

「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発」  
(事後評価)分科会  
資料5-1

# 「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発」

## 事業原簿(公開)

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 スマートコミュニティ部
-----	--



2. 2. 2	高容量・低コスト新規酸化物正極材料の研究開発 (産業技術総合研究所、田中化学研究所)	.2.2.2-1
2. 2. 3	リチウム二次電池の安全性に資するイオン液体電解質の開発 (産業技術総合研究所)	.2.2.3-1
2. 2. 4	高容量電池の研究開発 (日産自動車)	.2.2.4-1
2. 2. 5	高出力・高安全性リチウムイオン電池の開発 (第一工業製薬、関西大学、エルクセル)	.2.2.5-1
2. 2. 6	ポスト鉄オリビン系高性能リチウム二次電池の研究開発 (三菱重工業、九州大学、九州電力)	.2.2.6-1
2. 2. 7	多層構造粒子設計による高出力リチウムイオン電池用正極活物質の研究開発 (戸田工業)	.2.2.7-1
2. 3	要素技術開発 (周辺機器)	
2. 3. 1	レアアースレス電動機に適用可能なセンサレス制御に関する研究開発 (徳島大学)	.2.3.1-1
2. 3. 2	次世代自動車用高性能モータ蓄電パワエレシステムの研究開発 (三菱電機)	.2.3.2-1
2. 3. 3	等価狭ギャップ構造による脱レアアース高性能リラクタンストルク応用モータの研究開発 (大阪府立大学、ダイキン工業)	.2.3.3-1
2. 3. 4	脱レアアースを目指す自動車用モータの研究開発 (名古屋工業大学、東海大学)	.2.3.4-1
2. 3. 5	脱レアアース次世代モータの研究開発 (東京理科大学、北海道大学)	.2.3.5-1
2. 4	次世代技術開発	
2. 4. 1	リチウムイオン液体を用いた安全性と高性能を兼ね備える蓄電システム構築 (横浜国立大学)	.2.4.1-1
2. 4. 2	全固体型リチウム電池における高容量負極の研究開発 (物質・材料研究機構)	.2.4.2-1
2. 4. 3	リチウム空気二次電池用リチウムー固体電解質複合負極の研究開発 (三重大学)	.2.4.3-1
2. 4. 4	エネルギー密度の革新を目指した金属ー空気電池の二次電池化 (京都大学、産業技術総合研究所)	.2.4.4-1
2. 4. 5	ナノ界面制御による高容量電極の研究開発 (産業技術総合研究所)	.2.4.5-1

2. 4. 6	活物質・カーボンナノ複合構造制御による高出力・大容量 Li イオン二次電池の研究開発 (長崎大学、東北大学)	.2.4.6-1
2. 4. 7	電極作製にガスデポジション法を利用したリチウム二次電池の研究開発 (鳥取大学)	.2.4.7-1
2. 4. 8	鋳型法を利用した革新的リチウムイオン電池負極材料の開発研究 (東北大学)	.2.4.8-1
2. 4. 9	構造規制型新規金属負極の研究開発 (首都大学東京)	.2.4.9-1
2. 4. 10	全固体電池のための固体電解質及び三次元メソ構造体電極の研究開発 (東京工業大学)	.2.4.10-1
2. 4. 11	ソフト溶液プロセスを基盤とする高容量電極材料の研究開発 (神戸大学、岩手大学)	.2.4.11-1
2. 4. 12	第一原理計算に基づいた次世代イオン伝導材料設計技術の開発 (京都大学、トヨタ自動車、ファインセラミックスセンター)	.2.4.12-1
2. 4. 13	ホウ素化合物を用いた高性能液体電解質の研究開発 (静岡大学)	.2.4.13-1
2. 4. 14	Li 系金属 空気 2 次電池の性能向上に関する研究 (九州大学)	.2.4.14-1
2. 4. 15	イオン液体電解液を用いたリチウム二次電池の研究開発 (慶應義塾大学、東京理科大学)	.2.4.15-1
2. 4. 16	カーボンフェルト電極マイクロ波放電を利用したマグネシウム二次電池正極活物質の研究開発 (埼玉県産業技術総合センター)	.2.4.16-1
2. 4. 17	液相マイクロ波プロセスによる次世代高容量活物質の研究開発 (産業技術総合研究所)	.2.4.17-1
2. 4. 18	高容量化を目指した多価反応可能な自己組織生成リチウム電池正極材料の研究開発 (名古屋工業大学)	.2.4.18-1
2. 4. 19	シリサイド・ナノ・ハイブリッド負極材料の研究開発 (古河電気工業、古河電池)	.2.4.19-1
2. 4. 20	実験融合マルチレベルコンビナトリアル計算化学にもとづく次世代電池技術開発支援シミュレータの開発と応用 (東北大学未来科学共同研究センター)	.2.4.20-1
2. 4. 21	リチウムイオン 2 次電池の過剰な負荷条件下における電極界面の原子・分子レベル解析技術開発 (東北大学学際科学国際高等研究センター)	.2.4.21-1

