

「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発」

(事後評価)分科会

資料7-1

## 「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発」

### 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
-----	--

概要

		最終更新日	2021年7月5日
プロジェクト名	革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発	プロジェクト番号	P16001
担当推進部/担当者	<p>スマートコミュニティ部</p> <p>桜井 孝史 (2016年4月1日～2018年3月30日)</p> <p>細井 敬 (2016年4月1日～2018年3月31日)</p> <p>川本 浩二 (2016年4月1日～2016年10月31日)</p> <p>大園 一也 (2016年4月1日～2018年3月31日)</p> <p>巖 桂二郎 (2016年4月1日～2017年3月31日)</p> <p>木内 幸浩 (2016年4月1日～2016年10月31日)</p> <p>前信 潔 (2016年4月1日～2016年12月31日)</p> <p>古田土 克倫 (2016年4月1日～2018年3月31日)</p> <p>錦織 英孝 (2016年11月1日～2018年3月31日)</p> <p>竹川 寿弘 (2017年4月1日～2018年3月31日)</p> <p>近野 義人 (2017年1月1日～2018年3月31日)</p> <p>安井 あい (2016年4月1日～2018年3月31日)</p> <p>佐藤 恵太 (2016年4月1日～2018年3月31日)</p> <p>次世代電池・水素部</p> <p>細井 敬 (2018年4月1日～2021年3月31日)</p> <p>錦織 英孝 (2018年4月1日～2021年3月31日)</p> <p>竹川 寿弘 (2018年4月1日～2021年3月31日)</p> <p>近野 義人 (2018年4月1日～2020年3月31日)</p> <p>井ノ上 雅次郎 (2018年4月1日～2020年3月31日)</p> <p>小井戸 哲也 (2020年4月1日～2021年3月31日)</p> <p>西山 喜明 (2020年4月1日～2021年3月31日)</p> <p>安井 あい (2018年4月1日～2020年3月31日)</p> <p>佐藤 恵太 (2018年4月1日～2018年10月31日)</p> <p>中島 港人 (2018年11月1日～2021年3月31日)</p> <p>スマートコミュニティ・エネルギーシステム部</p> <p>古川 善規 (2021年4月1日～現在)</p> <p>錦織 英孝 (2021年4月1日～現在)</p> <p>小井戸 哲也 (2021年4月1日～現在)</p> <p>西山 喜明 (2021年4月1日～現在)</p> <p>丹羽 勇介 (2021年4月1日～現在)</p> <p>中島 港人 (2021年4月1日～現在)</p>		
0. 事業の概要	<p>本事業(RISING2)では、オリジナリティが高く、優位性のある電池を開発するために、RISINGの時と同様、世界ナンバーワン・オンリーワンの解析技術を開発する。特に、SPring8の放射光の分解能の向上に加えて、新しいOperando解析技術を開発し、それらとJ-PARCの中性子、NMR、計算科学等の技術を融合し、作動状態での電池の反応現象をより精密に把握し、セル設計に反映するなど、革新型蓄電池の課題解決のための世界最先端の解析プラットフォームを構築する。さらには開発する革新型蓄電池の実用化・製品化の道筋をつけるために、RISINGで目標としてきたエネルギー密度だけでなく、電極・電解質及びセル化技術の開発により、安全性・信頼性、コスト等の車載用蓄電池として必要とされる諸性能についても両立できる蓄電池を目指す。</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</p> <p>蓄電池は市場拡大が見込まれる成長産業であり、国内企業が国際競争力を有した製品を他国に先駆けて開発、事業拡大することで、雇用確保をはじめ国益に資する期待が大きい。</p> <p>現在、国内自動車メーカーや蓄電池メーカー等は、国家プロジェクトあるいは自社開発において先進リチウムイオン電池や革新型蓄電池の技術開発を鋭意進めているが、実用化に向けて解決すべき課題は多い。我が国のこれまでの「蓄電池の技術開発、市場開発」での競争優位を活かして次世代の革新的な蓄電池技術を創出し、グローバルで持続的な地球環境の維持、エネルギーセキュリティ・多様化への対応、および我が国の産業活性化に資することが期待される。車載用の革新型蓄電池の実用化が期待される2030年に向けて、エネルギー密度のみならず、耐久性や安全性等も実セルで技術確立する必要がある。しかしながら、自動車として想定すべき様々な運転状態で求められる性能・条件を満足させるレベルでの技術確立となると、開発リスクとハードルは極めて高く、民間企業単独の取組で実現することは困難である。</p>		

そのため、本事業「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発」プロジェクト(RISING2)においては、先端的な材料科学や高度な解析技術を得意とする大学・公的研究機関、車載用蓄電池の開発・製品化で豊富な実績を有する蓄電池メーカー、さらにはエンドユーザーとなる自動車メーカー等による緊密な産学官連携・協調(集中研方式)の体制を構築して、基礎科学に立脚した共通基盤技術を開発し、リチウムイオン電池(LIB)の性能を凌駕する高エネルギー密度 500 Wh/kg の革新型蓄電池を目指す。

上記を踏まえ、本事業においては、①高度解析技術の研究開発、②革新型蓄電池としてアニオン移動型のフッ化物電池、亜鉛空気電池、カチオン移動型のコンバージョン電池、硫化物電池の4つの蓄電池タイプを対象とした共通基盤技術開発を実施した。なお、これら4つの電池系は、NEDO 事業「革新型蓄電池先端科学基礎研究事業」(RISING)において基礎・基盤的な知見が得られているものである。

#### 1. 2 事業としての妥当性

本プロジェクトは、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 業界全体の競争力強化(公共性・汎用性)
- 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 関係者の利害調整
- ⑤ 蓄電池開発の技術蓄積、マネジメント経験の活用
- ⑥ 蓄電池開発プロジェクト間の連携促進、省庁間の連携

本事業の実施の効果として、試算の結果、2030年には約2,715万t/年のCO<sub>2</sub>削減効果が期待できる。加えて、我が国の自動車メーカーは輸出や現地生産にも積極的に取り組んでいる。輸出・海外生産の対象にはEV・PHEVも含まれることから、世界全体のCO<sub>2</sub>削減にも大きく貢献することが期待できる。

次に「未来投資戦略2017」等に掲げられた2030年におけるEV・PHEVの普及目標が達成された場合の経済効果について述べる。国内生産のEV・PHEVの売上と電池パックの売上はそれぞれ、0.7兆円/年、4.8兆円/年、海外生産のEV・PHEVの売上と電池パックの売り上げがそれぞれ、12兆円/年、1.8兆円/年と試算される。これに対して、本プロジェクトの5年間の予算総額(NEDO負担分)は約166億円であり、十分な費用対効果があると言える。

2. 研究開発マネジメントについて

事業の目標	<p><b>研究開発項目① 高度解析技術開発</b></p> <p>【最終目標】(2020年度末)</p> <p>革新型蓄電池の高性能化や高耐久化を実現する実セルおよび電極の設計・製造に活用可能な新規の解析技術を開発する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・実セル作動条件下における電極活物質-電解質界面の反応解析技術</li> <li>・実セル作動条件下における電極活物質の反応解析技術</li> <li>・実セル作動条件下における電極合剤内の反応分布および劣化現象解析技術</li> </ul> <p>なお、上記の解析技術には、空間分解能で10マイクロメートル、時間分解能で10ミリ秒、深さ分解能で10ナノメートルを超える技術が含まれるものとする。</p> <p>開発した解析技術を用いて、「研究開発項目② 革新型蓄電池開発」で開発する革新型蓄電池の性能や耐久性等の支配因子とその影響度を提示する。</p> <p><b>研究開発項目② 革新型蓄電池開発</b></p> <p>【最終目標】(2020年度末)</p> <p>開発した共通基盤技術を基に試作した実セル(容量5Ah級)について、下記を満足することを確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・重量エネルギー密度: 500 Wh/kg 以上</li> <li>・体積エネルギー密度: 1,000 Wh/L 以上</li> <li>・重量出力密度: 100 W/kg 以上</li> <li>・サイクル寿命: 100回以上</li> <li>・環境性: カドミウム、水銀、六価クロム等の環境負荷物質をセル構成材料として大量に使用していないこと。</li> <li>・車両環境への対応: -30~60℃の動作環境温度において変質しないこと。</li> <li>・経済性: 貴金属等、高コスト元素を大量に使用しないこと。</li> <li>・安全性: 内部短絡、圧潰・過充電時の異常発熱、発火、熱暴走等に対する安全策を講じることが技術的に可能なこと。</li> <li>・充電性: 普通充電(6時間)が可能なこと。急速充電が可能なこと。</li> </ul>							
	事業の計画内容	主な実施事項	2016	2017	2018	2019	2020	総額
	高度解析技術開発					→		
	革新型蓄電池開発					→		
事業費推移 (単位: 百万円) 契約種類: 委託(○) 助成( ) 共同研究( )	会計・勘定	2016	2017	2018	2019	2020	総額	
	一般会計							
	特別会計(電源)							
	特別会計(需給)	2,880	2,900	3,100	3,400	3,400	(15,680)	
	加速予算 (成果普及費を含む)	700	376	0	161	341	(1,578)	
	総予算額	3,580	3,276	3,100	3,561	3,741	(17,258)	
	経産省担当原課	経済産業省 製造産業局 自動車課 電池・次世代技術室						
	プロジェクトリーダー (PL)、 サブプロジェクトリーダー (SPL)、	PL 安部 武志 (国) 京都大学 大学院工学研究科 教授 SPL 森田 昌行 (国) 京都大学産官学連携本部 特任教授 ※上記は中間評価による見直し後の体制である。						

<p>実施体制</p>	<p>委託先（*委託先が管理法人の場合は参加企業数及び参加企業名も記載）</p>	<p>(国) 京都大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、(国) 大阪大学、(国) 神奈川大学、(学) 関西大学、(国) 九州大学、(国) 神戸大学、(国) 東京工業大学、(国) 東京大学、(国) 東京農工大学、(国) 東北大学、(国) 名古屋大学、(国) 名古屋工業大学、(公) 兵庫県立大学、(国) 北海道大学、(国) 三重大学、(学) 立命館、(学) 早稲田大学、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、(財) ファインセラミックスセンター、昭和電工マテリアルズ(株)、トヨタ自動車(株)、(株) 豊田中央研究所、日産自動車(株)、パナソニック(株)、(株) 日立製作所、(株) 本田技術研究所、マクセル(株)、三菱自動車工業(株)、(株) 村田製作所</p> <p>※中間評価での指摘事項を受けて、最終目標の達成に向け、本事業全体でより効率的かつ効果的な革新型蓄電池研究を進めるため、研究実施体制を見直した。上記は見直し後の体制である。</p>
-------------	--	---

<p>研究開発の 進捗管理</p>	<p><u>NEDOによる進捗管理</u></p> <p>各実施者の目標達成度、成果の技術的意義、実用化の可能性、産業への波及効果、産業界への技術移転なども考慮しながらプロジェクト進捗を管理。主な特徴は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 京大拠点に常駐者を派遣。研究現場との密接なコミュニケーションを強化。</li> <li>➤ 毎月、全事業者に登録研究員の従事月報の提出を求め、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するとともに、プロジェクト運営に反映。</li> <li>➤ 毎月、全事業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。</li> <li>➤ 革新型蓄電池研究の研究グループ毎に NEDO 担当者を配置し、適宜開催される報告会へ参加。研究進捗及び最新の技術情報を取り込み、プロジェクト運営に反映。</li> <li>➤ 新型コロナウイルス感染拡大防止のため、緊急事態宣言発出下での研究開発活動を促進できるように、テレワーク及び on line 会議を積極的な導入を指導。</li> <li>➤ 第 60 回電池討論会（2019 年 11 月）の「ナショナルプロジェクト合同セッション」にて、本事業の成果発表を支援し、広報活動を促進。</li> </ul> <p>加えて、技術動向の調査を行い、最新の動向を実施者と情報を共有し、プロジェクト運営に反映した。</p> <p><u>有識者会議の設置・実施者による進捗管理</u></p> <p>研究開発実施者サイドでは、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た。</p> <p>①年に 1 回、「有識者会議」を開催し、研究の進捗状況について有識者の視点から意見・助言を受け、プロジェクト運営に反映した。</p> <p>②年に 1 回、「運営会議」を開催し、参画企業の経営層（役員レベル）と集中研究拠点の運営について議論を行い、大所高所から受けた意見をプロジェクト運営に反映した。</p> <p>③3 か月に 1 回程度、「企画会議」「推進会議」を開催。前者では、参画企業のマネージャークラスの意見を吸い上げ、プロジェクトマネジメントに反映した。後者では、研究進捗や技術トピックスを事業関係者で共有し、意見を交換した。なお事業後期において⑦「全体技術会議」の新設に伴い、後期では「推進会議」は廃止した。</p> <p>④月に 1 回「GL 会議」を開催し、PL、SPL、GL、NEDO によりプロジェクトマネジメントについて議論を行い、マネジメント課題を事業運営に反映した。</p> <p>⑤年に 3 回程度「拡大会議」を電池研究グループ毎に開催し、各電池研究の関係者で研究進捗について情報を共有するとともに議論を実施。本事業後期では、⑦「全体技術会議」の新設により廃止。</p> <p>⑥年に 3 回程度「高度解析技術拡大会議」を高度解析の関係者を集めて開催し、高度解析技術の研究進捗について情報を共有するとともに議論を実施。本事業後期では、⑦「全体技術会議」の新設により廃止した。</p> <p>⑦ ⑤と⑥の機能を集約した「全体技術会議」を事業後期で新設。年に 3 回程度開催し、関係者で研究進捗について情報を共有するとともに議論を実施した。</p> <p>⑧各企業の意見を電池研究開発へダイレクトに反映させる「マネジメント会議」を事業後期で新設。事業目標達成に向けた実セルを用いた実証検証を促進した。</p> <p>⑨年に 1 回（もしくは若しくは 2 回）、「内部シンポジウム」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て、技術的交流を深めた。</p>
-----------------------	---

知的財産等に関する戦略	<p>基本的な戦略を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ オープン／クローズ の考えに基づく情報管理と運営</li> <li>➤ 柔軟な出願形態</li> <li>➤ 戦略的な特許出願</li> </ul> <p>第1の方針について説明する。まず留意している点は、オープン（論文・学会等による発表）にする領域と、クローズ（秘匿すべき情報、特許権等による独占）にする領域を適切に使い分けることである。そして、実施者個別のオープン／クローズ戦略を尊重しつつ、実用化・事業化に際して根幹となるものは積極的に知財を確保するよう指導している。</p> <p>第2の方針については、研究拠点、サテライト、参画企業について個別出願または共同出願を適宜、柔軟に選択することが可能となるようにしている。</p> <p>第3の方針については、各実施者の特許出願・権利化動向を把握しつつ、今後主要な市場形成が見込まれる海外への出願を積極的に推進している。</p> <p>実施者による知財管理については、下記に示す通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 知財運営委員会の設置</li> <li>➤ RISING2 知財運用規定の整備</li> <li>➤ 特許に適さない情報を「ノウハウ」として運用・管理する制度の設置</li> <li>➤ 特許技術動向調査</li> </ul>
	事前評価   平成 27 年度実施 担当部 スマートコミュニティ部

<p>評価に関する事項</p>	<p>中間評価</p>	<p>平成 30 年度 中間評価実施 担当部 次世代電池・水素部</p> <p>①研究開発マネジメント、②研究開発成果、③成果の実用化・事業化、の3項目についてA～Dの4段階で評価され、①はA：非常によい、②はB：良い、③はB：妥当、の結果となった。以下に中間評価での指摘事項および実施した対応についてまとめた。</p> <p>① 研究開発マネジメント  研究開発の加速・重点化に関して3つの指摘があった。  1. 主目標である革新型蓄電池開発に重点を絞り込み  2. 革新型蓄電池開発と高度解析技術開発の連携強化を可能とする連携しやすいグループ編成の見直し  3. プロジェクト終了後における効果的な資産運用</p> <p>1. については、革新型蓄電池開発にリソースを集中させることで参画企業10社と合意し実施した。取り組みを強化するために追加公募を行い、大阪大学、九州大学、工学院大学、名古屋大学、三重大学の5大学を新たに採択した。  2. については、高度解析技術開発グループを革新型蓄電池開発グループに併合した新体制に再構築し、PLは解析技術の専門家から蓄電池の開発を主導している京都大学の安部武志教授に交代した。  3. については、プロジェクト終了後の資産運用・活用方法を議論する会議体を設置した。</p> <p>②研究開発成果  研究開発項目における取り組みの強化に関して、エネルギー密度の目標値達成に固執した開発とならないように、サイクル特性、レート特性、ヒステリシスなど実用化に向けた様々な課題にもより一層の重点を置き、性能・耐久性の支配因子を明確化し、電池特性評価に際してパラメトリックスタディー強化が必要、との指摘があり、実セルの試作及びパラメトリックな特性評価を通じて、エネルギー密度以外の諸特性を確認する取組みを強化した。  さらに、戦略的な特許出願を行うための特許ベンチマークの実施、社会への発信を充実するために第60回電池討論会で成果を発表した。</p> <p>③成果の実用化・事業化  高度解析技術では、解析プラットフォームの維持・運用スキーム明確化が重要である、との指摘に対して、①で記載した体制の再構築により、高度解析技術の成果を革新型蓄電池の成果をパッケージ化して企業に移転できるようにした。一方、革新型蓄電池では、エネルギー密度の他に入出力特性、電流・温度依存性、安全性・信頼性など実運用を想定した諸元の把握が重要になること、電池開発の市場導入については、材料メーカーとの早期協働による研究開発の加速するよう指摘があった。これらに対しては、②で記載した諸特性のリストアップ作業に参画した企業も関与し、実運用を想定した諸元が導出できる評価内容を実施した。</p>
	<p>事後評価</p>	<p>令和3年度 事後評価実施予定 担当部 スマートコミュニティ・エネルギーシステム部</p>
<p>3. 研究開発成果について</p>		<p>3. 1 中間評価目まで  3. 1-1 高度解析技術開発  <u>放射光高度解析技術開発</u>  イメージング HAXPES 装置の導入、共焦点 XRD 装置の導入。X 線 CT による水系空気電池の亜鉛負極断面観察手法を確立。  <u>軟 X 線高度解析技術開発</u>  超軟 X 線 XAFS 測定系の導入。硫化物電池およびハロゲン化物電池について新規負極材料などの軟 X 線 XAFS 測定を実施し、軟 X 線 XAFS 革新型蓄電池材料評価技術を確立。  <u>中性子高度解析技術開発</u>  透過ビームモニタ、7 軸ゴニオメータなどの導入。中性子結晶構造解析から直接 MEM 解析する手法を開発。このデータからハロゲン化物電池の固体電解質中のフッ素イオン伝導経路を予測する解析法を確立。  <u>核磁気共鳴高度解析技術開発</u>  7 T 磁場用の新たな固体 NMR 測定システムの導入。<sup>19</sup>F NMR 測定によるハロゲン化物電池の電極材料/固体電解質の構造解析を実施。  <u>電子顕微鏡測定技術</u>  世界最高の分解能を有する新規収差補正装置の導入。水系空気電池の亜鉛極での反応モデ</p>



ルの観察法を検討。

#### 電気化学測定技術開発

放射光 operando 測定時に並行して測定可能である矩形波インピーダンス測定システムの導入。コンバージョン電池の  $\text{FeF}_3$  正極でインピーダンス測定を行い、低周波数領域に拡散に起因する特徴的なインピーダンス挙動を確認。

#### ラマン分光高度解析技術開発

可動式電場素子実装セルの導入。水系空気電池の亜鉛負極表面における水酸化物イオンのその場ラマン分光測定技術を確立。

#### 計算科学解析技術開発

第一原理計算(電極+反応部分)と古典溶液論(反応周辺の溶質部分)とのハイブリッド計算法の確立。コンバージョン電池の正極である  $\text{FeF}_3$  について、Li 挿入・脱離状態での X 線吸収端近傍微細構造(XANES)を、第一原理計算を用いて解明。

### 3. 1-2 革新型蓄電池開発

#### ハロゲン化物電池

銅正極を初めとする材料を用いて、圧粉型電極を作製。世界トップレベルとなる性能を実証。ただし、コイン電池において 100 Wh/kg とエネルギー密度目標は未達。金属と金属フッ化物を複合化する、金属フッ化物から欠陥を作るなどにより、フッ化物イオン伝導性がほとんどない活物質でも使用可能であることを示してきた。この成果は、今後の新しい電池開発につながる大きな発見である。

#### 亜鉛空気電池

単位面積当たり容量の高い厚膜亜鉛極及び新規な触媒を用いた長寿命炭素系空気極を開発。結果として、8 Ah セルにおいて 311 Wh/kg を達成。亜鉛極、空気極及びセルに関して、電極構成材料(触媒種、炭素、結着剤)、電極組成、電極構造が性能、耐久性に与える影響を詳細に検討。特に亜鉛極については、高度解析を活用して断面 X 線 CT 観察法を確立。亜鉛偏析が劣化要因であることを解明。

#### コンバージョン電池

$\text{FeF}_3$  活物質へのガラス混合により正極特性が大きく向上。結果として、6 Ah 級セルにおいて 319 Wh/kg を達成。 $\text{FeF}_3$  へのガラス混合による非晶質化が耐久性向上に寄与することを確認した。また、充放電サイクルを重ねるごとに、 $\text{FeF}_3$  表面が Fe を含まない皮膜に覆われることが劣化要因であることを解明。

#### 硫化物電池

$\text{VS}_4$  活物質の非晶質化により正極特性が大きく向上。結果として、8 Ah 級セルにおいて 314 Wh/kg を達成。 $\text{VS}_4$  活物質の非晶質化が耐久に寄与することを確認した。また、活物質表面を  $\text{TiO}_x$  皮膜で保護することにより硫黄溶出を抑え耐久性が向上することも分かった。

### 3. 2 事後評価 研究開発成果

#### 3. 2-1 高度解析技術開発

革新型蓄電池への適用に係る研究開発が大きく進捗し、最終目標を達成した。

以下に開発した主な新規解析技術を示す。

- ・SPring-8 放射光において、実セル作動環境において活物質と固体電解質の界面反応を解析する技術を確認した。また、時間分解能 10 ミリ秒を達成。
- ・SPring-8 放射光において、実セル作動環境において活物質の酸化還元反応を解析する技術を確認した。

次に、革新型電池開発において開発した解析技術の適用した成果を示す。

#### フッ化物電池への適用

SPring-8 においてフッ化物電池のオペランド放射光解析技術を確認した。結果、エネルギー密度と活物質利用率の関係を明確にした。

#### 亜鉛空気電池への適用

電池性能と深く関連する、電解液中の亜鉛水和構造を NMR で解析した。結果、電解液の水酸化カリウム濃度は水和構造に影響を及ぼさないことを明確にした。

#### コンバージョン電池への適用

サイクル劣化と正極内の鉄分散状態の関係を、X 線解析と精密充放電を組み合わせで明らかにした。結果、サイクル劣化と鉄の不均一分散の相関を明確にした。

#### 硫化物電池

	<p>サイクル劣化抑制に有効であるバナジウム硫化物へのリン添加について、X線散乱により解析した。結果、狙い通りに二硫化リチウム析出が抑制されたことを明確にした。</p> <p>3. 2-2 革新電池技術開発</p> <p><u>フッ化物電池</u></p> <p>重量エネルギー密度は、コインセル（高容量マグネシウム負極のフルセル適用）で 360 Wh/kg であった。体積エネルギー密度は同セルで 1400 Wh/L であった。重量出力密度は、目標出力における電池動作を確認した。また銅とフッ化バリウムを複合した正極による室温動作を実証した。サイクル寿命は、20 サイクルまで急激な容量劣化がないことを確認した。環境性、車両環境への適応、安全性、充電性については、問題は認められなかった。</p> <p><u>亜鉛空気電池</u></p> <p>重量エネルギー密度は、亜鉛負極構造改良等により、20.4 Ah のパウチセルで 476 Wh/kg であった。体積エネルギー密度は同セルで 662 Wh/L であった。重量出力密度は、メリライト型触媒により過電圧低減により、目標出力における電池動作を確認した。またメリライト型触媒により過電圧低減できることがわかった。30 サイクルまで急激な劣化がないことを確認。添加剤による正極劣化抑制を確認。また環境性、車両環境への適応、安全性、問題は認められなかった。充電性については、6 時間で 50% 程度の充電を確認した。</p> <p><u>コンバージョン電池</u></p> <p>重量エネルギー密度は、正極へのバナジン酸添加、負極利用率向上により単層ラミネートセルで 477 Wh/kg であった。体積エネルギー密度は同セルで 750 Wh/L であった。重量出力密度は、正極へのバナジン酸添加により過電圧低減し、目標出力における電池動作を確認した。サイクル寿命は、60 サイクルまで急激な劣化がないことを確認し、添加材による亜鉛負極のサイクル特性向上を確認した。また環境性、車両環境への適応、安全性、問題は認められなかった。充電性については、6 時間で 50% 程度の充電を確認した。</p> <p><u>硫化物電池</u></p> <p>重量エネルギー密度は、正極へのリン添加、負極利用率向上により、20 Ah 級積層ラミネートセルで 511 Wh/kg であった。体積エネルギー密度は同セルで 700 Wh/L であった。重量出力密度は、正極へのリン添加により抵抗低減し、目標出力における電池動作を確認した。サイクル寿命は、100 サイクルまで急激な劣化がないことを確認し、電解液濃度改良、添加剤による劣化抑制を確認した。また環境性、車両環境への適応、安全性、問題は認められなかった。充電性については、6 時間以下での充電を確認した。</p> <table border="1" data-bbox="416 1301 1447 1451"> <tr> <td>投稿論文</td> <td>154 件</td> </tr> <tr> <td>特許</td> <td>「出願」137 件（うち国際出願 52 件）</td> </tr> <tr> <td>その他の外部発表 （プレス発表等）</td> <td>「学会発表」691 件 「プレス発表」15 件</td> </tr> </table>	投稿論文	154 件	特許	「出願」137 件（うち国際出願 52 件）	その他の外部発表 （プレス発表等）	「学会発表」691 件 「プレス発表」15 件
投稿論文	154 件						
特許	「出願」137 件（うち国際出願 52 件）						
その他の外部発表 （プレス発表等）	「学会発表」691 件 「プレス発表」15 件						
<p>4. 実用化・事業化の見通し及び取組について</p>	<p>4. 1 実用化に向けた戦略</p> <p>実用的な EV が市販されると考えられる 2030 年頃に、本事業で開発された基盤技術が利活用されるためには、本事業終了後も本事業で得られた成果を活用した研究開発を継続することが重要となる。まず、第 1 のシナリオ（シナリオ 1）においては、実用化に向け積み残された課題が無い、あるいは少ない蓄電池タイプについては、企業中心の開発体制（自動車-蓄電池-材料メーカーによる垂直連携体制）を構築し、量産プロトタイプセル（大型セル）の開発ステージに移行していく。第 2 のシナリオ（シナリオ 2）においては、期待どおりの性能ポテンシャルが引き出せていない蓄電池タイプについては、引き続き、産学連携の開発体制で、材料改良と実証セルの開発ステージを継続する。</p> <p>カチオン移動型電池については、本事業終了後はシナリオ 1 に沿って進め、アニオン移動型電池については、シナリオ 2 に沿って進めることとした。</p> <p>4. 2 成果の実用化・事業化に向けた具体的取組</p> <p>本事業における革新型蓄電池に係る成果の実用化の担い手は、本事業に参画している自動車メーカー及び蓄電池メーカーであるため、本事業の成果をどのような形で移管していくのかを検討した。特に 2019 年度以降は、各企業のキーパーソンが出席する「マネジメント会議」を</p>						

新設し、要素技術のフルセル適用を中心に、四半期毎の頻度にて議論した。その結果として、各革新型蓄電池の可能性をより正確に把握することができた。それらを踏まえ、「技術戦略」を策定。後継事業において、継続して研究開発する革新型蓄電池を選定した。

また本事業で開発中の解析プラットフォーム（技術・装置）は世界最高・最先端のレベルにあり、革新型蓄電池の実用化を手戻り無く進めるための強力なツールとして、企業及びその企業と連携するアカデミアによる活用が期待できる。事業終了後における解析プラットフォームの運用体制、運営（コスト負担を含む）・情報管理のルールについて本事業の関係者で議論を深め、コンセンサスを得た。本事業終了後は、蓄電池に関わる解析技術の維持・管理・開発を、蓄電池の課題毎に受益者が負担するコンソーシアム方式を検討している。

#### 4. 3 成果の実用化の見通し

アニオン移動型電池の実用化検討にあたっては、後継事業として「電気自動車用革新型蓄電池開発」（2021年度から2025年度までの5年間）を立案した。後継事業においては、以下に示す5つの車載バッテリーの基本要件全てについて、現行の液系LIBを凌駕する革新型蓄電池を搭載したEV・PHEVを我が国自動車メーカーが世界に先駆け、グローバルに市場投入することにより、運輸部門におけるCO<sub>2</sub>排出量削減に貢献するとともに、我が国の自動車・蓄電池関連産業の競争力を維持・向上することをねらいとした研究開発を実施する。

- ・ 高エネルギー密度
- ・ 高耐久・長寿命
- ・ 発火リスク無し又は極少
- ・ 構成材料が安価（加えて、原材料調達リスクが無い）
- ・ 製造プロセスがシンプル（加えて、タクトタイムが短い）

後継事業の推進にあたっては、先端的な材料科学や高度な解析技術を得意とする大学・公的研究機関、車載バッテリー及びその構成材料の開発・製品化で豊富な実績を有する蓄電池メーカー及び材料メーカー、さらにはエンドユーザーとなる自動車メーカーで構成される産学連携・企業間連携のコンソーシアム体制を構築する。そして、NEDOがこれらプレーヤーの英知を事業内で好循環させるマネジメントを行い、電極・電解質等の材料開発～電池設計～電池試作～評価解析までの共通基盤技術を一貫通貫で構築することにより、革新的車載バッテリーの実用化を実現する技術的ブレークスルーを獲得する。

本事業の波及効果としては、以下があげられる。

##### (1) オープンイノベーションの推進

集中拠点においては、自動車・蓄電池メーカーの出向・出張研究員が競合・売買関係等の垣根を取り払い、協働で研究開発に取り組んだ。これにより、「科学者（アカデミア）とエンジニア（産業界）の交流」及び「蓄電池研究者と解析研究者の交流」を実現した。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おり、これまで垂直連携を基本として展開されてきた我が国の蓄電池の研究開発において、オープンイノベーションを推進した。

##### (2) 人材育成

本事業を経験した「蓄電池エンジニア」は、本事業を経験することにより、「サイエンスを理解する蓄電池エンジニア」へレベルアップした。このように多面的な能力を得た人材は、本事業の後継事業において引き続き活躍すると期待される。加えて、後継事業には含まれない様々な電池の発展にも貢献することが期待される。

##### (3) 低炭素化社会の構築

EV・PHEVおよびFCVの車載蓄電池は、車両運用時における低炭素化に大きく貢献する。のみならず、車載蓄電池から系統へ電力供給することにより、効率的なエネルギー運用へ貢献することもできる。つまり、蓄電池はモビリティの電動化と再生可能エネルギーの主力電源化に向けたキーテクノロジーであり、本プロジェクトで創出される革新型蓄電池は、低炭素なエネルギーネットワークの構築に貢献する。本プロジェクト参画企業は車載用蓄電池以外の分野でもビジネスを展開しており、本プロジェクト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	平成 28 年 1 月 作成
	変更履歴	平成 30 年 5 月 改訂 プロジェクトマネージャーの変更に伴う改訂

プロジェクト用語集

用語	説明
HAXPES	hard X-ray photoemission spectroscopy の略。物質に光を当てたときに表面から放出される光電子の状態によって表面の化学状態を解析する手法の一つ。照射する光のエネルギーが高いため、元素の奥（内核）に存在する電子の状態解析が可能となる。
NMR	nuclear magnetic resonance の略。磁場中の原子核に発生する核スピンの特定のラジオ波を与えると共鳴現象が発生する。その現象を利用して物質の化学構造を解析する手法。
Operando 測定	電池作動上において測定すること。
XAFS	X線を物質に照射すると、特定の波長でX線が物質に吸収される。急激な吸収挙動を示す吸収端の微細構造における波長と吸収されたエネルギーから物質の構造を解析する手法。
SAXS	SAXSは、X線を物質に照射して散乱したX線のうち、 $2\theta < 10^\circ$ 以下の低角領域に現れるものを測定し、物質の構造を評価する分析手法。通常、数nm～数十nm程度の大きさの構造を評価できる。
XRD	X-ray diffraction の略。X線が結晶格子で回折する特徴を生かし、回折パターンから結晶構造を特定する解析方法。
$^{19}\text{F}$	NMRでは通常観測対象となる原子を特定するため質量数を左肩に添えた表記を慣用的に用いている。フッ素NMRにおいては、 $^{19}\text{F}$ NMRという表現を用いる。ただし、天然に存在するフッ素の100%は $^{19}\text{F}$ であり、特殊なフッ素を表す表現ではない。
7T	Tはテスラであり、磁場強度の単位。
インピーダンス特性	電池に交流電流（または電圧）を印加すると交流の周波数によって異なる電圧を示す。この挙動は観測条件や環境に応じても変化することから、この現象を利用して得られる電池の特性のこと
活物質	電池において、電池動作に不可欠なイオンを貯蔵するための材料。
過電圧	放電反応が進むにつれて、基本的な反応機構が変化しないにも関わらず放電電圧が低下する場合がある。または充電反応が進むにつれて、上記機構変化をとまわずに充電電圧が増加する場合がある。この増減した電圧のこと。
固体電解質	固体状態の電解質。なお、電池作動においては、電池内をイオンが移動することが必要だが、電解質とはそのイオン（例 リチウムイオン）の通り道として機能する媒体のこと。
実セル	ケース、集電箔、電解質、正極、セパレータ、負極により構成される構造。それ単体で電池として機能する。なお、セパレータとは正極と負極を短絡させないための膜状の材料である。
全固体電池	電池に用いられる電解質が固体状態である電池。
軟X線	エネルギーの弱いX線。

プラトー	例えば放電反応が進んでも、放電電圧が殆ど変化しない領域が存在する 場合がある。充電反応においても同領域が存在する場合がある。これが プラトー（領域）となる。
放射光	高エネルギーの電子が磁場中でフレミングの法則により円弧を描く際 に円弧の接線方向に発生する光。この光は幅広い波長領域を含むため、 材料化学、物理学を初め様々な分野で利用されている。
メカノケミカル処理	物質を粉砕する際に摩擦、圧縮の力が発生する。それを利用した化学合 成法のこと。

