[92] https://36kr.jp/174702/
[93] https://www.nikkei.com/article/DGKKZO58913440Y2A300C2EA2000/

このような中、足元では、EV用電池で中国が優位な状況になっている。テスラやVW、フォード、ダイムラーなど有力EVメーカーは、供給企業の大半を中国企業が占めるLFP電池の採用を相次いで決めた。LFP電池生産に関わる主要な特許は、中国の大学や研究機関で構成されるコンソーシアムが管理し、同国の電池メーカーにライセンスフリーで提供されている。これらは競争優位の一部となる。また、中国政府も後押しする。例えば、2021年12月10日、同政府は、車載用LFP電池のエネルギー密度の規制を、180Wh/kgから160Wh/kgに引き下げた。これには、電池材料（正極材）のコストが上昇する中、価格優位性のあるLFPのEVへの搭載を促進するねらいがある。

液系リチウムイオン電池には、正極材料の違いによってNMC/三元系、NCA/ニッケル酸リチウム、LFP/リン酸鉄リチウムがある。このうち、中国メーカーはLFPに、日系はNMC、NCAの製造に注力した戦略を取る。LFP電池の特徴としては、他の二つに比べて燃えにくいため安全性が高く、コストメリットもある。正極材料は希少金属で、電池コスト全体の半分を占めるとされる。中でもコバルトは高価だが、LFP電池にはコバルトが含まれず、一般的に、NMC電池の4分の1程度のコストに収まる。他方、デメリットとしては、エネルギー密度が低いことが挙げられる。車載スペースが限られ、よりエネルギー密度の高い電池が求められるEV搭載にはこの点が課題だった。しかし、これもCell to Pack技術の進化で解決されつつあり、航続距離が500kmを超えたことも採用に繋がっている。

電池材料のコスト上昇を嫌うテスラは2021年6月、LFP電池メーカーの中国企業との契約を2025年末まで延長することを、また、同年10月には、世界的に車載用電池をLFP電池へ移行することを発表した。同社のCEOであるイーロン・マスク氏は、最終的にLFPが3分の2、残りをNCAにする意向を示す。テスラは、エネルギー貯蔵設備でもLFP電池を採用する。この潮流は、同設備を導入する他の企業にもみられる。世界のEV需要の過半を占める中国の電池動向が、車載向けのみならず、再エネ需要で世界的に増加が見込まれるエネルギー貯蔵設備にも影響を与えている。

7.2.2 中国の電力部門と蓄電池動向

前述したように、中関村エネルギー貯蔵産業技術連盟（CNESA）によると、2020年末時点で稼働しているエネルギー貯蔵設備の容量は累計で35.6GW、世界の市場規模全体の約2割を占める。その中心は、揚水式水力発電が中心である。2019年の揚水式エネルギー貯蔵の設備容量は約30GWhで、2035年に120GWh、2060年には170GWhに達すると予測される。

2021年においても、ダブルカーボン目標の指導の下、エネルギー貯蔵産業への注目が集まっている。短期的にみると、リン酸鉄リチウムと揚水式エネルギー貯蔵設備が有望技術であるが、長期的にみると、ナトリウムイオン電池、圧縮空気、水素エネルギーなどの各種技術が既存システムを補完する絵姿を描いている。このように、多様な貯蔵技術が検討される中で、安全性を担保した蓄電技術、システムを中国が作り上げることができるか、また運輸部門から出てくる使用済みの蓄電池を電力貯蔵領域でどのように活用するか、その動向が注目される。

7.2.3 中国の蓄電池企業の動向

上述の中国国内のEV市場拡大を背景として、中国の電池メーカーは、世界の有力メーカーとしてその立ち位置を確立している。前述したように、CATL（寧德時代新能源科技）社は、2020年世界の生産能力でシェア50%を占め、中国国内市場シェアは48%を占める。21年8月には、最大で582億元（約1兆円）の増資

を実施すると発表した。そのうち 419 億元を、福建省、広東省、江蘇省の 5 つの電池工場の新増設に充当し、残りの 163 億元を新エネルギー関連の先進技術の開発や運転資金に充てる（電池サプライチェーン関連企業に対し投資）としている。これらの積極投資により、日本、欧州等、グローバルでの拡販も計画している。