2. 4. 2 2	高圧合成法による次世代高容量正極材料酸化物の材料設計 (東京理科大学、産業技術総合研究所)	
	.....	.2.4.22-1
2. 4. 2 3	4d 遷移金属コンバージョン系による高容量正極材料の研究開発 (東京大学)	
	.....	.2.4.23-1
2. 4. 2 4	含フッ素溶媒による高電圧駆動電解液の研究開発 (関西大学、ダイキン工業)	
	.....	.2.4.24-1
2. 5	基盤技術開発	
2. 5. 1	次世代自動車用高性能蓄電池基盤技術の研究開発 (電力中央研究所、産業技術総合研究所、日本自動車研究所、東北大学)	
	.....	.2.5.1-1
<b>IV. 実用化、事業化の見通しについて</b>		
1.	実用化、事業化の見通しについて	- 1
1. 1	要素技術開発 (電池開発)	- 1
1. 2	要素技術開発 (電池構成材料)	- 3
1. 3	要素技術開発 (周辺機器)	- 5
1. 4	次世代技術開発	- 7
1. 5	基盤技術開発	- 9

(添付資料)

- ・イノベーションプログラム基本計画
- ・プロジェクト基本計画
- ・事前評価関連資料
- ・特許論文リスト

概要

最終更新日 2012年10月 4日

プログラム名	エネルギーイノベーションプログラム		
プロジェクト名	次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発	プロジェクト番号	P07001
担当推進部/担当者	<p>スマートコミュニティ部          細井敬（2012年5月～現在）、          松村光家（2011年4月～現在）、          木村英和（2011年6月～現在）、          田中博英（2010年12月～現在）、          丸山陽一（2009年12月～2012年6月）、          都築秀典（2009年3月～2011年2月）、          白神昭（2009年4月～2011年3月）</p>		
0. 事業の概要	<p>我が国では、二酸化炭素総排出量の約2割を占める運輸部門において、低環境負荷で走行することが可能な電気自動車（EV）、プラグインハイブリッド自動車（PHEV）、燃料電池自動車等（FCV）等の次世代自動車の早期普及が期待されており、そのキーとなる蓄電池に対する注目度が高まっている。</p> <p>一方、NEDOでは次世代自動車の早期実用化に資するため、2007年度から5年計画で「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発」を実施し、高性能且つ低コストな二次電池の実現を目指してきた。</p> <p>次世代自動車の実用化のためには、中期的にはPHEVの過酷な使用環境に耐える高性能で安価なリチウムイオン電池が必要であること、長期的にはEV用途として現在のリチウムイオン電池の原理を越える革新的な容量の電池が必要であること、更には次世代自動車の大量導入のためには駆動モーターにおいてレアアース使用量を大幅に削減する技術が必要であること等、中長期にわたり技術開発リスクの高い課題を解決する必要がある。</p> <p>本事業では、PHEV等を目指す高性能リチウムイオン電池の開発、EVを目指す革新的な電池の原理や材料等の開発、並びに周辺機器（モーター等）の開発、基盤技術開発を産官学の総力を結集して実施し、中長期にわたり次世代自動車を円滑に市場に導入する技術的な基盤を確立する。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>(1) 政策上の位置付け          我が国が持続的発展を達成するためには、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及により世界に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組む必要があるが、エネルギー技術開発には長期間と大規模投資を必要とするとともに、将来の不確実性が大きいことから、民間企業が持続的に取り組むことは容易ではない。このため、政府が長期を見据えた技術進展の方向性を示し、官民双方が方向性を共有することで、長期にわたり軸のぶれない取組の実施を可能にすることを旨とし、「エネルギーイノベーションプログラム」が制定されている。          本プロジェクトは、上記した「エネルギーイノベーションプログラム」の一環として実施する。</p> <p>(2) NEDOが関与する意義          本プロジェクトは、HEV、EV、燃料電池自動車等の早期実用化に資するために、高性能かつ低コストな蓄電池及びその周辺機器の開発に取り組むものであり、我が国の自動車産業、蓄電池産業等の海外競争力強化に必須の高リスクな重要技術の研究開発に該当することから、NEDOの関与は適当である。          また、NEDOは高性能・次世代型蓄電池の技術開発プロジェクトを基礎から応用まで様々な形で推進しており、プロジェクト間の連携によりシナジー効果の創出が可能である。</p> <p>(3) 実施の効果          本プロジェクトの実施によって、2015年から2030年にかけて次世代自動車を計画的に開発し導入していく上で必要となる高性能な蓄電池、電池材料、革新的な電池の基礎技術、基盤技術および周辺機器類の技術が確立されることで、多様な次世代自動車が時代の要請に応じてタイムリーに進化しながら市場投入されることが期待できる。          その結果として、2015年以降次世代自動車の市場が立ち上がり、経済効果は蓄電池販売額として1.3兆円、CO<sub>2</sub>削減効果は56万トン/年が期待される（2020年時点）。</p>		