—目 次—

第1章 事業の位置づけ・必要性について	
1.1 事業目的の妥当性	1
1.1-1 本事業のねらい	1
1.1-2 各国の政策・市場動向	3
1.1-3 我が国の上位施策・制度への寄与	8
1.1-4 現行のLIBの課題	11
1.1-5 本事業の取組の概要	13
1.1-6 海外における革新型蓄電池の開発状況	24
1.2 NEDO事業としての妥当性	32
1.2-1 NEDOの関与の必要性	32
1.2-2 実施の効果	34
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	37
2.2 研究開発計画の妥当性	40
2.2-1 研究開発内容	40
2.2-2 本プロジェクトの全体スケジュール	42
2.2-3 研究開発費	43
2.2-4 研究開発人員	45
2.3 研究開発の実施体制の妥当性	47
2.3-1 研究実施体制	47
2.3-2 研究実施体制の強化	48
2.4 研究開発の進捗管理の妥当性	49
2.4-1 NEDO・研究実施者による進捗管理	49
2.4-2 プロジェクトの会議体と運営	50
2.4-3 有識者会議の設置・運営	51
2.4-4 中間評価への対応	52
2.5 知的財産に関する戦略の妥当性	54
2.5-1 知的財産戦略	54
2.5-2 知的財産マネジメント	54
第3章 研究開発成果について	
3.1 中間評価概要	55
3.1-1 高度解析技術開発	55
3.1-2 革新型蓄電池開発	58
3.2 事後評価 研究開発成果	63
3.2-1 高度解析技術開発	63
3.2-2 革新型蓄電池開発	64
3.3 成果の普及	75
3.3-1 知的財産の確保、発表件数	75
3.3-2 一般への情報発信	76

第4章 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	
4.1 実用化に向けた戦略	79
4.2 成果の実用化・事業化に向けた具体的取組	81
4.2-1 革新型蓄電池の成果の実用化・事業化に取り組む者の検討	81
4.2-2 高度解析技術の普及・定着に向けた検討の状況	82
4.3 成果の実用化の見通し	82
4.3-1 アニオン移動型電池の実用化検討	82
4.3-2 波及効果	84



## 第1章 事業の位置づけ・必要性について

### 1. 1 事業目的の妥当性

#### 1. 1-1 本事業のねらい

主要各国で自動車のCO<sub>2</sub>排出・燃費規制が強化される方針であり、モビリティの電動化が世界中で急進展することが予想される。一定比率以上の電気自動車 (EV)・プラグインハイブリッド自動車 (PHEV) の販売を自動車メーカーに義務付ける政策の強化や、将来的なガソリン車の販売禁止の政策が検討されており、それに対応するため、多くの自動車メーカーが、数百万台／年規模でのEV・PHEV販売を目標に掲げ、それを社会にアピールしている。また、中国は「自動車強国化」を狙い、EV・PHEVの普及を図る補助金政策を進めており、今や世界の約半分のEV・PHEVが中国で生産・販売されている。我が国も経済産業省の「自動車産業戦略2014」において「EV・PHEVの新車販売に占める割合を2030年までに2割から3割とする。」という目標掲げ、EV・PHEVの車両価格及び利便性（航続距離）の支配要因となっている車載用蓄電池のコスト低減と性能向上を図るため、産学が連携・協調して研究開発を進める重点分野の一つとして、車載用蓄電池を選定している。

現状では車載用蓄電池としてはリチウムイオン電池 (LIB) が主に用いられているが、更なる電動走行距離の延伸や車両価格の低減を図るために、国内自動車メーカーや蓄電池メーカー等は、国家プロジェクトあるいは自社開発において先進LIB<sup>※1</sup>や全固体電池、革新型蓄電池<sup>※2</sup>の技術開発を鋭意進めている。

EVでガソリン車並みの車両価格や利便性を実現しようとする、電池パッケージのエネルギー密度は500Wh/kg以上が必要である。LIBの理論エネルギー密度は450～600Wh/kgであるが、LIBのようにインサージョン反応（トポケミカル反応）を利用する蓄電池では、イオンが出入りする遷移金属酸化物や炭素等のホスト材料が正極・負極に必要であり、さらに自動車の主動力源として求められる安全性や耐久性等をクリアしようとする、セルで350Wh/kg程度、電池パッケージで250Wh/kg程度が限界と見られており、エネルギー密度500Wh/kgの実現は困難である。そのため、LIBとは電荷キャリア、材料及び構造等が全く異なった新原理の革新型蓄電池（ポストLIB）を開発する必要がある。世界各国において革新型蓄電池の研究開発が展開されているが、実用化に向けて解決すべき課題は多く、またそのハードルも高いため、それらのいずれもが現時点では基礎研究の領域を出ていない。エネルギー密度でLIBと同等の実験データが示された報告例もあるが、耐久性はまだ実用レベルにはほど遠い状況にある。

実用化が期待される2030年にはまだ期間があるが、実際の製品化までのリードタイムを考慮すると、2020年代半ばにはセルの基本仕様を固め、企業による開発フェーズに移行する必要がある。そのためには、2020年代前半にはエネルギー密度のみならず、耐久性や安全性等も実際の単電池（実セル）で技術確立する必要がある。しかしながら、自動車として想定すべき様々な運転状態で求められる性能・条件を満足させるレベルでの技術確立となると、その開発リスクとハードルは極めて高く、民間企業単独の取り組みで実現することは困難である。そのため、

---

※1：先進LIB：高電位・高容量正極材料、高容量負極材料、高電圧耐性を有する電解質材料等を用いて、高性能化や高耐久化、低コスト化を図ったリチウムイオン電池。

※2：革新型蓄電池：リチウムイオン電池のエネルギー密度の工業的な限界（250Wh/kg程度）を超えて実用化が期待できる電池。硫化物電池、多価カチオン電池、金属空気電池等。

先端的な材料科学や高度な解析技術を得意とする大学・公的研究機関、車載用蓄電池の開発・製品化で豊富な実績を有する蓄電池メーカー、さらにはエンドユーザーとなる自動車メーカー等による緊密な産学官連携の体制を構築し、産業界による革新型蓄電池の実用化を促進するための科学技術の知見に立脚した共通基盤技術の開発に、我が国の総力を挙げて取り組むことが必要であることから、産学が連携・協調して研究開発を行う場として本事業「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発」(RISING2)の立案・実行が極めて重要である。

## 1. 1-2 各国の政策・市場動向

### (1) 各国の規制・政策

各国政府による各種規制や補助金、税制優遇制度等の政策は、EV・PHEV等の環境対応車市場・産業動向に多大な影響を与える要因となっている。欧州主要国や中国では、政府主導でガソリン車やディーゼル車等の内燃機関のみで走行する自動車の販売終了に向けた動きが加速している。また主要都市への内燃車乗り入れ禁止も拡大する傾向にある。このように政府が自動車メーカーや消費者に環境対応車への移行を強く促す傾向が近年顕著になっている。

主要各国は、運輸部門における環境・気候変動・エネルギー政策の一環として乗用車の燃費規制を強化しており、CAFE (Corporate Average Fuel Economy : 企業平均燃費) による規制の導入がトレンドとなっている。CAFEは、自動車メーカー毎に企業平均の燃費を算定し、その燃費が年毎に設定される基準値を下回らないように義務付ける規制である。CAFE規制のクリアを義務付けることで、自動車メーカーはエンジン車だけでは目標を達成できないため、EV・PHEV等を製品ラインナップに加えて一定台数以上売ることが必要が生じる。

欧州では、2019年4月25日に2025年以降の乗用車及び小型商用車に対する非常に厳しいCO<sub>2</sub>排出目標の法規が公布された。企業平均の新車1台当たりのCO<sub>2</sub>排出量を2021年に95g/km

(@NEDC) まで減らすという現在の規制に対して、2025年までに約81g/km (@WLTP)、2030年までに約60 g/km (@WLTP) まで下げなければならない。これは2018年時点で欧州における最低の平均CO<sub>2</sub>排出量101.2g/kmを達成しているトヨタ (Tesla等、EV専門メーカーは除く) が、全車種をプリウス並み (94g/km: 24.4km/L @WLTP) の燃費にしても達成できない水準である。すなわちこの規制は自動車メーカーに対し、2025年迄にEV・PHEVの車種を増やして一定台数以上販売する必要性を迫るものとなっている。

米国ではカリフォルニア州を中心としたZEV (Zero Emission Vehicle) 規制があり、新車販売台数に応じて決められたZEV (EV、FCVが該当)、TZEV (=Transient ZEV、PHEVが該当) を導入する必要がある。例えば、2018年MY (モデルイヤー) は新車販売台数のうち4.5%分のZEV+TZEVを導入する必要がある。大規模メーカーではそのうち2.0%をZEVだけで達成しなければならない。ZEVの販売台数が一定比率を上回った場合「クレジット (CO<sub>2</sub>削減量/実績係数)」が得られ、逆に下回った場合は罰金 (5,000ドル/クレジット) を支払うか、クレジットを多く保有する他メーカーからクレジットを購入する必要がある。

中国では2019年から自動車メーカーに一定比率の新エネ車販売を義務付けるクレジット規制 (NEVクレジット) を設け、燃費向上のための企業平均燃費クレジットとのダブルクレジット制度を開始した。生産及び輸入台数が3万台/年以上のメーカーが対象であり、販売台数に応じたNEV (=EV・PHEV・FCV) の販売を2019年は10%、2020年は12%以上にする必要がある。条件を満たさない場合は罰金、あるいは他社からNEVクレジット購入が必要な部分もZEV規制と同様である。

世界中のほとんどの国では燃料規制を実施済み若しくは検討中である。Global Fuel Economy Initiative (GFEI) の2016年度報告書によると、図1.1-2-1に示すように燃料規制採用国は緑色、検討中の国はオレンジ色で示されている。なお、総合的なエネルギー効率やCO<sub>2</sub>削減効果を表す指標には“Well to Wheel”と“Tank to Wheel”という考え方がある。例えば“Well to Wheel”にてEVとHEVのCO<sub>2</sub>削減効果を比較した場合、石炭による火力発電を主電源とする国では、EVよりもHEVの方が大きなCO<sub>2</sub>削減効果を得られるが、逆に水力発電や原子力発電

を主電源とする国では、EVによるCO<sub>2</sub>削減効果は非常に大きくなる。どちらの指標を採用しているかはその国の政策による。

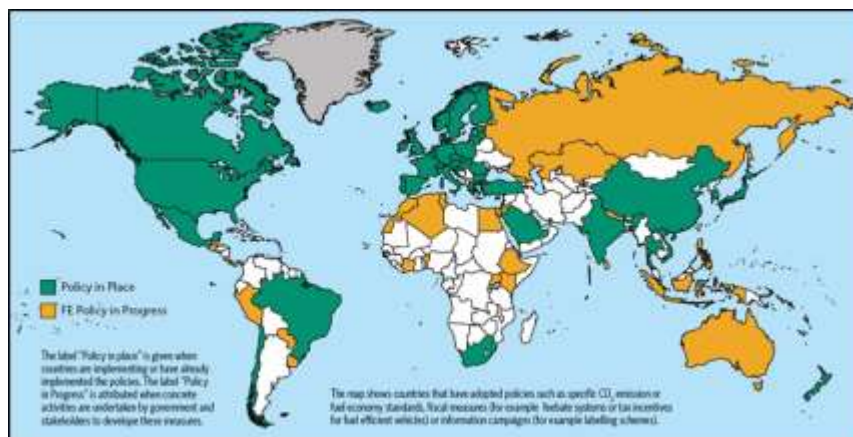


図1.1-2-1 世界の燃料規制採用国 (出典:GFEI State of the world report 2016)

## (2) EV・PHEVの市場動向

図 1.1-2-2 に示すように、EV・PHEV の世界販売台数は 2010 年頃から増加し続け、2017 年度は 116 万台、2018 年度にはその約 1.7 倍となる 192 万台の販売台数を記録した。2018 年度の販売台数の内、EV が約 128 万台で PHEV が約 57 万台であった。

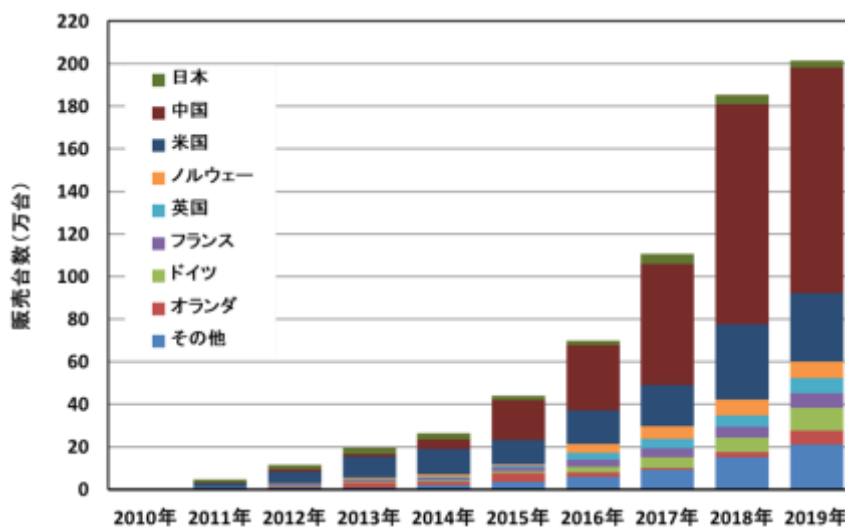


図 1.1-2-2 EV・PHEV 国別単年度販売推移

出典：「MARKLINES 自動車産業ポータル」等の台数統計データによりNEDO作成

地域別では、日本、中国、欧州、北米、韓国、東南アジアで世界の販売台数の約 98% を占める。日本は 2018 年度の時点で約 3% であり EV・PHEV の普及率は他国と比較して高くはない。日本で EV・PHEV の普及率が低い理由として、HEV (ハイブリッド車) の普及率が他国に比べて非常に高いことが挙げられる。傾向として EV 普及率の高い国は HEV の普及率が低く、HEV の普及率が高い国は EV 普及率が低い。これは先述した“Well to Wheel”の概念では、石炭などの火力発電に依存した国では EV よりも HEV の方が CO<sub>2</sub> の削減に有効であることから、敢えて EV を優遇する必要は無いからである。それにも係わらず、環境対応車から HEV を外し EV・PHEV を優遇する国も多い。国策として国内メーカー育成のため、技術的に難しい HEV を排除し、敢え

てEV・PHEV 開発を後押しする場合があります、各国の事情により政策として誘導されていると思われるケースが多くみられる。

EV・PHEV の販売台数が最も多いのは中国である。購入補助金やナンバープレート発行の優遇措置、国内産業の育成等の強力な国策により需要が増加した。2020 年からは補助金が削減されたが、2019 年度から始まった NEV 規制もあり、EV 化への流れは止まらない状況にある。とは言え、補助金の大幅削減、米中貿易摩擦などによる景気減速、家計債務の積み上がりに伴う消費意欲の減退などの影響もあり、2019 年度は自動車市場全体が縮小し、EV 販売にもブレーキがかかった状況になっている。しかし深刻な大気汚染への対策のため、中国政府は世界最高水準の厳しい排気ガス規制を前倒して上海や広州などの一部都市に適用開始するなど、政策による後押しは続いている。

欧州もEV化には熱心である。主要国のEV・PHEV保有台数を図1.1-2-3に記す。保有比率が北欧、特にノルウェーで高く、オランダが後に続く。

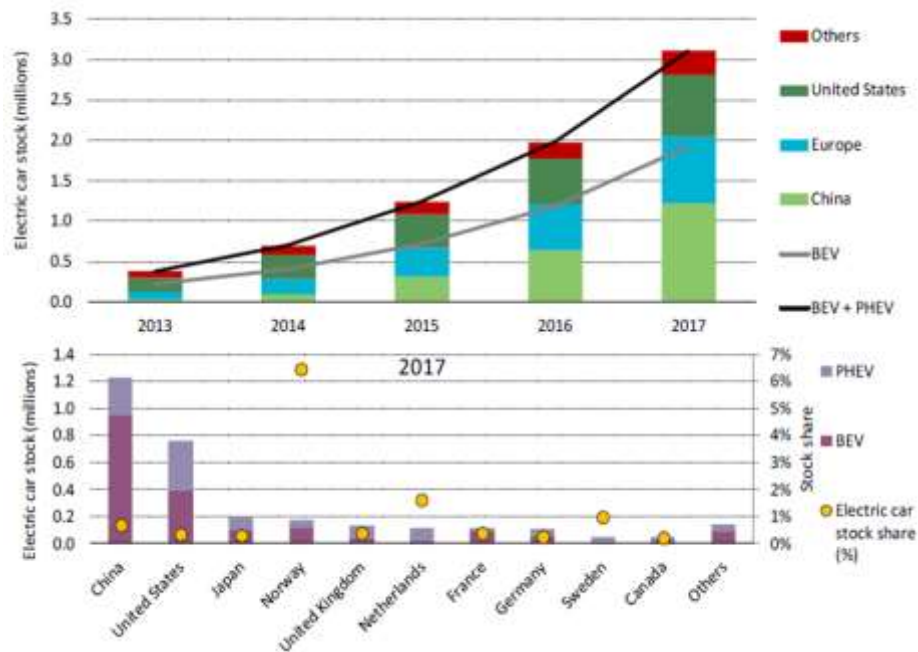


図 1.1-2-3 主要国のEV・PHEV保有台数（出典:IEA Global EV Outlook 2018）

※BEV: Battery Electric Vehicle = EV

EVの普及率が最も高いノルウェーは、2025年までにEV以外の車両販売を禁止することを決定した。2019年上半期の新車販売はEVが45%を占め、中でもTeslaのModel 3が13.5%でトップシェアであった。ノルウェーでEVの普及率が高い要因として、政府による優遇制度が充実しており、ユーザーメリットが大きいことが考えられる。補助金や減税だけでなく、駐車場や有料道路の割引など、数々の優遇措置が講じられている。また、充電インフラも既に整備されている。国としてEV化を推進する理由は、同国は産油国ではあるが発電電力の95%を水力発電でまかなっており、EV化すれば走行時のCO<sub>2</sub>をほとんど排出しないことがあり、さらに国内で消費しない燃料は輸出に回すことができる。

図1.1-2-4に示すように、グローバルOEM各社は、世界の情勢を踏まえ、ユーザーの多様なニーズや生活スタイルに対応しつつ、地球温暖化を抑制する“MaaS”（Mobility as a Service）や“CASE”（Connected, Autonomous, Shared/Service, Electric）と呼ばれる新たなモビリティ

の道を開拓する中長期の経営戦略を競うように公表している。その戦略の基軸となるのが、“電動化”であり、電池に求められる性能は更に高まっている。さらに、従来の走る機能を支えるだけでなく、自動運転に必要なセンサーや通信機能など、1台の自動車あたりの消費電力は増大する方向にあり、こうした側面からも蓄電池の高容量化等、性能向上は重要な課題である。



図 1.1-2-4 将来のモビリティとグローバル OEM の動向

### (3) 蓄電池の市場動向

蓄電池市場の現況と将来予測を図1.1-2-5に示す。蓄電池の世界市場規模は2018年は約8.5兆円である。今後、多用途に及ぶ需要開拓が想定され、2025年には約15兆円、2030年には約19兆円への成長を予測している。用途別での市場成長率は次世代自動車が最大で、2018年は約2.3兆円、2025年に約6.5兆円、2030年に約10.3兆円への成長が見込まれる。

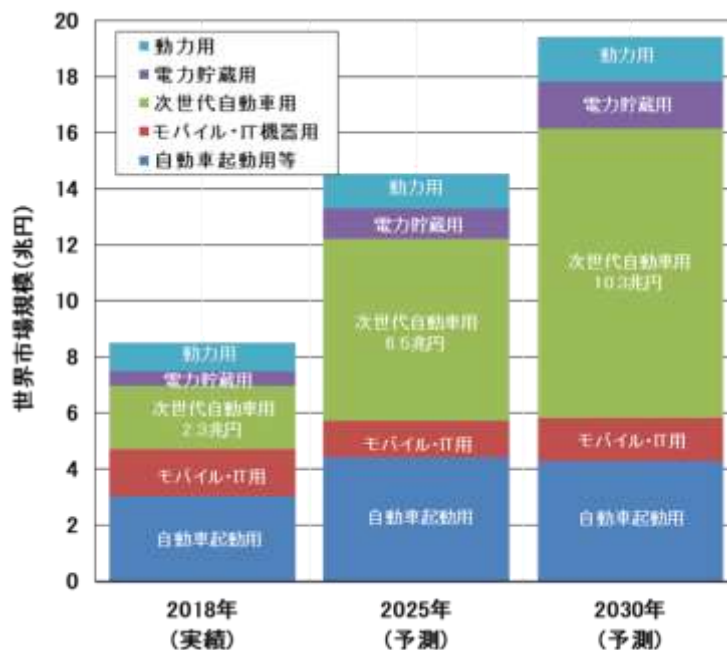


図 1.1-2-5 蓄電池市場の現況と将来予測

出典：「エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2018」、「2019 電池関連市場実態総調査」  
(株式会社富士経済) 等に基づきNEDO作成



#### (4) 車載用LIBの市場動向

自動車業界は100年に一度の大変革時代に入ったと言われ、CASE（Connected：コネクティド化、Autonomous：自動運転化、Shared/Service：シェア/サービス化、Electric：電動化）に向けた活動に注力しており、各国・地域における政策の後押しもあって、世界的にxEV（電動車：BEV、PHEV、HEV、FCEV）が増えている。xEV用のLIBについて、2018年の容量市場規模と世界シェアを図1.1-2-6に示す。2018年の世界シェアは中国系メーカーが過半数の57%を占めており、日本・韓国を含めたアジア圏で全体の9割以上の市場を占めている。

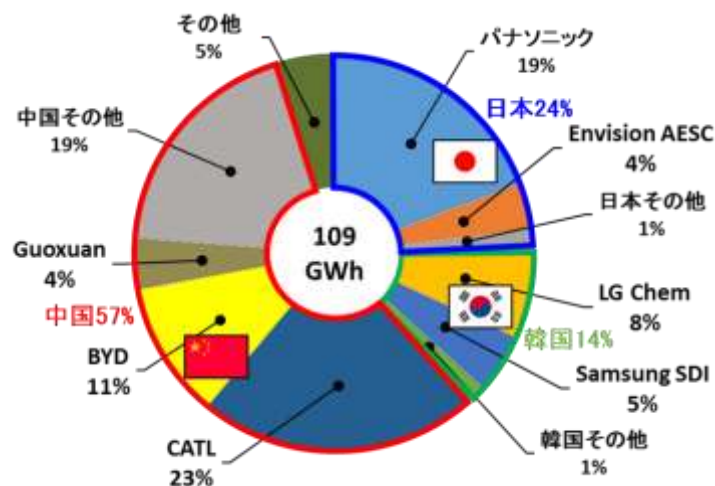


図 1.1-2-6 車載用 LIB 容量市場規模と世界シェア（2018 年）

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

中国は次世代環境対応車向けの購入補助金（ホワイトリスト）政策やナンバープレート規制によって自国のxEV用LIB産業の育成に力を入れることで、世界一の市場を形成した。補助金政策は支給要件をホワイトリスト掲載企業の電池を使用したxEVと定め、自国企業のみを認定し外資企業を排除するようにした。そのためパナソニックやLG Chem、Samsung SDIといった世界有数の蓄電池メーカーは支給対象とされなかった。その後、補助金の支給要件として要求される電池性能基準が段階的に引き上げられたことで、中国におけるメーカー間の競争が激化し、統廃合による業界の再編が進んでいった。2019年にホワイトリストに韓国メーカーが掲載されるなど規制緩和の動きがみられたが、当初2020年には補助金支給自体が終了する予定であった。これはCATLやBYDといった自国蓄電池メーカーが世界レベルへと成長したことで政策の目的を達成したからとみられている。一方で、世界最大のxEV市場を持つ中国において、補助金政策は延長されたものの、2020年からは補助金額が削減されて行くことによる関連市場の冷え込みといった懸念もあり、今後も中国は車載用LIBの市場において大きな影響を与えて行くと思われる。

欧州においても補助金支給によってxEV市場を支えようという試みがあるが、これまでは現地でLIBを生産する有力メーカー自体が無く、バッテリー調達も今までは中韓の電池メーカーに頼ってきた。しかしながら、Volkswagenは、2019年9月に独ザルツギッター（Salzgitter）工場にてセルのパイロットラインを稼働させた。その他にも、Northvoltとの折半出資の合弁事業に9億ユーロを既に投資した。2020年にザルツギッターで16GWhのバッテリーセル工場の建設に着工し、2023年から2024年初頭の稼働を計画している。

## 1. 1-3 我が国の上位施策・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施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) エネルギー基本計画（第5次計画：2018年7月、閣議決定）

我が国は化石燃料に乏しく、その大半を輸入に頼るという脆弱性を抱え、エネルギーを巡る国内外の状況変化に大きな影響を受けやすい構造を有している。エネルギーの安定確保は国の安全保障には不可欠であり、我が国にとって常に大きな課題である。さらに、国際的な地政学的構造の大きな変化に直面する中で、我が国のエネルギー安全保障を巡る環境は厳しさを増してきている。このような状況への対応には、長期的、総合的かつ計画的な視点に立ってエネルギー政策を遂行していく必要があり、その着実な遂行の確保を目的として、2002年に「エネルギー政策基本法」が制定された。この基本法では、政府が総合資源エネルギー調査会の意見を聴き、エネルギー需給施策の長期的、総合的かつ計画的な推進を図るために「エネルギー基本計画」を策定することを定め、少なくとも3年に一度の頻度で内容を検討し、必要に応じて変更を行うとしている。この法律に基づき、2003年に最初の計画が策定されている。その後、第二次計画が2007年に、第三次計画が2010年に策定され、東日本大震災以降では最初の計画となる第四次計画が2014年に、そして第5次計画が2018年7月に策定された。

この第5次計画における蓄電池に関係する主な記載は以下のとおりである。

- ① 蓄電池の国際市場の規模が大きく拡大していくことが予想され、引き続き、技術開発、国際標準化等により低コスト化・高性能化を図っていく。
- ② 次世代自動車の新車販売に占める割合を2030年までに5割から7割とすることを目指し、電動化・自動化・サービス化等の制度環境・社会インフラの整備や次世代電池をはじめとした基盤技術開発の抜本的強化等に向けた戦略を定め、官民一体でこれを進める。
- ③ 定置用蓄電池やEVなどの需要家側に設置される分散型エネルギーリソースを活用するバーチャルパワープラント（VPP）、EVからの逆潮流を制御するVehicle-to-Grid（V2G）、蓄電池等の調整力を活用し、調整力の脱炭素化を進めていく。

### (2) 科学技術イノベーション総合戦略2017（2017年6月、閣議決定）

我が国政府は、「第4期科学技術基本計画」（2011年8月、閣議決定）を指針とする科学イノベーション政策の大きな方向性の下、短期の工程表を具備する「科学技術イノベーション総合戦略」を毎年策定する枠組みを構築している。この枠組みに基づき、「科学技術イノベーション総合戦略2017」が2017年6月に閣議決定されているが、この戦略の「第3章 経済・社会的課題への対応」の「(1) 持続的な成長と地域社会の自律的な発展」において、次世代蓄電技術の開発・実証等への取組が重点的課題として取り上げられている。さらに、科学技術イノベーション総合戦略を抜本的に見直し、グローバルな視座に立ち、基礎研究から社会実装まで一貫通貫の戦略として2018年に「統合イノベーション戦略」が新たに策定された。2019年では「第5章 特に取組を強化すべき主要分野」の「(4) 環境エネルギー」にて蓄電池が取り上げられている。



(3) 自動車産業戦略 2014 (2014 年 11 月、経済産業省策定)

自動車産業全般を幅広く取扱い、自動車産業が「国民産業」として今後も永続的に発展することを指す戦略として、経済産業省は 2014 年 11 月、「自動車産業戦略 2014」を策定した。この戦略において、次世代自動車の政府の普及目標を 2030 年に 50~70% (うち EV・PHEV は 20~30%) と定め、「この普及目標は、我が国の環境・エネルギー制約の克服と同時に、我が国の自動車産業が永続的に発展していくためにも達成されなければならない、意欲ある多様な主体がさらに幅広く大同団結し、取組をさらに強化する必要がある。」とした上で、蓄電池は産産・産学で協調し、研究開発の効率化とより高度なすり合わせを実現すべき重点分野の一つとして選定されている。

(4) 未来投資戦略 2017 (2017 年 6 月、閣議決定) 及び未来投資戦略 2018 (2018 年 6 月、閣議決定)

我が国の経済を再興すべく、第二次安倍内閣の経済政策 (アベノミクス) 第一ステージにおける大胆な金融政策、機動的な財政政策に続く「第三の矢」として、「日本再興戦略」(2013 年 6 月、閣議決定) が策定された。その後、成長戦略のギアを一段階シフトアップするための「日本再興戦略 2014」(2014 年 6 月、閣議決定)、「未来投資による生産性革命の実現」と「ローカルアベノミクスの推進」を両輪とした「日本再興戦略 2015」(2015 年 6 月、閣議決定)、同経済政策第二ステージとして「新・3本の矢」に掲げた GDP600 兆円の達成を目指した「日本再興戦略 2016」(2016 年 6 月、閣議決定) が策定された。そして、2017 年には世界に先駆けた「超スマート社会」(Society 5.0) の実現を目指した成長戦略として「未来投資戦略 2017」(2017 年 6 月、閣議決定) が策定された。

これら成長戦略には、達成すべき「成果目標 (KPI : Key Performance Indicator)」が設定されており、この KPI を実現するために必要な個別施策の方向性、手段、実施時期等が明記されている。「未来投資戦略 2017」の「エネルギー・環境制約の克服と投資の拡大」において記載されている蓄電池に関する戦略と KPI は次のとおりである。

- ① 車載用蓄電池については、現在の液系リチウムイオン電池よりも安全面等で性能が高い全固体リチウムイオン電池等の開発・実用化を加速する。
- ② 2030 年までに乗用車の新車販売に占める次世代自動車の割合を 5~7 割とすることを目指す。
- ③ EV・PHEV の普及台数を 2020 年までに最大 100 万台とすることを目指す。
- ④ 2020 年に国内企業による車載用・電力貯蔵用の先端蓄電池の市場で、年間 5,000 億円 (世界市場の 5 割程度) を獲得することを目指す。
- ⑤ 2020 年までに系統用蓄電池のコストを半分以上 (2.3 万円/kWh 以下) まで低減することを目指す。

また、2018年6月に閣議決定された「未来投資戦略2018」では、Society 5.0を本格的に実現するための新たに講ずべき具体的施策として、蓄電池関連では次のような施策が追加されている。

- ① 電動車の普及拡大に備え、EV を電力の需給バランス調整等に活用する Vehicle to Grid 技術の開発を進め、平成33年度 (2021年度) の実用化を目指すとともに、電池の省資源技術やリユース・リサイクルの技術の開発、電動車を活用したサービスモデル構築等を行

う。また、電動車の車載用電池について、平成37年(2025年)の全固体蓄電池、平成42年(2030年)の革新型蓄電池等の実用化を見据えた研究開発、鉱物の安定供給を進める。

- ② 運輸部門の省エネを推進するため、電気自動車、燃料電池自動車等次世代自動車の普及、新たな燃費基準などの自動車単体対策や、より高効率な車載用蓄電池の開発・実用化を進める。

(5) 「自動車新時代戦略会議」(2018年8月、中間整理)

自動車新時代戦略会議は、コネクテッド、自動化、シェア・サービス、電動化という大きな技術革新の波を踏まえて、わが国の自動車産業が競争力を高め、世界のイノベーションをリードするための戦略について検討している。2018年8月に同会議における検討を踏まえて、中間整理を取りまとめている。自動車新時代戦略会議(中間整理)における電気自動車に関する主な記載は以下のとおりである。

- ① 2°Cシナリオを前提とした環境性能水準として 2050 年までに自動車1台、1kmあたりの温室効果ガス排出量を 2010 年比で8割程度削減(乗用車については9割程度削減)することを目指す。
- ② この水準が達成される場合、乗用車の電動車(xEV)率は100%に達することが想定される。戦略的な対応を加速し、電池等の技術革新、インフラや制度面での環境整備が進み、電動車の性能や消費者にとっての魅力を十分に高めていくことが重要である。

(6) 「革新的環境イノベーション戦略」(2020年1月、統合イノベーション戦略推進会議決定)

運輸部門において、2050年までに、世界で供給する日本車1台あたりの温室効果ガス排出量を2010年比で8割程度削減することを長期ゴールと定めた上で、EV・PHEV等の電動車の普及拡大に向け高性能蓄電池の技術開発に取り組むとしている。また、この開発に際しては、基礎基盤研究を進めつつ、大学・ベンチャー等の知識を取り込みながら、国内外の研究機関との連携体制を構築するとしている。さらに、電池特性の基礎的課題の解明に取り組む拠点を設置し、電池設計から電池材料開発、電池作製・評価解析までを一気通貫で行う体制を整備するとしている。

## 1. 1-4 現行の液系 LIB の課題

図 1.1-4-1 に、現行 LIB の課題を示す。世界規模での環境・エネルギー問題の解決という観点において、EV・PHEV 及び車載用蓄電池は、高い確度で今後の市場成長が見込まれている。その一方で自動車ユーザーの意識として、現在の EV・PHEV は、航続距離が短い、充電時間が長い、充電インフラが少ない等の利便性や、車両価格がガソリン車と比べて割高感があり、中古車としての下取り価格が低い等の経済性についてのマイナスイメージが存在する。さらに、スタイリング及び車内空間にも物足りなさを感じ、購入決断に踏み出せないとの声もある。これらの課題が解消されなければ、EV・PHEV の購入層は限定的なものとなるが、課題の支配的要因となっているのが 車載蓄電池の性能とコストである。

現在の 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 は一歩間違えると発火の危険性があり、また高レート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。その結果、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。また生産コストも高く、電池パックは車両コストの約 1/3 を占めるとも言われており、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、車載用蓄電池について、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、この課題を液系 LIB で解決するのは難しい。

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、数倍レベルのエネルギー密度の向上は困難であることによる。仮に数十%レベルの向上を図るにしても、例えば、NCM 系(三元系)正極活物質の高容量化に有効な Ni 含有量の増加は、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還元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。

また資源制約の観点からは、液系 LIB で使用されるリチウムやコバルトは採掘可能な地域に偏りがあることから、EV 大量普及時には使用量の増加に伴う高騰の可能性等のリスクも存在する。



図 1.1-4-1 現行リチウムイオン電池の課題

## 1. 1-5 本事業の取組の概要

本事業「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発」(RISING2)では、EVの大量普及に貢献する蓄電池、言い換えればEVの販売価格低減に寄与し、かつユーザーの利便性も向上させる車載用蓄電池を開発目標とした。ユーザーに対してガソリン車からEVへの乗り換えを訴求し、カーボンニュートラルに貢献していくとともに、日系OEMがグローバルなEVビジネスを勝ち抜けるようにしていくことが重要であるため、目標とする蓄電池の基本的な要件として、図1.1-5-1に示す5点を掲げて、開発に取り組んだ。