世界の生産能力のシェア 15% で CATL 社に続くのが、中国の BYD（比亜迪）である。同社は、現在、電気自動車事業向けの内販が大半であるが、2022 年以降は外販の拡大を計画しており、東風汽車、長安汽車、Ford、トヨタ自動車とも提携、電池を供給する予定といわれている。LFP に特化し、急激に伸ばす企業も出てきている。中創新航は、2021 年 9 月に新製品「One-Stop Battery」を発表し、蓄電池の構造部材の重量を 40% 減少、部品数を 25% 減少させ、生産効率を高めた。なにより、2018 年には 715.8MWh だった搭載量を 2021 年 10 月には 6.42GWh とするなど、僅か 3 年で急成長し、中国車載用電池市場でシェア 6％を獲得し、BYD に次いでシェア 3 位の位置を得た。

産官連携で有力新興企業も生まれている。Huawei は、2022 年 3 月、中国科学院発のナトリウムイオン電池のスタートアップ 2 社への投資を実行した。その内の一社である HiNa Battery (中科海鈉科技有限責任公司) は急速に発展し、2018 年には世界初のナトリウムイオン電池低速電気自動車の実証実験が完了、2019 年には世界初の 100kWh ナトリウムイオン電池エネルギー貯蔵発電所の実証実験を完了した。もう一社は WELION (北京衛蓋能源科技有限公司) 社で、現在の評価額は 150 億元まで伸長している。同社には、他に Xiaomi も出資を完了している。新産業の創出には、リスクマネーの存在が欠かせない。中国スタートアップエコシステムが機能し、新産業が創出されるには、これまでもリスクマネーを提供する VC（ベンチャーキャピタル）の存在があった。この 10 年で、25％以上の成長が見込まれる蓄電池業界でも、VC が新たなユニコーン企業を誕生させている。

中国蓄電池業界の競争は、本質的には、「全固体蓄電池」のようなゲームチェンジを引き起こす革新的な技術が商業化するまでは、生産規模やコストがメーカー間の競争要因になる。現段階では CATL はコストでも、顧客に対する粘着性でも強い。2021 年 8 月には 582 億元（約 1 兆 600 億円）の増資を実施し、リチウムイオンバッテリーの生産能力を年 137GWh、蓄電池収納設備の生産力を年 30GWh に高める。他方で、新興企業も新たな投資で競争力を高めている。中創新航は、2021 年 9 月に 120 億元（約 2,200 億円）を調達し、2023 年にも年 500GWh 超の生産力を達成する計画であると発表した。加えて、香港取引所への上場も目指す。長城汽車（Great Wall Motor）傘下の蓄電池メーカー「蜂巣能源科技（SVOLT Energy Technology）」も 2021 年に合計 160 億元（約 2,900 億円）を調達、2025 年までに年 600GWh の生産力を目指す。新興企業も、新たな資金調達や上場で得た資金を生産力拡大に振り向けて、競争を勝ち抜こうとしている。[94]

7.2.4 中国の電池サプライチェーンの動向

これまで述べてきた通り、蓄電池用途として運輸部門市場の急成長、その後に続く電力部門でのエネルギー貯蔵設備用途としての蓄電池需要の獲得において、中国企業は優位な立場を築いている。そればかりでなく、中国政府の後押しを受けて、中国企業及び中国関係団体は、サプライチェーンの上流である原材料となる資源確保も進めており、川下を含めた自国内でのサプライチェーン確立を着々と進めている。その他、現状の電池サプライチェーンは自動車 OEM の製造 / 開発拠点の周辺に集積することから、それらの地方政府は公開される各種補助に加え、一企一策による新たな電池企業の企業誘致政策を展開している。

[94] https://36kr.jp/

中国だけでなく、米国や欧州も自国のバッテリー・電池産業保護政策の動きを強めている。米国、欧州もガソリン車から環境車へのゲームチェンジを、その大きな付加価値部分である電池サプライチェーンを自らの経済域内に取込むことを狙っている。米国では 2021 年 2 月の大統領令により、経済安全保障の観点から米国内での大容量電池サプライチェーン確保の動きが加速している。中国資本は投資が難しくなり、Tesla・Panasonic の電池工場の他、韓国 LG、SK が GM、Ford と組み、率先して生産能力の拡大に動いている。欧州は 2030 年までに 400GWh (800 万台分 : テスラの米ギガファクトリー能力の 10 倍) の拠点構築を狙っている。LG、SK、サムスンなどの韓国勢の他、中国 CATL、OEM 各社（VW、ルノー、ステランティス）も JV を組みながら生産能力を拡大している。また、欧州では雇用の促進、経済安全保障の観点からも地産地消の動きが拡大をみせる。