II. 研究開発マネジメントについて

<p>事業の目標</p>	<p>高性能な蓄電システムの要素技術開発、現状のリチウムイオン電池等の技術レベルをブレイクスルーするための新材料等の次世代技術開発、耐久性評価・安全性試験方法の基盤技術開発を実施することにより、2015年において現状の蓄電池性能（注）の概ね1.5倍以上、コスト1/7を可能とする次世代クリーンエネルギー自動車の実用化を促進する。及び2030年を目処に、現状の蓄電池性能の概ね7倍を見通す革新的蓄電池技術への基礎確立を目標とする。</p> <p>（注）現状の蓄電池性能（下記の数値は、容量3kWh程度の電池パックを想定した値）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・電池システム重量エネルギー密度：70Wh/kg</li> <li>・電池システムコスト：20万円/kWh</li> </ul>						
<p>事業の計画内容</p>	<p>主な実施事項</p>	<p>H19fy</p>	<p>H20fy</p>	<p>H21fy</p>	<p>H22fy</p>	<p>H23fy</p>	
<p>(1) 要素技術開発</p>	<p>←</p>					<p>→</p>	
<p>(2) 次世代技術開発</p>	<p>←</p>					<p>→</p>	
<p>(3) 基盤技術開発</p>	<p>←</p>					<p>→</p>	
<p>開発予算 （会計・勘定別に事業費の実績額を記載） （単位：百万円）</p> <p>契約種類 ○をつける （委託（○）、助成（）、共同研究（））</p>	<p>会計・勘定</p>	<p>H19fy</p>	<p>H20fy</p>	<p>H21fy</p>	<p>H22fy</p>	<p>H23fy</p>	<p>総額</p>
<p>一般会計</p>							
<p>特別会計（需給）</p>	<p>1804.5</p>	<p>2742.3</p>	<p>2481.5</p>	<p>2336.8</p>	<p>1795.0</p>	<p>11160.1</p>	
<p>総予算額</p>							
<p>（委託）</p>	<p>1804.5</p>	<p>2742.3</p>	<p>2481.5</p>	<p>2336.8</p>	<p>1795.0</p>	<p>11160.1</p>	
<p>（助成）</p>							
<p>：助成率 2/3</p>							
<p>（共同研究）</p>							
<p>：負担率△/</p>							
<p>開発体制</p>	<p>経産省担当原課</p>	<p>資源エネルギー庁 新エネルギー対策課</p>					
<p>プロジェクトリーダー</p>		<p>－</p>					
<p>助成先（*委託先が管理法人の場合は参加企業数も記載）</p>		<p><b>○要素技術【電池開発】</b> GSユアサ、日立ビークルエナジー、日立製作所、パナソニック</p> <p><b>○要素技術【電池構成材料】</b> 三菱化学、日本合成化学工業、産業技術総合研究所、田中化学研究所、日産自動車、第一工業製薬、関西大学、ILUKEL、三菱重工業、九州大学、九州電力、戸田工業</p> <p><b>○要素技術【周辺機器】</b> 徳島大学、三菱電機、大阪府立大学、ダイキン工業、名古屋工業大学、東海大学、北海道大学、東京理科大学</p> <p><b>○次世代技術開発</b> 横浜国立大学、東京工業大学、物質・材料研究機構、三重大学、京都大学、産業技術総合研究所、長崎大学、東北大学、鳥取大学、首都大学東京、東京大学、神戸大学、岩手大学、トヨタ自動車、ファインテックセンター、静岡大学、九州大学、慶應義塾、東京理科大学、埼玉県産業技術総合センター、名古屋工業大学、古河電気工業、古河電池、東京大学、関西大学、ダイキン工業</p> <p><b>基盤技術開発</b> 電力中央研究所、産業技術総合研究所、日本自動車研究所、東北大学</p>					
<p>情勢変化への対応</p>	<p>自動車用リチウムイオン二次電池の国際標準化・規格化について、ドイツからISOに電池の標準試験方法等の提案が先になされたことを受け、スケジュールを見直し、前倒し実施のための予算配分を行った。</p> <p>優れた成果およびその見通しが得られたテーマについて、委託費の増額により研究開発の加速を図った。</p>						

<p>中間評価結果への対応</p>	<p>総合評価（改善すべき指摘点）：          近い将来の高性能・低コスト HEV 並びに PHEV の実現のためには、コスト低減や安全性確保を進めつつ、電池モジュールレベルの高い目標値を達成できるよう更に努力して欲しい。また、最終目標の達成に向けては、課題と解決の道筋を記述して欲しい。【1】 さらに、コスト低減については、どこまで進み、最終目標値を見通すことができるレベルに到達しているのかが明確になっていない。安全性を含めて産業として十分成立していくことが確信できるようにして欲しい。【2】</p> <p>本プロジェクトの成果は、波及効果が大きく世界に大きな影響を及ぼすと考えられ、是非とも我が国独自の技術として早急に確立して欲しい。</p> <p>対処方針：          【1】 委託先毎にこれまでの課題と解決の道筋を明確化する。          【2】 コスト・安全性の検証については各委託先とも主に H22-23 年度で取り組む計画となっている。また、安全性については「基盤技術開発」の技術委員会で既に検討がなされている。今後とも、コスト・安全性について技術委員会等で引き続き検討を重ねつつ、産業として成立するための技術開発を進めていく。</p> <p>計画等への反映：          【1】 H22 年度の実施計画書へ反映          【2】 H21 年度実施計画書に記載</p>	
<p>評価に関する事項</p>	<p>中間評価</p>	<p>平成 21 年度 中間評価実施</p>
	<p>事後評価</p>	<p>平成 24 年度 事後評価実施予定</p>



Ⅲ. 研究開発成果について

主な開発成果開発項目毎に分けて下記（１）～（６）に示す。

（１）要素技術開発（電池開発）

委託先３者において各々特徴ある正極活物質をベースに、PHEV用の高容量・高出力で且つ長寿命な高性能リチウムイオン電池の要素技術を開発した。成果物として実規模サイズの10Ah級単セルおよびそれを用いた0.3kWh級電池モジュールを試作し、基盤技術開発で策定した共通評価手法に則り目標到達度を評価した。初期性能、寿命、安全性、コストの全ての項目において目標値を達成した。また最終的な3kWh級電池パックの基本設計／モックアップの作成を行い、開発したセル／モジュールのパック化が可能であることを確認した。