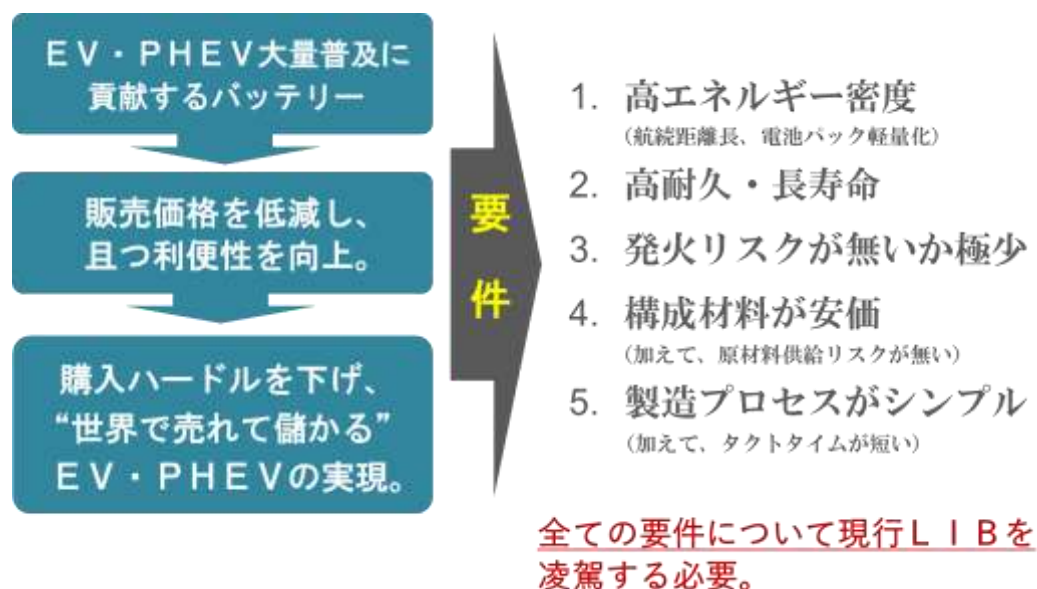


図 1.1-5-1 本事業で目標とする車載用蓄電池の基本的な要件

図 1.1-5-2 に示すように、EV でガソリン車並みの車両価格や利便性を実現しようとする、電池パッケージのエネルギー密度は 500Wh/kg 以上が必要である。しかしながら、LIB のようにインサージョン反応(トポケミカル反応)を利用する蓄電池では、イオンが出入りする遷移金属酸化物や炭素等のホスト材料が正極・負極に必要となるため、エネルギー密度 500Wh/kg の実現は困難である。そのため、LIB とは電荷キャリア、材料及び構造等が全く異なった新原理の革新型蓄電池(ポスト LIB)を開発する必要がある。

本事業では、2030年にガソリン車並みの走行性能を有する普及価格帯の電気自動車(EV)等を実現するため、リチウムイオン電池の性能を凌駕する革新型蓄電池の実用化を促進する共通基盤技術を産学官の連携・協調による集中研方式で開発した。

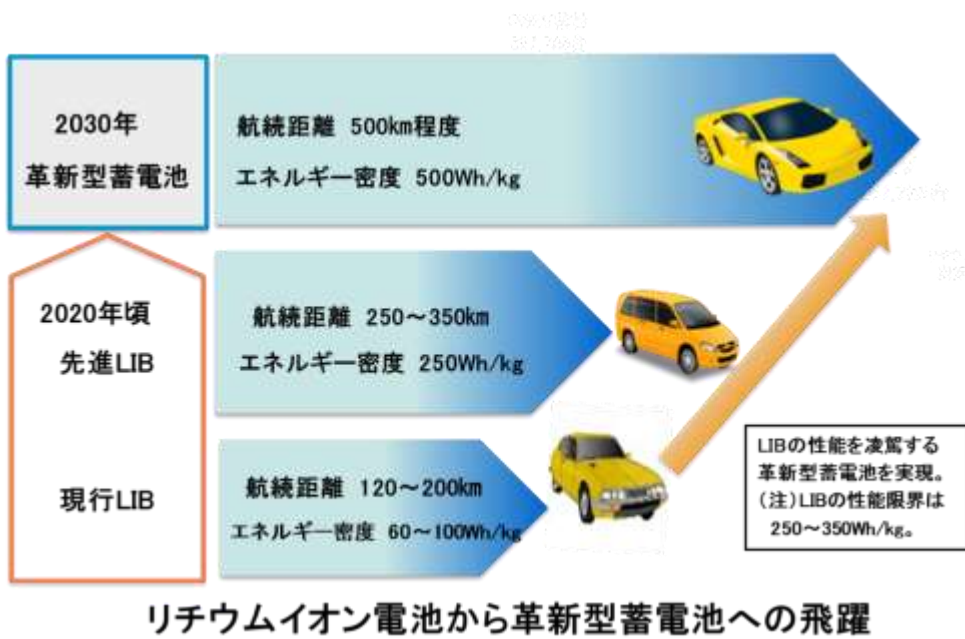


図 1.1-5-2 革新型蓄電池によるガソリン車に匹敵するEVの実現

図 1.1-5-3 に今後の車載用蓄電池に適用されていく蓄電池タイプの中長期的な技術シフトイメージを示す。当面は現行の液系LIBが車載用蓄電池の主流であるが、現行LIBに代わり、相反関係にある高エネルギー密度と安全性の両立が可能な全固体LIBへのシフトが始まり、次いでLIBの性能限界を大きく超える革新型蓄電池の市場投入で常に世界の先手を取り続ける必要がある。



図 1.1-5-3 車載用に適用される蓄電池の中長期的な技術シフトイメージ



(1) 革新型蓄電池開発

本事業においては、図 1.1-5-4 に示すように、アニオン移動型のフッ化物電池、亜鉛空気電池、カチオン移動型のコンバージョン電池、硫化物電池の4つの蓄電池タイプを対象として共通基盤技術の研究開発を実施した。なお、これら4つの電池系は、2009～2015年度に実施したNEDO事業「革新型蓄電池先端科学基礎研究事業」(RISING)において基礎・基盤的な知見が得られているものである。

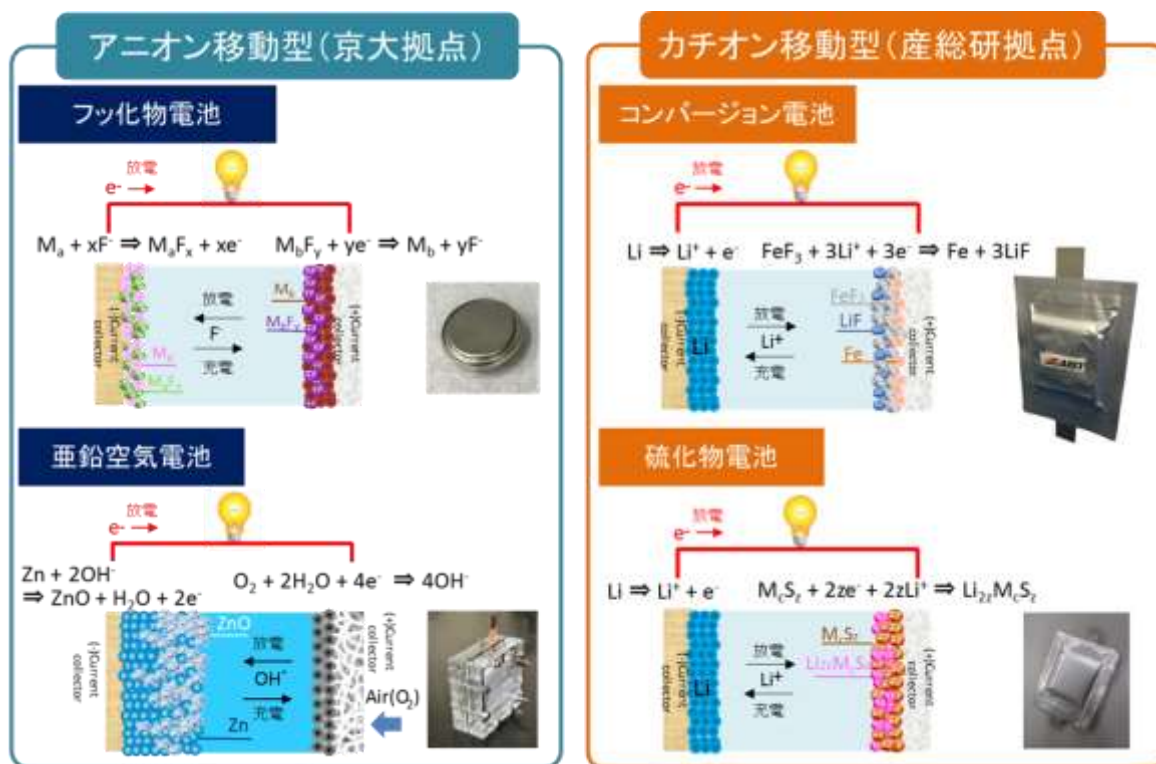


図 1.1-5-4 研究開発対象の蓄電池タイプ

フッ化物電池は金属ハロゲン化物を活物質とし、1価のフッ化物イオン(F<sup>-</sup>)の移動で反応が進行する蓄電池であり、多価イオンの移動が不要である。密閉系電池として最高の理論体積エネルギー密度を有し、異常時にも酸素を放出しないため、高い安全性が得られる。新規の概念であり、海外も含めて研究成果の報告例や障害となる特許が無いため、オープン・クローズの知財戦略や標準化と特許の組合せにより、ビジネス段階での優位性を構築するには最適と考えられる。

亜鉛空気電池は水酸化物イオン(OH<sup>-</sup>)の移動で反応が進行する蓄電池であり、酸素を正極活物質として利用するため、重量を小さく抑えることができ、高いエネルギー密度が得られる。水系の電解液を使用するため、燃焼の危険性がない。また、亜鉛は安価な金属であり、資源制約も無い。研究の歴史が古く、研究成果の報告例が多いものの、高エネルギー密度電池としての取組みは少ない。特許件数も多いが、期限切れが多く、ビジネス段階で障害となる特許はない。

コンバージョン電池はFeF<sub>3</sub>、FeOF、FeS<sub>2</sub>等を正極活物質に用い、1電子反応分のLiがインサージョン(放電)した組成から、更に2電子又は3電子反応分、Liとのコンバージョン反応に

よる放電が可能なものである。トータルで3電子又は4電子反応となるため、高容量が期待でき、密閉系電池としてはリチウム硫黄電池に次いで高い理論エネルギー密度が得られる。また、異常時にも酸素を放出しないため、高い安全性が得られる。

金属硫化物電池はリチウムイオン ( $\text{Li}^+$ ) の移動で反応が進行する蓄電池であり、資源量が豊富で高い理論容量を有する硫黄を正極とするため、高いエネルギー密度が得られる。資源量の豊富な硫黄を利用することで低コスト化も期待できる。リチウム硫黄電池の研究開発の歴史は古いが、硫黄の溶出が課題となって実用化に至っていない。前記した RISING プロジェクトにおいて硫黄の溶出を抑制し、同時にエネルギー密度・出力等のバランスを取れる金属多硫化物の正極材料を開発済みであり、基本特許を出願済みである。



## ①革新型蓄電池の特許動向

### (a)フッ化物電池の特許動向

アニオン移動型フッ化物電池の2001年以降の特許出願件数の推移を図1.1-5-5に示す。2017年までの全出願件数が35件と少ない。出願人国籍別では日本24件（内、RISING事業で20件）と最も多く、米国9件、欧州2件の順。最初の優先権主張年は2005年で、米国California Institute of TechnologyとアイルランドのPotanin Institute Limitedから出願されている。米国Rutgers大も2007年以降、3件出願している。

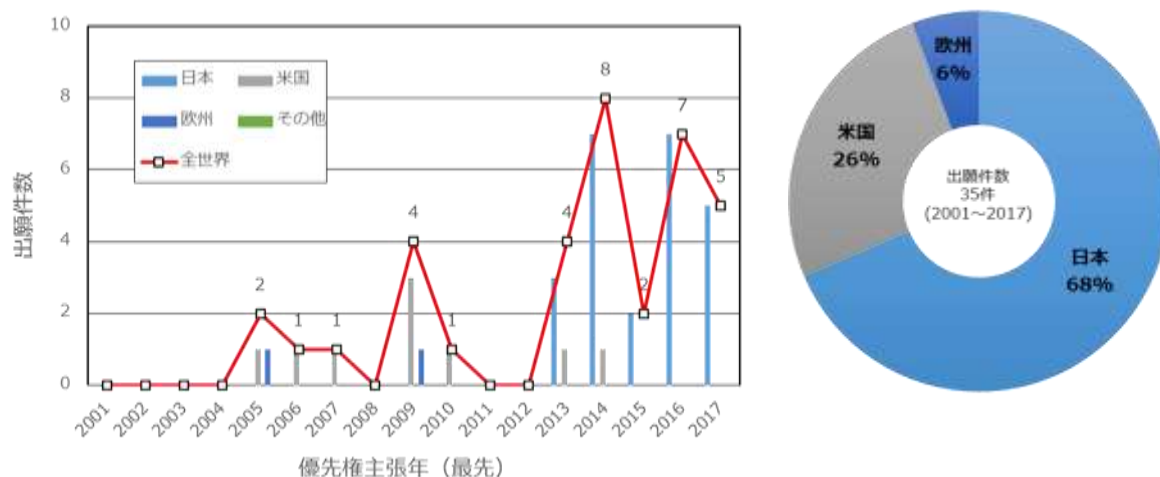


図 1.1-5-5 フッ化物電池の特許出願件数推移、及び出願人国籍別出願件数の比率

### (b)亜鉛空気電池の特許動向

亜鉛空気電池の出願件数を図1.1-5-6に示す。日本は2008年頃から出願件数が増加し、総数は830件強（40%）でトップ。次いで中国、米国、韓国の順。2015年以降、日本は減少傾向であるが、逆に中国は急増し、2016年に日本を追い抜いた。

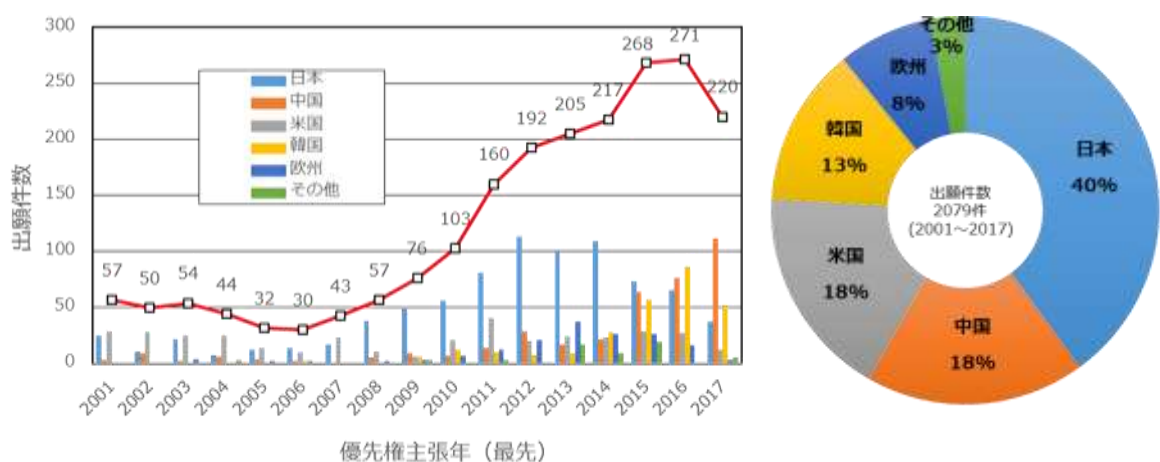


図 1.1-5-6 亜鉛空気電池の特許出願件数推移、及び出願人国籍別出願件数の比率

(c) コンバージョン電池の特許動向

コンバージョン電池（正極関連）の出願件数を図1.1-5-7に示す。2010年頃より出願件数が大幅に増加しており、近年は中国籍による自国での出願件数が急増しており、次いで米国での出願件数が増えている。米国籍の出願人の特許では、金属フッ化物との複合化及び表面改質の出願が多く、金属フッ化物のサイクル特性向上を主眼としたものが中心となっている。一方、欧州国籍の出願人は、金属フッ化物とバインダーや導電助剤など電極作製法を出願する傾向にある。近年の全体的な傾向として、複合化や表面改質といった作製プロセスが多くなっている。



図 1.1-5-7 コンバージョン電池の特許出願件数推移、及び出願人国籍別出願件数の比率

(d) 硫化物電池の特許動向

硫化物電池（正極関連）の出願件数の推移を図1.1-5-8に示す。2010年ごろより出願件数が急増しており、中国籍の出願の伸びが著しい。硫黄正極材料の種類別では、単体硫黄に関係した出願が全体の6割以上を占めている。また、炭素-硫黄複合体の多硫化リチウムシャトル抑制に関する出願が5割程度を占めている。



図 1.1-5-8 硫化物電池の特許出願件数推移、及び出願人国籍別出願件数の比率

②革新型蓄電池の論文発表動向

(a)フッ化物電池の論文動向

フッ化物電池の論文発表件数の推移を図1.1-5-9に示す。総数は30件と少ないが、2014年以降、増加している。欧州（特に独、仏）が90%以上。近年、米国から論文投稿が出ており、動向を注視する必要がある。

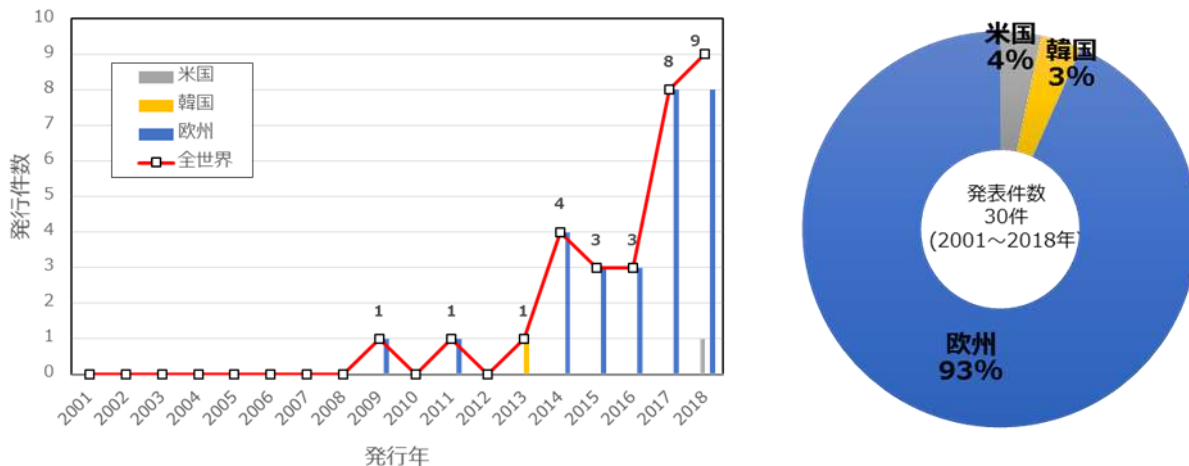


図 1.1-5-9 フッ化物電池の論文発表件数推移及び論文著者所属機関国籍別の発表件数の比率 (Derwent World Patents Index に基づき NEDO 作成)

(b)亜鉛空気電池の論文発表動向

亜鉛空気電池の論文発表件数は2013年以降、急増している。中国籍の発表件数が多く、欧州、米国、韓国の順。日本は全体の約4%で劣位である。

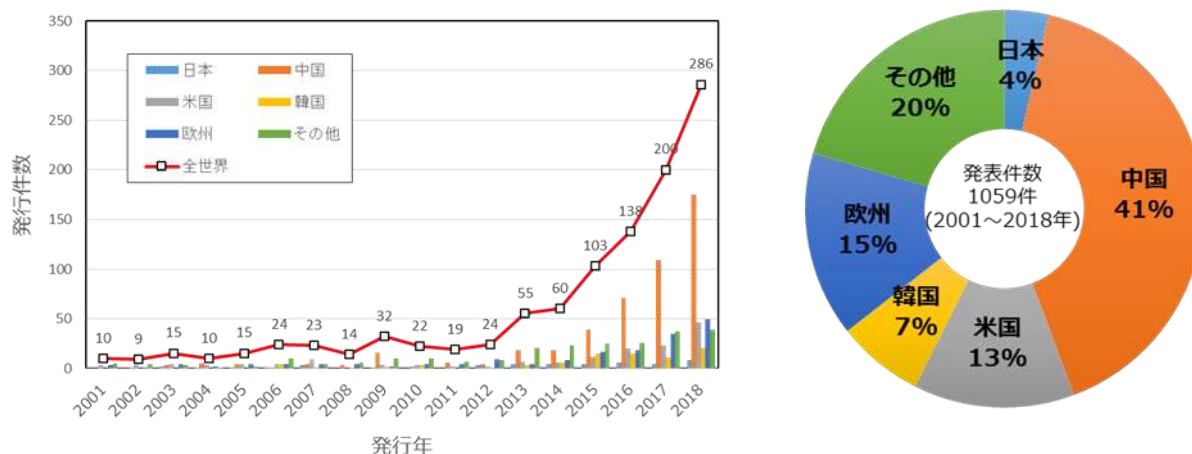


図 1.1-5-10 亜鉛空気電池の論文発表件数推移及び論文著者所属機関国籍別の発表件数の比率 (Derwent World Patents Index に基づき NEDO 作成)

(c) コンバージョン電池の論文発表動向

コンバージョン電池の論文発表件数は2009年以降、急増したが、2015年からは横ばい。近年は中国、米国の発表件数が多い。総数は中国、米国、欧州、日本、韓国の順。

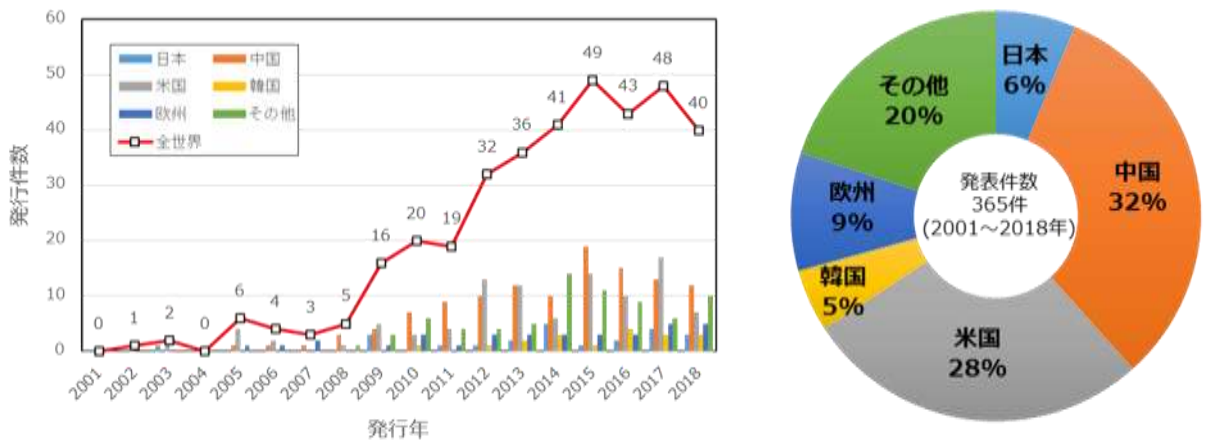


図 1.1-5-11 コンバージョン電池の論文発表件数推移及び論文著者所属機関国籍別の発表件数の比率 (Derwent World Patents Index に基づき NEDO 作成)

(d) 硫化物電池の論文発表動向

硫化物電池の論文発表件数は2012年以降、急増している。近年は中国籍の発表件数が非常に多い。総数は中国、米国、韓国、欧州、日本の順。

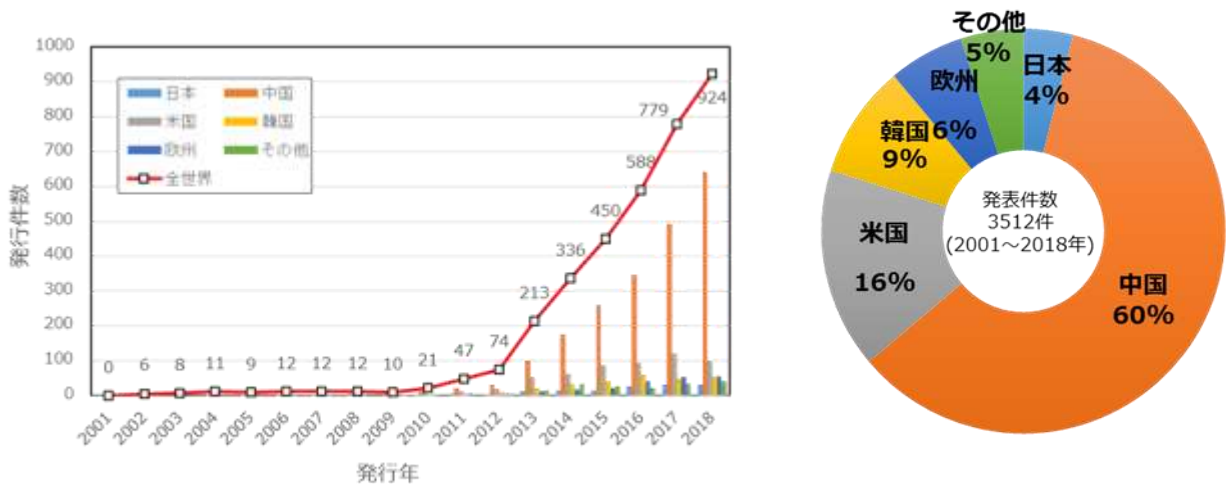


図 1.1-5-12 硫化物電池の論文発表件数推移及び論文著者所属機関国籍別の発表件数の比率 (Derwent World Patents Index に基づき NEDO 作成)

### ③革新型蓄電池の学会発表動向

2010年、2014年及び2018年のリチウム電池国際会議(International Meeting on Lithium Batteries : IMLB)における蓄電池タイプ別の発表件数を図1.1-5-13に示す。2010年はLIBが8割程度を占めるが、2014年ではLIB以外の固体電池や革新型蓄電池に関する発表が増加した。

IMLB2018ではLIB以外では、全固体電池の発表が目立つが、革新型蓄電池では、Naイオン電池、硫化物電池が多い。

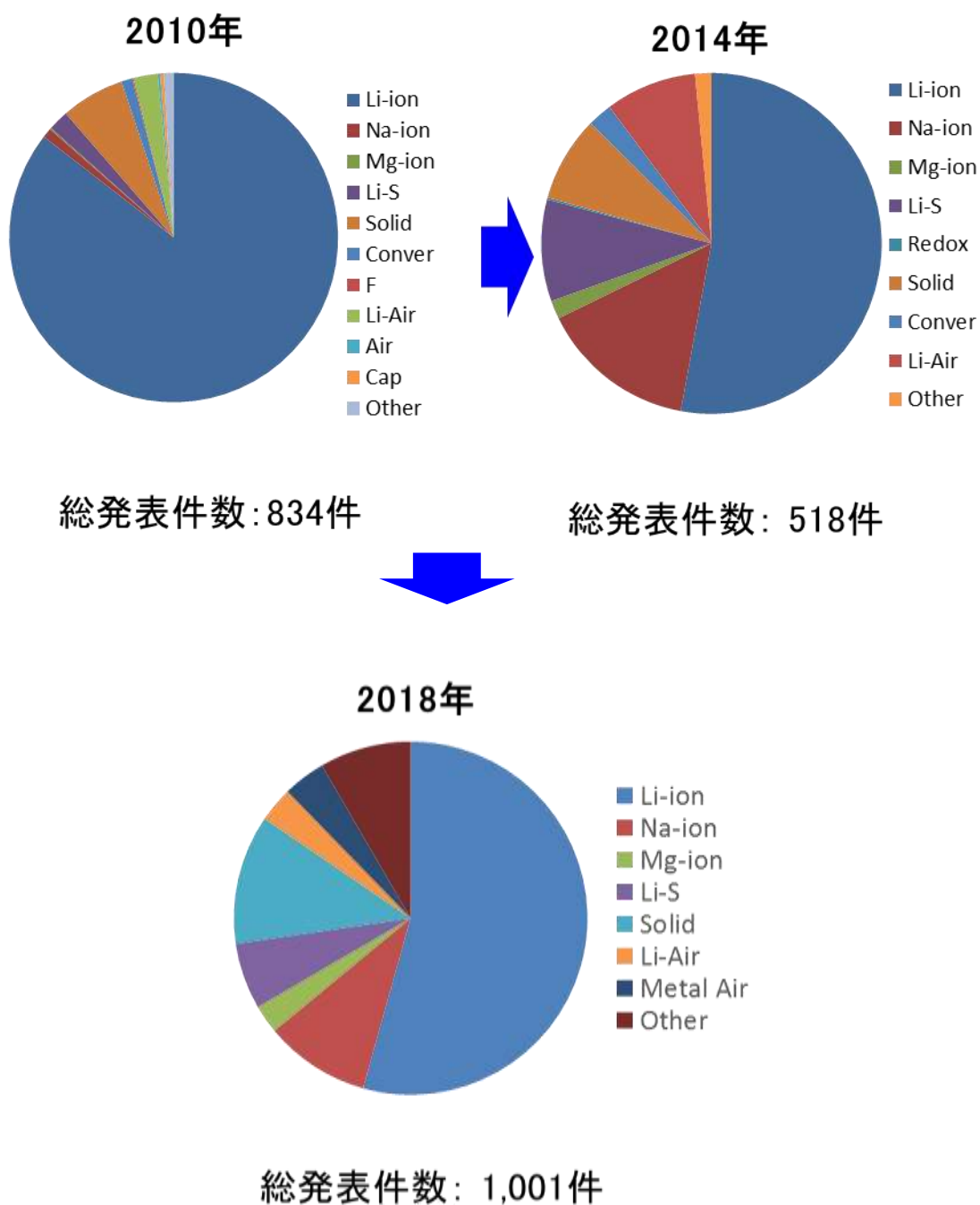


図1.1-5-13 IMLBにおける蓄電池タイプ別発表件数



#### ④日本における革新型蓄電池等の開発プロジェクト

本事業で開発した4つの蓄電池タイプについて電極活物質の理論容量密度と標準電極電位をプロットしたものを図1.1-5-14に示す(金属硫化物電池は、実測ベースの容量密度・作動電圧をプロット)。各プロット点は点線で示した理論エネルギー密度1,000Wh/kgのラインを超えており、本事業で開発対象としている蓄電池タイプは、EV用電池パックとして500Wh/kgの実現が期待できるポテンシャルを有していると言える。

なお、同図には参考として、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」(ALCA)の「次世代蓄電池研究加速プロジェクト」(SPRING)及び文部科学省事業「元素戦略プロジェクト<研究拠点型>」で研究開発されている蓄電池タイプについても併記した。

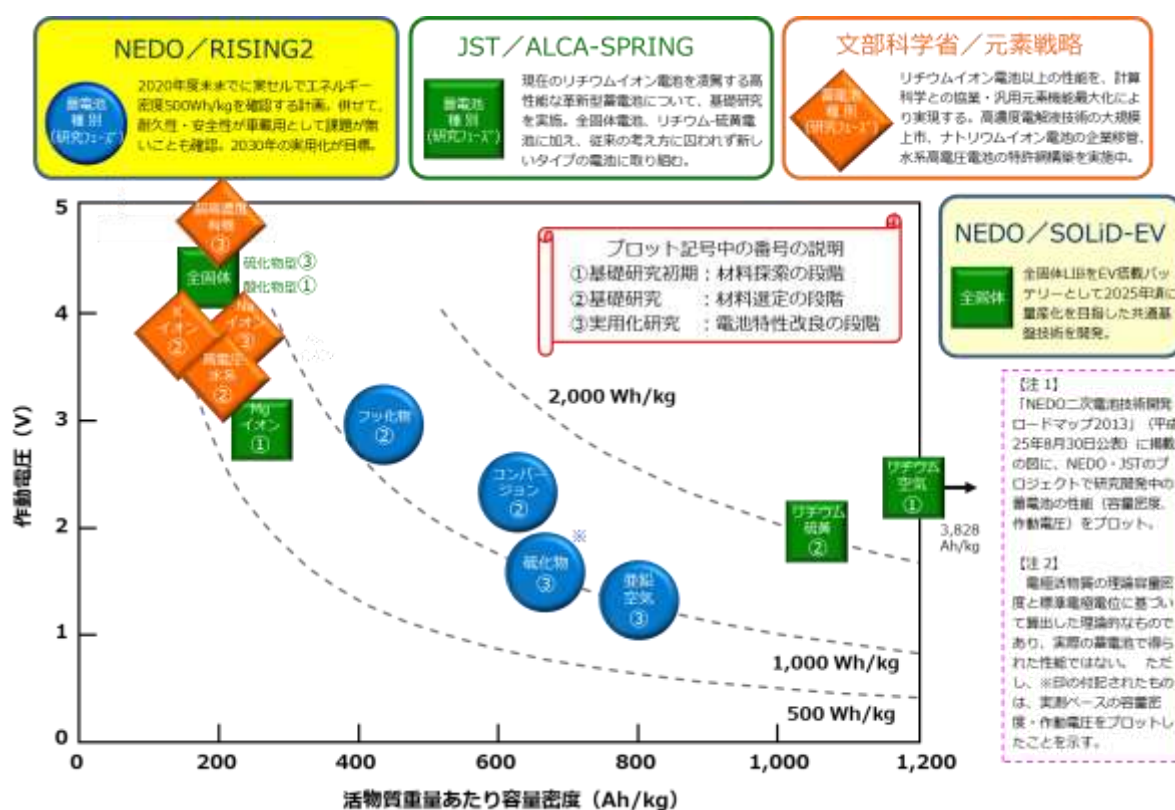


図 1.1-5-14 日本における革新型蓄電池等の開発プロジェクト

## (2) 高度解析技術開発

蓄電池の反応には、ナノオーダーの局所構造からミリオーダーの反応分布まで様々な空間・時間分布を持つ階層構造が存在する。これら反応の階層構造において、電池の性能（容量・出力）、耐久性、安全性等に及ぼす影響因子とその動的な挙動を最新の基礎科学を駆使して定量的に解明することが、技術的な課題が多く、且つそのハードルも高い革新型蓄電池を過酷な条件で使用される車載用蓄電池として開発する上で必須と考えられる。

RISINGプロジェクトにおいては、理化学研究所の大型放射光施設「SPring-8」に「RISING放射光ビームライン」を、高エネルギー加速器研究機構の大強度陽子加速器施設「J-PARC」に「RISING中性子ビームライン」をそれぞれ建設した。これら2つの異なる特長を持つ世界で唯一の電池専用ビームラインをフル活用し、実作動条件下における電池内部の動的挙動をリアルタイムで観察することが可能となった。その結果、フッ化物電池の正極活物質の酸化還元挙動や固体電解質内のイオン導電パスの解析、亜鉛空気電池のデンドライト成長を抑制する技術、多電子移動型金属化合物電極の酸化還元反応を円滑化する電解液等、新規のアイデアを導き出す等の実績を挙げた。また、核磁気共鳴、ラマン分光法、原子間力顕微鏡、電子線ホログラフィー、交流インピーダンス、計算科学等を用いた先端的な解析技術を開発した。