7.3　中国の次世代蓄電池に関する今後の展望

蓄電池を巡っては、中長期的な課題として、①コスト削減、②ライフサイクルでの脱炭素実現、③根本的なエネルギー密度の改善、の必要が指摘されている。

①については、内燃機関車とのコスト競争力の実現のためには、現在の 2 分の 1 のコスト削減が必要との指摘である。②は、EV 製造過程においては、内燃機関車の約 2 倍の CO_2 排出が見込まれることから、その製造プロセスの改善である。③は、次世代電池の技術確立、コスト削減、量産化の必要である。

その他に、本報告書の 1 章でも指摘があった通り、2021 年中国では、エネルギー貯蔵産業の安全性の問題が高い注目を集めた。これは中国に限らず、蓄電池が持つ潜在的なリスク要因であり、エネルギー貯蔵システムの安全性は、全ての業界関係者が重視しなければならない課題である。中国蓄電池産業に関わる方々には、これらの課題に対して、世界をリードした対応を期待したい。

中国国内には充分な市場があり、その市場を梃子に価格競争力を持った製品の中国外への輸出が中長期的には進んでいくであろう。その際には、上述課題を解決する基礎研究で日本が先行する次世代電池や、日本が有する環境技術との連携ポテンシャルがあり、世界の課題を日中連携で解決することも期待する。

おわりに

人類の生存と発展にはエネルギーが不可欠であり、人口の増加と社会の発展に伴い、エネルギーの需要量はますます増加している。世界の化石燃料の供給と環境状況は深刻化の一途をたどり、従来の化石燃料が日増しに枯渇してゆくとともに、化石燃料を使用することで深刻な環境汚染問題がもたらされている。2015年、習近平国家主席は、「中国はグローバルエネルギーインターネットを構築し、クリーンでグリーンな方法により世界の電力需要へ対応する」と提唱した。2020年9月に開催された第75回国際連合総会では、「中国は2030年までにCO_2排出量をピークアウトさせ、2060年までにカーボンニュートラルを実現することを目指す」と国際社会に向けて宣言した。また、2030年までに一次エネルギー消費に占める非化石燃料の割合を約25%に引き上げ、風力発電・太陽光発電の総設備容量は12億kW以上に増加するとしている。

間欠性・変動性・分散性を有する再生可能エネルギーには、その場で収集・貯蔵・使用するエネルギーネットワーク、つまり「エネルギーインターネット」を構築する必要がある。エネルギーインターネットには5つの特徴があり、第一に、使用するエネルギーは全て再生可能エネルギーである。第二に、分散型エネルギーである。第三に、相互接続型で、利用の際は必ずネットワークに接続しなければならない。第四に、開放的なネットワークで、随時余分なエネルギーを売り、必要な分のエネルギーを買うことができる。第五に、スマート制御による完全なスマート化を実現している。エネルギーインターネットの要はエネルギー貯蔵である。そのエネルギー貯蔵の要となるのは二次電池であり、特に固体リチウム電池やナトリウムイオン電池である。

石炭は豊富だが、石油・天然ガスに乏しいという国情に立脚し、「CO_2排出量ピークアウト」「カーボンニュートラル」の目標を積極的かつ着実に推進し、必ずや「電動中国（中国電動化）」を実現すると奮闘している。そのためには、まず、交通手段を電動化することからスタートし、電気自働車（EV）、電気推進船（EV船）、電動航空機を大幅に進歩させなければならない。また同時に、設備のスマート化やスマートシティ、スマート農村、スマート鉱山の建設も並行して行う必要がある。いずれもリチウムイオン電池とナトリウムイオン電池を要とし、その飛躍的進化が欠かせないであろう。

中国のリチウムイオン電池は、すでに世界市場シェアのトップを獲得している。しかし、エネルギー密度は300Wh/kgが限界に近く、時々ではあるが燃焼・爆発事故が発生するという2つの深刻な問題を抱えている。これらを解決するには、固体リチウム電池の開発が不可欠となる。全固体リチウムイオン電池は負極に金属リチウムを使うため、黒鉛（グラファイト）負極を使用する既存のリチウムイオン電池と比較し、その容量は10倍である。正極には既存の安価な正極材、電解質には熱安定性に優れた固体材料を使用している。また、既存のリチウムイオン電池の技術や製造設備を十分に活用すべく、その場固化技術を利用し、エネルギー密度を300Wh/kg以上に向上させ、安全性・信頼性の高い動力とエネルギー貯蔵能力を備えた電池を作り出す。

