

「先進・革新蓄電池材料評価技術開発(第2期)」
(事後評価)分科会
資料 7-1

「先進・革新蓄電池材料評価技術開発(第2期)」

事業原簿【公開】

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 スマートコミュニティ・エネルギーシステム部 蓄電技術開発室
-----	---

目次

概要

用語集

第1章 事業の位置付け・必要性について

1.1 事業目的の妥当性	1 - 1
1.1.1 本事業の目的	1 - 1
1.1.2 市場動向	1 - 2
1.1.3 技術動向	1 - 5
1.1.4 上位施策・制度への寄与	1 - 20
1.2 NEDOの事業としての妥当性	1 - 22
1.2.1 NEDOの関与の必要性	1 - 22
1.2.2 実施の効果	1 - 24

第2章 研究開発マネジメントについて

2.1 研究開発目標の妥当性	2 - 1
2.2 研究開発計画の妥当性	2 - 3
2.2.1 研究開発内容	2 - 3
2.2.2 研究開発スケジュール	2 - 5
2.2.3 研究開発費	2 - 6
2.3 研究開発実施体制の妥当性	2 - 7
2.3.1 実施者の技術力・実用化能力について	2 - 9
2.3.2 指揮命令系統・責任体制	2 - 9
2.4 研究開発の進捗管理の妥当性	2 - 10
2.4.1 NEDOによる進捗管理	2 - 10
2.4.2 実施者による進捗管理	2 - 12
2.5 知的財産に関する戦略の妥当性	2 - 13
2.5.1 知的財産戦略	2 - 13
2.5.2 知的財産マネジメント	2 - 13
2.6 国際標準化について	2 - 14
2.7 他事業との連携について	2 - 14
2.8 中間評価への対応	2 - 15
2.9 評価に関する事項	2 - 17

第3章 研究開発成果について

3.1 「研究開発項目① 共通基盤技術開発」の研究開発成果	3 - 1
3.1.1 要素技術に関する研究開発成果	3 - 1
3.1.2 材料特性評価技術の開発	3 - 24
3.1.3 シミュレーション技術の開発	3 - 27

3.1.4 試験評価法の開発	3 - 34
3.1.5 今後の取組	3 - 45
3.2 「研究開発項目② 社会システムデザインの検討」の研究開発成果	3 - 46
3.2.1 検討の流れ	3 - 46
3.2.2 EV・PHEV 導入に関するユーザー意識調査	3 - 47
3.2.3 全固体 LIB 導入シナリオの検討	3 - 50
3.2.4 全固体 LIB がもたらす社会的インパクト	3 - 50
3.2.5 社会システムのシナリオ・デザイン	3 - 53
3.3 成果の普及	3 - 55
3.3.1 特許出願・対外発表実績	3 - 55
3.3.2 情報発信	3 - 55

第4章 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

4.1 成果の実用化に向けた取組	4 - 1
4.1.1 開発成果の参加企業の活用に向けた取組	4 - 1
4.1.2 材料特性評価技術の産業界・学界の活用に向けた取組	4 - 4
4.1.3 国内標準化関係者との研究開発情報の共有	4 - 7
4.1.4 企業を交えた「社会システムデザインの検討」の実施	4 - 7
4.2 成果の実用化の見通し	4 - 8
4.3 波及効果	4 - 10
4.3.1 オープンイノベーションの推進	4 - 10
4.3.2 人材育成	4 - 10
4.3.3 全固体 LIB の他用途への展開	4 - 11

概要

		最終更新日	2022年7月21日
プロジェクト名	先進・革新蓄電池材料評価技術開発(第2期)	プロジェクト番号	P18003
担当推進部/ PMまたは担当者	<p>スマートコミュニティ・エネルギーシステム部 蓄電技術開発室 PM 臼田 浩幸(2022年2月～現在) PM 古川 喜規(2021年4月～2022年1月) 担当者 佐藤 勇人(2022年4月～現在)、檜座 秀一(2022年4月～現在)、 山崎 英生(2021年4月～現在)、水谷 有孝(2021年4月～現在)、 笹川 貴子(2021年4月～現在)、小宮山 知成(2021年4月～現在)、 中島 港人(2021年4月～現在)、松下 智子(2021年4月～現在)、 曾我 巖(2021年4月～現在)、山木 孝博(2021年4月～現在)、 臼田 浩幸(2021年6月～2022年1月)、奥村 貴典(2021年4月～2022年3月)</p> <p>次世代電池・水素部 蓄電技術開発室 PM 細井 敬(2018年4月～2021年3月) 担当者 田所 康樹(2018年4月～2021年3月)、北山 賢一(2018年4月～2021年3月)、 中島 港人(2018年11月～2021年3月)、中村 将司(2019年4月～2021年3月)、 奥村 貴典(2020年4月～2021年3月)、曾我 巖(2020年4月～2021年3月)、 山木 孝博(2020年4月～2021年3月)、 相原 茂(2018年4月～2020年3月)、宮本 潤一(2018年4月～2020年3月)、 豊川 卓也(2018年4月～2019年3月)、内田 雄輔(2018年4月～2020年3月)、 安井 あい(2018年4月～2020年3月)、佐藤 恵太(2018年4月～2018年10月)</p>		
0. 事業の概要	<p>コストパフォーマンスに秀でた全固体リチウムイオン電池(全固体 LIB)及びそれを搭載した電気自動車(EV)及びプラグインハイブリッド自動車(PHEV)の市場投入により、世界全体の環境・エネルギー問題に貢献するとともに、我が国の産業競争力を維持・向上することをねらいとして、国内企業(自動車・蓄電池・材料メーカー等)が幅広く協調・連携するとともに、大学・研究機関の公的研究成果や科学的知見も活用する体制を構築して、産業界の共通指標として機能する全固体 LIB の材料評価技術を中心とした共通基盤技術を開発する。</p> <p>また、本事業の成果を産業界の競争力として結実させるためのビジネスと一体となった国際標準化戦略の策定、国際規格化を想定した安全性・耐久性試験評価法の開発、国内外の政策・市場・研究開発動向の調査・分析に基づいた社会システムのシナリオ・デザインの検討等を行う。</p>		
1. 事業の位置付け・必要性について	<p>1.1 事業目的の妥当性 1.1.1 本事業の目的 本事業のねらいは、EV・PHEV の利便性向上と低価格化を同時実現する上で最も有望なアプローチと考えられる全固体 LIB について、その実用化で日本が世界の先手を取るとともに、その後の技術革新も日本が世界をリードしていくことである。そして、日本の蓄電池関連産業界にとって有利なビジネス環境やサプライチェーンを創造することを目指している。これらを実現するため、本事業においては、産業界の共通指標(ものさし)として機能する全固体 LIB の材料評価技術を中心とした共通基盤技術の確立とそのプラットフォームの構築に取り組むこととしている。取組の概要を以下に示す。</p> <p>「研究開発項目① 共通基盤技術開発」 1) 全固体 LIB の大型化・量産化のボトルネックとなっている技術課題を解決する要素技術及び全固体 LIB の更なる性能向上・低コスト化を実現するための要素技術を開発する。 2) 全固体 LIB への適用を想定し、今後、企業・大学等で開発される新材料をセルに組み込み、特性評価を行って、実用化課題や改良の方向性等を洗い出し、サンプル提供者にフィードバックするための特性評価の体系を構築する。 3) 上記の特性評価に用いるセル(以下、「標準電池モデル」という。)を、全固体 LIB の量産を想定した工業的な製造プロセス・装置を用いて作製する技術体系を構築する。 4) 実用サイズのセル及び車載電池パックの充放電特性や発熱挙動・温度分布等を予測する計算機シミュレーション技術を開発する。 5) 車載バッテリーの国際標準試験法としての発展を見据え、全固体 LIB の性能試験法及び安全性試験法を開発する。また、全固体 LIB の劣化解析・現象解明を行い、セル及び構成材料・部品の要因マップを策定するとともに、劣化加速試験法を開発する。</p> <p>「研究開発項目② 社会システムデザインの検討」 自動車市場、車載バッテリー、充電インフラ等に係る政策・市場、ユーザーニーズ、バリューチェーン、リユース・リサイクル等について、現状の動向把握と将来分析を行うことにより、本事業の成果を産業競争力として結実させるための社会システムのシナリオ・デザインをとりまとめる。</p>		

1.1.2 市場動向

リチウムイオン電池(LIB)の市場規模は現在、約 8 兆円であるが、2025 年には約 14 兆円、2035 年には約 33 兆円に成長すると予測されている。この市場拡大を牽引するのが、EV・PHEV 等の電動車の LIB である。各国は環境・エネルギー問題の深刻化を背景に、自動車の燃費規制・排出ガス規制を強化し電動車の導入政策を推進している。世界的なカーボンニュートラルを目指す動きの中、自動車メーカー各社も電動車へのシフト計画を発表し、2050 年のカーボンニュートラル達成に向け足並みを揃えつつある。電動車向け蓄電池としては現時点では電解質に有機電解液を使用する液系 LIB が主に採用されており、中国及び韓国の蓄電池メーカーは液系 LIB の生産設備投資を精力的に進めている。特に中国政府による手厚い EV・PHEV 導入補助金政策の恩恵を受けた中国蓄電池メーカーの躍進には目覚ましいものがある。また、欧米自動車メーカーの電動化が本格化することで増加した蓄電池需要に対して韓国の蓄電池メーカーが供給を増やすなどしており、結果として、日系蓄電池メーカーは生産・販売量は増やしているものの、シェアは大きく低下している。

今後、電動車用蓄電池の市場拡大とともに価格低下が見込まれるため、日系蓄電池メーカーが市場プレゼンスを向上させるためには、先を見据えた次の一手が必要であることは明白である。そして、ハイスペック化と低コスト化を両立させた全固体 LIB を早期に製品ラインナップ化することが重要と考えられる。

1.1.3 技術動向

自動車ユーザーの EV 購入意欲を掻き立てると同時に、自動車メーカーの EV・PHEV ビジネスを加速させるには、車載バッテリーについて信頼性・安全性を損ねることなく、エネルギー密度を向上させることにより、低コスト化及び軽量・コンパクト化を図る必要がある。しかしながら、この課題を現状の液系 LIB の技術開発の延長線上で解決するのは簡単ではない。そこで課題を解決する一つ的手段として電解質に固体物質を使用する全固体 LIB が注目されている。全固体 LIB は無機固体電解質(硫化物あるいは酸化物のリチウムイオン伝導体)の化学的安定性(実用的な高電圧耐性)を活かし、液系 LIB の有機溶媒電解液では分解・ガス発生が起きる高電圧条件でもセルを作動させることができる。そのため、セルのエネルギー密度を数 10%程度、向上させることができる。また、無機固体電解質の熱的安定性を活かし、電池パックの冷却システムの小型化あるいは不要化が期待できる。さらに、無機固体電解質は不燃性であり、発火リスクが大幅に低減するため、電池パックの安全系システムの簡素化も期待できる。その結果として、1/2~1/3 のオーダーで電池パックの小型化と低コスト化が期待できる。加えて、無機固体電解質はシングルイオン伝導体であるため、輸率が 1 となり、入出力特性が格段に向上し、数倍レベルでの「超急速充電」の実現も期待できる。

そのため、世界中の研究機関や企業で精力的な研究開発が進められている。公的資金による研究開発も主要国で行われており、本事業に加えて、科学技術振興機構(JST)の「戦略的創造研究推進事業／先端的低炭素化技術開発／次世代蓄電池」(ALCA-SPRING)、米国エネルギー省(DOE)の「Li-Bridge」や「IONICS」、ドイツ連邦教育研究省(BMBF)の「FestBatt」、英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)の「Faraday Battery Challenge」、中国「新エネルギー車試行特別プロジェクト」等で全固体電池が研究されている。

論文発表動向としては、2016 年頃から発表件数の増加が顕著になり 2021 年には 1,600 件を超え、20 年で 30 倍以上に増加している。21 年間の累積の総論文発表件数は 7,000 件以上になり、国別の発表件数で見ると、中国が最多で米国、欧州がこれに続き、日本は 1 割程度に留まる。

特許出願動向としては、2001 年～2019 年の過去 19 年間における全世界での全固体電池の特許出願件数の推移を見ると、2000 年代前半は 200 件／年以下であったが、2006 年より増加に転じ 2016 年から増加が顕著になって、2017 年以降、約 1,000 件／年以上となっている。また、2016 年より中国の出願件数が日本を上回るようになってきている。19 年間の累積の特許出願件数では日本は他国をリードしているものの、将来、中国に追い抜かれる可能性が高い。ただし、出願人別の出願件数では日本企業は 100 件以上の出願がある企業が複数あり集中した研究開発が進められている。

1.1.4 上位施策・制度への寄与

蓄電池に関しては、これまで我が国の様々な政策において研究開発の必要性・重要性が謳われてきている。このうち、本事業が密接に関連し、その目標達成に寄与する上位施策は以下のとおりである。

- ① 未来投資戦略 2018(2018 年 6 月閣議決定)
- ② パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略(2021 年 10 月閣議決定)
- ③ 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(2020 年 12 月経済産業省策定)
- ④ 第 6 次エネルギー基本計画(2021 年 10 月閣議決定)
- ⑤ 蓄電池戦略産業戦略 中間とりまとめ(2022 年 4 月経済産業省公表)

1.2 NEDO の事業としての妥当性

1.2.1 NEDO の関与の必要性

本事業が取り組む全固体 LIB の共通基盤技術の開発については、下記①～⑥に示す理由から、NEDO 事業として取り組むこと、あるいは NEDO の関与が必要である。

- ① 産業界全体の競争力強化(公共性・汎用性)

	<p>② 学術成果の産業技術への引き上げ ③ 開発リスク・ハードルの高さ ④ 関係者間の利害調整 ⑤ 過去の蓄電池材料評価技術開発事業におけるマネジメント経験の活用 ⑥ 国内の蓄電池開発事業間の連携促進</p> <p>1.2.2 実施の効果 本事業の成果が国内産業界に普及・定着することによる効果、及び本事業を実施すること自体の効果として、下記の①～④が挙げられる。</p> <p>① 新材料の開発効率向上及び開発期間の短縮 ② 材料メーカーによる自社開発品の正確なポテンシャル把握 ③ LIBTEC による材料評価のワンストップサービスの提供 ④ 我が国蓄電池関連産業の技術力の底上げ</p> <p>また、国内産業界による全固体 LIB の手の内化によって、全固体 LIB を搭載した EV・PHEV の実用化・普及が進むことで、以下に示す経済効果と CO₂ 削減効果が得られる。</p> <p><経済効果> 車載バッテリーの年間売上としての経済効果は 2035 年が約 2,700 億円/年、2040 年が約 9,100 億円/年～2.1 兆円/年となる。なお、EV・PHEV の価格を 200 万円とした場合、その年間総売上としての経済効果は 2035 年が約 1.1 兆円/年、2040 年が約 3.7 兆円/年～8.6 兆円/年となる。</p> <p><CO₂削減効果> 全固体 LIB 搭載の EV・PHEV の普及台数及び CO₂ 排出量の削減は 2035 年に 140 万台、約 210 万トン/年、2040 年に 740 万台～1,300 万台、約 1,100 万トン/年～約 1,900 万トン/年となる。</p>
<p>2. 研究開発マネジメントについて</p>	
<p>事業の目標</p>	<p>「研究開発項目① 共通基盤技術開発」 【中間目標】(2020 年度末)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 第 1 世代全固体 LIB の大型化・量産化に必須となる固体電解質の量産、電極設計、電極活物質粒子への電解質コーティング、合剤電極の塗工及び電極厚膜化・大面積化等の要素技術を開発する。 2) 第 1 世代全固体 LIB に用いられる新材料について性能、耐久性、安全性・信頼性を大型の標準電池モデルで評価する技術を開発する。 3) 量産プロセスをモデル的に再現した標準電池モデルの作製設備を設計・製作し、標準電池モデルを性能バラツキが無く、安定的に作製可能であることを検証する。 4) 次世代全固体 LIB として、第 1 世代全固体 LIB からの飛躍的な性能向上を実現する高性能固体電解質や高電位・高容量電極活物質等の候補材料を選定する。 5) 次世代全固体 LIB でユーザー訴求力を有した EV・PHEV 用の電池パックを実現するための外装パッケージ構造及びセル積層構造の候補を抽出する。 6) イオン濃度・輸送の理論モデルに基づいて、セルの不安定化・劣化、熱的挙動を予測するシミュレーション技術を開発する。また、車両走行パターンにおける電池モジュール・パックの充放電・熱的挙動を予測するシミュレーション技術を開発する。 7) 将来の国際規格・基準への反映を想定した全固体 LIB の試験評価法としての試験項目をリストアップし、試験条件・方法・クライテリア等を明確化する。 <p>【最終目標】(2022 年度末)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 第 1 世代全固体 LIB の標準電池モデルを用いた材料評価技術について、産業界における新材料開発の進展に対応した見直しを行い、性能、耐久性及び安全性・信頼性に加えて、量産への適合性も評価可能な技術として仕上げる。 2) 高性能固体電解質や高電位・高容量電極活物質等を次世代全固体 LIB に適用するための電解質・電極活物質の界面形成技術を開発するとともに、合剤電極での配合比や電極構造の最適化を行う。 3) 次世代全固体 LIB に適用する外装パッケージ構造及びセル積層構造のコンセプトを策定する。 4) 次世代全固体 LIB に用いられる新材料について性能、耐久性及び安全性・信頼性を小型の標準電池モデルで評価する技術を開発する。 5) 次世代全固体 LIB の標準電池モデルの作製設備を設計・製作し、標準電池モデルを性能バラツキが無く、安定的に作製可能であることを検証する。 6) 国際規格・基準への反映を想定した全固体 LIB の試験評価法の原案を策定する。 7) 全固体 LIB の耐久性試験データや劣化メカニズム解析、劣化現象解明の結果に基づき、全固体 LIB の劣化・不安定化要因マップを策定する。また、長期耐久性を短期間で予測可能な劣化加速試験法を開発する。 8) 全固体 LIB 及び全固体 LIB を搭載した EV・PHEV の国際標準化戦略・方針を策定する。

	<p>「研究開発項目② 社会システムデザインの検討」</p> <p>【中間目標】(2020 年度末)</p> <p>国内外の政策・市場・研究開発動向等の調査・分析結果に基づき、エネルギー・資源、リユース・リサイクル産業、充電インフラ等も視野に入れた全固体 LIB 及び EV・PHEV を取り巻く社会システムの将来像を提示する。</p> <p>【最終目標】(2022 年度末)</p> <p>本事業の成果を産業競争力として結実させるための社会システムのシナリオ・デザインをとりまとめる。</p>						
事業の計画内容	主な実施事項	2018FY	2019FY	2020FY	2021FY	2022FY	
	研究開発項目①						
	第 1 世代全固体 LIB の共通基盤技術	←					→
	次世代全固体 LIB の共通基盤技術	←					→
	材料特性評価技術	←					→
	シミュレーション技術	←					→
	試験評価法	←					→
	研究開発項目②						
社会システムデザインの検討	←					→	
事業費推移 (会計・勘定別に NEDO が負担した実績額(評価実施年度については予算額)を記載) (単位:百万円)	会計・勘定	2018FY	2019FY	2020FY	2021FY	2022FY	総 額
	一般会計	—	—	—	—	—	—
	特別会計(需 給)	1,531	2,095	2,081	2,510	2,032	10,249
	総 NEDO 負担額	1,531	2,095	2,081	2,510	2,032	10,249
	(委 託)	1,531	2,095	2,081	2,510	2,032	10,249
開発体制	経産省担当原課	製造産業局 素材産業課、自動車課					
	プロジェクトリーダー	<p>プロジェクトリーダー(PL)</p> <p>技術研究組合リチウムイオン電池材料評価研究センター(LIBTEC)</p> <p>理事 嶋田 幹也(2021 年 1 月から)</p> <p>常務理事 石黒 恭生(2020 年 12 月まで)</p> <p>サブプロジェクトリーダー(SPL)</p> <p>技術研究組合リチウムイオン電池材料評価研究センター(LIBTEC)</p> <p>第 1 研究部 部長 川本 浩二(2021 年 1 月から)</p> <p>第 1 研究部 部長 阿部 武志(2020 年 12 月まで)</p> <p>第 2 研究部 部長 安田 博文(2020 年 12 月から)</p> <p>第 2 研究部 部長 蕪木 智裕(2020 年 11 月まで)</p> <p>第 3 研究部 部長 福岡 歩</p> <p>第 4 研究部 部長 川合 光幹</p>					
	プロジェクトマネージャー	<p>国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構</p> <p>スマートコミュニティ・エネルギーシステム部 蓄電技術開発室長</p> <p>臼田 浩幸(2022 年 2 月から)</p> <p>スマートコミュニティ・エネルギーシステム部長 兼蓄電技術開発室長</p> <p>古川 喜規(2021 年 4 月~2022 年 1 月)</p> <p>次世代電池・水素部 統括研究員 兼 蓄電技術開発室長</p> <p>細井 敬(2021 年 3 月まで)</p>					

	<p>委託先 (組合が委託先に含まれる場合は、その参加企業数及び参加企業名も記載)</p>	<p>技術研究組合リチウムイオン電池材料評価研究センター(LIBTEC) (参加 26 機関) 旭化成、出光興産、大阪ソーダ、関西ペイント、クラレ、GS ユアサ、住友金属鉱山、大日本印刷、東レ、凸版印刷、トヨタ自動車、日産化学、日産自動車、日本触媒、パナソニックホールディングス、ピークルエナジージャパン、富士フイルム、堀場製作所、本田技術研究所、マクセル、三井化学、三井金属鉱業、三菱ケミカル、村田製作所、ヤマハ発動機、産業技術総合研究所</p> <p>(再委託 7 機関) 京都大学、早稲田大学、鳥取大学、大阪大学、東北大学、産業技術総合研究所、北見工大</p> <p>産業技術総合研究所(2020 年度まで)、物質・材料研究機構、理化学研究所(2018 年度のみ)、大阪産業技術研究所、大阪公立大学、九州大学、京都大学、群馬大学(2020 年度まで)、甲南大学、東京工業大学、豊橋技術科学大学、名古屋大学(再委託:オハラ)、兵庫教育大学、北海道大学、日本自動車研究所</p>
<p>研究開発の進捗管理</p>	<p>NEDO による進捗管理としては以下を実施。</p> <p>① NEDO 担当部による進捗管理。 本事業の研究開発テーマ毎に複数名の NEDO 担当者を配置。実施者(委託先)の研究進捗を常に把握するとともに、目標への到達度、成果の技術的意義、実用化の可能性、産業への波及効果等も分析・評価しながら、事業のマネジメントを推進している。</p> <p>② 外部有識者による進捗点検(「NEDO 技術委員会」の開催)。 外部有識者で構成される「NEDO 技術委員会(蓄電技術開発)」を設置・運営し、研究開発内容に関する技術的な助言や事業全体の運営管理に関する助言・指摘をすくい上げながら、事業を推進している。NEDO 技術委員会での助言・指摘は、必要に応じて、事業の実施方針や各実施者の研究計画に反映している。</p> <p>③ サテライト機関のステージゲート審査の実施。 本事業の研究進捗管理の一環として、サテライトの各大学・研究機関が実施している個別の研究開発を対象とし、前半 3 年間の目標達成度、これまでの研究開発成果、本事業への貢献(集中研究拠点との連携)、後半 2 年間の研究計画、研究成果の本事業及び産業界での活用見通し等を審査項目としたステージゲート審査を全研究開発テーマについて 2021 年 1 月に実施した。2021 年 12 月には前記審査で単年度契約となった 3 テーマについてステージゲート審査を追加で実施した。</p> <p>実施者による進捗管理としては以下を実施。</p> <p>① 「PL・SPL 会議」「PL 報告会」を毎週開催。 PL・SPL 間で各研究開発チームの研究進捗を共有。</p> <p>② 「研究開発チーム会議」を年に 1~2 回開催。 研究開発チーム内で研究進捗を共有。</p> <p>③ 「LIBTEC/SOLiD-EV 技術委員会」を年に 2 回程度開催。 参画企業の開発責任者等と研究進捗を共有。</p> <p>④ 「SOLiD-EV シンポジウム」を年に 1 回(もしくは 2 回)開催。 本事業の関係者全員で事業全体の研究進捗を共有。</p>	
<p>知的財産に関する戦略</p>	<p>国際市場で競争力を獲得するためには、知的財産と標準化を戦略的に組み合わせてビジネス戦略に相乗効果をもたらす取組を進める必要がある。その一方、特許化やデジュール標準化(公的標準化)は実質的な技術の公開に繋がるという側面を持つため、オープン&クローズの戦略が必要である。</p> <p>本事業の成果となる材料特性評価技術(標準電池モデル、材料特性評価の条件・要領・手順、個別の物性測定・分析評価手法等)は、基本的にはノウハウ(ブラックボックスのクローズ領域)として取り扱うものとし、特許出願やデジュール標準化は行わない方針とする。</p> <p>一方、要素技術開発の成果(要素技術開発の過程で創出される材料発明を含む。)については、以下に示す戦略を取る。</p> <p>① 全固体 LIB ビジネスの武器となる基本特許の創成活動を推進する。</p> <p>② 国外特許出願を積極的に行う。</p> <p>③ 電極活物質・電解質等の材料発明は積極的に権利化する。</p> <p>④ 製造方法や運転・制御方法等の発明は、原則、ノウハウとして秘匿化する。</p>	

国際標準化	<p>新規技術である全固体 LIB のグローバル市場への投入と普及拡大に向けては、性能・品質、安全性、互換性等の統一的なルールとなる国際規格の整備が必要となる。全固体 LIB の標準化の方向性としては、全固体 LIB が持つ高い耐久性・安全性の価値を客観的に浮かび上がらせて、ユーザーに強い訴求力を示すための試験評価法の国際標準化に取り組む必要がある。</p> <p>また、この試験評価法の国際標準化を迅速・円滑に進めるには、ISO、IEC 等の国際標準化機関における議論を早く始めることが重要である。そのため、本事業における研究開発成果が速やかに国際標準化機関における議論の場で活用されることを目的として、車載バッテリーに関する国内標準化関係者との会合を定期的に持ち、研究開発の状況を共有するとともに、意見・助言をすくい上げて研究開発活動に反映する。</p>	
他事業との連携について	<p>事業の効率的・効果的な推進に向けては、事業内のみならず、他の事業との連携も不可欠である。本事業は、プロジェクト開始以降、NEDO 事業「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発(RISING2)」及び科学技術振興機構(JST)事業「戦略的創造研究推進事業／先端的低炭素化技術開発／次世代蓄電池研究加速プロジェクト(ALCA-SPRING)」と連携を進めてきた。RISING2 については、2021 年度から「電気自動車用革新型蓄電池開発(RISING3)」として新たに事業が開始されており、引き続き、事業間の連携を実施している。また、同年に文部科学省 科学研究費助成事業「蓄電固体界面科学」との連携も進めるとともに、2022 年度からは新たに JST 事業「共創の場形成支援プログラム(COINEXT)環境エネルギー分野／先進蓄電池研究開発拠点」との連携も開始している。</p>	
評価に関する事項	事前評価	2017 年度 事前評価実施 担当部 スマートコミュニティ部
	中間評価	2020 年度 中間評価実施 担当部 次世代電池・水素部
	事後評価	2022 年度 事後評価実施 担当部 スマートコミュニティ・エネルギーシステム部
3. 研究開発成果について	<p>3.1 「研究開発項目① 共通基盤技術開発」の研究開発成果</p> <p>3.1.1 要素技術に関する研究開発成果</p> <p>第 1 世代全固体 LIB の要素技術として、正極活物質の表面被覆手法の開発、黒鉛負極粒子の結晶性、粒径、形状の検討、固体電解質粒子の開発、固体電解質層の薄層化プロセスの開発、電極層の均質分散及び高充填化、電極層－固体電解質層の接合プロセスの開発検討を実施した。これらの要素技術の開発成果を取り込んだ 2cm 角単層の実証セルを試作し、体積エネルギー密度 450Wh/L 以上、6C レート充電を実証し、開発した要素技術の妥当性を検証した。さらに、大型化、量産化を見据えた連続プロセスの検討を実施し均一な電極が得られることを確認して 4×12.5cm 中型単層の実証セルにおいて 2cm 角と同等の性能を確認した。また、セルの積層化検討を実施し、集電体への電極両面塗工技術の開発、プレス装置を用いた加圧(緻密化、接合)技術の開発、積層体端部の絶縁処理技術の開発、ラミネートセル化技術等の開発を実施した。これらの要素技術の開発成果を取り込んだ 4×12.5cm のセルを 10 積層した実証セルを試作し、容量 1.4Ah、体積エネルギー密度 450Wh/L 以上を実証することで開発した積層技術に関わる要素技術の妥当性を検証した。</p> <p>次世代全固体 LIB の要素技術として、電極活物質の組合せの検討、正極活物質候補の検討、高容量・高電位正極活物質の被覆技術の検討、高容量負極活物質の検討、正極の厚膜化等の開発検討を実施した。これらの要素技術の開発成果を取り込んだ三元系正極活物質、シリコン系負極活物質を用いた 2cm 角単層の実証セルにおいて 860Wh/L の体積エネルギー密度を実証した。実証セルの作製は、第 1 世代全固体 LIB の実証セルの試作で得られた知見をベースに、電解質スラリーを基材上にダイコーターで塗工・成形し、正極スラリー、負極スラリーを集電体上にダイコーターで塗工・シート成形した後、各シートを積層し、一体で加圧することにより接合・緻密化するプロセスで行った。また高安定固体電解質の創出に向けた耐湿性評価・解析基盤の確立と、それを用いた水分劣化挙動の解析、及び高容量活物質の採用に付随する各種現象の評価法の開発と、劣化挙動の解析を進めて材料開発へ反映させた。</p> <p>3.1.2 材料特性評価技術の開発</p> <p>今後、企業・大学等で開発される全固体 LIB 用の新材料サンプルについて、セルとしての特性評価を行って、新材料の得失、技術的課題及びセル量産プロセスへの適合性等を把握することに使用する標準電池モデル(セル)の開発を進めた。体積エネルギー密度 200Wh/L、300Wh/L 及び 400Wh/L の 3 種の 2cm 角単層セルでの標準電池モデルの開発が完了し、400Wh/L で 4×12.5cm 単層セルの開発も完了見込みとなった。また次世代全固体 LIB の標準電池モデルについては体積エネルギー密度 790Wh/L で 2cm 角単層セルの開発を進めた結果、安定的に作製できる技術を完成見込みであり、仕様書作成を進めている。</p> <p>3.1.3 シミュレーション技術の開発</p> <p>Newman モデルをベースにして、液系 LIB とは異なってくる全固体 LIB の電極構造情報、すなわち、電極内の空隙の存在及び活物質と電解質の接触状態を考慮したマクロ電極モデルを開発した。さら</p>	

に、これを発展させた電極内粒子の膨張収縮に伴う弾塑性変形と、活物質や固体電解質粒子の接触状態をイオン伝導に反映可能な電極モデルを用いることで 2cm 角単層セルの実際の放電曲線を精度良く再現できることを確認した。

EV の走行時や急速充電時のセル及び電池パックの発熱挙動を予測する手法の開発を進めた。マクロ電極モデルの計算体系を一部簡略化して汎用有限要素法の物理シミュレーションソフトに組み込み、3次元のセルの伝熱計算モデルを構築した。0.3C 放電時の温度上昇の計算結果と実測値を比較した結果、概ね一致することが確認された。また、液系 LIB で実績のある電池パック解析モデルに、全固体 LIB のセル解析モデルを組み込み、全固体 LIB 搭載の EV 使用時の発熱挙動、温度分布の推算が可能となった。

3.1.4 試験評価法の開発

IEC 62660-1「電動車両推進用リチウムイオン二次電池 -性能試験-」に規定されている各性能試験項目について、試験温度範囲を広げて実施した。その結果、液系 LIB では電解液の分解によるガス発生が起きる 80℃以上でも全固体 LIB は問題なく作動することを確認した。入出力性能についても各性能試験をより高レートで実施した。入出力試験結果では 25℃以上の最大レートにおいて液系 LIB の最大レートとされている 5C レート以上の入出力が可能であることを確認した。

耐久性試験方法については IEC62660-1 の保存試験及びサイクル試験の全固体 LIB への適用性を確認した後に、高温作動性を評価可能な試験温度範囲に拡張して評価した。また、劣化後のセルの特性評価、解体分析などの劣化要因解析を行い劣化要因マップとしてまとめた。

安全性試験については、IEC 62660-2「電動車両推進用リチウムイオン二次電池 -信頼性・誤用試験-」及び IEC 62660-3「電動車両推進用リチウムイオン二次電池 -安全性要求事項-」に規定されている各安全性試験が全固体 LIB にも適用可能かを検討した結果、強制内部短絡試験(FISC 試験)のみが適用困難であるとの結論に至った。そのため、セルの解体が不要でかつ拘束状態でも試験が可能となる釘刺し方式の内部短絡試験法を開発した。開発された評価方法は、液系 LIB を対象とした強制内部短絡試験の代替試験法として、全固体 LIB に適用できることが示された。

特性評価法としては材料、電池に関する各種の評価法を確立した。新たに開発した参照極を有する全固体 3 極セルでは正極と負極の電位及び抵抗変化を分離して計測することが可能となった。

3.2 「研究開発項目② 社会システムデザインの検討」の研究開発成果

3.2.1 検討の流れ

社会システムデザインの検討を以下に示す流れで実施した。

- ① 一般ユーザー及び法人ユーザーを対象とした EV・PHEV の受容性調査を実施し、その結果に基づいて、国内乗用車普及台数推計ツールを作成する。
- ② 全固体 LIB 及び競合技術となる液系 LIB について、市場・技術動向を整理した上で、性能向上やコストダウン見通しを検討する。
- ③ 全固体 LIB 搭載 EV・PHEV の市場導入シナリオ(車両スペック・価格、市場投入タイミング等)を設定し、上記①で作成した普及台数推計ツールを用いて EV・PHEV(全固体 LIB 搭載車及び液系 LIB 搭載車)の普及台数を推計する。
- ④ 上記③で推計される EV・PHEV の普及台数を全固体 LIB の開発・実用化がもたらす社会的インパクトとして定義し、これを実現するために必要とされる施策を検討する。
- ⑤ 全固体 LIB 搭載 EV・PHEV の広範な普及が実現した際の社会システムの将来像を整理する。
- ⑥ 社会システムの将来像を実現するための課題を整理して、今後の取組と提言を検討する。

3.2.2 EV・PHEV 導入に関するユーザー意識調査

中間評価に続き、2021 年度に改めて 2216 人(うち自動車保有者 1740 人)に対して、一般アンケート調査及びコンジョイントアンケート調査を実施し、EV・PHEV の受容性や次回購入する自動車に対する意識(価格、ランニングコスト等の属性の重要度)を把握した。

3.2.3 全固体 LIB 導入シナリオの検討

EV・PHEV の普及を、乗用車は普及台数推計モデル、商用車は経済性モデルを用いて推定することとし、S1:液系 LIB シナリオ(液系 LIB のみ普及する場合)、S2:全固体 LIB 開発シナリオ(全固体 LIB が普及する場合)、S3:全固体 LIB 開発+政策拡大シナリオ(全固体 LIB の普及に大きな政策的な支援が拡大される場合)の 3 つのシナリオを検討した。

3.2.4 全固体 LIB がもたらす社会的インパクト

社会的なインパクトを把握するため、(1)国内電動車普及台数の推計、(2)全固体 LIB 搭載車普及に関する CO₂ 排出削減、(3)全固体 LIB 搭載車普及に関するリユース・リサイクル、(4)全固体 LIB 搭載車普及に関する充電インフラ整備の観点から分析を行った。分析結果から充電インフラの充実が EV 普及につながることで、急速充電を定期的に利用する商用車に全固体 LIB の耐久性のメリットが効果的である可能性が示唆された。

	<p>3.2.5 社会システムのシナリオ・デザイン</p> <p>全固体 LIB 普及がもたらす社会的インパクトの分析から、「社会システムの将来像」を実現するための課題とその課題解決に向けた方策の検討を進めた。一例として、全固体 LIB には長寿命化と急速充電による劣化を低減する開発が期待され、高耐久と急速充電性が生かされる A・B セグメントの PHEV に導入される将来像が示唆された。また、地球温暖化抑制への対策として、固体電解質の製造時のエネルギー消費、セル製造時の除湿負荷を低減することが期待される。抽出された課題は、材料調達、製造段階、充電インフラ整備、ユーザー購入意欲向上、資源循環の観点から整理し、解決に向けた方策を提言としてまとめ、全固体 LIB ならではの課題解決に向けた検討を進める。</p> <table border="1" data-bbox="391 448 1426 676"> <tr> <td>投稿論文</td> <td>8 件(2022 年 5 月までの集計、2022 年度中に 5 件を追加予定)</td> </tr> <tr> <td>特許</td> <td>出願済 25 件(2022 年 5 月までの集計、2022 年度中に 23 件を追加予定)</td> </tr> <tr> <td>その他の外部発表 (プレス発表等)</td> <td>講演会・セミナー等 13 件、学会等 71 件、雑誌・書籍等 6 件、 取材・プレスリリース等 3 件 (2022 年 5 月までの集計)</td> </tr> </table>	投稿論文	8 件(2022 年 5 月までの集計、2022 年度中に 5 件を追加予定)	特許	出願済 25 件(2022 年 5 月までの集計、2022 年度中に 23 件を追加予定)	その他の外部発表 (プレス発表等)	講演会・セミナー等 13 件、学会等 71 件、雑誌・書籍等 6 件、 取材・プレスリリース等 3 件 (2022 年 5 月までの集計)
投稿論文	8 件(2022 年 5 月までの集計、2022 年度中に 5 件を追加予定)						
特許	出願済 25 件(2022 年 5 月までの集計、2022 年度中に 23 件を追加予定)						
その他の外部発表 (プレス発表等)	講演会・セミナー等 13 件、学会等 71 件、雑誌・書籍等 6 件、 取材・プレスリリース等 3 件 (2022 年 5 月までの集計)						
<p>4. 成果の実用化に向けた取組及び見通し</p>	<p>本事業における成果の実用化の考え方は、以下のように定義した。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> <p>本事業における成果の実用化の考え方(定義)</p> <p>本事業の成果(全固体リチウムイオン電池の共通基盤技術及び社会システムのシナリオ・デザイン)が、材料メーカー・大学等における新材料の研究開発や自動車・蓄電池メーカーにおける電動車及び車載バッテリーの研究開発に活用されること。</p> </div> <p>4.1 成果の実用化に向けた取組</p> <p>上記した定義に基づく成果の実用化に向けた基本的な戦略と具体的な取組は以下のとおりである。</p> <p>4.1.1 開発成果の参加企業の活用に向けた取組</p> <p>本事業の集中研究拠点である LIBTEC は、全固体 LIB や車載バッテリーで豊富な技術蓄積を有する材料・蓄電池・自動車メーカー 25 社より、研究者・エンジニアを外向研究員として受け入れ(2022 年 4 月時点で 34 名在籍)、各社の技術シーズ・ニーズを循環させつつ、大学・研究機関のサイエンスの知見を取り入れて研究開発を進めている。こうした企業間連携及び産学連携により価値を高めた技術の有用性は、各外向研究員が強く実感しており、各外向研究員が外向元企業に復帰することで、自ずと参加企業内で活用され、その後、産業界全体に浸透していくと考えられる。外向元企業に対するヒアリングの結果からも評価・解析手法を活用しているとの回答や、人材育成や会社間の技術交流が進んでいるとの回答が多数寄せられている。</p> <p>この産業界浸透の迅速化をねらい、事業期間中より、参加企業の開発担当者に対しても研究開発情報をタイムリーに共有し、開発技術の有用性を認知させることを基本戦略として、以下に示す取組を進めた。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 「SOLiD-EV 技術委員会」の開催(開催実績: 10 回) ② 「SOLiD-EV 技術シンポジウム」の開催(開催実績: 6 回、各回参加人数: 約 150~240 名) ③ 参加企業に対する「個別限定情報」の開示(開示実績: 358 件) ④ 研究設備の企業見学会の開催(開催実績: 46 回) <p>4.1.2 材料特性評価技術の産業界・学界の活用に向けた取組</p> <p>本事業で開発している全固体 LIB の材料特性評価技術については、材料メーカーのみならず、大学・研究機関も広く活用して、我が国における全固体 LIB の研究開発を効率的に進め、日本が全固体 LIB の技術進化でリードする状況を作る必要がある。</p> <p>この材料特性評価技術の産業界・学界への浸透には、実際のユーザーの立場で成果を利用してもらい、その有用性を実感させるのが最も効果的である。そのため、事業期間中より、新材料の受入れと電池試作・評価、標準電池モデルの提供を行うことを基本戦略として、以下に示す取組を進めた。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 新材料の受入れと電池試作・評価(サンプル評価実績: 320 件) ② 大学・研究機関への標準電池モデルの提供(提供実績: 7 機関) ③ 全固体 LIB の特性評価及び分析・解析に係るドキュメント類の整備(文書発行実績: 109 件、発行予定: 69 件) <p>4.1.3 国内標準化関係者との研究開発情報の共有</p> <p>試験評価法の国際標準化を迅速・円滑に進めるには、国際標準化機関における議論を早く始めることが重要である。そのため、事業開始初年度より、国内の標準化関係者と定期的に会合を持ち、研究開発の状況を共有していくとともに、意見・助言をすくい上げて実験データを取得した。</p>						

4.1.4 企業を交えた「社会システムデザインの検討」の実施
 全固体 LIB 搭載電動車の社会実装に向けた推進力・担い手となるのは自動車・蓄電池メーカーである。そのため、自動車・蓄電池メーカー9社の専門家で構成されるワーキンググループを LIBTEC 内に設置し、定期的に会合を開催し、各専門家の意見・助言をすくい上げながら検討を進めた。

4.2 成果の実用化の見通し
 次の 1)～3)に示す理由により、本事業の成果は、我が国における全固体 LIB の研究開発及び実用化を手戻りなく効率的に進めるための強力なツールとして、国内産業界及び学会で活用されることが期待できる。

- 1) 本事業に参加している企業は、蓄電池開発・実用化のパイオニア的な存在であり、この分野で世界トップの技術力を保有している。本事業では、こうした産業界・アカデミアの経験、技術力、人材等を最大限に活かす産学連携・企業間連携の体制で研究開発を進めている。
- 2) 全固体電池の研究開発が世界的に活発化しており、欧州では産学連携による国家プロジェクトも開始されているが、総合的に見て本事業の方が実施体制に厚みがあり、開発している要素技術や特性評価のプラットフォームは世界トップレベルの水準にある。
- 3) 事業期間中より、成果を企業・アカデミアに浸透させていく取組を研究開発と同時進行で行っており、順調に進展している。

また、本事業の成果と技術蓄積を活用し、将来、LIBTEC が全固体 LIB の材料評価サービスを展開することが予想される。既に LIBTEC は、過去の NEDO 事業で開発した液系 LIB の材料評価技術及び導入した設備・装置を活用し、液 LIB の材料評価サービスを自主事業として展開している。全固体 LIB の材料評価サービスについても LIBTEC において自主事業化の検討を進めている。

さらに、2022 年度より開始したグリーンイノベーション基金事業は 2050 年カーボンニュートラルの実現に向け、野心的な目標にコミットする企業等に対して、10 年間、研究開発・実証から社会実装までを継続して支援するものであるが、自動車・蓄電池産業界における「次世代蓄電池・次世代モーターの開発」プロジェクトにおいては全固体 LIB と関連材料の研究開発テーマとして 7 件が採択されている。これらの企業における研究開発で本事業の成果が活用されることが期待できる。

4.3 波及効果

4.3.1 オープンイノベーションの推進
 本事業においては、自動車・蓄電池・材料メーカー等 26 法人が競合・売買関係等の垣根を取り払い、協調して研究開発に取り組んでいる。集中研究拠点である LIBTEC においては、企業各社からの出向研究員によってニーズ・シーズの好循環や幅広い知・人材の交流が図られている。さらに、本事業への参加により派生した企業間コネクションに基づいて個別の研究開発体制を作り、開発を進めようとする動きも見られている。また、LIBTEC がハブとなって国内の大学・研究機関を研究ネットワークに取り込み、課題・ニーズを共有しながら課題解決型の研究開発を進めることにより、学術成果の産業技術としての引き上げを実現している。さらに、各研究チームの内外で、大学・研究機関相互及び異分野の研究者相互の連携・協力も実現している。

4.3.2 人材育成
 本事業では、「科学者(アカデミア)とエンジニア(産業界)の交流」及び「蓄電池研究者と電池設計・プロセス技術者の交流」を実現している。その結果として、科学者は研究と社会(産業)との繋がり・結び付き、企業のコスト意識や時間感覚等を体感し、一方、エンジニアは大学・研究機関が保有するサイエンスに立脚した研究を体感している。また、産学両方のフィールドで、「サイエンスを理解した電池設計・プロセス技術者」及び「電池設計・プロセス技術を理解した蓄電池研究者」が育成される。

4.3.3 全固体 LIB の他用途への展開
 全固体 LIB は EV・PHEV 用途だけでなく、電動バイク、無人搬送車、フォークリフト、ロボットといった他の動力分野用途にも応用できる。さらには、住宅設置、需要家設置、系統設置等の電力貯蔵システム用途でも応用できる。本事業に参加している企業は EV・PHEV 用以外でもビジネスを展開しており、本事業の成果は様々な分野の世界市場に展開することができる。

5. 基本計画に関する事項	作成時期	2018 年 1 月 作成
	変更履歴	なし

用語集

用語	説明
C	評価対象の電池の容量から規定される電池を充放電する際の電流値の表記法。定電流放電したときに、1 時間で対象電池の全容量を放電できる電流値を 1 C と規定する。2 C の定電流放電では電流値が 1C の電流値の 2 倍であり、0.5 時間で充電状態から全容量が放電される。
EV	電気自動車。Electric Vehicle の頭字語。外部からの電力供給によって搭載する蓄電池に充電し、蓄電池から電動機に電力を供給することで走行する、内燃エンジンを搭載していない自動車。
HEV	Hybrid Electric Vehicle の頭字語。ハイブリッド電気自動車。蓄電池を搭載し、内燃エンジンと電動機で走行可能な自動車。蓄電池の充電は内燃エンジンで行う。
IEC	International Electrotechnical Commission の頭字語。和訳は国際電気標準会議。電気・電子技術分野の国際規格の制定を行っている非政府国際標準化機関。制定された規格は IEC62660 などと付番される。IEC には、技術分野毎に規格を開発するための専門技術委員会があり、これらは TC (Technical Committee) と呼ばれる。TC は TC1 から TC114 まであり、TC21 は蓄電池である。
LCA	Life Cycle Assessment の頭文字。製品・サービスのライフサイクル全体(資源採取—原料生産—製品生産—流通・消費—廃棄・リサイクル)における環境負荷を定量的に評価する方法である。
LIB	リチウムイオン電池(Lithium Ion Battery)。本事業では、電解質に固体電解質を使用するリチウムイオン電池を全固体 LIB、電解質に電解液を使用するリチウムイオン電池を液系 LIB と呼称する。
NCM	$\text{Li}[\text{NiCoMn}]\text{O}_2$ LIB 用正極材として利用。三元系正極活物質とも呼ばれる。Ni、Co、Mn の比率に応じて Ni:Co:Mn=5:2:3 であれば NCM523 などと表記される。
OEM	Original Equipment Manufacturer の頭字語。一般には他社ブランドの製品を製造すること、またはその企業に使われる場合が多いが、自動車産業関係の話題では、自動車製造者の事を OEM と呼ぶ。
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle の頭字語。プラグインハイブリッド電気自動車。外部から充電可能な蓄電池を搭載し、内燃エンジンと電動機で走行可能な自動車。
SE	Solid Electrolyte の頭字語。固体電解質の略号として使用される。
SOC	State of Charge の頭字語。電池の規定容量に対してどの程度充電されているかの状態。SOC 100%で満充電。SOC 0%で完全放電状態。
圧粉体セル	粉末状の材料を円筒状の形状を有する評価セルの内部に充填し、密閉、必要に応じて加圧することで電池として作動する構成を実現し評価をおこなうセル。
活物質	電極活物質ともいう。化学電池で、その電池の起電反応のもととなる主要物質のこと。LIB では、正極活物質として、コバルト酸リチウム、マンガン酸リチウム、リン酸鉄リチウム等が、負極活物質として、黒鉛等が使用されている。
固体電解質	有機物または無機物の固体の中で、リチウムイオン伝導性を示し、電解質として使用できるもの。
酸化物系固体電解質	酸素を主成分の一つとして含有する酸化物の固体電解質。化学的安定性に優れるが、リチウムイオン伝導度が相対的に低い物質が多い。
三元系正極活物質	リチウムイオン電池の正極活物質の一種。層状結晶を有するリチウム金属酸化物で金属にコバルト(Co)、ニッケル(Ni)、マンガン(Mn)の 3 種を使用する物質。NCM とも呼ばれる。
シングルイオン伝導体	電解質中をイオンが移動する際、移動するイオンが1種類の電解質。電解液では解離したプラスイオン、マイナスイオンの 2 種類が移動する。
セパレータ	正極と負極の間に短絡防止、間隔保持、電解液保持等の目的で挿入する多孔または微孔性の膜や不織布状のもの。
セル	電池の内部構造で、正極・負極・電解質の 1 組を有し蓄電機能を有する最小単位として機能する構造体。またはそれを 1 組だけ持つ電池。

用語	説明
全固体電池	電解質として電解液の代わりに固体電解質を利用し、電池の構成成分全てが固体からなる電池。液体をゲル化などの手法で固化した電池を固体電池と称する例もあり、液体成分を含まない構成を特に「全」を付して識別するが、使用者によって定義が異なることもある。
電解液	二次電池内の電気化学反応に際してイオン伝導させる溶液。LIB では、極性が大きく溶解力の高いカーボネート系有機溶剤が使用される。
電極	二次電池においてエネルギーの保存に関与する部材。正極、負極がある。リチウムイオン電池では活物質をバインダーと混合し集電体上に膜形成したもの。
二次電池	蓄電池。充電することで繰り返し利用することが可能な電池。鉛蓄電池、ニッケルカドミウム電池、ニッケル水素電池(Ni-MH 電池)、リチウムイオン電池など。充電できない乾電池などを一次電池、充電できる電池を二次電池と区別する。
パック (電池パック)	蓄電池の搭載機器において蓄電池が収納されているユニット。電動車に対して用いる場合が多く、複数の電池と電池制御システムを一つの筐体に収めたパーツ。
標準電池モデル	一定のカテゴリーの材料系を用いた電池において、安定かつ十分な性能を発現できる電池構成、電池作製プロセスを開発しモデルとした電池。材料評価、特性評価の基準として活用する。
フルセル	検討対象の電池において、想定する正極、負極の双方を有するセル。一方が参照用のリチウム金属などで代替される場合はハーフセルという。
放射光	磁場中を円運動する電子が曲げられるときに放射(シンクロトロン放射)する紫外～X線。通常の光源に比べ強度と指向性が極めて高く、電池をはじめ物理、化学、生物、工業分野での研究に広く活用されている。国内では SPring-8、フォトンファクトリー等の施設がある。
ラミネート形電池	従来の金属ケースに代えて、金属箔、高分子フィルムなどを積層(laminate)した複合フィルムからなる包材を成型し、ケースとした電池の総称。小型で軽量の電池が比較的容易に実現できる。
リチウムイオン電池	二次電池の 1 種。充放電における反応は、リチウム原子が正極・負極、両極の層状物質の層間を往復するだけのシンプルなものである。(1)起電力が約 4V と高い、(2)エネルギー密度が高い、(3)レート特性が良い、(4)温度特性、自己放電特性が良い、(5)メモリ効果が見られない、という特徴を持っている。これらの特徴から、家電、通信機等の幅広い分野で応用されている。今後は、自動車等輸送機器用の電源としての用途が期待されている。
硫化物系固体電解質	Lithium phosphorus sulfide など硫黄(S)を主成分として含有する固体電解質。高いリチウムイオン伝導度を示す材料系が複数知られている。

第 1 章 事業の位置付け・必要性について

1.1 事業目的の妥当性

1.1.1 本事業の目的

多様なエネルギー源を転換して生産することが可能であり、利便性も高い 2 次エネルギーである電気を蓄え、繰り返し使用可能にする電気化学デバイスが蓄電池である。今日、様々な用途で利活用されており、技術革新による更なる高性能化・低コスト化が期待されている。

蓄電池の高性能化・低コスト化において、中心的な役割を果たすのは電極活物質、電解質、セパレータといった蓄電池を構成する材料である。ただし、材料単体の性能を向上させても、その性能をセルで最大限発揮させるには、合材電極・セルの構造、他の材料との相性・組合せ、量産プロセスへの適合性等を検討する必要がある。加えて、適用を想定しているアプリケーションの要求仕様をクリアできることの検証も必要である。そのため、新材料の実用化には、材料単体の改良と実際のセルに組み込みでの特性評価というキャッチボールを迅速かつ効率的に行っていく開発のアプローチが必要である。