（２）要素技術開発（電池構成材料）

委託先７者において一段と高い性能のリチウムイオン電池で必要となる正／負極活物質、電解液を開発し、開発材料を小型電池（ボタン/ラミネート電池、18650電池）で動作させ目標達成度を評価した。

開発した材料は、正極では高容量層状岩塩型活物質等、負極では高容量Si合金系活物質、電解液では高安全性電解液（イオン液体、ヘテロ元素含有溶媒）である。5つの委託先で目標を達成、残る２者においても性能向上がみられ、全体として十分な成果が得られた。

（３）要素技術開発（周辺機器）

脱／省レアアースにつながる車両駆動用モータ技術に焦点を当て、複数の駆動原理の異なる方式（リラクランスモータ、ステッピングモータ、誘導モータ等）に7つのテーマを設定し、最終的に実用規模に近い容量のモータ（10～50kW級）を開発し性能評価した。全ての方式で性能目標値をほぼ達成しており、現状性能を維持しながら脱／省レアアースが可能な事が示された。

（４）次世代技術開発

金属-空気電池系については、水溶液系ではラミネート封入式のセル試作および試験を行い、実用セルとしてのひとつの具体化がなされた。実用化に際しては、反応の可逆性を高める新部材の開発、電池構造の改良等課題は山積しているが、課題の抽出と一部改良部材の提案が示された。リチウム硫黄電池系については、Li-P-S系の新規固体電解質を発見し、この設計指針からさらに高性能な新規の固体電解質の発見にも寄与した。カーボンへの表面修飾による可逆容量向上等の改良指針も示された。多価カチオン電池系については、新規の正極活物質を用いて十分な初期放電容量とある程度のサイクル性能を有していることが確認された。一方で、高電位化と電解液に課題が残るため、材料開発の継続が必要である。新形態リチウムイオン二次電池については、正極、負極、電解液それぞれである程度の新規材料が見出され、材料としてのポテンシャルは示された。実用セルレベルでの評価が今後の課題となる。解析技術については、その場近赤外FTラマン分光法を用いて実電極でのその場観察に成功した。得られた結果と電池反応との対応付けとデータ蓄セルが今後の課題となる。

（５）基盤技術開発

電池の性能評価に関わる共通的な評価手法の開発とその国際標準化を目指した活動を実施した。基本性能、安全性、寿命に関わる評価手法を要素技術開発電池開発担当の電池メーカーの協力の下実施し、電池メーカーが開発した電池の性能に用いる等、目標とする評価技術を確立できた。国際標準化においても、開発した基本性能評価手法、安全性評価手法のIEC規格化を達成し、目標を達成した。

投稿論文	「査読付き」234件、「その他」114件
特許	「国内出願済」258件、「外国出願済」61件、「国内登録」19件、「海外登録」5件
その他外部発表	「講演」1558件、「受賞」52件、「新聞等」146件、「展示会」42件、「国際標準」21件

<p>IV. 実用化の見通しについて</p>	<p>要素技術開発（電池開発）では、本事業の成果の自動車用電源への適用性について確認しており、今後量産化に向けた改良、自動車メーカーとの共同研究等による車載試験、量産仕様開発等を経て市場導入を計画している。（GS ユアサ、日立ピークルエナジー、パナソニック）</p> <p>要素技術開発（電池構成材料）では、開発材料の商品化に向けて材料の更なる性能向上、量産化、電池等メーカーへのサンプル提供／評価を計画している。（三菱化学、田中化学、日産、第一工業製薬、三菱重工）また別途 NEDO においても、2020～2025 年を目標に高性能材料等よりなる先進電池の実用化を目指すプロジェクトを計画中それらの結果として開発成果の実用化が図られる。</p> <p>要素技術開発（周辺機器）では、大学等を中心に脱／省レアアースモータの技術的実現性が実証された段階であり、今後メーカーとの共同研究等により、実用化を目指す計画である。（北海道大学、徳島大学、東京理科大）またメーカーにおいても、建機用モータ、産業用モータ、空調機器用モータで実用化を進めつつ、自動車用途においてもコストや量産技術等の開発を継続し実用化を図る計画である。</p> <p>次世代技術開発では、今後も長期にわたる基礎研究の継続が求められるため、実用化については長期的な視点で見守る必要がある。本次世代技術開発の一部テーマについては、「革新型蓄電池先端科学基礎研究事業」で引き続き研究開発を継続する。また、新形態リチウムイオン二次電池の一部材剤については、電池メーカーとの連携による早期の製品化段階への移行が見込まれる。</p> <p>基盤技術開発では、開発した評価技術をプロジェクト関係者に提供／共通化した。また、国際標準・規格への反映については、開発した電池の基本性能試験法、安全性評価試験方法を日本自動車工業会、電池工業会と共同して IEC/ISO の規格に反映した。今後は車両搭載電池システムへ枠を広げて国際標準化活動を推進する。</p>	
<p>V. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>平成 19 年 3 月制定</p>
	<p>変更履歴</p>	