本事業においては、図1.1-5-15に示すように、2030年の革新型蓄電池の実用化には手戻りのない開発によって技術革新のスピードを加速する必要があるとの認識の下、上述したRISINGプロジェクトの解析技術を更に発展させるとともに、各種解析技術を統合した世界最高・最先端の解析プラットフォームの構築に取り組んだ。

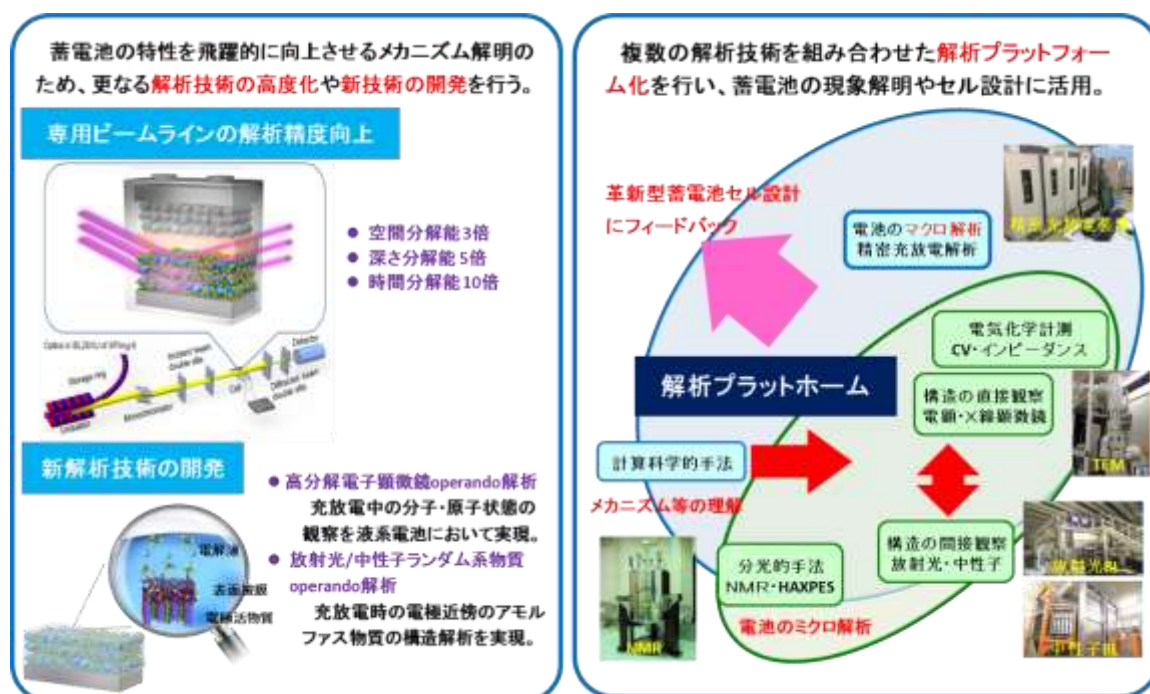


図 1.1-5-15 高度解析技術開発の概要

## 1. 1-6 海外における革新型蓄電池の開発状況

### (1) 米国

米国においては、エネルギー省(DOE)のエネルギー効率・再生可能エネルギー・自動車技術局(EERE-VTO)、エネルギー先端研究計画局(ARPA-E)、科学局(Office of Science)が、様々な革新型蓄電池のプロジェクトを推進中である。

#### ① FERRE-VTO

2016～2021年の5ヶ年計画のコンソーシアム型プロジェクト「Battery500」を立ち上げている。開発予算総額は5,000万ドル(5年間)とされている。コンソーシアムのメンバー構成は、Pacific Northwest 国立研究所(リーダー)、Brookhaven 国立研究所、Idaho 国立研究所、SLAC 国立加速器研究所、Stanford 大、Binghamton 大、California San Diego 大、Texas 大(Austin)、Washington 大の9機関であり、IBM、Tesla、USABCがアドバイザーとして参加している。開発目標はエネルギー密度が500Wh/kg、サイクル寿命が1,000サイクルとなっており、デンドライトフリーのリチウム金属負極と硫黄正極から構成されるリチウム硫黄電池、及びリチウム金属負極と高ニッケルNMC正極からなる次世代LIBを開発している。何れもパウチセルで試作、評価を進めており、リチウム硫黄電池は372Wh/kgで300サイクル達成、後者のLIBは350Wh/kgで200サイクルを超え、継続中である。

また、VTOのプログラム「Advanced Battery Materials Research」(BMR)には、Argonne 国立研究所をはじめ7つの国立研究所、23大学、2企業が参画し、液・ポリマー系固体電解質、解析技術、モデリング、金属リチウム負極、硫黄正極、リチウム空気電池、ナトリウムイオン電池の7つのカテゴリで46のテーマが実施されている。

- ・液・ポリマー系固体電解質：ダイキンがLIB用の高電圧電解液、West Virginia 大学がLiLaAlZrO<sub>3</sub> ナノファイバーとポリマーとの複合電解質、Lawrence Berkeley 国立研究所がLi 金属負極用のブロック共重合体電解質、Argonne 国立研究所がリチウム硫黄電池用の固体電解質を開発している。
- ・リチウム金属負極：Li デンドライト抑制を主眼として、Pacific Northwest 国立研究所、Carnegie Mellon 大、Pittsburgh 大学、Oak Ridge 国立研究所、Texas 大、Argonne 国立研究所がLLZO 固体電解質やポリマーを添加したハイブリッド電解質などを研究している。
- ・リチウム硫黄電池：リチウムポリスルフィドの溶解防止やシャトル効果抑制、硫黄カソードの導電性付与のため、Argonne 国立研究所、Pacific Northwest 国立研究所、Stanford 大、Brookhaven 国立研究所、Pennsylvania 州立大、Lawrence Berkeley 国立研究所が、ポリマー硫黄複合電極、Li 金属負極の保護層、ナノ構造硫黄カソード等の開発を進めている。
- ・リチウム空気電池：充放電反応の安定化とサイクル寿命向上のため、Pacific Northwest 国立研究所、Argonne 国立研究所、Illinois 大が、空気極の過電圧低減、Li 金属負極の保護被膜形成、電解液の安定性向上等の開発に取り組んでいる。
- ・ナトリウムイオン電池：Brookhaven 国立研究所、2019年度からはArgonne 国立研究所、Lawrence Berkeley 国立研究所、Pacific Northwest 国立研究所が参画して、重量エネルギー密度200 Wh/kg、体積エネルギー密度500 Wh/Lの目標を掲げ、遷移金属酸化物正極、チタン系酸化物負極、高難燃性電解液等の研究を進めている。



2019年10月、FERE-VTOは新たなAdvanced vehicle technologies researchとして、蓄電池、電動システム、高効率モビリティシステム等の開発に着手した。3年間で5,900万ドルを投下する。蓄電池は固体電池に特化し、1,500万ドル（FY2020）の予算で材料、診断ツール、モデリングに取り組む。材料開発では企業、大学が種々の固体電解質の開発を担当する。

開発テーマは以下の通り。

- ・Maryland大：Liデンドライドフリー固体電解質
- ・Solid Power, Inc：多機能電解質材料を用いた全固体電池
- ・Iowa州立大：グラッシー固体電解質
- ・Michigan大：Liセラミック電解質の薄膜形成
- ・Virginia工科大：ポリマー電解質の複合材料
- ・General Motors：硫化物ガラス化物電解質を用いた全固体電池のホットプレス
- ・West Virginia大：全固体電池用単一イオン伝導電解質
- ・Pennsylvania州立大：全固体Li-S電池の材料開発
- ・Wisconsin大：Liデンドライド抑制のための動的保護層の開発
- ・Wildcat Discovery社：Li界面設計による固体イオン伝導体

## ② ARPA-E

2010～2016年に実施されたプロジェクト「BEEST」においては、480km以上の走行を可能とする車載用蓄電池の開発を目的として革新型蓄電池の研究開発が行われた。2010～2016年の6年間の予算総額は約3,900万ドルである。開発目標としては、重量エネルギー密度200Wh/kg、体積エネルギー密度300Wh/L、コスト250ドル/kWhが設定された。Missouri大学とPolyPlusBatteryがリチウム空気電池、Sion Powerがリチウム硫黄電池、Pellion Technologiesがマグネシウムイオン電池、Revolt Technologyが亜鉛空気電池、Stanford大学が全量子型電池に取り組んだ。ARPA-Eとは別に、Sion Powerはリチウム金属負極とハイニッケル正極で構成されたパウチセル（1.8Ah）で、エネルギー密度420Wh/kg、700Wh/1,800サイクル後の容量維持率70%を達成したと報告している。

2010～2013年に実施されたグリッドスケールの貯蔵技術のプロジェクト「GRIDS」において、Fluidic, Inc.（現Nant Energy, Inc.）は亜鉛空気電池で参加していたが、プロジェクト終了後も開発を進め、蓄電システムは途上国でのモバイル基地局や太陽光発電システム併設などの用途に展開されてきた。定置用の亜鉛空気電池（定格容量750Wh）と40セルから構成される蓄電システム（30kWh）、及び亜鉛空気電池とLIBのハイブリッドシステムの2タイプがラインナップされている。

2013～2017年に実施されたプロジェクト「RANGE」においては、車載用蓄電池及び電池システムのロバスト性を向上させることによって、電池システム全体のオーバーヘッドを軽減し、電池コンパクト化（230Wh/L）や低コスト化（100～125ドル/kWh）等の達成を目指した。開発予算総額は3,800万ドル（5年間）とされている。本プロジェクトには12の企業、国立研究所、大学等が参画したが、そのうち、企業2社（Solid Power、Bettery）、Oak Ridge国立研究所、Maryland大学が全固体電池の開発に取り組んだ。また、水系LIB、亜鉛空気電池、リチウム硫黄電池等の研究開発が行われた。

2016年開始のプロジェクト「IONICS」では、車載用蓄電池、定置用蓄電池及び燃料電池へ

の適用を想定し、イオン伝導性材料を用いた新規な電気化学デバイスの研究開発が行われている。予算総額は3,700万ドル（5年間）で計画されている。2019年は大学・国立研究所・企業等による16テーマが採択されているが、内訳は蓄電池関係が9テーマ、燃料電池関連が6テーマ、フロー電池が1テーマ。車載用蓄電池のコスト目標はセルで100ドル/kWh以下、電池パックで175ドル/kWh以下が掲げられており、以下に示すような研究開発が行われている。

- ・ Pennsylvania 州立大学：独自の低温焼結技術を用いた複合構造の酸化物系固体電解質
- ・ Colorado 大 Boulder 校：全固体 LIB のセルの製造時間を短縮する瞬間焼結法
- ・ Iowa 州立大：ガラス系電解質の低コスト製造プロセス
- ・ Oak Ridge 国立研究所：ガラス系電解質及び低コストセル化技術
- ・ 24M：ロール・ツー・ロール法で製造可能な有機・無機固体電解質の保護層を設置したリチウム金属負極電池
- ・ Sila Nanotechnologies：固体電解質を軟化させて正極とセパレーターに接合する製造プロセス
- ・ Ionic Materials：リチウム金属負極電池用のポリマー電解質及びポリマー複合体正極
- ・ PolyPlus Battery：リチウム金属薄膜とガラス系電解質薄膜で構成される電極・セパレーター複合体
- ・ UC San Diego 校：サイクルによるダメージを修復し、デンドライト析出を抑制する自己修復電解質

### ③ Office of Science

プログラム「Basic Energy Science」(BES)において、2012年11月、次世代蓄電池（車載用／定置用）の研究拠点として「Joint Center for Energy Storage Research」(JCESR)をArgonne国立研究所に設立した。開発予算総額は1億2,500万ドル（5年間）とされている。

開発目標は5年以内にエネルギー密度5倍、コスト1/5のポストLIBを開発することであり、Argonne国立研究所をリーダーとして5国立研究所、5大学、5企業（Dow Chemical、Applied Materials、Johnson Controls、Clean Energy Trust、United Technologies Research Center）が参加した。革新型蓄電池の開発コンセプトは、多価イオンのインサージョン反応やリチウム-酸素、リチウム-硫黄、ナトリウム-硫黄等の化学反応、非水系レドックスフローをベースにしたものであった。

JCESRは2016年1月に、目標達成のための蓄電池コンセプトとして、定置用ではフロー電池を、車載用ではリチウム金属負極と硫黄正極を組み合わせたリチウム硫黄電池を選定した。2017年のプログラム終了までは他の電池系の研究も推進し、100ドル/kWh（パックレベル）目標の達成を目指していた。2019年から5年間（～2023年）延長され、開発予算総額は12,000万ドルで、原子／分子レベルの材料分析を強化し、多価イオン電池（マグネシウム等）、リチウム硫黄電池に注力するとしている。

## (2) 欧州

欧州においては、EU、欧州投資銀行、産業界等から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)に対して拠出される資金を使い、数多くの車載用蓄電池の技

術開発プロジェクトを推進している。1つのプロジェクトに多数のEU加盟国の企業、大学・研究機関が参加するコンソーシアム方式で実施されている。

EGVIにおける革新型蓄電池関連のプロジェクトの概要を表1.1-6-1に示す。9件のプロジェクトの蓄電池タイプの内訳はリチウム硫黄電池が5件、リチウム空気電池が2件、鉄空気電池が1件、全固体電池が1件である。

表1.1-6-1に記載したプロジェクトのうち、「LISSEN」はリチウム金属負極を使用しないリチウム硫黄電池を開発するものであり、イオン液体をベースとした電解液に、ハードカーボン担持体に硫黄を分散させた正極、シリコン（又は錫）と黒鉛の混合負極の組み合わせで、1Ah級のセルを試作し、特性評価を行った。一方、「EUROLIS」はリチウム金属負極を使用しており、リチウム金属のデンドライト成長対策として、ガラス繊維セラミック製セパレータの仕様を検討した。「LISA」はLi金属負極の保護とハイブリッド固体電解質を特長とする高エネルギー、高安全な20Ah級のリチウム硫黄電池の開発を進めている。

「LISA」に参画しているOXIS Energyは2020年にエネルギー密度500Wh/kgを目指しているが、現状、セルレベルで400Wh/kgを達成している。セルの定格容量は10～35Ah、電圧2.1V。また、ブラジルにリチウム硫黄電池の生産プラントを建築するとの報道（2019年2月）がなされた。

2017年に開始された全固体電池の開発プロジェクトの「IMAGE」は、BMW（独）、VARTA（独）、Umicore（ベルギー）、Arkema（仏）、Hydro-Québec（加）等の11企業が参画し、Li金属負極、ゲルポリマー電解質を用いた全固体電池でエネルギー密度300Wh/kg以上を目指す。

表 1.1-6-1 EGVI の革新型蓄電池の開発プロジェクト

プロジェクト	内容	目標値	参加機関
LISSEN (2012～2015)	ポリサルファイド溶出を抑制するイオン液体電解質とカーボンコート・カーボン中空体技術を開発	定量目標無し	Volkswagen(独)等 3企業、6大学・研究所、 1コンソーシアム
EUROLIS (2012～2016)	材料改良と電極を開発し、18650プロトタイプセルを試作し、EV用評価試験を実施	エネルギー密度： 500Wh/kg、 出力密度 1,000W/kg	Renault(仏)、 Saft(仏)、 Fraunhofer(独)、 MaxPlanck(独)、 Volvo(スウェーデン)等 4企業、7大学・研究所
ALISE (2015～2019)	各電極材料を改良して、電池セルとパック評価が目標	エネルギー密度：500Wh/kg	Fraunhofer(独)、 DARAMIC(仏)等 11企業、5大学・研究所
HELIS (2015～2019) ※EUROLIS 後継	EUROLISの後続プログラムで、リチウム硫黄電池のパイロット試作と電池特性評価	コスト： 150ユーロ/kWh以下 エネルギー密度：500Wh/kg	PSA(仏)、SAFT(仏)等 4企業、9大学・研究所
LISA (2019～2022)	ALISEプロジェクトで抽出されたレート特性、体積エネルギー密度、寿命等を改善。Li金属の保護と固体電解質の開発を重点化。	ハイブリッド固体電解質を特長とする高エネルギー、高安全な20Ah級のLiSセル	Oxis Energy(英)、 Renault(仏)、Varta(独) 等9企業、4大学・研究所

金属空気電池	LABOHR (2011～2014)	循環式ドライ酸素収集デバイスを備えたリチウム空気電池技術の開発のための新概念の確認	定量目標無し	Volkswagen(独)等 3企業、7大学・研究所
	STABLE (2012～2015)	空気極の改良と正極表面、触媒改良で、1,200mAh/g、サイクル寿命151回達成	容量：2,000mAh/g サイクル寿命：100～150回	Politecnico di Torino(伊)、SWEAR IVF(スウェーデン)等 1企業、8大学・研究所
	NECOBAUT (2012～2015)	炭化鉄/ペロブスカイト構造体の開発により、鉄空気セルを開発し、電極面積も拡大化(～400 cm <sup>2</sup> )	エネルギー密度：400Wh/kg サイクル寿命：3,000回 コスト：100ユーロ/kWh	Saft Baterías(スペイン)等5企業、3大学・研究所
全固体電池	IMAGE (2017～20121)	Li金属負極ベースの高エネルギー密度電池の開発	Li金属負極、ゲルポリマー電解質を用いた全固体電池の開発。エネルギー密度目標は300wh/kg以上	BMW(独)、VARTA(独)、Umicore(Belgium)、Arkema(仏)、Hydro-Québec(加)等11企業

なお、欧州連合ではフレームワークプログラム「Horizon2020」においても定置用や宇宙用等のアルミニウムイオン電池、マグネシウムイオン電池、ナトリウムイオン電池、亜鉛空気電池等の研究開発が大学・研究機関中心で行われている。表 1.1-6-2 に革新型蓄電池の開発プロジェクトの概要を示す。

表 1.1-6-2 Horizon2020 の革新型蓄電池の開発プロジェクト

プロジェクト	電池タイプ	内容	目標	参加機関
HS-GLASSion (2015～2017)	All-Solid	無機ガラス系固体電解質を用いた全固体LIB(薄膜型)の開発。	(定量目標無し)	Interuniversitair Micro-Electronicacentrum Imec VZW(Belgium)
NAIADES (2015～2018)	Na-ion	Naイオン電池の実証試験。1kWモジュールシステムの構築。	(定量目標無し)	Saft(仏)等5企業、1大学、3研究所
ALION (2015～2019)	Al-ion	定置用途のAlイオン電池の開発。48Vモジュールの開発。	エネルギー密度：400Wh/kg サイクル寿命：3,000回	Varta Microbattery(独)等7企業、3大学、2研究所
ARTIST (2015～2018)	Mg-ion	Mgイオン電池の反応機構の解明	(定量目標無し)	The Chancellor(英)、CAMBRIDGE大(英)
ZAS (2015～2018)	Zn-Air	定置用途の亜鉛空気電池の開発。亜鉛極のShape-change、デンドライド成長、溶解腐食、電解液の劣化、空気極触媒の過電圧等の課題を解決しながら、セル・モジュールを開発。	エネルギー密度：160Wh/kg 260Wh/L サイクル寿命：1,000回(80%DOD) コスト：300ユーロ/Wh	Varta Microbattery(独)等4企業、5研究所、1大学

ドイツ連邦政府は、EGVI や Horizon2020 のプロジェクトとは別に、EV 及び車載用蓄電池の分野でドイツ企業を世界トップ水準に引き上げることを目指し、独自の技術開発政策を展開している。2016 年に連邦教育研究省（BMBF）主導で開始されたプログラム「Batterie 2020」プログラムにおいては、車載用蓄電池及び定置用蓄電システムに適用する全固体電池、多価カチオン電池、リチウム硫黄電池、金属空気電池等の研究開発が産学連携で行われている。

2018 年、BMBF は固体電池の基礎研究を促進するため、リサーチクラスター「FestBatt」を立ち上げた。Gießen 大（JLU）のコーディネートの下、KIT、FZJ、German Aerospace Center（DLR）、Helmholtz Institute Ulm、Max planck institute、Duisburg 大、Marburg 大、Darmstadt 工科大等、14 の研究機関が参画。予算は 16M EUR（2018-2021）。3 つの材料系（リン酸化合物、酸化物、ポリマー）、2 つのプロセスプラットフォーム（解析、理論・データプロセッシング）のプロジェクトから構成されている。

ドイツの電池研究開発拠点として 2009 年に活動を開始した Münster 大の蓄電技術研究センター（MEET）には BMW、BOSCH 等、30 社以上の企業が参加し、基礎研究～製造技術～リサイクルまで広い範囲で研究開発を行っており、リチウム硫黄電池、金属空気電池、マグネシウム硫黄電池の研究を行っている。

フランスでは、2011 年に高等研究教育省によって産官学の連携促進と新規事業の創出を目的に RS2E（Research Network on Electrochemical Energy Storage）が設立され、様々な蓄電池の研究プロジェクトを推進中。プログラム期間は 10 年間（2011～2020 年）、年間予算は約 1,000 万ユーロ。中心的な機関は国立科学研究所（CNRS）で、3 政府系機関（CEA、IFPEN、INERIS）、17 大学・国研、15 企業（RENAULT、SAFT、ALSTOM、AIRBUS、EDF、UMICORE 等）が参画している。次世代 LIB、キャパシターに加え、革新型蓄電池としてはリチウム硫黄電池、リチウム空気電池、ナトリウムイオン電池等の研究がおこなわれている。

イギリスでは蓄電池開発事業「Faraday Battery Challenge」に 4 年間で 24,600 万ポンドを投じる計画を進めている。この一環で 2017 年に Faraday Institution を設立し、第 1 弾として、蓄電池の基礎研究に 4,200 万ポンドを供給すると発表した（2018 年 1 月）。EV 用途での固体電池の実証を目的とするプロジェクト「SOLVAT」は Oxford 大をリーダーに 7 大学、9 企業が参画している。2019 年 9 月には第 2 弾として、低コスト、長寿命な Na イオン電池の「NEXGENNA」とリチウム硫黄電池の「LiSTAR」の産学連携プロジェクトが発足した。

### （3）中国

中国においては、第 12 次 5 ヶ年計画（2011～2015 年）の「国家ハイテク研究発展計画」（863 計画）で LIB の研究開発が行われ、「中国国家重点基礎研究発展計画」（973 計画）で革新型蓄電池の研究開発が行われたが、第 13 次 5 ヶ年計画（2016～2020 年）においては、上記 2 つを統合した「国家重点研究開発計画」で LIB と革新型蓄電池の研究開発が行われている。2020 年の LIB の開発目標は、エネルギー密度 300 Wh/kg と第 12 次 5 ヶ年計画と同じである。しかし、サイクル寿命は 1,500 回と目標値を下げる一方、コストは 800 元/kWh（1 万 3,000 円/kWh）とさらに厳しい目標設定を掲げた。また、革新型電池の開発目標はエネルギー密度 500Wh/kg となっている。

この計画の中にある「新エネ車試行特別プロジェクト」において、LIB の正極では高 Ni 系の高電位・高容量化、負極では Si-黒鉛混合系等の高容量材料、電解液では耐高電圧電解液を開

発する予定となっている。また、革新型蓄電池では全固体電池、リチウム硫黄電池、リチウム空気電池を開発するとしている。5年間の総予算は約3.55億元（60億円）で計画されている。

中でも中国科学院（CAS）がリチウム硫黄電池、リチウム空気電池の研究開発を行っており、サイクル寿命に課題はあるものの実セルで300Wh/kgのエネルギー密度を達成するとともに、1kWh級の電池パックを試作しているとの報告がある。

表 1.1.6-3 新エネ車試行特別プロジェクトの車載用蓄電池技術の重点テーマ

最先端の基礎研究	① 車載用蓄電池の新材料、新システム
重要技術	② 高エネルギー密度 LIB 開発
	③ 高出力、長寿命の LIB 開発
	④ 車載用蓄電池のシステム技術開発
	⑤ 革新型高エネルギー密度電池技術
評価プラットフォーム	⑥ 車載用蓄電池の評価及び試験方法開発

2016年4月に、中国・国家発展改革委員会、国家能源局の連名にて、「エネルギー技術革命に向けたイノベーション行動計画（2016-2030年）」が通達され、高度なエネルギー貯蔵技術へのイノベーションのカテゴリーで、二次電池については、低コスト、長寿命、安全性の高い全固体リチウムイオン電池の開発、次世代電池（ナトリウムイオン電池、フッ化物イオン電池、塩化物イオン電池、マグネシウムイオン電池等）の開発によって、蓄電技術のブレークスルーを目指すとされている。

#### （4）韓国

World Premier Materials（WPM）は2010年に知識経済部（現在の産業通商資源部）が、2018年までに主要素材分野で30%以上の世界シェア確保を目指して立ち上げたプロジェクトであり、「高性能二次電池素材」が対象分野の1つに含まれる。Samsung SDIをプロジェクトリーダーとし、主要蓄電池・材料メーカーや研究機関が広く参画し、高ニッケル三元系正極やSi合金系負極の開発が推進された。

また、「緑色産業先導型二次電池技術開発」は、2011年に産業通商資源省傘下の韓国産業技術評価管理院が、蓄電池分野で2018年に世界シェア45%を達成し、2020年にグリーンエネルギー供給において世界第1位に跳躍することを目指して立ち上げたプロジェクトである。政府総予算は1,300億ウォンで、多様な大学・研究機関及び民間企業が参画し、ニッケル系正極、マンガン系正極、シリコン合金系負極、バインダーのコーティング技術等の開発を推進している。

2012年に韓国エネルギー技術評価院（KETEP）は、「二次電池の競争力強化に向けた統合ロードマップ」を補完する位置づけで「EV用エネルギー貯蔵システムロードマップ」を発表しているが、その中でコア技術として改良型LIBと全固体電池を挙げ、特に全固体電池に関しては短期目標として300Wh/kg、中長期目標として500Wh/kgを掲げている。

さらに、2014年7月に蓄電池を含む6大コア技術分野の「気候変化対応コア技術開発戦略」を策定した。2020年まで分野合計で毎年4,300億ウォンを投資すると発表した。韓国の蓄電池生産は世界1位であるが、コア材料の国産化率は41%と分析し、競争力強化が必要としている。LIBのエネルギー密度の向上に加え、2020年までにエネルギー密度400Wh/kgの革新型蓄

電池を実現するとし、全固体 LIB、リチウム硫黄電池、リチウム空気電池等の開発を推進している。

この戦略を受けて、群山大学が亜鉛空気電池に適用する多元空気極触媒を、韓国電気研究院が亜鉛空気電池のセル化技術を開発している。なお現在、韓国電池研究組合が中心となり、2025年を見据えた「中大型二次電池国家戦略ロードマップ」を策定中である。

2018年、韓国電気技術研究院（KERI）を中心に韓国生産技術研究院（KEITECH）、韓国科学技術院（KAIST）、韓国電子部品研究院（KETI）が参画し、電気自動車用次世代リチウム金属二次電池の開発プロジェクトが発足した。2023年までに243億ウォンを投資し、430Wh/kgの高エネルギー密度を持つリチウム金属二次電池を開発する

また、国家プロジェクトではないが、LG化学がリチウム硫黄電池及び金属空気電池を、SKイノベーションがナトリウム二次電池及びリチウム空気電池の研究開発を推進しているとの報告がある。2021年4月には、漢陽大学から460Wh/kgの1Ah級全固体空気亜鉛パウチセルが報告された。

## 1. 2 NEDO事業としての妥当性

### 1. 2-1 NEDOの関与の必要性

本プロジェクトは、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 業界全体の競争力強化(公共性・汎用性)

低炭素化社会の構築に向けては、技術革新による蓄電池の高性能化・低コスト化が必須であり、その実現に向けては革新型蓄電池の中・長期的な研究開発が必要である。加えて、蓄電池及び蓄電池材料分野は日本メーカーが技術力で世界をリードしているものの、ビジネス面での国際競争は激化している。さらに、主要各国も研究開発を精力的に推進し、キャッチアップを目指している。そのため、日本メーカーによる競争力を有した革新型蓄電池の早期市場投入を実現する研究開発を加速化あるいは効率化するためには、共通基盤技術の開発が必須要素である。蓄電池自体の実用化開発は個別の事業者の負担で行うべきであるが、本事業で開発している技術は関連産業界全体の競争力強化を図るものであり、公共性・汎用性を有する共通基盤技術である。

#### 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・公的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。そのため、これら学術成果を産業技術として仕上げていく観点からも本事業における産学連携の取組みが必要である。

#### ③ 開発リスク・ハードルの高さ

本事業では、革新型蓄電池を車載用蓄電池として実用化するためには、トレードオフの関係にある高エネルギー密度と耐久性・安全性等を高いレベルで両立させる必要があるが、その開発リスクとハードルは極めて高いと言える。

#### ④ 関係者の利害調整

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のは、民間活動だけでは困難であり、中立的な立場でマネジメントを行う機関の関与が必要である。

また、本事業には多くの大学・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できるマネジメント機関の関与が必要である。

#### ⑤ 蓄電池開発の技術蓄積、マネジメント経験の活用

NEDOでは共通基盤技術開発から応用・実用化開発までを戦略的かつ包括的にマネジメントしている。「安全・低コスト大規模蓄電システム技術開発」(2011～2015年)では、電力システム用大型蓄電システムの開発とその実証試験を行った。「リチウムイオン電池応用・実用化先端技術開発」(2012～2016年)では、EV・PHEV用LIBの高性能化・低コスト化の技術開発を推進した。また、「先進・革新蓄電池材料評価技術開発」(2013～2022年)では、



蓄電池産業における共通的な基礎・基盤技術として、LIB 及び全固体 LIB 用材料の開発効率を飛躍的に向上させるための材料評価技術の開発を推進中である。さらに、本事業推進上の基礎・基盤的な知見を獲得した「革新型蓄電池先端科学基礎研究事業」（2009～2015年）を実施し、世界最先端の解析プラットフォームの構築と、エネルギー密度 500 Wh/kg を実現可能な革新型蓄電池のコンセプトを創出した。このように国プロの推進等を通じて培われた蓄電池の技術及び産業・市場に関する知見や研究開発マネジメントの経験・ノウハウ等を有効活用する観点において、本プロジェクトへの NEDO の関与は適切と言える。

⑥ 蓄電池開発プロジェクト間の連携促進、省庁間の連携

経済産業省と文部科学省では、蓄電池の研究開発において省庁の枠を越えた連携に取り組む、両省が実施している蓄電池開発プロジェクトを一体的に運営するため、各事業に係っ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：東京大学大学院工学研究科教授 橋本和仁）を設置している。

NEDO蓄電技術開発室長は同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、本事業、NEDO「先進・革新型蓄電池材料評価技術開発」、JST「戦略的創造研究推進事業／先端的低炭素化技術開発」の「次世代蓄電池研究加速プロジェクト」及び文部科学省事業「元素戦略プロジェクト」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。

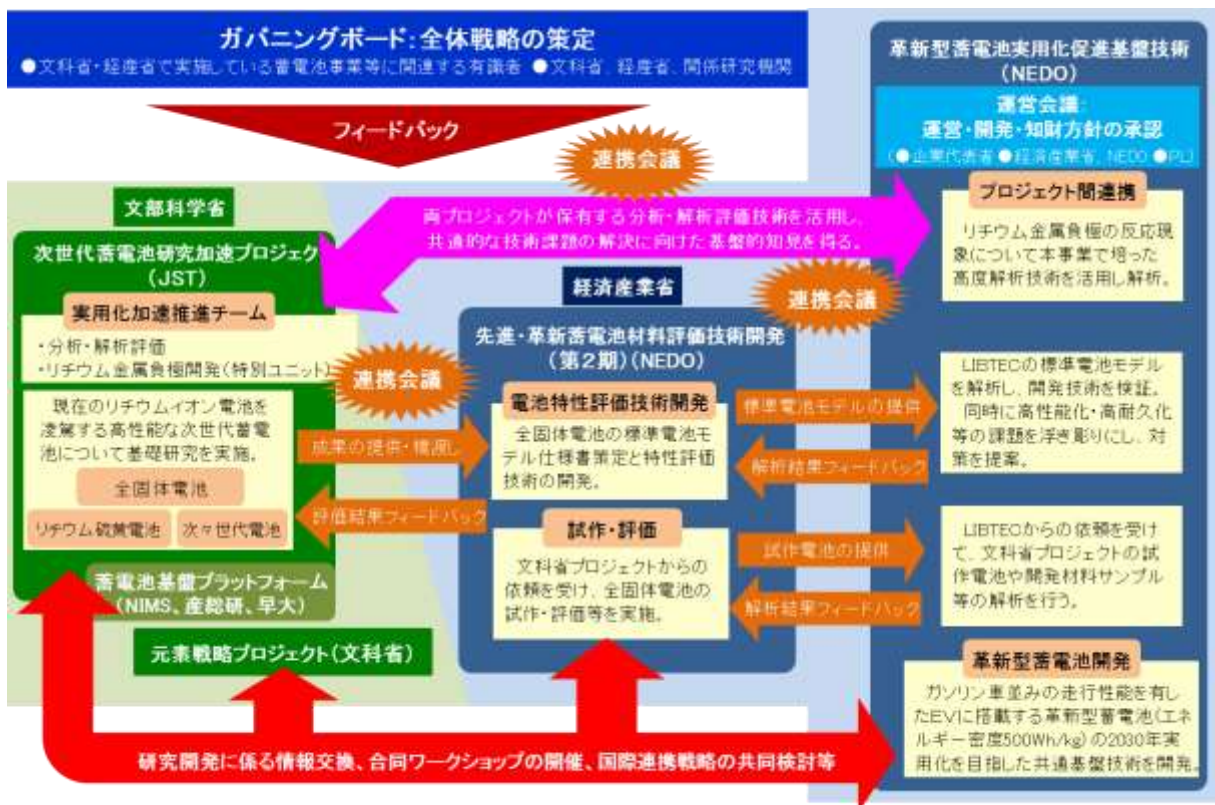


図1.2-1-1 我が国の蓄電池開発プロジェクトの連携関係

## 1. 2-2 実施の効果

### (1) CO<sub>2</sub>削減効果

ガソリン車、EV、PHEV1台当たりの年間CO<sub>2</sub>排出量はそれぞれ以下のように試算される。

$$\begin{aligned} & \bullet \text{ ガソリン車の年間 CO}_2 \text{ 排出量} \\ & \quad = \text{【年間走行距離】} \div \text{【燃費】} \times \text{【ガソリン CO}_2 \text{ 排出係数】} \\ & \quad = 10,000\text{km}^{*\text{1}} \div 10.92\text{km/L}^{*\text{2}} \times 2.32\text{kg-CO}_2\text{/L}^{*\text{3}} \\ & \quad = 2,125\text{kg-CO}_2 \\ & \bullet \text{ EV の年間 CO}_2 \text{ 排出量} \\ & \quad = \text{【年間走行距離】} \times \text{【電費】} \times \text{【電力 CO}_2 \text{ 排出係数】} \\ & \quad = 10,000\text{km} \times 0.171\text{kWh/km}^{*\text{4}} \times 0.37\text{kg-CO}_2\text{/kWh}^{*\text{5}} \\ & \quad = 633\text{kg-CO}_2 \\ & \bullet \text{ PHEV の年間 CO}_2 \text{ 排出量} \\ & \quad = \text{【年間 EV 走行距離】} \times \text{【電費】} \times \text{【電力 CO}_2 \text{ 排出係数】} \\ & \quad \quad + \text{【年間 HEV 走行距離】} \div \text{【燃費】} \times \text{【ガソリン CO}_2 \text{ 排出係数】} \\ & \quad = 5,000\text{km}^{*\text{6}} \div 7.378\text{km/kWh}^{*\text{7}} \times 0.370\text{kg-CO}_2\text{/kWh} \\ & \quad \quad + 5,000\text{km} \div 26.04\text{km/L}^{*\text{8}} \times 2.322\text{kg-CO}_2\text{/L} \\ & \quad = 251\text{kg-CO}_2 + 446\text{kg-CO}_2 \\ & \quad = 697\text{kg-CO}_2 \end{aligned}$$