本事業のねらいは、電気自動車(EV)及びプラグインハイブリッド自動車(PHEV)の利便性向上と低価格化を同時実現する上で最も有望なアプローチと考えられる全固体リチウムイオン電池(以下、「全固体 LIB」という。)について、その実用化で日本が世界の先手を取るとともに、その後の技術革新も日本が世界をリードしていくことである。そして、日本の蓄電池関連産業界にとって有利なビジネス環境やサプライチェーンを創造することを目指している。これらを実現するため、本事業においては、産業界の共通指標(ものさし)として機能する全固体 LIB の材料評価技術を中心とした共通基盤技術の確立とそのプラットフォームの構築に取り組むこととしている。

詳細は「第 2 章 研究開発マネジメント」で述べるが、取組の概要を以下に示す。

「研究開発項目① 共通基盤技術開発」

- 1) 全固体 LIB の大型化・量産化のボトルネックとなっている技術課題を解決する要素技術及び全固体 LIB の更なる性能向上・低コスト化を実現するための要素技術を開発する。
- 2) 全固体 LIB への適用を想定し、今後、企業・大学等で開発される新材料をセルに組み込み、特性評価を行って、実用化課題や改良の方向性等を洗い出し、サンプル提供者にフィードバックするための特性評価の体系を構築する。
- 3) 上記の特性評価に用いるセル(以下、「標準電池モデル」という。)を、全固体 LIB の量産を想定した工業的な製造プロセス・装置を用いて作製する技術体系を構築する。
- 4) 実用サイズのセル及び車載電池パックの充放電特性や発熱挙動・温度分布等を予測する計算機シミュレーション技術を開発する。
- 5) 車載バッテリーの国際標準試験法としての発展を見据え、全固体 LIB の性能試験法及び安全性試験法を開発する。また、全固体 LIB の劣化解析・現象解明を行い、セル及び構成材料・部品の要因マップを策定するとともに、劣化加速試験法を開発する。

「研究開発項目② 社会システムデザインの検討」

自動車市場、車載バッテリー、充電インフラ等に係る政策・市場、ユーザーニーズ、バリューチェーン、リユース・リサイクル等について、現状の動向把握と将来分析を行うことにより、本事業の成果を産業競争力として結実させるための社会システムのシナリオ・デザインをとりまとめる。

1.1.2 市場動向

(1) LIB の市場動向

有機溶媒電解液を用いた LIB(以下、「液系 LIB」という。)が、1991 年にソニーによって実用化されると、ニカド電池やニッケル水素電池を一気に代替し、瞬く間にモバイル・IT 機器への搭載が進んだ。その後の技術改良による高性能化・低コスト化も著しく、今日、LIB は自動車の電動化、電力自由化、再生可能エネルギーの導入量拡大、災害対応、スマートコミュニティの社会実装等も担うキーデバイスとなっている。

図 1.1.2-1 に示すように、LIB の市場規模は現在、約 8 兆円であるが、2025 年には約 14 兆円、2035 年には約 33 兆円に成長すると予測されている。この市場拡大を牽引するのが、EV・PHEV 等の電動車用の LIB である。現在、液系 LIB が採用されており市場規模は約 5 兆円であるが、2025 年には約 10 兆円、2035 年には約 26 兆円に成長すると予測されている。

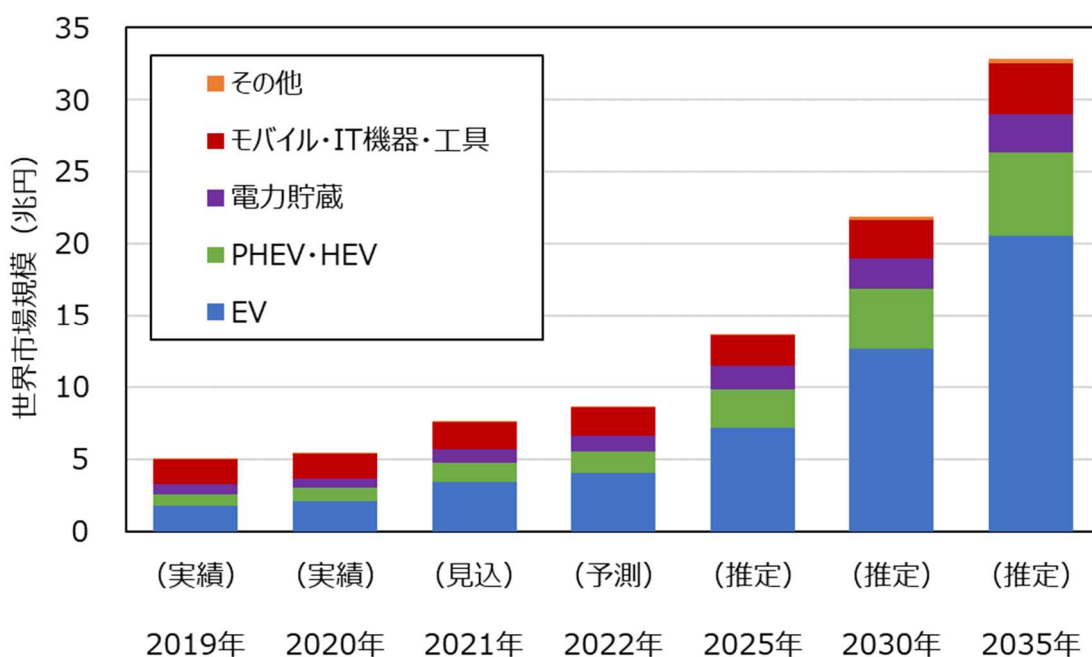


図 1.1.2-1 LIB の市場規模推移と将来予測

出典:「エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2021」及び「2020 電池関連市場実態総調査」
(株式会社富士経済)を参考に NEDO 推定

電動車用の LIB の市場拡大が予測される理由としては、環境・エネルギー問題の深刻化を背景に、各国が自動車の燃費規制・排出ガス規制を強化すると同時に、電動車特に EV・PHEV への補助金政策、ガソリン・ディーゼル車販売を段階的に禁止する政策を推進していることによる。世界的なカーボンニュートラルを目指す動きの中、自動車メーカー各社も 2030 年前後に数百万台規模の EV 販売を目標とする電動車へのシフトを発表し、2050 年のカーボンニュートラル達成に向け足並みを揃えつつある。

電動車へのシフトが進む中、中国及び韓国の蓄電池メーカーは LIB の生産設備投資を精力的に進めている。特に中国政府による手厚い支援を受けた中国蓄電池メーカーの躍進には目覚ましいものがある。また、欧米自動車メーカーの電動化が本格化することで増加した蓄電池需要に韓国の蓄電池メーカーが供給を増やしており、結果として、図 1.1.2-2 に示すように、日系蓄電池メーカーは生産・販売量は増やしているものの、シェアは低下している。

今後、電動車用蓄電池の市場拡大とともに価格低下が見込まれるため、日系蓄電池メーカーが市場プレゼンスを向上させるためには、先を見据えた次の一手が必要であることは明白である。そして、ハイスペック化と低コスト化を両立させた全固体 LIB を早期に製品ラインナップ化することが重要と考えられる。

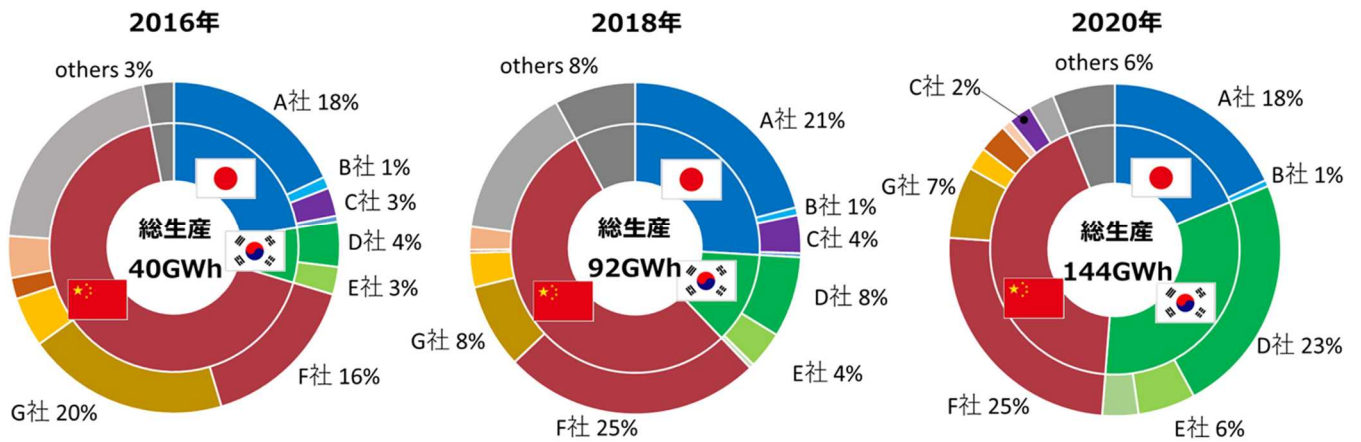


図 1.1.2-2 電動車用 LIB の市場シェア推移

出典:「エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2017、2019、2021」
(株式会社富士経済)に基づき NEDO 作成

(2) LIB 材料の市場動向

正極・負極活物質、電解液、セパレータ等の LIB 材料の市場規模推移と将来予測を図 1.1.2-3 に示す。現在の市場規模は約 3 兆円であるが、電動車用の蓄電池需要の増加に対応し、2030 年には約 10 兆円、2035 年には約 17 兆円まで成長すると予測されている。

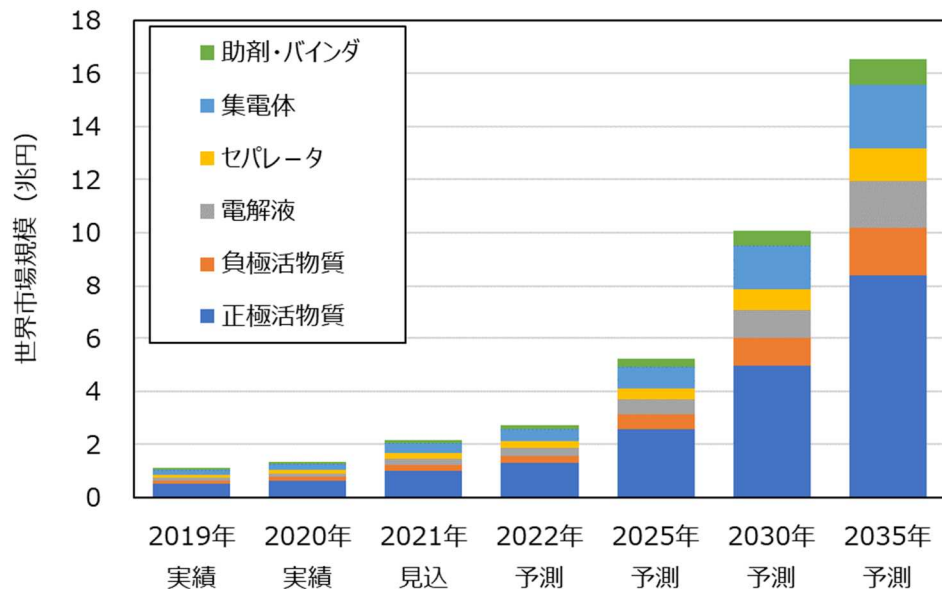


図 1.1.2-3 LIB 材料(電動車用)の市場規模推移と将来予測

出典:「エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2021」及び「2020 電池関連市場実態総調査」
(株式会社富士経済)を参考に NEDO 推定

次に、LIB の主要 4 材料(正極活物質、電解液、セパレータ)の 2016 年、2018 年、2020 年の各国メーカーの世界生産量(地域別)を図 1.1.2-4 に示す。LIB 市場と同様に、日本、韓国、中国の材料メーカーがシェアを確保し、とりわけ自国の EV・PHEV 導入補助金政策の恩恵を受けた中国材料メーカーが生産量を大幅に増加させている。一方、日系材料メーカーは高品質な材料で一定のプレゼンスを維持するに留まっている。

また、図 1.1.2-5 に LIB の主要 4 材料の生産量と生産金額のシェアを地域別に比較しているが、日系材料メーカーは生産金額において一定のシェアを確保している。高性能、高安全性といったハイレベルの技術力を保有することを示すものであるが、その一方で、前記したように価格低下の圧力は今後、厳しさを増すことが予想され、利幅の少ない旨味の無いビジネスを強いられる可能性がある。そのため、全固体 LIB 用の材料を早く手の内化し、LIB 用の材料との両輪で持続可能なビジネスモデルを構築していくことが望ましいと考えられる。

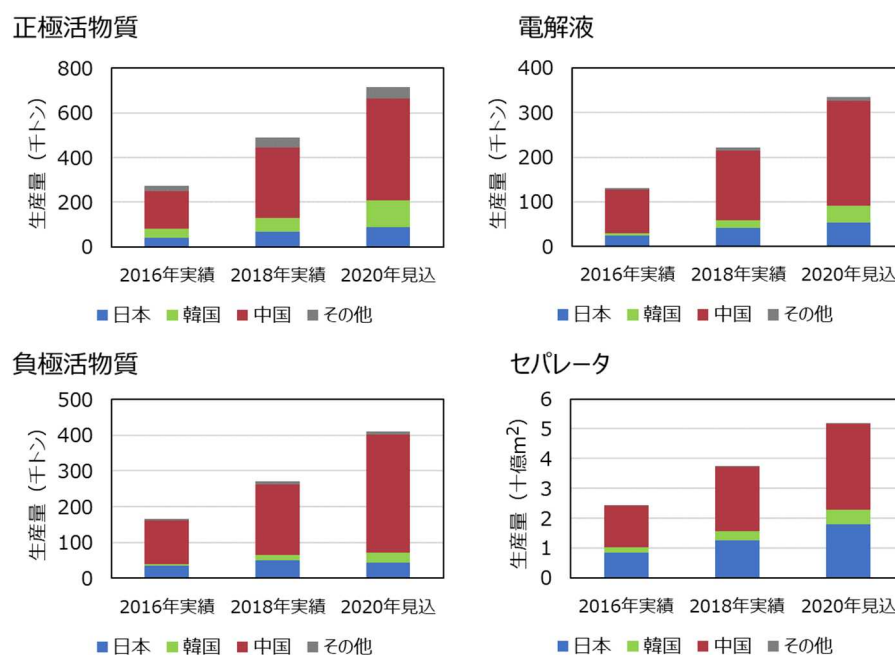


図 1.1.2-4 LIB 材料の世界生産量(地域別)の推移

出典:「2017、2019、2020 電池関連市場実態総調査」(株式会社富士経済)に基づき NEDO 作成

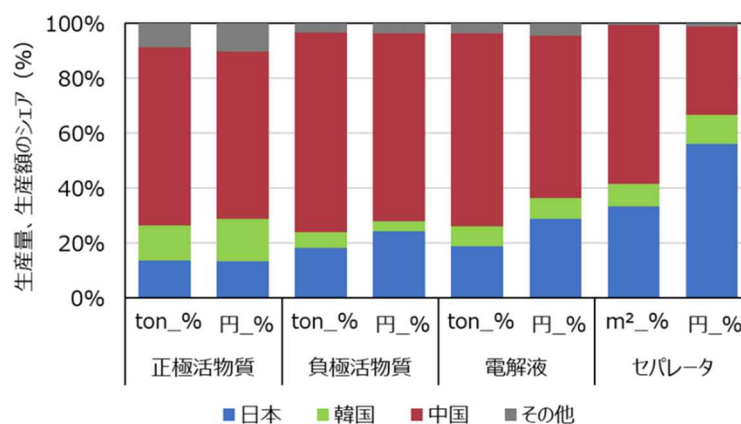


図 1.1.2-5 LIB 材料の生産量と生産金額のシェア比較(2018 年、地域別)

出典:「2019 電池関連市場実態総調査<電池材料市場編>」(株式会社富士経済)に基づき NEDO 作成

1.1.3 技術動向

(1) 液系 LIB の現状と課題

カーボンニュートラル政策を契機とした飛躍的な電動車市場の成長期待を踏まえ、EV・PHEV 用の蓄電池は市場拡大を続けているものの、車両価格がエンジン車との比較で高い、航続距離が短い、充電時間が長い、充電インフラが少ないなどの技術課題と利便性の課題は依然として残っており、各国は車両購入、充電インフラ整備への補助金に加え、再生可能エネルギーの普及促進により政策的な支援を継続的に進めている。また、市場拡大に伴いライフサイクルでの CO₂ 低減、レアメタル資源の確保も新たな課題となっており、蓄電池のリユース・リサイクルへの取組や、欧州では、域内での電池生産と循環を推進する電池規則案制定の協議が始まっている。今後、EV・PHEV の普及が進むにつれ、車載用蓄電池としてコスト低減、エネルギー密度向上による航続距離延長、充電性能向上による充電時間短縮、電池製造プロセスの CO₂ 排出低減、材料資源確保と代替材料の開発が更に重要となってくる。

現在車載用蓄電池の主流となっている液系 LIB は、エネルギー密度向上や安全性向上などの技術課題は残るものの漸進的に性能向上が進んでいる。一方で、技術的優位性視点での製品差別化は困難となりつつあり、技術競争領域からコスト競争領域に移行してきている。それゆえ、中期的には日本の蓄電池産業は、液系 LIB で一定の市場確保を狙うため、生産基盤強化のための大規模投資、戦略的なグローバルアライアンスの確立を段階的に推進することを検討していく一方で、製品性能として差別化可能な全固体電池を含む次世代電池の技術開発への中長期的な投資を進めている。

現状の EV・PHEV に用いられている液系 LIB のエネルギー密度は、セル重量エネルギー密度で 200～250Wh/kg、セル体積エネルギー密度で 400～700Wh/L のレベルにある。しかしながら、液系 LIB は異常時には発火の危険性があり、また、高レートでの充放電による温度上昇で劣化が進むため、電池パックには安全系や冷却系（熱マネジメント系）のシステム部品が数多く組み込まれている。この結果、電池パックでは、重量エネルギー密度が 130～160Wh/kg 程度、体積エネルギー密度が 150～240Wh/L 程度となっている。航続距離が 400km を超える EV に搭載される大型の電池パックであれば、重量で 300kg 以上、体積で 250L 以上と重く嵩張るものとなり、車両デザインに大きな制約を与えている。また、電池の生産コストも高く、車両コストの約 1/3 を占めると言われており、低価格帯の車両モデルではガソリン車と同レベルの収益性を確保することが困難となっている。

そのため、自動車ユーザーの EV 購入意欲を掻き立てると同時に、自動車メーカーの EV・PHEV ビジネスを加速させるには、車載バッテリーについて信頼性・安全性を損ねることなく、エネルギー密度を向上させることにより、低コスト化及び軽量・コンパクト化を図る必要がある。しかしながら、この課題を現状の液系 LIB の技術開発の延長線上で解決するのは簡単ではない。

この理由としては、LIB の充放電反応は Li イオンの活物質への挿入・脱離反応（トポケミカル反応）を用いるため、Li を挿入・脱離するホスト材料が必要なこと、Li の挿入・脱離量はホスト材料の Li の結晶学的位置の数で決まること、Li の脱離量が多くなるとホスト材料に構造相転移が起こって可逆性が低下すること等により、電池セルでの数倍レベルのエネルギー密度の向上は困難であるからである。数割レベルの向上を目指して、例えば、NCM 系（三元系）正極活物質の高容量化に有効な Ni 含有量を増加することは、結晶構造の分解温度を低下させ、異常時の高温熱分解による放出酸素と電解液の反応による発火リスクを高めることになる。また、高電位の正極活物質を用いるにしても、有機溶媒電解液の酸化分解とガス発生の問題がある。難燃性・不燃性の電解液も検討されているが、性能・経済性を損ねずに安全性を抜本的に改善するものはまだ見出されていない。

この様に技術的な課題の難易度は高いが、液系 LIB は車載用蓄電池の現在の主流であり将来的にも有望であることから各国では研究開発が盛んに進められている。図 1.1.3-1 に主要論文誌に掲載された液系 LIB の論文発表件数の推移を示す。全世界における液系 LIB の論文発表件数は 2010 年頃から増加が顕著になった。増加分の多くは中国によるものであるが、米国、欧州、韓国においても件数は増えている。日本は 2000 年台前半においては開発国として 5 カ国・地域の中で上位であったが、その後の発表件数の伸びは小さく、2010 年頃を境に最下位になり現在に至っている。ここ数年の傾向としては中国の増加傾向は継続しており他を引き離している。その他エリアでも傾向は異なるが研究活動が続けられている。図 1.1.3-2 に示すように、2001 年から 2021 年までの累積発表件数では中国が約 4 割強を占めており他国に大きく差をつけている。米国、欧州が 15% 程度と一定の存在感を維持している一方、日本は累積発表件数でも 5% に留まり 5 カ国・地域の中では最も少なくなっている。

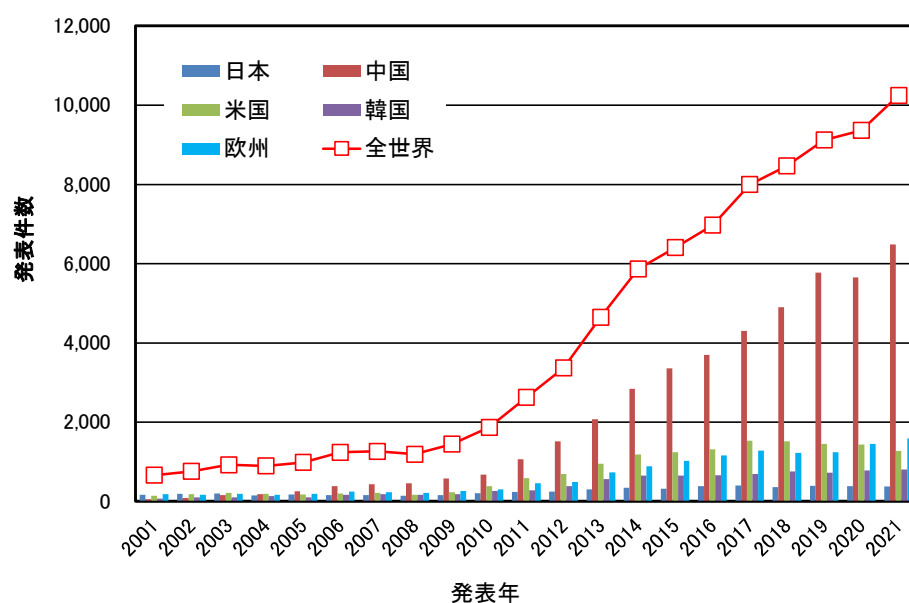


図 1.1.3-1 液系 LIB の論文発表件数の推移

出典: Web of Science に基づき NEDO 作成

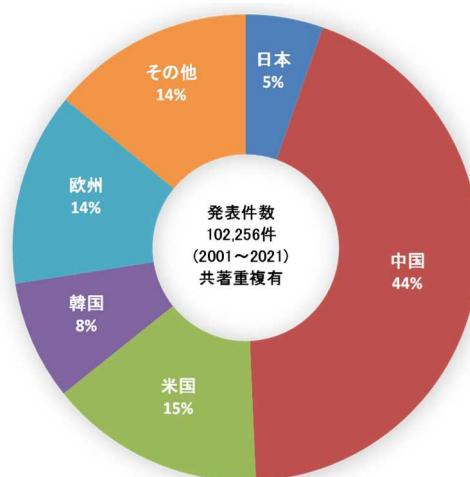


図 1.1.3-2 液系 LIB の著者所属機関国籍別の論文発表件数の割合

出典: Web of Science に基づき NEDO 作成

同様に、2001年から2019年の19年間における液系LIBの特許出願件数の推移を図1.1.3-3に示す。液系LIBの年間特許出願件数は2008年以降、急速に増加し、2019年には約14,000件/年と2001年の約7倍に増加している。増加分の多くは中国での出願によるものであり増加傾向は継続している一方で、米国、欧州、韓国は2010年台前半から横ばいとなっており中国の増加が目立つ。日本は2000年台前半、5カ国・地域で圧倒的に多かったが出願件数の伸びは停滞しており、その後、2008年頃より一度増加したものの2012年頃から減少に転じた結果、2012年には単年の出願件数で中国に追い抜かれ2020年には5倍程度の差をつけられている。累積出願件数では図1.1.3-4に示すように、中国が1/2、日本が1/4程度を占めている。

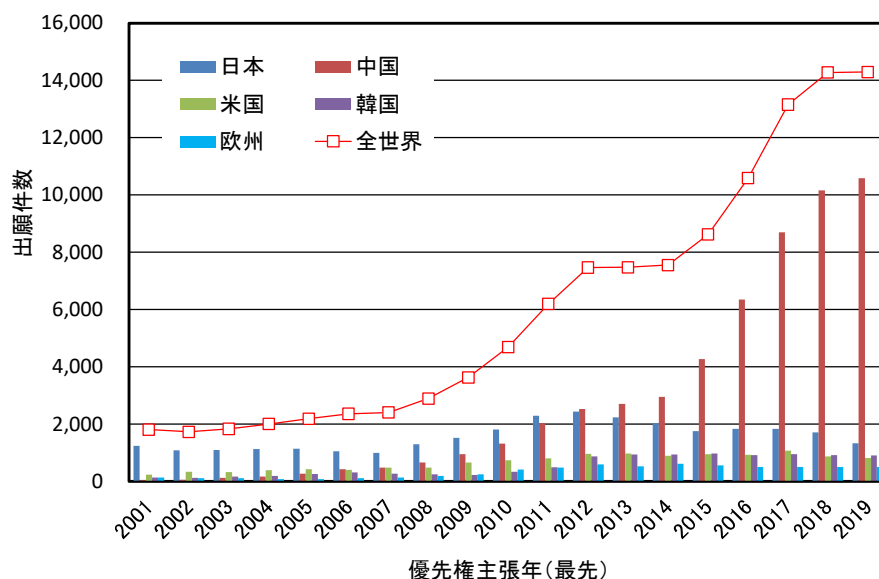


図 1.1.3-3 液系 LIB の特許出願件数推移

出典: Derwent World Patents Index に基づき NEDO 作成

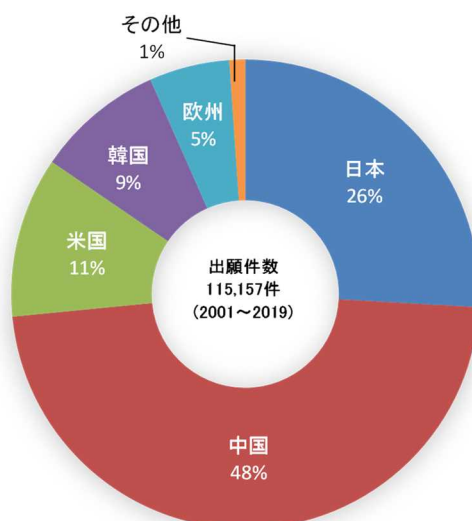


図 1.1.3-4 液系 LIB の出願人国籍別累積出願件数の割合

出典: Derwent World Patents Index に基づき NEDO 作成

論文発表件数及び特許出願件数は必ずしも産業競争力に直結するものではないが、日本発祥の技術である液系 LIB について各国が相当量の技術的知見・ノウハウを蓄積しているのは明らかであり、開発競争が継続している状況である。

(2) 全固体電池の実用化の期待

前記した車載バッテリー・液系 LIB の課題を解決する蓄電池として全固体電池に実用化の期待が高まっている。

全固体電池は無機固体電解質(硫化物あるいは酸化物のリチウムイオン伝導体)の化学的安定性(実用的な高電圧耐性)を活かし、液系 LIB の有機溶媒電解液では分解・ガス発生が起きる高電圧条件でもセルを作動させることができる。そのため、セルのエネルギー密度を数 10%程度、向上させることができる。流動性のない電解質を使用するためバイポーラ型構造を採用することも可能であり、将来的にバイポーラ型でセル構造が実現できれば更にエネルギー密度は向上できる。また、無機固体電解質の熱的安定性を活かし、電池パックの冷却システムの小型化あるいは不要化が期待できる。さらに、無機固体電解質は不燃性であり、発火リスクが大幅に低減するため、電池パックの安全システムの見直しも期待できる。その結果として、1/2～1/3 のオーダーで電池パックの小型化と低コスト化が期待できる。加えて、有機溶媒電解液中では陽イオンと陰イオンが同時に移動するため、Li イオンの輸率は 0.5 以下と低いが、無機固体電解質はシングルイオン伝導体であるため、輸率が 1 となり、入出力特性が格段に向上し、数倍レベルでの「超急速充電」の実現も期待できる。

かつて固体電解質は Li イオン伝導性が低く、全固体電池の実用化は困難と見られていた。しかしながら、近年、優れた硫化物系の固体電解質が日本で相次ぎ発見され、小型のセルであったものの、液系 LIB を凌駕する性能が実証された。この結果、世界中で研究開発が活発化しており、トヨタ自動車、日産自動車、本田技研工業、Volkswagen、Mercedes-Benz Group、Samsung SDI、CATL、BYD 等、大手自動車・蓄電池メーカーが早期実用化に向け、研究開発に取り組んでいる。また、米国・欧州には固体電解質を用いた蓄電池を手掛けるベンチャー企業が多数存在する。さらに、米国、EU、ドイツ、英国、中国、韓国等においては公的資金による研究開発も進められている。

NEDO が想定している車載バッテリーに関する技術シフトシナリオとして、当面は液系 LIB が市場の主流であるが、2030 年頃には、研究開発が先行している硫化物系固体電解質に液系 LIB に使われている電極活物質を組み合わせた第 1 世代全固体 LIB が市場に浸透し始めると考えている。そして、2030～35 年頃以降からは、さらにイオン伝導性を高めた硫化物系電解質や化学的安定性の高い酸化物系電解質に、高電位・高容量の電極活物質を組み合わせることで、全固体電池の特長を最大限まで引き出した次世代全固体 LIB が実用化・製品化されて、液系 LIB とともに EV・PHEV の普及拡大に貢献していくと考えている。

(3) 全固体電池の研究開発動向

① 日本

NEDO は全固体電池の研究開発に約 15 年間、取り組んできている。そのスタートポイントは、「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発」(2007～2011 年度)において東京工業大学が実施した「全固体電池のための固体電解質及び三次元メソ構造体電極の研究開発」である。この研究開発により確立されたイオン伝導体の探索指針を適用し、有機溶媒電解液を超える 10^{-2}S/cm 以上のイオン伝導率を有する Li-Ge-P-S (LGPS) 系固体電解質が東京工業大学によって見い出されている。

その後、引き続いた全固体 LIB の研究開発は、「リチウムイオン電池応用・実用化先端技術開発」(事業期間:2012～2016 年度)においてトヨタ自動車と豊田中央研究所が実施した「電極のナノコンポジット化による高性能全固体電池の研究開発」である。この研究開発においても、東京工業大学とトヨタ自動車によって世界最高の Li イオン伝導率 $2.5 \times 10^{-2} \text{S/cm}$ を有する Li-Si-P-S-Cl 系固体電解質が見い出され、コインセルではあったが液系 LIB の 3 倍以上の高出力特性が実証されている。

本事業の第 1 期(2013～2017 年度)においては、全固体 LIB の基軸材料となる固体電解質・電極活物質の特性評価に適用する圧粉成形タイプの標準電池モデル(2mAh 級コインセル)、セル特性の評価に適用するシート成形タイプの標準電池モデル(8mAh 級、50mAh 級、200mAh 級単層ラミネートセル)が開発された。また、全固体 LIB 特有の電気化学特性及び劣化メカニズムの解析評価手法が開発された。

さらに、NEDO は、全固体 LIB を本格量産するために必要な技術開発にも取り組んでいる。2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略の中で定められた「グリーンイノベーション基金事業」では、高性能電池・材料、省資源化、生産技術、リサイクル等を研究対象として、2030 年の本格実用化を目標に、電池パックでのエネルギー密度 700～800 Wh/L 以上等を目標に掲げたテーマを実施している。技術開発対象には全固体 LIB とそれに用いる材料が含まれ、「グリーンイノベーション基金事業」では全固体 LIB と関連材料の研究開発テーマとして表 1.1.3-1 に示すテーマが採択されている。

表 1.1.3-1 グリーンイノベーション基金事業 全固体 LIB と関連材料の研究開発テーマ

機関	研究開発テーマ
本田技研工業株式会社 株式会社本田技術研究所	次世代全固体電池の開発
日産自動車株式会社	ASSB(全固体電池)パイロットラインによる高性能・低 LCA バッテリー生産のプロセス確立
株式会社GSユアサ	先進固体電池開発
住友金属鉱山株式会社	次世代蓄電池用高性能正極材料の開発と実証
株式会社アルバック	次世代蓄電池向けリチウム金属負極生産技術開発
出光興産株式会社	硫化物系固体電解質の量産技術開発
株式会社大阪ソーダ	全固体電池用超高イオン伝導性ポリマーの開発

国立研究法人科学技術振興機構(JST)の「戦略的創造研究推進事業／先端的低炭素化技術開発(ALCA)」の枠組みにおいて 2013 年から開始された「次世代蓄電池研究開発プロジェクト」(以下、「ALCA-SPRING」という。)でも全固体 LIB(全固体リチウム硫黄電池も含む。)の研究開発が行われている。また、文部科学省 科学研究費助成事業「蓄電固体界面科学」においては、電極と固体電解質の界面におけるモデル構築、高度計測や機能開拓等を目指した研究開発を実施している。

なお、本事業は ALCA-SPRING と連携関係を構築しており、ALCA-SPRING で開発される材料を受け入れてセルを試作し、その特性評価を行っている。また、2021 年からは「蓄電固体界面科学」とも連携を進め、ALCA-SPRING と同様の取組を実施している。

次に、個別の国内企業による全固体電池開発の主な取組は以下のとおりである。

トヨタ自動車は、2021年9月に、電池・カーボンニュートラルに関する公開説明会を開催した。全固体電池については2020年代前半に実用化するという目標は変わっていないとしている。全固体電池の特長を生かした高出力という特徴をハイブリッド車に適応させることで、最速で市場に出すことを想定して開発を進めているとする一方で、長期間の使用で劣化する現象にも言及している。この課題の解決に向けては、固体電解質そのものの材料開発を続けるとしている。

日産自動車は、「Nissan Ambition 2030」(2021年11月発表)の中で、2028年度までに自社開発の全固体電池を搭載した電気自動車(EV)を市場投入することを目指し、同電池の量産化に向けたパイロットラインを2024年度までに横浜工場内に設置する予定であることを発表した。その中では、エネルギー密度を2倍にするため、正極と負極の材料に液系とは異なる「全固体電池ならではの材料を選択する」考えであることに言及している。

本田技研工業は、2040年に世界市場で販売する全車両を電気自動車(EV)または燃料電池車(FCV)にする計画の中で、電池戦略としては液系LIBの生産拡大と革新電池の実現の両面で投資していく方針としている。全固体電池は量産に向けて電池セル仕様の策定と生産技術の確立をセットにして研究開発中で、電池セルの形状は、大型のラミネート(パウチ)型を選択したと報道されている。2020年代後半の採用に向けて実証ラインを建設し2024年に立ち上げる予定としている。

GSユアサは、硫化物と組み合わせる最適な材料(窒化物及びハロゲン化物)を効率的に選定することで、高いイオン伝導度と優れた耐水性を兼ね備えた窒素含有硫化物固体電解質の合成に成功したことを公表している。今後は、この耐水性に優れた「窒素含有硫化物固体電解質」をさらに改良し、次世代電池である全固体電池を2020年代に実用化することを目指すとしている。

マクセルは、硫化物系電解質を採用し、パイポーラ構造を適用することで高電圧・高出力を実現したコイン型全固体電池のサンプル出荷を2021年11月から開始すると発表した。このコイン型全固体電池はマイナス60度から125度の温度環境で使用でき、約30分で90%まで充電できる急速充電性能、長寿命、高い安全性を併せ持つとし、将来的には車載への適用も可能としている。

日立造船は、機械加工技術を活用した独自の製造方法による全固体LIBを開発している。2021年2月、JAXAとの全固体リチウムイオン電池の実用化に向けた実証実験に関する共同研究契約を締結したと発表した。2016年からJAXAと共同開発を行ってきた全固体LIBについて、真空状態や厳しい高温・低温環境といった過酷な宇宙環境における全固体電池の稼働確認のため、2021年秋以降に国際宇宙ステーションに向けて打ち上げ、2021年末より約半年間、実証実験が実施される予定としている。

固体電解質の実用化・量産化の動きとして、出光興産が硫化物系固体電解質の商業生産に向けた実証設備を新たに建設し、2021年11月に稼働を開始したと発表している。また、三井金属鉱業は2021年11月に量産試験用設備で製造した全固体電池向けアルジロダイト型硫化物固体電解質のサンプル供給を開始した。住友金属鉱山は次世代の高性能ニッケル正極材や全固体電池用正極材料の開発を目的とした電池研究所の拡張・設備拡充についても2022年7月完成目途で実施すると発表している。

② 米 国

エネルギー省(DOE)のエネルギー効率・再生可能エネルギー局自動車技術室(EERE-VTO)

は、2019 年開始の「Advanced Vehicle Technologies Research (AVTR)」において、プログラム全体の予算総額 5,900 万ドル(3 年間)のうち 1,500 万ドルを全固体電池に割り当てて開発を行った。Maryland 大、Michigan 大などの大学や、Solid Power などのベンチャー、General Motor (米)など 15 の参画機関・開発テーマで固体電解質、製造プロセス、診断ツール、モデリング等の研究開発が実施された。固体電解質としては酸化物系、硫化物系及び高分子系が開発対象になっている。

さらに、2021 年 10 月には電気自動車や先端電池、コネクテッド自動車に焦点を当てた 26 件の新たなプロジェクト(Li-Bridge)に 2 億 900 万ドルを提供すると発表した。アルゴンヌ国立研究所が中心になって国立研究所と産業界を橋渡しするとしている。全固体電池の開発に係るプロジェクトは、17 件であり、表 1.1.3-2 に参画機関と開発テーマについて記す。

表 1.1.3-2 Li-Bridge の参画国立研究所と開発テーマ

参画機関	開発テーマ
LBNL	材料設計と統合化により長寿命と高エネルギー密度を実現する固体電池
NREL	低拘束圧全固体電池
LLNL	3D プリンティングによる全固体リチウム電池
LLNL	3D 固体リチウム電池設計のためのマルチスケール統合モデル
PNNL	高エネルギー全固体リチウム硫黄電池のための安定な固体電解質及び界面の開発
ORNL	置換型アルジロダイト固体電解質と全固体電池用大容量コンバージョン型正極の開発
ANL	硫化物系固体電池用多機能傾斜コーティング開発
ANL	全固体リチウム金属電池用の(極薄)硫化物電解質に対応した(厚膜)硫化セレン正極
SLAC	(導電性や電気化学的安定性の高い)チオホウ酸リチウム固体電解質の開発
ANL	界面設計を統合した複合電解質の合成
ORNL	安定な低インピーダンス固体電解質界面のための高分子電解質
BNL	リチウム金属固体電解質用無機・ポリマー複合電解質の設計
LBNL	固体電池用イオン伝導性高 Li ⁺ 輸率ポリマー複合体の開発
ORNL	固体電池用 Li 表面の精密制御
ORNL	ハロゲン化リチウム系超イオン固体電解質と高電圧正極界面
LBNL	リチウム金属電池用ポリエステル系ブロック共重合体電解質
ANL	逆ペロブスカイト型固体電解質膜を用いた全固体電池の開発

LBNL : Lawrence Berkeley National Laboratory、NREL : National Renewable Energy Laboratory、
 LLNL : Lawrence Livermore National Laboratory、PNNL : Pacific Northwest National Laboratory、
 ORNL : Oak Ridge National Laboratory、ANL : Argonne National Laboratory、
 SLAC : SLAC National Accelerator Laboratory (Stanford Linear Accelerator Center)、
 BNL : Brookhaven National Laboratory

DOE のエネルギー先端研究計画局(ARPA-E)が 2013~2017 年に実施した「RANGE」においては、開発予算総額 4,000 万ドル(5 年間)で 20 を超える企業、国立研究所、大学等が参画したが、そのうち、Solid Power、Battery、Oak Ridge 国立研究所、Maryland 大学が全固体電池の研究開発に取り組んだ。Maryland 大学の酸化物系電解質を用いた全固体電池の研究開発は 2022 年まで延長され継続中である。

ARPA-E が 2016 年に開始した「IONICS」では、予算総額 3,700 万ドル(5 年間)で大学・国立

研究所・企業等の 16 テーマが採択された中で 9 テーマが全固体電池関連であった。Pennsylvania 州立大、Oak Ridge 国立研究所などが参画し酸化物系固体電解質と Li 金属の適用に関するテーマが中心になっている。UC San Diego の一括形成正極、自己修復型電解質のテーマは 2023 年まで、PolyPlus の固体電解質保護 Li 金属負極のテーマは 2022 年まで延長されている。車載バッテリーの目標コストは、セルで 100 ドル/kWh 以下、電池パックで 175 ドル/kWh 以下となっている。

さらに ARPA-E は、2022 年 5 月に総額約 4,500 万ドル(3 年間)で Electric Vehicles for American Low-Carbon Living (EVs4ALL) プログラムを立ち上げた。今後、実施者を募集・選考し、2023 年 3 月頃から研究開発が開始される見通しである。研究開発内容には、高容量や高出力の蓄電池開発が含まれており、電解質は液体、全固体、ポリマー又はこれらのハイブリッドも含めて募集対象範囲としている。高容量電池では 400Wh/kg 及び 900Wh/L 以上、高出力電池では 200Wh/kg、500Wh/L 以上のエネルギー密度等が目標に掲げられている。

これら DOE のプロジェクトとは別に 2021 年 7 月に公表された「NATIONAL BLUEPRINT FOR LITHIUM BATTERIES」では次世代電池の一つとして全固体電池が挙げられ、2030 年にコバルトとニッケルを使用せずに重量エネルギー密度として 500Wh/kg を目指すとしている。

次に、個別の米国企業による全固体電池開発の主な取組は以下のとおりである。

全固体電池を開発する米スタートアップ企業、Solid Power は Ford Motor(米)、BMW(独)等から投資を受け、2022 年 6 月には EV 向け全固体電池セルのパイロット生産ライン設置を完了したと発表している。

Volkswagen(独)から投資を受けている QuantumScape は、2022 年 1 月、同社が開発した全固体電池について、急速充電(4C)サイクル(SOC10%-80%)を 400 回連続して行い、初期のエネルギーの 80%以上を保持したと発表している。また、同社は、全固体電池の車載用セルのパイロットライン施設の建設場所を 2021 年中に選定し、2024~2025 年の電池生産を目指している。

マサチューセッツ州に拠点を置く Factorial Energy は、2021 年 11 月に発表した Mercedes-Benz(独)、ステランティス、現代自動車との共同開発契約により、固体電池の実用化を目指すとし、2022 年前半にはパイロット生産施設の建設を開始するとしている。

③ EU

EU の官民パートナーシップ「欧州グリーンビークル・イニシアティブ」(EGVI)は、様々な車載バッテリーの研究開発プロジェクトを数多く推進している。2017 年開始のプロジェクト「IMAGE」では、BMW(独)、VARTA(独)、Umicore(ベルギー)、Arkema(仏)、Hydro-Québec(加)等の 13 企業・大学・研究機関が参画し、4 年間の総予算 490 万ユーロで Li 金属負極とゲルポリマー電解質を組み合わせた固体電池でエネルギー密度 300Wh/kg 以上を目指している。

原材料から部品・製品、リサイクルまでバッテリーのバリューチェーンに関わる研究開発プロジェクト「欧州バッテリーイノベーション(European Battery Innovation)」について、欧州委員会は 2021 年 1 月に最大で総額 29 億ユーロの補助を承認した。オーストリア、ベルギー、クロアチア、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、イタリア、ポーランド、スロバキア、スペイン、スウェーデンの計 12 カ国が参加。全固体電池については、BMW グループが全固体電池の技術検証も実施するとしている。

また、欧州研究開発フレームワーク「Horizon 2020」においても、全固体電池の研究開発プロジェクトが推進されている。2015~2017 年に実施されたプロジェクト「HS-GLASSion」では、独立系

ナノエレクトロニクス研究機関 Imec(ベルギー)が無機ガラス系電解質を用いた薄膜タイプの全固体電池を研究した。また、2020年開始のプロジェクト「ASTRABAT」では、フランス原子力・代替エネルギー庁(仏)、PSA(仏)、Umicore(ベルギー)、Leclanche GMBH(独)等の14企業・大学・研究機関が参画し、4年間の総予算780万ユーロで酸化物と高分子の複合電解質を用いた量産可能な全固体電池の開発に取り組んだ。2021年に発行された報告書では開発されるセルの外部形状、試験仕様プロトコル、電気自動車(EV)用途のバッテリー要件の分析について報告されている。試作品(50Ah)のセル形状はA4サイズのパウチセルになっている。「Horizon2020」における車載バッテリー用途の全固体電池の開発目標を表1.1.3-3に示す。

表 1.1.3-3 「Horizon2020」における全固体電池の開発目標

	2020～2022年	2025～2030年
重量エネルギー密度	350 Wh/kg	400 Wh/kg
体積エネルギー密度	1,000 Wh/L	1,200 Wh/L
重量出力密度	—	10,000 W/kg
コスト	—	100 ユーロ/kWh

④ ドイツ

ドイツ連邦教育研究省(BMBF)は全固体電池の基盤技術を確立するため、2018年に研究クラスター「FestBatt」を立ち上げた。総予算(3年間)は1,600万ユーロであり、Justus-Liebig 大学、Karlsruhe 工科大学、Jülich 研究所、(FZJ)、ドイツ航空宇宙センター(DLR)、Helmholtz Ulm 研究所、Max Planck 研究所、Duisburg 大学、Marburg 大学、Darmstadt 工科大学等、14の大学・研究機関が参画している。重点研究テーマは、表1.1.3-4に示すように、3つの電解質材料系(硫化物、酸化物、ポリマー)の開発と2つのプロセスプラットフォーム(分析評価、理論・データプロセッシング)で構成されている。

表 1.1.3-4 FestBatt の主な研究開発テーマ

電解質	硫化物	・L-M-S等の合成
	酸化物	・LLZ及びLATPの合成表面改質
	ポリマー	・高分子電解質(ポリロタキサン、ポリスルホンアミド)合成 ・ポリエチレンオキサイドを用いたゲルポリマー電解質合成
プロセス	分析評価	・微細構造の特性評価 ・イオン伝導度及び電気化学インピーダンス測定方法の確立
	理論・データプロセッシング	・原子スケール及びマイクロスケールでのモデリング ・データ管理

また、BMBFは、全固体電池の量産化技術の開発を行うプロジェクトとして「ARTEMYS」を2017年に立ち上げた。開発予算は3年間で600万ユーロの予算となっている。Braunschweig 工科大、BMW、BASF、Thyssen Krupp System Engineering、Rehm等の企業・大学が参加している。酸化物系全固体電池については、量産に適用する電解質の合成技術や正極層と固体電解質層を一体化させて塗工・乾燥・焼成する技術等を検討している。硫化物系全固体電池についてはテープキャスト法で成形する正極層及び電解質層にLi金属負極を組み合わせる1Ah級の積

層セルを開発するとしている。

さらに 2021 年、BMBF の「Battery 2020 Transfer」プロジェクトによる資金提供の下、ALANO (Alternative Anode Concepts for Safe Solid State Batteries) プロジェクトが開始された。本プロジェクトは、リチウム金属負極を中核とした研究開発に注力し、BMW、Helmholtz Ulm 研究所、Fraunhofer 研究所、Münster 大学の MEET バッテリー研究センター等がメンバーとして参加している。

次に、個別のドイツ企業による全固体電池開発の主な取組は以下のとおりである。

Mercedes-Benz はカナダの電力公社 Hydro-Quebec と全固体電池分野で技術提携しており、開発加速のため新材料を実用に近い状態でテストする計画があることが 2020 年 2 月に報道されている。また、同社は 2022 年 1 月、台湾の輝能科技 (ProLogium Technology) と電動車の次世代全固体電池を共同開発することで合意したと発表した。

BMW は 2025 年までに全固体電池を搭載した車両の路上試験を始め、30 年までに発売する計画である。BMW はフォード・モーター同様、Solid Power に出資、それぞれ同社と電池の共同開発を行っている。

⑤ 英国

ビジネス・エネルギー・産業戦略省 (BEIS) が 2017 年に開始したプログラム「Faraday Battery Challenge」において、種々の蓄電池の基礎研究及び応用・実用化開発が行われている。予算総額は 246 百万ポンドであり、基礎研究には 78 百万ポンドの予算が割り充てられており、多くの企業・大学等が参加している。この中には全固体電池を対象とする SOLBAT プロジェクトが含まれており、Oxford 大、Warwick 大学 WMG (Warwick Manufacturing Group) などが参画している。

また、医療用インプラント機器向けに半導体プロセスで作製する全固体電池の開発を手掛けてきたベンチャー企業 Ilika Technologies は、2018 年より上記のプログラムに参加し、約 500 万ポンドの資金提供を受けて、EV 用に大型化した全固体電池 Goliath の開発を進めている。

⑥ 中国

第 13 次 5 ヶ年計画 (2016～2020 年) の一環として中国科学技術部が中心となり取り組んだ「国家重点基礎研究計画／新エネルギー車試行特別プロジェクト」では、中国科学院 (CAS) とその傘下の研究所群が中心となり、車載用バッテリーに適用する液系 LIB、全固体 LIB 及び次世代電池 (リチウム硫黄電池、リチウム空気電池等) に関する研究開発が実施された。この流れは第 14 次 5 ヶ年計画 (2021 年～2025 年) でも引き継がれ、2020 年 10 月に中国自動車工学学会が発表した「省エネルギー・新エネルギー自動車技術ロードマップ 2.0」では新体系電池として全固体 LIB が挙げられており第 14 次 5 ヶ年計画に反映されている。

次に、個別の中国企業による全固体電池開発の主な取組は以下のとおりである。

BYD はポスト液系 LIB の有力候補と位置づけ、硫化物系・高分子系電解質を用いた全固体 LIB の開発に取り組み、10 年後を目途に全固体電池の量産化する計画であることを発表している。

CATL は硫化物系電解質を用いた全固体 LIB で液系 LIB と同様のウェットコーティング法を適用したパイロットプラントの立ち上げに着手済みで、試作品は完成済みとしているが実用化は 2030 年以降になるとの見通しを発表している。2021 年に公開された「全固体電池電解質の製造方法」と、「硫化物固体電解質の製造方法」の特許では液相合成の工程が示されている。

蔚来汽車(NIO)は2021年1月、150kWhの全固体電池パックについて、航続距離は1,000km超、エネルギー密度は360Wh/kgになると発表した。負極にはシリコン・カーボン複合負極材を採用し、正極にはニッケル正極材とナノレベルのコーティング技術を採用したとしている。2022年3月発売のeT7では上記全固体電池のパックが搭載オプションに含まれている。

⑦ 韓国

韓国では、産業通商資源部や教育科学技術部等の公的資金による全固体電池の研究開発が推進されている。2021年7月に発表されたK-バッテリー発展戦略では、次世代二次電池の早期商用化に向けて高性能化、安全性の向上を目指すとしている。その中で全固体電池を2027年までに商用化し、電極素材、固体電解質など必要な要素技術の開発のため、次世代バッテリーパークを設置し、集中的に支援するとしている。個別の韓国企業による全固体電池開発の主な取組は次のとおりである。

Samsung SDI及び日本サムスン研究所は、硫化物系電解質を用いた全固体LIBの開発に取り組んでいる。2020年3月には、アルジロダイト系の硫化物系固体電解質、Ni配合率90%のNCM正極活物質(Zr被覆有り)、Ag-C複合体負極活物質を組み合わせた0.6Ah級セルで、体積エネルギー密度900Wh/Lを実証するとともに、0.5Cレートでの充放電サイクル試験で1,000サイクル後の容量維持率が89%であったことを発表した。また、同社は2022年3月に京畿道の水原市に位置するSDI研究所内に全固体電池のパイロットラインを着工したと発表した。

現代自動車は、全固体電池について自社主導で先行開発し、同電池搭載車の量産を2027年に開始予定であるとしている。同社と傘下の起亜は2021年10月、全固体電池開発を手掛ける米スタートアップ企業Factorial Energyと電気自動車(EV)向け全固体電池の共同開発契約を交わし、戦略的投資を行うと発表した。

POSCO Holdingsと固体電解質技術を保有するJeong Kwanとの合弁会社POSCO JK Solid Solutionが年産24トンの固体電解質工場を着工したと2022年2月に発表するなど、材料に関する動きも見られる。

(4) 全固体電池の論文発表動向

2001年～2021年の過去21年間における全固体電池の論文発表件数の推移を図1.1.3-6に、論文の著者所属機関国籍別の発表件数の割合を図1.1.3-7に示す。