今やリチウムイオン電池も、世界各国が我先にと競い合って製造するほどの製品となった。しかしながら、リチウム資源には限りがある。リチウムの地殻中の含有量はわずか0.0065%に過ぎないが、一方でナトリウムの含有量は2.75%と比較的多い。世界中の自動車がリチウムイオン電池で駆働し、世界中の電力をリチウムイオン電池で貯蔵した場合、リチウム資源はすぐにも足りなくなるであろう。そこで、次世代の電池を考慮しなければならないのだが、ナトリウムイオン電池はその第一候補である。ナトリウム資源は広範に分布している上、コストが安価である。また、ナトリウムイオン電池の高低温特性は安定しており、サイクル寿命も長く、エネルギー密度はリン酸鉄リチウム電池とほぼ変わらない。

中国科学院物理研究所は、2009 年からナトリウムイオン電池の研究を開始しており、ナトリウムイオン電池のコア技術、自主的知的財産権を保有しているため、先発優位性がある。2017 年には中科海鈉科技有限責任公司（HiNa Battery）を設立し、ナトリウムイオン電池の研究開発と製造に注力している。そして、ナトリウムイオン電池を搭載した低速電気自動車、ナトリウムイオン電池を利用した 1MWh エネルギー貯蔵システムを実現した。現在のナトリウムイオン電池はまだ産業化初期の段階にあるが、リチウムイオン電池に類似した部分が多く、そのため、ナトリウムイオン電池の発展スピードは予想をはるかに上回ると思われる。

今回の調査研究活動において、中国と日本のさまざまな分野の専門家が、「中国の先端研究者から見た次世代蓄電池の研究開発動向」を執筆していただいたことに感謝する。これは中国の固体電池とナトリウムイオン電池の研究と開発に役立ち、中国と日本の電気自動車とエネルギー貯蔵産業の発展、国際交流・国際提携を促進するであろう。なにより、「ダブルカーボン（双碳）」目標の達成に向けて、私は皆と共に奮闘したいと願っている。

中国科学院物理研究所
陳立泉工程院院士
2022 年 3 月

執筆者一覧・調査企画

執筆者一覧

1章	趙　英	（中国社会科学院　研究員）
2章	李　恵敏	（中国科学院科学技術戦略研究院　副研究員）
3章	周　少丹	（上海市科学学研究所　フェロー）
4章	李　先鋒	（中国科学院大連化学物理研究所エネルギーストレージ研究部　研究員兼副所長）
	鄭　琼	（中国科学院大連化学物理研究所エネルギーストレージ研究部　研究員）
5章	劉　剛鋒	（材料科学姑蘇実験室 G2116 プロジェクト総括　兼　BOTREE 社 CTO）
	常　娜娜	（材料科学姑蘇実験室 (GUSU Lab) G2116 プロジェクト　研究員）
6章	崔　光磊	（中国科学院青島バイオエネルギー・プロセス研究所　研究員）
7章	藤代　康一	（三井物産戦略研究所　研究員）
おわりに	陳　立泉	（中国科学院物理研究所　工程院院士）

調査企画

小松　義隆　(科学技術振興機構アジア・太平洋総合研究センター フェロー)

東　美貴子　(科学技術振興機構アジア・太平洋総合研究センター 調査役)

本報告書は、国立研究開発法人科学技術振興機構 アジア・太平洋総合研究センターが令和３年度に公益社団法人科学技術国際交流センター（JISTEC）に委託した「中国の先端研究者から見た次世代蓄電池の研究開発動向」の成果をまとめたものです。本業務の実施に際して、ご協力いただいた多くの方々に、本紙上を借りて厚くお礼申し上げます。

また、全体を通して、科学技術振興機構 未来創造研究開発推進部の大矢克部長、加藤真一調査役および三田雅昭主任調査員より有益な助言をいただきました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

調査報告書 APRC-FY2021-RR-06

中国の先端研究者から見た次世代蓄電池の研究開発動向

R&D Trends in Next-Generation Batteries from the Perspective of Leading Chinese Researchers

2022 年 3 月
ISBN: 978-4-88890-809-2

本報告書に関するお問い合わせ先：
国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）アジア・太平洋総合研究センター（APRC）
Asia and Pacific Research Center, Japan Science and Technology Agency
〒 102-8666　東京都千代田区四番町 5-3　サイエンスプラザ
Tel: 03-5214-7556　E-Mail: aprc@jst.go.jp
https://www.jst.go.jp/aprc/

Copyright © Japan Science and Technology Agency
本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。転載を希望される際は、事前に上記お問い合わせ先迄ご連絡ください。引用を行う際は、必ず出典：JST/APRC 調査報告書「中国の先端研究者から見た次世代蓄電池の研究開発動向」として記述願います。

This report is protected by copyright law and international treaties. No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law. Any quotations must be appropriately acknowledged. If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact APRC.