#### [注記]

※1：国土交通省「継続検査の際の整備前自動車不具合状況調査」 自家用車 10,575km/年を参考。

※2：2,000cc クラスガソリン車(トヨタ：プレミオ)の燃費 15.6km/L(JC08 モード)の0.7倍と仮定。

※3：環境省・令和元年「温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度 説明会」資料 P53 (参考1) 燃料の使用に関する排出係数(別表1×別表2×(44/12))に記載の値。

※4：日産リーフ(2017年発売)の電費カタログ値 0.120kWh/km (JC08 モード)の1/0.7倍と仮定。

※5：2015年電気事業連合会「電気事業における低炭素社会実行計画」において、2030年度の長期エネルギー需給見通しに基づき、定めた電力CO<sub>2</sub>排出係数(使用端)の目標値。

※6：EV走行距離とHEV走行距離の割合を50:50と仮定。

※7：トヨタプリウスPHV(2017年発売)のEV走行時電力消費率 10.54km/kWh (JC08 モード)の0.7倍と仮定。

※8：トヨタプリウスPHV(2017年発売)のHEV走行時燃費 37.2km/L (JC08 モード)の0.7倍と仮定。

従って、EV・PHEV 1台当たりの年間CO<sub>2</sub>削減効果は、以下のように算出され、それぞれ1,492kg-CO<sub>2</sub>、1,428kg-CO<sub>2</sub>となる。よってEV・PHEV 1台当たりの年間の平均CO<sub>2</sub>削減効果は、約1.46t/年となる。

次に、本プロジェクトの実施によって車載用LIBの高性能化や低コスト化等が進展し、その結果として、「未来投資戦略2017」等に掲げられた2030年におけるEV・PHEVの普及目標が達成された場合のCO<sub>2</sub>削減効果について述べる。

「日本の自動車工業2019」(日本自動車工業会、2019年7月)によると、我が国の四輪車保有台数は2018年12月末現在で約7,829万台であり、うち乗用車(普通車、小型四輪車、軽四輪車)は約6,202万台である。本CO<sub>2</sub>削減効果の検討においては、2030年代の乗用車保有台数は6,200万台で一定とし、そのうち30%をEV・PHEV(EV:PHEV=1:1)とすると、国内CO<sub>2</sub>削減量は約2,715万t/年となる。

<ul style="list-style-type: none"> <li>● EV の年間 CO<sub>2</sub> 削減効果 <ul style="list-style-type: none"> <li>= 【ガソリン車 CO<sub>2</sub> 排出量】 - 【EV 年間 CO<sub>2</sub> 排出量】</li> <li>= 2,125kg-CO<sub>2</sub> - 633kg-CO<sub>2</sub></li> <li>= 1,492kg-CO<sub>2</sub></li> </ul> </li> <li>● PHEV の年間 CO<sub>2</sub> 削減効果 <ul style="list-style-type: none"> <li>= 【ガソリン車 CO<sub>2</sub> 排出量】 - 【PHEV 年間 CO<sub>2</sub> 排出量】</li> <li>= 2,125kg-CO<sub>2</sub> - 697kg-CO<sub>2</sub></li> <li>= 1,428kg-CO<sub>2</sub></li> </ul> </li> <li>● 国内 CO<sub>2</sub> 削減量 <ul style="list-style-type: none"> <li>= 6,200 万台×30%×1.46t/年</li> <li>= 2,715 万 t/年</li> </ul> </li> </ul>
--

今後、EV・PHEV、ガソリン車共に電費・燃費は更に向上すること等も想定され、本試算結果は変動要素を含んだものであるが、2030年には約2,715万t/年のCO<sub>2</sub>削減効果が期待できる。加えて、我が国の自動車メーカーは2018年実績で約482万台の乗用車を輸出するとともに、米国、欧州、東南アジア、中国等での現地生産にも積極的に取り組んでいる。輸出・海外生産の対象にはEV・PHEVも含まれることから、世界全体のCO<sub>2</sub>削減にも大きく貢献することが期待できる。

## (2) 経済効果

「未来投資戦略2017」等に掲げられた2030年におけるEV・PHEVの普及目標が達成された場合の経済効果について述べる。

「日本の自動車工業2019」（日本自動車工業会、2019年7月）における直近10年間（2009年～2018年）の国内乗用車生産平均台数798万台、2018年実績で国内自動車メーカーの海外生産台数1,997万台とし、パック容量をEV：40kWh、PHEV：20kWh、EVとPHEVの販売比率を1:1とすると、国内生産及び海外生産のEV・PHEVの売上と電池パックの売上は以下のように計算される。

- 国内生産EV・PHEVの売上
  - = 【国内乗用車生産台数】 × 30% × 【乗用車平均価格】
  - = 798万台 × 30% × 200万円/台
  - = 4.8兆円/年
- 国内生産EV・PHEV用の電池パックの売上
  - = 【国内乗用車生産台数】 × 30% × 【電池パック容量】 × 【電池パックコスト】
  - = 798万台 × 30% × 30kWh × 1.0万円/kWh
  - = 0.72兆円/年
- 国内生産EV・PHEV用の電池パックの容量
  - = 【国内乗用車生産台数】 × 30% × 【電池パック容量】
  - = 798万台 × 30% × 30kWh
  - = 72GWh/年

● 海外生産 EV・PHEV の売上

$$\begin{aligned} &= \text{【国内自動車メーカーの海外生産台数】} \times 30\% \times \text{【乗用車平均価格】} \\ &= 1,997 \text{ 万台} \times 30\% \times 200 \text{ 万円/台} \\ &= 12 \text{ 兆円/年} \end{aligned}$$

● 海外生産 EV・PHEV 用の電池パックの売上

$$\begin{aligned} &= \text{【国内自動車メーカーの海外生産台数】} \times 30\% \times \text{【電池パック容量】} \\ &\quad \times \text{【電池パックコスト】} \\ &= 1,997 \text{ 万台} \times 30\% \times 30\text{kWh} \times 1.0 \text{ 万円/kWh} \\ &= 1.8 \text{ 兆円/年} \end{aligned}$$

● 海外生産 EV・PHEV 用の電池パックの容量

$$\begin{aligned} &= \text{【国内自動車メーカーの海外生産台数】} \times 30\% \times \text{【電池パック容量】} \\ &= 1,997 \text{ 万台} \times 30\% \times 30\text{kWh} \\ &= 180\text{GWh/年} \end{aligned}$$

上記の売上見通し等に対して、本プロジェクトの5年間の予算総額（NEDO負担分）は約166億円であり、十分な費用対効果があると言える。

## 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

本プロジェクトでは、以下に示す性能・諸元を有した EV および電池パックを 2030 年に実用化するために革新型蓄電池の共通基盤技術の開発として、「研究開発項目① 高度解析技術開発」および「研究開発項目② 革新型蓄電池開発」を実施した。

#### 2030 年に実用化を目指す EV および電池パックの性能・諸元

- ✓ 車両走行距離（1 回充電あたり）：500km
- ✓ 車両コスト：190 万円（10 万台/年/社 生産ケース）
- ✓ 電池パックコスト：40 万円（容量あたりコスト：1 万円/kWh）
- ✓ 電池パック容量：40kWh
- ✓ 電池パック出力：120kW（重量あたり出力密度：1,500W/kg）
- ✓ 電池パック重量：80kg（重量あたりエネルギー密度：500Wh/kg）
- ✓ 電池パック体積：70L（体積あたりエネルギー密度：570Wh/L）
- ✓ 車両環境温度：-30℃～60℃
- ✓ 電池パック寿命：カレンダー10 年以上、サイクル1,000～1,500 回
- ✓ 電池パック安全性：現行の車載用 LIB パックと同等以上のこと

「研究開発項目① 高度解析技術開発」および「研究開発項目② 革新型蓄電池開発」の最終目標は以下とした。

#### 研究開発項目① 「高度解析技術開発」

##### 【最終目標】（2020 年度末）

革新型蓄電池の高性能化や高耐久化を実現する実セルおよび電極の設計・製造に活用可能な新規の解析技術を開発する。

- ・実セル作動条件下における電極活物質-電解質界面の反応解析技術
- ・実セル作動条件下における電極活物質の反応解析技術
- ・実セル作動条件下における電極合剤内の反応分布および劣化現象解析技術

なお、上記の解析技術には、空間分解能で 10  $\mu$ m、時間分解能で 10 ミリ秒、深さ分解能で 10 ナノメートルを超える技術が含まれるものとする。

開発した解析技術を用いて、「研究開発項目② 革新型蓄電池開発」で開発する革新型蓄電池の性能や耐久性等の支配因子とその影響度を提示する。

## 研究開発項目② 「革新型蓄電池開発」

### 【最終目標】（2020 年度末）

開発した共通基盤技術を基に試作した実セル（容量 5Ah 級）<sup>注1)</sup> について、下記を満足することを確認する<sup>注2)</sup>。

- ・重量エネルギー密度：500Wh/kg 以上
- ・体積エネルギー密度：1,000Wh/L 以上
- ・重量出力密度：100W/kg 以上<sup>注3)</sup>
- ・サイクル寿命：100 回以上<sup>注3)</sup>
- ・環境性：カドミウム、水銀、六価クロム等の環境負荷物質をセル構成材料として大量に使用していないこと。
- ・車両環境への対応：-30～60℃の動作環境温度において変質しないこと。
- ・経済性：貴金属等、高コスト元素を大量に使用しないこと。
- ・安全性：内部短絡、圧潰・過充電時の異常発熱、発火、熱暴走等に対する安全策を講じることが技術的に可能なこと。
- ・充電性：普通充電（6 時間）が可能なこと。急速充電が可能なこと<sup>注3)</sup>。

注 1) 一対の正極、負極、セパレータおよび電解質（電解液）で構成され、充放電が可能な単電池の状態。ただし、端子や電子制御装置等は含まれない。

注 2) 試作する実セルの容量と最終・中間目標は、開発する革新型蓄電池タイプの特性、実用化課題、試作・評価に使用する研究開発設備および研究開発時の安全性等を勘案した上で、提案者が公募時に提案し、採択決定後に NEDO と協議の上、実施計画書において定めるものとする。

注 3) プロジェクト終了後における更なるプロセスエンジニアリング開発等によって、前記した 2030 年実用化を想定する電池パックの出力、サイクル耐久性、充電性まで向上する見通しがあること。

これらの目標は本プロジェクトの企画、立案段階において主要な自動車、蓄電池メーカーおよび有識者と意見交換して設定した。表 2.1-1 には、主要各国の車載用蓄電池の開発目標を示した。表からわかる通り、RISING2 における各項目の目標値は世界トップレベルに設定した。重要な目標の一つである電池パックエネルギー密度の目標値は 300～500Wh/kg と各国とも同様なレベルであった。このことから、いかに早く目標を達成し、市場投入するかも革新型蓄電池普及の点で重要であった。この点においても、早期実用化に向けて産官学連携の下で予算を投入して研究開発を推進することは非常に意義があった。

表 2. 1-1 主要各国の車載用蓄電池の開発目標

国/地域		日本		米国	欧州	韓国	中国
目標の策定機関		NEDO ※1		DOE/VTO ※2	EC ※3	産業通商資源 ※4	科学技術部 ※5
車両タイプ		PHEV	EV	EV	EV	EV	EV・PHEV
電池パックエネルギー密度 (Wh/kg)	2030年	—	500	—	—	400	250
	2030年以降	—	700	500	500	—	300
電池パック出力密度 (W/kg)		2,500	1,500	2,000	—	—	—
コスト (円/kWh)	2030年	—	10,000	—	10,000	—	5,100
カレンダー寿命 (年)		10~15	10~15	15	15	—	12
サイクル寿命 (回)		4,000~6,000	1,000~1,500	1,000	1,500	1,000~2,000	<u>3,000</u>

※1: NEDO (二次電池技術開発ロードマップ2013、先進・革新蓄電池材料評価技術開発(第II期)、革新型蓄電池実用化基盤技術開発)

※2: DOE (Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting (2016)), Battery 500 project)

※3: 欧州委員会(「Set-Plan/Action7/Declaration on Batteries and E-mobility」,「Horizon2020(ALISE)」)

※4: 緑色産業先導型二次電池技術開発、エネルギー技術(R&Dウェアハウス、エネルギー技術ロードマップ2013)等

※5: 节能与新能源汽车技术路线图2.0、中国自動車工程学会 (2020.9)

## 2. 2 研究開発計画の妥当性

### 2. 2-1 研究開発内容

#### 研究開発項目①「高度解析技術開発」

蓄電池内部では、ナノメートルオーダーの活物質/電解質界面から電極のマクロ配置のスケールに至る空間的な階層構造と、ミリ秒オーダーの電荷移動過程から時間以上のオーダーで起こる劣化過程といった時間的な階層構造が複雑に関連した反応過程が存在し、これらが蓄電池の耐久性（劣化挙動）、出力特性、安定性等の特性に大きな影響を及ぼす。本プロジェクトの前身に当たる RISING では、これらの電池内部の反応に生じる時間と空間分布の階層構造を実験的に解明する技術の開発を目的に、より早い反応を捉えるための計測技術やより微細な領域を解析できる計測技術の開発を行った。この開発のため、理化学研究所の大型放射光施設 SPring-8 および高エネルギー加速器研究機構の大強度陽子加速器施設 J-PARC に、それぞれ蓄電池研究専用の放射光 X 線ビームライン BL-28XU および中性子ビームライン SPICA を建設した。このような大型施設以外にも電極/電解液表面のキャリアイオンの化学状態や拡散挙動などを解明するための核磁気共鳴（NMR）、電池内部反応を電気化学的に予測する精密充放電測定、第一原理計算を用いた電極活物質の電子構造の解析のための計算科学、界面の微細構造を観察するための高分解能電子顕微鏡観察技術なども整備した。

本プロジェクトでは、RISING で開発した蓄電池の解析技術を基盤として、電池特性の向上や電池劣化の抑制の指針を得るために、蓄電池反応に伴う活物質や電極の構造や化学状態などの時間変化を解析する、放射光、中性子、電子顕微鏡、核磁気共鳴、計算科学などの技術の開発と、これらの技術を組み合わせた多面的な解析技術の開発に取り組んだ。

#### 研究開発項目②「革新型蓄電池開発」

RISING では、ナノ界面制御電池（フッ化物電池、塩化物電池）、亜鉛空気電池、多価イオン電池、Li 空気電池、硫化物電池の潜在的可能性を調査・探索し、リチウムイオン電池（LIB）に替わる有望な革新型蓄電池候補として、ナノ界面制御電池、亜鉛空気電池および硫化物電池に焦点を当てた。

本プロジェクトでは、革新型蓄電池候補から 500 Wh/kg の重量エネルギー密度の可能性を有する電池として、フッ化物電池、亜鉛空気電池、コンバージョン電池、及び硫化物電池を選出し、研究開発項目①で示した高度解析技術を活用しつつ、これら 4 種の革新型蓄電池の開発を進めた。キャリアイオンの駆動形態からアニオン駆動型電池とカチオン駆動型電池に大別し、キャリアイオンの駆動形態毎に研究開発集中拠点を組織して研究開発を進める体制とした。アニオン駆動型電池では、フッ化物電池及び亜鉛空気電池を研究対象とし京都大学に集中拠点を設置した。カチオン駆動型電池では、コンバージョン電池及び硫化物電池を研究対象とし産業技術総合研究所（産総研）に集中拠点を設置した。

フッ化物電池の研究では、電解質及び活物質の材料探索、電池挙動反応を検証するとともに、電池としての実証試験を進めた。特に電解質は有力な候補材料が少ないため、フッ化物イオン伝導体の探索、開発は本テーマの重要な課題であった。そこで、多面的に新規電解質の調査、材料開発を実施するため、大阪大学、九州大学、工学院大学、名古屋大学、三重大学の 5 事業者を 2018 年度後半から新たに採択して研究体制の強化を図った。新規なフッ化物イオン導電体の創出を試み、セルを用いた実証検証では数 mAh 級の薄膜電池から 500mAh 級の実セル（全固体ペレット型セル）を試作し、実セルによる充放電挙動の実証に取り組んだ。また、液系



電解質についても電解質組成の最適化によりフッ化／脱フッ化反応の促進を図った。

亜鉛空気電池では、サテライト拠点で創出された電極材料について数 Ah 級（□20×20mm サイズ）の実セルによる性能評価を進めるとともに、有望な材料技術を取り入れて 20Ah 級（□50×50mm サイズ）の実セルを設計、試作し、重量エネルギー密度 500 Wh/kg 以上の実証に取り組んだ。また、OER 特性に優れた電極と ORR 特性に優れた電極のそれぞれ特性をより効果的にするため、電極内での空間配置を検討することにより空気極電極の性能改善を図った。

コンバージョン電池では、Fe 系活物質を用いた実証セルで明確になったエネルギー効率の向上に取り組み、高容量電極の構築及び電解液量の最適化により、重量エネルギー密度 500 Wh/kg の実証に取り組んだ。

硫化物電池では、ハーフセル（□50×50mm サイズ）の試作、評価を通じて、種々の電池特性について多面的に評価を行い、V-S 系正極を第一優先候補材料に選定した。選定した材料を中心にさらなる性能向上にむけた材料開発を進めるとともに、20Ah 級積層実電池の設計・試作に取り組む、重量エネルギー密度 500 Wh/kg の実証に取り組んだ。

## 2. 2-2 本プロジェクトの全体スケジュール

本プロジェクトの全体スケジュールを図 2.2-2-1 に示した。高度解析技術開発では、革新型蓄電池技術開発を加速するための革新的な解析技術、既存解析技術の高度化、革新型蓄電池内でみられる独自の反応機構観測に必要となる周辺技術開発を推進した。2-4 研究開発の進捗管理の妥当性 で後述するように、高度解析技術研究者と蓄電池開発研究者の間で成果を共有、論議を行う会議体を新設し、開発した技術を蓄電池研究者と連携し、革新型蓄電池解析を多角的に行う取り組みを推進した。

革新型蓄電池開発においてはフルセルでの電池評価を軸とし、そこで明らかとなる要素技術の組み合わせの効果を検証することで、電池本来の課題解決に向けた研究開発に取り組むことで実証試験に取り組んだ。

このように革新型蓄電池および高度解析技術の年度毎の開発の進捗状況に応じ、技術の相互連携について重点化を行いながら、最終目標である 500Wh/kg の検証とともに、プロジェクト終了後の事業化に向けた実用化研究へのスムーズな移行を目指した。



図 2.2-2-1 本プロジェクトの全体スケジュール

## 2. 2-3 研究開発費

本プロジェクトの研究開発予算の内訳（経費別）を図 2.2-3-1 に示した。予算総額は、2016年度から 2020 年度の 5 年間で 16,632 百万円、総予算の配分は機械装置費に 4,710 百万円、労務費に 4,862 百万円、消耗品費、その他に 7,060 百万円と研究計画に沿って適切に配分した。

機械装置費の年度推移を図 2.2-3-1(2) に示した。初年度には 1,500 百万円を上回る予算を投入した。早期に高度解析技術を確立するため、設備導入に多くの初期投資をした結果である。設備導入が順調に進むにつれて機械装置費の負担が年々軽減した。ただし、2019 年度はフッ化物電池研究を促進すべく追加公募を実施した翌年にあたり、新規事業者の設備導入のため一時的な増額により対応をした。

労務費の年度推移を図 2.2-3-1(3) に示した。中間評価の指摘事項を反映して、革新型蓄電池開発の加速、重点化にともない評価実験の負荷が増大し、これらに対応する労務費を増加した。

拠点別、グループ別で整理した研究開発予算の内訳を図 2.2-3-2 にまとめた。拠点別では（図 2.2-3-2 (1)）、京大拠点、サテライト、産総研拠点の順に配分した。また、グループ別では（図 2.2-3-2 (2)）、フッ化物電池、硫化物電池、亜鉛空気電池、コンバージョン電池の順に配分した。これは京都大学が革新型蓄電池であるフッ化物電池研究、および、放射光を用いた高度解析技術開発の中心となる拠点であったためであった。

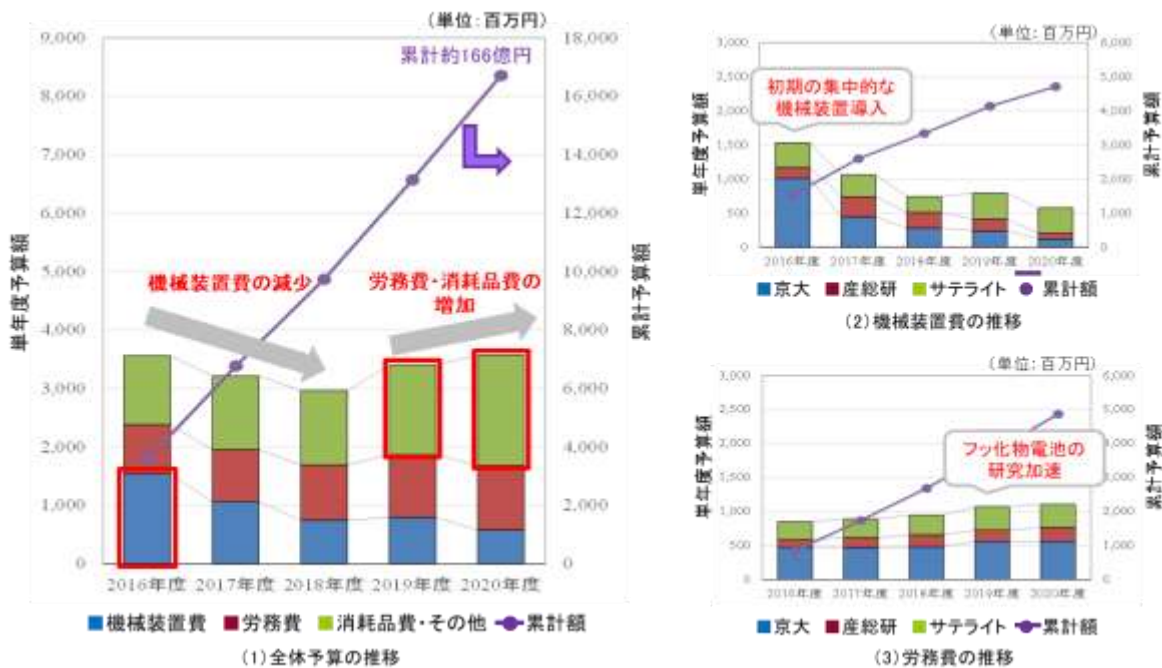


図 2.2-3-1 研究開発予算の内訳（経費別）

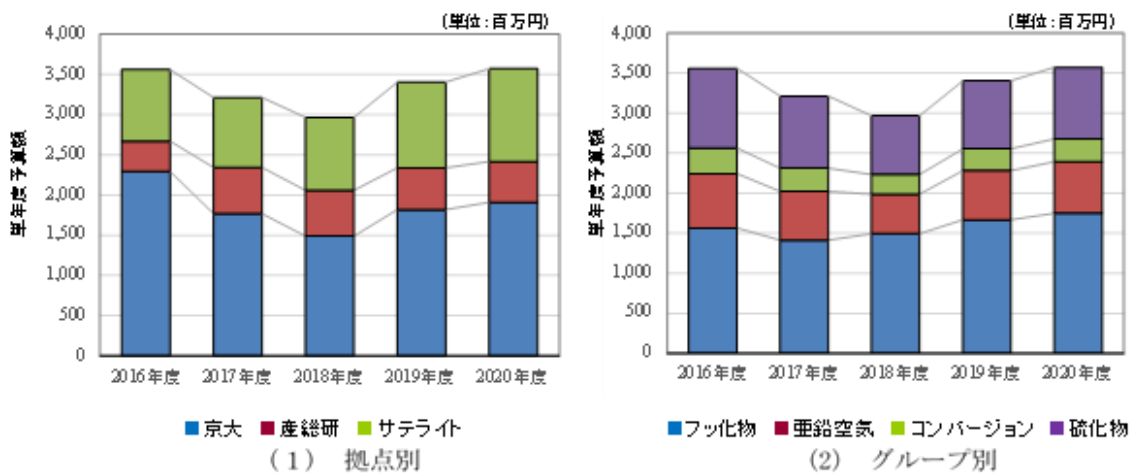


図 2.2-3-2 研究開発予算の内訳（拠点・グループ別）

## 2. 2-4 研究開発人員

本プロジェクトにおける研究開発拠点は、集中拠点である京都大学拠点と産総研拠点及びサテライト拠点の3拠点とした。各拠点到従事する人員推移を図2.2-4-1に示した。300名以上の研究員が本プロジェクトに従事しており、中心的役割を担う京都大学集中拠点が半数を占め、続いてサテライト拠点で約1/3、産総研拠点で約1/6を占めた。2018年度の追加公募によりサテライト拠点の従事者が20名程度増員した。産総研拠点でも2018年度に10名程増員し、研究開発体制を強化した。

研究開発拠点の中心となる京大拠点と産総研拠点での人員構成を図2.2-4-2、図2.2-4-3に示した。京大拠点での専任研究員は約40名、産総研拠点での専任職員は約30名の研究員が本プロジェクトに従事した。企業出向者は、京大拠点で約20名、産総研拠点でも約5名となり、いずれの場合も拠点到属する研究者、研究所職員が大多数を占めており、大学、公的研究機関が得意とする先端的な材料科学、基礎的な反応挙動に関する理解、高度な解析技術と、企業が得意とする電池開発、製品化に関する技術やノウハウの融合による革新型蓄電池開発が進められた。

京大拠点の従事者構成で特徴的な点は、参画企業からの登録研究員が80名以上と極めて多いことであった(図2.2-4-2)。このような観点からも革新型蓄電池に対する参画企業の関心の高さがうかがえた。これらの登録研究員は直接本プロジェクトの研究に携わらないものの、研究進捗や成果について適宜情報交換可能な立場であり、プロジェクト終了後において技術の移管や実用化を促進する役割を担った。

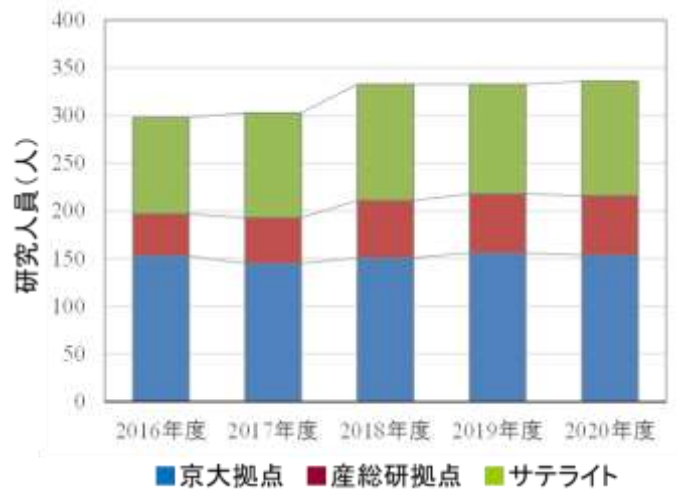


図 2.2-4-1 研究開発人員の推移



図 2.2-4-2 京大拠点における人員構成

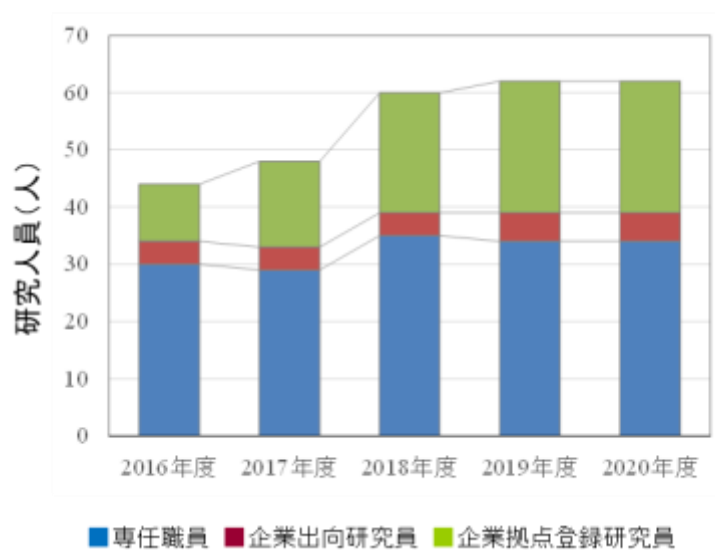


図 2.2-4-3 産総研拠点における人員構成

## 2. 3 研究開発実施体制の妥当性

### 2. 3-1 研究実施体制

本プロジェクトの 2016～2018 年度の前期 3 年間にわたるプロジェクト全体の実施体制を図 2.3-1-1 に示した。前期 3 年間は NEDO がプロジェクトリーダー（PL）として委託した国立大学法人京都大学 大学院工学研究科 松原 英一郎 教授（当時）、およびサブプロジェクトリーダー（SPL）として委託した国立研究開発法人産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 電池技術研究部門 小林 弘典 総括研究主幹（当時）の下で実施した。集中拠点である京都大学、および産総研で各々テーマを分担しており、それぞれの集中研究拠点が手がける研究開発活動に貢献できる自動車、蓄電池、材料メーカー等 10 法人が研究者やエンジニアを積極的に派遣し、相互にノウハウ、電池技術を持ち寄ることで研究開発を進める連携体制を構築した。

サテライト拠点では、当初 15 大学、3 研究機関でスタートし、体制を強化するため 2018 年度の追加公募で工学院大学、名古屋大学、大阪大学の 3 大学が新たにサテライト拠点として加え、総計 18 大学・3 研究機関の構成となった。



図 2.3-1-1 プロジェクト前期（2016-2018 年度）の実施体制



2. 3-2 研究実施体制の強化

中間評価での指摘事項を受けて、より効率的かつ効果的な革新型蓄電池研究を進めるために研究実施体制を大幅に変更した。革新型蓄電池の研究者として高い専門技術を有する国立大学法人 京都大学工学研究科 安部 武志 教授を PL に、また、国立大学法人 京都大学 産官学連携本部 森田 昌行 特任教授を SPL として委託し、参画企業・大学等への技術的指導・助言等を適切に行うとともに、革新型蓄電池研究の加速を図った。

高度解析技術開発は革新型蓄電池研究グループの直下に配置したことにより、それぞれの革新型蓄電池開発に適した解析技術開発を行った。これにより、各革新型蓄電池開発では高度解析技術適用により新たに得られた詳細な反応挙動に関する知見に基づき、材料開発及び実セルでの実証を加速することが可能となった。



図 2.3-1-2 プロジェクト後期（2019-2020 年度）の実施体制



2. 4 研究開発の進捗管理の妥当性

2. 4-1 NEDO・研究実施者による進捗管理

NEDO のマネジメントの管理概要を図 2. 4-1-1 に示した。各研究実施者の目標達成度に加え、実用化の可能性、産業への波及効果、産業界への技術移転なども考慮しながら、以下のようにプロジェクトの進捗を管理した。

- ▶ 京大拠点に常駐者を派遣。研究現場との密接なコミュニケーションを強化。
- ▶ 毎月、登録研究員の従事月報の提出を求め、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するとともに、プロジェクト運営に反映。
- ▶ 毎月、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。
- ▶ 革新型蓄電池研究の研究グループ毎に NEDO 担当者を配置し、適宜開催される報告会へ参加。研究進捗及び最新の技術情報を取り込み、プロジェクト運営に反映。
- ▶ 新型コロナウイルス感染拡大防止のため、緊急事態宣言発出下での研究開発活動を促進できるように、テレワーク及び on line 会議を積極的な導入を指導。
- ▶ 第 60 回電池討論会（2019 年 11 月）の「ナショナルプロジェクト合同セッション」にて成果発表を支援し、広報活動を促進。

加えて、技術動向の調査を行い、最新の動向を実施者と情報を共有し、プロジェクト運営に反映した。

		2019年度												2020年度											
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
全体		2020年度へ予算修正												2021年度へ予算修正											
内マネジ	定例会議		5/22						10/1	9/18	12/18	1/24				6/30					10/29				
全課	例会議	4/16	6/19	8/21	9/18	10/21	11/19	1/8	3/24	5/20	7/30	9/24	11/25	1/19											
	全体技術会議	4/16	6/11	8/2	9/3	11/1	12/17	2/13	4/16	5/22	8/1	9/10	12/1	3/19											
	マネージメント会議	6/23	8/12	9/3	11/5	12/18	2/4	4/16	5/21	8/2	9/11	12/22	2/19												
	成果報告書等																								
	広報活動	5/26-31	7/18	8/4-9	10/13-17	11/13-15	3/17-19	5/40-45	10/4-9	11/18-20	1/28														
	他事業との連携活動	5/23	6/17	9/9	9/11-13	11/14		6/25		12/14															
	規定・運用など																								

図 2. 4-1-1 NEDO のマネジメント管理概要（2019 年度～2020 年度）

## 2. 4-2 プロジェクトの会議体と運営

マネジメントを行うにあたり設置した会議体とその運営を図 2. 4-2-1 に示した。

- ① 有識者会議：年に1回開催し、有識者の視点から研究の進捗状況について意見・助言を受け、プロジェクトマネジメントに反映した。
- ② 運営会議：年に1回開催し、参画企業の経営層と集中研究拠点の運営について議論を行い、大所高所から受けた意見をプロジェクトマネジメントに反映した。
- ③ 企画会議：年に4回程度開催し、参画企業のマネージャークラスの意見を吸い上げ、プロジェクトマネジメントに反映した。
- ④ GL 会議：毎月開催し、マネージャークラスの意見を日々のテクニカルマネジメントに反映した。
- ⑤ 拡大会議：年に3回程度、電池研究グループ毎に開催し、情報共有と議論を実施した。本プロジェクト後期では、⑧全体技術会議の新設により廃止した。
- ⑥ 高度解析技術拡大会議：年に3回程度、高度解析技術者を集めて開催し、情報共有と議論を実施した。本プロジェクト後期では、⑧全体技術会議の新設により廃止した。
- ⑦ 推進会議：年に4回程度開催し、進捗や技術トピックスを関係者で共有し、意見交換を行った。本プロジェクト後期では、⑧全体技術会議の新設により廃止した。
- ⑧ 全体技術会議：各々実施していた情報共有を加速するため、⑤⑥⑦を統合して全体技術会議を新設した。年に3回程度開催し、各電池開発者、解析技術者、参画企業の関係者全員でタイムリーに情報を共有、開発に反映した。
- ⑨ マネジメント会議：⑧の全体技術会議で共有した情報をもとに、各企業の意見を電池開発へダイレクトに反映させるため、マネジメント会議を新設した。目標達成に向けた実証試験を加速した。
- ⑩ 内部シンポジウム：年に1回開催し、本プロジェクトの関係者全員でプロジェクト全体の研究進捗を共有した。また、ポスターセッションを設けて技術的交流を深めた。