全固体電池の論文発表件数は2010年頃から増加傾向が大きくなり、2016年頃からは一段と加速して年率30%程度の増加となっており、これは液系LIBの論文件数の増加率より高い。ここ数年では中国からの発表が圧倒的に多く、米国、欧州が250件/年程度で並び日本、韓国がその半分程度となっている。累積の論文発表件数で見ると、液系LIBの場合と比較して日本の割合が高くなっているが、中国が最多で米国、欧州がこれに続く状況は全固体LIBにおいても同様である。

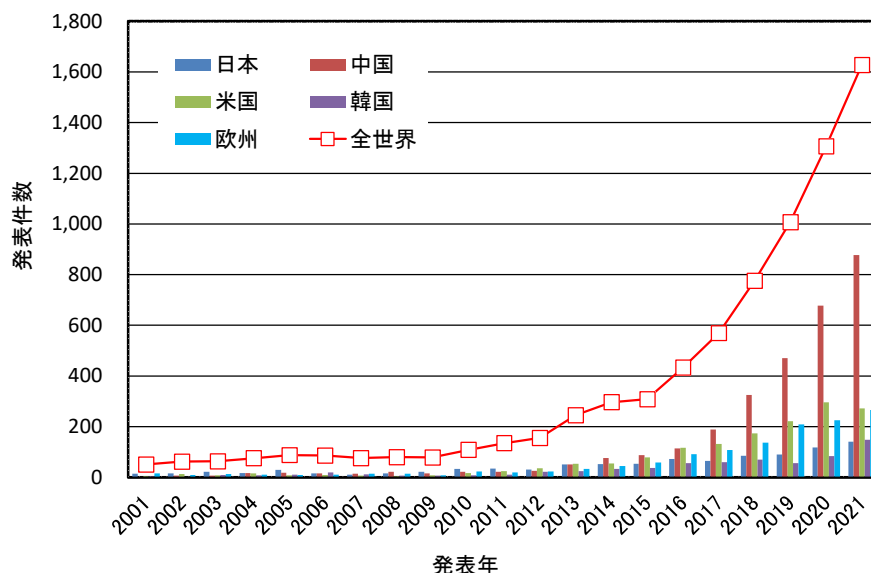


図 1.1.3-6 全固体電池の論文発表件数の推移

出典: Web of Science に基づき NEDO 作成

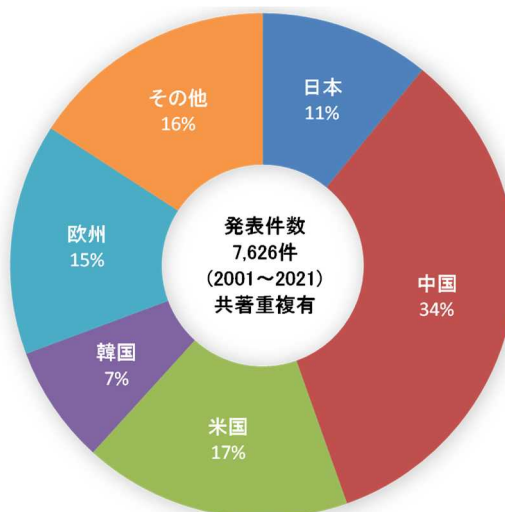


図 1.1.3-7 全固体電池の論文著者所属機関国籍別の累積発表件数の割合

出典: Web of Science に基づき NEDO 作成

(5) 全固体電池の特許動向

2001 年～2019 年の過去 19 年間における全固体電池の特許出願件数の推移を図 1.1.3-8 に示す。2000 年代前半は 200 件／年以下であったが、2006 年より増加に転じ 2016 年から増加が顕著になり、2017 年以降、約 1,000 件／年以上となって増加が続いている。2016 年より中国の出願件数が日本を上回るようになってきているが、液 LIB の場合と異なり日本からの出願も増加傾向を維持している。19 年間の累積の特許出願件数では図 1.1.3-9 に示すように日本が他国をリードしている。近いうちに中国に追い抜かれる可能性が高いが、競争が続いている状況である。

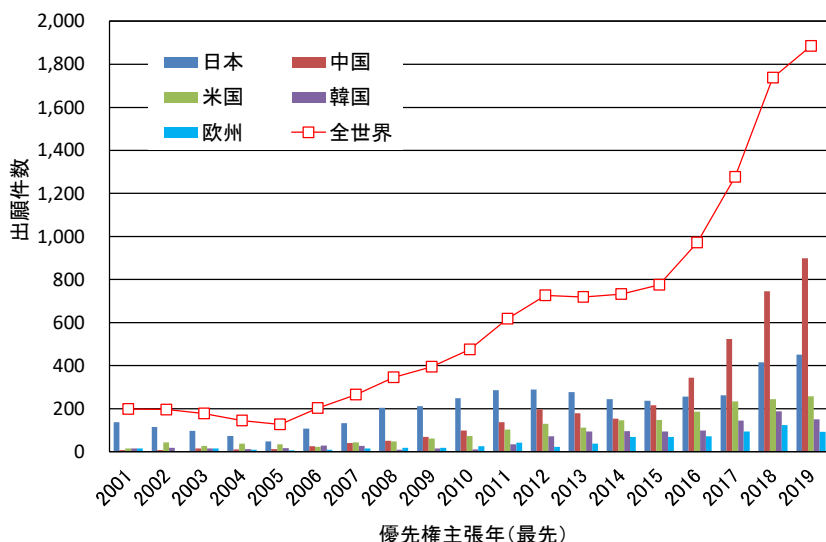


図 1.1.3-8 全固体電池の特許出願件数の推移

出典: Derwent World Patents Index に基づき NEDO 作成

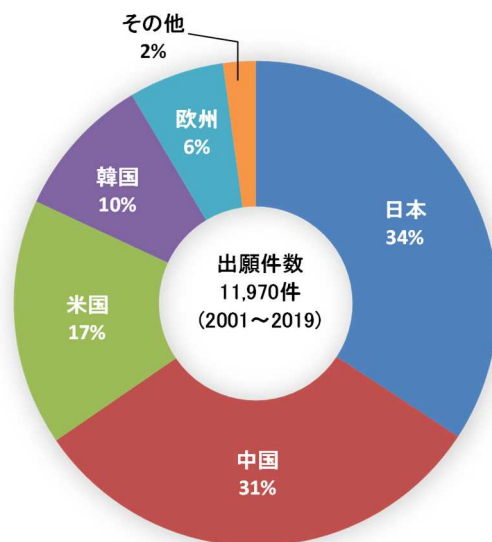


図 1.1.3-9 全固体電池の出願人国籍別の累積出願件数の割合

出典: Derwent World Patents Index に基づき NEDO 作成

国別の出願件数では単年度で中国が最多となり日本、米国がこれに続いている状況で、累積件数でも中国は日本に追いつきつつある。一方、出願人別については、第 1 位がトヨタ自動車であり、その後、2 位に LG Group、3 位に Samsung Group と韓国勢が続く。以降は、4 位パナソニックグループ、5 位出光興産、6 位住友電工、7 位現代自動車(韓国)、8 位富士フイルム、9 位村田製作所、10 位日本ガイシの順番で日本勢が多数を占める状況となっている。

出願特許で取り上げている材料に着目した出願件数を図 1.1.3-10 に示す。全固体電池の中核材料である固体電解質、容量向上の鍵となる活物質など中心材料についての出願が多い。日本が硫化物系の出願が多いなど多少の傾向差は見られるが、各国の取り組みに大きな差は見られない。一方、集電体、外装、パック等に関する出願はまだ少ない状況にある。これらの発明はサイエンス面での価値は低いのかもしれないが、蓄電池の実用化(量産)・製品化には必須の技術アイテムであり、

侵害発見も比較的容易な部材であることから知財的価値も認められ、今後の検討の余地はあるものと思われる。

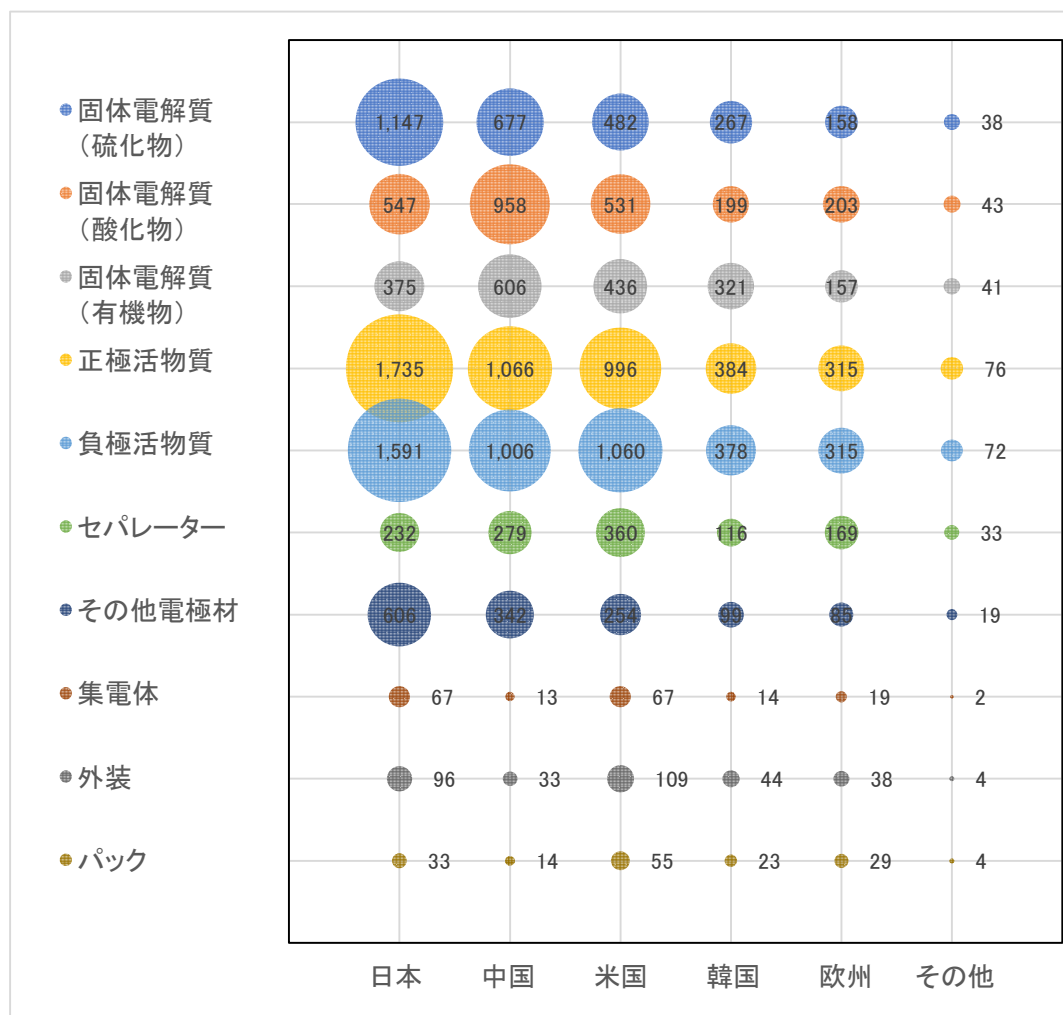


図 1.1.3-10 全固体電池の課題別の特許出願件数

出典: Derwent World Patents Index に基づき NEDO 作成

全固体電池の特徴である固体電解質について材料系ごとの特許出願件数の推移を見ると、いずれの系においても出願件数が伸びており、材料間の選別には至らない状況で開発が加速している(図 1.1.3-11)。日本は図 1.1.3-10 で見たように硫化物系固体電解質の累積出願件数が酸化物系、有機物系の 2 倍以上あり、他国に対してもリードしている状況である。一方で、硫化物系固体電解質でも図 1.1.3-12 に見るように 2016 年以降、中国の出願件数が急速に伸びている。日本も 2018 年から増加に転じており、今後開発競争が加速するものと思われる。

全固体電池で基軸の材料となるのは固体電解質である。NEDO は本事業の実施によって卓越した特性を発揮する固体電解質が日本で創出・実用化される環境を構築したいと考えている。

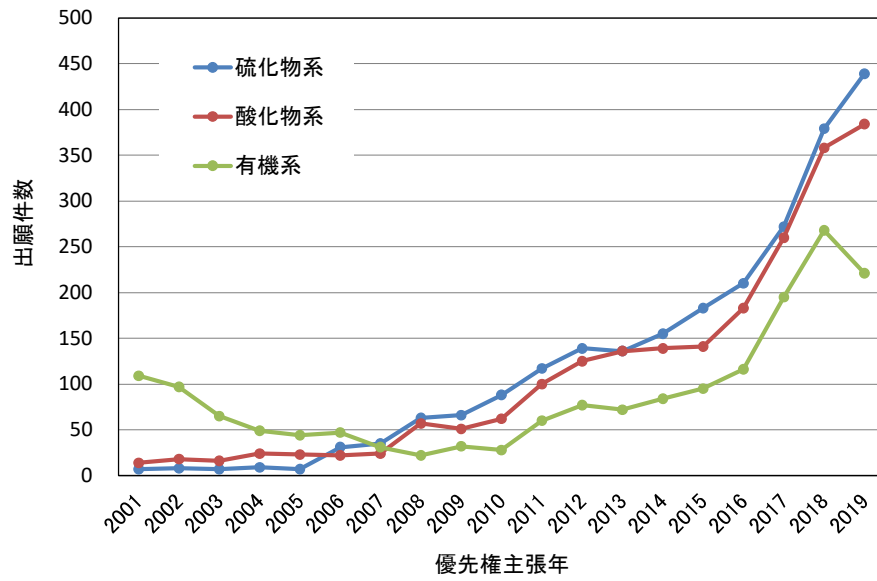


図 1.1.3-11 固体電解質の特許出願件数の推移

出典: Derwent World Patents Index に基づき NEDO 作成

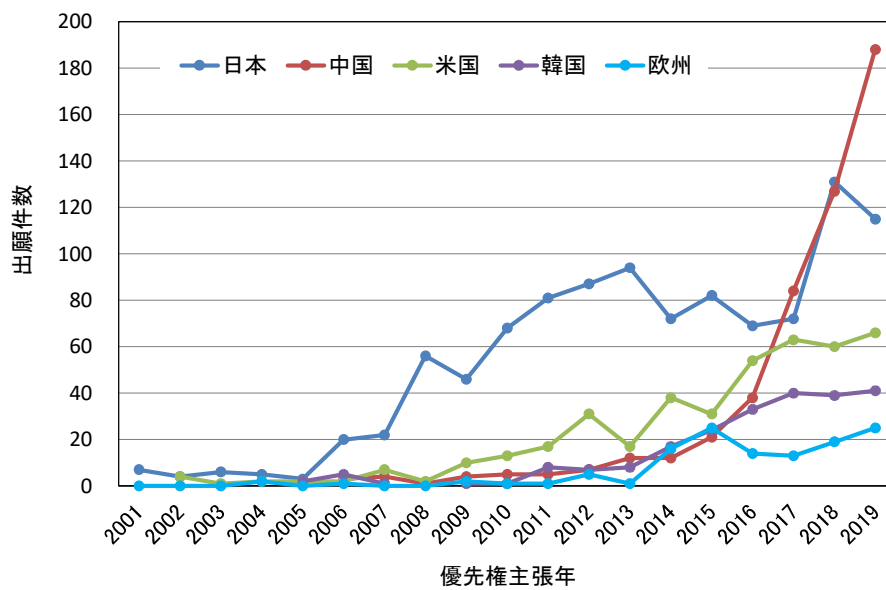


図 1.1.3-12 硫化物系全固体電池の特許出願件数の推移

出典: Derwent World Patents Index に基づき NEDO 作成

1.1.4 上位施策・制度への寄与

(1) 関連する上位施策

蓄電池に関しては、これまで我が国の様々な政策において研究開発の必要性・重要性が謳われてきている。このうち、本事業が密接に関連し、その目標達成に寄与する上位施策を以下に示す。

① 未来投資戦略 2018(2018 年 6 月、閣議決定)

世界に先駆けた「超スマート社会」(Society 5.0)の実現を目指し、運輸部門の省エネルギー化を推進するため、EV・PHEV 等の電動車の普及、新たな燃費基準等の自動車単体対策、より高効率な車載用蓄電池の開発・実用化を進めるとしている。特に、車載用蓄電池については、現在の液系 LIB よりも安全面等で性能が高い全固体電池や革新型蓄電池の研究開発を加速し、全固体電池は 2025 年、革新型蓄電池は 2030 年の実用化を目指すとしている。

② パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略(2021 年 10 月閣議決定)

2019 年 6 月に閣議決定された後、2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、「2050 年カーボンニュートラル」を目指すことが 2020 年 10 月に宣言された。

2035 年までに、乗用車新車販売で電動車 100%を実現できるよう包括的な措置を講じ、この 10 年間は EV の導入を強力に進め、電池をはじめ、世界をリードする産業サプライチェーンとモビリティ社会を構築するとしている。

また、蓄電池は、自動車の電動化や再生可能エネルギーの普及に必要となる調整力のカーボンフリー化等のグリーン化や、デジタル化の進展の要となる「新たなエネルギー基盤」と位置づけられ、研究開発・実証・設備投資支援や制度的枠組みの検討、標準化に向けた国際連携といった政策により、蓄電池の産業競争力強化を図るとしている。

③ 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(2020 年 12 月経済産業省策定)

遅くとも 2030 年代半ばまでに、乗用車新車販売で電動車 100%を実現できるよう包括的な措置を講じ、特に軽自動車や商用車等の、EV や燃料電池自動車への転換について特段の対策を講じていくとしている。また、2030 年までのできるだけ早期に、EV とガソリン車の経済性が同等となる車載用の電池パック価格 1 万円/kWh 以下を目指す。また、2030 年以降、更なる蓄電池性能の向上が期待される全固体 LIB の本格実用化を目指すとしている。

④ 第 6 次エネルギー基本計画(2021 年 10 月閣議決定)

運輸部門の CO₂ 排出量の 86%を占める自動車のカーボンニュートラル化に向け、燃料・エネルギーのカーボンニュートラル化の取組を通じて多様な選択肢を追求し、2050 年に自動車の生産、利用、廃棄を通じた CO₂ ゼロを目指す。特に、乗用車については、2035 年までに新車販売で電動車 100%を実現できるよう、電動車・インフラの導入拡大、電池等の電動車関連技術の強化等の包括的な措置を講じる。また、国内の自動車製造の安定的な基盤を確保するため、2030 年までのできるだけ早期に、国内の車載用蓄電池の製造能力を 100GWh まで高めるとともに、蓄電池サプライチェーンの強化に向け、蓄電池材料を含めた大規模投資を促すとしている。

⑤ 蓄電池産業戦略 中間とりまとめ(2022 年 4 月経済産業省公表)

蓄電池に対する産業戦略として、上流資源の確保を含めた液系 LIB の国内製造基盤を確立するとともに、国内で確立した技術をベースに国内企業が競争力を維持・強化できるよう、海外展開を戦略的に展開し、グローバルプレゼンスを確保していくこと、全固体電池など次世代電池を世界に

先駆けて実用化するために技術開発を加速し次世代電池市場を着実に獲得することが掲げられている。次世代電池については、研究開発能力目標として固体電池など次世代電池を世界に先駆けて実用化し製造技術の優位性・不可欠性を確保するため、産官学の研究開発力を結集し、2030年頃に全固体電池の本格実用化、2030年以降も我が国が技術リーダーの地位を維持・確保することを目標とするとしている。

(2) 未来開拓研究プロジェクトについて

2012年8月、経済産業省は、我が国の将来の糧となるイノベーションを創出する、従来技術の延長線上にない、開発リスクの高い革新的技術に関する中長期的な研究開発プロジェクトであって、国のイニシアティブの下、優れた技術及び知見を有する国内外の企業、大学、公的研究機関等を集め、継続的に実施されるべきものを対象とした「未来開拓研究プロジェクト実施要綱」及び「未来開拓研究プロジェクト実施に関する基本方針」を策定した。

本事業(第1期及び第2期)は、この実施要綱及び「未来開拓研究プロジェクトの実施に関する基本方針の一部を改正する方針」(2013年8月、経済産業省)に基づき実施してきている。

未来開拓研究プロジェクトでは省庁の枠を越えた連携に取り組むことになっており、本事業の連携先として、前記した JST 所管事業「ALCA-SPRING」に加えて、文部科学省所管事業「元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>」及び NEDO 所管事業「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発」が選定されている。

1.2 NEDO の事業としての妥当性

1.2.1 NEDO の関与の必要性

本事業が取り組む全固体 LIB の共通基盤技術の開発については、下記(1)～(6)に示す理由から、NEDO 事業として取り組むこと、あるいは NEDO の関与が必要である。

(1) 産業界全体の競争力強化(公共性・汎用性)

「1.1.2 市場動向」で述べたように、今後、飛躍的な市場拡大が予想される車載バッテリー用途の液系 LIB とその構成材料の市場は、大胆な生産設備投資により価格競争力を獲得した中国・韓国勢にインバードされつつある。また、「1.1.3 技術動向」で述べたように、国内蓄電池・材料メーカーは液系 LIB で高い技術力を保有するものの、他国企業も技術的知見を蓄積しており、今後、差別化された製品を生み出し難い状況となっている。そのため、国内自動車・蓄電池・材料メーカーにとって、全固体 LIB は「虎の子」、「ゲームチェンジ」の技術であると言え、世界全体で研究開発が活発化している中、実用化で世界の先手を取るとともに、その後の技術進化でも世界をリードしていく必要がある。

この実現に向けては、全固体 LIB の高性能化・低コスト化において中心的な役割を果たす電解質や電極活物質等の新材料を迅速かつ効率的に実用化へと導く必要がある。そのため、本事業では、国内自動車・蓄電池・材料メーカー 25 社及び大学・研究機関 12 法人の幅広い協調・連携により、適切かつ公平な評価を可能とする材料評価技術の開発に取り組んでいる。また、この開発成果は、将来的には本事業に参加していない国内企業・大学等が開発した材料・部品やその加工プロセス等の評価にも活用し、実用化を後押ししていく予定である。

(2) 学術成果の産業技術への引き上げ

蓄電池及び蓄電池材料については、国内の大学・研究機関において学術的な基礎研究が連綿として取り組まれており、また、その研究レベルも世界トップレベルにある。特に全固体 LIB については、優れた固体電解質や電解質-電極活物質界面の抵抗低減技術等が国内の大学・研究機関で見出され、世界的にも高い評価を得ている。こうした学術成果を産業技術に引き上げていく観点からも本事業における産学連携の取組が必要である。

具体的には、本事業(第2期)の開始時に、JST 事業の ALCA-SPRING で硫化物系全固体電池の研究開発を行っていた大学・研究機関を多数、受け入れている。また、現在も ALCA-SPRING の全固体電池チーム(硫化物型サブチーム)及び正極不溶型リチウム硫黄電池チームと情報交換を行いながら、開発された新材料・技術のサンプルの提供を受けて、電池試作・評価を行うとともに、評価結果のフィードバックを行う取組を推進している。

(3) 開発リスク・ハードルの高さ

全固体 LIB で期待される性能を発揮させるためには、活物質-電解質界面に生じる抵抗層の解消、電解質層の薄膜化・緻密化、合材電極内での活物質・電解質粒子の凝集防止、これら粒子間での空隙発生防止等に対応する必要がある。液系 LIB に比べると技術的なハードルが高い。高い信頼性・耐久性が求められる車載用バッテリーとしての実用化になると、ハードルは一層高くなる。また、全固体 LIB は研究開発段階にあり、ベンチマークとなる製品が存在しない中、適切かつ公平な評価を可能とする材料評価技術を開発することはリスクが高く、企業単独の活動のみでは困難である。

(4) 関係者間の利害調整

共通基盤技術の開発に際しては、企業を競争させるのではなく、競合関係あるいは売り手と買い

手の関係にある複数の企業を連携・協調させる必要がある。特に、技術情報の開示／非開示の範囲に関して、説得性・納得性のあるルールをプロジェクト内で作る必要がある。この場合、関係者の利害得失を調整し、関係者のメリットを最大化させる必要があり、中立的な立場でマネジメントを行う NEDO の関与が必要である。

また、本事業には数多くの大学・公的研究機関が参加している。アカデミアにおける教育研究は知識の普及と伝承・共有化を行う活動であり、秘密保持を行わない公開性が基本であるのに対して、本事業のような産学連携は知識の財産化と企業活用が目的であり、守秘性が基本となる。この相反を理解した上で、アカデミア、産業界双方のモチベーションを維持する妥協点を探索するマネジメントを行う必要があり、NEDO の関与が求められる。

(5) 過去の蓄電池材料評価技術開発事業におけるマネジメント経験の活用

NEDO は、蓄電池材料評価技術の開発に 10 年間以上、取り組んできている。

その第一歩として実施した「次世代蓄電池材料評価技術開発」(2010～2014 年度)では、既に実用化されている液系 LIB 用材料(コバルト酸リチウム正極活物質、三元系正極活物質、黒鉛系負極活物質等)の高性能化をねらい、1Ah 級及び 5Ah 級の標準電池モデル(捲回積層セル)とこれらを用いた特性評価法を開発した。そして、材料メーカーより 400 以上の新材料サンプルを受け入れて特性評価を行った。

また、本事業の第 1 期(2013～2017 年度)では、将来の実用化が想定される先進的な液系 LIB (4.5V 超級スピネル系正極活物質、固溶体系正極活物質、SiO 系負極活物質、難燃性電解液等を使用)及び全固体 LIB の材料評価技術を開発した。先進的な液系 LIB については、1Ah 級の標準電池モデル(捲回積層セル)とこれを用いた特性評価法を開発し、材料メーカーより 400 以上の新材料サンプルを受け入れて特性評価を行った。また、全固体 LIB については、硫化物系電解質、三元系正極活物質、黒鉛系負極活物質を組み合わせ、2mAh 級の圧粉体成形セル、8mAh 級、50mAh 級及び 200mAh 級シート成形セルの合計 4 タイプの標準電池モデル(単層セル)とこれらを用いた特性評価法を開発し、材料メーカー及び大学等から約 30 の新材料サンプルを受け入れて特性評価を行った。

これらの事業で蓄積されたマネジメントの知見・ノウハウが本事業にも活用できる。

(6) 国内の蓄電池開発事業間の連携促進

前記したように、「未来開拓研究プロジェクト」として位置付けられた本事業は、他の JST 事業、文科省事業及び NEDO 事業と省庁の枠を越えた連携に取り組むことになっている。これら事業間の連携を効果的・効率的に行うため、各事業に関係している有識者から構成される「文部科学省・経済産業省ガバニングボード(蓄電池)」(戦略コーディネーター:国立研究開発法人 科学技術振興機構 理事長 橋本和仁)が設置されている。NEDO 蓄電技術開発室長(本事業のプロジェクトマネージャー)はこのガバニングボードの構成員であり、図 1.2.1-1 に示すように、他事業との連携関係を構築し、シナジー効果の獲得に取り組んでおり、この点においても NEDO の関与は適切である。

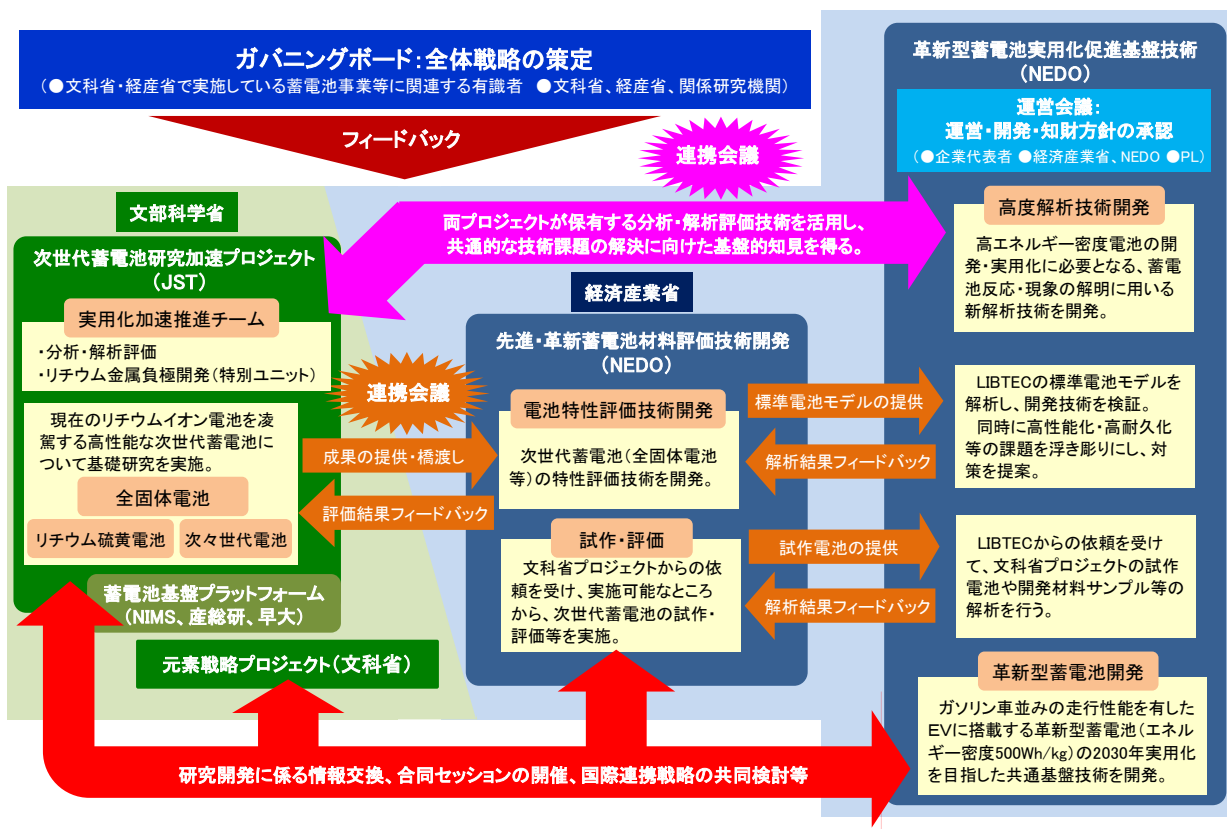


図 1.2.1-1 他の蓄電池開発事業との連携

1.2.2 実施の効果

(1) 蓄電池産業の競争力強化

本事業の成果(全固体 LIB の材料評価技術を中心とした共通基盤技術)が国内産業界に普及・定着することによる効果、及び本事業を実施すること自体の効果として、下記の①～④が挙げられる。

① 新材料の開発効率向上及び開発期間の短縮

材料メーカーによる新材料・部品の提案(サンプル供試)の段階より、全固体 LIB の完成形(フルセル)として得られる各種特性データに基づいて、材料メーカーとユーザー(自動車・蓄電池メーカー)でハイレベルの議論が行うことができる。引き続いて、フィージビリティスタディや共同開発のフェーズに移行した場合も、技術の摺り合わせが円滑に進展し、実用化に至るまでの開発期間が短縮される。

② 材料メーカーによる自社開発品の正確なポテンシャル把握

ユーザーへの新材料提案の前段階において、材料メーカー自身で開発品のポテンシャル把握が可能になる。また、他の構成材料・部品との相互影響やセル製造プロセスへの適合性等も明らかになる。そのため、材料メーカーとしての開発の方向性や戦略等が明確になり、ビジネスの選択と集中の判断に繋げることができる。

③ LIBTEC による材料評価のワンストップサービスの提供

本事業における共通基盤技術の開発のために LIBTEC に導入した各種製造設備、試験評価設備、分析装置等は、個別の企業が実際に開発した材料・部品等の評価に利活用可能である。そのため、企業が自己資金で設備投資を行わなくても、開発品のサンプルを LIBTEC に持ち込むことにより、特性評価のワンストップサービスを受けることが可能となる。

④ 我が国蓄電池関連産業の技術力の底上げ

大手自動車・蓄電池メーカー出身の研究マネージャーで構成されるLIBTEC、その組合員企業である大手自動車・蓄電池・材料メーカー25社、高い技術力を有する大学・研究機関12法人による幅広い企業間連携・産学連携で本事業の開発に取り組むことにより、全固体LIBに関する様々な技術シーズ・ニーズ及び知見が蓄積され、共有される。その結果として、我が国蓄電池関連産業全体での全固体LIBの技術力の向上に繋がる。

(2) アウトカム

国内産業界による全固体LIBの手の内化によって、全固体LIBを搭載したEV・PHEVの実用化・普及が進むことで、以下に示す経済効果とCO₂削減効果が得られる。

① 経済効果

本事業に参加しているトヨタ自動車、日産自動車、本田技研工業の電動車の2035年までのセールスマックスにつき、民間の市場予測事例の一つを図1.2.2-1に示す。予測における2035年のEV・PHEVの世界生産台数(3社合計)は、EVが約560万台、PHEVが約190万台と予測されている(注1)。このEV・PHEVの世界生産台数が、上記予測による2030～2035年の年率と同じ年率で2040年まで増加すると仮定した場合、2040年でEVが約940万台、PHEVが約290万台と試算される。

これらEV・PHEVへの全固体LIBの搭載が2028年に開始され、液系LIBを含む総台数に対する割合が、2035年に8%(約56万台)、2040年に15%～35%(約180万台～約430万台)と仮定し(注2)、また、電池パックの容量をEVが60kWh、PHEVが15kWh、コストをEV・PHEV共通で1万円/kWhとすると、車載バッテリーの年間売上としての経済効果は2035年が約2,700億円/年、2040年が約9,100億円/年～2.1兆円/年となる。なお、EV・PHEVの車両価格を200万円とした場合、その年間総売上としての経済効果は2035年が約1.1兆円/年、2040年が約3.7兆円/年～8.6兆円/年となる。

なお、上記は、事業参加の自動車メーカーによる経済効果として試算したものであるが、材料メーカーにおける新材料の市場投入や、蓄電池メーカーにおける車載用バッテリーの他の自動車メーカーへの展開など、サプライチェーン全体としての経済効果は、さらに大きくなる。他の自動車メーカーにおける電動車開発や、他の輸送機器の電動化などへの技術波及効果も大きく、国の投資による費用対効果は十分大きい。

(注1)「エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2021 -電動自動車・車載電池分野編-」(株式会社富士経済)の予測による。

(注2)2030年、2035年の全固体LIB搭載割合を「2020 次世代電池関連技術・市場の全貌」及び「エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2020 - 電気自動車・車載電池分野編-」(いずれも株式会社富士経済)を参考に算出しNEDOが仮定した。

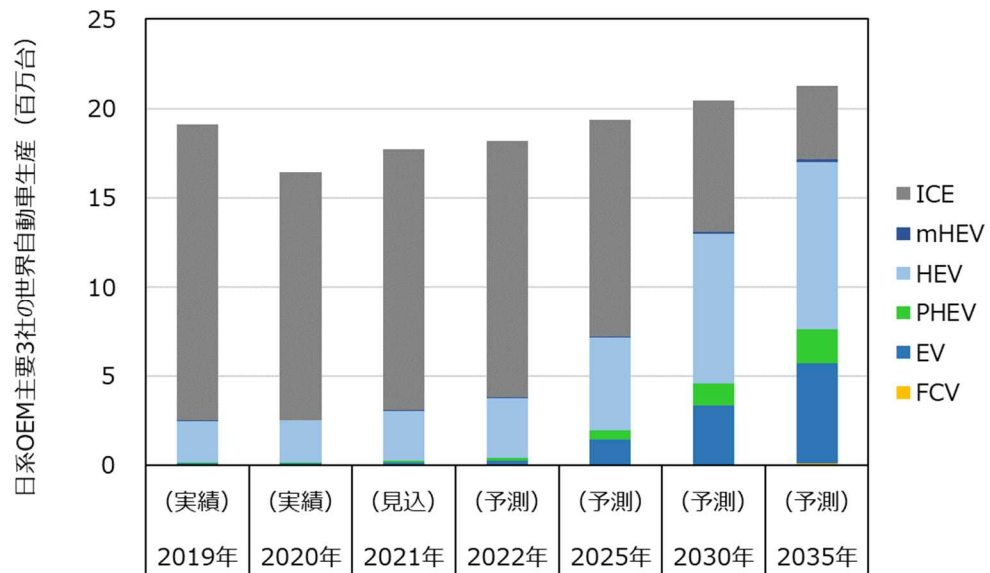


図 1.2.2-1 国内自動車メーカーの電動車生産台数の推移と将来予測

出典:「エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2021」(株式会社富士経済)に基づき NEDO 作成

② CO₂ 削減効果

耐久性に優れ、かつ充電時間が短くてすむ全固体 LIB を搭載した EV・PHEV であれば、ガソリン車と同等の 1 万 km レベルの年間走行距離で使用されるものと予想され、1 台あたり約 1.5 トン/年の CO₂ 排出量の削減効果がある。(注 3)

全固体 LIB 搭載の電動車への普及シナリオが①経済効果の試算条件と同じとし、車両が 10 年毎に更新され普及すると仮定すると、EV・PHEV の普及台数及び CO₂ 排出量の削減は 2035 年に 140 万台、約 210 万トン/年、2040 年に 740 万台～1,300 万台、約 1,100 万トン/年～約 1,900 万トン/年と見込まれる。

(注 3) 電気事業連合会が「長期エネルギー需給見通し」に基づいて定めた 2030 年度の電力 CO₂ 排出係数の目標値を用いて試算。

第2章 研究開発マネジメントについて

2.1 研究開発目標の妥当性

本事業の基本計画に記載されている目標は以下のとおりである。

各目標に対する達成度判定指標については、実施者(委託先)の公募採択決定後、NEDOと実施者で協議の上、実施計画書において定めることとした。

「研究開発項目① 共通基盤技術開発」

【中間目標】(2020年度末)

- 1) 第1世代全固体 LIB の大型化・量産化に必須となる固体電解質の量産、電極設計、電極活物質粒子への電解質コーティング、合剤電極の塗工及び電極厚膜化・大面積化等の要素技術を開発する。
- 2) 第1世代全固体 LIB に用いられる新材料について、性能、耐久性、安全性・信頼性を大型の標準電池モデルで評価する技術を開発する。
- 3) 量産プロセスをモデル的に再現した標準電池モデルの作製設備を設計・製作し、標準電池モデルを性能バラツキが無く、安定的に作製可能であることを検証する。
- 4) 次世代全固体 LIB として、第1世代全固体 LIB からの飛躍的な性能向上を実現する高性能固体電解質や高電位・高容量電極活物質等の候補材料を選定する。
- 5) 次世代全固体 LIB でユーザー訴求力を有した EV・PHEV 用の電池パックを実現するための外装パッケージ構造及びセル積層構造の候補を抽出する。
- 6) イオン濃度・輸送の理論モデルに基づいて、セルの不安定化・劣化、熱的挙動を予測するシミュレーション技術を開発する。また、車両走行パターンにおける電池モジュール・パックの充放電・熱的挙動を予測するシミュレーション技術を開発する。
- 7) 将来の国際規格・基準への反映を想定した全固体 LIB の試験評価法としての試験項目をリストアップし、試験条件・方法・クライテリア等を明確化する。

【最終目標】(2022年度末)

- 1) 第1世代全固体 LIB の標準電池モデルを用いた材料評価技術について、産業界における新材料開発の進展に対応した見直しを行い、性能、耐久性及び安全性・信頼性に加えて、量産への適合性も評価可能な技術として仕上げる。
- 2) 高性能固体電解質や高電位・高容量電極活物質等を次世代全固体 LIB に適用するための電解質・電極活物質の界面形成技術を開発するとともに、合剤電極での配合比や電極構造の最適化を行う。
- 3) 次世代全固体 LIB に適用する外装パッケージ構造及びセル積層構造のコンセプトを策定する。
- 4) 次世代全固体 LIB に用いられる新材料について、性能、耐久性及び安全性・信頼性を小型の標準電池モデルで評価する技術を開発する。
- 5) 次世代全固体 LIB の標準電池モデルの作製設備を設計・製作し、標準電池モデルを性能バラツキが無く、安定的に作製可能であることを検証する。
- 6) 国際規格・基準への反映を想定した全固体 LIB の試験評価法の原案を策定する。
- 7) 全固体 LIB の耐久性試験データや劣化メカニズム解析、劣化現象解明の結果に基づき、全固体 LIB の劣化・不安定化要因マップを策定する。また、長期耐久性を短期間で予測可能な劣化加速試験法を開発する。
- 8) 全固体 LIB 及び全固体 LIB を搭載した EV・PHEV の国際標準化戦略・方針を策定する。

「研究開発項目② 社会システムデザインの検討」

【中間目標】(2020 年度末)

国内外の政策・市場・研究開発動向等の調査・分析結果に基づき、エネルギー・資源、リユース・リサイクル産業、充電インフラ等も視野に入れた全固体 LIB 及び EV・PHEV を取り巻く社会システムの将来像を提示する。

【最終目標】(2022 年度末)

本事業の成果を産業競争力として結実させるための社会システムのシナリオ・デザインを取りまとめる。

上記の目標は、本事業の企画・立案段階において自動車・蓄電池メーカー各社の開発デジジョンメーカーを一堂に集めて意見交換した結果を反映したものである。また、京都大学・小久見善八名誉教授、群馬大学・鳶島真一教授(現名誉教授)、同志社大学・稲葉稔教授の学識者 3 名で構成される NEDO 技術委員会を開催し、そこで受けた指摘や助言も反映している。

自動車・蓄電池メーカーの要望、すなわち、企業・大学等で研究開発されている新材料がどの程度セル性能を向上させるポテンシャルを有するのか、その新材料のポテンシャルを十分に引き出すにはどんな改良が必要なのか、社会実装時に想定されるセルの量産プロセスには適合するのか等を理解するためのエンジニアリングデータを取得し、全固体 LIB の開発・実用化を加速したいという要望に応えるものとなっている。

戦略的な目標設定であること理由は次のとおりである。

- ① 「第 1 世代全固体 LIB」(研究開発が先行している硫化物系電解質に液系 LIB でも使われている電極活物質を組み合わせたもの。)と「次世代全固体 LIB」(高性能電解質に高電位・高容量の電極活物質を組み合わせたもの。)の材料評価技術を開発することは、全固体 LIB の実用化で日本が世界の先手を取り、かつ、その後の技術革新もリードしていくことに繋がるため。
- ② 「2.2.1 研究開発内容」で後述するように、「第 1 世代全固体 LIB」及び「次世代全固体 LIB」の要素技術開発に関する実証目標は、基盤技術という観点から見ると、非常に高いレベルに設定しているため。
- ③ ベンチマークとなる上市された製品が存在しない全固体 LIB について、標準電池モデルに使用する材料の選定・調達に始まり、合材電極・セルの構造及び作製プロセスの検討等を経て、耐久性・安全性まで評価可能なプラットフォームを先取りして構築するため。また、数値解析によるセル及び電池パックの充放電特性や発熱挙動の予測や開発した評価技術の国際規格・基準への反映もスコープに含めているため。
- ④ 自動車を巡っては、CASE (Connected (コネクテッド)、Autonomous (自動運転)、Shared & Services (シェアリングとサービス)、Electric (電動化))と呼ばれる技術革新の潮流によって、今後、産業構造が大きく変化する可能性がある。CASE の中心となる EV・PHEV の普及には、上流(資源)～中流(バッテリー、車両、充電インフラ)～下流(リユース、リサイクル)まで様々な課題が存在している。また、EV・PHEV がどのタイミング・規模で導入されていくことが適切かは、経済成長段階やエネルギー需給制約等、地域の状況によって大きく相違してくる。よって、全固体 LIB の価値を最大化するには、研究開発と並行して、産業構造変化や社会システムの将来像を先読みする必要があり、この検討を含めているため。

2.2 研究開発計画の妥当性

2.2.1 研究開発内容

(1) 「研究開発項目① 共通基盤技術開発」の研究開発内容

研究開発テーマの構成を図 2.2.1-1 に示す。各テーマは研究開発目標を達成するために必要となる開発内容を精査し技術分野を考慮するとともに、産学の有識者の意見を反映して設定した。また、各テーマに含まれる具体的開発内容は実施者との協議を経て決定するとともに、中間評価における指摘事項、技術委員会における助言などに基づいて適宜修正をおこなっている。

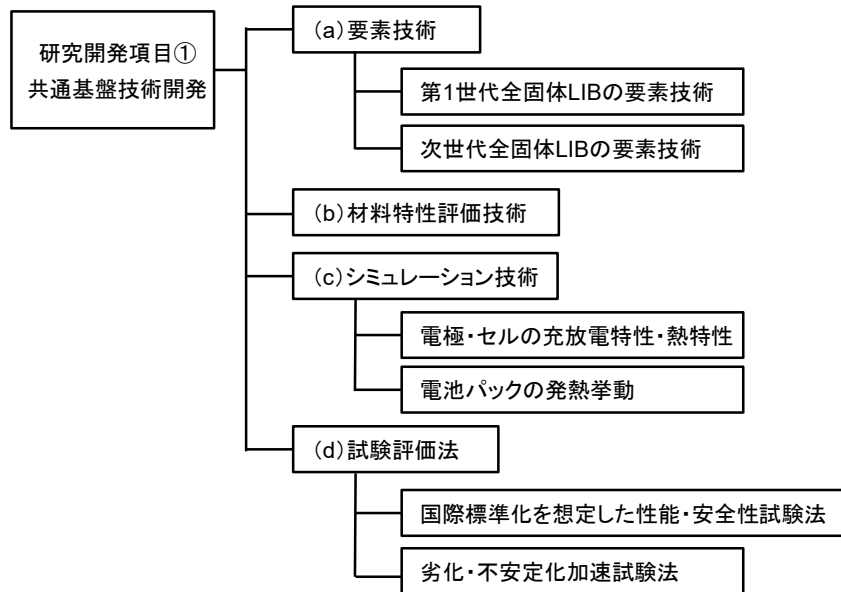


図 2.2.1-1 「研究開発項目① 共通基盤技術開発」のテーマ構成

(a) 要素技術開発

全固体 LIB の主要な技術課題を図 2.2.1-2 に示す。

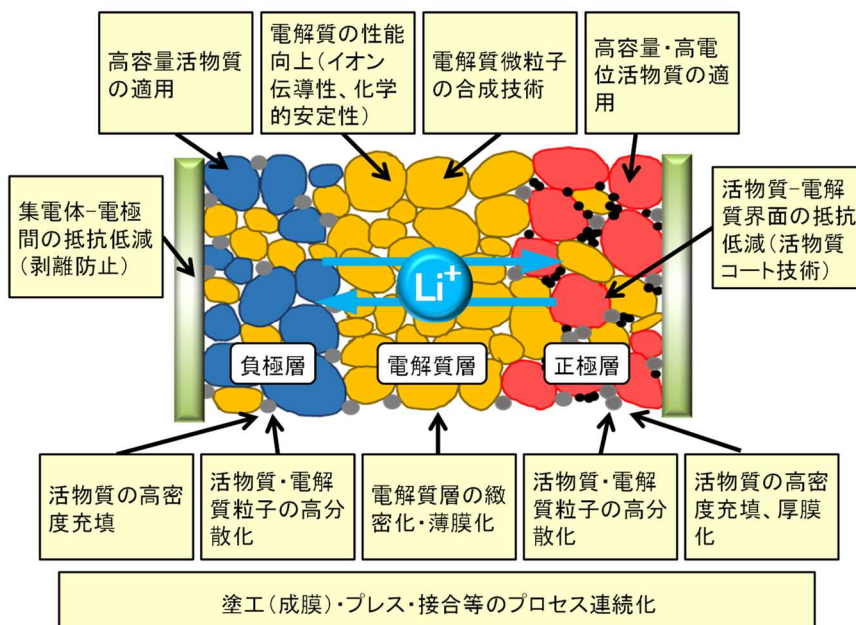


図 2.2.1-2 全固体 LIB の技術課題

本事業では、これら技術課題を解決する各種要素技術の開発を、第1世代全固体LIB、次世代全固体LIBそれぞれの電池コンセプトに対応させて行っている(図2.2.1-3)。また、開発成果を取り込んだセルを試作し、性能実証を行うことにより開発した要素技術の妥当性を検証している。

なお、性能実証の目標は、第1世代全固体LIBが体積エネルギー密度450Wh/L以上及び6C充電とし、次世代全固体LIBが体積エネルギー密度800Wh/Lとした。

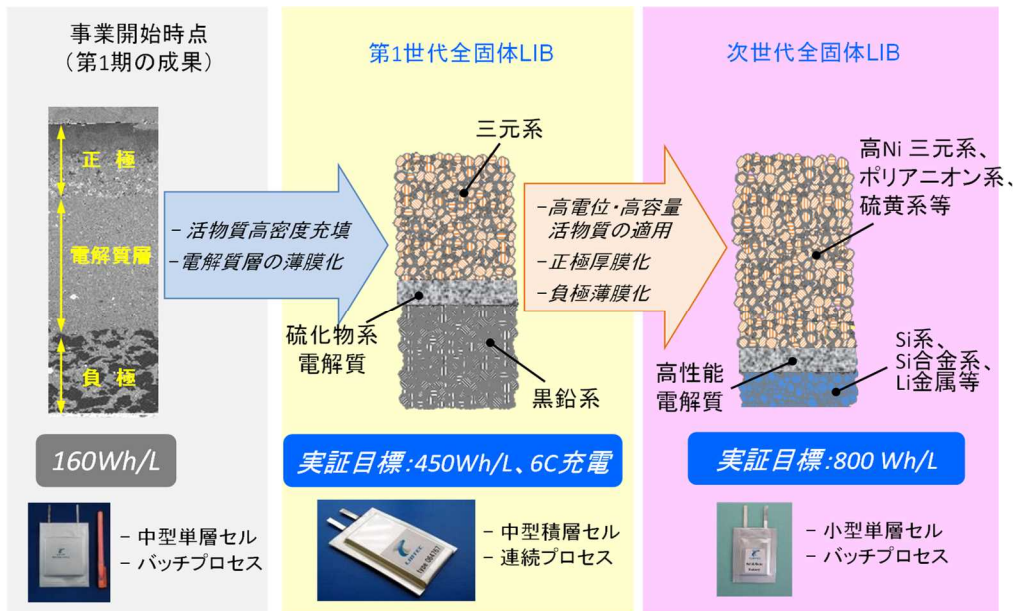


図 2.2.1-3 全固体 LIB の電池コンセプト

(b) 材料特性評価技術開発

図 2.2.1-4 に示すように、全固体 LIB への適用を想定し、今後、企業・大学等で開発される新材料サンプルを標準電池モデル(セル)に組み込み、特性評価を行うことにより、新材料のメリット・デメリットや改良の方向性を把握する技術(評価基盤)を開発している。



図 2.2.1-4 標準電池モデルを用いた新材料の特性評価の流れ

標準電池モデルのバリエーションとしては各種の材料特性評価に対応できるように構成材料、エネルギー密度が異なる仕様の 2cm 角単層セル、量産仕様を想定した設計において安定性を評価するための 4×12.5cm 単層セルを揃え、性能バラツキが無く、安定的に作製できるようにしている。

標準電池モデルによる特性評価の前段階として実施する材料物性測定やハーフセル試験等も含め、材料種も考慮した評価項目をリストアップし、評価項目毎のサンプル数、試験条件、試験方法等を検討するとともに、使用する設備・装置を整備している。

(c) シミュレーション技術の開発

全固体 LIB の電極・セル及び電池パックの充放電特性や発熱挙動を計算機シミュレーションによって予測・把握する技術を開発する。なお、このシミュレーション技術は、本事業において実施する各種要素技術開発の課題解決や妥当性検証にも活用している。

(d) 試験評価法の開発

車載バッテリーの国際標準試験法としての反映を見据えた全固体 LIB の性能試験法及び安全性試験法を開発している。液系 LIB については以下の国際規格が制定されており、これらを参考としつつ、全固体 LIB の特長を強くアピールし、液系 LIB との差別化が図れる試験評価法を開発している。

IEC 62660-1 「電動車両推進用リチウムイオン二次電池 -性能試験-」

IEC 62660-2 「電動車両推進用リチウムイオン二次電池 -信頼性・乱用試験-」

IEC 62660-3 「電動車両推進用リチウムイオン二次電池 -安全性要求事項-」

また、電解質・活物質の変化・変質や電解質-活物質界面の崩壊等、全固体 LIB 特有の不安定化・劣化のメカニズムを調べ、セル及び構成材料・部品の劣化要因マップを策定するとともに、劣化加速試験法を開発している。

(2) 「研究開発項目② 社会システムデザインの検討」の研究開発内容

電動車、車載バッテリー、充電インフラ等に係る政策・市場、ユーザーニーズ、バリューチェーン、リユース・リサイクル等について、動向把握と将来分析を行うことにより、本事業の成果を産業競争力として結実させる社会システムのシナリオ・デザインを取り纏めている。また、社会システムデザインの検討結果は、本事業において実施する共通基盤技術開発で取り組むべきテーマ・課題抽出にも活用している。

2.2.2 研究開発スケジュール

研究開発スケジュールを表 2.2.2-1 に示す。

第 1 世代全固体 LIB の要素技術に関しては、前半 3 年間で電解質層の薄膜化、電極層の高容量化・高入力化、プロセス連続化等の技術を開発し、これらの開発成果を取り込んだ 2cm 角及び 4×12.5cm 単層セルで性能実証(エネルギー密度 450Wh/L 以上、6C 充電)を行った。後半 2 年間では、積層セル化の技術を開発し、4×12.5cm 積層セルで性能実証を行っている。