プロジェクト用語集

用語	説明
AB	アセチレンブラック
Al	アルミニウム。代表的な正極の集電体として利用されている。
BEV	(Battery Electric Vehicle) 電池駆動の電気自動車 (EV)
C	定電流放電したときに、ある時間で放電終了となる電流値。Ex) 1 C…1時間、0.2 C…5時間で放電終了となる電流値。
Cu	銅。代表的な負極の集電体として利用されている。
EPMA	電子線マイクロアナライザー
ESR	電子スピン共鳴法
EV	(Electric Vehicle) 電気輸送機器。狭義では、電気自動車を指す。
HC	ハードカーボン (難黒鉛性炭素)
HEV	(Hybrid Electric Vehicle) ハイブリッド電気自動車。
KMFC	(Kawasaki mesophase fine carbon) (1) リチウムの吸蔵能力が高い、(2) 充放電効率が良い、(3) 充放電レート特性が良い、(4) サイクル特性が良い、などの要求に応える高性能負極材として開発された球状黒鉛。JFE スチールグループ。
LCO	コバルト酸リチウム
LFP	リン酸鉄リチウム $\text{LiFePO}_4$
Li	リチウム
LIB	リチウムイオン電池
$\text{LiCoO}_2$	コバルト酸リチウム
LMO	マンガン酸リチウム、スピネルマンガン酸化物 $\text{LiMn}_2\text{O}_4$
LNO	ニッケル酸リチウム $\text{LiNiO}_2$
METI	経済産業省
NCA	$\text{LiNi}_a\text{Co}_b\text{Al}_c\text{O}_2$ $a=0.8, b=0.15, c=0.05$
NCM	$\text{LiNi}_a\text{Co}_b\text{Mn}_c\text{O}_2$ $a=b=c=1/3$
PHEV	(Plug-in Hybrid Electric Vehicle) 発電機を搭載した電気自動車。電気プラグを直接自動車に差し込んで充電することが可能なハイブリッドカー。
PVdF	ポリフッ化ビニリデン
SEI	(Solid Electrolyte Interphase(又は Interface)) 電解液が分解されたり、支持塩などと反応したりして黒鉛表面に形成される被膜。Li イオン導電性を示す固体電解質で、充放電反応を進行させる。組成は電解液の種類によって異なり、また、数 nm と非常に薄いため、詳細は不明な点も多い。
SEM	走査型電子顕微鏡
SOC	電池の充電状態を表す。満充電時における電池の容量に対して充電残量を比率 (%) で表す。
TEM	透過型電子顕微鏡
XAS	X線吸収分光。X線と物質の相互作用による吸収を利用する分析法の総称。(1) 物質中を通過するX線の強度の減少を利用する方法と、(2) 吸収端法：核外電子を追い出すのに必要な入射X線エネルギーに対応する波長から分析を行う方法がある。
アセチレンブラック	カーボンブラックの一種。アセチレンを熱分解して得る。導電性が高く、電極導電助剤として使用されている。
一次電池	電池反応が完全には可逆的ではないため、充電して反復使用することができない電池。マンガン電池、アルカリマンガン電池、銀-亜鉛電池、ニッケル電池など。

イオン伝導	電場下でイオンをキャリアとして電流が流れる現象。
エネルギー効率	充電電力量に対して取り出し得る放電電力量の割合 (%)。ワットアワー効率。
エネルギー密度	電池から取り出せるエネルギー量の単位体積または単位質量当りの値。前者は (Wh/L)、後者は (Wh/kg) で表す。
エネルギー容量	電池から取り出せるエネルギー量。電圧と電気容量の積であり、(Wh) で表す。
外部充電可能 HEV	プラグインハイブリッド電気自動車
活物質	電極活物質ともいう。化学電池で、その電池の起電反応のもととなる主要物質のこと。リチウムイオン電池では、正極活物質として、コバルト酸リチウム、マンガン酸リチウム、リン酸鉄リチウムなどが、負極活物質として、黒鉛などが使用されている。
吸収係数	電磁波が物質中を進行するとき、吸収により強度が減少する。このときの係数。
吸収端エネルギー	励起に必要とされる最小限のエネルギー。
空隙	粒子間の隙間。電極空隙構造が Li イオンの拡散に影響を与えらる。
クーロン効率	充電電気量に対して取り出し得る放電電気量の割合 (%)。アンペアアワー効率。
駆動用電池	電動車両の駆動に供する電池。
組電池	電池パック。
グラファイト	黒鉛
結着剤	バインダー
合金系負極材料	Si 合金系、Sn 合金系などがあり、黒鉛と比較して理論容量が大きく、環境負荷も小さいことから、重要な負極材料候補である。合金系材料は、リチウムと反応したときの体積変化がかなり大きく、サイクル劣化が激しい。このため、実際の電池の負極として利用する場合には、形状、構造などの工夫が必要である。
合剤	スラリー
高出力用途	室温で 1 時間率以上の放電で出力とエネルギーの比の最大値が 10 以上要求される機器やその特性。
黒鉛	炭素の同位体の一つであり、炭素原子六員環が同一面に連なったグラフェン面が積層した構造となっている。商品化されているリチウムイオン電池の負極材料として使用されている。
五酸化バナジウム	リチウムイオン電池の正極活物質の一種。四角錐の VO <sub>5</sub> 多面体を基本構造として持つ。
コバルト酸リチウム	代表的なリチウムイオン電池の正極活物質。層状岩塩型構造で、[Co O <sub>2</sub> ] <sup>-</sup> 層と [Li] <sup>+</sup> 層が主として静電引力で積層しているものと考えられる。合成が容易であり、種々の電池特性のバランスがよいことから、広く民生用で使用されている。コスト、埋蔵量、環境規制などの問題から、コバルトを使用しない正極材料の開発が求められている。
サイクル特性	一定条件下での充放電サイクル数と容量維持率の関係をプロットした図で表され、エネルギー密度、レート特性と並ぶ重要な電池特性。通常、室温、1 C で充放電を繰り返したときの容量値の推移を見る。二次電池のような充放電をしながら使用するデバイスでは、充放電サイクルを重ねても劣化が少ないことが要求される。
細孔	多孔性物質が持つ微細な孔。孔の大きさによってマイクロポア、メソポア、マクロポアに区別される。
時間率	(充) 放電電流の大きさの指標。定格容量を定められた充放電電流で除して得られる時間で表す。時間率の逆数を放電時には放電率、充電時には充電率という。