会議名称		2016	2017	2018	2019	2020
		▼ 中間評価				
プロジェクト マネジメント	有識者会議 (1回/年)	有識者の意見・助言をプロジェクトマネジメントに反映				
	運営会議 (1回/年)	参画企業の経営層の意見を集中研究拠点のプロジェクトマネジメントに反映				
	企画会議 (4回/年)	参画企業のマネージャークラスの意見をプロジェクトマネジメントに反映				
テクニカル マネジメント	GL会議 (12回/年)	PL、SPL、GL、参画企業のマネージャークラスの意見を日々のテクニカルマネジメントに反映				
	拡大会議 (3回/年)	PL、SPL、GL、各電池開発者、参画企業で進捗の共有・議論		「全体技術会議」への統合により、PL、SPL、GL、開発者でタイムリーに情報を共有し、電池開発に反映した		
	高度解析拡大会議 (3回/年)	PL、SPL、GL、解析技術者、参画企業で進捗の共有・議論				
	推進会議 (4回/年)	PL、SPL、GL、参画企業で電池開発、解析技術の進め方を議論・情報共有				
	全体技術会議 (3回/年)	PL、SPL、GL、開発者、参画企業で進捗の共有、進め方を議論				
	マネジメント会議 (3回/年)	「マネジメント会議」の新設により、実証試験を加速、目標値に目処		PL、SPL、GL、参画企業で実証試験内容を議論、実証試験に反映		
	内部シンポジウム (1回/年)	事業関係者全員で全体の研究進捗を共有				

図 2. 4-2-1 プロジェクトの会議体と運営

## 2. 4-3 有識者会議の設置・運営

前述した有識者会議は、電池技術に関する有識者 10 名で構成され（表 2.4-3-1）、技術的な助言およびプロジェクト全体の運営管理等に関する助言を頂く目的で設置、運営した。2019 年 10 月には第 3 回有識者会議を開催し、中間評価以降より強化した電池研究進捗に対する技術的な助言や、中間評価を反映した本プロジェクトの活動方針に関する助言・指摘及び様々な評価やコメントをいただいた。その内容と、各コメントに沿って対応した対処方針などを表 2.4-3-2 にまとめた。各コメントに対して対処方針を検討し、計画や運営などに反映した。

表 2.4-3-1 有識者会議のメンバー構成

	氏名	所属
議長	山地 憲治	地球環境産業技術研究機構 理事・研究所長
副議長	横山 明彦	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 教授
委員	武田 保雄	三重大学 参与
	竹田 美和	あいちシンクロトロン光センター 所長
	太田 健一郎	横浜国立大学大学院 名誉教授
	桑野 幸徳	太陽光発電技術研究組合 名誉顧問
	佐藤 祐一	神奈川大学 名誉教授
	太田 璋	前 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 専務理事
	秋田 調	電力中央研究所 常務理事
	松本 孝直	電池工業会 部長

表 2.4-3-2 有識者会議での指摘事項とその対応

開催日	指摘事項	対応
第 3 回 有識者 会議  2019 年 10 月 1 日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・活動方針について賛同をいただき、電池の実用化に向けて取り組むようご意見を頂戴した。</li> <li>・残る期間はメリハリを意識して研究開発に取り組むよう助言をいただいた。</li> <li>・蓄電池関連の他のプロジェクトとの連携推進の強化についてご意見を頂戴した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実用化を意識して、運営会議等でいただいた参画企業との意見も参考に今後の研究計画に反映した。</li> <li>・今後の研究開発マネジメントに反映し、プロジェクト運営を進めた。</li> <li>・他の蓄電池関連プロジェクトとの更なる連携強化を進めた。</li> </ul>

## 2. 4-4 中間評価結果への対応

中間評価での指摘事項および実施した対応について表 2.4-4-1 まとめた。

表 2.4-4-1 中間評価での指摘事項とその対応

指摘事項	対応	評価
<b>◆ 研究開発マネジメント</b> <b>研究開発の加速・重点化</b> ・主目標の革新型蓄電池開発を重点化 ・革新型蓄電池開発と高度解析技術開発の連携強化、連携しやすいグループ編成 ・プロジェクト終了後の効果的な資産運用	<b>革新型蓄電池開発の取り組み強化</b> ・高度解析技術を取り込んだ革新型蓄電池開発の実施体制変更 ・リソースの集中強化 ・資産運用を議論する会議体を設置	◎
<b>◆ 研究開発成果</b> <b>研究開発項目における取り組みの強化</b> ・エネルギー密度ほか、実運用に係る性能、耐久性の支配因子を明確化	<b>実運用を想定した電池特性諸元のデータ取得を強化</b> ・パラメトリックスタディーの強化 <b>戦略的な特許出願</b> ・特許ベンチマーク <b>社会への発信の充実</b> ・国プロ合同セッションでの発表	◎
<b>◆ 成果の実用化・事業化</b> <b>研究開発項目における取り組みの強化</b> ・解析プラットフォームの維持・運用スキーム明確化 ・安全性・信頼性など実運用を想定した諸元把握 ・材料メーカーとの早期協働による研究開発加速	<b>プロジェクト後の取扱い、方向性</b> ・高度解析技術と革新蓄電池開発の成果をパッケージ化して企業へ移管 ・企業の意見も取り入れ、実運用を想定した評価を実施	○

### ① 研究開発マネジメント

研究開発マネジメントでは研究開発の加速・重点化に関して3つの指摘があった。

1. 主目標の革新型蓄電池開発を重点化
2. 革新型蓄電池開発と高度解析技術開発の連携強化、連携しやすいグループ編成
3. プロジェクト終了後における効果的な資産運用

1. については、2. 3-2 研究実施体制の強化、で記載した通り、実施体制を大幅に変更するとともに、革新型蓄電池開発にリソースを集中させることで参画企業 10 社と合意、大阪大学、九州大学、工学院大学、名古屋大学、三重大学の5大学を新たに採択した。

2. については、実施体制変更にともない高度解析技術開発グループを革新型蓄電池開発グループに併合し、PLは解析技術の専門家から蓄電池の開発を主導している京都大学の安部武志教授に交代した。

3. については、プロジェクト終了後の資産運用、活用方法を議論する会議体を設置した。

### ② 研究開発成果研究

開発成果では研究開発項目における取り組みの強化に関して、エネルギー密度の目標値達成に固執した開発とならないように、サイクル特性、レート特性、ヒステリシスなど実用化に向けた様々な課題にもより一層の重点を置き、性能・耐久性の支配因子を明確化し、電池特性評価に際してパラメトリックスタディー強化が必要、との指摘があり、実セルの試作及びパラメトリックな特性評価を通じて、エネルギー密度以外の諸特性を確認する取り組みを強化した。具体的には、以下の評価を実施した。

- ・入出力特性（レート特性、充電受入性）
- ・サイクル寿命
- ・環境性（高温、低温）
- ・安全性（内部短絡、圧潰・過充電時の発熱・熱暴走）
- ・経済性等

さらに、戦略的な特許出願を行うための特許ベンチマークの実施、社会への発信を充実するために国プロ合同セッション（第60回電池討論会（2019年11月）の「ナショナルプロジェクト合同セッション」）で成果を発表した。

### ③ 成果の実用化・事業化

成果の実用化・事業化に関しては、高度解析技術と革新型蓄電池、それぞれについて指摘があった。高度解析技術では、解析プラットフォームの維持・運用スキーム明確化が重要である、との指摘に対しては、①で記載した体制の再構築により、高度解析技術の成果を革新型蓄電池の成果をパッケージ化して企業に移転できるようにした。一方、革新型蓄電池では、エネルギー密度の他に入出力特性、電流・温度依存性、安全性・信頼性など実運用を想定した諸元の把握が重要になること、電池開発の市場導入については、材料メーカーとの早期協働による研究開発の加速するよう指摘があった。これらに対しては、②で記載した諸特性のリストアップ作業に参画した企業も関与し、実運用を想定した諸元が導出できる評価内容を実施した。



## 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

潜在的な技術ポテンシャルの高い革新型蓄電池が国際市場で競争力を獲得するためには、国内外を含めて戦略的な出願の取り組みが求められる。その一方で、革新型蓄電池の実現に結び付く基盤技術の成果を学会発表及び論文投稿等により幅広く社会にアピールをするためには、計画的な特許出願とノウハウ等の秘匿すべき情報を適切に使い分ける戦略が必要であった。特に基盤技術開発に携わる大学の先生方にとって、学会発表、論文投稿は重要な活動であり、実用化に携わる企業も参加する本プロジェクトにおいて、実施者別にオープン／クローズの戦略の優先順位が大きく異なっていた。そのため、実施者個別のオープン／クローズ戦略を尊重しつつ、実用化・事業化に際して基本となる技術は積極的に知財を確保するよう指導した。また、研究拠点、サテライト、参画企業について個別出願または共同出願を適宜、柔軟に選択することが可能となるようにした。さらに、各実施者の特許出願・権利化動向を把握しつつ、今後主要な市場形成が見込まれる海外への出願を積極的に推進した。

### 2. 5-2 知的財産マネジメント

本プロジェクトでは、「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。研究開発実施者サイドでは、PL のリーダーシップの下、以下の管理を行った。

- ・ 知財運営委員会の設置
- ・ RISING2 知財運用規定の整備
- ・ 特許に適さない知財情報  
「ノウハウ集」として管理・運用した。
- ・ 特許技術動向調査  
国内外の特許調査を実施した。

### 第3章 研究開発成果について

#### 3.1 中間評価概要

##### 3.1-1 高度解析技術開発

成果まとめ及び中間目標に対する達成状況について下表に示す。

表 3.1-1-1 に記載するように、中間目標を達成した。また、表 3.1-1-2 に示すように一部の最終目標については既に前倒しで達成した。

表 3.1-1-1 高度解析技術開発の成果まとめ

中間目標	成果	達成度
<b>目標1</b> 開発中の解析技術を組み込んだ計測分析装置・設備の設置を完了する。	放射光) イメージングHAXPES装置の導入、共焦点XRD装置の導入。 軟X線) 超軟X線XAFS測定系。 中性子) 透過ビームモニタ、7軸ゴニオメータなど。 核磁気共鳴) 7T磁場用の新たな固体NMR測定システム。 電子顕微鏡) 世界最高の分解能を有する新規収差補正装置。 電気化学測定) 放射光operando測定時に並行して測定可能である矩形波インピーダンス測定システム。 ラマン分光) 可動式電場素子実装セル。 計算科学) 第一原理計算(電極+反応部分)と古典溶液論(反応周辺の溶質部分)とのハイブリッド計算法。	○
<b>目標2</b> 開発中の解析技術を用いて、「研究開発項目② 革新型蓄電池開発」で開発する革新型蓄電池の解析評価に着手していること。	放射光) X線CTによる水系空気電池の亜鉛負極断面観察手法を確立。 軟X線) 硫化物電池・ハロゲン化物電池の新規負極材料等について軟X線XAFS測定による評価技術を確立。 中性子) 中性子結晶構造解析から直接MEM解析する手法を開発。このデータからハロゲン化物電池の固体電解質中のフッ素イオン伝導経路を予測する解析法を確立。 核磁気共鳴) $^{19}\text{F}$ NMR測定によるハロゲン化物電池の電極材料/固体電解質の構造解析を実施。 電子顕微鏡) 水系空気電池の亜鉛極での反応モデルの観察法を検討。 電気化学測定) コンバージョン電池の $\text{FeF}_3$ 正極で低周波数領域に拡散に起因する特徴的なインピーダンス挙動を確認。 ラマン分光) 亜鉛空気電池の亜鉛負極表面における水酸化物イオンのその場ラマン分光測定技術を確立。 計算科学) コンバージョン電池の正極である $\text{FeF}_3$ について、リチウム挿入・脱離状態でのX線吸収端近傍微細構造(XANES)を、第一原理計算を用いて解明。	○

◎大幅達成、○達成、△一部未達、×未達

表 3.1-1-2 高度解析技術成果まとめ

最終目標(抜粋)	成果	達成度
革新型蓄電池の高性能化や高耐久化を実現する実セル及び電極の設計・製造に活用可能な新規の解析技術を開発する。 なお、上記の解析技術には、空間分解能で10マイクロメートル、時間分解能で10ミリ秒、深さ分解能で10ナノメートルを超える技術が含まれるものとする。	HAXPESと軟X線を組み合わせた測定装置において10nmの深さ分解能を達成。	◎

次に、代表的な成果トピックスについて記述する。

SPring-8 BL28XU に既設の HAXPES 装置に、軟 X 線源を備えることで、入射エネルギーを変えて深さ方向の分析ができるようにした (図 3.1-1-1)。また、蓄電池分析のためにグローブボックスから大気非暴露で真空チャンバー内の測定槽まで試料を搬送できるように、トランスファーベッセルを追加した。このトランスファーベッセル部分を従来の SUS 製から高強度ガラスに変更して、ユーザーが試料の移動を見ながらできるように改良した。



図 3.1-1-1 HAXPES 装置外観

電子顕微鏡測定技術開発において、図 3.1-1-2 に示すように、水系空気電池の負極である亜鉛の析出過程のその場 TEM 観察を実施した。それぞれ電圧印加から 1、2、4、6 秒後の同一視野像である。像中下部の暗い領域が Pt 電極に相当し、視野全体が電解液中に浸漬された状態にある。図中矢印で示す部分がデンドライト核に相当する微結晶で、時間が経つにつれ徐々に数が増え、かつ各核が成長して樹状に伸びる様子が捉えられている。また核形成と同時に電極表面での層状の析出も観察された (図 3.1-1-2 の 1、2 秒後)。この後、印加電圧の極性を反転すると、電極上に析出した亜鉛の溶出過程も観察された。さらに析出/溶解のサイクルを繰り返したところ、デンドライト核が発生する場所は毎回ほぼ同一であることが判明した。

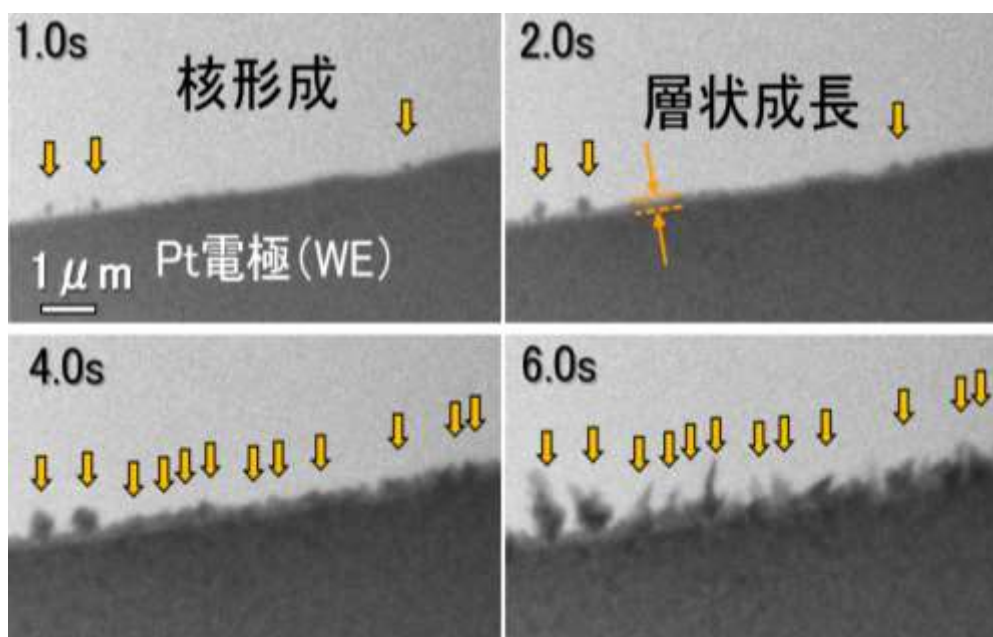


図 3.1-1-2 電解液中での亜鉛デンドライト成長のその場 TEM 観察像



水系空気電池の耐久性向上に対して、亜鉛負極のサイクル特性向上が重要となる。具体的には、電池または電極内における亜鉛金属、または亜鉛酸化物の分布状態を詳細に解明することが必要である。そこで、高度解析技術グループと連携し、亜鉛負極断面の X 線 CT 観察技術を確立した。タングステン管球 X 線源を用いた X 線 CT 断面像により、電極端周辺および電極表面において X 線吸収係数が比較的高い物質の偏析が観察された (図 3.1-1-3)。これは亜鉛金属の偏析によるものと考えられる。従って劣化後において亜鉛金属が酸化亜鉛電極表面に緻密化し、放電反応においても酸化亜鉛パッシベーションにより完全放電出来ないことが示された。

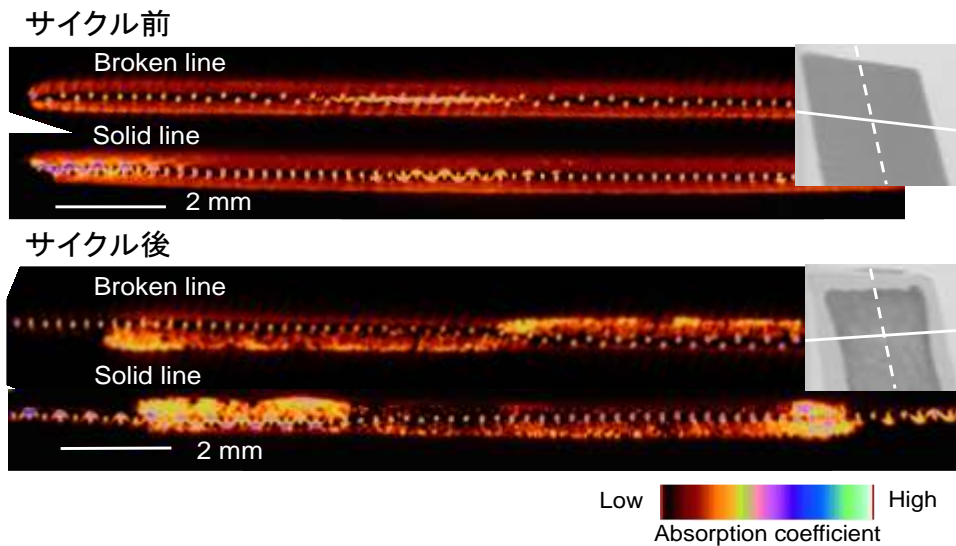


図 3.1-1-3 亜鉛負極断面の X 線 CT による観察結果

### 3. 1-2 革新型蓄電池開発

成果まとめ及び中間目標に対する達成状況について下表に示す。目標を大幅達成している項目もあるが、それは300Wh/kgという数値を、最終目標に示される5Ahを超える容量のセルで達成したためである。

表 3.1-2-1 革新型蓄電池開発の成果まとめ

中間目標	成果と達成度	ハロゲン化物電池	亜鉛空気電池	コンバージョン電池	硫化物電池
<p>開発した共通基盤技術を基に試作した実セルで重量エネルギー密度300Wh/kg以上が得られていることを確認する。 また、当該蓄電池の性能・耐久性等の支配因子とその影響度を把握し、最終目標を満足させるための技術開発の方向性を提示すること。</p>	成果	<p>銅正極を初めとする材料を用いて、圧粉型電極を作製。世界トップレベルとなる性能を実証。ただし、コイン電池において100Wh/kgとエネルギー密度目標は未達。 金属と金属フッ化物を複合化する、金属フッ化物から欠陥を作るなどにより、フッ化物イオン伝導性がほとんどない活物質でも使用可能であることを実証。この成果は、今後の新しい電池開発につながる大きな発見である。</p>	<p>単位面積当たり容量の高い厚膜亜鉛極及び新規な触媒を用いた長寿命炭素系空気極を開発。結果として、8Ahセルにおいて311Wh/kgを達成。 亜鉛極、空気極及びセルに関して、電極構成材料（触媒種、炭素、結着剤）、電極組成、電極構造が性能、耐久性に与える影響を詳細に検討。特に亜鉛極については、高度解析を活用して断面X線CT観察法を確立。亜鉛偏析が劣化要因であることを解明。</p>	<p>FeF<sub>3</sub>活物質へのガラス混合により正極特性が大きく向上。結果として、8Ah級セルにおいて319Wh/kgを達成。 FeF<sub>3</sub>へのガラス混合による非晶質化が耐久性向上に寄与することを確認。また、充放電サイクルを重ねることに、FeF<sub>3</sub>表面がFeを含まない皮膜に覆われることが劣化要因であることを解明。</p>	<p>VS<sub>4</sub>活物質の非晶質化により正極特性が大きく向上。結果として、8 Ah級セルにおいて314 Wh/kgを達成。 VS<sub>4</sub>活物質の非晶質化が耐久に寄与することを確認した。また、活物質表面をTiO<sub>2</sub>皮膜で保護することにより硫黄溶出を抑え耐久性が向上することも分かっている。</p>
	達成度	○	◎	◎	◎

◎大幅達成、○達成、△一部未達、×未達

次に、代表的な成果トピックスについて記述する。

#### (1) ハロゲン化物電池

ハロゲン化物電池は金属ハロゲン化物（金属フッ化物、金属塩化物他）を活物質として利用し、塩化物イオン、フッ化物イオンをキャリアーとする電池である。層状活物質を利用する従来のリチウムイオン電池と比較して、理論容量は遥かに高い高エネルギー密度型電池として期待されている。一方で、金属ハロゲン化物はイオン導電性が乏しい等の技術課題が存在する。

本事業（RISING2）の前身であるRISING事業においては、薄膜型電極および電池による評価を進めた。結果として、銅正極において充放電挙動を確認するという成果を得た。しかしながら、実セルの構築、その大型化等、実用化を視野にいれた場合、薄膜型電極での取組には困難がと

もなう。それを踏まえ本事業においては、活物質及び導電助剤等を圧粉することにより電極を作製することを試みた（圧粉型電極）。研究開発の結果、フッ化銅にイオン導電性を付与することに成功した（詳細は後述）。その銅正極を初めとする材料を用いて、圧粉型電極を作製することに成功し、その電極を利用したコイン電池を構築した。図 3.1-2-1 に実セルの外観写真を示す。結果として、世界トップレベルとなる性能を実証することができた（図 3.1-2-2）。ただし、コイン電池において 100Wh/kg とエネルギー密度の目標は未達である。追加公募により増強した研究体制をもって、更なる研究開発の加速を図っていく。



図 3.1-2-1 ハロゲン化物電池  
実セルの外観

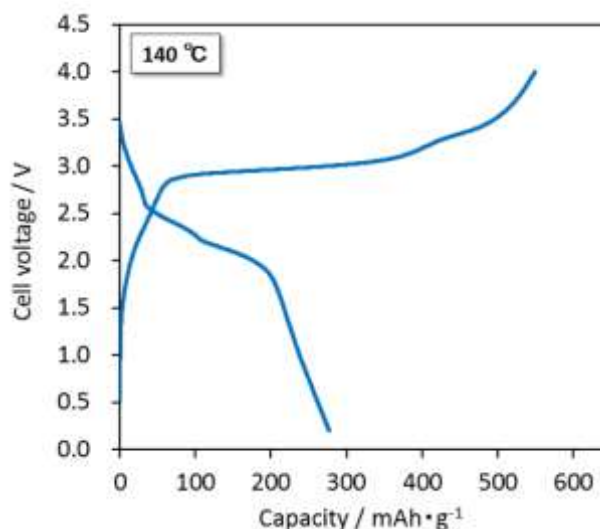


図 3.1-2-2 ハロゲン化物電池 実セルの充放電特性

## (2) 水系空気電池

空気電池は、大気中の酸素を活物質として利用するため、つまり電池内の正極体積を削減できるため、高エネルギー密度型の電池として期待されている。特に水系空気電池は、非水系の空気電池とは異なり、大気中に含まれる水分の影響を受け難いため、より実用化に適した電池となる。一方、電極構造等が未だ十分に最適化されておらず、期待されるほど実セルのエネルギー密度が高まっていない等、の技術課題がある。

本事業の中間目標であるエネルギー密度 300Wh/kg 実現が可能となる亜鉛-空気電池のセル設計を行った。また基本計画において最終目標（2020 年度）の実セル容量が 5 Ah 級とされているため、中間評価段階でも 5Ah 以上の容量を持つセルを開発することを目標とした。

実セル構造は扁平角形とし、亜鉛極を中心に、空気極を両面に配置する構造とした。セルサイズとしては、5~10Ah の容量を持たせるために正負極対向部分を 5 cm×5 cm (25 cm<sup>2</sup>) とした。このセルサイズの場合、亜鉛極の単位面積当たりの容量として、200~400mAh/cm<sup>2</sup>が必要となる。亜鉛極は酸化亜鉛を活物質とし、短絡防止のため袋状のセパレータで包み込む構造とした。空気極はガス拡散層と触媒層を一体化した 2 層構造の空気極とした。ガス拡散層側に集電体のニッケル網を圧着した。試験セルは各空気極の外気側を端板（アクリル製、厚み 20 mm）で両側から押さえる構造のセルを組み立てた。図 3.1-2-3 に亜鉛-空気電池実セルの外観写真を示す。

上記の実セルについて、組み立て、性能評価を繰り返して構成の最適化を行った。図 3.1-2-4 に

亜鉛-空気電池実セルの充放電曲線の一例を示す。放電容量 8.53Ah、平均放電電圧 1.09V、重量エネルギー密度 311Wh/kg が得られ、エネルギー密度に関しては中間評価の目標値を達成した。また、セルサイズについては最終目標に示される 5Ah を、現時点において超えることができています。



図 3.1-2-3 亜鉛-空気電池 実セルの外観

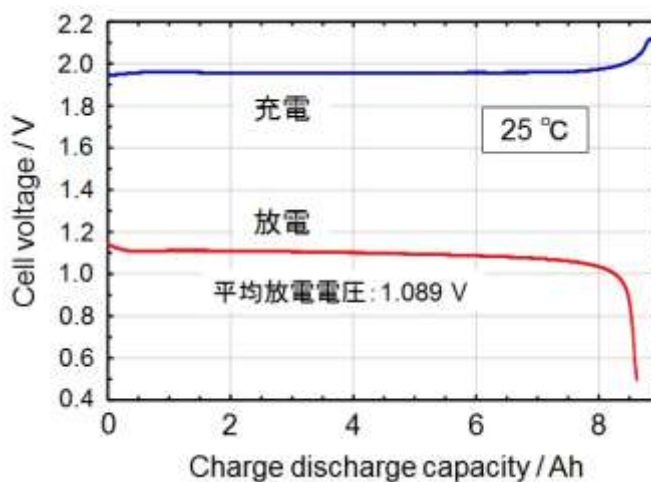


図 3.1-2-4 亜鉛-空気電池 実セルの充放電曲線

### (3) コンバージョン電池

コンバージョン電池では、正極活物質の構造自体が変化するコンバージョン領域まで充放電をおこなう。結果、層状活物質の層間にリチウムイオンを挿入・脱離させる従来のリチウムイオン電池より高い理論容量を得ることが可能となる。一方、正極活物質である  $\text{FeF}_3$  の過電圧が大きい、コンバージョン領域まで反応した活物質が元に戻らない、つまり反応可逆性が悪い 等の課題があった。

エネルギー密度向上に向けて、本事業では、活物質の非晶質化による過電圧低減に取り組んだ。具体的には、 $\text{FeF}_3$  へバナジン酸ガラスを添加することにより非晶質化に成功し、活物質レベルでの大幅な過電圧低減を確認した (図 3.1-2-6 中 小図)。それらの活物質を利用して負極とも適合する電解液や部材の選択によりラミネート型実セルを構築した。図 3.1-2-5 に実セルの外観写真を示す。結果として、6Ah 級セルにおいて 319Wh/kg のエネルギー密度が得られ、中間目標を達成することができた (図 3.1-2-6)。また、セルサイズについては最終目標に示される 5Ah を、現時点において超えることができています。





図 3.1-2-5 コンバージョン電池 実セルの外観

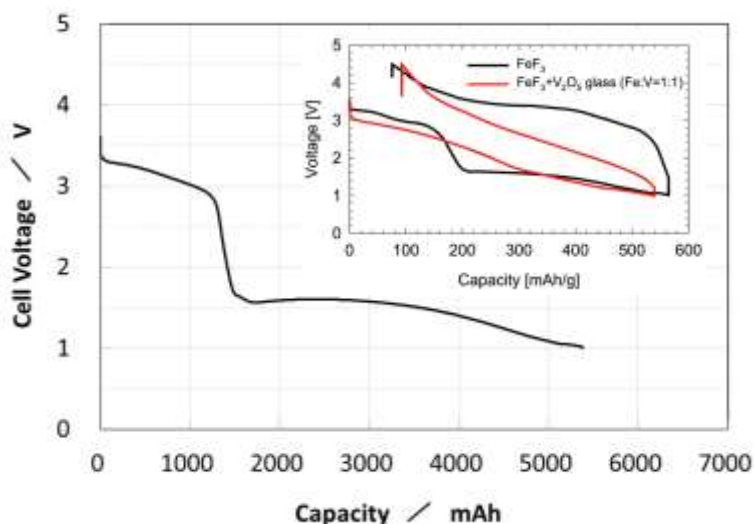


図 3.1-2-6 ハロゲン化合物電池 実セルの充放電特性

#### (4) 硫化物電池

硫黄原子に多数のリチウムを結合させる硫化物電池は、高エネルギー密度電池として期待されている。一方、電極から硫黄が離脱するという大きな課題があり、本事業では金属多硫化物というアプローチで克服するべく研究開発を進めている。

エネルギー密度向上に向けて、正極活物質である  $VS_4$  の過電圧が大きいことが課題となっていた。そこで、メカノケミカル処理により正極活物質である  $VS_4$  の低結晶化を試みた。結果として、低結晶性とすることにより、初期充放電特性の向上が認められた。すなわち、初期放電時において、いずれの活物質を用いたセルもおよそ  $950 \text{ mAh g}^{-1}$  の放電容量を示すものの、低結晶性  $VS_4$  を正極として用いた場合、放電曲線のプラトーの電位がおよそ  $0.1 \text{ V}$  向上した。容量増加および過電圧低下を確認した (図 3.1-2-8 中 小図)。この活物質を利用して、負極とも適合する電解液や部材の選択によりラミネート型実セルを構築した。外観を図 3.1-2-7 に示す。結果として、 $8 \text{ Ah}$  セルにおいて  $314 \text{ Wh/kg}$  のエネルギー密度が得られ、中間目標を達成することができた (図 3.1-2-8)。また、セルサイズについては最終目標に示される  $5 \text{ Ah}$  を、現時点において超えることができてい



図 3.1-2-7 硫化物電池  
実セルの外観

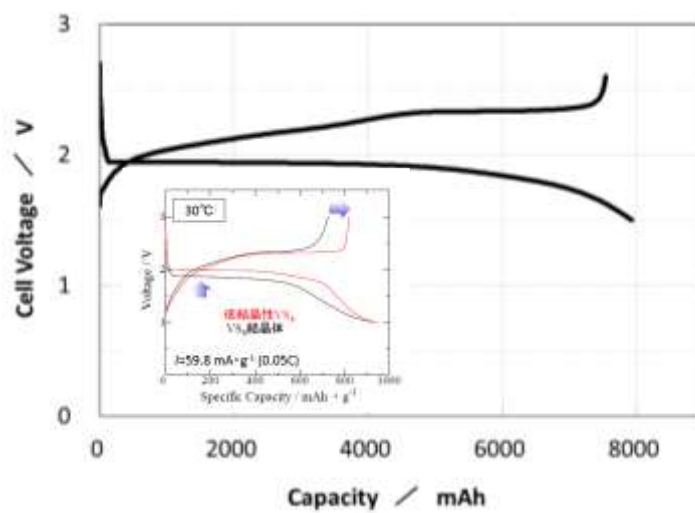


図 3.1-2-8 硫化物電池 実セルの充放電特性

3. 2 事後評価 研究開発成果

3. 2 - 1 高度解析技術開発

成果まとめ及び最終目標に対する達成状況について表 3.2-1-1 に示す。表に記載するように、最終目標を達成した。特に、革新型蓄電池への適用に係る研究開発が大きく進捗した。これが示すように、中間評価以降の大半の成果は革新型蓄電池適用に係るものである。よって、成果トピックスは3. 2-2項にて記載する。

表 3.2-1-1 高度解析技術開発の成果まとめ

最終目標	成果
<p>革新型蓄電池の高性能化や高耐久化を実現する実セル及び電極の設計・製造に活用可能な新規の解析技術を開発する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・実セル作動条件下における電極活物質-電解質界面の反応解析技術</li> <li>・実セル作動条件下における電極活物質の反応解析技術</li> <li>・実セル作動条件下における電極合剤内の反応分布及び劣化現象解析技術</li> </ul> <p>なお、上記の解析技術には、空間分解能で10 μm、時間分解能で10ミリ秒、深さ分解能で10ナノメートルを超える技術が含まれるものとする。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SPring-8放射光において、実セル作動環境において活物質と固体電解質の界面反応を解析する技術を確立した。また、時間分解能10ミリ秒を達成。</li> <li>・SPring-8放射光において、実セル作動環境において活物質の酸化還元反応を解析する技術を確立した。</li> <li>・透過電子顕微鏡において、活物質表面におけるイオン再析出反応を可視化する技術を確立した。また、空間分解能10 μmを達成。</li> <li>・X線-CTにおいて、実セル作動環境において電極内の活物質再析出分布状態を可視化する技術を確立した。</li> <li>・HAIXPESにより活物質表面における元素分布状態を解析する技術を確立した。また、深さ分解能10ナノメートルを達成した。</li> </ul> <p style="text-align: right;">※上記灰色字：中間評価時点において達成済</p>
<p>開発した解析技術を用いて、「研究開発項目② 革新型蓄電池開発」で開発する革新型蓄電池の性能や耐久性等の支配因子とその影響度を提示する。</p>	<p><u>ハロゲン化物電池</u> SPring-8においてフッ化物電池のオペランド放射光解析技術を確認した。結果、エネルギー密度と活物質利用率の関係を明確にした。</p> <p><u>水系空気電池</u> 電池性能と深く関連する、電解液中の亜鉛水和構造をNMRで解析した。結果、電解液の水酸化カリウム濃度は水和構造に影響を及ぼさないことを明確にした。</p> <p><u>コンバージョン電池</u> サイクル劣化と正極内の鉄分散状態の関係を、X線解析と精密充放電を組み合わせて明らかにした。結果、サイクル劣化と鉄の不均一分散の相関を明確にした。</p> <p><u>硫化物電池</u> サイクル劣化抑制に有効であるバナジウム硫化物へのリン添加について、X線散乱により解析した。結果、狙い通りに2硫化リチウム析出が抑制されたことを明確にした。</p>