次世代全固体 LIB の要素技術に関しては、前半 3 年間で正極厚膜化技術の開発、高容量・高電位活物質の選定、電解質の安定性評価法の検討等を行った。後半 2 年間では、単層セル化の技術を開発し、2cm 角単層セルで性能実証(エネルギー密度 800Wh/L)を実施している。

材料特性評価技術に関しては、前半 3 年間で 2cm 角単層及び 4×12.5cm 単層の標準電池モデルを開発するとともに、その作製仕様書のドキュメント化や作製設備の整備を行った。後半 2 年間では、次世代全固体 LIB の 2cm 角単層の標準電池モデルの開発、作製仕様書のドキュメント化、作製設備の整備を行っている。また、引き続き、新材料サンプルを標準電池モデルに組み込んだ評価、新材料について物性測定やハーフセル試験等による特性評価を行うプラットフォームの整備を行っていく。

シミュレーション技術に関しては、前半 3 年間で第 1 世代全固体 LIB のセル及び電池パックの解析モデルを構築した。後半 2 年間では、解析結果と実測データの比較検討により、モデル化や計算手法の妥当性を検証している。また、次世代全固体 LIB のセル及び電池パックの解析モデルを構築する。

試験評価法に関しては、前半 3 年間で国際標準試験法に係る新業務項目提案 (NP 提案) に向けた試験項目、試験条件、試験方法等を検討するとともに、その妥当性を説明するためのデータ取得を行った。後半 2 年間では、NP 提案後の国際標準化 (IS 化) に向けたデータ取得を行っている。さらに、前半 3 年間で調べた全固体 LIB 特有の不安定化・劣化のメカニズムに基づき、後半 2 年間で劣化要因マップの策定と劣化加速試験法を開発する。

表 2.2.2-1 研究開発スケジュール

		2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
研究開発項目① 共通基盤技術開発	第1世代全固体LIB 要素技術 (450Wh/L、6C充電)	SE層薄膜化、電極高容量化・高入力化、プロセス技術	→		積層セル化技術	→
		単層セル性能実証	→		積層セル性能実証	→
	次世代全固体LIB 要素技術 (800Wh/L)	正極厚膜化、活物質候補の選定、電解質安定性評価等	→		単層セル化技術	→
			→		単層セル性能実証	→
	材料特性評価技術	標準電池モデル (第1世代 2cm角単層、4×12.5cm単層)	→		標準電池モデル (次世代)	→
		特性評価プラットフォームの構築	→			→
	シミュレーション技術	電極・セルの解析モデルの構築	→		妥当性検証	→
		電池パックの解析モデルの構築	→		妥当性検証	→
	試験評価法	IEC-NP提案に向けた性能・安全性試験法の検討	→		IS化に向けたデータ取得	→
		不安定化・不安定化メカニズムの把握	→		劣化・不安定化要因マップ策定	→
研究開発項目② 「社会システムデザインの検討」	動向調査・分析 (車載バッテリー市場、技術開発、充電インフラ、リユース・リサイクル)	→			→	
	全固体LIB搭載車の普及シナリオ、普及台数推計、社会システムの将来像	→			→	

2.2.3 研究開発費

本事業の研究開発予算を表 2.2.3-1 に示す。

予算総額は、2018 年度から 2022 年度の 5 年間で 10,249 百万円である。

「研究開発項目① 共通基盤技術開発」では、集中研究拠点の LIBTEC において要素技術開発と標準電池モデルの作製に使用する活物質表面コーティング装置、電解質・合材電極のスラリー化装置、電解質層・合材電極層の塗工装置及びプレス装置等を導入した。また、シミュレーション技術の開発に使用する計算機及びソフトウェア、試験評価法の開発に使用する安全性試験装置、充放電試験装置、固体電解質の耐水性評価装置等を導入した。また、開発電池試作のための試作材料費、材料の加工及び作製した材料や電池について分析を実施するための外注費を計上した。サテライトにおいては担当する基盤研究を遂行するために必要な経費を計上した。

「研究開発項目② 社会システムデザインの検討」においては、各種動向調査の外注費を計上した。

表 2.2.3 -1 研究開発予算

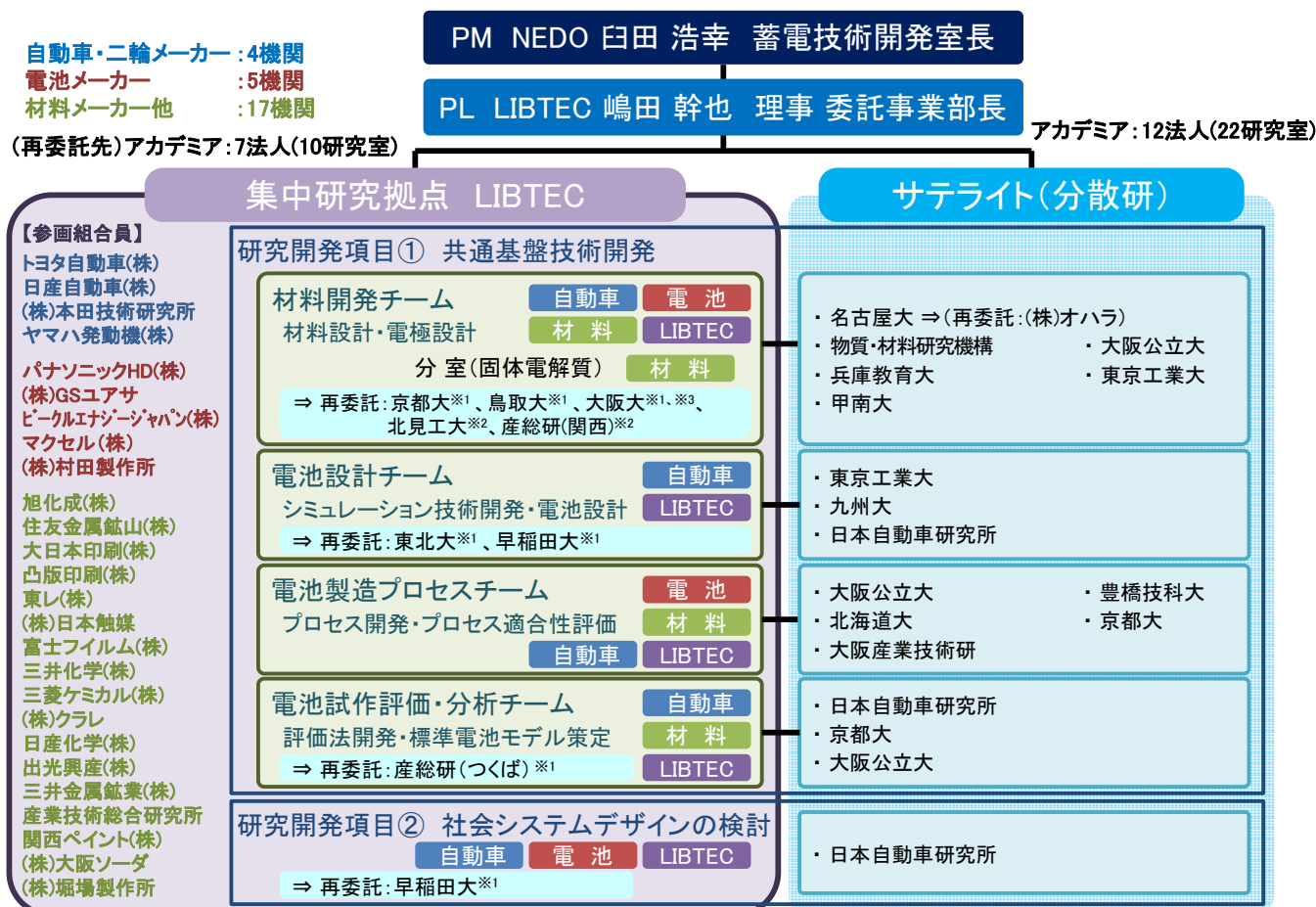
(単位:百万円)

研究開発テーマ	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	合計	
研究開発項目 ① 共通基盤技術開発	(1)第1世代全固体 LIB の要素技術開発	739	1,007	870	1,009	787	4,413
	(2)次世代全固体 LIB の要素技術開発	264	312	443	656	445	2,119
	(3)シミュレーション技術	84	110	149	143	156	642
	(4)試験評価法	398	550	503	576	517	2,544
	(1)~(4) 小計	1,485	1,978	1,964	2,384	1,906	9,717
研究開発項目 ②社会システムデザインの検討	46	117	117	126	126	532	
合計 (NEDO 委託費)	1,531	2,095	2,081	2,510	2,032	10,249	
集中研究拠点 (LIBTEC) の予算	1,219	1,640	1,426	1,806	1,644	7,735	
サテライト (大学・研究機関) の予算	312	455	655	704	388	2,514	

2.3 研究開発実施体制の妥当性

本事業全体の実施体制を図 2.3-1 に示す。

集中研究拠点である LIBTEC に自動車・蓄電池・材料メーカー等、26 法人 が研究者・エンジニアを派遣するなどして、相互に技術的ノウハウや自社材料等を持ち寄る企業間連携の体制を構築している。



※1 2020年4月から参画 ※2 2021年4月から参画、※3 2研究室、内1研究室は2020年4月に東京大で参画し、研究者異動により2022年4月からは大阪大として参画
 ※サテライト 理化学研究所: 2018年4月~2019年3月参画、群馬大: 2018年4月~ 2021年3月参画、産業技術総合研究所: 2018年4月~ 2021年3月参画

図 2.3-1 事業全体の実施体制

LIBTEC 内には、「材料開発チーム」、「電池設計チーム」、「電池製造プロセスチーム」、「電池試作評価・分析チーム」の 4 つの研究チームが設けられており、前記の「2.2.1 研究開発内容」で述べた各研究開発テーマを分担している。また、本事業には、NEDO の委託先として大学・研究機関 12 法人 (22 研究室) が、LIBTEC の再委託先として大学・研究機関 7 法人 (10 研究室) が参画し、前述した 4 研究チームの何れかに所属し、LIBTEC と連携しながら研究開発を進めている。

「研究開発項目② 社会システムデザインの見直し」に関しては、LIBTEC 及び日本自動車研究所が NEDO 委託先である。図 2.3-2 に示すように、LIBTEC 内に自動車・蓄電池メーカーの専門家で構成されるワーキンググループを設置し、LIBTEC が実施した各種動向の調査・分析結果や普及シナリオ・市場デザインの見直し結果について意見・助言を受けながら、見直しを進めている。なお、ワーキンググループは、事業部門の担当者や充電インフラに詳しい関係者も含まれており、広い視野で議論ができるメンバー構成となっている。

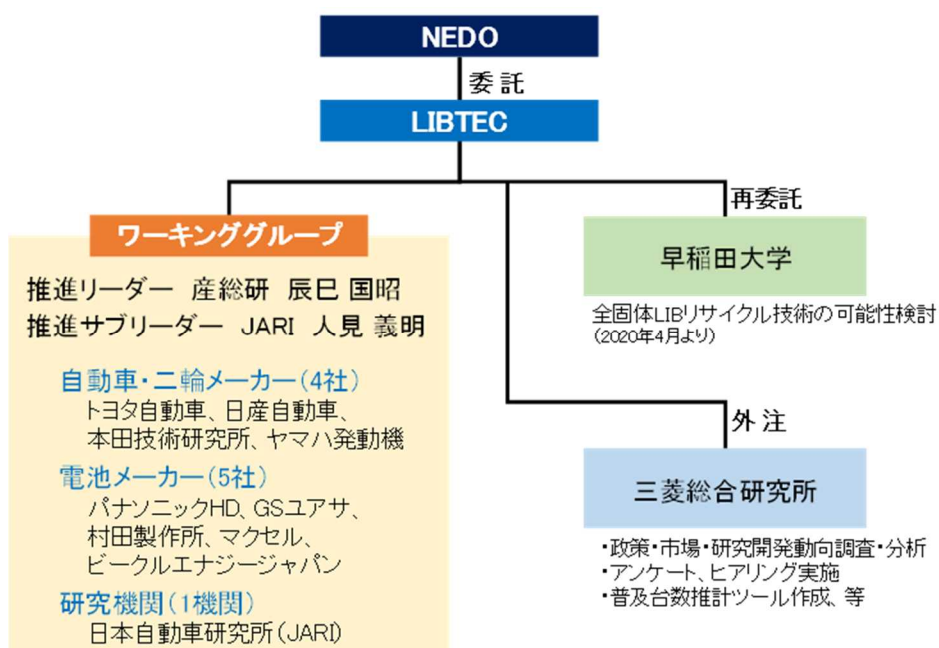


図 2.3-2 「研究開発項目② 社会システムデザインの見直し」の実施体制

事業期間中においては研究実施体制の妥当性を維持するため研究開発の進捗などを考慮して体制の見直しを実施した。2020 年度冒頭には 2 年間の研究開発の結果を受けて追加する必要がある技術を補充するために 7 機関を LIBTEC の再委託先として追加し、2021 年冒頭には更に 2 機関を追加した。サテライト機関については 2.4.1(3)に示すようにステージゲート審査を実施して見直しをおこなった。

2.3.1 実施者の技術力・実用化能力について

LIBTEC は、前記の「1.2.1 NEDO の関与の必要性」で述べた 2 つの NEDO 事業、すなわち、「次世代蓄電池材料評価技術開発」(2010～2014 年度)及び「先進・革新蓄電池材料評価技術開発(第 1 期)」(2013～2017 年度)の助成先・委託先として、液系 LIB 及び全固体 LIB の材料評価技術の開発に取り組んできた。また、これらの成果を活用し、2017 年より材料評価サービスや蓄電池開発コンサルティングを自主事業として展開している。そのため、LIBTEC は材料特性評価技術の開発におけるポイントを押さえており、本事業に必要な技術力と成果の実用化能力を有していると言える。

同様に、本事業に参加している各自動車・蓄電池・材料メーカーも、液系 LIB 及び車載バッテリー分野におけるビジネス及び研究開発の豊富な経験と実績を有しており、本事業に必要な技術力と成果の実用化能力を有していると言える。また、前記の「1.1.3 技術動向」で述べたように、全固体 LIB の研究開発で世界リードするトヨタ自動車、コイン形全固体 LIB のサンプル出荷を開始したマクセル、硫化物系固体電解質の商業生産を計画している出光興産及び三井金属鉱業といった技術蓄積がある企業が参画している。

本事業に参加しているサテライトの大学・研究機関も高いレベルの技術力を保有している。参加した 15 法人のうち、12 法人(大阪公立大学、京都大学、群馬大学、甲南大学、東京工業大学、豊橋技術科学大学、兵庫教育大学、北海道大学、産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、理化学研究所、大阪産業技術研究所)は、JST/ALCA-SPRING の硫化物型全固体電池チームで 5 年間の活動実績がある。大阪公立大学・辰巳砂教授(学長)、東京工業大学・菅野教授といった全固体電池の研究で広く世界に認知されている研究者も参加している。

加えて、日本自動車研究所は、電動車両及び車載バッテリーの国際標準化を担当する国内審議団体であり、本事業の成果を戦略的かつ迅速に標準化活動に展開することができる。

2.3.2 指揮命令系統・責任体制

NEDO は、研究開発実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、研究開発の実施主体である LIBTEC の中からプロジェクトリーダー(PL)及びサブプロジェクトリーダー(SPL)を選定している。具体的には、PL を石黒恭生氏(LIBTEC 常務理事、2020 年 12 月まで)及び嶋田幹也氏(LIBTEC 理事、2021 年 1 月から)に、SPL を阿部武志氏(LIBTEC 第 1 研究部長、2020 年 12 月まで)及び川本浩二氏(LIBTEC 第 1 研究部長、2021 年 1 月から)、蕪木智裕氏(LIBTEC 第 2 研究部長、2020 年 11 月まで)及び安田博文氏(LIBTEC 第 2 研究部長、2020 年 12 月から)、福岡歩氏(LIBTEC 第 3 研究部長)、川合光幹氏(LIBTEC 第 4 研究部長)に委嘱している。嶋田 PL は、LIBTEC 内に嶋田氏を頂点とする明確な指令命令系統及び責任体制を構築しており、前述した 4 つの研究チームのリーダーとして SPL を配置し、プロジェクト全体を管理している。また、各 SPL は、自研究チームに所属するサテライトの大学・研究機関の研究進捗を管理している。

石黒 PL はトヨタ自動車において、阿部 SPL 及び川本 SPL、蕪木 SPL 及び安田 SPL、福岡 SPL、川合 SPL は、それぞれトヨタ自動車、日産自動車、パナソニック(現:パナソニックホールディングス)、本田技術研究所において全固体 LIB も含めた蓄電池及び車載バッテリーの研究開発に深く携わってきており、全固体 LIB に係る技術的なポイントやボトルネック課題を把握している。また、所管する研究チームのメンバーに対する技術的なアドバイスのみならず、成果を活用する企業の責任者と議論することができる。嶋田 PL はパナソニック(現:パナソニックホールディングス)において LIB 開発に長く携わり LIB の材料、製造に係わる知見が豊富であり、本事業の開始当初は有識者として本事業を俯瞰し助言を行ってきた。LIBTEC に移籍後は委託事業推進室長として本事業を担当し全固体 LIB に係る技術にも通じており、LIBTEC 内の技術、要員、設備にも通じていることから本事業の最終目標達成に向けて必要な議論、指揮を行うことができる。

また、東京工業大学・菅野教授及び大阪公立大学・林教授が大学・研究機関側のリーダーとなって、サテライト側での連携・協力関係を構築している。

2.4 研究開発の進捗管理の妥当性

2.4.1 NEDO による進捗管理

(1) NEDO 担当部による進捗管理

NEDO は、本事業の研究開発テーマ毎に複数名の NEDO 担当者を配置して、実施者の研究進捗を常に把握するとともに、目標への到達度、成果の技術的意義、実用化の可能性、産業への波及効果等も分析・評価しながら、事業のマネジメントを推進している。

NEDO による具体的な進捗管理の内容は次のとおりである。

- ① 毎月、労務費が計上される登録研究員から提出される従事月報について内容を確認し、登録研究員ベースでの研究開発に遅滞が生じていないことを確認。
- ② 2～3 ヶ月に 1 回、年度後半では頻度を高めて、全実施者に予算執行状況の報告を求め、研究設備の導入状況や消耗品の購入状況から委託先単位での研究開発の遅延が発生していないことを確認。
- ③ 2～3 ヶ月に 1 回、NEDO 担当者が LIBTEC を訪問し、研究開発状況や研究設備の稼働状況を確認。また必要に応じオンライン会議、電話により NEDO 担当者が LIBTEC 担当者に状況を確認。
- ④ 年に 2 回程度開催される「研究開発チーム会議」(LIBTEC 主催)に NEDO 担当者も出席し、チーム単位での研究開発進捗を確認。
- ⑤ 年に 1～2 回、NEDO 担当者が大学・研究機関を訪問し、研究開発状況や研究設備の稼働状況を確認。
- ⑥ 年に 1～2 回開催される「SOLiD-EV シンポジウム」(LIBTEC 主催)に NEDO 担当者も出席し、事業全体の研究進捗を確認。なお、この機会を利用して他事業との「連携会議」を開催することもある。

(2) 外部有識者による進捗点検(「NEDO 技術委員会」の開催)

NEDO は、2013 年度より外部有識者で構成される「NEDO 技術委員会(蓄電技術開発)」を設置・運営し、研究開発内容に関する技術的な助言や事業全体の運営管理に関する助言・指摘をすくい上げながら、事業を推進している。NEDO 技術委員会での助言・指摘は、必要に応じて、事業の実施方針や各実施者の研究計画に反映している。

NEDO 技術委員会(蓄電技術開発)は 2013 年から 2021 年 8 月の間に 19 回開催され、本事業を対象としては、第 14 回(2018 年 10 月 29 日)、第 15 回(2019 年 5 月 13 日)、第 17 回(2019 年 12 月 9 日、10 日)、第 19 回(2021 年 8 月 2 日)の計 4 回開催した。

事業開始初年度の第 14 回では、事業全体の研究計画(目標、内容、スケジュール等)が審議された。第 15 回では、主に集中研究拠点である LIBTEC のこれまでの成果と今後の研究開発の進め方が審議された。第 17 回では、主にサテライトの大学・研究機関のこれまでの成果と今後の研究開発の進め方が審議された。第 19 回では中間評価までの進捗報告と今後の進め方が議論された。

2021 年 8 月までの NEDO 技術委員会のメンバー構成を表 2.4.1-1 に示す。蓄電池・電気化学分野における著名な研究者、自動車・蓄電池メーカーにおける蓄電池研究のデジジョンメーカー、国際標準化の担当者等で構成されている。

表 2.4.1-1 NEDO 技術委員会(蓄電技術開発) 委員一覧 (~2021 年 8 月)

	氏名	所属、役職
委員長	小久見 善八	京都大学 名誉教授
副委員長	稲葉 稔	同志社大学 理工学部 機能分子・生命化学科 教授
委員	安部 武志	京都大学 工学研究科 物質エネルギー化学専攻 教授
	板井 幸彦	本田技術研究所 オートモービルセンター 第5技術開発室 第3ブロック 主任研究員
	射場 英紀	トヨタ自動車 先端材料技術部 電池材料技術・研究部 担当部長
	大澤 充	本田技術研究所 先進技術研究所 主任研究員
	小谷 幸成	トヨタ自動車 先進技術開発カンパニー先端材料技術部 主査
	嶋田 幹也	パナソニック テクノロジーイノベーション本部 資源・エネルギー研究所 蓄電池技術分野 主幹研究員
	鳶島 真一	群馬大学 理工学部 環境創生理工学科 教授
	仁科 辰夫	山形大学 大学院理工学研究科 教授
	新田 芳明	日産自動車 総合研究所 先端材料・プロセス研究所 エキスパートリーダー
	長谷川 真也	パナソニック テクノロジーイノベーション本部 資源・エネルギー研究所 全固体電池プロジェクト 部長
	秦野 正治	日産自動車 総合研究所 先端材料・プロセス研究所 エキスパートリーダー
	松本 孝直	電池工業会 二次電池第2部会 普及促進担当 新種電池研究会 部長
	三田 裕一	電力中央研究所 材料科学研究所 電気化学領域 上席研究員
山木 準一	九州大学 名誉教授	

(所属、役職は委員会開催時点のもの)

また、2021 年 8 月に事業のステージが実用化をより意識した段階にあることを踏まえ、新たな技術委員を委嘱して技術委員会を開催することとし、第 1 回(2021 年 8 月 4 日)、第 2 回(2022 年 1 月 24 日)、第 3 回(2022 年 5 月 16 日)、第 4 回(2022 年 6 月 13 日)を開催した。

第 1 回では前半 3 年間の進捗と課題報告を受けて後半 2 年間の方針を議論した。第 2 回では 2021 年度の成果と 2022 年度の取組について議論した。第 3 回では現状の技術課題とアカデミア連携について詳細な状況報告と議論を実施した。第 4 回では最終目標に向けて事業の状況と事業期間内で実施すべき内容を審議した。2021 年 8 月以降の NEDO 技術委員会のメンバー構成を表 2.4.1-2 に示す。

表 2.4.1-2 NEDO 技術委員会 委員一覧(2021 年 8 月～)

	氏名	所属、役職
委員長	稲葉 稔	同志社大学 理工学部 機能分子・生命化学科 教授
委員	射場 英紀	トヨタ自動車 先端材料技術部 チーフプロフェッショナルエンジニア
	大園 一也	本田技術研究所 先進技術研究所 材料・プロセスドメイン チーフエンジニア
	仁科 辰夫	山形大学 大学院理工学研究科 化学・バイオ工学専攻 教授
	秦野 正治	日産自動車 総合研究所 先端材料・プロセス研究所 技術参与
	湯浅 浩次	パナソニックエナジー 品質・環境センター 戦略担当

(所属、役職は 2022 年 6 月時点)

(3) サテライト機関のステージゲート審査の実施について

2021年1月に本事業の研究進捗管理の一環として、サテライトの各大学・研究機関が実施している個別の研究開発を対象としたステージゲート審査を全研究開発テーマについて実施した。

ステージゲート審査は、本事業を所管するNEDO蓄電技術開発室が主体となり、前記したNEDO技術委員会の外部有識者の協力も得て行った。審査項目は、前半3年間の目標達成度、これまでの研究開発成果、本事業への貢献(集中研究拠点との連携)、後半2年間の研究計画、研究成果の本事業及び産業界での活用見通し等である。

この審査の結果に基づいて、2021年度以降における委託契約継続の可否、契約継続する場合の研究内容(技術の取捨選択や技術の融合)を判断し、全24テーマ中、2テーマを継続不可、3テーマを単年度契約として1年後にステージゲート審査を実施して2022年度の継続可否を判断、17テーマを条件付き継続、2テーマを無条件継続とした。

2021年12月には2021年1月の審査で単年度契約となった3テーマについてステージゲート審査を前回同様の形式で実施し、2021年度の進捗と2022年度の成果見込みを中心に審議して2テーマを条件付き継続、1テーマを無条件継続とした。

2.4.2 実施者による進捗管理

研究開発実施者は、PLを頂点とする指揮命令系統の下、次のような進捗管理を行っている。

- ① 毎週、「PL・SPL会議」を開催し、PL・SPL間で各研究開発チームの研究進捗を共有。
- ② 毎週、「PL報告会」を開催し、PLが研究開発チーム毎の研究進捗を確認。
- ③ 年に1~2回、「研究開発チーム会議」を開催し、研究開発チーム内で研究進捗を共有。
- ④ 年に2回程度、「LIBTEC/SOLID-EV技術委員会」を開催し、研究進捗を参画企業の開発責任者と共有。また、新材料サンプルの提供依頼も行っている。
- ⑤ 年に1~2回、「SOLID-EVシンポジウム」を開催し、本事業の関係者全員で事業全体の研究進捗を共有。また、ポスターセッションを設け技術的交流を深めている。

コロナ禍においても④⑤についてはオンライン会議を活用し、進捗管理に支障が無い様取り進めた。

2.5 知的財産に関する戦略の妥当性

2.5.1 知的財産戦略

国際市場で競争力を獲得するためには、知的財産と標準化を戦略的に組み合わせてビジネス戦略に相乗効果をもたらす取組を進める必要がある。その一方、特許化やデジュール標準化(公的標準化)は実質的な技術の公開に繋がるという側面を持つため、オープン&クローズの戦略が必要である。

本事業の成果となる材料特性評価技術(標準電池モデル、材料特性評価の条件・要領・手順、個別の物性測定・分析評価手法等)は、国内自動車・蓄電池・材料メーカーが市場競争力を有した製品を創出するために使用するツールであり、フォーラム標準に近い性質を持つ。そのため、これらの技術は基本的にはノウハウ(ブラックボックスのクローズ領域)として取り扱うものとし、特許出願やデジュール標準化は行わない方針としている。ただし、国内産業界全体の競争力強化の観点から、本事業に不参加の国内関係者にも広く共有し、産業界の共通指標として普及・定着させる方針である。この場合、まだ製品として上市されていない全固体 LIB を対象としたものであり、技術情報の海外流出は競争力の低下を招くおそれがあることから、その防止対策を設けることが必要と認識している。

一方、要素技術開発の成果(要素技術開発の過程で創出される材料発明を含む。)については、以下に示す戦略を取ることを基本としている。

- ① 全固体 LIB ビジネスの武器となる基本特許の創成活動を推進する。この場合、量よりも質を重視する。創成した基本特許は、補正・分割・改良出願等して、他国企業が回避困難な堅固な特許網を計画的・戦略的に構築することを狙う。
- ② 国外特許出願を積極的に行う。国外出願しない特許は日本出願もしない方向で進めることも検討する。出願対象国は、海外競合企業のバッテリー及びバッテリー材料の製造工場が存在する国及び主要な電動車普及国とする。
- ③ 電極活物質・電解質等の材料発明は、少数の特許で独占排他のビジネスが可能となることから、積極的に権利化する。また、海外競合企業には基本的にライセンスしないか、若しくは高料率・拘束条件付のライセンスを行う。
- ④ 秘匿することがビジネス上有利となる製造方法や運転・制御方法等の発明は、原則、ノウハウとして秘匿化する。ただし、リバースエンジニアリングの容易性や他国企業の出願可能性等のリスクを考慮して最終判断する。同時に、秘匿に際しての先使用权主張の準備も行う。

なお、本事業の成果に関わる知的財産権は、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第 25 条の規定等に基づき、原則として、全て委託先に帰属することになっている。

2.5.2 知的財産マネジメント

本事業では、「NEDO プロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」(2012 年策定、2015 年改訂)及び「運用ガイドライン」(2013 年発行)に基づき、知的財産マネジメントを推進している。

事業開始初年度において、本事業参加の全機関で成果活用のために必要な知的財産の取扱いについて合意を形成する場として「知財運営委員会」を設置済みである。また、知的財産の帰属、実施許諾、継承・移転等の細目を定めた「知財合意書」、知的財産に係る出願・活用ルールを定めた「知的財産権取扱規程」、情報管理・秘密保持のルールを定めた「情報管理規程」を策定済みである。

知的財産の出願に関しては、参加企業及び大学・研究機関において個別出願又は共同出願を適宜、柔軟に選択することが可能となるルールを設けている。

また、情報管理に関しては、認証 ID による専用居室への入退室許可制、サンプル・図面等(電子媒体を含む)の外部持ち出し不可、社用 PC・社外電子メールの監視等のルールを設けている。さらに、秘密保持に関しては、「情報管理規程」の下での保護(賠償請求有)を基本に研究者個人と守秘契約を締結している。なお、企業については、LIBTEC からの脱会時の対応についても合意済みである。

2.6 国際標準化について

新規技術である全固体 LIB のグローバル市場への投入と普及拡大に向けては、性能・品質、安全性、互換性等の統一的なルールとなる国際規格の整備が必要となる。また、近年は様々な産業分野で技術革新のスピードが増す中、海外企業はブラックボックス化とオープン化を組み合わせた標準化戦略の仕掛けで競争優位を發揮しており、自社や自国に不利にならない国際規格を作ることが産業競争力の強化には不可欠である。加えて、国際規格は法的拘束力を持たないが、近年は各国の規制において国際規格を引用するケースが増加しており、この点を考慮して国際標準化の取組を進める必要がある。

全固体 LIB の標準化の方向性としては、市場における車載用バッテリーの耐久性・安全性に対する関心の高まりと、中韓蓄電池メーカーの液系 LIB の技術向上・低価格化が顕在化しつつあることを踏まえ、全固体 LIB が持つ高い耐久性・安全性の価値を客観的に浮かび上がらせて、ユーザーに強い訴求力を示すための試験評価法の国際標準化に取り組む必要があると NEDO は認識している。

また、この試験評価法の国際標準化を迅速・円滑に進めるには、ISO、IEC 等の国際標準化機関における議論を早く始めることが重要であると認識している。そのため、本事業における研究開発成果が速やかに国際標準化機関における議論の場で活用されることを目的として、車載バッテリーに関する国内標準化関係者との会合を定期的に持ち、研究開発の状況を共有するとともに、意見・助言をすくい上げて研究開発活動に反映している。

2.7 他事業との連携について

事業の効率的・効果的な推進に向けては、事業内のみならず、他の事業との連携も不可欠である。NEDO は、PL と相談しつつ、プロジェクト開始以降、NEDO 事業「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発(RISING2)」及び科学技術振興機構(JST)事業「戦略的創造研究推進事業／先端的低炭素化技術開発／次世代蓄電池研究加速プロジェクト(ALCA-SPRING)」と連携を進めてきた。

RISING2 については、同プロジェクトが培ってきた高度解析技術の全固体 LIB への応用と、RISING2 で研究中の革新電池の先行評価の 2 分野において連携した。本事業の課題解決による研究加速だけでなく、全固体 LIB 用の専用治具の開発等、RISING2 の高度解析技術発展にも寄与している。2021 年度からは、「電気自動車用革新型蓄電池開発(RISING3)」として新たに事業が開始されているが、引き続き、高度解析技術の全固体 LIB 開発への応用について、事業間の連携を実施している。

ALCA-SPRING との連携では、ALCA-SPRING 側から、次世代全固体 LIB 用材料として期待される新材料の提供や新技術に関する情報の共有を受け、LIBTEC にてセル試作、特性評価を実施し、評価結果を提供している。

また、2020 年度から NEDO エネルギー環境先導プログラムのテーマ「車載用蓄電池の内部状態解析に基づく診断技術の研究開発」との連携を実施し、SOLiD-EV で開発した標準電池の提供を通じて、液系 LIB の劣化予測手法の全固体 LIB への適用性の検討に貢献した。2021 年からは、文部科学省科学研究費助成事業「蓄電固体界面科学」との連携も進め、ALCA-SPRING と同じく、開発された新材料の特性評価を行っている。2022 年度からは新たに JST 事業「共創の場形成支援プログラム(COINEXT) 環境エネルギー分野／先進蓄電池研究開発拠点」との連携も開始している。

さらに NEDO「新エネルギー等のシーズ発掘・事業化に向けた技術研究開発事業／全固体 LIB に係る課題設定枠(2019 年度)」で採択された以下の 2 つの研究テーマとの連携も行った。「電極活物質への無機材料の薄膜コート技術の実用化研究開発」については、正極へのコーティング技術を評価し、当該テーマの完了に貢献するとともに、本事業の研究進展にもつなげている。また、「全固体リチウムイ

オン電池(電極層並びに固体電解質)薄膜化成形用精密プレス「の技術開発」については、LIBTEC がプレス装置の改良について技術的コンサルティングを実施した。

なお、これらの連携は研究開発だけでなく、相互に研究情報の共有化を図っていることから、我が国の全固体電池研究開発の効率的・効果的な推進や技術の底上げにもつながっている。

2.8 中間評価への対応

本事業の中間評価を2020年10月20日に実施した。表2.8-1に研究評価委員会「先進・革新蓄電池材料評価技術開発(第2期)」(中間評価)分科会委員を示す。中間評価における指摘事項、コメント及び対応の概要を表2.8-2に示す。対処方針は実施計画等へ反映させた。また、耐久性の課題の把握や液系LIBとの挙動の違いの明確化等も含め、研究開発を加速・深掘させるため、2021年度は当初予算に加え、約3億円の増額を実施した。

表 2.8-1 研究評価委員会「先進・革新蓄電池材料評価技術開発(第2期)」
(中間評価)分科会 委員一覧

	氏名	所属	役職
分科会長	豊田 昌宏	大分大学 理工学部	教授
分科会長代理	井手本 康	東京理科大学	教授 副学長
委員	石原 達己	九州大学大学院 工学研究院 応用化学部門	教授
	今西 誠之	三重大学 工学部 分子素材工学科	教授
	加藤 尚	東北電力株式会社 研究開発センター	主幹研究員
	喜多條 鮎子	山口大学 大学院 創製科学研究科	准教授
	林 克也	NTTファシリティーズ総合研究所	担当部長

(所属、役職は分科会開催時点のもの)

表 2.8-2 中間評価の反映について

改善すべき点及び今後への提言	「改善すべき点及び今後への提言」に対する対応
<p>○事業の位置づけ・必要性 －指摘無し－</p>	<p>－指摘無し－</p>
<p>○研究開発マネジメント ① これまで同様に課題に対する問題意識の共有、産官学の強力な連携を含めて成果を挙げていくマネジメントを期待する。</p>	<p>①引き続き産学官連携のマネジメントを効果的に推進する。 本事業では 2.3 節で示すとおり産官学が結集した体制を構築している。この体制を継続するとともに、第 4 章で説明するように産官学における技術交流、情報交換の取り組みを一層推進することで連携強化を図った。 また、中間評価結果やステージゲート審査結果を踏まえた取り組むべき課題に対する研究内容は、2021 年度以降の後半 2 年間の延長契約における集中研、アカデミアの実施計画書に反映するとともに、2021 年度は約 3 億円の増額を実施して開発の強化を図った。</p>
<p>○研究開発成果 ② サイクル特性等の実用寄りの指標設定等を行うなど、実用に資する課題の解決を図っていくことを望む。</p>	<p>②プロジェクトの研究開発計画として、前半 3 年間でエネルギー密度とレート特性を液系 LIB 相当のレベルに到達させた後、後半 2 年間でサイクル特性、保存特性といった耐久性の検討に取り組むことにしている(内部抵抗が大きい、不均質な電極構造で耐久性を評価しても、劣化・不安定化のメカニズムや支配因子が正確に把握できないため)。 当初計画にしたがって後半 2 年間の研究開発において、耐久性に関する実用化課題の把握と課題解決のアプローチの提示を進めた。具体的な耐久性の評価条件・方法、劣化現象及びその要因の把握内容等は延長契約における後半 2 年間の実施計画書に反映させた。 本事業の「ステアリング会議」(自動車・蓄電池メーカーのキーパーソンが参加)において後半 2 年間で実施すべき取組について検証を受けた。</p>
<p>○成果の実用化に向けた取組及び見通し ③ 目標値のエネルギー密度とレート特性の達成に注力し過ぎていることから、安全性の課題や既存の液系 LIB との充放電特性の違い、実用に資する際の課題を明確にするべきと考える。特にリチウムイオン電池は制御回路も重要なため、保存特性をはじめ、通常の液系 LIB との特性の違いや、何が課題で何を解決しないといけないかを、明確にしていきたい。</p>	<p>③車載バッテリーの IEC 規格で規定されている安全性要求事項 9 項目(強制放電、過充電、振動・衝撃・圧壊、加熱・温度サイクル、短絡)については有機溶媒電解液を用いない全固体 LIB でクリアできないものは無いと判断している。また、液系 LIB に比べ、安全制御システムを多重化・冗長化する必要は無く、むしろ簡素化できる方向にあると判断している。 安全性へ影響が大きい加熱試験については検証を実施し液系 LIB より熱暴走に対して安全であることを確認した。液系 LIB との特性の違いとしては作動温度範囲について評価を実施し全固体 LIB の方が広い温度域で作動することを実証した 経年劣化を考慮した充放電制御(回路)については、後半 2 年間の研究開発の中で課題の有無を把握することとし、耐久性の確保に取り組む検討の中で液系 LIB との経年劣化挙動の違いを把握し、充放電制御に関して実用化の障害となる課題が無いことを確認している。 サイクル劣化や保存劣化等に関する液系 LIB との挙動(特性)の違いを明確化することは延長契約時における後半 2 年間の実施計画書に反映させた。</p>

2.9 評価に関する事項

本事業に関して実施された評価を表 2.9-1 に示す。

表 2.9-1 「先進・革新蓄電池材料評価技術開発(第2期)」に対する評価

名称	実施時期	評価方法	事務局
事前評価	2017年6月	研究評価委員会	評価部
中間評価	2020年10月	現地調査会・分科会 研究評価委員会	評価部
事後評価	2022年7月	現地調査会・分科会 研究評価委員会	評価部

第3章 研究開発成果について

3.1 「研究開発項目① 共通基盤技術開発」の研究開発成果

3.1.1 要素技術に関する研究開発成果

(1) 第1世代全固体 LIB の要素技術開発

前半3年間の要素技術成果を取り込んで試作した実証セルの仕様、性能は以下のとおりである。

- ① 設計容量 11mAh の 2cm 角単層セルであり、アルジロナイト系電解質、三元系正極活物質、天然黒鉛系負極活物質を用いた。
- ② 実証セルの体積エネルギー密度は 450Wh/L 以上となり、設定した要素技術の性能実証目標をクリアした。また、6C レート充電についてもクリアした。
- ③ 実証セルの作製プロセスは、電解質スラリーを基材上にブレードコーターで塗工・成形し、合材正極・負極スラリーは集電体上にダイコーターで塗工・シート成形した後、各シートを積層し、一体で加圧することにより接合・緻密化するプロセスで行った。実証セルの断面 SEM-EDX マッピング像において、電解質層及び電極層は均一な厚さで成形されており、また、緻密な電解質薄膜及び活物質・電解質粒子が高分散した厚膜電極が得られていることを確認した。
- ④ 図 3.1.1-1 に示すような、セルの面積を 10 倍以上とした 4×12.5cm 中型単層セルでの実証も行い、2cm 角単層セルと同等の性能が得られることを確認した。また、図 3.1.1-2 に示すように、4×12.5cm 中型単層セルの CC 放電容量は 140mAh 以上で、2cm 角単層セルの面積倍(12.5 倍)の容量となっていることを確認した。

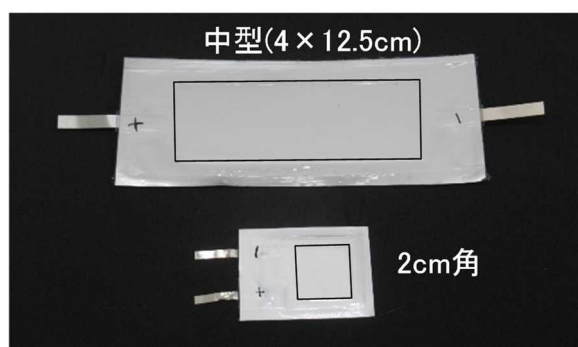


図 3.1.1-1 実証セルの外観

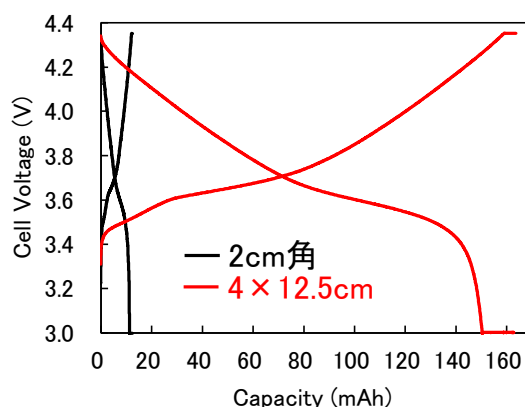


図 3.1.1-2 実証セル(第1世代全固体 LIB)の充放電曲線

全固体 LIB のメリットを確認するため、正極ハーフセルで液系 LIB と動作温度範囲を比較検討した。その結果を図 3.1.1-3 に示す。25℃以上の温度では全固体 LIB の容量は液系 LIB と同等以上で、特に 60℃を超える温度において、液系 LIB では電解液のガス化や熱分解などにより容量が低下するが、全固体 LIB では容量低下は見られなかった。また、-40～25℃の温度範囲において液系 LIB のほうが容量は多いが、-40℃以下になると電解液の凝固や粘度上昇により極端に容量低下した。一方、全固体 LIB では、-60℃においても作動することを確認した。以上より、全固体 LIB は-60～100℃の広範囲な温度範囲で安定作動できることが示唆された。

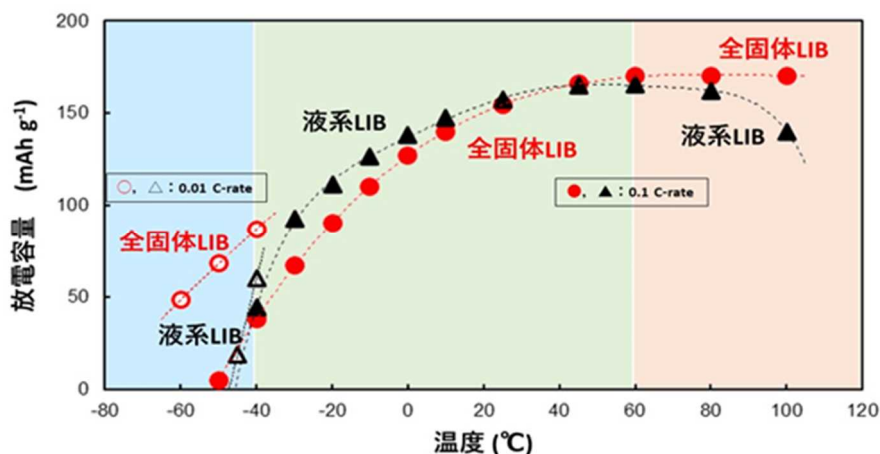


図 3.1.1-3 液系 LIB と全固体 LIB の比較(低温～高温駆動)

前半 3 年間で基盤技術を確立した 4×12.5cm 中型セルについて、セル積層化技術を開発した。集電体への電極両面塗工技術の開発、プレス装置を用いた加圧(緻密化、接合)技術の開発、積層体端部の絶縁処理技術の開発、ラミネートセル化技術の開発等を実施した。

これらの要素技術の開発成果を取り込んだ 4×12.5cm 10 積層の実証セルを試作し、性能実証することで開発した要素技術の妥当性を検証した。以下に概略を示す。

- ① 実証セルの基本仕様を表 3.1.1-1 に示す。設計容量は 1.4Ah であり、アルジロダイト系電解質、三元系正極活物質、天然黒鉛系負極活物質を用いた。
- ② 4×12.5cm 10 積層実証セルの体積エネルギー密度は、450Wh/L 以上をクリアした。急速充電特性については現在検証中である。また、図 3.1.1-4 に示すように、10 積層セルの CC 放電容量は 1400mAh 以上で、単層セルの積層数倍(10 倍)の容量となっていることを確認した。
- ③ 実証セルの作製プロセスを図 3.1.1-5 に示す。合材正極・負極スラリーを集電体上にダイコーターで塗工・成形したシート電極上に、電解質スラリーを基材上にダイコーターで塗工した電解質層を加圧転写・成形した。その後、各シートを積層、端部絶縁処理を行い、加圧接合するプロセスでセル作製を行った。

表 3.1.1-1 実証セルの基本仕様

設計容量	1.4Ah
電極形状・サイズ	4×12.5cm 10 積層
正極活物質	三元系
負極活物質	天然黒鉛系
固体電解質	アルジロナイト結晶系

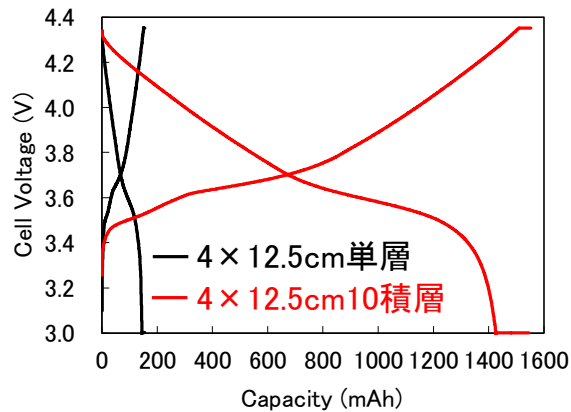


図 3.1.1-4 積層実証セル(第 1 世代全固体 LIB)の充放電曲線

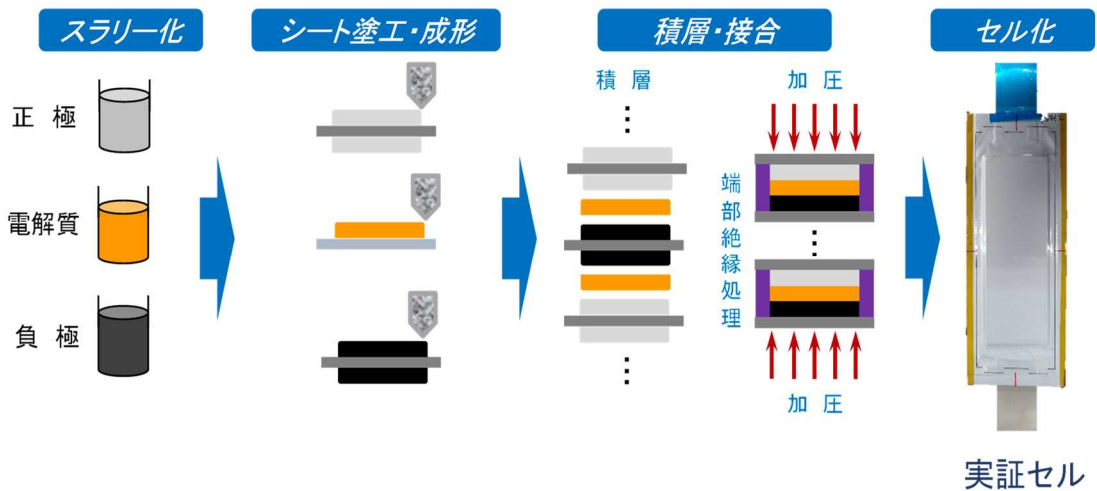


図 3.1.1-5 実証セル(積層セル)の作製プロセス

本事業終了までに、積層・接合プロセスや端部絶縁処理の適正化、セル設計の細部の見直し等を進めながら、4×12.5cm 10 積層の実証セルの試作安定性を向上させ、急速充電性能を含めた性能実証をさらに進める。

次に、第 1 世代全固体 LIB の要素技術開発の一環として実施した個別技術の成果について以下に示す。

(a) 固体電解質粒子の微細化の検討

電極内での活物質-電解質界面の密着性を向上させ、同時に活物質の充填比率を高めるためには、微細で均一な固体電解質粒子を用いる必要がある。

そこで、固体電解質粒子を初期の粒径 $5\mu\text{m}$ レベルから微細化をすることを試みた。検討においては、均一な微細化の実現に加えて、微細化に伴い生じるイオン伝導度の低下など固体電解質性能を低下させないことを目的として、粉砕方式を選定するとともに、そのプロセス条件の適正化を図った。

その結果、三井金属鉱業ではアルジロダイト系電解質の検討を行い、粒径 $5\mu\text{m}$ レベルからメディアン径 (D_{50})= $0.7\mu\text{m}$ に微細化できた。また、出光興産はガラスセラミックス系電解質について検討を行い、粒径 $5\mu\text{m}$ レベルからサブミクロンレベルに微細化できた。

(b) LiNbO_3 被覆正極活物質の検討

正極活物質と固体電解質の界面においては副反応により高抵抗の被膜が形成されるが、活物質表面をニオブ酸リチウム (LiNbO_3) で被覆することで副反応を抑制できることが知られている。ただし、図 3.1.1-6 に示すように、この被覆が不均一である場合には露出した活物質表面が電解質に曝され、部分的に副反応が進行してしまう。その一方で、露出部分を低減するために過剰な量の被覆を施すと、固固界面の Li イオン伝導性が低下し、全固体 LIB に期待されている充電(入力)性能の発揮を阻害する。そのため、 LiNbO_3 の被覆形態としては「均一かつ薄い」状態で「活物質全表面が覆われている」ことが求められる。

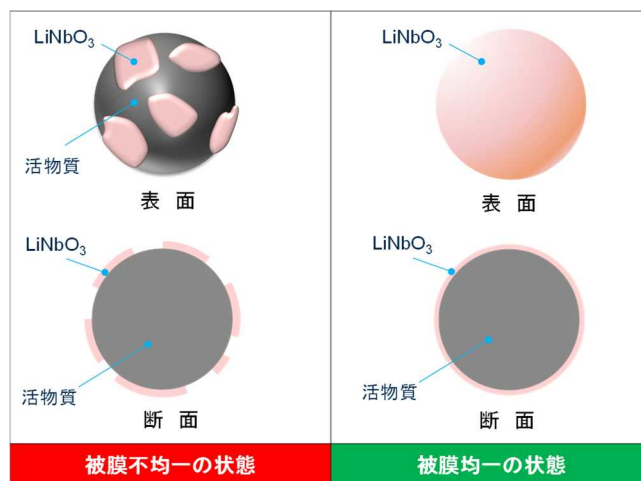


図 3.1.1-6 LiNbO_3 による正極活物質の被覆状態イメージ

本事業においては、図 3.1.1-7 に示す流動層造粒、遠心転動造粒及び攪拌造粒の 3 機能が付加された転動流動造粒コーティング装置を用いて、均一かつ薄い LiNbO_3 層で被覆された三元系正極活物質の微粒子を造粒するためのプロセス条件(被覆スプレー液の濃度、噴霧量、噴霧速度等)の適正化を検討した。

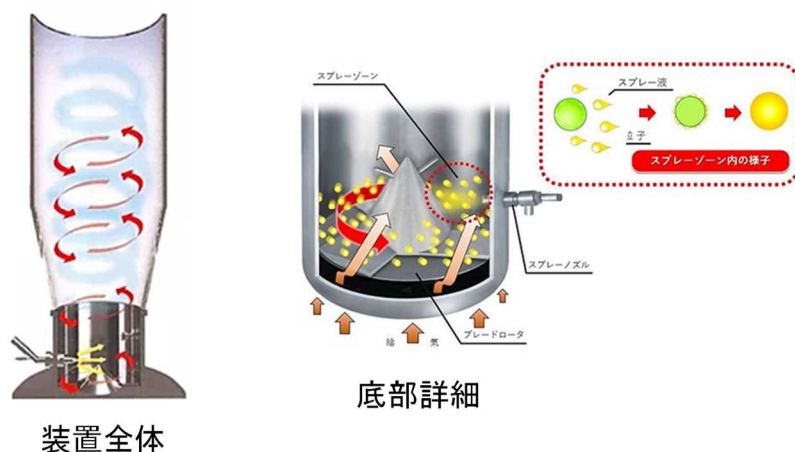


図 3.1.1-7 転動流動コーティング装置の原理

プロセス条件の適正化前と適正化後における三元系正極活物質表面の SEM-EDX マッピング像を図 3.1.1-8 に示す。後述する正極活物質の被覆状態評価法を用いて推定した LiNbO_3 層の被覆率は、適正化前が 85%程度であったのに対して、適正化後は 95%以上になるとともに、 LiNbO_3 層の被覆量は半分以下となった。