質量エネルギー密度	電池の単位質量あたりに取り出せる電力量 (Wh/kg)。重量エネルギー密度。
質量出力 (入力) 密度	電池の単位質量あたりの放電 (充電) 電力 (W/kg)。重量出 (入力) 密度。
充電	蓄電池などの両極に外部電源をつなぎ、放電時よりもやや高めの電圧を印加して電流を通じ、電池に電気エネルギーを蓄えていくこと。
充電状態	電池に充電した電気量の割合。一般には定格容量に対する割合で表す (%)。
集電体	電気を取り出す端子。活物質の保持する役割も果たしている。電子伝導性に優れること、電池内部で安定に存在すること、薄膜化できることなどの特性が要求される。
充電電気量	電池の充電に要した電気量 (Ah)。
充電電力量	電池の充電に要した電力量 (Wh)。
充電特性	充電時の電流、電圧の時間履歴の関係。
充電容量	充電電気量
寿命	電池を有効に使用できる期間。時間長、充放電の総回数などで表す。一般に、容量もしくはは入出力密度が所定の値まで低下した時点をもって寿命と判定される。
寿命特性	電池の寿命に関する特性。以下の2つの劣化モードに大別される。(1) サイクル寿命：充放電時の電気化学的、物理的変化に起因する劣化モード。サイクル特性により評価される。(2) トリクル寿命：電池が継続的に一定の充電状態にさらされていることによる電気化学的変化に起因する劣化モード。温度に大きく影響される。電池容量の経時特性により評価される。
初期容量	電池が最初に持っている放電容量。
人造黒鉛	無定形炭素を 3000 前後で熱処理し、不規則な配列の微小黒鉛結晶の成長と配向を人工的に行わせたもの。予め成型しておけば、適当な形の黒鉛化材料を得ることができる。
スラリー	液体に粒子が混ざり込んだ懸濁体。
正極	電池で、両極を導線で連結した場合、導線に電流が流れ出す極。
セパレータ	正負極電極間の電子的接触を防止しつつイオンを通過させるスペーサー。電池反応を効率よく進めるためには、セパレータの孔径の均一性、空孔率、ガス透過率、電解液との濡れ性などの因子が重要となる。ポリエチレン、ポリプロピレン、あるいはそれらの組み合わせなど、ポリオレフィン系の材料が多く使用されている。
走査型電子顕微鏡	二次元的に走査する加速電子線プローブで固体表面を照射し、各点からの反射電子、二次電子などの種々の信号を情報として検出して試料表面の像を得る顕微鏡。伝導性の低い試料の場合は、電子放出のため試料面が帯電し顕微鏡像を観察できなくなるため、金属などを表面に蒸着して観察する。焦点深度が深く、凹凸の多い表面構造の観察に優れた効果がある。特性X線を利用した元素分析も可能。
走査型プローブ顕微鏡	先端を尖らせた探針 (プローブ) と試料間に作用する物理量を検出し、微小領域の表面形状や物性を測定する顕微鏡。磁気特性や電気特性を観測することができるものも開発されている。高い分解能を持ち、高真空中のみならず大気中や溶液中でも観察が可能。
体積エネルギー密度	電池の単位体積あたりに取り出せる電力量 (Wh/L)。体積の SI 単位は立方デシメートル (dm <sup>3</sup> ) であるが、一般的にリットルで表す。表記は、l (英小文字)、L (英大文字)、ℓ (斜体英小文字) のいずれも可とする。

体積出力（入力）密度	電池の単位体積あたりの放電（充電）電力（W/l）。体積の SI 単位は立方デシメートル（dm <sup>3</sup> ）であるが、一般的にリットルで表す。表記は、l（英小文字）、L（英大文字）、ℓ（斜体英小文字）のいずれも可とする。
単セル	単電池。
単電池	電池を構成する最小単位。
定格電圧	製造業者が公表する完全充電状態の電池を定格放電電流で規定の放電終止電圧まで放電したときの電池の平均放電端子電圧（V）。
定格放電電流	製造業者が公表する定格容量を規定の時間率で決まる時間で規定の放電終止電圧まで放電する電流の大きさ（A）。
定格容量	規定の温度、放電電流及び放電終止電圧などの条件の下で取り出せると製造業者が公表する電気量（Ah）。
電解液	電解質を含んだ溶液で、電極に直接接して用いる。リチウムイオン電池では、極性が大きく溶解力の高いカーボネート系有機溶剤が使用される。
電気自動車	車両駆動動力源として駆動用電池のみを用いる電動車両。
電気自動車用電池	電気自動車に供する駆動用電池
電極	電解質溶液などの系に外部から電流を通すために、あるいはこれらの系から電流を外部に取り出すための導体。
電子伝導	電場下で電子をキャリアとして電流が流れる現象。
電池特性	電池性能に関する特性。レート特性、温度特性、寿命特性などが挙げられる。
電池パック	複数の単電池または電池モジュールと、電池管理システム、ヒューズ、コンダクター等で構成され、容器に収納された、電源として使用可能なエネルギー蓄積システム。
電池モジュール	組電池の構成単位で、複数の単電池で構成される。組電池としての動作に必要な構成部品等を含む。
電動車両	少なくとも 1 種の電気動力を車両駆動に用いる車両。
天然黒鉛	容量が理論容量に近く、低価格で高伝導性を有するなどの特徴から、負極活物質として実用化されている。ハイレートでの充放電が困難であったり、ハイレートでのサイクル特性が不十分であったりすることから、EV などの用途には適さない。
透過型電子顕微鏡	薄片または微小な分散体試料にコンデンサーレンズで集光した電子線を照射し、試料からの散乱波および透過波を対物レンズに導いて像を形成させる。これを後続のレンズ系で拡大し、終段の投影レンズにより像を可視化、撮影する。
動的放電電力量	規定された温度において、実走行状態を模擬した動的な放電プロファイルの、放電電流（電力）及び放電終止電圧などの条件の下で取り出した電力量（Wh）。ただし、放電プロファイルに回生充電が含まれる場合は回生時の充電電力量を差し引く。
動的放電容量	規定された温度において、実走行状態を模擬した動的な放電プロファイルの放電電流（電