評価 ○

◎大幅達成、○達成、△一部未達、×未達

### 3. 2 - 2 革新型蓄電池開発

成果まとめ及び最終目標に対する達成状況について表 3. 2-2-1 に示す。表に記載するように、最終目標を達成した。

表 3. 2-2-1 革新型蓄電池開発の成果まとめ

最終目標*	フッ化物電池	亜鉛空気電池	コンバージョン電池	硫化物電池
重量エネルギー密度： 500Wh/kg以上	360Wh/kg、コインセル 高容量マグネシウム 負極のフルセル適用	476Wh/kg、20.4Ahパウ チセル 亜鉛負極構造改良等	477Wh/kg、単層ラミ ネートセル 正極へのバナジン酸 添加、負極利用率向 上	511Wh/kg、20Ah級積層 ラミネートセル 正極へのリン添加、 負極利用率向上
体積エネルギー密度： 1,000Wh/L以上	1400Wh/L、同上	662Wh/L（空気流路 含）、同上	750Wh/L、同上	700Wh/L、同上
重量出力密度：100W/kg以 上	目標出力における電池 動作を確認。銅とフッ 化バリウムを複合した 正極による室温動作を 実証。	目標出力における電池 動作を確認。メリライ ト型触媒により過電圧 低減。	目標出力における電池 動作を確認。正極への バナジン酸添加により 過電圧低減。	目標出力における電池 動作を確認。正極への リン添加により抵抗低 減。
サイクル寿命：100回以上	20サイクルまで急激な 容量劣化がないことを 確認。	60サイクルまで急激な 劣化がないことを確認。 添加材による亜鉛負極 のサイクル特性向上を 確認。	30サイクルまで急激な 劣化がないことを確認。 添加剤による正極劣化 抑制を確認。	100サイクルまで急激な 劣化がないことを確認。 電解液濃度改良、添加 剤による劣化抑制を確 認。
環境性：カドミウム、水銀、 六価クロム等の環境負荷物 質をセル構成材料として大 量に使用していないこと。	環境負荷物質の使用無。 動作環境温度における 材料変質は確認されず。 本質的に安全な金属フッ 化物を使用。	環境負荷物質の使用無。	環境負荷物質の使用無。	環境負荷物質の使用無。
車両環境への対応：-30～ 60℃の動作環境温度にお いて変質しないこと。		動作環境温度における 材料変質は確認されず。	動作環境温度における 材料変質は確認されず。	動作環境温度における 材料変質は確認されず。
安全性：内部短絡、圧潰・過 充電時の異常発熱、発火、 熱暴走等に対する安全策を 講じることが技術的に可 能なこと。		本質的に安全な水系電 解液を使用。	正極に酸素を含まない 材料を使用。	正極に酸素を含まない 材料を使用。
充電性：普通充電（6時間） が可能なこと。急速充電が 可能なこと。		6時間で50%程度の充 電を確認。	6時間で50%程度の充 電を確認。	6時間以下での充電を 確認。

\*開発した共通基盤技術を基に試作した実セル（容量5Ah級）について、上記を満足することを確認する。

評価 ○

◎大幅達成、○達成、△一部未達、×未達



次に、代表的な成果トピックスについて記述する。

### (1) ハロゲン化物電池

高エネルギー密度の実証について検討した。特に理論容量が高い負極材料について、利用率を高めることが課題となっていた。そこで、新たにマグネシウム系材料に着目した。純粋なマグネシウムのみを利用する場合、フッ化状態であるフッ化マグネシウムのフッ素イオン伝導が著しく低い事が知られており、負極材料として機能させることは困難である。そこで、フッ化状態におけるイオン導電性増加を狙い、マグネシウムへの第2および第3金属の添加に取り組んだ。そのマグネシウム合金負極と銅合金正極を組み合わせて実セルを構築した(図3.2-2-1)。カルシウムとバリウムを含む固体電解質を用いた全固体電池となる。結果、重量エネルギー密度360Wh/kg、体積エネルギー密度1,400Wh/Lを示した(図3.2-2-2)。これは、同電池において世界トップレベルである。



図3.2-2-1 ハロゲン化物電池 実セルの外観

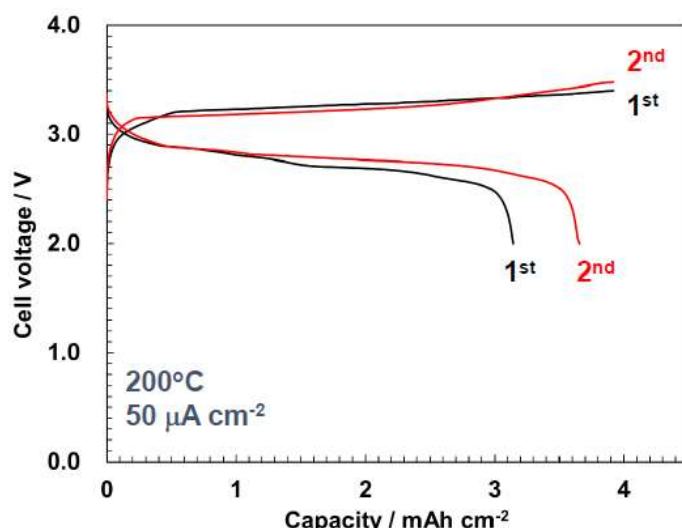


図3.2-2-2 ハロゲン化物電池 実セルの充放電特性

第2の課題は、電池作動に高温を必要とすること、つまりは入出力に係る抵抗が大きいことである。それを克服すべく、活物質主相への金属フッ化物複合化に取り組んだ。銅にフッ化バリウムを複合化した正極について、鉛を対極とする単極評価を実施した。結果、図3.2-2-3に示すように、充放電容量の大きな増加が確認された。次にセリウムを負極とした実セルを構築し、室温における動作を試みた。結果、実セル動作を確認した(図3.2-2-4)。この成果から、活物質と金属フッ化物の複合化は、電池の高入出力化に有用であると示した。

電池実用化に向けて、サイクル特性も重要な指標である。今回は銅正極について評価を実施した。図3.2-2-5に充放電特性を示す。サイクルにともなう充放電極性の形態変化(例:プラトリーの消失、新規プラトリーの出現等)はみられず、結果としてサイクルに伴う活物質の顕著な変質は確認されなかった。図3.2-2-6に容量維持率を示す。図に示すように、20サイクル程度までは急

激な容量劣化はないことを確認した。

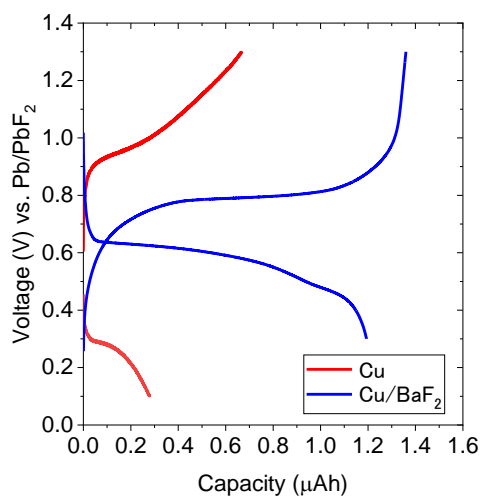


図 3.2-2-3 銅へのフッ化バリウム添加効果

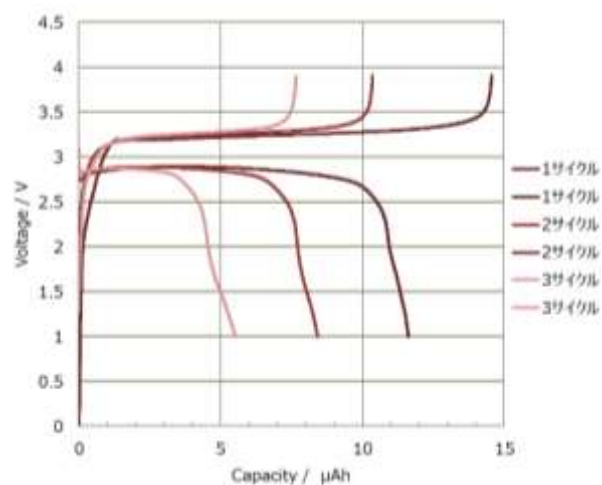


図 3.2-2-4 セリウム負極の室温における実セル放電特性

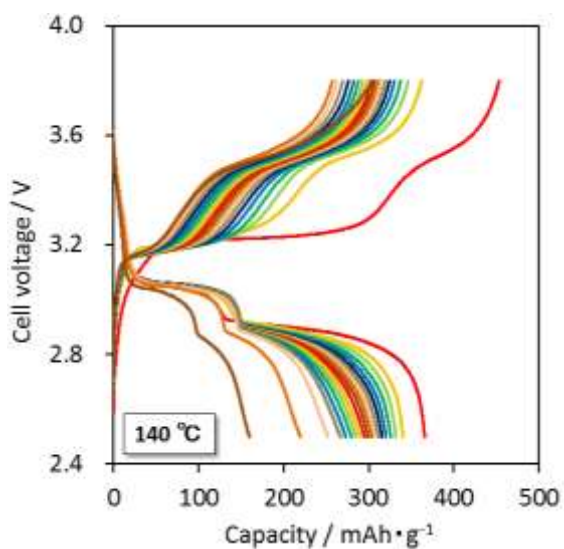


図 3.2-2-5 銅正極のサイクル特性

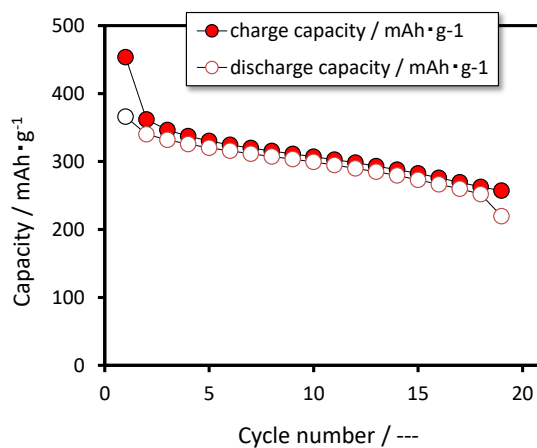


図 3.2-2-6 銅正極の容量維持率

次に、高度解析技術の適用について記述する。フッ化物電池の活物質開発において、活物質金属の酸化還元反応を正確に把握することは大変重要である。そこで、SPring-8 放射光施設において、フッ化物電池の Operand 解析装置を構築した (図 3.2-2-7)。特徴は、様々な電池作動温度において解析可能とするべく、電極とヒーターをセットにした電池解析部を確立したことである。銅正極の解析した図 3.2-2-8 に示す。図に示すように、電池の充放電ともなう銅正極の酸化還元反応を正確に捉えられることを確認した。

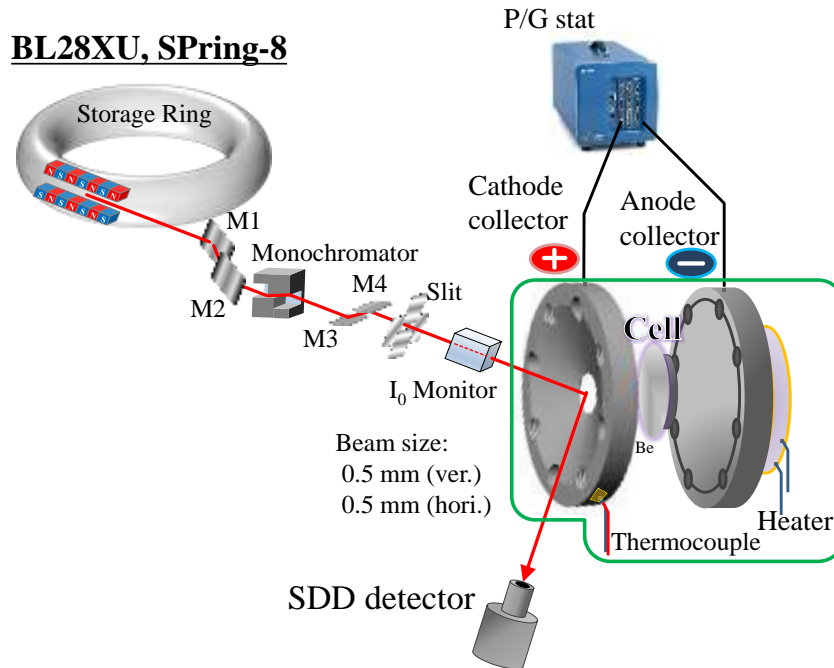


図 3.2-2-7 ハロゲン化物電池 Operand 解析装置

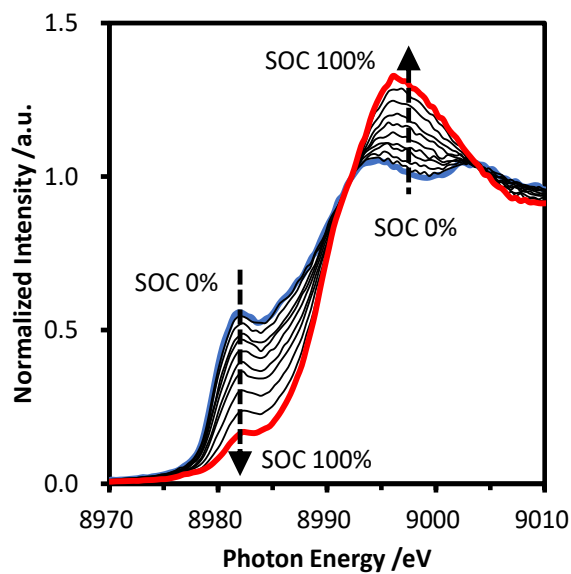


図 3.2-2-8 ハロゲン化物電池 銅正極の酸化還元挙動の解析結果

## (2) 水系空気電池

高エネルギー密度の実証について検討した。車載時における積層型電池を視野に入れたパウチ型セルを構築した (図 3.2-2-9)。負極構造を工夫することにより、亜鉛負極の更なる厚膜化を可能とした。測定条件は、図に示す通りである。結果、室温において 476Wh/kg のエネルギー密度を実証した (図 3.2-2-10)。これは、同電池において世界トップレベルである。

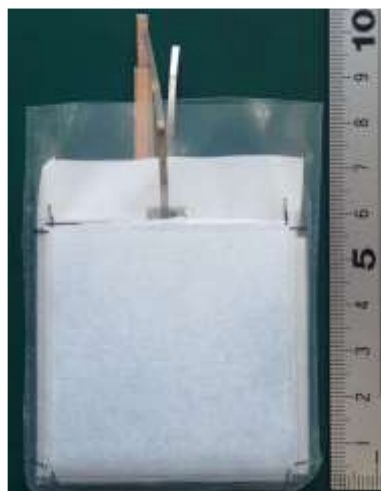


図 3.2-2-9 水系空気電池  
実セルの外観

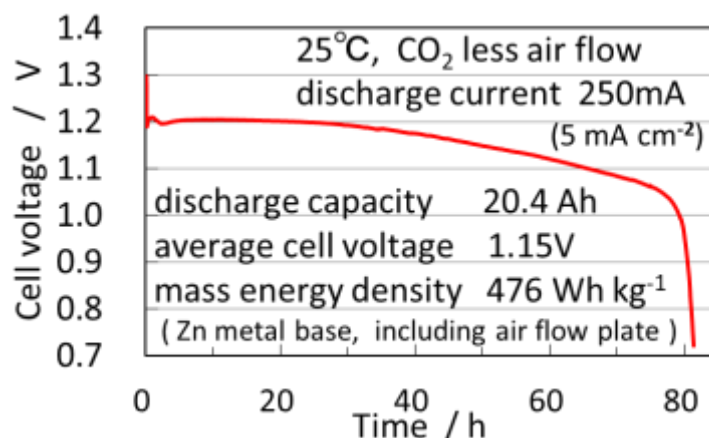


図 3.2-2-10 水系空気電池 実セルの充放電特性

サイクル特性向上に向けて、亜鉛負極のシェイプチェンジ抑制が重要である。そこで、合剤電極へのアルミ化合物添加による改良に取り組んだ。添加剤によるサイクル特性向上を確認した (図 3.2-2-11)。次に、そのメカニズムを推定した (図 3.2-2-12)。添加剤が無い状態では、サイクル数が増加すると、負極の電解液側から亜鉛粒子の肥大化が進行する。肥大粒子は 200 μm 以上まで到達し、このことにより亜鉛負極の可逆性は大きく低下する。加えて、この肥大粒子が負極の集電体側への電解液拡散を阻害する。

これにより、サイクル数増加にともない、負極の集電体側における亜鉛金属の反応が低下する。上記の2つの現象が同時進行することより、サイクル劣化は顕著に進むことになる。添加剤を加えることにより、亜鉛極の肥大化を抑制できることを確認した。また、肥大化が顕著に進む箇所を、電解液側から集電体側へシフトすることにも成功した。結果、サイクル特性の大幅向上を達成することができた。

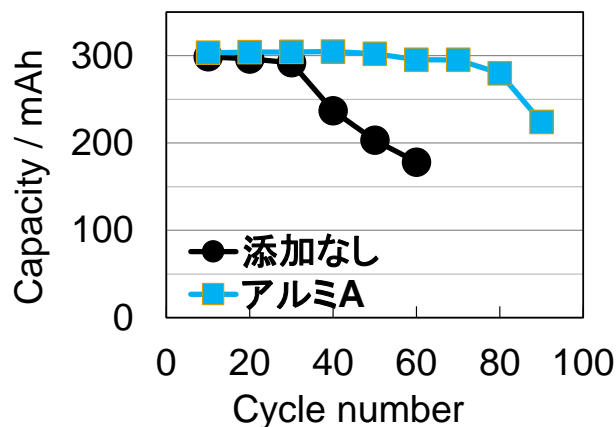


図 3.2-2-11 合剤電極へのアルミ化合物添加効果

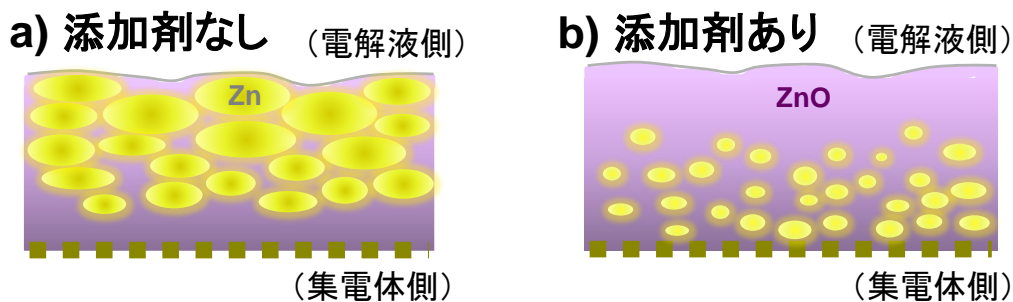


図 3.2-2-12 アルミ化合物添加効果の推定メカニズム

次に、高度解析技術の適用について記述する。

電解液中には亜鉛を含む反応中間体が溶存している。この詳細な構造、ひいては水和構造を把握することは、亜鉛負極の形状を制御し、シェイプチェンジを抑制する上で重要である。ここでは NMR による解析に取り組んだ。図 3.2-2-13 から明らかなように、電解液中の亜鉛濃度によらず亜鉛ケミカルシフトは大きく変化しないことを確認した。また、図 3.2-2-14 が示すように、電解液中の水酸化カリウム濃度によらず、亜鉛ピーク値は殆ど一定であった。これは、電解液中の亜鉛水和構造は、環境によらず変化し難いことを示している。

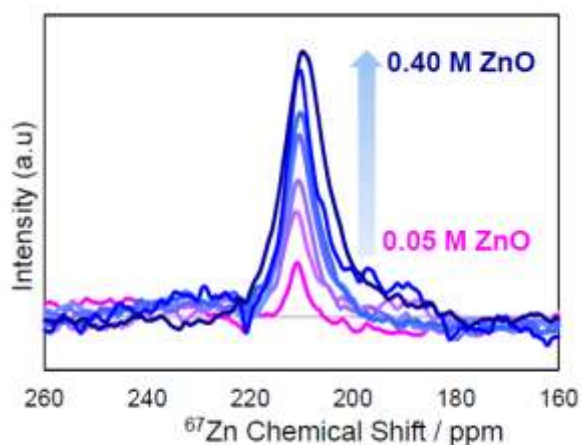


図 3.2-2-13 液中亜鉛濃度と NMR スペクトル  
(8M KOH)

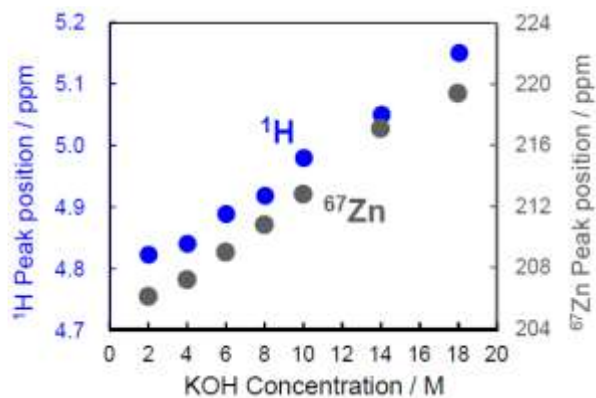


図 3.2-2-14 液中 KOH 濃度と NMR ピーク  
シフト

### (3) コンバージョン電池

高エネルギー密度の実証について検討した。正極は過電圧低減（＝電池電圧増加）を狙いとした、バナジン酸を複合化したフッ化鉄を用いた（詳細後述）。負極については、その利用率を向上させる改良を加えたリチウム金属負極である。これら材料による単層ラミネートセルを構築した（図 3.2-2-15）。結果、477Wh/kg のエネルギー密度を実証した。これは、同電池において世界トップレベルである。



図 3.2-2-15 コンバージョン電池 実セルの外観

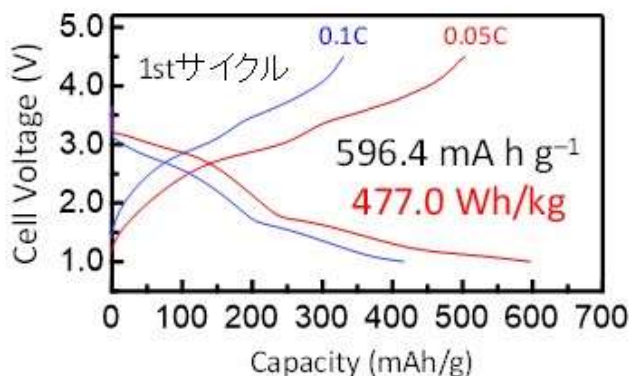


図 3.2-2-16 コンバージョン電池 実セルの充放電特性

高出力化に向けて、正極の過電圧を低下させることが重要である。そこで中間評価から引き続きとなるが、フッ化鉄へのバナジン酸複合化に取り組んだ。図 3.2-2-17 に示すように、バナジン酸の複合化割合が増加するほど、容量が低下する反面、過電圧は改善された。容量低下と過電圧改善（＝正極電位増加）を比較したのものが表 3.2-2-2 である。過電圧改善が、容量低下による損失を上回ることが分かった。この結果は、バナジン酸複合化が高出力化および高エネルギー密度化に寄与することを示すものである。

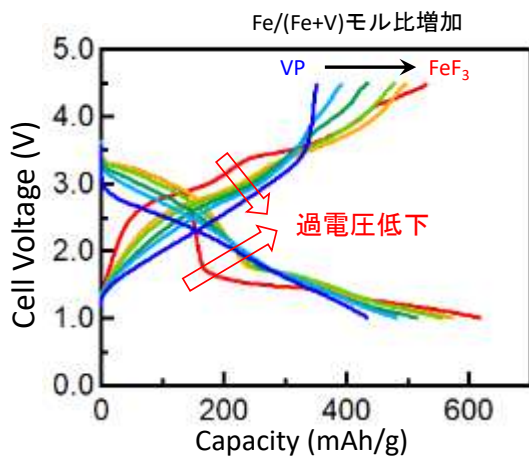


図 3.2-2-17 バナジン酸 (VP) の添加効果

表 3.2-2-2 バナジン酸添加有無の比較

	容量	平均電位
FeF <sub>3</sub>	約600 mA h g <sup>-1</sup>	約1.79 V
FVP(2:1)	約550 mA h g <sup>-1</sup>	約1.98 V



サイクル劣化抑制に向けて、電解液への鉄原子溶解を抑制することが重要である。そこで、添加剤による劣化抑制を試みた (図 3.2-2-18)。添加剤を加えない状態においては、15 サイクル程度から急激な容量低下が発生することが分かる。まず、正極のみに LiDFOB (図 3.2-2-19) を添加剤として加えた。結果、急激な容量低下を抑制することができた。次に、負極のみに LiDFOB を加えた場合、急激な容量劣化が確認された。よって、急激な容量劣化は正極で発生しており、添加剤によりこれを抑制できると判明した。一方、正極および負極双方に添加剤を加えた場合、急激な容量低下は発生しないが、サイクル特性は 1~20 サイクルの範囲において全体的に悪化した。これは、添加剤が負極に悪影響を及ぼしているためと考えられ、今後の検討課題である。

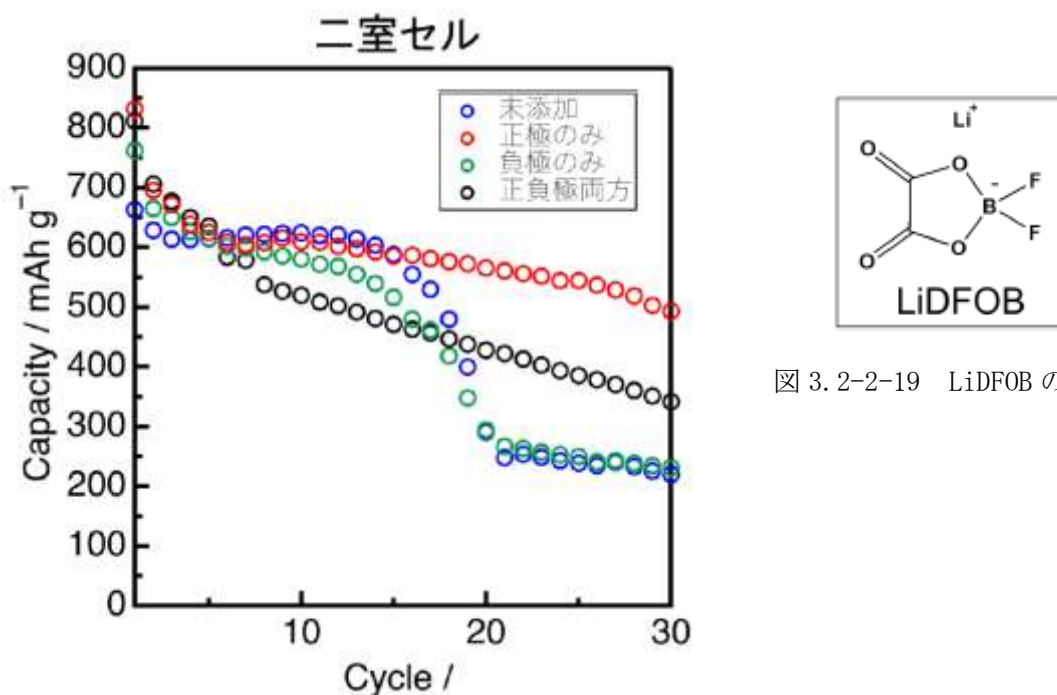
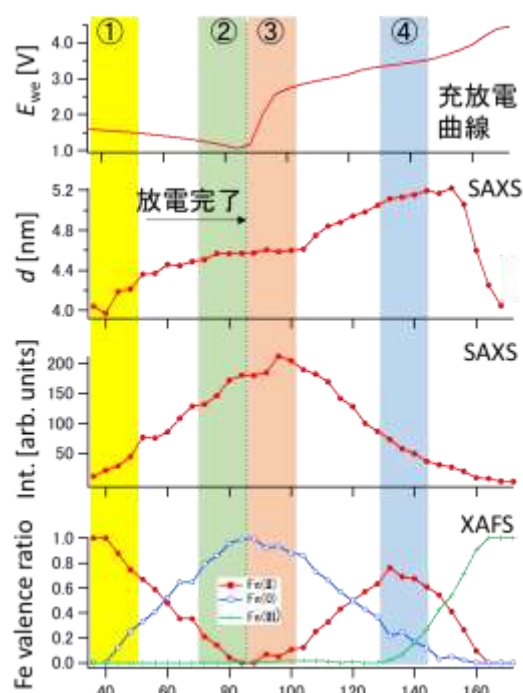


図 3.2-2-18 各電極に対する添加剤効果

次に、高度解析技術の適用について記述する。

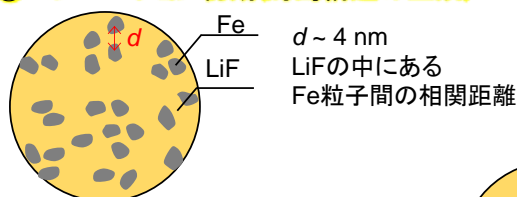
正極のサイクル特性を向上させるために、正極内の詳細な金属分布状態を把握することは重要である。ここでは、オペランド X 線解析と精密充放電を組み合わせる手法により検証をおこなった (図 3.2-2-20)。放電初期において、正極内には Fe が析出する。SAXS 解析から、この Fe 同士の距離を示す d 値は 4nm 程度であった。放電反応の進行にともない、この距離は拡大した。つまり、析出した Fe 粒子の粗大化が発生した。充電反応においては、析出した Fe が消失する。充電反応の進行にともない、この距離は更に拡大した。これは、析出した Fe について、粗大化のみならず粒径が不均一であることを示している。上記から、結晶構造が不均一に分断されることが、過電圧発生 of 要因であることが確認された。

### コンバージョン反応のモデル統合



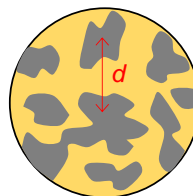
上図X軸は充放電深度の積算値(%)

#### ① コンバージョン初期(海島構造の生成)



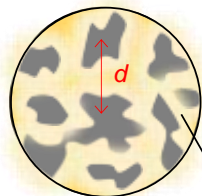
#### ② 放電末期

Fe粒子同士が合体  
 $d$ 増大 $\sim 4.5 \text{ nm}$



#### ③ 充電初期

逆コンバージョン反応で  
Fe近傍のLiが一部欠乏する  
 $2\text{LiF} + \text{Fe} \rightarrow 2\text{Li}^+ + \text{FeF}_2 + 2\text{e}^-$



#### ④ 逆コンバージョン末期

比較的大きな島が残る  
 $d$ さらに増大 $\sim 5 \text{ nm}$

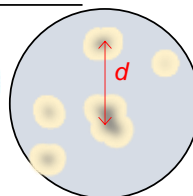


図 3. 2-2-20 過電圧発生要因の解析



#### (4) 硫化物電池

高エネルギー密度の実証について検討した。正極は、低拘束における高出力維持、およびサイクル特性向上に寄与するリンを添加した硫化バナジウムを用いた。負極は、コンバージョン電池と同様に、その利用率を高める改良を加えたりチウム金属負極である。これらを積層型のラミネートセルに組み込んだ (図 3.2-2-21)。評価の結果、511Wh/kg を実証した (図 3.2-2-22)。これは、同電池において世界トップレベルである。



図 3.2-2-21 硫化物電池 実セルの外観

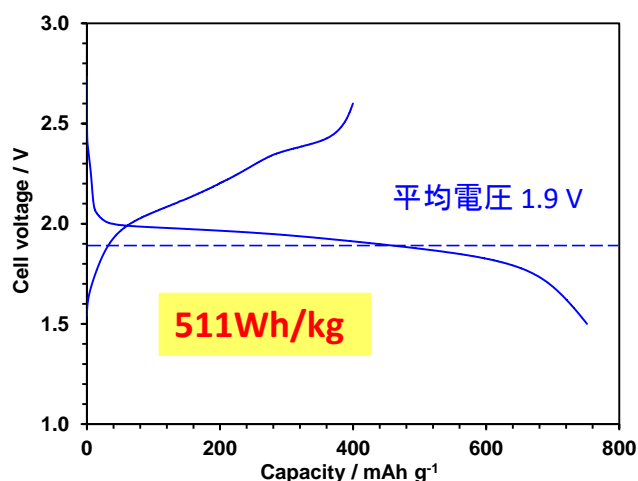


図 3.2-2-22 硫化物電池 実セルの充放電特性

正極のサイクル特性を向上させるために、反応中間体である硫化リチウムの電解液への溶解を抑制することが重要である。そこで、溶媒和の基になる有機溶媒の活量減少、正極と電解液の接触を抑制する被膜生成に着目した。

かつ、これらを低コストも視野に入れたカーボネート系溶媒で実現することが肝要である。今回は、EMC系溶媒と高濃度 LiTFSI 塩を組み合わせた。結果、サイクル特性は改善した (図 3.2-2-23)。次に、この電解液に FEC を添加し被膜形成を試みた。結果、サイクル特性は更に良好となった。100 サイクルにおけるサイクル初期に対する容量維持率は 95% 超となり、優れた成果をもたらした。

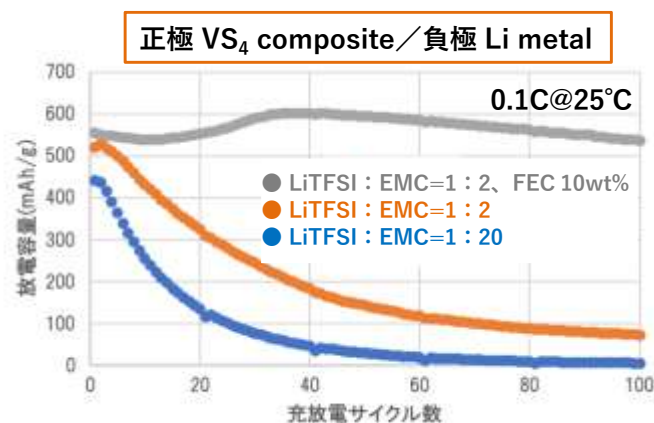


図 3.2-2-23 電解液塩濃度および添加剤の効果

高出力化については、高エネルギー密度および低コスト等の他の諸特性と両立させることが肝要となる。今回は、低拘束圧における高出力化、具体的には抵抗低減に取り組んだ。なお、拘束圧の低下は電池構造の簡略化に直結し、ひいては電池パック基準での高エネルギー密度および低コスト化に貢献するものである。正極活物質としてリンを添加したバナジウム硫化物を用いた電極の抵抗測定を実施した（図 3.2-2-24）。拘束圧が高い場合、サイクルに伴う抵抗減少が確認された。拘束圧が低い場合、初期の抵抗値は高いもののサイクルに伴う抵抗減少が大きく、2 サイクル後の抵抗値は高拘束のそれと同等であった。つまり、従来の 1/20 程度の拘束圧力においても、同等の出力を確保できることを確認した。