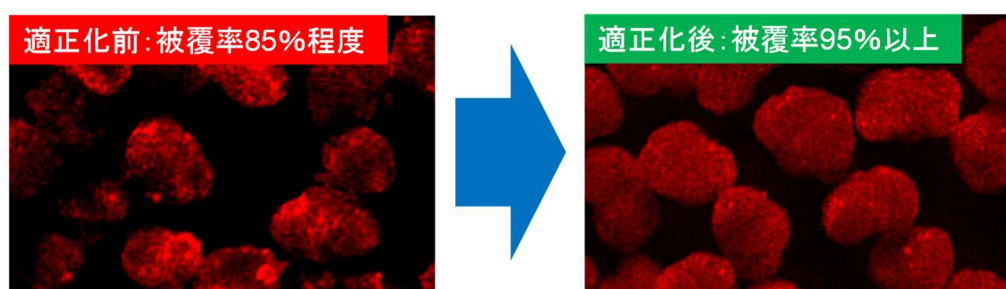


図 3.1.1-8 プロセス条件の異なる正極活物質表面の SEM-EDX マッピング像

また、被覆プロセス条件の適正化前と適正化後の LiNbO_3 被覆活物質を用いて作製した圧粉体成形 In-Li ハーフセルの充電容量試験の結果を図 3.1.1-9 に示す。適正化後においては、適正化前に比べて 1C レートでの充電容量が約 30%向上したことが確認されたので、このプロセス条件で作製した LiNbO_3 被覆の三元系正極活物質を前記した実証セルに組み込むこととした。

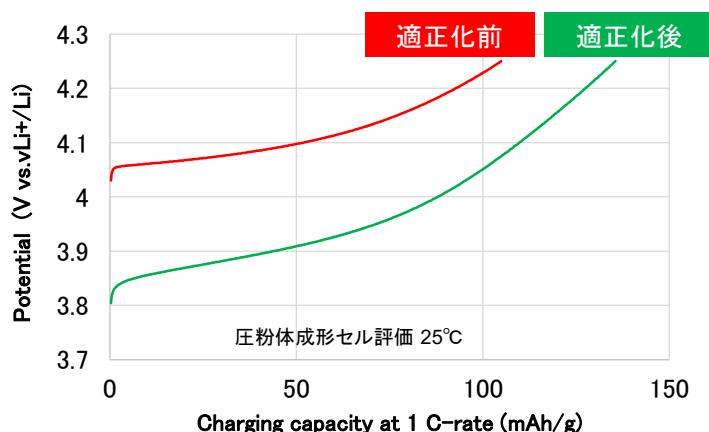


図 3.1.1-9 プロセス条件の異なる圧粉体正極ハーフセルの充電容量試験結果

さらに、転動流動式ではコーティング時間が長く、活物質同士の衝突による割れが生じることが課題であったため、NEDO の「新エネルギー等のシーズ発掘・事業化に向けた技術研究開発事業(2019 年度)」で採択された「電極活物質への無機材料の薄膜コート技術の実用化研究開発」において、(株)カワタが開発した高速気流分散方式のコーティング技術(図 3.1.1-10)を用いて短時間・均一コーティングを試みた。

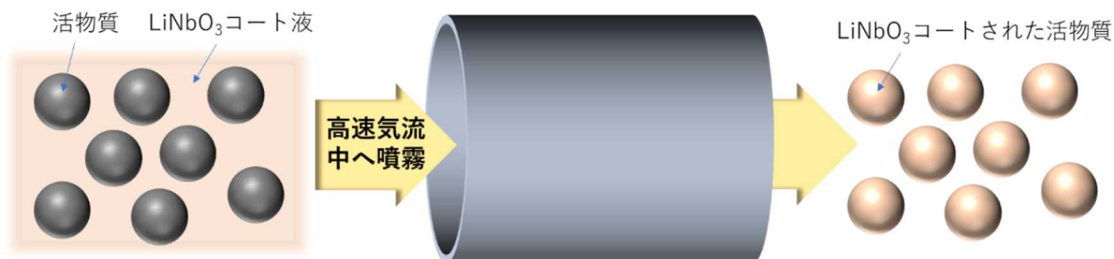


図 3.1.1-10 高速気流分散式コーティング装置の原理

その結果、転動流動式では 180 分かかっていたコーティング時間は 10 分に短縮可能となり、図 3.1.1-11 に示すように活物質の割れも見られなかった。また、図 3.1.1-12 に示すように、電池特性は適正化後の転動流動式コーティングと同等以上の結果が得られた。

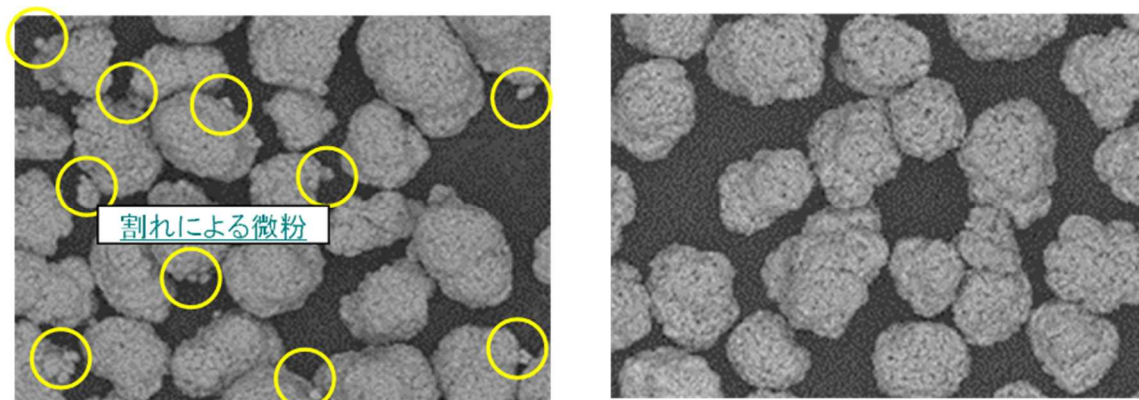


図 3.1.1-11 転動流動式(左)と高速気流分散式(右)によるコーティング後の活物質

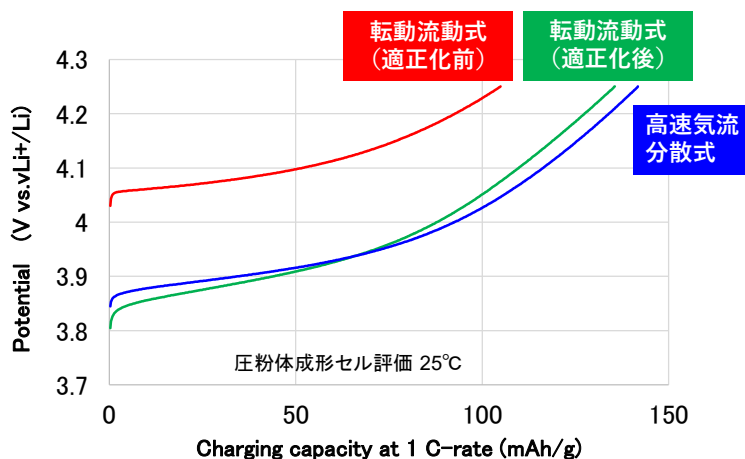


図 3.1.1-12 プロセス条件の異なる圧粉体正極ハーフセルの充電容量試験結果

(c) 正極活物質の LiNbO₃ 被覆状態評価技術の開発

LiNbO₃ 被覆の状態を評価する方法として TEM と SEM が考えられるが、前者は活物質表面の部分的な観察となり、後者は低空間分解能であり、また定量性に乏しいため、得られる情報が限定的かつ定性的となる。そのため、LiNbO₃ が「均一かつ薄い」状態で「活物質全表面を覆っている」ことを定量的に評価する手法の開発に取り組んだ。

まず、LiNbO₃ が「均一かつ薄い」状態であることの評価手法として、蛍光 X 線元素分析法 (XRF) によって LiNbO₃ の被覆全量を測定するとともに、X 線光電子分光法 (XPS) によって表面から深さ方向で 5nm 程度の領域における元素構成 (表面の Nb 濃度) を測定し、これらの測定値を縦横軸上にプロットすることで評価する手法を考案した。前記した転動流動造粒コーティングのプロセスの適正化前と適正化後の LiNbO₃ 被覆活物質について、XRF と XPS の測定結果をプロットしたものを図 3.1.1-13 に示す。この結果より、プロセス条件の適正化後の正極活物質については、LiNbO₃ の被覆全量が半分以下となり、また、表面に近い領域での Nb 濃度が約 1.1 程度になっていることから、均一かつ薄い状態の被覆が施されていると判断した。また、高速気流分散式コーティングを行うことにより、さらに均一で薄膜の被覆が施されたと考えられる。

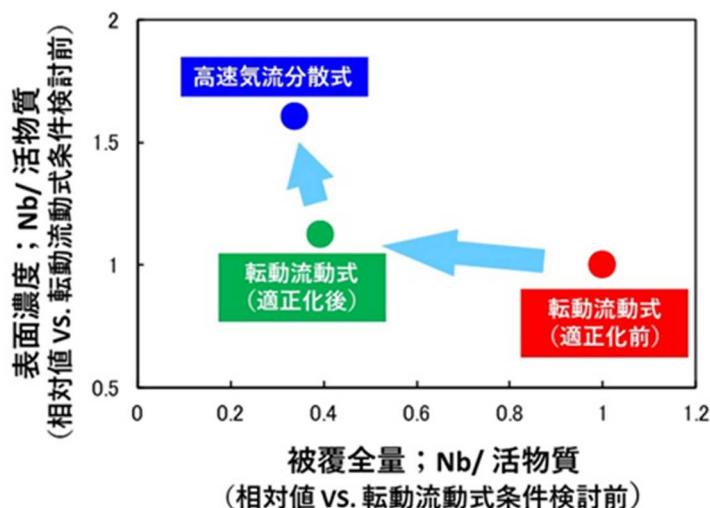


図 3.1.1-13 プロセス条件の異なる正極活物質の XRF・XPS 測定結果

前記したように、XPS の測定範囲は表面から 5nm 程度の領域となるため、例えば、2nm の厚みで活物質が被覆された状態にあった場合、測定結果には下地 (活物質) の情報も含まれるため、活物質全表面が、LiNbO₃ で覆われているのかは正確に把握できない。そこで、低エネルギーイオン散乱分光法 (LEIS) によって、LiNbO₃ 被覆活物質の表面元素量 (例えば、三元系活物質由来の Ni、Co、Mn の量) を測定し、LiNbO₃ が被覆されていない活物質の表面元素量と比較する手法を考案した。

この場合における被覆活物質における表面被覆率は、次式で定義することにした。

$$\text{表面被覆率} = 1 - (\text{被覆活物質の表面元素量} \div \text{未被覆活物質の表面元素量})$$

前記と同様に、転動流動式コーティングのプロセスの適正化前と適正化後及び高速気流分散式コーティングの LiNbO₃ 被覆活物質について、LEIS 測定を行い、表面被覆率を算定した結果を図 3.1.1-14 に示す。この結果より、プロセス条件の適正化後及び高速気流分散式コーティングの正極活物質については、LiNbO₃ の表面被覆率が 95% 以上に向上していると判断した。

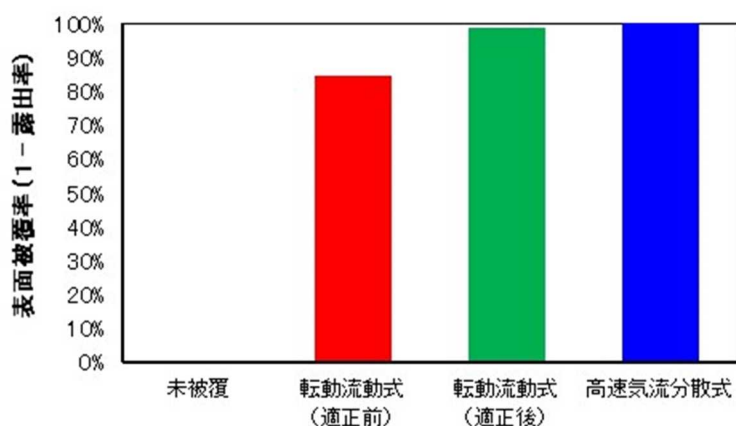


図 3.1.1-14 プロセス条件の異なる正極活物質の LEIS 測定結果に基づく表面被覆率

(d) 負極活物質(黒鉛)の選定基準の検討

種々の黒鉛活物質を入手し、硫化物系固体電解質と組み合わせてハーフセル(圧粉体成形)を作成し、25°Cにおける比容量を測定した。この測定結果と黒鉛活物質の層間距離及び結晶子サイズの関係を整理したものを図 3.1.1-15 に示す。この結果より、液系 LIB の場合と同様に、黒鉛活物質の黒鉛化度とバルク結晶性が高いほど比容量が高い傾向にあることが確認され、これを黒鉛活物質の選定基準とすることにした。

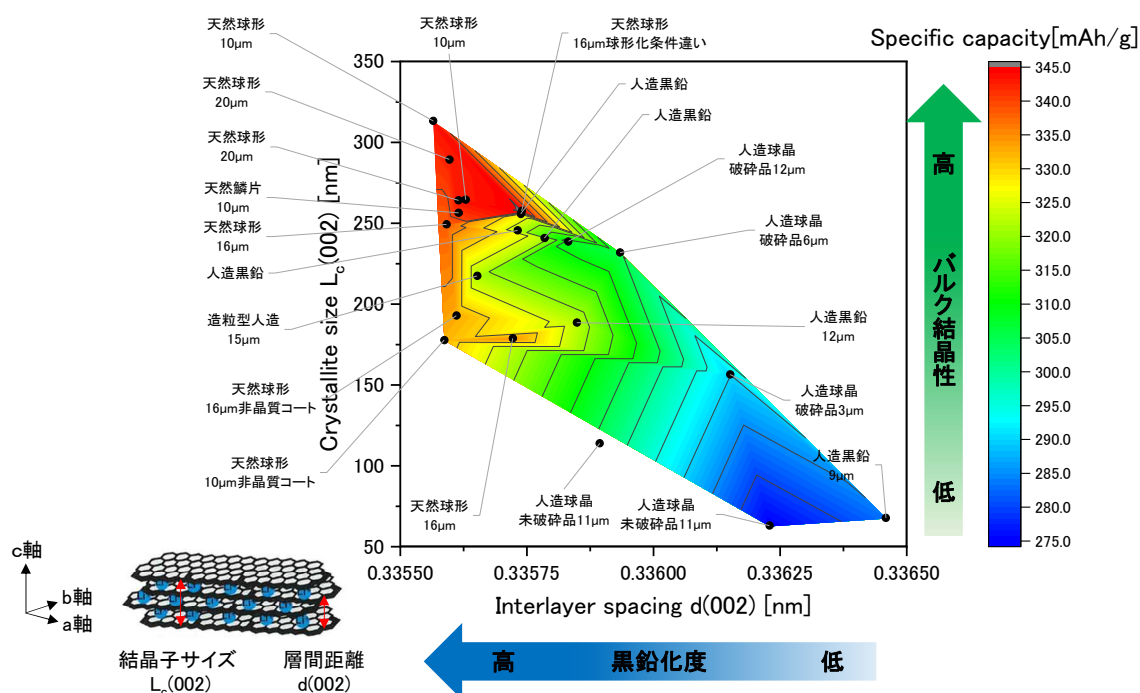


図 3.1.1-15 黒鉛負極の比容量と活物質の黒鉛化度・バルク結晶性の関係

(e) 電極内のイオン輸送抵抗低減の検討

負極は、図 3.1.1-16 に示すように、シート塗工・成形後の電極をプレス加圧(緻密化)した際、黒鉛活物質粒子が電極の厚み方向に対して横長に配向・変形することにより、Li イオンの伝導パスが伸長し、イオン輸送抵抗が増大し、セルの入力特性の低下を招く。

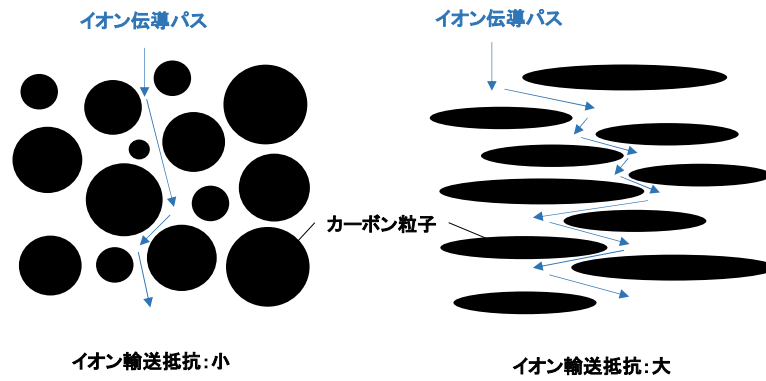


図 3.1.1-16 黒鉛活物質粒子形状と電極のイオン輸送抵抗の関係

そのため、種々の黒鉛活物質について、その機械的性質（弾性率、硬度等）、粒形サイズ、及びプレス加圧前後における粒子形状（アスペクト比、球形度、包絡度等）に関するデータベースを構築した。このデータベースに基づいて改良した黒鉛活物質について、プレス加圧後の電極のイオン輸送抵抗を測定したところ、従来の黒鉛活物質に比べて約 20%の低減が確認されたことから、これを前記した実証セルに組み込むこととした。

このイオン輸送抵抗低減を検討する上で、黒鉛活物質の粒子形状解析手法を構築した。

液系 LIB で広く適用されているレーザー回折式の粒度分布測定では、球体を仮定して粒径分布だけを試算するため、粒子形状に関する統計情報を得ることはできない。そこで、マルバーン・パナリティカル社製の光学顕微鏡画像解析システム「モフォロギ G3」を用いて、カーボン材の粒子形状分布の統計解析を行うこととした。図 3.1.1-17 に黒鉛活物質の形状分布解析結果の一例を示す。実証セルの電極設計仕様では 1mm²あたりに含まれる黒鉛活物質の粒子数は約 1 万個であることから、余裕をもって 2~3 万個の粒子に対して計測した。なお、正確に統計情報を得るためには活物質粒子の凝集を解消する必要があり、付属の加圧式噴霧分散機を用いた。オートフォーカス機能とオート検出機能を有する光学顕微鏡により粒子毎に画像を撮影し、粒径に関する情報に加え、アスペクト比、球形度、包絡度、真円度等に関する統計情報が得られている。

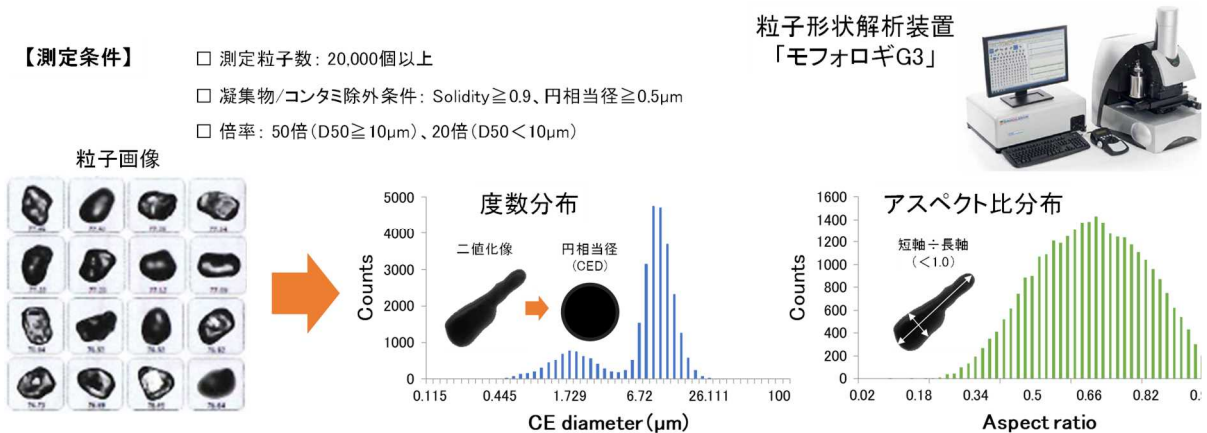


図 3.1.1-17 黒鉛活物質の粒子形状解析結果の一例

(f) 電極内の反応抵抗低減の検討

正極においては、前記の正極活物質のコーティング手法により被覆状態が変化し充電容量に影響を及ぼすことを示した。同様に反応抵抗について検討したところ、図 3.1.1-18 に示すように転動流動式プロセス条件の適正化により抵抗は低減し、高速気流分散式コーティングによりさらに低減した。

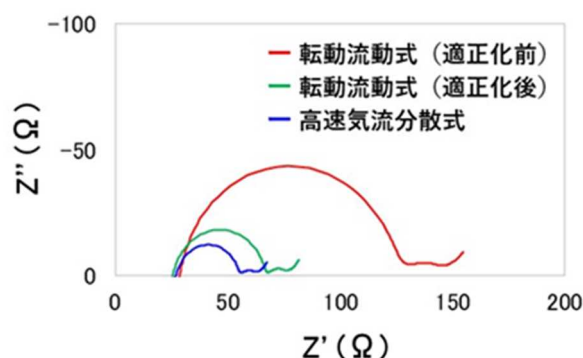


図 3.1.1-18 プロセス条件の異なる圧粉体正極ハーフセルのインピーダンス結果

一方、負極においては、前記したように、プレス加圧後における黒鉛活物質の球形化度を高く維持した方がイオン輸送抵抗の低減を回避できるが、その一方で比表面積が小さくなるため、電解質との接触面積が少なくなり、電極としての反応抵抗は大きくなる。

そこで、何種類かの黒鉛活物質粒子について、表面の結晶性、物理的な表面構造、比表面積を測定するとともに、ハーフセルに組み込んで電極の反応抵抗を測定した。その結果、ピッチ系炭素を用いた液相法等により黒鉛活物質粒子の表面を被覆あるいは改質し、表面結晶性を制御すると、電極の反応抵抗が 50%以上、低減することが確認された。

この反応抵抗低減の検討を実施する上で、黒鉛活物質原粉の幾何表面積を算定する手法を構築した。

上記した光学顕微鏡による画像解析システムで計測された円相当径を用いて、2~3 万個の黒鉛活物質粒子それぞれについて体積と表面積を算出し、合計体積に真密度を乗じて総重量を算出することとした。そして、総表面積を総重量で除した値を幾何比表面積と定義した。この手法で算出した幾何比表面積と BET 法で計測した比表面積の関係を図 3.1.1-19 に示す。

造粒型の天然球形化黒鉛、一次粒子系の人造黒鉛のどちらにおいても、同一原鉱(同じメーカーの同じ出発原料)であれば、幾何比表面積と BET 値はほぼ線形関係であることが分かった。一方、表面コートをした天然球形化黒鉛の場合、表面の微細な凹凸や粒子内細孔が被覆されるため、BET 値が大幅に小さくなることが分かった。

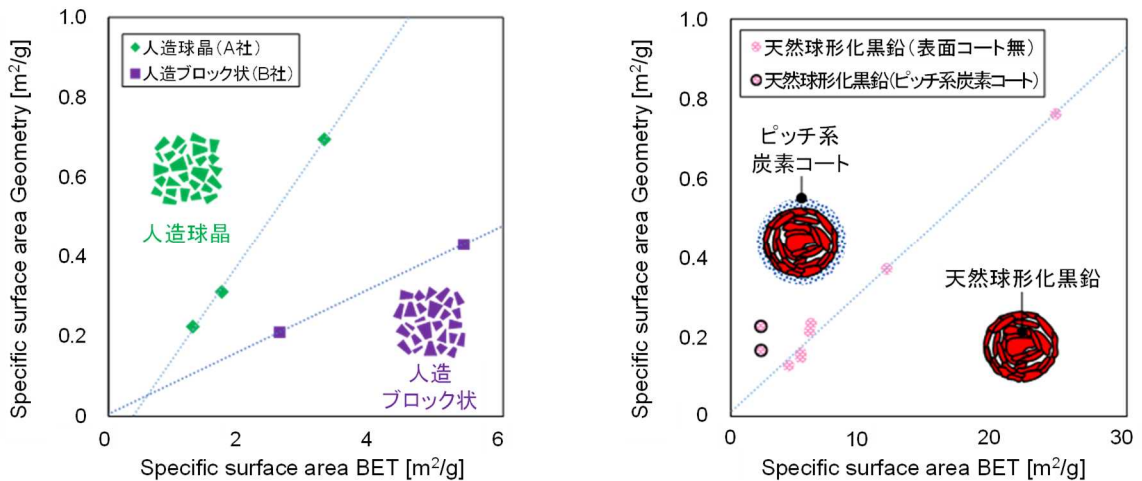


図 3.1.1-19 画像解析で求めた幾何比表面積と BET 値の関係

(g) 固体電解質層の薄層化プロセスの開発

第 1 世代全固体 LIB の性能実証目標として設定した体積エネルギー密度 450Wh/L 以上をクリアするため、固体電解質層の薄層化は必要不可欠な要素技術である。前半 3 年間では、本事業の開始時点で 100 μ m 以上あった固体電解質層の厚さを 20 μ m に薄層化することに成功した。薄層化プロセスは、2 種類のプロセスを並行して検討した。1 つ目は、本事業の第 1 期で基本プロセスを確立していた「転写プロセス」で、基材上に塗布形成した固体電解質層をプレスによって電極上へ転写するものである。薄層化の過程で、スジ引きや凝集体を抑制するスラリー作製技術の開発、転写不良を抑制する基材選定やプレス条件の検討を行い、20 μ m 以下の固体電解質層を安定的に形成するプロセスが確立できた。2 つ目は、図 3.1.1-20 に示すような、貫通多孔シートを支持体として固体電解質を埋め込んで自立シートを形成する「自立膜プロセス」である。

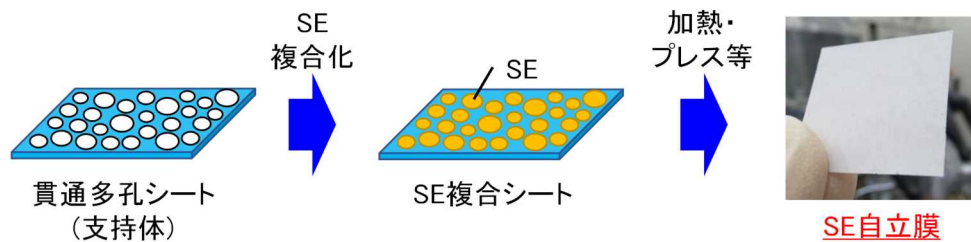


図 3.1.1-20 自立膜プロセス

図 3.1.1-20 に示した自立膜は、支持体となる貫通多孔シートとしてポリエステル不織布を用い、固体電解質スラリーを塗布することで固体電解質を複合化して作製したものである。この自立膜を固体電解質層として使い、2cm 角単層セルにおいて性能検証したところ、図 3.1.1-21 に示すように、「転写プロセス」と同等の基本性能を示すことを確認した。

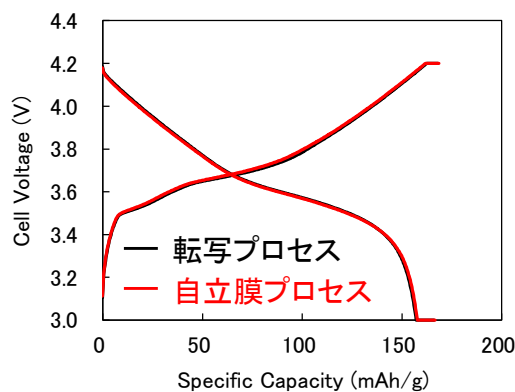


図 3.1.1-21 自立膜プロセス及び転写プロセスで作製した 2cm 角単層セルの充放電曲線

後半 2 年間は、大面積での安定的な固体電解質層の形成を目的とし、「転写プロセス」における基材上への電解質層の塗布をブレードコートからダイコートに変更する検討を行った。結果として、電解質層の目付安定性、4×12.5cm セルの試作歩留りが大きく向上した。また、「自立膜プロセス」においても大面積化に取り組み、4×12.5cm セルでの実証が可能となった。

(h) 電極層の高容量化・高入力化プロセスの開発

本事業の開始時点の電極層は、活物質比率が低い、材料分散性が低い、空隙率が高い、といった問題があり、セルとしての体積エネルギー密度は 200Wh/L に満たなかった。体積エネルギー密度 450Wh/L 以上をクリアするため、初期は、前記の微細化した固体電解質を用い、活物質比率を向上させることに取り組んだ。結果として、体積エネルギー密度は 350Wh/L 以上に向上したが、充電レート特性は著しく低下した。そこで、前記した活物質の改良等の材料面の要素技術開発に加え、プロセス面の要素技術を並行して推進した。具体的には、高い材料分散性を実現するスラリー作製プロセスの開発、電極空隙率を 10%以下まで低減する高充填化プロセスの開発、セルの内部抵抗低減に寄与する電極層—固体電解質層接合プロセスの開発を行い、体積エネルギー密度 450Wh/L 以上と 6C レート充電を両立することに成功した。

(i) 電極層／固体電解質層の接合プロセスの開発

塗工電極を用いたシート成形セルにおいては、正極層／固体電解質層／負極層の各層間の密着性が重要となる。各層間の密着性が電池特性に与える影響を調査するため、図 3.1.1-22 に示すような層間の密着性を変えたセルを作製した。(a)はセルの組立過程で 3 層を加圧により接合し、(b)は正極層／固体電解質層を、(c)は負極層／固体電解質層をセルの組立過程では加圧接合を行わず、組立後にラミネートセルを拘束する外部圧力(加圧接合圧力の約 1/50)で界面を密着させた。したがって、(a)に対して、(b)は正極層／固体電解質層、(c)は負極層／固体電解質層の層間がそれぞれ緩く接合された状態である。3 水準のセルを 25℃環境下、0.1C レートで充放電試験を 3 サイクル行った結果、各セル間で充放電容量の差異はなかった。これらのセルを SOC50%に充電して、最大 0.5C レートで 10 秒間放電した時の DC-IR 測定を行ったところ、(a)の抵抗に対して(b)は約 2 倍、(c)は約 1.3 倍大きい結果となった。これより、正極層／固体電解質層の界面密着性は、負極層／固体電解質層に対して劣ることが分かった。次に、SOC50%でインピーダンス測定を実施した結果、抵抗が高かった(b)のセルでは高周波側の 100k~1MHz 近傍の抵抗成分が極めて大きいことが分かった。高周波側の抵抗成分は固体電解質粒子間の抵抗に

よるものであり、正極層／固体電解質層の接合が緩い状態の場合、正極層の電解質粒子と固体電解質層の電解質粒子の接触が不十分であるために、固体電解質粒子間の抵抗が増加したと考えられる。さらに、(a)～(c)のセルの充電レート特性を評価した結果、(b)のセルは(a)と比較して前述の抵抗上昇による容量低下が見られた。一方で、(c)のセルは高レート充電時に短絡が発生した。負極層／固体電解質層の接合が緩い状態の場合、負極層の粒子と固体電解質層の粒子の接点が少なく、高レート充電で局所的に反応が進行する箇所が存在し、リチウムデンドライトが析出して短絡が発生したと考えられる。三極式のラミネートセルを作製して負極の電位を測定したところ、実際に短絡時には電位が 0V に達しており、リチウムデンドライトの析出を支持する結果となった。

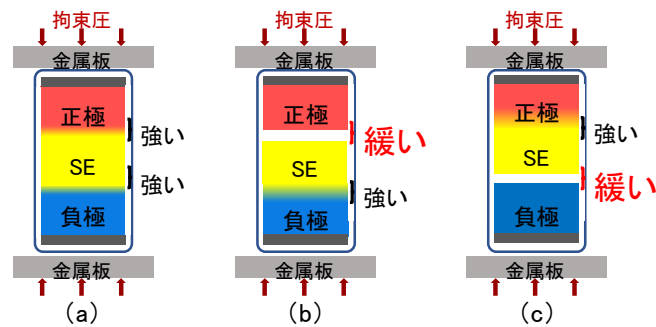


図 3.1.1-22 層間密着性を変化させたシート成形セルのモデル図

(j) 連続プロセスのモデル構築

量産化を見据えた連続プロセスのモデルを構築する検討を進めた。本事業の第 1 期において確立したシート成形セルの作製プロセスは、小スケールの混練・分散装置を用いて作製したスラリーをブレードコーターで塗布し、冷間等方圧プレス(CIP)で個別に高充填化させた後に、各層を CIP で接合するものである。このプロセスは標準電池モデルの作製プロセスの基盤となっており、高い歩留りを示すものの、個別処理が主体のバッチプロセスである。そこで、液系 LIB プロセスを参考にした中スケールの混練・分散装置を用いたスラリー作製、ダイコートによる塗布、ロールプレスによる高充填化・接合等、連続化を視野に入れたプロセスの開発を進めた。一例として、正極層のロール to ロール連続塗工では、図 3.1.1-23 に示す塗布長約 200m の塗膜を得ることに成功した。塗膜の幅方向の膜厚分布、流れ方向の目付分布ともに変動係数が 2%未満となり、高い塗工精度が実現できていることを示した。

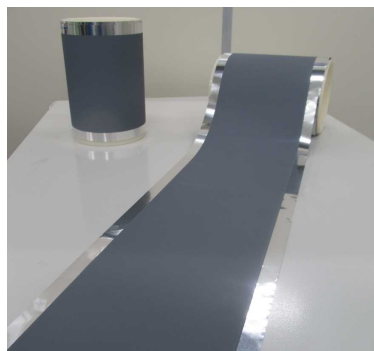


図 3.1.1-23 ロール to ロール塗工正極

(2) 次世代全固体 LIB の要素技術開発

前半 3 年間は、第 1 世代全固体 LIB の実証セルの設計・試作で得られた知見をベースに、高容量・高電位の正極・負極活物質の組合せを検討し、高 Ni 三元系正極活物質と Si 系の負極活物質の組合せを中心に研究開発を進めることとした。また、高安定性固体電解質の創出に向け、硫化物系固体電解質の変質・劣化の挙動を正確に把握することが可能な評価システムを集中研究拠点 (LIBTEC) に構築し、種々の電解質の耐湿性を確認した。

さらに、各要素技術の成果を取り込んだ実証セルの試作にも着手した。試作した実証セルの仕様、性能は以下のとおりである。

- ① 設計容量 8mAh の 2cm 角単層セルであり、アルジロダイト系電解質、三元系正極活物質、Si 系負極活物質を用いた。
- ② 実証セルの体積エネルギー密度は 550Wh/L であった。
- ③ 実証セルの作製は、電解質スラリーを基材上にブレードコーターで塗工・成形し、合材正極・負極スラリーを集電体上にブレードコーターで塗工・シート成形した後、各シートを積層し、一体で加圧することにより接合・緻密化するプロセスで行った。

後半 2 年間は、性能実証目標として設定した体積エネルギー密度 800Wh/L の実現に向け、電極の高容量・高電位化、正極層の厚膜化等を進めるとともに、高安定性固体電解質の創出に継続して取り組んだ。

これらの要素技術の開発成果を取り込んだ実証セルを試作し、性能実証することで開発した要素技術の妥当性を検証した。以下に概略を示す。

- ① 実証セルの基本仕様を表 3.1.1-2 に示す。設計容量 24mAh の 2cm 角単層セルであり、アルジロダイト系電解質、三元系正極活物質、Si 系負極活物質を用いた。
- ② 実証セルの充放電試験結果を図 3.1.1-24 に示す。設計どおりの容量を確認し、要素技術の性能実証目標として設定した体積エネルギー密度 800Wh/L を大きく超える 860Wh/L 以上 (初期性能) を実証した。
- ③ 実証セルの作製は、第 1 世代全固体 LIB の実証セルの試作で得られた知見をベースに、電解質スラリーを基材上にダイコーターで塗工・成形し、正極スラリー、負極スラリーを集電体上にダイコーターで塗工・シート成形した後、各シートを積層し、一体で加圧することにより接合・緻密化するプロセスで行った。電解質スラリー及び正極スラリーは、第 1 世代全固体 LIB の実証セル試作と同仕様で、固体電解質層の厚さは同等、正極層の厚さは約 2 倍となるように塗工した (図 3.1.1-25)。

表 3.1.1-2 実証セルの基本仕様

設計容量	24mAh
電極形状・サイズ	2cm 角単層
正極活物質	三元系
負極活物質	Si 系
固体電解質	アルジロダイト結晶系

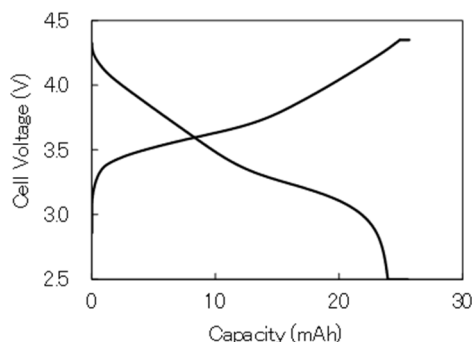


図 3.1.1-24 実証セル(次世代全固体 LIB)の充放電曲線

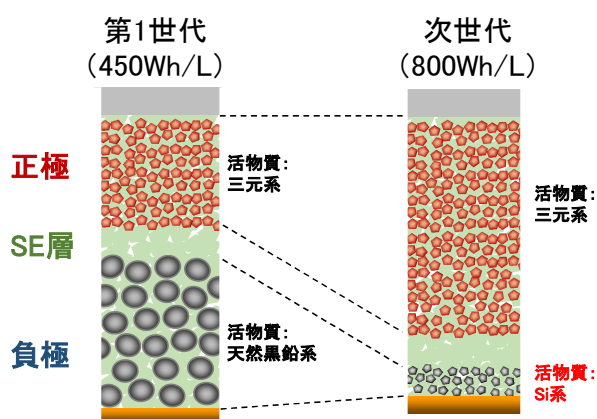


図 3.1.1-25 実証セルの構成

これまでに次世代全固体 LIB の要素技術開発の一環として実施した検討の成果について以下に述べる。

(a) 電極活物質の組合せの検討

第 1 世代全固体 LIB の実証セルの設計・試作で得られた知見をベースに、高容量・高電位の正極・負極活物質を選択した際に得られるセルの体積エネルギー密度の範囲を簡易試算した。その結果を図 3.1.1-26 に示す。なお、電解質層の厚さは第 1 世代全固体 LIB の実証セルと同等としている。また、電解質のイオン伝導性が飛躍的に向上すれば、超厚膜の電極構造が取れるため、異なる結果が得られるものと予想される。

この試算結果より、体積エネルギー密度 800Wh/L 以上が得られる次世代全固体 LIB の実用化に向けては、正極活物質として高 Ni 三元系及び硫黄を、また、負極活物質として Si、Si 合金及び金属 Li を用いる必要があることが分かり、本事業においては、これらの電極活物質の組合せでセルを構築し、所定の充放電性能を発揮させるための要素技術の開発を進めることとした。

ただし、硫黄正極や金属 Li 負極は高エネルギー密度化のポテンシャルは高いものの、技術的な課題が多く、またそのハードルも高いことから、高 Ni 三元系、多硫化物系及び Li 過剰系の正極活物質と Si 系の負極活物質の組合せを中心に研究開発を進めることとした。

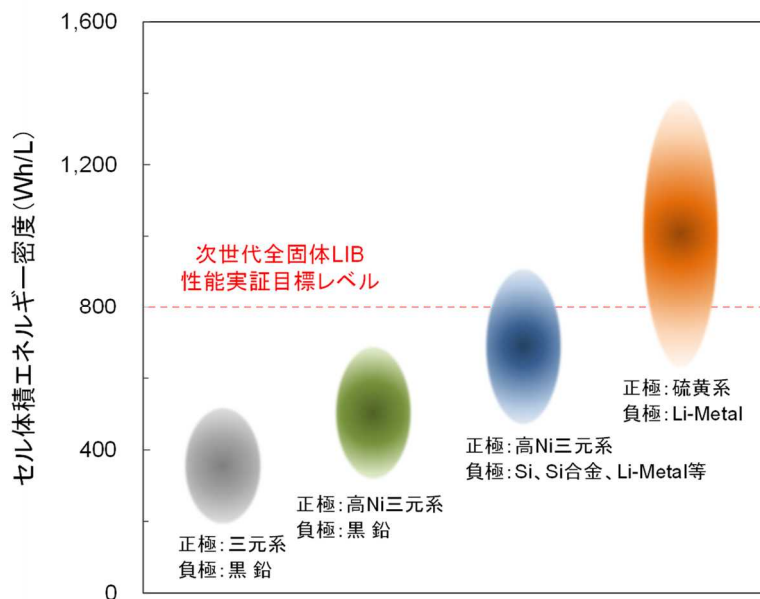


図 3.1.1-26 各種電極活物質の組合せによるセルの体積エネルギー密度の試算例

(b) 正極活物質候補の検討

各種正極活物質の体積エネルギー密度の試算結果を図 3.1.1-27 に示す。

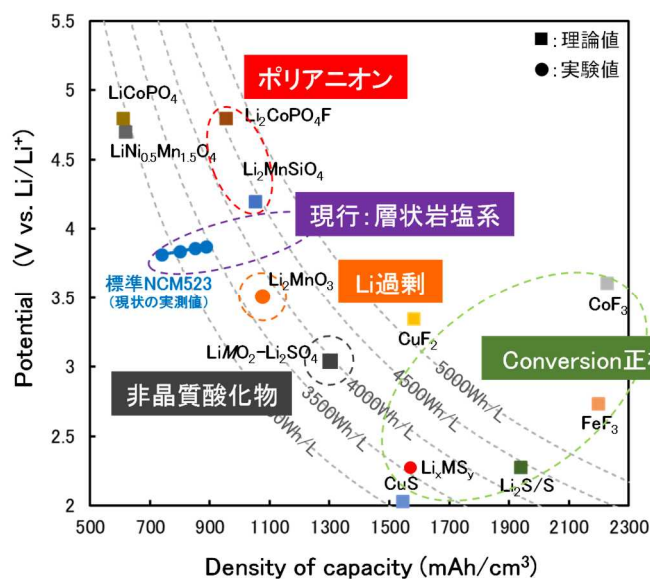


図 3.1.1-27 各種正極活物質の体積当たりの比容量の計算結果

この結果より、次世代全固体 LIB の正極活物質としては、①高電位のポリアニオン型活物質、②固溶体(Li 過剰系)、③Conversion 正極等の高容量活物質(多硫化物系)、④高 Ni 化により容量密度を向上させた層状岩塩型酸化物(主に三元系)、⑤三元系活物質の作動電圧向上(4.5V レベルの中電位化)、⑥非晶質酸化物の 6 つを候補として選定した。後半 2 年は⑤三元系活物質の作動電圧向上をメインに劣化解析を含めて開発を進めた。さらに、高容量化を目指した ④高 Ni 化により容量密度を向上させた層状岩塩型酸化物、②固溶体(Li 過剰系)、③Conversion(多硫化物系)にも着手した。

(c) 高容量・高電位正極活物質の被覆技術の検討

第1世代全固体 LIB と同様に、活物質-電解質界面における高抵抗被膜の形成有無及びメカニズムを把握しつつ、高容量・高電位の正極活物質表面への被覆技術の検討を進めた。

その検討の第一ステップとして、第1世代全固体 LIB の実証セルに適用した LiNbO_3 被覆が三元系活物質の中電位化にも対応可能であるのかについて検討した。

圧粉体成形の In-Li ハーフセルを用いて、4.25V と 4.55V でのフローティング試験を行った。その結果、図 3.1.1-28 に示すように、4.25V では容量劣化はほとんど起きていないが、4.55V では大きく容量劣化することが確認された。また、別途実施した XRD 解析ではバルクの活物質に結晶構造変化が確認されなかったことより、 LiNbO_3 被覆層で副反応が進行していると推測された。

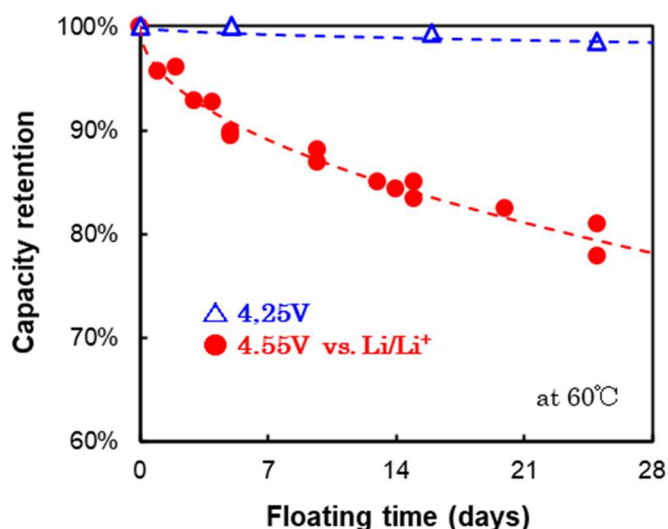


図 3.1.1-28 LiNbO_3 被覆三元系正極のフローティング試験による容量劣化

そのため、4.25V と 4.55V で 5 日間フローティング試験を行った後の活物質-電解質界面近傍を飛行時間型二次イオン質量分析法 (TOF-SIMS) にて解析したところ、図 3.1.1-29 に示すように 4.55V の高電位では PO_x の成分が確認され、固体電解質が酸化分解されていることが分かった。

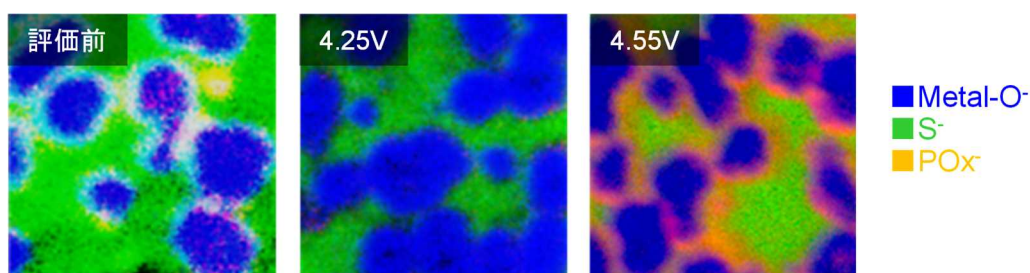


図 3.1.1-29 フローティング試験による TOF-SIMS マッピング

(d) 高容量負極活物質の検討

サテライトの大学・研究機関が検討している Si 溶射膜及び Si 粉末について、硫化物系固体電解質を組み合わせた In-Li ハーフセルを作製し、その特性を評価した。

Si 溶射膜については、柔軟性を向上させた硫化物系固体電解質層を適用することにより、表面に凹凸・空隙が存在する Si 溶射膜との密着性を向上させた結果、3,000 mAh/g レベルの初期容量が得られることが確認された。また、Si 粉末についても Si、電解質、導電助剤の配合比の適正化を図り、図 3.1.1-30 に示すように 3,000 mAh/g レベルの初期容量が得られることが確認された。

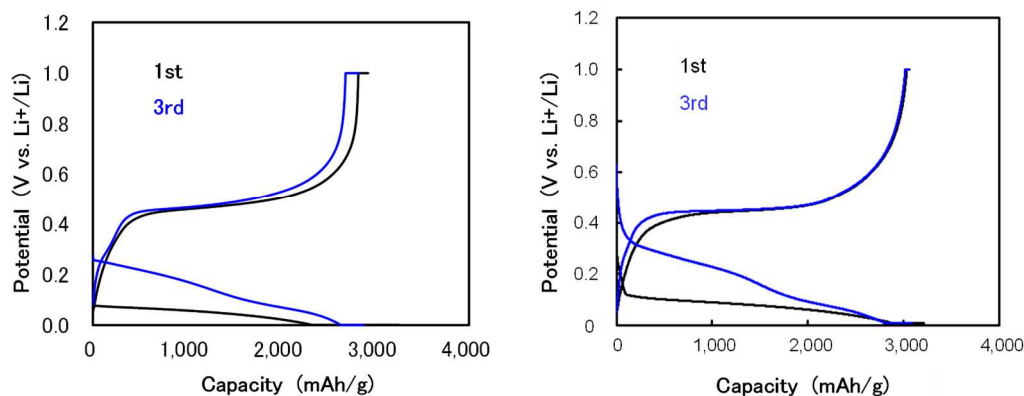


図 3.1.1-30 Si 負極を用いたハーフセルの充放電曲線
(左:溶射膜 右:粉末合材)

ただし、図 3.1.1-31 に示すように、Si 溶射膜、Si 粉末のどちらも充放電サイクルを繰り返すと、容量劣化が生じていることが確認された。原因としては、Si 系活物質に特有の膨張収縮による粒子割れやイオン・電子伝導パスの損壊であると推察される。特に Si 溶射膜は膜中に固体電解質を含まないため膨張収縮の影響が大きく劣化が加速されたと考えられる。

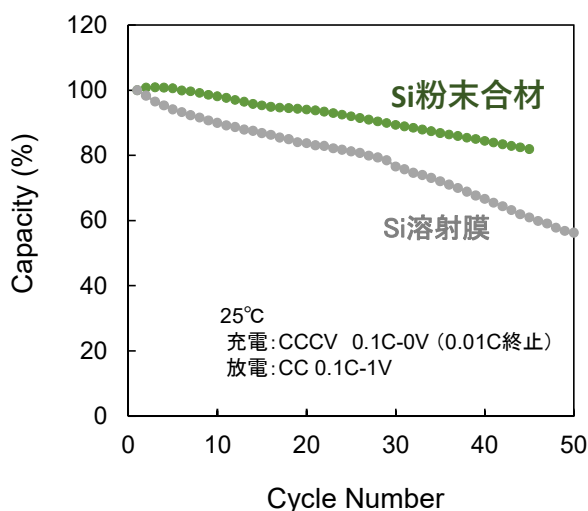


図 3.1.1-31 Si 系活物質を用いたハーフセルの充放電サイクル試験結果

次に、高容量負極活物質を用いた圧粉体セル評価法の見直し検討を行った。Si は第 1 世代のカーボン負極に比べて 1 桁容量が大きいいため、同じレートで評価すると 1 桁多く電流を流すことになる。圧粉体セル評価は、短絡防止のためセパレータ層を厚く (550 μ m) しており、図 3.1.1-32 (左) に示すように 0.1C 充放電にて評価するとセパレータ層の抵抗が影響し、CC 放電容量は大きく減少する。そこで、対極 In-Li の厚みやプレス条件などを最適化して、セパレータ層を薄膜化しても短絡しないよう検討した結果、セパレータ層を 165 μ m まで薄膜化することができた。その結果、図 3.1.1-32 (右) に示すように 0.1C 充放電においても、検討前の図 3.1.1-32 (左) の 0.02C と同等の放電容量が得られることを確認した。1C 評価においても検討前の 0.1C の放電容量と同等の容量が得られたため、以降、サイクル特性評価は充電: 1C-CCCV、放電: 1C-CCCV で実施することとした。

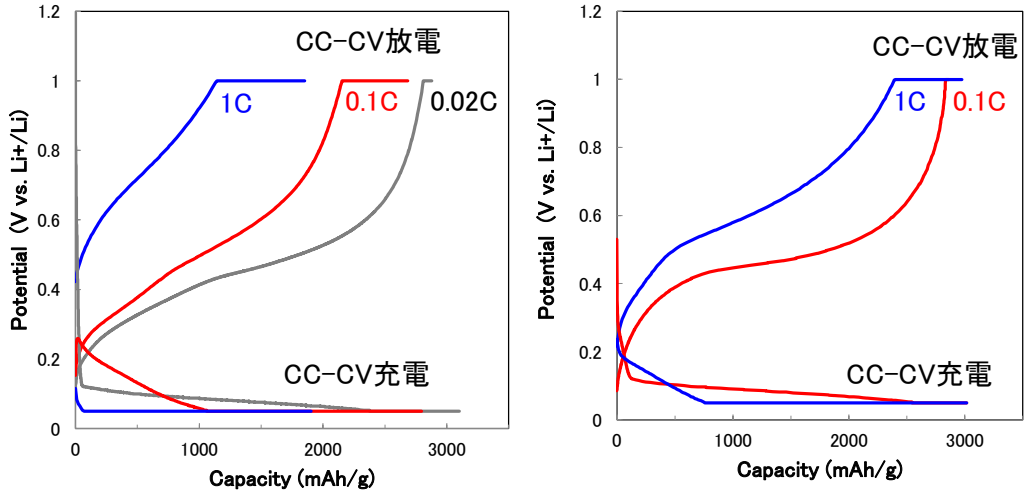


図 3.1.1-32 セパレータ層薄膜化検討の結果
(左: 検討前 550µm、右: 検討後 165µm)