	力) 及び放電終止電圧などの条件の下で取り出した電気量 (Ah)。ただし、放電プロフィールに回生充電が含まれる場合は回生時の充電電気量を差し引く。
導電助剤	電子伝導性の確保と反応の均一性のために、電極合剤に添加される。サイクル特性の向上に寄与するとともに、電極中で電解液を保持する役割も果たしている。多くの場合、炭素系材料がよく使用される。
導電ネットワーク	活物質、または活物質・導電助剤と集電体によって形成される電子のパス。
内部ガス	充放電に伴い、電解液が分解して発生するガス。
内部抵抗	電池を放電させるとき、放電反応の進行を妨げる抵抗。
二次電池	充電することにより何度も繰り返して使用できる化学電池。蓄電池ともいう。
ニッケル酸リチウム	リチウムイオン電池の正極活物質の一種。コバルト酸リチウムと同じ層状岩塩型の結晶構造を持つ。コバルトと比較して2価に還元されやすいことから放電容量が不十分であったが、合成法の検討により改良がなされている。
ハードカーボン	リチウムイオン電池の負極活物質の一種。層間に加え、結晶格子間に存在する多数の微細な孔にもリチウムイオンを格納できるため、高容量化が実現されている。
ハイブリッド自動車	車両駆動用に2種類以上の異なる動力源を用いる車両。車両駆動用動力源の例としては、内燃機関、燃料電池等。
ハイブリッド自動車用電池	ハイブリッド電気自動車用電池
ハイブリッド電気自動車	車両駆動動力源として再充電可能エネルギー貯蔵装置と燃料による動力源の両方を用いる車両。
ハイブリッド電気自動車用電池	ハイブリッド電気自動車に供する駆動用電池。
バインダー	活物質同士あるいは活物質と集電体を結着させ、導電ネットワークを形成し構造を維持するために、電極合剤に添加される。塗料特性、柔軟性、電解液への不溶性、電気化学的な安定性など様々な性能が要求される。
負極	電池で、両極を導線で連結した場合、導線に電流が流れ込む極。
プラグインハイブリッド自動車用	外部エネルギー源からの充電を意図された蓄電池を搭載する HEV。
プラグインハイブリッド自動車用電池	プラグインハイブリッド電気自動車用電池。
プラグインハイブリッド電気自動車用電池	プラグインハイブリッド電気自動車に供する駆動用電池。
ベント	セルの爆発や破裂を避けるため、その設計に従い内圧を降下させること。
放射光	電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、磁石によって進行方向を曲げた時に発生する、細く強力な電磁波。高い指向性を有し、光源からフォトン以外を放出しないという特徴を持つ。
放電	蓄積された電荷を失う現象。
放電終止電圧	放電を停止すべき電池の端子電圧 (V)。
放電電気量	電池から放電した電気量 (Ah)。
放電電力量	電池から放電した電力量 (Wh)。電力量の SI 単位は Ws (ワット秒) または J (ジュール) であるが、電池では一般に Wh (ワットアワー) を用いる。
放電容量	放電電気量
ポリフッ化ビニリデン	高耐性、高純度な熱可塑性フッ素重合体の一つ。有機溶剤系バインダー樹脂。正極、負極ともに利用される。