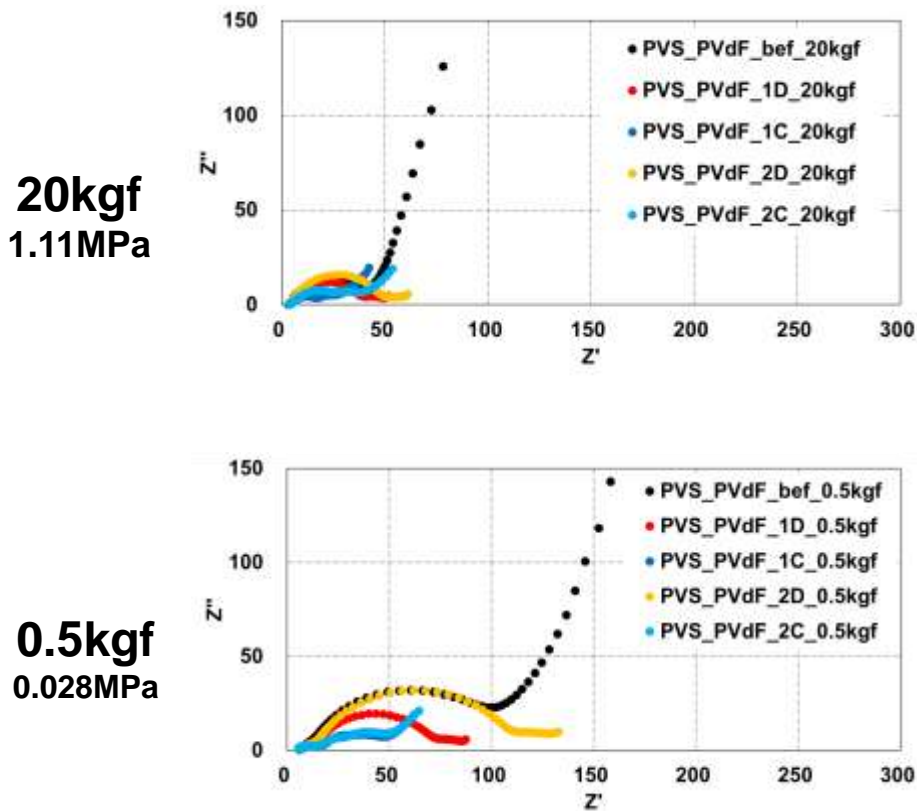


図 3.2-2-24 電池拘束圧力とインピーダンス特性

次に、高度解析技術の適用について記述する。

前述のリン添加バナジウム硫化物は、抵抗低減のみならずサイクル特性向上に寄与することも確認された。その要因を明確にするべく、X線全散乱手法によるオペランド解析を実施した（図 3.2-2-25）。リン添加がない場合、サイクル数が増加すると放電後に、電池容量に寄与しない 2 硫化リチウムが生成し、かつ充電後もそれは消失せず蓄積することが確認された。一方、リン添加品においては、放電後の 2 硫化リチウム生成は大きく抑制され、充電後には、そのピークは検出されなかった。つまり、サイクル経過にともない 2 硫化リチウムは蓄積しないことが確認された。

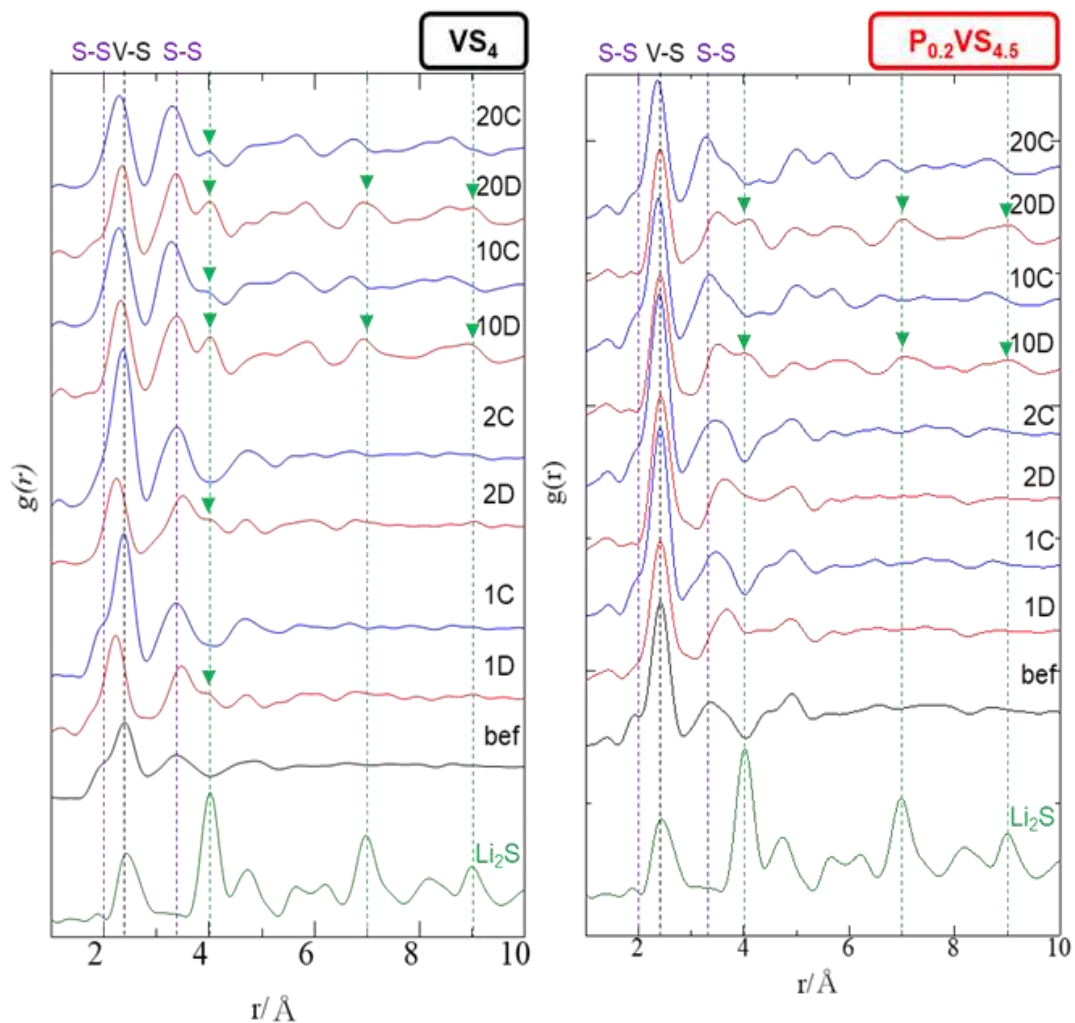


図 3.2-2-25 X線散乱手法による正極活物質の解析結果

### 3.3 成果の普及

#### 3.3-1 知的財産の確保、発表件数

図 3.3-1 に中間評価以降および中間評価前の成果を示す。中間評価以降、革新型蓄電池開発において特許出願数、論文および学会等の発表件数ともに加速した。特にハロゲン化物電池において顕著である。なお、外国出願については、国内出願後に時間をかけて手続きとなるため、今後更に件数が増加する見込みである。

中間評価以降

		特許出願 (うち外国出願)	論文 (査読つき)	研究発表 ・講演(国際発表)	新聞・雑誌等 への掲載
高度解析技術開発		1 (0)	29 (28)	101 (23)	0
革新型蓄電池 開発	ハロゲン化物電池	24 (24)	51 (46)	168 (36)	5
	亜鉛空気電池	15 (8)	14 (11)	57 (29)	1
	コンバージョン電池	1 (3)	8 (8)	38 (13)	1
	硫化物電池	13 (5)	13 (11)	58 (21)	2

中間評価まで

		特許出願 (同上)	論文 (同上)	研究発表 ・講演(同上)	新聞・雑誌等 への掲載
高度解析技術開発		3 (2)	26 (22)	181 (67)	4
革新型蓄電池 開発	ハロゲン化物電池	8 (6)	6 (6)	17 (5)	0
	亜鉛空気電池	11 (0)	2 (2)	20 (3)	0
	コンバージョン電池	2 (3)	1 (1)	24 (9)	1
	硫化物電池	7 (1)	4 (4)	32 (12)	1

図 3.3-1 特許出願数および発表件数

3.3-2 一般への情報発信

前述のように、2019年4月から本事業の研究体制を変更した。結果、4種類の革新型蓄電池を軸とした体制となった。パンフレットについて、新体制における取組を明確に伝えるべく刷新した(図3.3-2-1)。このパンフレットについては、後述する「ナショナルプロジェクト合同セッション」においても配布し、国内の電池関係者に本事業の活動を理解頂くようにした。



図 3.3-2-1 刷新した事業パンフレットの抜粋

また、文部科学省、JST と連携して、第 60 回電池討論会との共催にて「ナショナルプロジェクト合同セッション」を開催した。

電池討論会は国内における最大規模の電池関連学会である。セッション当日は 1,200 名もの電池研究者・技術者に聴講頂き、大変盛況であった。これにより、多くの方々に RISING2 事業の成果を紹介し、国内における本事業の存在感を高めることに成功した。また、各ナショナルプロジェクト間の連携についても紹介することもできた。当日の会場の様子を図 3.3-2-2 に示す。

合同セッションは第 58 回電池討論会においても実施したが、今回は演目について電池技術領域毎にカテゴライズした（表 3.3-2）。これにより、各ナショナルプロジェクトの関連をより明確に示すとともに、RISING2 を始めとする国プロの技術力をアピールすることに成功した。



図 3.3-2-2 合同セッションの会場風景（2019 年 11 月、於：京都国際会館）

表 3.3-2 合同セッションの演目

	ご講演内容	プロジェクト
JST大矢様 MEDO細井	全体概要	
京大田中様	フッ化物電池	RISING2
東理大駒場様	カリウム電池	元素戦略
京大新倉様	亜鉛空気電池	RISING2
NIMS久保様	リチウム空気電池	ALCA-SPRING
首都大金村様	リチウムおよびマグネシウム金属負極	ALCA-SPRING
産総研宮崎様	コンバージョン電池	RISING2
東大山田様	層状正極・濃厚電解液の新機能	元素戦略
産総研倉谷様	硫化物電池	RISING2
横国大渡邊様	リチウム硫黄電池	ALCA-SPRING
LIBTEC大谷様	全固体電池	SOLiD-EV
阪府大塚崎様	全固体電池	SOLiD-EV
阪府大辰巳砂様	全固体電池	ALCA-SPRING

## 第4章 成果の実用化・事業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定義は以下のように定めた。

### 定 義

本事業で開発された共通基盤技術が、革新型蓄電池の実用化開発に利活用され、ガソリン車並みの走行距離を有するEVの実現に資すること。

### 4. 1 実用化に向けた戦略

基本的な戦略は次のとおりとしている。

#### 革新型蓄電池

プロジェクト期間中より、参画企業と開発内容・状況等の情報をタイムリーに共有し、性能ポテンシャル、実用化課題、改良の方向性等について議論し、開発内容にフィードバックする。また、性能評価結果の取得だけでなく、何故、そのような結果が得られるのかの現象・メカニズムの裏付けデータを取得する。

#### 高度解析技術

プロジェクト期間中より、なるべく多くの企業の研究者・エンジニア（出向研究員以外）を開発技術にアクセスさせるとともに、専門家（アカデミア）が解析データの解釈方法を丁寧に指導し、「この技術で取得されたデータであれば信頼でき、革新型蓄電池の実用化開発に活用できる。」という認識を浸透させる。また、技術面以外にも、装置の操作性、マニュアル類の分かり易さ、秘密漏洩・技術流出防止等に対しても配慮する。

次に、実用的なEVが市販されると考えられる2030年頃に、本事業で開発された基盤技術を企業が利活用し、2030年頃にEVに搭載するための研究開発に移行する場合の開発シナリオとロードマップを図4.1-1に示す。

まず、第1のシナリオ（シナリオ1）であるが、実用化に向け積み残された課題が無い、あるいは少ない蓄電池タイプについては、企業中心の開発体制（自動車-蓄電池-材料メーカーによる垂直連携体制）を構築し、量産プロトタイプセル（大型セル）の開発ステージに移行することが考えられる。本シナリオでは、本事業の成果を活用して、2021年より量産プロトタイプセルの開発を中心に進め、2025年頃にはモジュール・システム開発へ移行し、2030年以降には車載評価、量産へと移行することになる。また、これらと並行して、解析技術の高度化、試験評価法の開発、国際標準化・基準化等も進めていくことになる。

次に、第2のシナリオ（シナリオ2）であるが、期待どおりの性能ポテンシャルが引き出せていない蓄電池タイプについては、引き続き、産学連携の開発体制で、材料改良と実証セルの開発ステージを継続することが考えられる。ただし、この場合もセル大型化に向けた検討を含める必要があり、開発体制への材料メーカーの取込みが必須と考えられる。このシナリオでは、2025年頃までは材料改良および実証セル開発を進め、2025年頃を目途に次のステージへの移行判断をすることになる。移行可の判断がなされた後には、シナリオ1と同様に量産プロトタイプセル開発から量産までのプロセスを進めることになる。ただし、車載評価および量産の時期をシナリオ1から遅らせないために、量産プロトタイプセル開発およびモジュール・システム開発に対して、



高度解析技術または計算シミュレーションを有効に活用し、開発期間の短縮を図る必要がある。また、上記プロセスと並行して、解析技術の高度化等を進めていく必要があることは、シナリオ1と同様である。

第3章にて説明したカチオン移動型電池については、本事業終了後はシナリオ1に沿って進める。

アニオン移動型電池については、シナリオ2に沿って進める。詳細は4.3-1項において説明する。

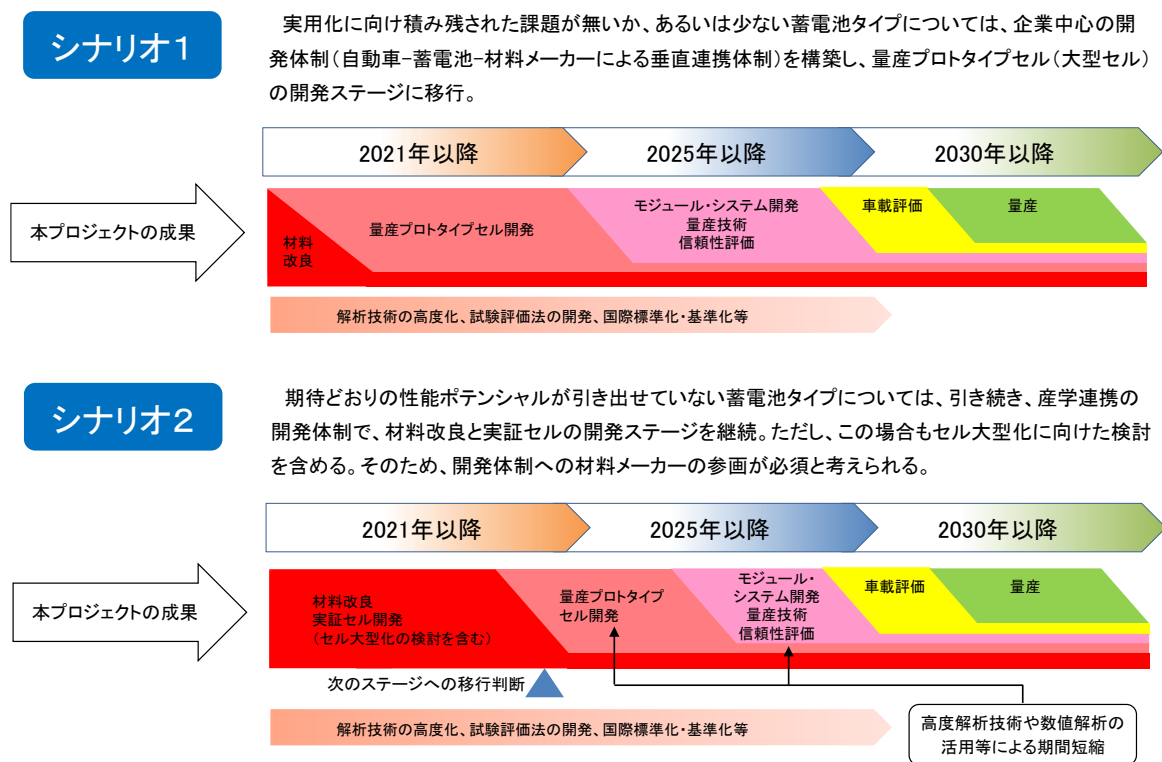


図 4.1-1 革新型蓄電池 本事業終了後の戦略

4. 2 成果の実用化・事業化に向けた具体的取組

4. 2-1 革新型蓄電池の成果の実用化・事業化に取り組む者の検討

本事業における革新型蓄電池に係る成果の実用化の担い手は、本事業に参画している自動車メーカー及び蓄電池メーカーである。そのため、NEDOは図4.2-1-1に示すスケジュールに則り、本事業の成果をどのような形で移管していくのかを検討した。

特に2019年度以降は、各企業のキーパーソンが出席する「マネージメント会議」を新設し、要素技術のフルセル適用を中心に、四半期毎の頻度にて議論した。その結果として、各革新型蓄電池の可能性をより正確に把握することができた。それらを踏まえ、「技術戦略」を策定。後継事業において、継続して研究開発する革新型蓄電池を選定した。

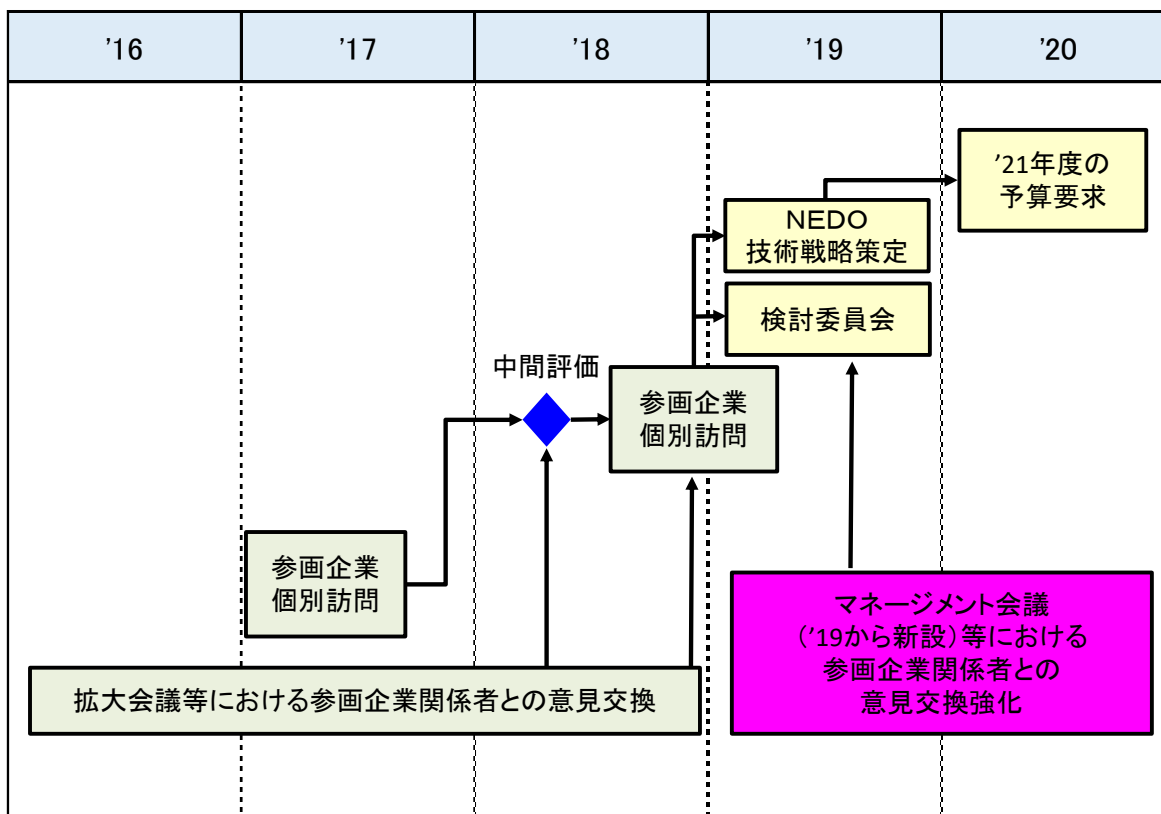


図 4.2-1-1 実用化に向けた検討スケジュール

#### 4. 2-2 高度解析技術の普及・定着に向けた検討の状況

本事業で開発中の解析プラットフォーム（技術・装置）は世界最高・最先端のレベルにあり、革新型蓄電池の実用化を手戻り無く進めるための強力なツールとして、企業及びその企業と連携するアカデミアによる活用が期待できる。

今後は、事業終了後における解析プラットフォームの運用体制、運営（コスト負担を含む）・情報管理のルールについて本事業の関係者で議論を深め、コンセンサスを得た。

概略となるが、図 4.2-2-1 に本事業終了後におけるイメージ図 4.2-2-1 を示す。現状は解析技術の維持・管理・開発を全て公的資金で賄う方式にて進めている。それに対して、本事業終了後は、蓄電池に関わる解析技術の維持・管理・開発を、蓄電池の課題毎に受益者が負担するコンソーシアム方式を検討している。

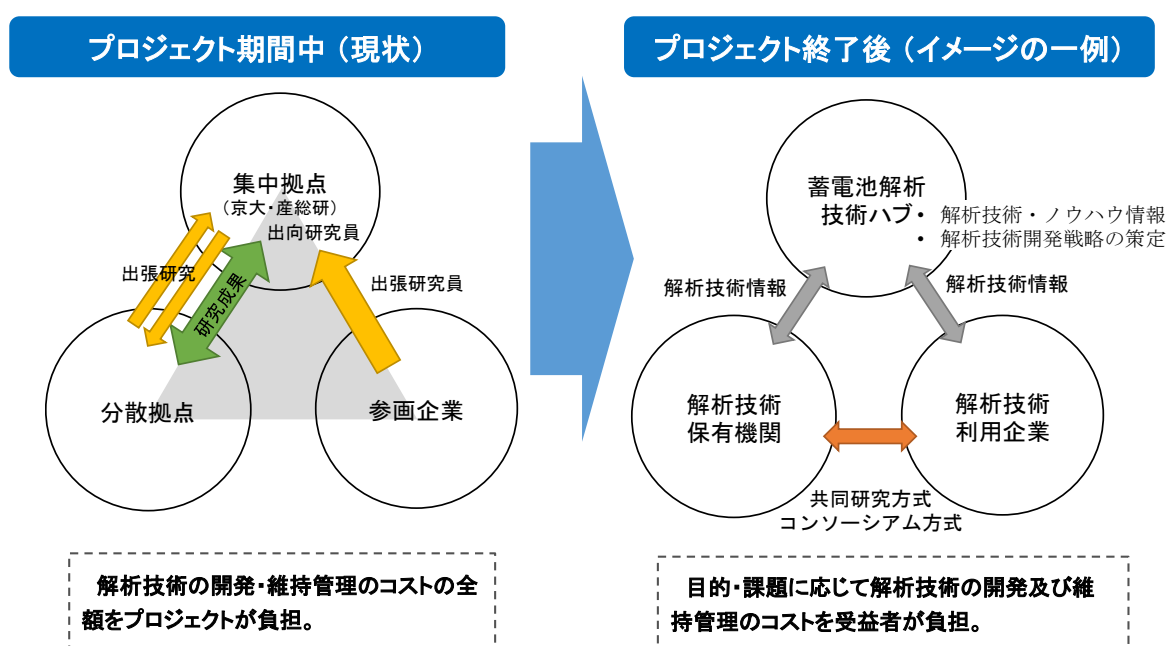


図 4.2-2-1 本事業終了後における解析プラットフォームの活用形態イメージ図

#### 4. 3 成果の実用化の見通し

##### 4. 3-1 アニオン移動型電池の実用化検討

前述したように、後継事業として「電気自動車用革新型蓄電池開発」を立案した。

本事業においては、以下に示す5つの車載バッテリーの基本要件全てについて、現行の液系 LIB を凌駕する革新型蓄電池を搭載した EV・PHEV を我が国自動車メーカーが世界に先駆け、グローバルに市場投入することにより、運輸部門における CO<sub>2</sub> 排出量削減に貢献するとともに、我が国の自動車・蓄電池関連産業の競争力を維持・向上することをねらいとした研究開発を実施する。

- 高エネルギー密度
- 高耐久・長寿命

- 発火リスク無し又は極少
- 構成材料が安価（加えて、原材料調達リスクが無い）
- 製造プロセスがシンプル（加えて、タクトタイムが短い）

本事業の推進にあたっては、先端的な材料科学や高度な解析技術を得意とする大学・公的研究機関、車載バッテリー及びその構成材料の開発・製品化で豊富な実績を有する蓄電池メーカー及び材料メーカー、さらにはエンドユーザーとなる自動車メーカーで構成される産学連携・企業間連携のコンソーシアム体制を構築する。そして、NEDO がこれらプレーヤーの英知を事業内で好循環させるマネージメントを行い、電極・電解質等の材料開発～電池設計～電池試作～評価解析までの共通基盤技術を一気通貫で構築することにより、革新的車載バッテリーの実用化を実現する技術的ブレークスルーを獲得する。

本研究開発の期間は、2021 年度から 2025 年度までの 5 年間とした。

フッ化物電池、亜鉛負極電池のそれぞれについて、下記 (1) ～ (5) に示す研究開発を行う。

#### (1) 高性能・低コストな電極活物質・電解質の開発

資源制約や調達リスクの無い元素を用いて、高容量の電極活物質、高イオン伝導性の電解質を開発する。この際、マテリアルズ・インフォマティクスに基づいた新材料の探索手法も開発する。また、開発した電極活物質及び電解質の性能発現や劣化・不安定化のメカニズムについて、量子ビーム技術等の先端的な計測分析技術や計算科学を活用して解明する。さらに、開発した電極活物質及び電解質を工業的手法で合成するプロセス技術を開発する。

#### (2) 合剤電極構造の開発

上記 (1) で開発した電極活物質及び電解質が高分散し、良好なイオン・電子伝導ネットワークが形成された合剤電極構造を開発する。また、開発した合剤電極構造の性能発現や劣化・不安定化のメカニズムについて、量子ビーム技術等の先端的な計測分析技術や計算科学を活用して解明する。さらに、開発した合剤電極について、スケーラビリティを有した工業的手法で形成するプロセス技術を開発する。

#### (3) セルの設計・試作及び特性評価

上記 (1) 及び (2) で開発した電極活物質、電解質及び合剤電極構造を適用したセルを設計・試作し、充放電性能や耐久性、安全性等の諸特性を評価する。また、試作セルの耐久性評価を通じて、セルの劣化・不安定化のメカニズム及び支配因子を明確化し、耐久性向上の方策を提示する。さらに、簡易な装置・システム構成でセルの劣化・不安定化の状態を把握する技術を開発する。

#### (4) シミュレーション技術の開発

前記 (1) 及び (2) で述べたメカニズム解明の結果及び前記 (3) で述べた試作セルの特性評価の結果等を取り込んで、セルの充放電性能や劣化・不安定化及び熱的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。

#### (5) 総合評価

前記 (1) ～ (4) の開発成果に基づき、本事業終了後の実用化開発を経て実現されるセル及びバッテリーパックの性能・コストを推定し、表-1 に示した実用化目標を達成可能なことを確認する。また、セル及びバッテリーパックの LCA 評価（革新型蓄電池の素材製造段階から使用段階に至るエネルギー消費及び環境負荷の分析・考察）を行う。

#### 4. 3-2 波及効果

##### (1) オープンイノベーションの推進

集中拠点においては、自動車・蓄電池メーカーの出向・出張研究員が競合・売買関係等の垣根を取り払い、協働で研究開発に取り組んだ（図 4.3-2-1）。

特に本事業の特徴として、メーカーからの出向研究員が集中拠点に常駐し、産学連携を更に促進した。また、研究拠点がハブとなることにより、高効率かつ、より統合されたコミュニケーションを可能とした。加えて、前述した 2019 年度からの組織変更により、電池研究者と解析研究者のコミュニケーションが、より活発となり協働が進んだ。

上記する取組により、「科学者（アカデミア）とエンジニア（産業界）の交流」及び「蓄電池研究者と解析研究者の交流」を実現した。

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おり、これまで垂直連携を基本として展開されてきた我が国の蓄電池の研究開発において、オープンイノベーションを推進した。

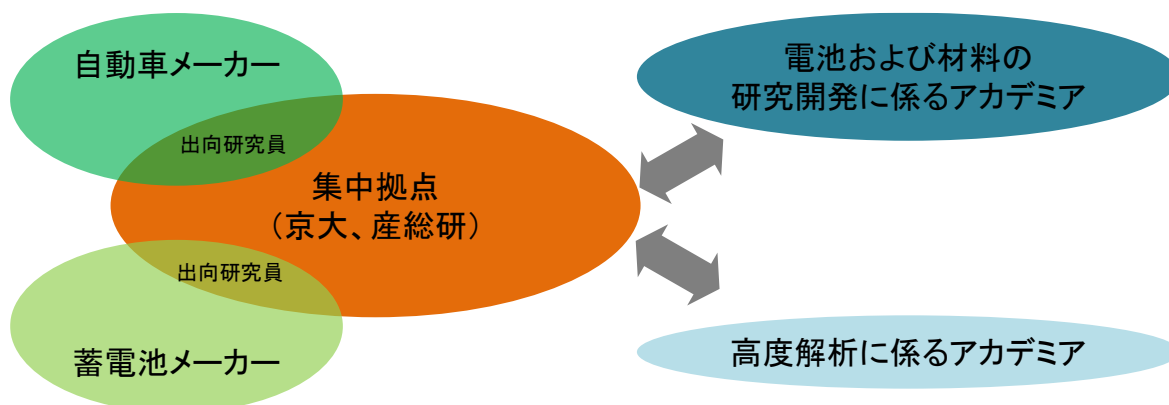


図 4.3-2-1 本事業における参画者の連携

##### (2) 人材育成

本事業では、前述のように「科学者（アカデミア）とエンジニア（産業界）の交流」および「蓄電池研究者と解析技術者の交流」を実現している。これは、本事業を経験した人材は多面的な能力を得られたことに繋がる。例えば、「蓄電池エンジニア」は、本事業を経験することにより、「サイエンスを理解する蓄電池エンジニア」へレベルアップした（図 4.3-2-2）。

このように多面的な能力を得た人材は、本事業の後継事業において引き続き活躍すると期待される。加えて、後継事業には含まれない様々な電池の発展にも貢献することが期待される。

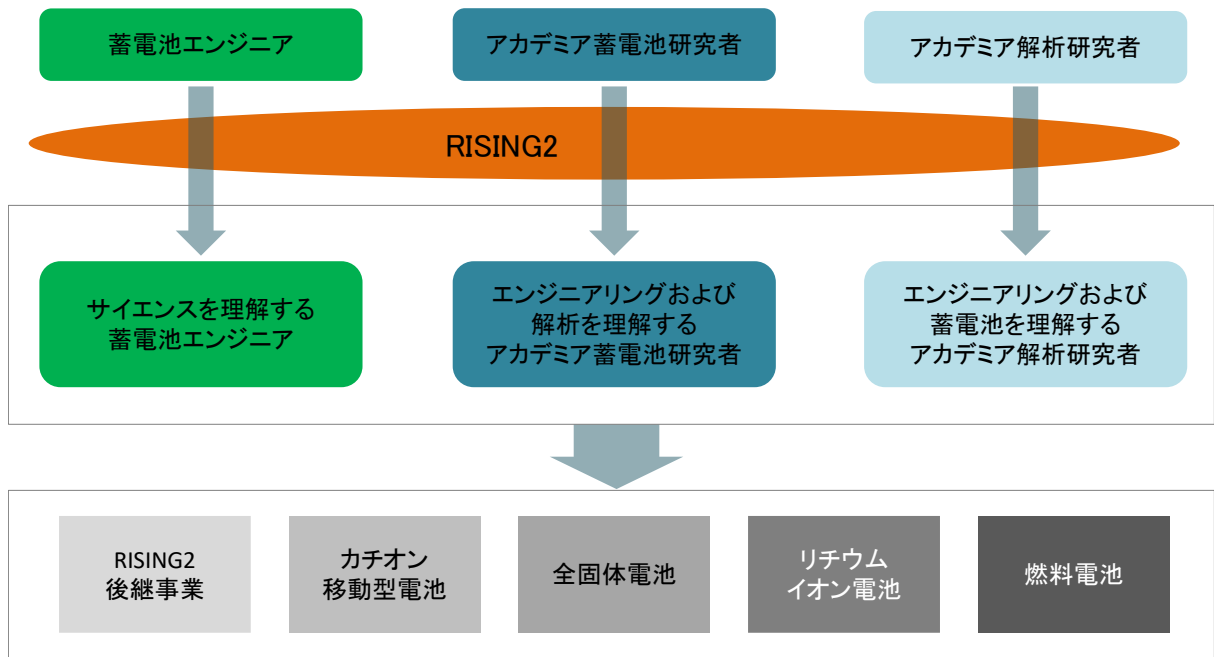


図 4.3-2-2 本事業における人材育成

### (3) 低炭素化社会の構築

地球温暖化防止には、輸送部門の低炭素化と電源の低炭素化をセットで対策する必要がある。

図 4.3-2-3 に輸送部門と電源、それに対する蓄電池関わり関係を示す。具体的には、発電、再エネ（再生エネルギー）、送配電、水素、需要家の関係を示している。再エネ→送配電→需要家（ビル・工場、商店・事務所）へ至る過程では、様々な個所において蓄電池へ一旦エネルギー貯蔵を行うことが重要である（図 4.3-2-3 中 赤矢印）。これにより、効率的なエネルギー運用ひいては低炭素化の実現に貢献することができる。また、EV・PHEV および FCV の車載蓄電池は、車両運用時における低炭素化に大きく貢献する。のみならず、車載蓄電池から系統へ電力供給することにより、効率的なエネルギー運用へ貢献することもできる。

つまり、蓄電池はモビリティの電動化と再生可能エネルギーの主力電源化に向けたキーテクノロジーであり、本プロジェクトで創出される革新型蓄電池は、低炭素なエネルギーネットワークの構築に貢献する。

本プロジェクト参画企業は車載用蓄電池以外の分野でもビジネスを展開しており、本プロジェクト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。



図 4.3-2-3 電源および輸送部門と蓄電池の関係図