前記した Si 粉末(平均粒径:2µm)では、膨張収縮による粒子割れ等が生じサイクル特性が悪化したと考えられる。Liu らによると、割れを抑制するには粒径 150nm 以下にする必要がある¹⁾ため、プラズマスプレー法によりナノ粒子(平均粒径: 50nm)を合成した。その結果、図 3.1.1-33 に示すように初期容量は粒径 2 µ m(図 3.1.1-30)と同等の 3,000mAh/g レベルが得られることを確認し、サイクル特性評価においては、図 3.1.1-34 に示すようにナノ粒子化により耐久性が改善されることを確認した。

¹⁾ Ref. Liu et al., ACS NANO 6 1522 (2012)

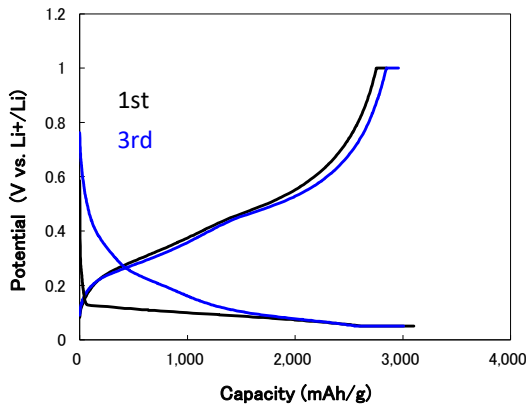


図 3.1.1-33 Si(平均粒径:50nm)負極を用いたハーフセルの充放電曲線

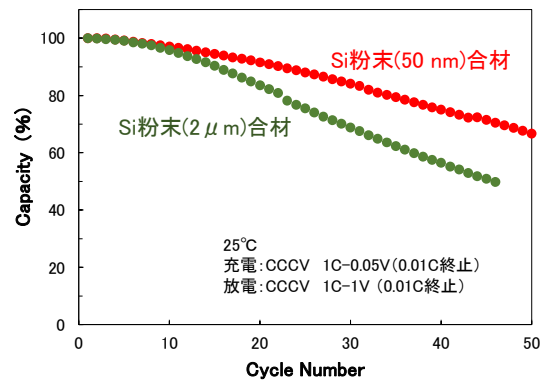


図 3.1.1-34 Si 粒子径の違いによるハーフセルの充放電サイクル試験結果

(e) 固体電解質の耐湿性評価・解析

硫化物系固体電解質がどの程度の水分暴露でイオン伝導度が低下するのか、水分暴露の時間経過による性能変化の進み方はどうなるのかといった変質・劣化の挙動を正確に把握するために使用する評価システムを LIBTEC に構築し、種々の電解質の耐湿性を確認した。

耐湿性評価システムの構成を図 3.1.1-35 に示す。グローブボックス(調湿ボックス)に除湿機を

接続し、設定露点に対する現在の露点の差を計測し、除湿機の運転にフィードバックすることにより、グローブボックス内を所定の露点に制御し、ここから調湿された空気をポンプにより一定の流量で反応容器に供給するシステムとなっている。除湿機を 2 台連結することにより、グローブボックス内の空気の露点は、 -10°C から -50°C で $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の精度で制御可能となっている。反応容器には硫化水素濃度計が接続されており、リアルタイムで硫化水素濃度を計測することで、硫化水素発生速度を定量的に把握可能である。

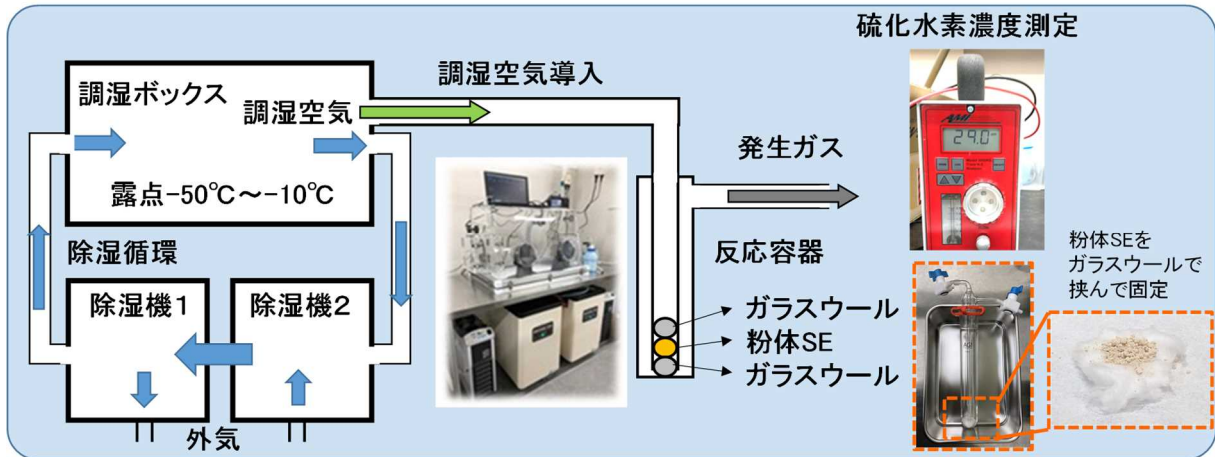


図 3.1.1-35 固体電解質の耐湿性評価システム

また、サテライトの大学・研究機関においては、暴露前後の電解質に対して XRD 測定とインピーダンス測定を行う手法や、調湿空気を流しながら in-situ で XRD 測定を行う手法を開発した。さらに、暴露前後の電解質について Raman 分光、SEM-EDX、TEM 等による分析・観察を行い、劣化メカニズムの解明を進めた。耐湿性評価前後及び評価後に真空加熱した際のアルジロナイト結晶型固体電解質 ($\text{Li}_{(7-x)}\text{PS}_{(6-x)}\text{Cl}_x$) のインピーダンスと XRD 解析結果を図 3.1.1-36 に示す。

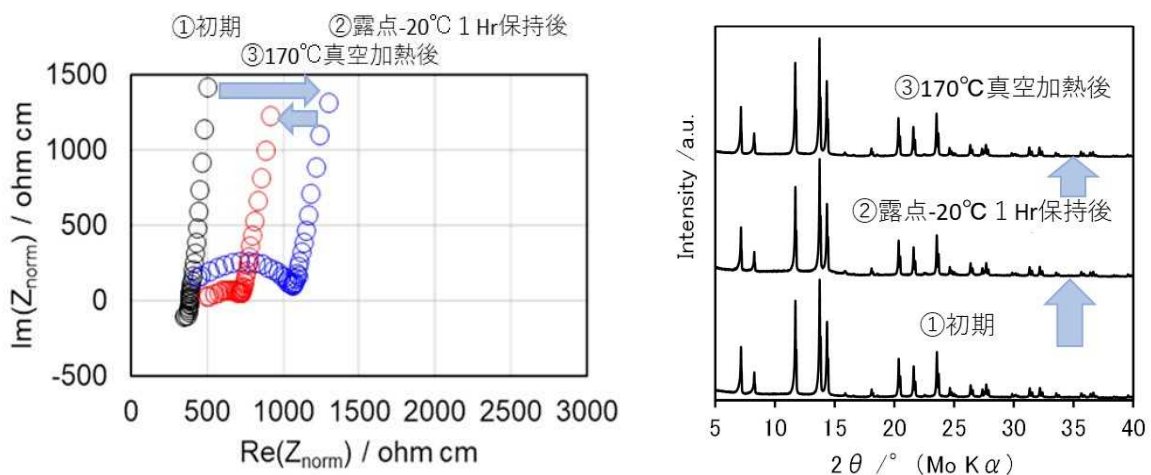


図 3.1.1-36 固体電解質の耐湿性検討結果(左:インピーダンス、右 XRD)

インピーダンスの結果より、露点 -20°C にて暴露すると抵抗は増加し、その後 170°C で真空加熱することによりある程度抵抗が回復することが分かった。特に反応抵抗に起因する成分が増減していることと、XRD の結果から結晶構造はほとんど変化していないことから、表面のみが変化していると推定される。また、TOF-SIMS 測定の結果、耐湿性評価及び真空加熱後は、炭酸リチウム、硫

酸リチウム、塩化リチウムが生成しており、固体電解質表面が水分と反応していることを確認した。

さらに、ガラスセラミックス型固体電解質 ($\text{Li}_3\text{PS}_4\text{-LiI}$) を用いて耐湿性評価を実施した。その結果を図 3.1.1-37 に示す。アルジロダイト結晶型固体電解質同様、露点 -20°C 暴露により抵抗は増加するが、XRD の結果より構造はほとんど変化していないため表面のみが変化していると考えられる。その後 100°C 真空加熱により抵抗は回復した。回復率はアルジロダイト結晶型 52% に対しガラスセラミックスは 80% と高く、耐湿安定性が高いことが分かった。これは、 Li_3PS_4 の PS_4 骨格が水と反応しにくいことが要因と考えられる。

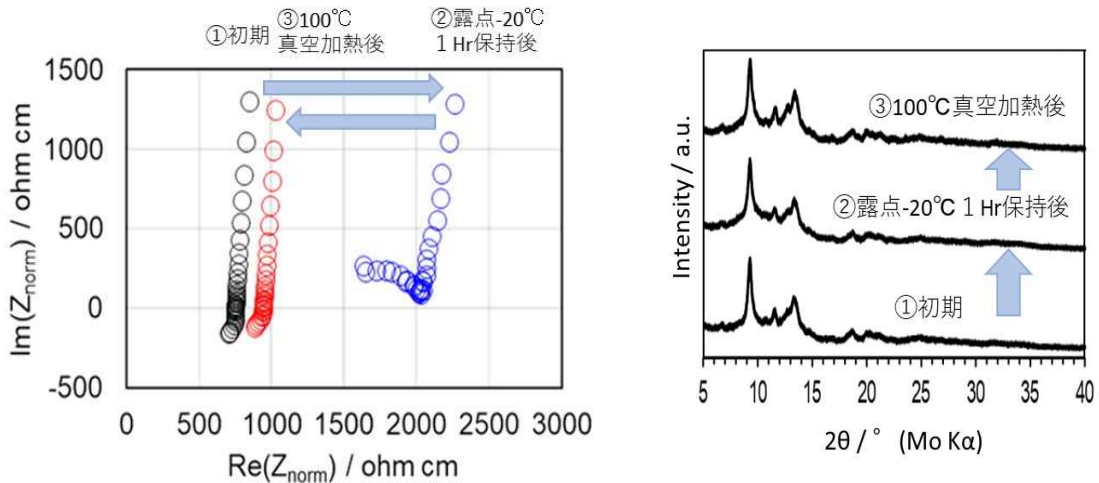


図 3.1.1-37 ガラスセラミックス型固体電解質 ($\text{Li}_3\text{PS}_4\text{-LiI}$) の耐湿性評価結果 (左: インピーダンス、右 XRD)

(f) 正極高電位化・正極高容量化の要素技術開発と評価解析

エネルギー密度向上のため、高電位・高容量材料である Li 過剰系正極活物質の適用検討を行った。図 3.1.1-38 は Li 過剰活物質 ($\text{Li}_2\text{MnO}_3\text{-LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$) を液系 LIB と全固体 LIB に適用した際の初回充放電特性を示す。

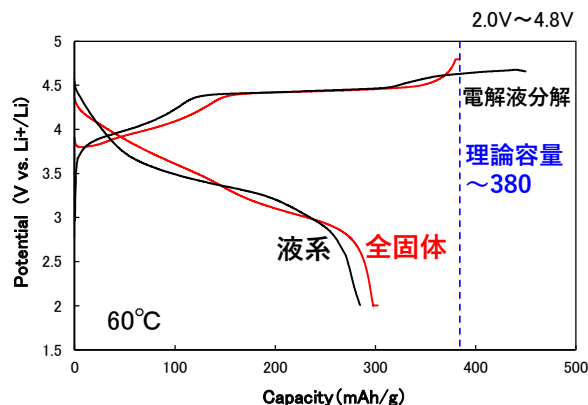


図 3.1.1-38 Li 過剰系活物質を用いたハーフセルの初回充放電曲線

液系 LIB では 4.5V を超えると電解液の分解と思われる不可逆容量が見られるが、全固体 LIB では同様な分解と思われる不可逆容量は見られなかった。放電容量は全固体 LIB の方が多く、全固体 LIB では、高電位まで充電が可能であるため液系 LIB よりも放電容量が増加したと考えられる。

次に、負極にカーボンや Si など Li を含まない系を想定し、Li 含有硫黄系活物質の検討を行った。一般的に硫黄系活物質は電子伝導性が悪く、正極材として使用するにはカーボンなど導電助剤を必要とするが、Li-V-S 金属多硫化物の合成に取り組み、導電助剤なしに 700mAh/g を超える比容量が得られることを確認した(図 3.1.1-39)。

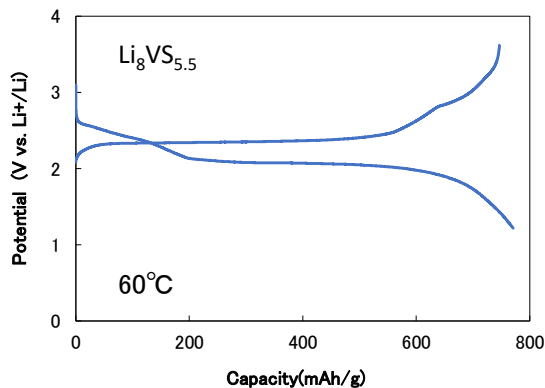


図 3.1.1-39 多硫化物正極活物質を用いたハーフセルの初回充放電曲線

(g) 高容量負極の評価解析

Si 系負極活物質は、黒鉛系負極活物質と比較して充放電時の体積変化が大きく、液系 LIB においては充放電中の粒子割れや合材破壊による劣化が報告されている。全固体 LIB において Si 系負極活物質を使いこなすためには、充放電時の体積変化がイオン・電子伝導パスや電極構造にどのような影響を及ぼすのかを明らかにする必要がある。そこで、高倍率で個々の活物質粒子の充放電挙動を把握できる FE-SEM オペランド測定に着目した。FE-SEM 測定は超高真空下で行うため、電解液が揮発してしまう液系 LIB では適用できない解析方法である。オペランド測定の流れを図 3.1.1-40 に示す。

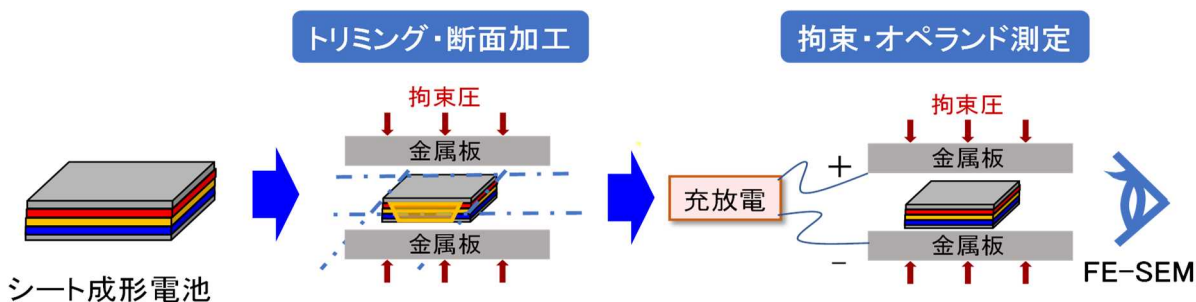


図 3.1.1-40 全固体 LIB の FE-SEM オペランド測定の流れ

Si 系負極活物質を用いた全固体 LIB のシート成形セルを観察用試験片に切り出し、観察面を加工した後、電極端子を取り付けた拘束治具に設置し、FE-SEM オペランド測定を行った。図 3.1.1-41 に負極層と固体電解質層部分を拡大したオペランド測定結果を示す。初期状態と比較して、充電時には負極層が約 2 倍に膨張し、負極層内に割れや空隙が発生している様子を捉えることができた。放電後もこの割れや空隙は残り、元の状態に戻っていない。一方で、正極層や固体電解質層には、充放電中の体積変化はほぼ見られなかった。観察対象への電子線照射のダメージが少ない反射電子像でより高倍率のオペランド測定も行い、充電時に個々の Si 系負極活物質粒子に亀裂や割れが生じていること、リチウムイオンの挿入脱離にともない活物質粒子のコントラス

トが変化することを捉えることができた。

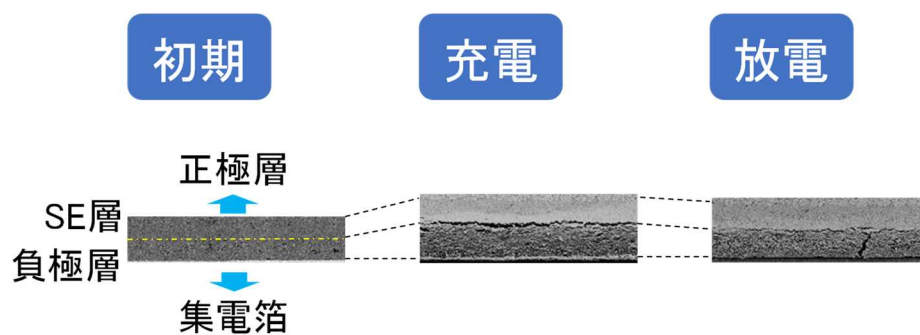


図 3.1.1-41 FE-SEM オペランド測定の結果(2 次電子像)

3.1.2 材料特性評価技術の開発

材料メーカー及び大学・研究機関で開発される全固体 LIB 用の新材料サンプルについて、新材料の得失、技術的課題及びセル量産プロセスへの適合性等を把握するため、標準電池モデル(セル)、圧粉電極、シート電極のハーフセルを準備し材料特性評価を進めている。

標準電池モデルの開発に関しバリエーションとしては、第1世代全固体LIBとして2cm角単層セル、4×12.5cm単層セル、次世代全固体LIBとして2cm角単層セルを要素技術開発の進展に合わせて開発する方針である。ただし、標準電池モデルの性能は、標準材料から新材料サンプルに置換しての評価を行った際、リファレンスとして機能するレベルで良く、最高である必要はないと考えている。むしろ、新材料評価を効率的に回すには、性能バラツキがなく、安定的に作製可能とする必要がある。

前半3年間では、第1世代全固体LIBの体積エネルギー密度300Wh/Lの2cm角単層セルの標準電池モデル(標準電池2)の開発が完了した。その後、体積エネルギー密度及び充電レート特性の向上のために、固体電解質層の薄層化や電極組成の見直し等を進めた結果、現在、体積エネルギー密度400Wh/Lの2cm角単層セルの標準電池モデル(標準電池2.1)の開発が完了し、同体積エネルギー密度で4×12.5cm単層の標準電池モデルの仕様化も完了見込みである。

開発済みの第1世代全固体LIBの標準電池モデル基本仕様を表3.1.2-1に示す。設計容量は8mAhであり、アルジロダイト系電解質、三元系正極活物質、天然黒鉛系負極活物質を用いている。

この標準電池モデルの25°C、0.1Cレートでの充放電曲線を図3.1.2-1に示す。放電、充電ともに、設計どおりの容量が発現している。図中には同一ロットの17個のセルの充放電曲線をプロットしているが、どれも大差なく、放電・充電容量は±3%以内に収まっている。

表 3.1.2-1 第1世代全固体LIBの標準電池モデル(標準電池2.1)の基本仕様

設計容量		8mAh
セル外形・サイズ		65×45mm
電極形状・サイズ		20×20mm 単層
体積エネルギー密度		400 Wh/L
標準材料	正極活物質	三元系
	負極活物質	天然黒鉛系
	固体電解質	アルジロダイト結晶系

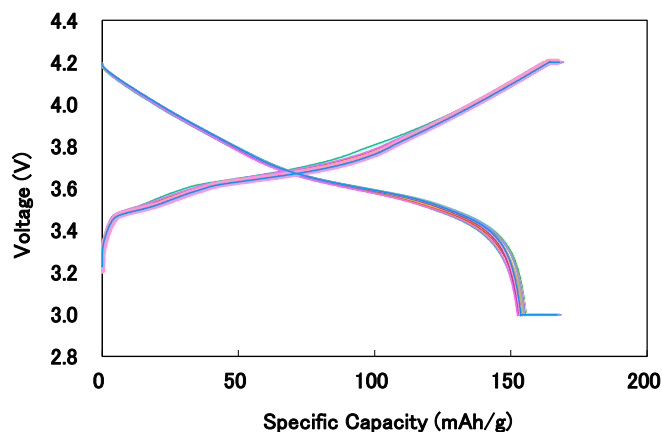


図 3.1.2-1 第1世代全固体LIBの標準電池モデル(標準電池2.1)の充放電曲線

また、この標準電池モデルの作製プロセスを図 3.1.2-2 に示す。

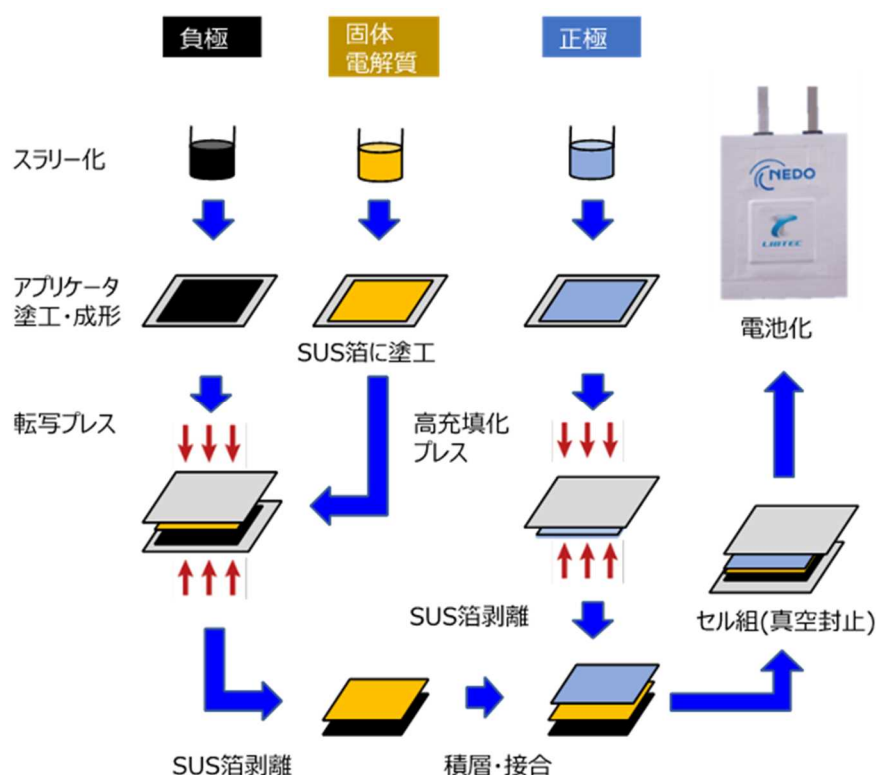


図 3.1.2-2 第 1 世代全固体 LIB の標準電池モデル(標準電池 2.1)の作製プロセス

電解質スラリー、正極スラリー、負極スラリーを基板(ステンレス箔)上にアプリケーションを用いて塗工してシート成形化する。次に、固体電解質シートと合材負極シートは重ねた状態で、一方、合材正極シートは単独で、プレスにより加圧・緻密化している。その後、ステンレス箔を取り除き、2つの合材電極シートを重ね、集電体で挟み込み、ラミネート外装に入れて真空封止している。

この作製プロセスを適用することで、月当たり 100 個の標準電池モデルを歩留り約 90%のレベルで作製可能であることを確認し、この標準電池モデルに関する作製仕様、作製要領、評価手順等をドキュメント化した。また、初期充放電特性及び寿命特性を安定化させるとともに、微短絡等の不具合が発生しやすい標準電池モデルを排除するため、完成後に実施するコンディショニングの方法・条件等を現在進めており、今後はこの結果もドキュメントに反映する予定である。

なお、この標準電池モデルは、既に本事業に参加している大学・研究機関に供給しており、全固体 LIB の反応・メカニズム解明や国際標準化を想定した試験評価法の開発等に活用している。

次世代全固体 LIB については、「3.1.1 要素技術に関する研究開発成果」に記載したように、正極層が厚いことや充放電にともなう負極層の体積変化が大きいことから、第 1 世代全固体 LIB と比較して性能バラツキが発生することが多かった。そこで、標準電池モデルとしてのセル設計を検討するとともに、作製プロセスにおいても実証セル試作において安定的な電極層・固体電解質層の塗工に寄与したダイコートによる塗工を導入することとした。現在、標準電池モデルの基本仕様は表 3.1.2-2 のように考えている。設計容量は 24mAh、体積エネルギー密度は 790Wh/L で、アルジロダイト系電解質、三元系正極活物質、Si 系負極活物質の標準材料を用いる。

表 3.1.2-2 次世代全固体 LIB の標準電池モデルの基本仕様

設計容量		24mAh
セル外形・サイズ		65 × 45mm
電極形状・サイズ		20 × 20mm 単層
体積エネルギー密度		790Wh/L
標準材料	正極活物質	三元系
	負極活物質	Si 系
	固体電解質	アルジロナイト結晶系

この標準電池モデルの 25°C、0.1C レートでの充放電曲線を図 3.1.2-3 に示す。放電、充電ともに、設計どおりの容量が発現している。図中には同一ロットの 10 個のセルの充放電曲線をプロットしているが、どれも大差なく、放電・充電容量は±3%以内に収まっている。

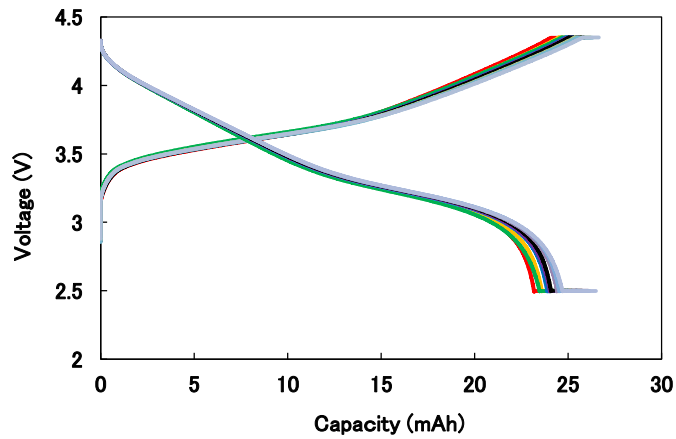


図 3.1.2-3 次世代全固体 LIB の標準電池モデルの充放電曲線

3.1.3 シミュレーション技術の開発

(1) 電極・セル特性のシミュレーション技術

液系 LIB の充放電特性のシミュレーションには、電極層厚さ方向のイオン・電子の輸送方程式、電気化学反応式、粒子内 Li 拡散方程式を連成して解析する方法である、J. Newman らにより提案された電気化学モデルが広く利用されている。本事業においては、この Newman モデルをベースにして、液系 LIB とは異なってくる全固体 LIB の電極構造情報、すなわち、電極内の空隙の存在及び活物質と電解質の接触状態を考慮した(i)イオン伝導モデル、(ii)電解質/活物質界面を考慮した電極モデルを開発した。液系 LIB と全固体 LIB との差異については、図 3.1.3-1 に示す。

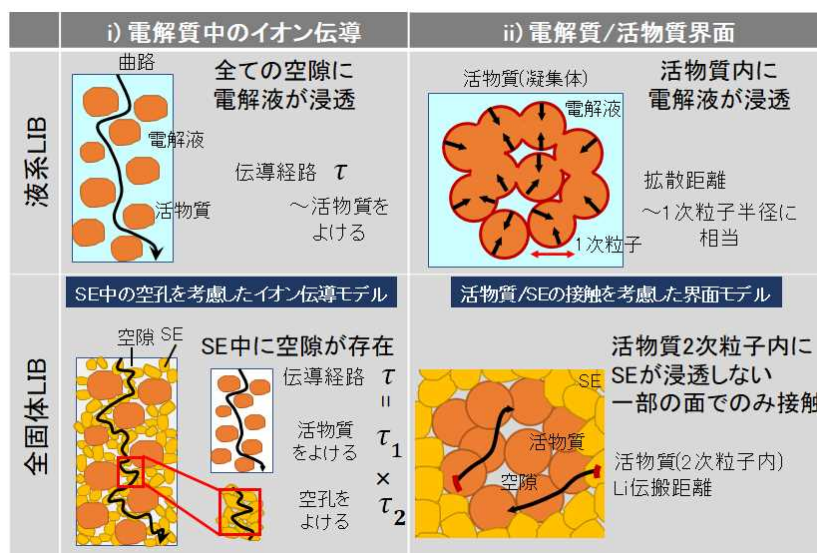


図 3.1.3-1 液系 LIB と全固体 LIB の差異点

① イオン伝導モデル

図 3.1.3-1 の左図に示すように、電解液が電極中の全ての空隙に浸透可能な液系 LIB に対して、全固体 LIB の場合は電極中の固体電解質中に空隙が存在する。そこで、電極内の空隙も含めて全固体 LIB のリチウムイオン伝導性の低下につながる要因解明を行った。確認されたいくつかの経路増加要因のうち、全固体 LIB の場合は電極内の空隙率と粒子の接触面積による影響が大きいことが分かった。一般的に曲路率は、空隙を回避する際の伝導経路長さと電極厚みの比率から算出することができるが、空隙率が増加すると曲路率が増加し、結果として、固体電解質本来のイオン伝導度が電極としては十分発揮できないことにつながる。そこで、電極内の空隙率と粒子の接触面積に焦点を当ててリチウムの有効イオン伝導度への影響について検討した(図 3.1.3-2)。

空隙回避等による曲路に加え、接触面積の影響はいずれもイオン伝導経路の形状による抵抗であるため、ここでは便宜上それらをまとめて経路抵抗と呼ぶことにする。さらに、その抵抗増加率は見かけの曲路率として表すことができると考え、この見かけの曲路率を経路抵抗係数という用語で定義した。

固体電解質層の有効イオン伝導度を電気化学測定とランダムウォーク法¹を用いて算出し、全固体 LIB 特有の有効イオン伝導度の低下要因について定量的に切り分けた基礎検討の例を紹介

¹ ランダムウォーク法を用いた曲路率算出の具体的手順について紹介する。計算を行う前に電極の構造情報が必要であり、2D であれば断面 SEM、3D であれば FIB-SEM や X 線 CT を用いて、もしくは計算によりコンピュータ内で電極構造のモデルを作製し構造情報を取得する。ランダムウォーク計算については構造体の中心近辺に開始点を配置して伝導障害物を避けながら進んだ平均二乗変位 (MSD) と、障害物の一切ない自由空間 (電解質だけで構成された均一) でランダムウォークしたときに進んだ平均二乗変位の比率から算出する。

する。アルジロナイト型硫化物系固体電解質を使用し、拘束圧及び成型圧を変化させて空隙率を制御し、種々の空隙率における有効イオン伝導度を電気化学測定により取得した。さらに、同仕様の固体電解質層の断面 SEM 画像を取得しランダムウォーク法を用いて経路抵抗係数を求め、そこから見積られる有効イオン伝導度を算出した。図 3.1.3-2 にそれぞれの結果について空隙率毎に有効イオン伝導度をプロットした結果を示すが、おおよそ一致していることが分かる。この結果より今回使用した固体電解質では固体電解質層の有効イオン伝導度を経路抵抗係数から見積もることができた。

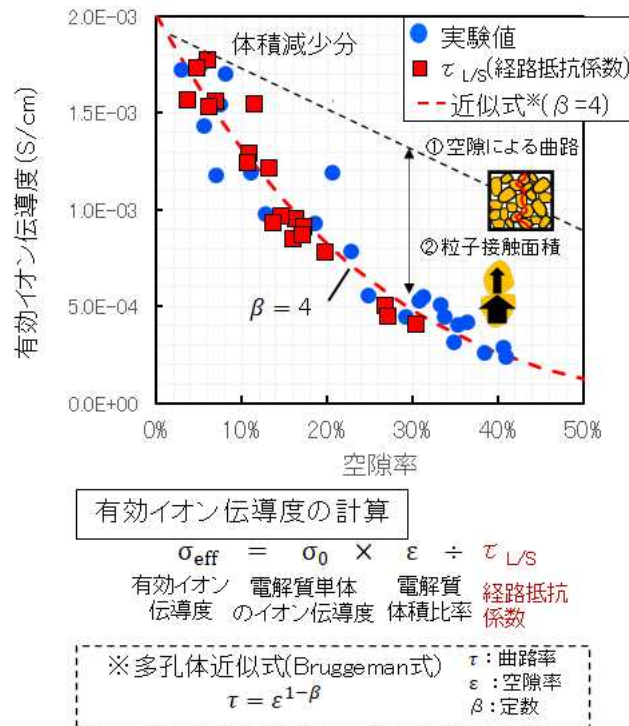


図 3.1.3-2 代表的な固体電解質の有効イオン伝導度測定結果と計算結果

図 3.1.3-3 に活物質/固体電解質の割合が異なる系で、電極内空隙比率を変化させた場合のイオン伝導度変化を示す。

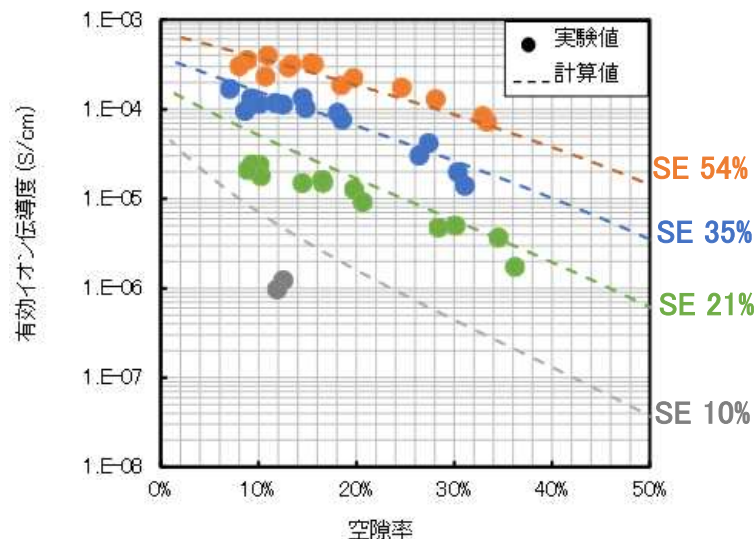


図 3.1.3-3 電極内空隙率による有効イオン伝導度変化

固体電解質割合が異なっても空隙が増加することでイオン伝導度が低下することが分かる。そこで、全固体 LIB の電極内空隙の存在及び活物質と電解質の接触状態をさらに精度よく把握するため、最大 40nm レベルの空間解像度を有する高輝度放射光施設 SPring-8 の X 線 CT を用いて実電極の構造情報を取得した。得られた電極の CT 像を図 3.1.3-4 に示す。得られた画像から 100nm 以下の空隙も確認できるようになった。また、得られた CT 画像は機械学習を用いることで、これまでの画像解析技術では識別が困難であった活物質と電解質も識別分離可能となった。

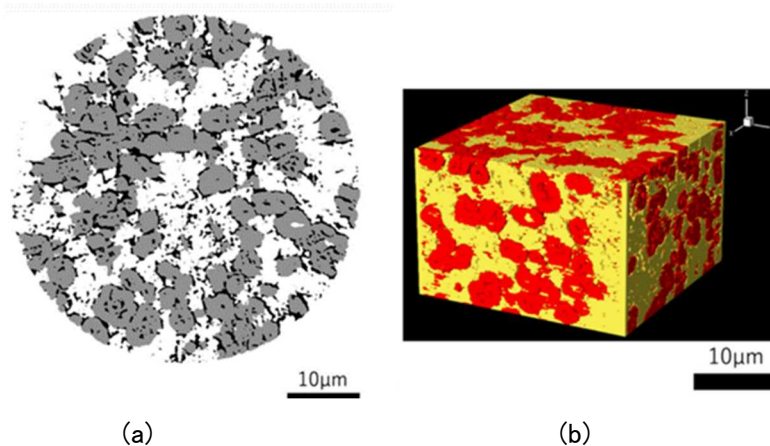


図 3.1.3-4 放射光を用いた電極の nano CT 画像
 (a) 断面イメージ：白:SE、グレー:NCM、黒:空隙、 (b) 3D イメージ：赤:NCM、黄色:SE

② 電極モデル

図 3.1.3-1 の右図に示すように、全固体 LIB の場合は凝集している活物質粒子内に固体電解質が浸透しないため、活物質の一部でしか固体電解質が接触できず Li イオン伝搬距離が液系 LIB とは異なることが予想される。そこで、固体電解質/活物質比を考慮し開発したマクロ電極モデルを用いた全固体 LIB の充放電特性のシミュレーションの手順と計算式を図 3.1.3-5 に示す。シミュレーションの概略手順は以下のとおりである。

- a) 300nm レベルの空間解像度を有するコーンビーム X 線 CT システムを用いて、100µm スケールの視野で実電極の 3 次元構造を撮像し、この撮像データを解析することにより、電極内の活物質、電解質、空隙の体積割合を求める。
- b) 解析の対象とする電極の 3 次元構造を辺長 20µm 程度のブロックに細分化してモデル化する。ブロック毎に上記の X 線 CT 撮像で求めた体積割合で活物質、電解質、空隙の 3 相をランダムに配置し、イオン伝導の曲路率及び活物質-電解質界面の接触率を算出・設定する。
- c) また、各ブロックからの周囲へのイオン・電子伝導度を曲路率と各相の体積割合に対応させて有効伝導度に置換し、図 3.1.3-5 中に示す Newman モデルをベースとした多孔質電極理論の計算式に基づき、活物質-電解質界面での反応、活物質内 Li 濃度、活物質の電子電位及び電解質中のイオン電位を連成して解く。

前記したマクロ電極モデルを用いて計算した 2cm 角単層セルの放電曲線を、実測データと比較して図 3.1.3-6 に示す。電圧低下が緩やかな放電中期までは実際の放電特性を再現できている。

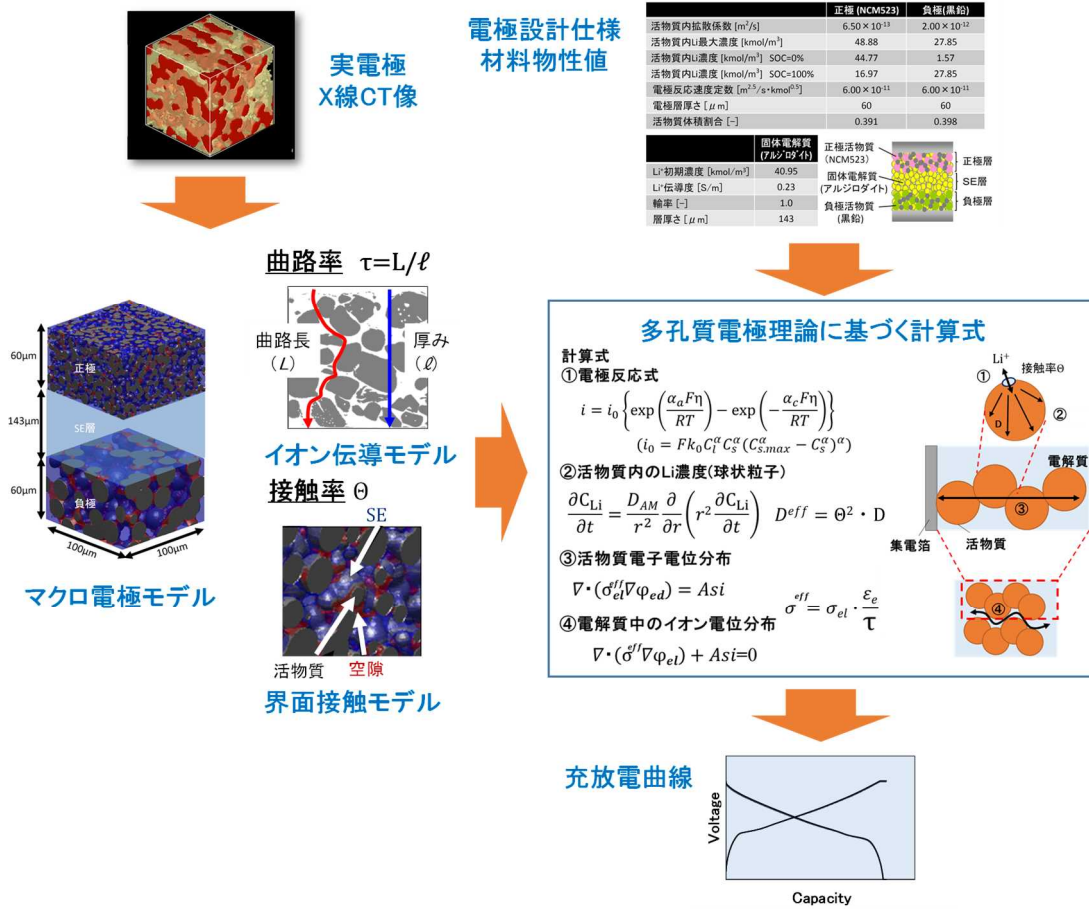


図 3.1.3-5 マクロ電極モデルによる充放電特性シミュレーションの流れ

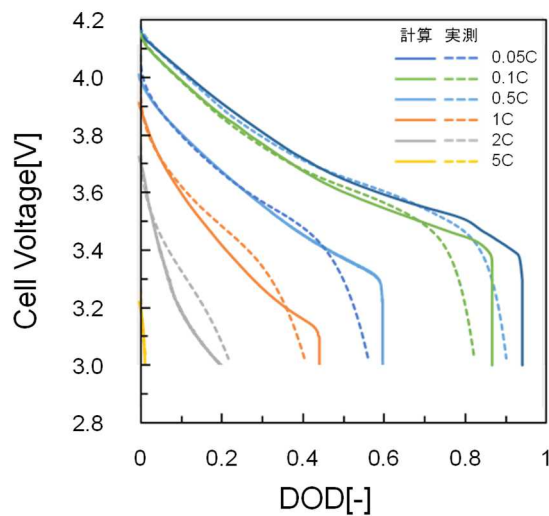


図 3.1.3-6 マクロ電極モデルによる 2cm 角単層セルの放電曲線の再現例 (改善前のモデル)

しかしながら、計算では活物質及び電解質の材料物性値を放電中は一定と仮定しているが、実際には、セルに加えられる締付力や活物質の膨張収縮に伴って発生する応力によって、活物質-電解質の接触率や反応面積等が変化すると考えられる。放電カーブの形状に関しては活物質と固体電解質との接触が大きく寄与していることを、セル設計値と電池特性を紐づけた電気化学モデル (Newman モデルベース) のパラメータ検討で確認できている。そのため、次世代全固体 LIB など膨張収縮が大きい系では、マクロ電極モデルを用いた性能予測が難しくなることが予想された。そこで、電気化学モデルと電極内応力分布の変化をカップリングするために、電極内粒子の膨張収縮に伴う弾塑性変形と、活物質や固体電解質粒子の接触状態をイオン伝導に反映可能な電極モデルを新たに構築した。また、前述の放射光 CT を用いて実電極内の活物質、電解質、空隙の体積割合、接触状態を定量化し、モデルに適用した。新たなモデルでは、電極構造内の活物質を球体構造として実体配置して解析することができ、充放電による活物質の膨張収縮で生じる活物質と固体電解質間、活物質間の粒子間応力変化、接触率変化を考慮した充放電特性計算が可能となったため、実証電池の実測データをより精度よく再現することができた (図 3.1.3-7)。

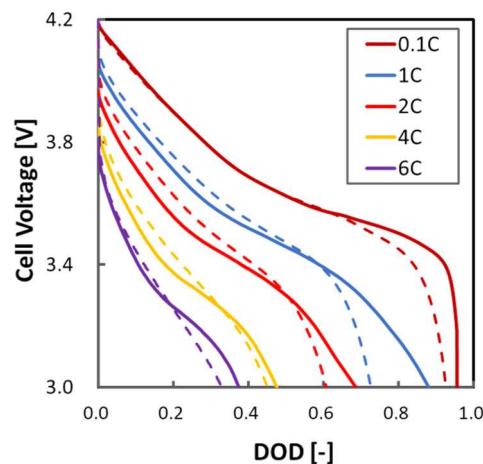


図 3.1.3-7 マクロ電極モデルによる 2cm 角単層セルの放電曲線の再現例 (新モデル)

また、本モデルは充放電時の膨張収縮による粒子間応力変化、接触率変化を考慮可能なため、第 1 世代全固体 LIB に加えて、膨張収縮変化の大きい次世代全固体 LIB へも適用可能である。充放電性能予測に必要な次世代全固体 LIB の実電極構造は放射光 CT で取得済みのため、事業終了までに本モデルの次世代全固体 LIB への適用も完了させる。

(2) 電池パック発熱挙動のシミュレーション技術

EV の走行時や急速充電時のセル及び電池パックの発熱挙動を予測する手法の開発を進めた。

まず、前記 (1) で述べたマクロ電極モデルの計算体系を一部簡略化して汎用有限要素法の物理シミュレーションソフトに組み込み、3 次元のセルの伝熱計算モデルを構築した。この計算モデルの妥当性を検証するため、4×12.5cm 単層セルの充放電時の温度計測実験を行った。図 3.1.3-8 に 0.3C 放電時の温度上昇の計算結果と実測値を比較して示すが、概ね一致することが確認された。

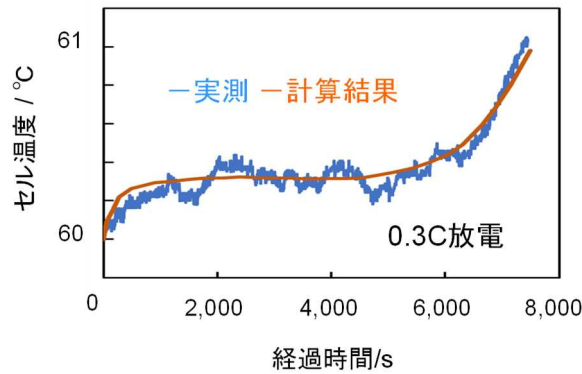


図 3.1.3-8 3次元伝熱計算モデルによる4×12.5cm単層セルの放電時温度上昇の再現例

次に、仮想 EV を設定し、大型ラミネートセル及び電池パックの設計を行い、形状・寸法等の詳細仕様を決定した。この詳細仕様に基づいて、大型ラミネートセル及び電池パックの3次元伝熱計算モデルを構築した。セルの伝熱計算モデルには、前記した4×12.5cm単層セルの温度計測実験で妥当性が検証されたモデル化手法を適用した。一方、電池パックの伝熱計算モデルには、液系 LIB の電池パックの発熱挙動予測で実績のあるモデル化手法を適用した。また、EV 走行シミュレータを用い、仮想 EV の走行パターン及び充電プロトコルに対応したセル及び電池パックへの入出力を算出し、伝熱計算モデルに対する入力条件を決定した。

セルの形状・寸法や配列等が異なる2種類の55kWh級電池パックを設計し、6Cレートでの急速充電を行った場合の電池パック温度分布の計算結果の例を図3.1.3-9に示す。構築した3次元伝熱計算モデルにて、異なる電池パック形状においてもパック内温度分布の差異を確認することができた。

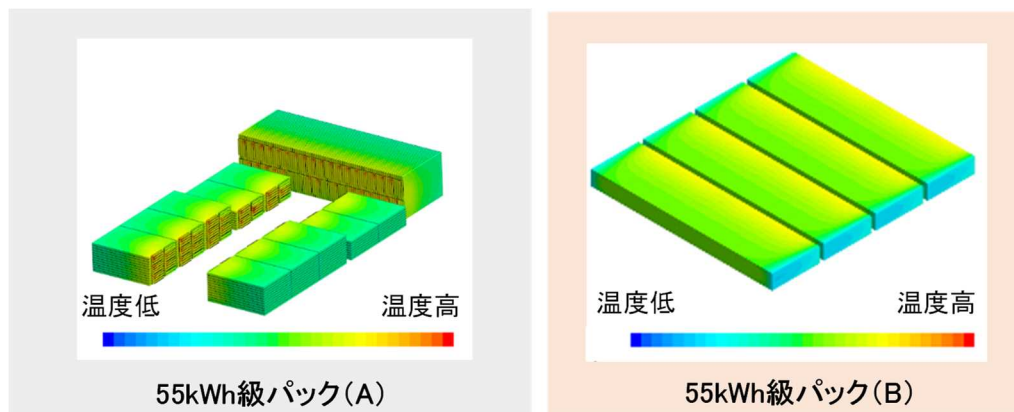


図 3.1.3-9 3次元伝熱計算モデル検証のための電池パック温度分布計算結果例

電池パック設計に使用する3次元伝熱計算モデルの実環境適用性を高めるため、追加設計因子となる実セルの充放電に対する膨張収縮量を評価した。得られたセルの膨張収縮量を図3.1.3-10に示す。実セルでは充放電により2%程度の膨張収縮が生じるため、電池パックはセルの膨張収縮を考慮した構造設計が必要であることが分かった。

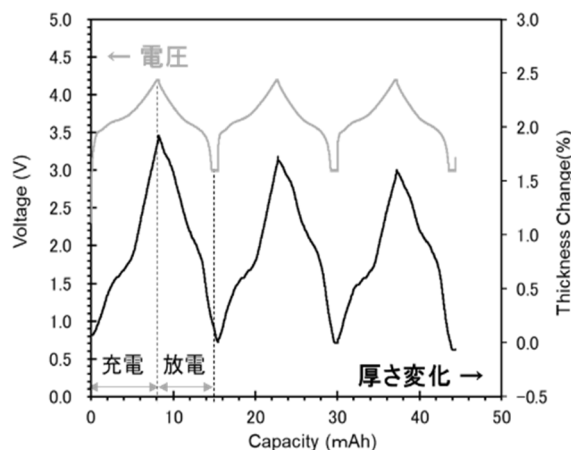


図 3.1.3-10 充放電によるセル厚さ変化

そこで、実環境を想定した仮想電池パックではセルの膨張収縮を定寸締結で吸収可能な構造仕様とサイズに修正した。その際、市販 EV で実装されている EV 補器類相当の搭載スペースを考慮したほか、車体下部への搭載可能な電池パックサイズとした。さらに、セル材料の熱特性評価で得られた熱物性値、改善した放熱モード等も計算モデルに適用した。これらの仕様変更、物性値を、図 3.1.3-9 で説明した 55kWh 級電池パックモデルを搭載した仮想 EV 発熱・伝熱モデルに適用することによって、実環境条件を想定した 6C レートの急速充電・高負荷走行 (5%勾配での WLTC モード走行) 時の温度分布を計算した。その結果を図 3.1.3-11 に示す。電池パック構造と放熱モードを改善することにより、パック内の最高温度及び温度分布が改善されたことが示され、仮想 EV 発熱・伝熱モデルにより、全固体 LIB が EV で使用された際の発熱挙動、温度分布を正確に把握することができる。

本プロジェクトでは電池パックの試作は実施しないが、構築した伝熱計算モデルによって全固体 LIB が EV で使用された際の発熱挙動、温度分布の推算が可能となった。その結果として、全固体 LIB 性能と電池パック内温度分布を考慮した上で、電池パックの冷却レス要否についての検討が可能となった。また、次世代全固体 LIB においてもセル膨張収縮量、熱特性を取得しているため、事業終了までに構築した伝熱計算モデルによって次世代全固体 LIB の発熱挙動を算出完了予定である。

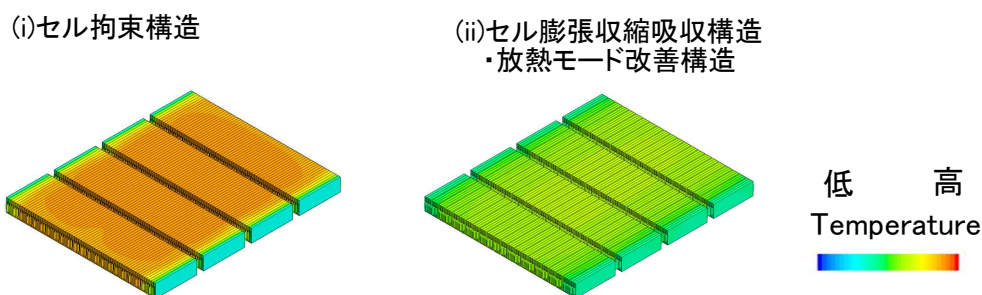


図 3.1.3-11 実環境想定下での 3 次元伝熱計算モデルによる電池パック温度分布計算結果例

3.1.4 試験評価法の開発

(1) 性能試験法に関する検討

IEC 62660-1 「電動車両推進用リチウムイオン二次電池 -性能試験-」に規定されている性能試験項目と試験温度を表 3.1.4-1 に示す。揮発性の有機電解液を用いる液系 LIB を前提としているため、各試験項目の試験温度は 45°C を上限としている。一方、無機固体電解質を用いる全固体 LIB は高温動作が可能であり、液系 LIB に比べて冷却システムを簡素化した電池パックが実現できるため、全固体 LIB の性能評価に適用する国際標準試験法では、より高い温度条件で試験を実施する規定を設けることが望ましい。

そこで、「3.1.2 材料特性評価技術の開発」で述べた全固体 LIB の標準電池モデル(2cm 角単層セル)を用い、表 3.1.4-1 に示した各性能試験について試験温度範囲を広げて実施した。

-40°C~100°C の温度条件で実施した全固体 LIB の標準電池モデルの容量試験の結果を、ほぼ同サイズで同種の電極活物質を用いた液系 LIB セルの容量試験結果と比較して図 3.1.4-1 に示す。なお、グラフ縦軸の容量は、全固体 LIB の標準電池モデルと液系 LIB セルで容量が異なることから、25°C での放電容量を 100% として、これに対する割合をプロットした。これらの試験の結果、液系 LIB では電解液の分解によるガス発生が起きる 80°C 以上でも、全固体 LIB は問題なく作動することが確認された。

また、入出力性能において、液系 LIB では 5C レートを最大としているが、全固体 LIB は、リチウムイオンの輸率が 1 であるため高レートでの動作が可能であり、液系 LIB に比べてより短い充電時間に対応した急速充電ができる可能性がある。そのため、全固体 LIB の性能評価に適用する国際標準試験法では、より高レートで試験を実施する規定を設けることが望ましく、全固体 LIB の標準電池モデル(2cm 角単層セル)を用いて、表 3.1.4-1 に示した各性能試験をより高レートで実施した。その中で入出力試験結果を図 3.1.4-2 に示す。25°C 以上の最大レートにおいて 5C レート以上の入出力が可能であることを確認した。

これらの結果を踏まえ、その他の性能試験項目についても同様のデータを取得している。

上記検討により、全固体 LIB に対して温度範囲を拡張した性能試験法の適用が可能であることを確認し、結果をまとめると共に、国際標準化に向けて議論できるデータを提供した。

表 3.1.4-1 IEC62660-1 の性能試験項目と温度条件

試験項目	試験内容の概略	試験温度
容量	25°C で充電後、1/3 C もしくは 1C の放電容量	0 ~ 45°C
入出力	SOC20%、50%、80% における 10 秒入出力	-20 ~ 40°C
エネルギー密度	容量試験の結果と平均電圧から算出	0 ~ 45°C
保存試験	SOC50%、100% で保存し、一定期間毎に性能評価	45°C
サイクル試験	走行時の入出力を想定した充放電サイクル試験	45°C
効率	所定 SOC の充電容量に対する放電容量比	-20 ~ 45°C

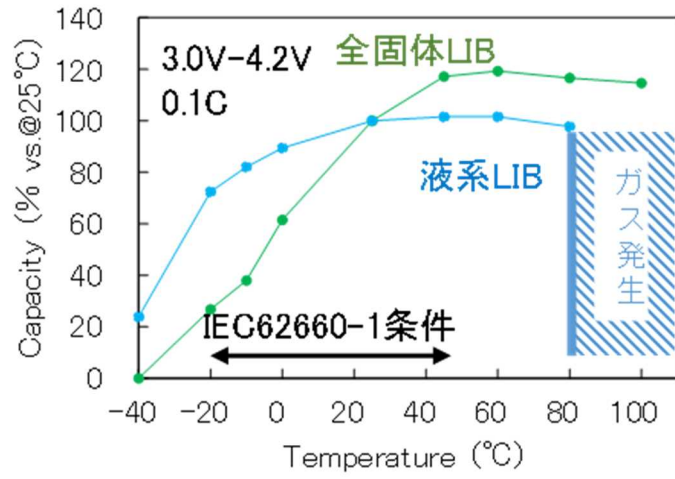


図 3.1.4-1 全固体 LIB と液系 LIB の容量試験結果

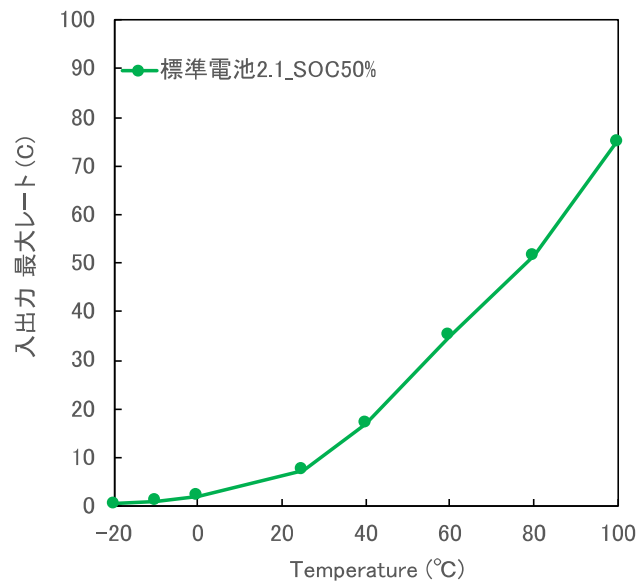


図 3.1.4-2 全固体 LIB の入出力試験結果

(2) 耐久性試験法に関する検討

表 3.1.4-1 に示した液系 LIB を対象とした標準試験法である IEC62660-1 を参考にした耐久試験法を、全固体 LIB が高温動作可能である点を踏まえて開発する。具体的には、IEC62660-1 の保存試験及びサイクル試験の全固体 LIB への適用性を確認した後に、高温作動性を評価可能な試験温度を検討する。

「3.1.2 材料特性評価技術の開発」で述べた全固体 LIB の標準電池モデル(2cm 角単層セル)を用いて、全固体 LIB では高温において優位性があると想定し、温度条件及び拘束圧を図 3.1.4-3(a)に示す条件とし、保存試験及びサイクル試験を実施した。また、全固体 LIB との差異を評価するために、液系 LIB についても 100℃を除く、同様の条件で試験を実施した。

サイクル試験を 28 日、保存試験を 42 日間実施した後に、1/3C、25℃で評価した電池容量維持率を図 3.1.4-3(b)に示す。サイクル試験、保存試験ともに、同耐久性試験法が全固体 LIB への適用可能なことを確認した。

耐久性試験法に関する結果とまとめを、国際標準化に向けて議論できるデータとして提供した。

(a) 全固体LIB寿命試験条件

保存試験 (3条件、9セル)

保存時温度	45℃, 80℃, 100℃
保存時SOC	100%
試験数 (n数)	3

サイクル試験 (6条件、18セル)

サイクル試験時温度	45℃, 80℃, 100℃
放電時負荷パターン	IEC62660-1
狙い拘束圧	200 MPa, 20 MPa
サイクル試験時充電条件	0.8 mA CCCV
試験数 (n数)	3

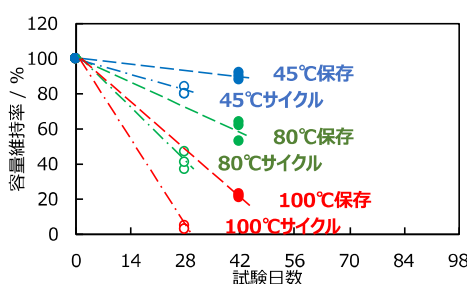
性能評価条件

(サイクル28日おき、保存42日おきに実施)

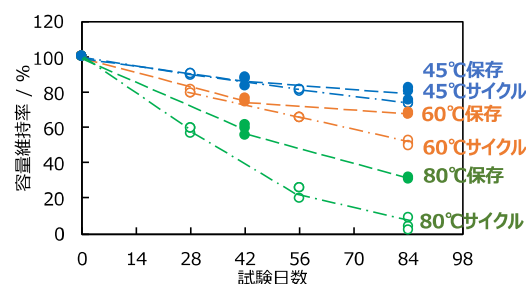
性能評価項目	容量(C/3, C/20) 動的放電容量 内部抵抗-DCR (出力)
性能評価温度	25℃, (45℃)

(b) 28日間サイクル試験後と42日間保存後の性能評価結果 (C/3, 25℃)

全固体LIB (標準電池)



試作液LIB



* 点線はガイドであり、実際の劣化曲線とは異なる

図 3.1.4-3 全固体 LIB のサイクル試験、保存試験結果

試験結果は全固体 LIB の容量特性が劣化ばらつきも含め耐久性を評価できるレベルにあることを示す一方で、「3.1.2 材料特性評価技術の開発」で述べた全固体 LIB の標準電池モデル(2cm 角単層セル)は初期性能に着目したセル作製になっており劣化対策が施されていない。そこで、劣化対策の指針を得るため、耐久試験に供した標準電池モデルの劣化要因解析を行った。

劣化解析は、dV/dQ 解析、交流インピーダンス(EIS)測定、放射光 X 線回折測定、X 線光電子分光(XPS)測定、透過電子顕微鏡(TEM)観察について行った。図 3.1.4-4(a)にサイクル試験時、保存試験時の dV/dQ 特性の推移を示す。曲線の形状は大きく変化せず、グラファイトに帰属されるピ

ーク位置のシフトのみが観測されたことから、全固体 LIB においても液系 LIB と同様に、正負極のバランスのずれが生じ、それによって電池容量が低下することが示唆された。図 3.1.4-4(b)に各温度におけるサイクル試験後の EIS 測定の結果を示す。等価回路モデルのパラメータ同定から、2 種類の抵抗成分(R_{Low} 、 R_{Middle})が増大していることが示唆された。抵抗成分は、(b)に示す等価回路でフィッティングされたものであるが、それぞれの成分の帰属を現在行っている。図 3.1.4-4(c)にサイクル試験前後の正極及び負極の XPS 測定の結果を示す。正極において、硫黄成分の変性と P-O の出現、負極において、 CO_3^{2-} の増加と LiSx の増加が観測されたことから、正負極で固体電解質の分解生成物が生じていること、及び、負極における Li 析出が示唆された。以上のことから、副反応により正負極バランスのずれが生じたことと、界面生成物により抵抗成分が大きく増加したことで劣化が進行したと考えられる。

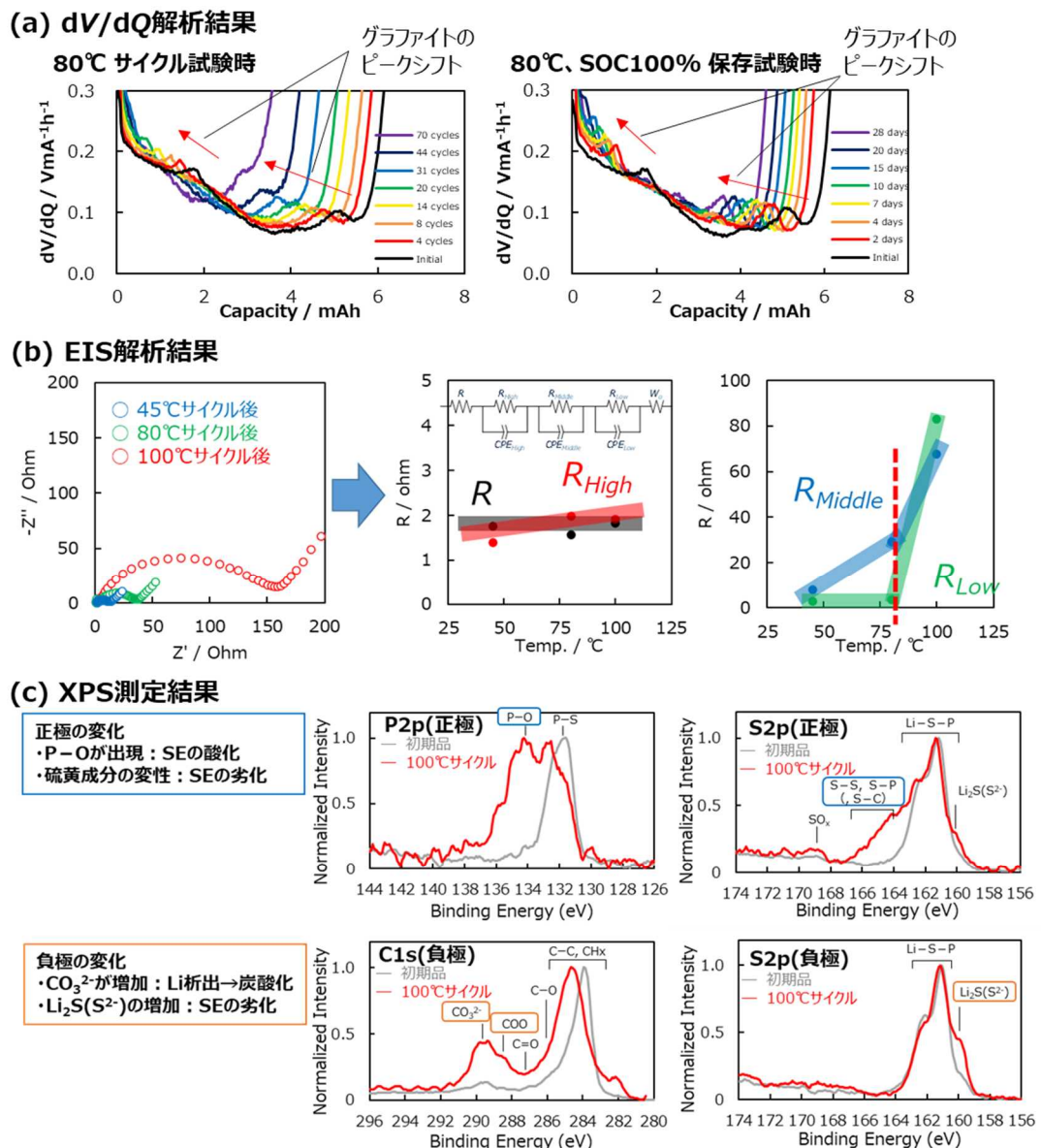


図 3.1.4-4 全固体 LIB の劣化解析結果

劣化解析結果等を劣化要因マップとしてまとめた結果を表 3.1.4-2 に示す。標準電池の劣化は、正極側固体電解質の酸化反応による抵抗上昇、負極側固体電解質の還元反応による有効 Li の減少(容量減少)、クラックによる抵抗上昇と容量減少に大きく分類できることが分かった。

表 3.1.4-2 標準電池の劣化要因マップ

	劣化部位	劣化箇所 材料/界面	劣化現象		
			活物質 容量減少	有効Li+量 減少	抵抗増加
電池劣化	正極層	活物質/SE・元素拡散	✓	✓	✓
		SE分解	-	-	✓
		活物質劣化	✓	✓	-
		表面コート劣化	✓	✓	✓
		クラック	-	✓	✓
		不純物による汚染	✓	✓	✓
	SE層	SE分解	-	-	✓
		クラック	-	-	✓
		不純物による汚染	-	-	✓
	負極層	活物質/SE	✓	✓	✓
		SE分解	-	✓	✓
		Li電析・Li/SE反応	-	✓	✓
		活物質劣化	✓	-	✓
		クラック	-	✓	✓
		不純物による汚染	✓	-	✓

以上の結果を踏まえ、全固体 LIB の国際標準化へ向け国内審議団体である JARI が主催する電池標準化ワーキンググループ (WG) で議論を開始した。また、上記解析結果に基づき、実証セル及び標準電池への耐久性改善策を実施予定である。

(3) 安全性試験法に関する検討

IEC 62660-2 「電動車両推進用リチウムイオン二次電池 -信頼性・誤用試験-」及び IEC 62660-3 「電動車両推進用リチウムイオン二次電池 -安全性要求事項-」 に規定されている安全性試験項目及びそのクライテリアを表 3.1.4-3 に示す。

表 3.1.4-3 IEC62660 の安全性試験項目・試験内容・クライテリア

試験項目	試験内容の概略	クライテリア	全固体 LIB 適用可否
強制放電	SOC 0%から 1C、90 分放電	漏液、開弁、発火 破裂爆発無し	○
振 動	ランダム波、5~2000 Hz、8 h×3 方向	同 上	○
衝 撃	加速度 500 m/s ² 、持続時間 6 ms、10 回×6 方向	同 上	○
温度サイクル	-40~85℃若しくは製造者指定温度範囲で 30 回	同 上	○
外部短絡	SOC100%から 5 mΩ 以下の抵抗を介して短絡	発火爆発無し	○
過充電	1C で SOC130%又は最大電圧の 120%まで充電	同 上	○
圧 壊	半円柱状若しくは半球の治具で、1/3 電圧又は 15% 以上の変形若しくはセル質量の 1,000 倍まで	同 上	○
加 熱	SOC100%で 130 °Cまで昇温後 30 分保持	同 上	○
強制内部短絡 (FISC)	正負極間に模擬的な異物 (Ni 片) を挿入後、再度セルとして組み立て、外力を加え短絡	同 上	×

表 3.1.4-3 に記載した各安全性試験が全固体 LIB にも適用可能かを検討した結果、強制内部短絡試験 (FISC 試験) のみが適用困難であるとの結論に至った。

図 3.1.4-5 に、IEC62660-3 に規定された FISC 試験の概要を示す。この試験は製造時の万一の金属異物混入等を想定し、正負極一層のみを短絡させるものである。試験の手順としては、セルを開封して電極群を取り出し、正負極の間に L 字型の Ni 片を挿入し、再度セルとして組み立てた後、外力を加えて短絡させることとなる。

しかしながら、全固体 LIB の場合、正極、固体電解質、負極を一体化してセル化するため、液系 LIB のようにセルを解体して、正負極間に Ni 片を挿入することはできない。また、全固体 LIB は治具で拘束して使用されることから、セルに外力を加えることも困難である。そのため、セルの解体が不要でかつ拘束状態でも試験が可能となる釘刺し方式の内部短絡試験法を開発することとした。

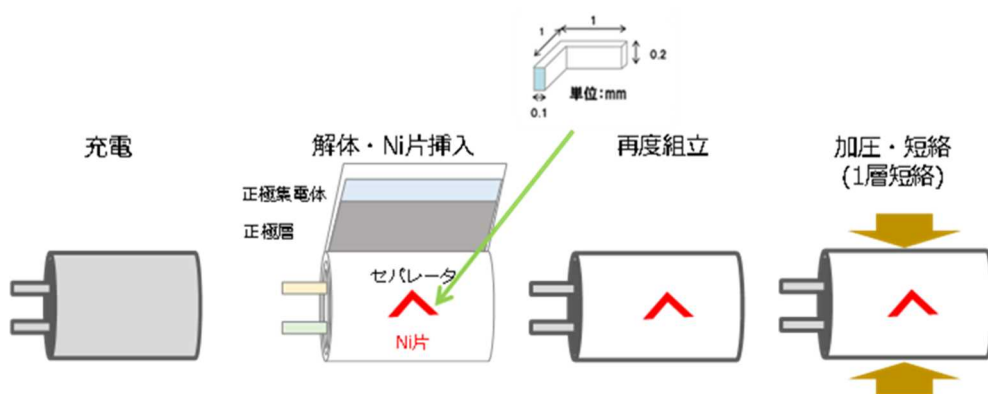


図 3.1.4-5 IEC62660-3 の強制内部短絡試験の方法

強制内部短絡試験の代替試験法となるためには、強制内部短絡試験と同じ短絡状態、つまり一層短絡の実現と短絡電流が Ni 片を介して流れること (電極同士が接触して短絡しないこと) の 2 つが必要となる。

中間評価では、強制内部短絡試験の代替試験法として図 3.1.4-6 に示す釘刺し方式での内部短絡試験装置を開発して、強制内部短絡試験と同様な一層短絡になることを確認した。具体的には、拘束状態での釘刺しを可能とするため、拘束治具に釘を挿入する孔 (直径 3.5mm) を設けた。また、物理的に一層短絡を実現できるよう、3mm 径のニッケル製円柱の先端を鋭利な突起に加工したネイルを開発した。このネイルを用いて釘刺しする際、先端の平坦部がセルの外装に当たることで突起部のみがセルに刺さり、短絡深さが制限され一層短絡を実現できることを確認した。

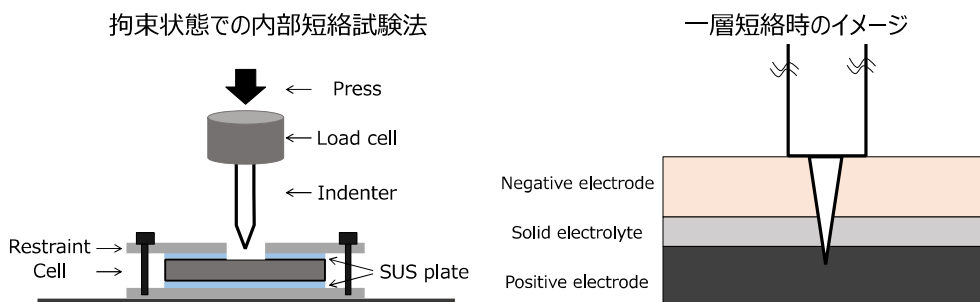


図 3.1.4-6 開発した全固体 LIB の強制内部短絡試験法 (Ni ネイル短絡試験) の概要

最終評価では、代替試験法とするためのもう1つの条件である短絡電流が Ni 片を介して流れること(電極同士が接触して短絡しないこと)を、図 3.1.4-6 に示した試験装置を用いて確認した。具体的には、釘の先端部分をセラミックス(絶縁物)に変更して(図 3.1.4-7)、試験を行った。このセラミックス釘を用いて Ni 釘で一層短絡した条件と同じ条件で試験を行い、短絡電流が検知されなければ、Ni 釘に短絡電流が流れていることになる。

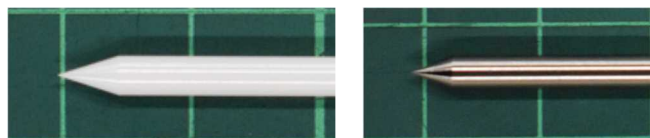


図 3.1.4-7 セラミックス釘(左)と Ni 釘(右)

結果を図 3.1.4-8 に示す。セラミックス釘の径と先端角度を Ni 釘と同じにした 4 種類で試験を行ったところ、短絡電流は検知されなかった(左図)。右図に測定の一例として、セラミックス釘径 1mm、先端角度 45 度の結果を示す。セラミックス釘の降下に伴い荷重が上昇するが、電池電圧は 4V と測定されているため内部短絡は起こっていない。このことから開発された装置での試験において短絡電流は Ni 釘を流れていることを確認した。

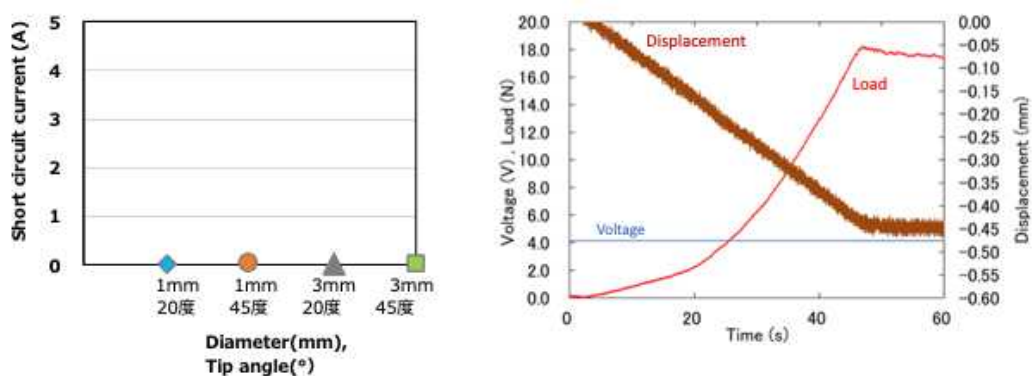


図 3.1.4-8 セラミックス釘使用時の短絡電流測定結果(左)と時間に対する測定値変化の一例(右)

以上から開発された釘刺し方式による評価方法は、液系 LIB を対象とした強制内部短絡試験の代替試験法として全固体 LIB を対象とできる可能性があることが示された。また、同試験により全固体 LIB (標準電池)の安全性を確認した。検討結果に関し、国際標準化に向けて議論できるデータとして電池標準化 WG に提供した。

加熱試験については、表 3.1.4-3 に示すとおり、IEC62660 では、130°C 保持で「発火爆発無し」がクライテリアとなっているが、全固体 LIB の高温での安全性を評価するため、断熱性暴走反応熱量計(Adiabatic Rate Calorimeter、以下 ARC)を用いて熱量測定を行った。比較用に用いた液系 LIB は標準電池モデルと同容量のセルを用いた。結果を図 3.1.4-9 に示す。自己発熱開始温度(本試験では発熱速度が 0.02°C/min.に達した時点と定義)と熱暴走領域(本試験では発熱速度が 1°C/min.に達した時点と定義)に入る温度が共に液系 LIB より全固体 LIB の方が高かった。また、全固体 LIB は、270°C 以上の温度においても熱暴走領域に入り続けることなく、熱連鎖反応が抑えられているよ

うな挙動を示した。以上から全固体 LIB と比較用液系 LIB との比較において、全固体 LIB の方が熱暴走に対して安全であることが示唆された。

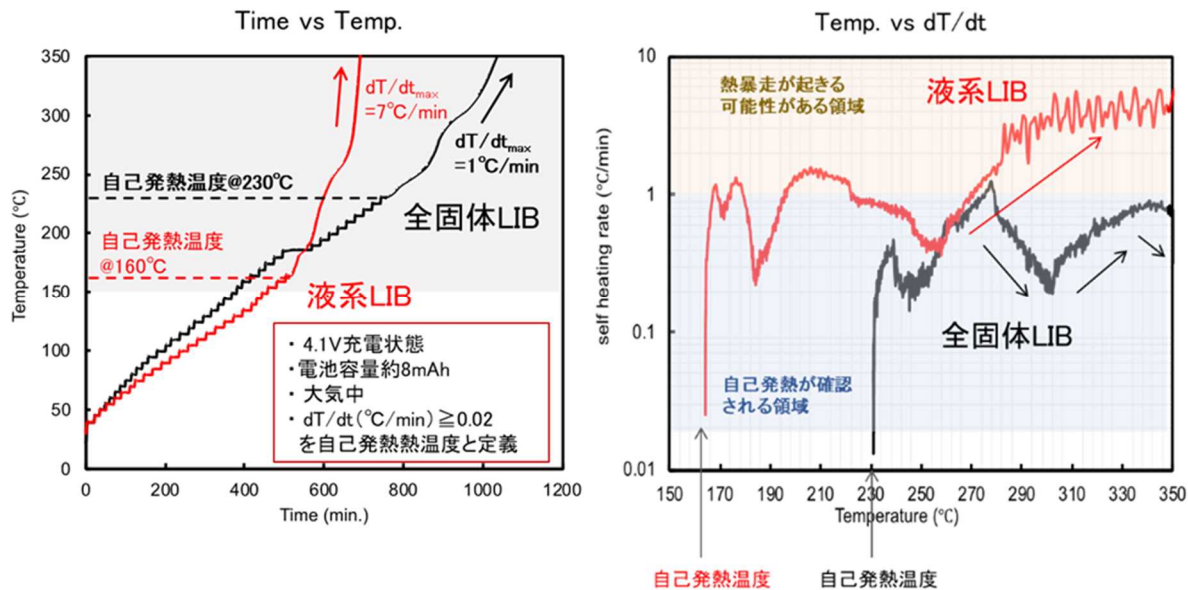


図 3.1.4-9 断熱性暴走反応熱量計による昇温時の発熱量測定結果
(左: 温度上昇曲線、右: 発熱速度曲線)

全固体 LIB において自己発熱が始まる 230°C 以上の発熱メカニズムを推定するために、C600 (示差熱分析装置) を用いて昇温熱量測定を行った。測定結果を図 3.1.4-10 に示す (青線が C600 での測定結果、黒線が図 3.1.4-9 右図に示す ARC の測定結果)。それぞれの結果に対応関係があることが分かる (a、b、c、d)。ピーク位置にずれがあるのは昇温速度の違いによるものと考えられる。具体的には、ARC の昇温モードが $2.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Wait 時間 10 分、Search 時間 5 分 (平均 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. 程度)、C600 が $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. であり C600 の方が昇温速度が早いため、C600 のピーク位置の方が高温側にシフトする。以上から C600 での昇温熱量測定結果を使用してそれぞれのピーク位置での発熱挙動を解析した。尚 ARC 測定で観察された 230°C での自己発熱はピーク a に相当する。

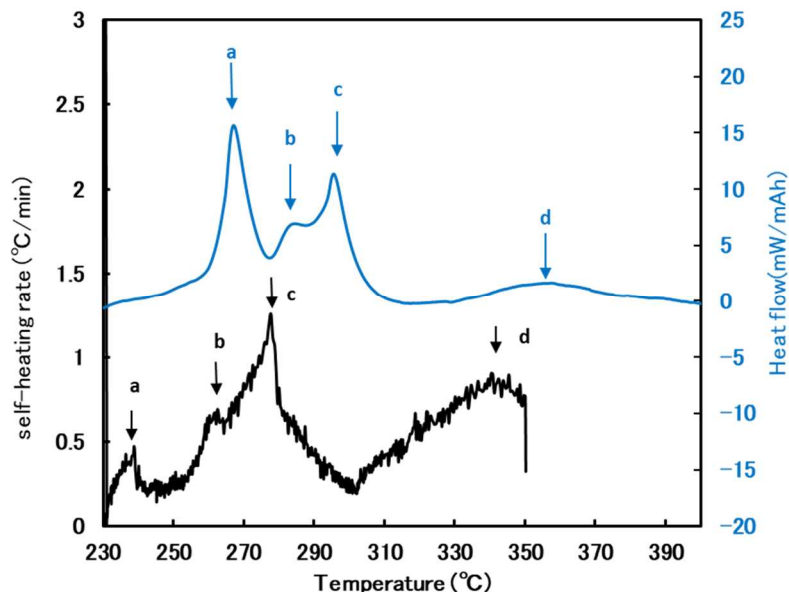


図 3.1.4-10 C600 (示差熱分析) 結果

図 3.1.4-11 に昇温 XRD (X-Ray Diffraction) 測定結果を示す。それぞれのピークに対応する箇所での生成物が特定されたが、a のピーク (C600 測定結果の 260°C 付近) に対応する構造は測定されなかった。

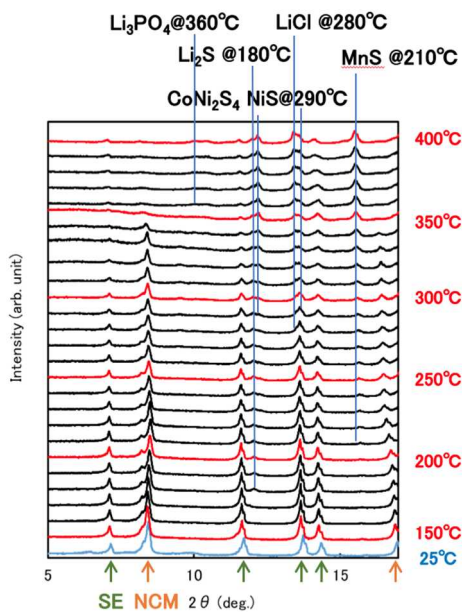


図 3.1.4-11 昇温 XRD 試験結果

昇温 XRD 測定では観察できなかった 260°C 付近の a のピーク帰属を行うため、TPD-TOFMS (Temperature Programmed Desorption Time Of Flight Mass Spectrometry) を用いて昇温ガス分析を行った。その結果を図 3.1.4-12 に示す。260°C を頂点として、 H_2S 、 S が観測された。また、図 3.1.4-12 から 260°C より低温で Li_2S 、 MnS が観測されたことを鑑みると、ピーク a は、SE と正極活物質による反応であると推定された。

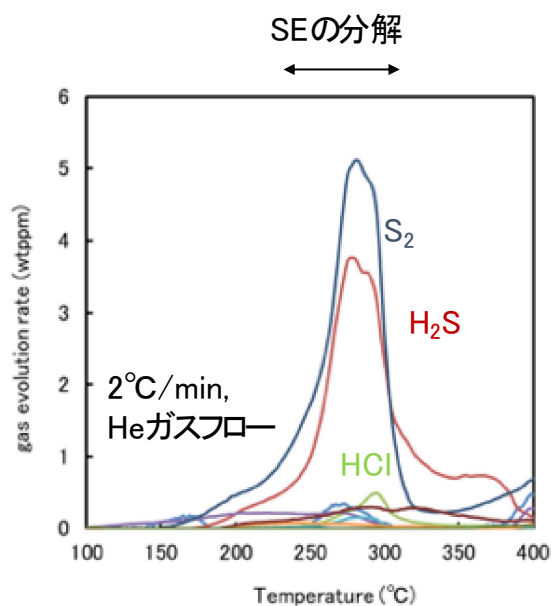


図 3.1.4-12 TPD-TOFMS 試験結果

(4) 電極の電位・抵抗計測手法に関する検討

全固体 LIB の性能向上に向けた知見の獲得を目的として、参照極を有する圧粉成形の三極セルを用い、正極と負極の電位及び抵抗変化を分離して計測する手法を開発した。

三極セルの組立方法を図 3.1.4-13 に示す。リチウム挿入型チタン酸リチウム(Li-LTO)製のリングを予めホルダ内に設置しておき、上下から固体電解質ペレットを挿入して挟み込んだ後、正極・負極ペレットを挿入し、プレス加圧を行うことで 3 極セルは完成する。参照極材料である Li-LTO は、硫化物系電解質に対する化学的安定性や電位平坦性に優れ、リチウムで部分的に還元されているため電子伝導性も得られる。

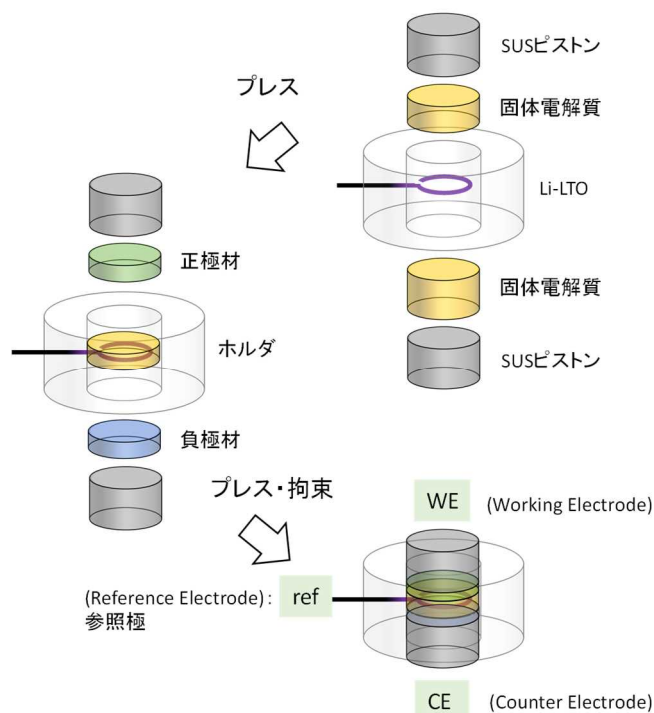


図 3.1.4-13 圧粉成形の三極セルの組立方法

この三極セルを用いて得られた電位・インピーダンスの測定データの一例を図 3.1.4-14 に示す。電位の計測では正極、負極の電位が分離して測定可能であり、放電時の正負極のそれぞれの電位変化を測定することで、定電流(CC)放電のカットオフが主としてどちらの極の電位変化により起こっているかということを確認することができた。また、定電圧(CV)放電時の電圧変化挙動から放電末期における正極と負極の抵抗の違いを識別できる可能性が示唆されている。インピーダンス測定では 10kHz より低周波領域での正負極の抵抗分離が可能であることが確認された。

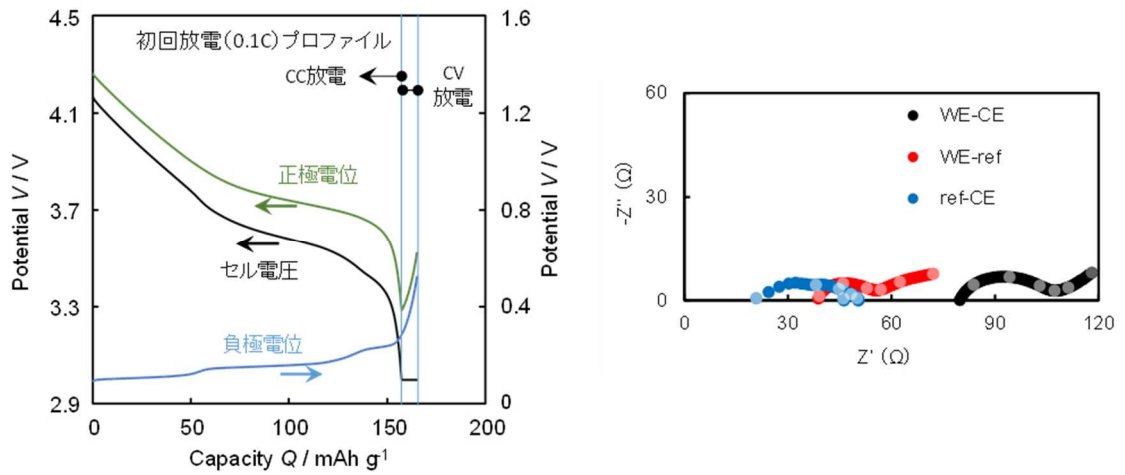


図 3.1.4-14 圧粉成形の三極セルの測定データ
(左:容量-電位特性、右:インピーダンス測定)

さらに、シート成形された電極を用いたラミネートセルへの応用検討を行った。組立方法を図 3.1.4-15 に示す。塗工電極を用いたラミネート型三極式セルでは固体電解質層が薄く短絡しやすいため、参照極を正負極対向部位の外に設置した。データの一例を図 3.1.4-16 に示す。圧粉成形の三極セル同様、正極・負極電位の切り分け、及び抵抗分離ができることを確認した。

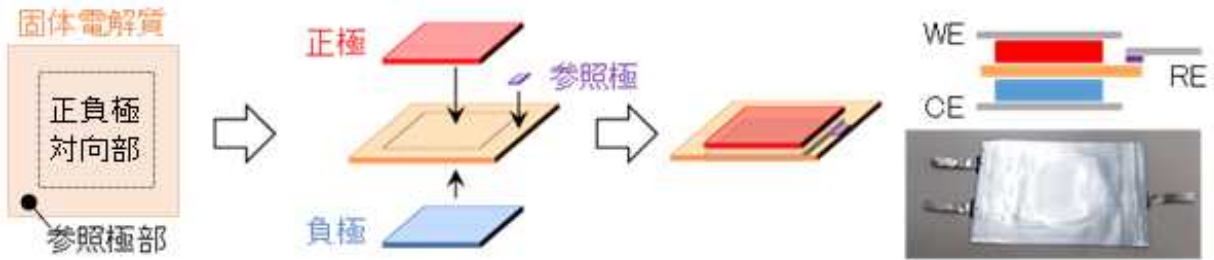


図 3.1.4-15 ラミネート型三極セルの組立方法

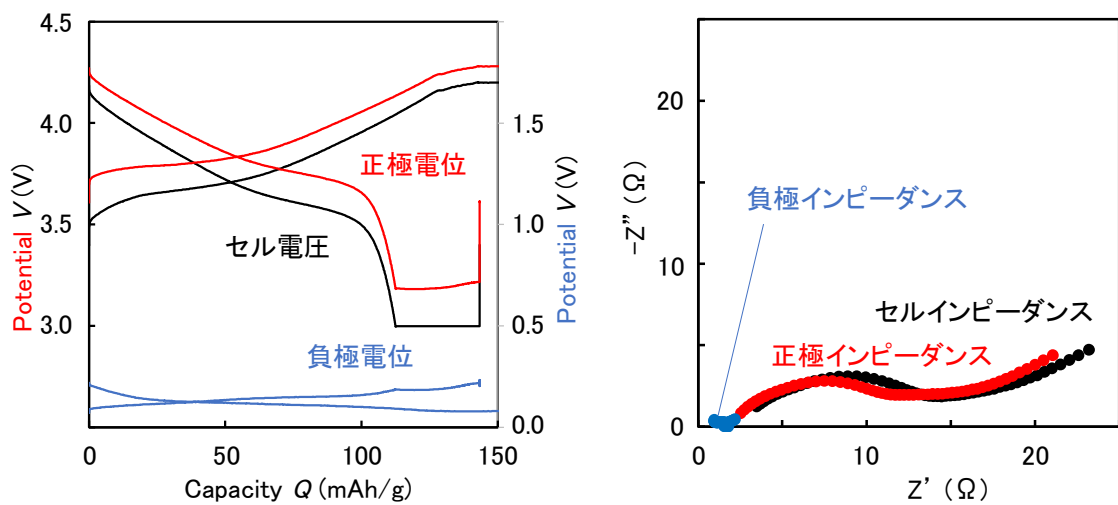


図 3.1.4-16 ラミネート型三極セルの電位特性と抵抗分離
(左:容量-電位特性、右:インピーダンス測定)

3.1.5 今後の取組

表 3.1.5-1 に 2022 年度のプロジェクト終了までの今後の取組を示す。

表 3.1.5-1 プロジェクト終了までの今後の取組

研究テーマ	今後の主な取組（計画）
第 1 世代全固体 LIB の要素技術	・4×12.5cm 10 積層の実証セルの試作安定性向上、急速充電性能を含めた更なる性能実証 ・耐久性改善に向けた要素技術の検証
次世代全固体 LIB の要素技術	・高容量・高電位電極材料等の評価継続と耐久性評価
材料特性評価技術	・第 1 世代全固体 LIB の 4×12.5cm 単層標準電池モデルの仕様書化 ・次世代 LIB の 2cm 角単層標準電池モデルの仕様書化
シミュレーション技術	・材料の膨張収縮を考慮し新たに構築した全固体 LIB モデルの次世代全固体 LIB への適用
試験評価法	・IEC 国際標準化へ向けた試験条件範囲の絞り込み（性能試験、熱系試験）

3.2 「研究開発項目② 社会システムデザインの検討」の研究開発成果

3.2.1 検討の流れ

EV・PHEV の普及、CO₂ 排出削減の各国動向を踏まえ、全固体 LIB を搭載した電動車の日本における普及に向けた課題とその対応を具体的に検討するために、社会システムのシナリオ・デザインを策定する。本取組における概略を以下に記載するとともに、検討の流れを図 3.2.1-1 に示す。EV・PHEV の台数推計は 1.1.2 市場動向、及び、1.2.2 実施の効果に示す台数予測とは異なり、ユーザーの EV・PHEV 受容性調査に基づき、独自の市場導入シナリオ設定の条件で行っている。全固体 LIB 搭載の EV・PHEV が普及した将来像を整理する目的のため、政策動向や精緻な市場動向の反映は考慮していない。

- ① 一般ユーザー及び法人ユーザーを対象とした EV・PHEV の受容性調査を実施。その結果に基づいて、全固体 LIB を搭載した EV・PHEV の有望な領域を想定するとともに、ユーザーの購入要因を関数パラメータとして反映した国内乗用車普及台数推計ツールを作成する。
- ② 続いて、全固体 LIB 及び競合技術となる液系 LIB について、市場・技術動向を整理した上で、性能向上やコストダウン見通しを検討する。また、原材料の需給バランスを分析し、コストダウン見通しに反映する。
- ③ 上記②の検討結果に基づいて、全固体 LIB 搭載 EV・PHEV の市場導入シナリオ(車両スペック・価格、市場投入タイミング等)を設定し、上記①で作成した普及台数推計ツールを用いて EV・PHEV(全固体 LIB 搭載車及び液系 LIB 搭載車)の普及台数を推計する。
- ④ 上記③で推計される EV・PHEV の普及台数を全固体 LIB の開発・実用化がもたらす社会的インパクトとして定義し、これを実現するために、あるいは、より大きなインパクトをもたらすために必要とされる施策を検討する。
- ⑤ 全固体 LIB 搭載 EV・PHEV の広範な普及が実現した際の社会システムの将来像を整理する。
- ⑥ 社会システムの将来像を実現するための課題を整理して、今後の取組と提言を検討する。

なお、①のユーザーアンケート調査は 2019 年度に行い、中間評価時に EV・PHEV の普及台数推計を実施したが、2021 年度に再アンケート調査を行い、検討を進めた。

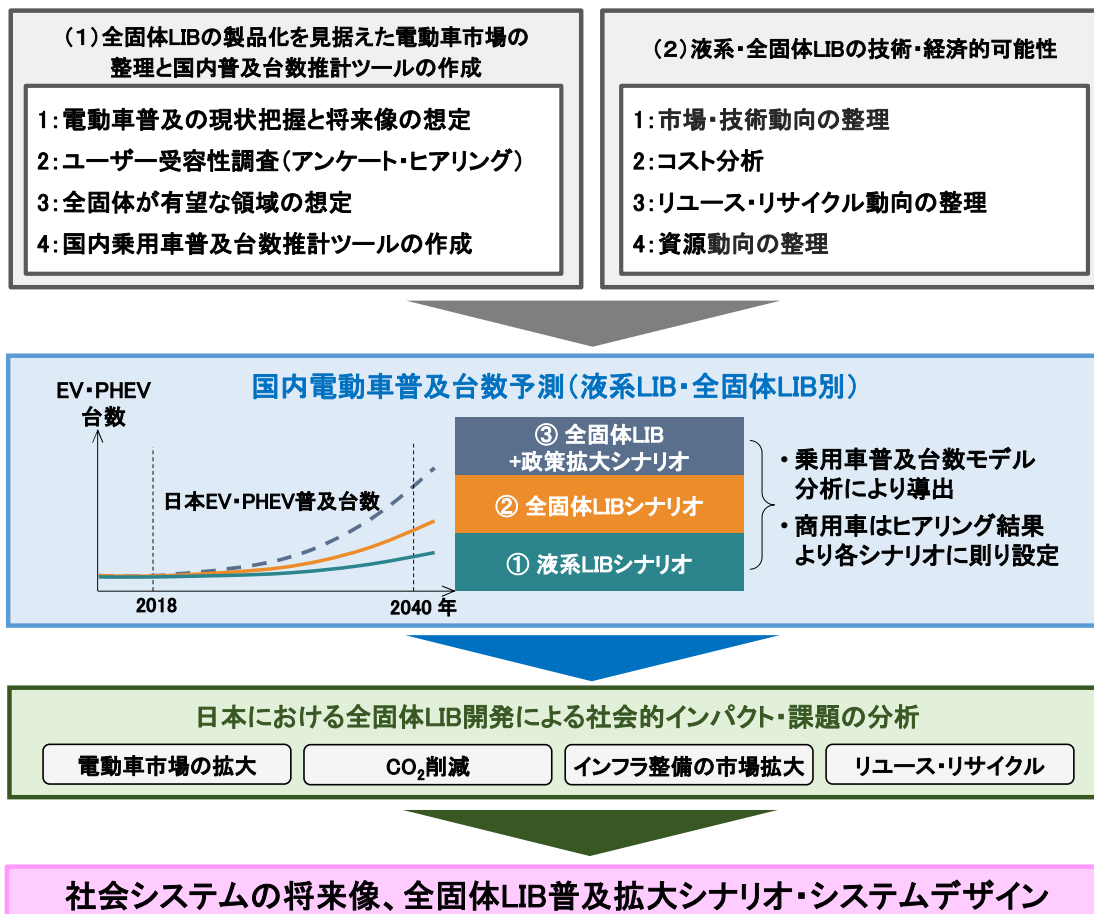


図 3.2.1-1 「研究開発項目② 社会システムデザインの検討」の流れ

3.2.2 EV・PHEV 導入に関するユーザー意識調査

(1) 一般アンケート・コンジョイントアンケート調査・分析

自動車ユーザーの乗用車利用実態や購入意思等のニーズを把握するため、表 3.2.2-1 に示す一般的なアンケート調査を実施した。

表 3.2.2-1 一般アンケート調査の概要

対象者	2216 人(うち自動車保有者 1,740 人) 【年齢】 20～69 歳、【性別】男女、【地域】全国
構成・内容	【一般属性】 保有台数、性別、世帯年収、利用目的等 【自動車利用状況属性】 目的別走行距離、長距離走行頻度、ランニングコスト 【EV・PHEV 関連属性】 EV・PHEV のメリット・デメリット、インフラへの要望、充電の残量許容度・許容時間等 【その他】 次回購入希望(動力タイプ、予算範囲)

アンケートの集計結果の一例として、EV・PHEV のメリット・デメリットを図 3.2.2-1 に示す。

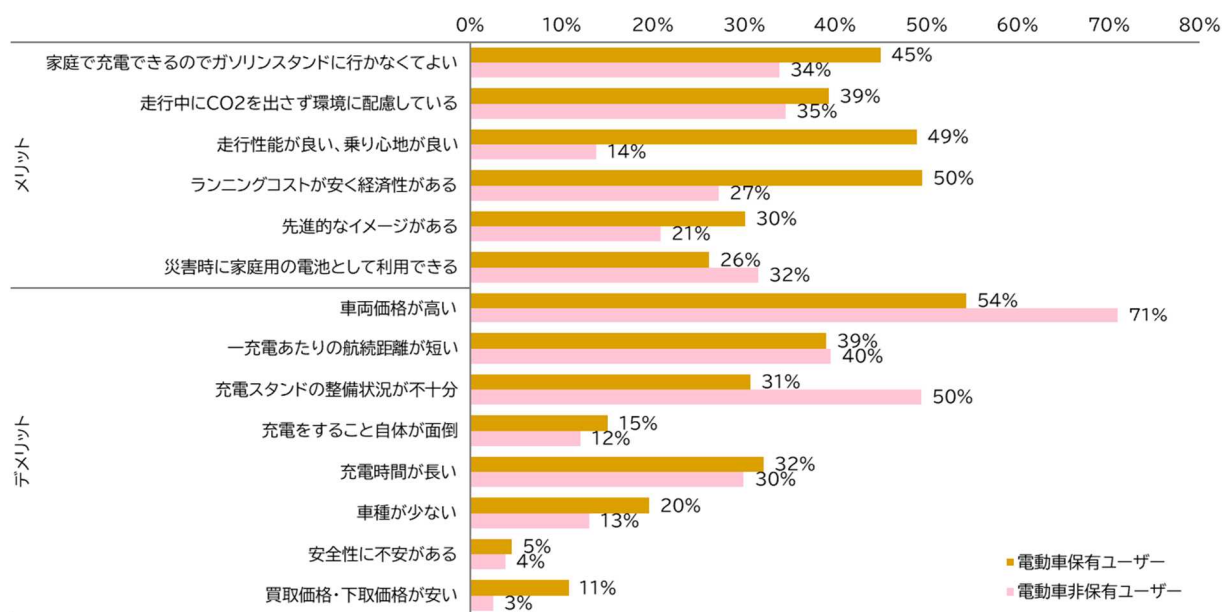


図 3.2.2-1 EV・PHEV のメリット・デメリットに関するアンケート集計結果

一般アンケート調査と同じ自動車ユーザーを対象に、コンジョイントアンケート調査を実施し、その結果についてコンジョイント分析を行った。

なお、コンジョイント分析とは、商品やサービスの「どこ」を「どの程度」変更すれば、消費者に気に入ってもらえるのかを明らかにする商品開発の戦略立案に適した分析手法である。商品アイデアを直接的に対象者に評価させるのではなく、考える商品スペックの組合せを実験的に作成し、各々について評価させる。その際、商品の具体的スペックにトレードオフが発生するように設定することにより、対象者別の「本当に重視すること」を明らかにした上で、商品スペックの各々の「買いたい気持ちを強める力(効用値)」を算出可能である。

実施したコンジョイントアンケート調査の概要を表 3.2.2-2 に示す。アンケートは、「動力タイプ」とその他の水準を有する全 8 つの属性から、最も利用頻度が高い車を買替える際の意思に該当する項目を選ばせる構成となっている。

表 3.2.2-2 コンジョイントアンケート調査の概要

対象者	一般アンケートと同じ自動車ユーザー
構成・内容	<ul style="list-style-type: none"> 8 つの属性「動力タイプ」、「ガソリン車と EV・PHEV の車両購入価格差」、「PHEV の電動航続距離」、「EV の電動航続距離」、「ランニングコスト」、「リセールバリュー」、「急速充電時間」、「急速充電器設置箇所数」の各水準から選択。 「リセールバリュー」、「電動航続距離」、「急速充電時間」への対価の額を明確化。 液系 LIB に対する全固体 LIB の優位性が比較できるように属性を設定。

アンケートの集計結果に基づき、新たに構築した普及台数推計ツールを用いてコンジョイント分析を実施した結果、EV・PHEV ユーザー、非 EV・PHEV ユーザーともに、「動力タイプ」の重要度が最も高く、次いで「車両購入価格差」となった。非 EV・PHEV ユーザーの「車両購入価格差」の重要度が高く、EV・PHEV ユーザーの「動力タイプ」の重要度が高い傾向は前回のコンジョイントアンケートと同様の結果となった。「電動航続距離」等のその他の属性は EV・PHEV のスペックに深く関係するものであるが、EV・PHEV ユーザー、非 EV・PHEV ユーザーで重要度には大差がない結果となった。

(2) 法人ユーザーのヒアリング調査・分析

「タクシー」、「外回り営業」、「物流」、「バス」の各業界の法人ユーザーを対象としたヒアリング調査を実施し、現在の自動車の利用実態及び将来の EV・PHEV の導入に向けたニーズを把握した。

この調査結果をまとめたものを表 3.2.2-3 に示すが、EV・PHEV 導入のポイントは各業界共通で車両価格であることが確認された。また、各業界での自動車利用実態に適合した走行可能距離への対応が欠かせないことが確認された。さらに、商用車は乗用車と比べて稼働率が高く、1 日の走行距離も長いいため、急速充電のニーズが高いことも確認された。

表 3.2.2-3 法人ユーザーのヒアリング調査結果のまとめ

業界	主な車両	利用実態	電動車導入の決定ポイント
タクシー	普通乗用車	【運用状況】 ・法人は1日2交代。ハイヤー、個人タクシーは1日1交代。 【電動車の充電関連】 ・都内法人タクシーは300～400km/日走行。EVの場合、1日に急速充電を4～5回する必要がある、評判が悪い。	・走行距離(急速充電のニーズあり。法人タクシーは交代の際に30～60分充電可能) ・車両価格
外回り営業	1.5L以下のコンパクトカー	【運用状況】 ・卸売業、運送業が多く、コストが最重要。 【電動車の充電関連】 ・走行パターンがある程度固定で、夜間営業所に戻るケースも多く(1.5～2千km/月程度)、夜間充電で対応可能。	・車両価格、走行距離 ・EV導入のインセンティブ(リース会社はEVをリースするインセンティブが欠けている。)
物流	小型貨物車10トンクラス	【運用状況】 ・小型貨物は拠点から個人宅等への輸送、10トンクラスは物流会社の倉庫間等の移動に利用。 【電動車の充電関連】 ・拠点間走行で急速充電ニーズが高い。	・車両価格 ・走行距離
バス	中・大型バス車両	【運用状況】 ・1路線の走行距離は不定。複数路線を車両1台で賄うことが多い。100km/日以上走行が多い。 【電動車の充電関連】 ・昼間や路線の折返しでの待機時間があり、急速充電可能。	・走行距離(最低1回の充電で100km) ・急速充電可能 ・車両価格 ・運用管理

3.2.3 全固体 LIB 導入シナリオの検討

乗用車と商用車への電動車の普及台数、及びその際に必要となる充電インフラの整備状況について検討するために、電動車の普及シナリオを想定した。

電動車として EV・PHEV を想定し、これらの普及シナリオを、個人の多様な要因が導入に影響する乗用車と、経済性と車両の仕様で決まる商用車とを区分して分析した。乗用車は、個人ユーザーの購入意向を考慮したコンジョイント分析を用いた台数推計モデルで算定した。商用車は、用途により自動車の使い方が全く異なるので、業種別のインタビュー結果等を用いて、経済性を考慮した経済性モデルを用いて推定した。

なお、自動車の普及台数に影響を与える可能性のある超小型モビリティは、アンケート結果から自動車以外からの乗り換え需要を期待しにくい結果となったため、台数推計には考慮していない。また、カーシェアの普及による自動車の販売台数の低減については、アンケート結果から、2050 年時点でおおよそ 10 台の個人保有が 1 台のカーシェアに置き換わると推定し、乗用車の普及台数モデルに反映させた。

これらを踏まえて、3つのシナリオを想定した。

S1:液系 LIB シナリオ(液系 LIB のみ普及する場合)

S2:全固体 LIB 開発シナリオ(全固体 LIB が普及する場合)

S3:全固体 LIB 開発+政策拡大シナリオ(全固体 LIB の普及に大きな政策的な支援が拡大される場合)

3.2.4 全固体 LIB がもたらす社会的インパクト

社会システムのシナリオ・デザインの検討に役立てるために、電動車が普及した際の「社会システムの将来像」から、どのような社会インパクトが生じるかを検討し、その社会システムの将来像を実現するための課題を抽出することを目的とした。社会インパクトは、自動車市場、地球温暖化、リユース・リサイクル、充電インフラ整備について検討した。

(1) 国内電動車普及台数の推計

個人の EV の選好については、2021 年度に新たに実施した一般ユーザーアンケートの結果を用いた。その結果、シナリオ別に以下のような普及台数が予測された。

図 3.2.4-1(a)より電動車の販売台数は、全固体 LIB の導入により増加し、2040 年に 290 万台(S2)~320 万台(S3)となる。2030 年を境にして販売台数の増加が緩やかになるのは、電池価格等のパラメータの設定を 2030 年以降は変化がないと想定しているためである。図 3.2.4-1(b)に示すように電動車の保有台数は、2040 年に 2,900~3,300 万台となる。

販売台数の内訳は、全固体 LIB は当初は PHEV への導入が進むが、政策支援が実施される S3 のケースでは、EV への普及が PHEV への普及を上回るようになる。

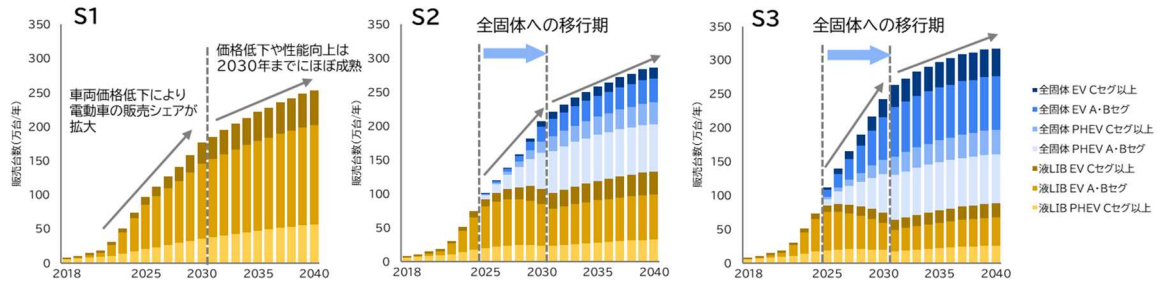


図 3.2.4-1(a) 電動車販売台数推計結果(乗用車:シナリオ間比較)

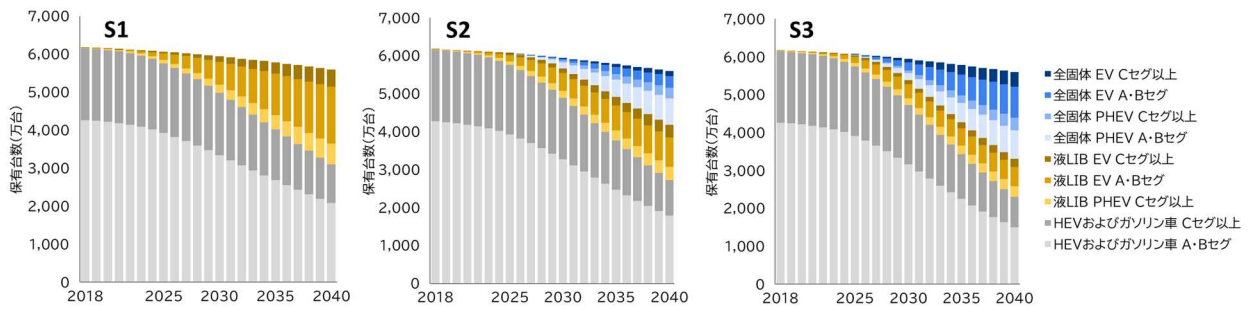


図 3.2.4-1(b) 電動車保有台数推計結果(乗用車:シナリオ間比較)

注 1) 台数推計はユーザーアンケートに基づき実施し、政策動向や精緻な市場動向の反映は考慮していない。
 注 2) 車格を A・B セグメントと C セグメント以上に分類し、EV・PHEV の電池容量を設定し台数推計を実施。

商用車ユーザーは、一般ユーザーの乗用車利用者に比べてトータルコスト削減に関心が高いため、個人が用いる車両よりも経済性が重視され、経済性が優れば導入が進むと考えられる。そこで、商用車の普及のシナリオは、経済性による分析から導入台数を推定した。その結果、表 3.2.4-1 に示すように全固体 LIB の商用車への 2025 年頃の導入台数(16~43 万台)は、乗用車への導入台数(8~26 万台)に匹敵する。したがって、初期市場の立ち上げのためにも商用車への導入は効果的であり、全固体 LIB の長寿命化が進めば、より導入量が増加する。また、全固体 LIB が急速充電を定期的にご利用することができれば、商用車の中で特に稼働率が高い用途に導入を進めることができる。

表 3.2.4-1 全固体 LIB の電動車の販売台数推計結果(単位:万台)

年	乗用			商用			合計	
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S2	S3
2025	0	8	26	0	16	43	24	69
2030	0	100	168	0	43	45	143	213
2035	0	140	220	0	43	45	183	265
2040	0	154	228	0	45	45	199	273

S1: 液系 LIB シナリオ 全固体 LIB の開発が進まず、市場に液系 LIB しか存在しない。

S2: 全固体 LIB 開発シナリオ 全固体 LIB の開発に成功し、2025 年から全固体 LIB が市場投入される。

S3: 全固体 LIB 開発+政策支援シナリオ 全固体 LIB の開発に加え、普及に資する政策支援が拡大

(2) 全固体 LIB 搭載車普及に関する CO₂ 排出に関するインパクト

地球温暖化抑制へのインパクトは、既存文献をもとに、ICE と EV・PHEV の CO₂ 排出に関する LCA の試算を行った。試算にあたっては、開発途上にある全固体 LIB の技術革新も考慮した。また、本検討で用いた文献の LCA データによる検討結果が、他の検討事例との差がどの程度あるかについてベンチマーク調査を実施し、問題がないことを確認した。

これらを踏まえて、全固体 LIB の普及による CO₂ 削減効果について検討したところ、図 3.2.4-2 に示すように、全固体 LIB の普及が S1 から S2・S3 と進むに伴い、CO₂ 排出量がより削減される見通しとなった。

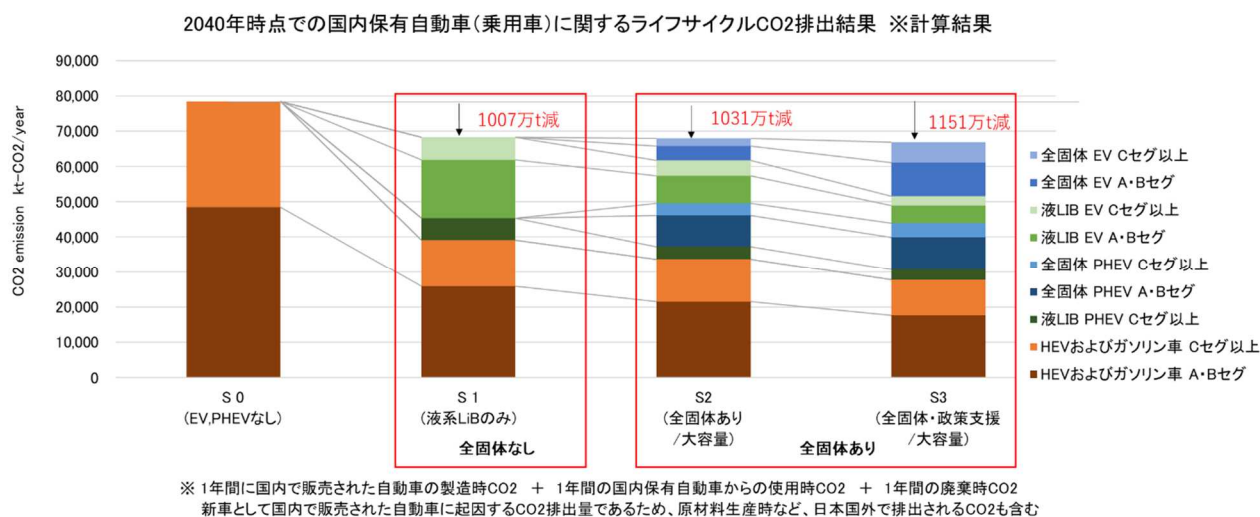


図 3.2.4-2 国内保有乗用車に関するライフサイクル CO₂ 排出量の推定結果 (2040 年時点)

(3) 全固体 LIB 搭載車普及に関するリユース・リサイクルへのインパクト

リユース・リサイクルへのインパクトを検討するために、社会システム検討において推計される電動車普及台数を踏まえて、資源需給バランスを評価した。その結果、ニッケル、コバルトの需給ひっ迫に対する安定供給不安の解消が必要であることが明らかになった。そこで、リユース・リサイクルによる不足分を供給するシナリオを検討した。全固体 LIB のリサイクル技術については、液系 LIB のプロセスに対する全固体 LIB の適用可能性及び全固体 LIB 特有のプロセスを検討した。その結果、①収集運搬において、運搬効率の向上、液系 LIB との混合処理の対応可能性の検討が必要であり、②失活化・一次処理(放電→解体→焙焼)では、解体プロセスの効率化が必要となることが明らかになった。③破碎・選別、④元素回収においては、通常の還元プロセスでも元素回収が可能であることが明らかになった。また、リユースに関しては、評価技術、リパック作業、部材コスト、規格共通化等が必要となる。

(4) 全固体 LIB 搭載車普及に関する充電インフラ整備へのインパクト

充電インフラへのインパクトについては、ユーザーサイドの視点から、利便性が保たれる充電器数を試算し、事業者サイドの視点からは事業性が成り立つ稼働率・価格等の試算をそれぞれ実施した。

その結果から、シナリオ S1 の場合に、2,494 万台の EV が普及した場合に 26.7 万基の充電インフラ(20kW~350kW の急速充電器)が必要と試算された。急速充電の容量は、150kW 以下が全体の約 9 割を占める。残りの 350kW 級の急速充電器の大半は、都市間走行用の商用車向けに用いられる結果となった。普及台数に応じて必要となる充電インフラの基数は明らかになったが、これらの充電インフ

ラの運営が事業として成立することが不可欠である。しかし、EV 普及が先行している海外の事例の調査結果からも、現状では、充電インフラ事業の事業性は厳しい。そのため、充電器の設置コストを低減することが可能な低価格機器や工事費低減のための技術開発が必要である。また、EV の普及が先行している中国や英国でも、依然として国が充電インフラ整備を支援しており、急速充電を整備するためには経済的な補助の実施が求められる。

3.2.5 社会システムのシナリオ・デザイン

全固体 LIB 普及がもたらす社会的インパクトから、「社会システムの将来像」を実現するための課題とその課題解決に向けた方策、それに基づく全固体 LIB ならではの課題の解決に向けた提言を示すことを目的として、社会システムのシナリオ・デザインを描いた。

(1) 社会システムの将来像

インパクト分析の結果から、全固体 LIB の研究開発に対して、次のような示唆が明らかになった。電動車の普及のインパクトとして、全固体 LIB の長寿命化と急速充電による劣化を低減させるような開発が期待される。また、乗用車への全固体 LIB の普及に際しては、電池価格が高価であっても高エネルギー密度、高耐久、急速充電といった全固体 LIB のメリットが生かせる、PHEV の A・B セグメントへの導入が期待される。

地球温暖化の抑制へのインパクトとして、全固体 LIB の製造時の CO₂ 排出量を低減する必要がある。特に固体電解質の製造時のエネルギー消費量、セル製造時の除湿負荷の低減が期待される。

全固体 LIB のリサイクルに関しては、収集運搬においては、運搬効率の向上、液系 LIB との混合処理の対応可能性の検討が必要であり、失活化・一次処理では、解体プロセスの効率化が必要なが示された。リユースのためには、評価技術、リパック作業、部材コスト、規格共通化等が必要となる。

これらの検討を踏まえて、全固体 LIB が普及した際の社会システムの将来像を図 3.2.5-1 に示す。



図 3.2.5-1 社会システムの将来像

(2) 社会システムの将来像を実現するための課題

全固体 LIB 普及に向けた社会システムのシナリオ検討とあわせて、3.2.4 で検討した社会インパクトの分析から示唆される全固体 LIB 普及のための課題を 1.材料調達、2.製造段階、3.使用段階(充電インフラ)、4.EV・PHEV の購入意欲、5.再資源化の観点から掘り下げた結果を表 3.2.5-1 に示す。

表 3.2.5-1 本検討から示唆される課題

	課題	社会インパクト		
		地球温暖化抑制	リユース・リサイクル	インフラ整備
1. 材料調達	・特にニッケル、コバルトの需給ひっ迫に対する安定供給不安の解消(特に Class1 ニッケルに対して)		◎	
2. 製造段階	・製造時の CO ₂ 排出量の低減 ・市場へ対応したタイムリーな投資と工場拡大の必要性	◎		
3. 使用段階(充電インフラ整備)	・急速充電、超急速充電の拡大に向けた収益性の確保			◎
4. 使用段階(ユーザーの購入意欲向上)	・車両購入費用の低減(全固体 LIB の価格低減) ・運用費用の低減(V2G などユーザーにとって新たな収益元となる制度の結実) ・中古車価格の向上(電池の余寿命診断技術の確立等)		◎	
5. 再資源化(資源循環)	・処理コスト(収集運搬費用、リサイクル費用)の低減 ・車載電池のリユース品の経済性向上、リユース市場の拡大 ・全固体 LIB 向けのより効率的な処理フローの確立		◎	

(3) 課題解決に向けた取組

3.2.5(1)で検討した社会システムの将来像を実現するための提言の骨子を表 3.2.5-2 にまとめた。表 3.2.5-1 に示された課題に対して液系 LIB と全固体 LIB に共通の提言と全固体 LIB 固有の提言に分けて記載している。表 3.2.5-2 に下線で示された提言の骨子は、本社会システムデザインの見直しで推計されたとおりに EV・PHEV が普及するための全固体 LIB が目指す技術開発の方向性を示している。全固体 LIB ならではの課題解決に向けた詳細を検討し、今後の開発等へのフィードバックを検討する。

表 3.2.5-2 本検討から得られた提言の骨子

	液系 LIB と全固体 LIB 共通	全固体 LIB 固有
1. 材料調達	<ul style="list-style-type: none"> ・ニッケル資源の権益確保に向けた資源外交強化 ・日系資本の class1 ニッケル製錬プラント、リサイクルプラントへの公的支援 ・正極材の代替・省資源化技術の開発 ・材料調達のための国内リサイクルの仕組みの推進 	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>固体電解質の安定供給の確保に向けた大量生産技術の開発</u>
2. 製造段階	<ul style="list-style-type: none"> ・大規模投資を可能とする資金調達の枠組み構築 ・市場変動に強いバリューチェーン形成 ・工場立地・建設に対する優遇策 ・装置メーカーとの協業と生産技術の優位性確保 	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>全固体電池製造時の CO₂ 排出削減技術開発</u> ・全固体 LIB の量産化、導入支援による製造コスト低減
3. 使用段階(充電インフラ整備)	<ul style="list-style-type: none"> ・必要となる充電インフラの整備 ・充電インフラ事業の事業性確立のための経済的支援 	<ul style="list-style-type: none"> ・稼働率の高い商用車に対する急速充電整備への支援
4. 使用段階(ユーザーの購入意欲向上)	<ul style="list-style-type: none"> ・運用費用の低減に向けた電池特性の実証支援(V2G) ・<u>蓄電池の残存性能評価技術、認証制度の確立</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>液系 LIB に比して寿命2倍以上、体積密度2倍、電池価格の低減の達成(普及に向けた前提)</u>
5. 再資源化(資源循環)	<ul style="list-style-type: none"> ・回収・処理体制の構築 ・リパック等の作業・部材コストの低減(規格共通化等) 	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>全固体電池に適した低コストな回収・処理体制の構築</u> ・<u>リユース経済性向上のための性能評価技術の開発</u> ・<u>全固体電池のリサイクル技術の開発</u>

3.3 成果の普及

3.3.1 特許出願・対外発表実績

特許出願及び対外発表等の実績を表 3.3.1-1 に示す。中間評価以降、特許出願、研究発表・講演を加速している。

表 3.3.1-1 特許出願及び対外発表実績

全期間(2018年度～2022年度)

	特許出願	論文	研究発表・講演	雑誌等への掲載
件数 (2022年5月迄)	25件	8件	84件	6件
予定件数 (2022年6月以降)	23件	5件	40件	1件

参考: 中間評価時(2018年度～2020年度中間評価)

	特許出願	論文	研究発表・講演	雑誌等への掲載
件数 (中間評価迄)	4件	5件	47件	5件

注: 件数は筆頭者の所属機関でカウント

3.3.2 情報発信

NEDO 及び実施者は、本事業における研究開発活動及びその成果を広く周知するための対外情報発信に取り組んでいる。

上述の論文発表、学会報告、講演、取材対応などに加えて、NEDO のホームページには事業の基本計画、各年度の実施方針、中間年報、成果報告書が掲載されている。また、図 3.3.2-1 に示すように、LIBTEC のホームページでも SOLID-EV プロジェクトの紹介、全固体 LIB の開発に関する情報を発信している。

さらに、より直接的な情報発信として NEDO 成果報告会(蓄電池セッション)を開催している。本事業では蓄電池開発に関心をもつ、開発者、研究者が情報に纏めてアクセスできる取り組みとして、NEDO の次世代電池開発のもう一つの事業である革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発(RISING2)とあわせて本事業の報告を行う取り組みを行い、最先端の蓄電池開発の概要を一括して聴講出来る様にした。NEDO 成果報告会については、2018 年はパシフィコ横浜で、2019 年は東京ビックサイトで開催した。

また、電池関連で国内最大の学会である電池討論会において、独立のセッションを設けて研究成果を報告する取り組みも実施した。2019 年は「第 60 回電池討論会 ナショナルプロジェクト(MEXT・JST・NEDO)合同セッション」として MEXT の元素戦略プロジェクトや JST の ALCA-SPRING と合同のセッションを担当し、本事業からは 2 コマの講演をおこなった。2021 年は「第 62 回電池討論会 NEDO 国プロ合同セッションプログラム」として NEDO の成果報告会を兼ねた形式とし、RISING2 と合わせて 9 コマの講演を企画し本事業からは 5 コマの講演を実施した。図 3.3.2-2 に示すように当セッションは現地約 150 名、オンライン約 550 名の参加があり、NEDO の先端電池開発事業に対する関心の高さが伺えた。



図 3.3.2-1 LIBTEC のホームページ



図 3.3.2-2 第 62 回電池討論会 NEDO セッション の会場の様子
(2021 年 12 月)

第4章 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

本事業における成果の実用化の考え方は、以下のように定義した。

本事業における成果の実用化の考え方(定義)

本事業の成果(全固体リチウムイオン電池の共通基盤技術及び社会システムのシナリオ・デザイン)が、材料メーカー・大学等における新材料の研究開発や自動車・蓄電池メーカーにおける電動車及び車載バッテリーの研究開発に活用されること。

4.1 成果の実用化に向けた取組

上記定義に基づく、成果の実用化に向けた基本的な戦略と具体的な取組について以下に述べる。

4.1.1 開発成果の参加企業での活用に向けた取組

本事業の集中研究拠点である LIBTEC は、全固体 LIB や車載バッテリーで豊富な技術蓄積を有する材料・蓄電池・自動車メーカー25 社より、研究者・エンジニアを出向研究員として受け入れ(2022 年 6 月時点で 34 名在籍)、各社の技術シーズ・ニーズを循環させつつ、大学・研究機関のサイエンスの知見を取り入れて研究開発を進めている。こうした企業間連携及び産学連携により価値を高めた技術の有用性は、各出向研究員が強く実感しており、出向元企業に復帰することで、自ずと参加企業内で活用され、その後、産業界全体に浸透していくと考えられる。実際、出向元企業に対するヒアリングの結果からも評価・解析手法を活用しているとの回答や、人材育成や会社間の技術交流が進んでいるとの回答が多数寄せられている。

この産業界浸透の迅速化をねらい、事業期間中より参加企業の開発担当者に対して研究開発情報をタイムリーに共有し、開発技術の有用性を認知させることを基本戦略とし、以下に示す取組を進めた。

(1) 「SOLiD-EV 技術委員会」の開催

集中研究拠点に参加する 26 法人の開発責任者が出席する「SOLiD-EV 技術委員会」を合計 10 回定期開催し、研究開発の計画及び進捗状況を共有した。開催実績を表 4.1.1-1 に示す。

表 4.1.1-1 「SOLiD-EV 技術委員会」(LIBTEC 主催)の開催実績

回次	開催年月日	内容
第1回	2018年7月11日	事業全体の研究開発計画の確認。知財合意内容の確認。
第2回	2018年9月19日	委員会の開催方法の協議。
第3回	2018年11月14日	各チームの開発進捗の報告。
第4回	2019年2月20日	事業全体の開発進捗の報告。
第5回	2019年6月24日	事業の年度計画の報告。参加研究員等の確認。
第6回	2020年2月18日	2020年度予算の報告。成果利用ルール協議等。
第7回	2020年9月11日	ノウハウ管理に関する協議等。
第8回	2021年5月19日	中間評価結果と2021年度取り組み方針報告等。
第9回	2021年11月10日	成果利用のルール(情報の開示及びノウハウ取扱い)の協議。
第10回	2022年2月16日	成果利用のルール(ノウハウ取扱い及び知的財産取扱い)の協議。

この委員会においては、知的財産の取扱いや情報管理といった成果活用に係る仕組みや運用方法についても、協議・調整している。例えば、知財運営委員会で精査された特許の中で、不実施機関となる大学・研究機関が出願する特許を関連企業に紹介し、産学双方にとって有益となるような取組を推進した。

(2) 「SOLID-EV 技術シンポジウム」の開催

参加 26 法人の開発責任者及び担当者に加えて、参加大学・研究機関の研究者、連携中の他事業関係者、外部有識者(NEDO 技術委員)、経済産業省及び NEDO 担当者が参加する「SOLID-EV 技術シンポジウム」を開催し、関係者全員で研究開発の進捗状況を共有してきた。

開催実績を表 4.1.1-2 に示すとおり、これまでに合計 6 回(延べ 11 日間)開催し、1 回あたり約 150～240 名が出席した。また、シンポジウムの会場風景を図 4.1.1-1 に示す。

表 4.1.1-2 「SOLID-EV 技術シンポジウム」(LIBTEC 主催)の開催実績

回次	開催年月日	内容	参加者数
第 1 回	2018 年 9 月 3 日	事業全体の研究開発方針・計画、個別研究テーマ(29 件)の研究内容。	146 名
第 2 回	2019 年 1 月 21～22 日	事業全体及び個別研究テーマ(34 件)の進捗状況。	159 名
第 3 回	2019 年 12 月 9～10 日	事業全体及び個別研究テーマ(42 件)の進捗状況。	188 名
第 4 回	2020 年 11 月 4～5 日	事業全体及び個別研究テーマ(54 件)の進捗状況。	219 名
第 5 回	2021 年 7 月 12～13 日	事業全体及び個別研究テーマ(46 件)の後半 2 年の目標及び今後の取組み。	235 名
第 6 回	2021 年 12 月 14～15 日	事業全体及び個別研究テーマ(57 件)の進捗状況。	238 名



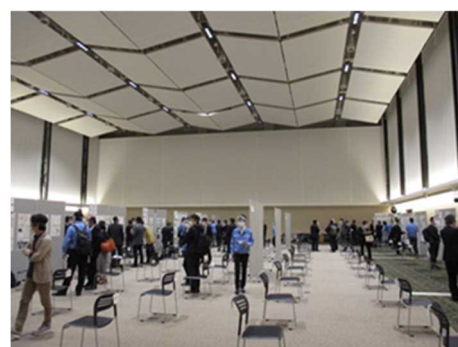
開発進捗報告の状況 (第 3 回)



ポスターセッションの状況(第 3 回)



開発進捗報告の状況 (第 4 回)



ポスターセッションの状況(第 4 回)

図 4.1.1-1 「SOLID-EV 技術シンポジウム(第 3 回、第 4 回)」の会場風景

このシンポジウムでは、ポスターセッションを設け、各企業の関係者が大学・研究機関の研究開発内容について、技術的な理解を深める機会を提供してきた。同時に業種・競合等の垣根を越えた企業間の交流を促進してきた。コロナ感染禍の影響を受けた期間中においても、第 4 回は密を避けることが可能な会場設定によりオンサイトで開催した。第 5 回と第 6 回はオンライン開催となったが、第 5 回ではブレイクアウトルームを設定してポスター会場に近い自由な議論を促進し、第 6 回ではオンラインで事前に発表資料を共有するなどして、より活発な質疑ができるように工夫した。

(3) 参加企業に対する「個別限定情報」の開示

LIBTEC では、出向研究員が取り組んでいる研究開発の情報を出向元企業に対して報告することが出来るルールを設け、出向元企業内での全固体 LIB の研究開発を促進してきた。なお、この報告内容は、LIBTEC において「個別限定情報」として管理されている。

これまでの「個別限定情報」の開示実績は、表 4.1.1-3 に示すように合計 358 件である。組合員企業 1 社あたり約 14 件の開示件数となっている。事業開始当初から一定数の情報開示をおこなっており、研究が進むとともに情報が蓄積されることから開示件数が増加する傾向にある。特に材料・プロセスメーカーで件数の増加が見られており、材料評価技術基盤として一定の役割を果たしているものと考えられる。

表 4.1.1-3 LIBTEC の組合員企業への個別限定情報の開示実績

企業の業種	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度 (~5月)	合計
自動車・二輪メーカー	11	36	25	28	3	103件
蓄電池メーカー	6	19	27	23	3	78件
材料・プロセスメーカー	8	40	52	64	13	177件
合計	25	95	104	115	19	358件

(4) 研究設備の企業見学会の開催

LIBTEC は、組合員企業の開発責任者や出向研究員の上司・同僚が参加する「企業見学会」を開催し、本事業で導入した研究開発設備や研究開発現場の状況等を紹介してきた。

これまでの「企業見学会」の開催実績は、表 4.1.1-4 に示すように延べ 46 回であり、17 社、約 100 名が参加した。

表 4.1.1-4 LIBTEC による企業見学会の開催実績

期 間	企業の業種	回数(企業数)
2018年9月 ~2022年5月	自動車・二輪メーカー	21回(3社)
	蓄電池メーカー	4回(3社)
	材料・プロセスメーカー	21回(11社)
	合計	46回(17社)

4.1.2 材料特性評価技術の産業界・学界の活用に向けた取組

本事業で開発している全固体 LIB の材料特性評価技術については、材料メーカーのみならず、大学・研究機関も広く活用して、我が国における全固体 LIB の研究開発を効率的に進め、日本が全固体 LIB の技術進化でリードする状況を作る必要がある。

この材料特性評価技術の産業界・学界への浸透には、実際のユーザーの立場で成果を利用してもらい、その有用性を実感させるのが最も効果的である。そのため、事業期間中より、新材料の受入れと電池試作・評価、標準電池モデルの提供を行うことを基本戦略として、以下の取組を進めた。

(1) 新材料の受入れと電池試作・評価

LIBTEC は、本事業に参加している材料メーカー及び大学・研究機関を中心として、なるべく多くの新材料サンプルを受け入れて電池試作・評価を行い、その結果をフィードバックすることで、技術の有用性を認知させてきた。加えて、フィードバックの際は、単に評価結果のデータを提示するのではなく、何故、このような評価結果が得られるのかの現象・メカニズムの裏付けデータも併せて提示してきた。

これまでの新材料を用いた電池試作・評価の実績は、表 4.1.2-1 に示すように合計 320 件である。評価結果のフィードバックを受けることで、サンプル提供者が材料の性能を向上することができた実績が複数ある。LIB 主要材以外のバインダーやその他材料の評価件数も多く、開発材料の裾野が広がっている。また、本事業が材料開発の活性化に寄与していることを示唆する別の情報として、図 4.1.2-1 に材料評価件数の年度別推移を示す。中間評価が行われた 2020 年度に材料評価件数が大幅に増えており、2022 年度も通年で 100 件以上になると見込まれる。本事業の中間評価において、ラミネート型セルで体積エネルギー密度 450Wh/L の性能を実証したことにより実用電池への可能性が提示されたことから開発が活発になったものと推定される。

表 4.1.2-1 LIBTEC による新材料を用いた電池試作・評価実績

対 象	評価材料種	評価種類数
第 1 世代全固体 LIB	正極活物質	30
	負極活物質	99
	固体電解質	22
	バインダー	21
	その他	75
次世代全固体 LIB	正極活物質	6
	負極活物質	65
	バインダー	2
合 計		320

(2022 年 5 月末時点)

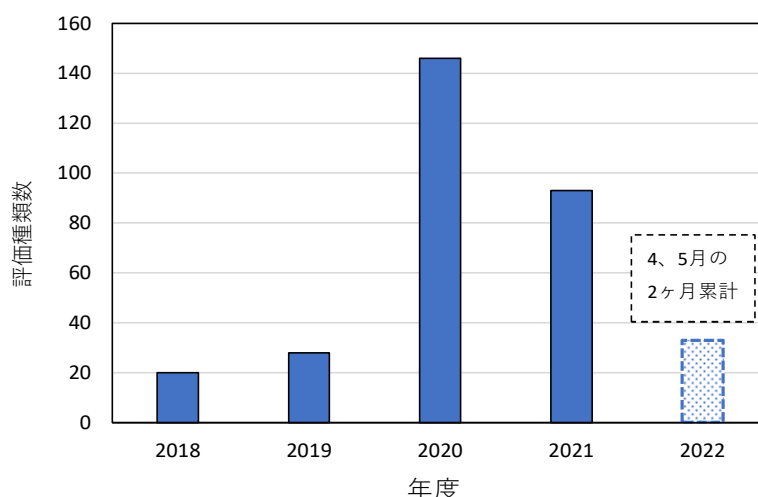


図 4.1.2-1 材料評価件数の年度推移

また、事業の枠を超えたプロジェクト間連携として、本事業と連携関係にある JST 事業 ALCA-SPRING プロジェクトで開発された新規の硫黄系正極材料を受け入れ、LIBTEC で加工・電極化したものを提供し、かつ、電池での評価を行い結果をフィードバックした。2021 年度から連携を進めている文部科学省 科学研究費助成事業「蓄電固体界面科学」との間でも開発された新規正極材料を受け入れ、液系 LIB 及び全固体 LIB で評価を行い、結果をフィードバックした。今後も引き続き各連携先プロジェクトから新材料を受け入れ、全固体電池への適用に向けた検討を進めていく予定である。

さらに、評価技術の別の形の活用として、NEDO「新エネルギー等のシーズ発掘・事業化に向けた技術研究開発事業／全固体 LIB に係る課題設定枠(2019 年度)」で採択された 2 つの研究テーマについて連携を行った。「電極活物質への無機材料の薄膜コート技術の実用化研究開発」については、正極へのコーティング技術の評価し、当該テーマの完了に貢献した。「全固体リチウムイオン電池(電極層並びに固体電解質)薄膜化成形用精密プレスの技術開発」については、LIBTEC がプレス装置の改良について技術的コンサルティングを行っている。

(2) 大学・研究機関への標準電池モデルの提供

標準電池モデル(2cm 角単層セル)を、本事業に参加している大学・研究機関に提供し、各機関が担当している研究開発の加速に繋げるとともに、将来、アカデミアの全固体 LIB の研究開発活動において標準電池モデルが広く活用されていく布石を打ってきた。

これまでの標準電池モデルの提供実績を表 4.1.2-2 に示す。提供先は合計 7 機関(8 研究室)で 14 件である。大学・研究機関自身では全固体 LIB フルセルの解析評価体系を構築することは困難であり、標準電池モデルは有効に活用されている。

表 4.1.2-2 LIBTEC による標準電池モデルの提供実績

対象	提供先	目的
標準電池1	研究機関 A	寿命評価法検討
標準電池1	研究機関 A	安全性試験法検討
標準電池1	研究機関 B	安全性評価
標準電池1	大学 C	電極電位評価法開発
標準電池1	大学 D	リサイクル技術課題検討
標準電池1	大学 C・大学 E	電極モデル開発
標準電池1	大学 D	電極モデル開発
標準電池1	プロジェクト F	残存性能・診断技術開発
標準電池1	研究機関 A	劣化解析
標準電池1	大学 G	安全性評価
標準電池 2.1	研究機関 A	劣化解析
標準電池 2.1	研究機関 B	安全性評価
標準電池 2.1	大学 G	安全性評価
標準電池 2.1	大学 D	リサイクル技術課題検討

また、本事業に参加していない大学・研究機関にも標準電池モデルを提供した。具体的には、2020年7月から2021年7月に連携した NEDO「エネルギー・環境新技術先導研究プログラム」の研究テーマ「車載用蓄電池の内部状態解析に基づく診断技術の研究開発」の実施者に対して、LIBTEC が標準電池モデルを提供し、全固体 LIB の寿命評価の要素技術を共同で確立した。

さらに、適宜バージョンアップした標準電池モデルの仕様書を LIBTEC 組合員企業にも提供し、企業内における全固体 LIB の研究開発の活用を図った。これにより産業界共通の指標として浸透されていくものとする。

(3) 全固体 LIB の特性評価及び分析・解析に係るドキュメント類の整備

本事業で開発する材料特性評価技術が広く活用されるには、「この技術で取得されたデータであれば、自社あるいは自大学の開発品のポテンシャル把握に信頼して使用できる。」、あるいは「顧客への提案資料や研究発表資料に用いたり、顧客評価結果の検証データとして有効に使用できる。」といった認識を関係者に抱かせる必要がある。そのため、LIBTEC では、材料・セルの特性評価や分析・解析に係る試験(実験)の条件、方法等をドキュメント化し、仕様書、要領書といった組織文書として発行・管理してきている。

これまでの文書発行の実績は、表 4.1.2-3 に示すように合計で 109 件である。さらに 2022 年度中には 69 件の発行を予定しており、最終的には合計 178 件に達すると見込まれる。

表 4.1.2-3 LIBTEC による特性評価・分析・解析ドキュメントの発行実績

文書の分類	実績件数	発行予定件数	合計
材料評価関連	23 件	24 件	47 件
製造プロセス関連	57 件	37 件	94 件
シミュレーション技術関連	21 件	4 件	25 件
試作・電池評価技術関連	6 件	2 件	8 件
プロジェクト連携関連(外部連携部)	2 件	2 件	4 件
合計	109 件	69 件	178 件

(4) 産業界・学界に向けた情報発信

本事業で開発する材料特性評価技術が広く活用されるには、開発した技術について広く情報を発信し、関心を高めることも重要である。本事業においては事業期間中から論文、学会発表等による成果の公開やセミナー等による全固体 LIB の紹介を行ってきた。2022 年 5 月までに論文発表 8 件、学会発表 71 件、セミナー等における講演 13 件を行い、書籍への寄稿 6 件、取材対応 3 件でも情報発信を行った。また、NEDO の成果報告会(蓄電池セッション)による事業の概要、成果を纏めて報告する機会も設けている。2019 年と 2021 年の成果報告会は全固体電池への関心の高まりに合わせて電池討論会の中のセッションとして開催し、多くの電池開発関係者が参加しやすい形で開催するなどの工夫も行った(第 3 章に記載)。

4.1.3 国内標準化関係者との研究開発情報の共有

「2.6 国際標準化について」で述べたように、試験評価法の国際標準化を迅速・円滑に進めるには、国際標準化機関における議論を早く始めることが重要である。そのため、事業開始初年度より、国内の標準化関係者と定期的に会合を持ち、研究開発の状況を共有していくとともに、意見・助言をすくい上げて実験データを取得してきた。

なお、国際標準化の進め方は国内審議団体の委員会／専門分科会で今後決定されるため、現時点では規格審議や制定のスケジュールは未確定であるが、審議に有効活用可能なデータを前広に取得していく予定である。

4.1.4 企業を交えた「社会システムデザインの検討」の実施

全固体 LIB 搭載電動車の社会実装に向けた推進力・担い手となるのは自動車・蓄電池メーカーである。そのため、自動車・蓄電池メーカー 9 社の専門家で構成されるワーキンググループを LIBTEC 内に設置し、定期的に会合を開催し、各専門家の意見・助言をすくい上げながら検討を進めた。メンバーには充電インフラ関連の実務担当者も含まれており、広い視野で社会システムの議論を進めてきた。

ワーキンググループの開催実績は、表 4.1.4-1 に示すように合計で 11 回である。

また、国内の蓄電池開発プロジェクトに関係している有識者で構成される「文部科学省・経済産業省ガバナリングボード(蓄電池)」においても、定期的に検討状況を報告している。

表 4.1.4-1 「社会システムデザインの検討」ワーキンググループの開催実績

回次	開催年月日	議論の内容
第 1 回	2018 年 10 月 22 日	全体計画。
第 2 回	2018 年 12 月 12 日	動向調査の内容。
第 3 回	2019 年 2 月 21 日	動向調査の進め方、アンケート調査内容等。
第 4 回	2019 年 3 月 28 日	2019 年度の計画、普及台数推計ツール等。
第 5 回	2019 年 6 月 3 日	アンケート調査結果。
第 6 回	2019 年 8 月 5 日	電動車市場の分析結果、全固体 LIB の技術開的・経済的可能性、普及台数推計ツール等。
第 7 回	2019 年 10 月 28 日	普及台数推計条件及び推計結果。
第 8 回	2020 年 1 月 20 日	動向調査結果、中間とりまとめ。
第 9 回	2021 年 1 月 15 日	中間評価に関する説明、中間評価後の取り組み状況、2022 年度末までの進め方等。
第 10 回	2021 年 12 月 8 日	全体進捗概要(LCA・充電器・商用車導入シナリオ)、まとめの提案等。
第 11 回	2022 年 6 月 23 日	進捗報告とまとめ等。

4.2 成果の実用化の見通し

次の 1)～3)に示す理由により、本事業の成果は、我が国における全固体 LIB の研究開発及び実用化を手戻りなく効率的に進めるための強力なツールとして、国内産業界及び学会で活用されることが期待できる。

- 1) 本事業に参加している企業は、蓄電池開発・実用化のパイオニア的な存在であり、この分野で世界トップの技術力を保有している。また、参加している自動車メーカーは優れた環境性能と顧客ニーズを両立した電動車をいち早く開発・量産してきた実績がある。加えて、全固体 LIB の研究開発で世界をリードしている企業・アカデミアや商業生産を表明している企業も参加しており、これら企業は硫化物系全固体 LIB の特許出願ランキングの上位を占めている。本事業では、こうした産業界・アカデミアの経験、技術力、人材等を最大限に活かす産学連携・企業間連携の体制で研究開発を進めている。
- 2) 「1.1.3 技術動向」で述べたように、全固体 LIB の研究開発が世界的に活発化しており、欧州では産学連携による国家プロジェクトも開始されているが、総合的に見て本事業の方が実施体制に厚みがあり、開発している要素技術や特性評価のプラットフォームは世界トップレベルの水準にある。
- 3) 「4.1 成果の実用化に向けた取組」で述べたように、事業期間中より、成果を企業・アカデミアに浸透させていく取組を研究開発と同時進行で行っており、順調に進展している。

また、本事業の成果と技術蓄積を活用し、将来、LIBTEC が全固体 LIB の材料評価サービスを展開することが予想される。「2.3.1 実施者の技術力・実用化能力について」で述べたように、既に LIBTEC は、過去の NEDO 事業で開発した液系 LIB の材料評価技術及び導入した設備・装置を活用し、材料評価サービス、蓄電池開発コンサルティング、電池技術者育成プログラム等の自主事業を展開している。この自主事業に参加している企業数は 21 社であり、2021 年度に評価した材料サンプル数は約 600 件である。今後においては、本事業に参加の材料メーカー、不参加の材料メーカーを問わず、全固体 LIB 用の新材料を個別に改良したいというニーズや、本事業への参加により派生した企業間コネクションに基づいて個別の研究開発体制を作り、セルのカスタマイズを図りたいというニーズがあることから、LIBTEC において自主事業化の検討を進めている。

さらに 2021 年度に公募、2022 年度より開始したグリーンイノベーション基金事業は 2050 年カーボンニュートラルの実現に向け、野心的な目標にコミットする企業等に対して、10 年間、研究開発・実証から社会実装までを継続して支援する事業であるが、自動車・蓄電池産業分野における「次世代蓄電池・次世代モーターの開発」プロジェクトにおいては、全固体 LIB と関連材料の研究開発テーマとして 7 件が採択されている。これらの企業における研究開発で本事業の成果が活用されることが期待できる。

なお、全固体 LIB の試験評価法に関する国際標準化の進め方は、国内審議団体内に設置される国内委員会／専門分科会で決定されるため、現時点で国際標準化機関における審議開始や規格制定等のタイミングを明言することはできないが、審議に有効活用可能なデータをタイムリーに提供できるように前広に取得していく予定である。

成果の実用化、すなわち「本事業の成果が、材料メーカー・大学等における新材料の研究開発や自動車・蓄電池メーカーにおける電動車及び車載バッテリーの研究開発に活用されること」に対する現状

及び見通しの参考とするために、事業に参画した企業(集中研組合員)、アカデミアに事業の成果がどの様に役に立っているかのヒアリングを実施した。

図 4.2-1 に企業からの回答、図 4.2-2 にアカデミアからの回答を示す。企業では人材育成の他に、本事業の主たる目的である評価・解析方法を参照したという回答や、事業の成果を材料改良に反映したという回答など、既に事業の成果を活用した動きも見られる。アカデミアからの回答では成果についての議論や情報交換など交流に関する回答とともに、LIBTEC による電池試作、評価などを活用した研究開発の効率化が挙げられており、産学交流の効果が見て取れる。

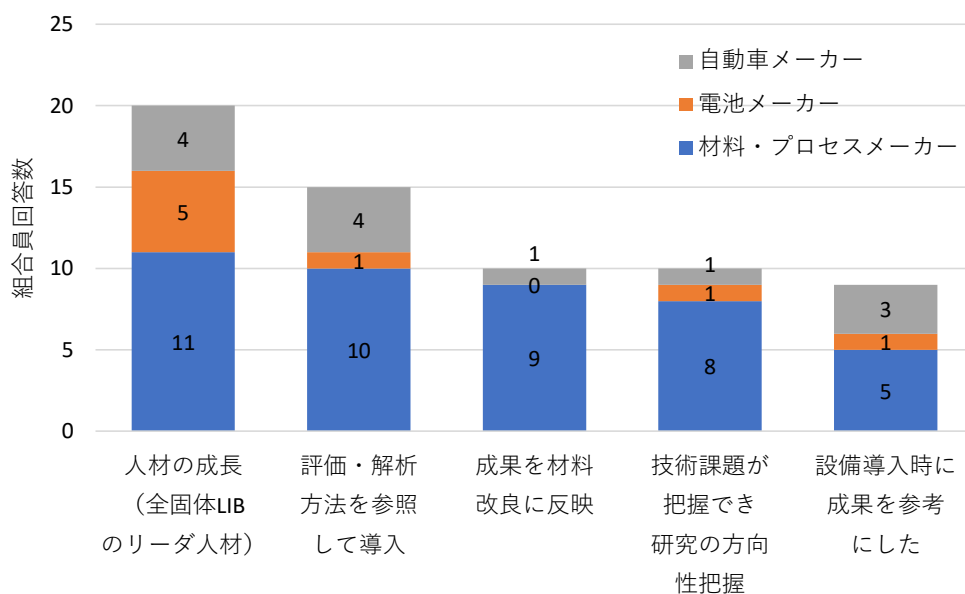


図 4.2-1 参画機関によるプロジェクト成果の活用(企業)

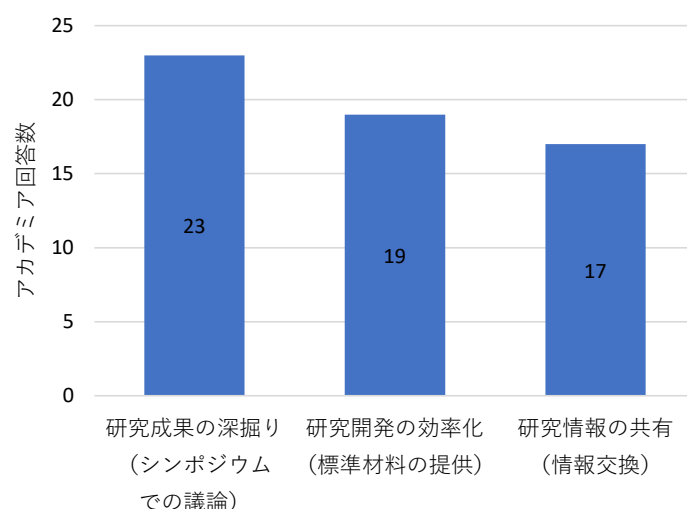


図 4.2-2 参画機関によるプロジェクト成果の活用(アカデミア)

4.3 波及効果

4.3.1 オープンイノベーションの推進

グローバルな競争の激化、資源流動性の高まり、科学技術の高度化・複雑化、研究開発コストの高騰等を背景として、様々な分野でオープンイノベーションが推進されている。世界のトップ企業は、世界中の企業・大学等が産み出す先端的な知識・技術を吸収し、それらを量産用に統合することでビジネスを大きく拡大させている。また、これとは逆に、自社の経営資源を積極的に外部に提供し、他社のイノベーションを促進することで、自社技術が市場に辿り付く最短ルートを切り開き、ビジネスの成功に結び付けている企業も数多く存在している。

このようなビジネス形態の変化と我が国の蓄電池産業の現状を照らし合わせて考えると、これまで国内の蓄電池開発が基本としてきたクローズドイノベーション、すなわち、自前主義的な開発スタイルには限界が近づいていると考えられる。そのため、技術的な難易度が高く、開発リスクが存在する全固体 LIB の研究開発、とりわけ共通基盤技術の研究開発は、研究開発の効率やスピードの観点からオープンイノベーションの枠組みで推進することが望ましいと NEDO は考えており、この考えに則って本事業を推進している。

図 4.3.1-1 に示すように、本事業においては、自動車・蓄電池・材料メーカー等 26 法人が競合・売買関係等の垣根を取り払い、協調して研究開発に取り組んでいる。集中研究拠点である LIBTEC においては、企業各社からの出向研究員によってニーズ・シーズの好循環や幅広い知・人材の交流が図られている。さらに、本事業への参加により派生した企業間コネクションに基づいて個別の研究開発体制を作り、開発を進めようとする動きも見られている。また、LIBTEC がハブとなって国内の大学・研究機関を研究ネットワークに取り込み、課題・ニーズを共有しながら課題解決型の研究開発を進めることにより、学術成果の産業技術としての引き上げを実現している。さらに、各研究チームの内外で、大学・研究機関相互及び異分野の研究者相互の連携・協力も実現している。

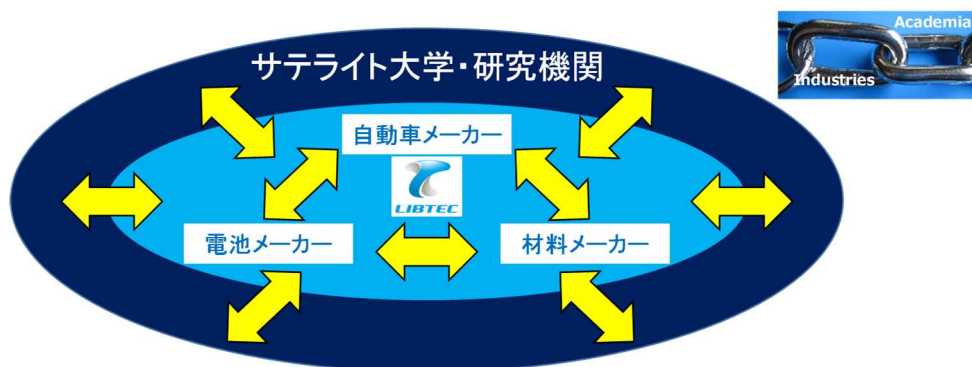


図 4.3.1-1 本事業におけるオープンイノベーションの取組

4.3.2 人材育成

本事業では、「科学者(アカデミア)とエンジニア(産業界)の交流」及び「蓄電池研究者と電池設計・プロセス技術者の交流」を実現している。その結果として、科学者は研究と社会(産業)との繋がり・結び付き、企業のコスト意識や時間感覚等を体感し、一方、エンジニアは大学・研究機関が保有するサイエンスに立脚した研究を体感している。また、産学両方のフィールドで、「サイエンスを理解した電池設計・プロセス技術者」及び「電池設計・プロセス技術を理解した蓄電池研究者」が育成される。

事業に関与した LIBTEC への出向研究員は蓄電池技術者として幅広い経験を積み、出向元復帰後は第一人者として自社の蓄電池開発を牽引している。表 4.3.2-1 に本事業における出向研究員の

人数の推移を示す。登録研究員として研究に従事する人数は各年度 30 名強であり、毎年 10 名程度が入れ替わることで、延べ人数としては 65 名になっている。既に出向元に復帰した研究者は自社における蓄電池開発の第一人者として活躍しており、今後の蓄電池開発への貢献が期待される。

表 4.3.2-1 事業における集中研への出向研究員の人数推移

年度	2018	2019	2020	2021	2022
在籍者数	33	33	33	33	34
延べ人数	33	38	50	63	65

※2018 年度はプロジェクト開始時の人数、2022 年度は 6 月現在の人数、それ以外は 4 月 1 日時点の人数

4.3.3 全固体 LIB の他用途への展開

全固体 LIB は EV・PHEV 用途だけでなく、電動バイク、無人搬送車、フォークリフト、ロボットといった他の動力分野用途にも応用できる。さらには、住宅設置、需要家設置、系統設置等の電力貯蔵システム用途でも応用できる。本事業に参加している企業は EV・PHEV 用以外でもビジネスを展開しており、本事業の成果は様々な分野の世界市場に展開することができる。