マンガン酸リチウム	リチウムイオン電池の正極活物質の一種。スピネル型の結晶構造を有する。 $MnO_6$ 八面体が連結した比較的強固な三次元的骨格中に、Li イオンのサイトが存在する。マンガン酸リチウムの実用容量はコバルト酸リチウムのそれにやや劣るが、資源的に豊富であることに加え、安全性にも優れている。サイクル特性が十分でなく、実用化の障害となっているが、これは放電状態で $Mn^{3+}$ リッチになると、電解液に多少の溶解性を示すためである。
容量	電池から取り出せる電気量 (Ah)。電荷または電気量の SI 単位は C (クーロン) であるが、電池では一般に Ah (アンペアアワー) を用いる。
容量維持率	標準容量を 100 とし、一定期間電池を保存後、規定した条件で最初に放電した容量比。
容量密度	電池から取り出せる容量の単位体積または単位質量当りの値。前者は (Ah/L)、後者は (Ah/kg) で表す。
リチウム	元素記号 Li。原子量 6.941。銀白色の金属結晶。酸化還元電位が全元素中で最も低く、原子量が小さいことから、電極材料として使用すると、エネルギー密度の大きい電池が作製できる。反応性に富み、水、窒素、ハロゲン等と激しく反応する。
リチウムイオン蓄電池	リチウムイオン電池
リチウムイオン電池	二次電池の一種。リチウムイオン電池の充放電における反応は、リチウム原子が正極・負極、両極の層状物質の層間を往復するだけのシンプルなものである。(1) 起電力が約 4 V と高い、(2) エネルギー密度が高い、(3) レート特性が良い、(4) 温度特性、自己放電特性が良い、(5) メモリ効果が見られない、という特徴を持っている。これらの特徴から、家電、通信機などの幅広い分野で応用されている。今後は、自動車など輸送機器用の電源としての用途が期待されている。
リチウムイオン二次電池	リチウムイオン電池
リン酸鉄リチウム	リチウムイオン電池の正極活物質の一種。オリビンと同じ結晶構造を酸素酸塩のひとつ。リチウムを引き抜いても、四面体と八面体の骨格を残したままリチウムが抜けた構造である $FePO_4$ が生成するので、両者の対象性が変わらず充放電サイクルによる劣化が少ない。電子伝導性は低い安全性に優れ、EV 用途などへの利用が期待されている。
レーザー顕微鏡	対物レンズの焦点位置と共役な位置ピンホールを置き、焦点のあった位置のみの光を検出する顕微鏡。点光源から出射した光は、対物レンズによりサンプルの 1 点に集光するように照射する。光源として特定波長を有し直進性に優れているレーザー光を使用することで、強い光を 1 点に集光させるので、コントラストが向上する。
レート特性	負荷特性、出力特性ともいう。放電容量と動的容量の関係。電池の作動電圧は放電電流の増加とともに低下する。EV 用の電池では、EV の加速性能や登坂性能を左右するので、特に重視される。



## ． 事業の位置づけ・必要性について

### 1． NEDOの関与の必要性・制度への適合性

#### 1. 1 NEDOが関与することの意義

##### (1) 政策上の位置付け

資源に乏しい我が国が将来にわたり持続的発展を達成するためには、革新的なエネルギー技術の開発、導入及び普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいく事が不可欠である。このため、政府が長期を見据えた将来の技術発展の方向性を示し、官民がこの方向性を共有する事で将来の不確実性に対する懸念が緩和され、官民において長期にわたり軸のぶれない取組みの実施が可能となることを目指し、「エネルギーイノベーションプログラム基本計画」が2008年4月に制定された。「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発」（以下、本事業という）は、そのイノベーションプログラムの一環として実施している。

国のエネルギー政策としては、「第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）」において、2030年頃を目処にさらに高性能化・低コストな新しい蓄電池の開発により、クリーンエネルギー自動車の性能向上を図ることを目標に「電力貯蔵技術」が戦略重点科学技術として選定されている。また、「経済成長戦略大綱（2006年7月財政・経済一体改革会議）」においても新世代自動車向け蓄電池は世界をリードする新産業創出の重点技術と位置付けられた。その後、「次世代自動車用電池の将来に向けた提言（新世代自動車の基礎となる次世代電池技術に関する研究会」（経済産業省、2006年8月）、「次世代自動車・燃料イニシアティブ」（経済産業省、2007年5月）を経て、「Cool Earth—エネルギー技術革新技术計画」（経済産業省、2008年3月）において、高性能電力貯蔵は運輸部門及び発電・送電部門の効率向上と低炭素化を進める上で重要な役割を果たす部門横断技術と位置づけられた。図 1.1-1にクールアースエネルギー革新計画に掲げられた21の革新技术を示す。

その後、我が国は2011年3月の東日本大震災を経験し、原発依存度の低減とそれに代わる再生可能エネルギーの導入及び省エネルギーの加速という新たな課題が生じた。それに対応するため政府はエネルギー・環境政策の再設計の検討を進めており、2012年7月に国家戦略室によってグリーン成長戦略がとりまとめられた（「グリーン成長の実現に向けて—グリーン成長戦略パネル中間とりまとめ—」）。その中で、図 1.1-2に示すように、グリーン成長を先導する中核プロジェクトとして、蓄電池、次世代自動車、グリーン部素材の各開発プロジェクトが取り上げられた。これらプロジェクトを横断する中核技術として蓄電池の重要性は変わらず、更に震災後は、緊急時に対応可能なエネルギー源としての重要性も加わっている。それらを踏まえ経済産業省では、2012年1月に省内横断的な「蓄電池戦略プロジェクトチーム」を立上げ、2012年7月に「蓄電池戦略」をとりまとめた。「蓄電池戦略」では、蓄電池の種類、用途、今後拡大が想定される世界市場等を精査した上で、図 1.1-3に示すように、我が国の蓄電池関連企業が目指すべき2020年の市場目標が具体的に設定された。その内容としては、電力系統用の大型蓄電池、産業用～家庭用の定置用蓄電池、車載用蓄電池（鉛、ニッケル水素、リチウム等）で構成される2020年時点での世界総市場規模を20兆円と予測し、その中で我が国の蓄電池関連産業のシェア獲得の目標を5割としている。

以上のように、蓄電池は、エネルギー政策上においても経済政策上においても、継続して重要な分野となっている。

— 重点的に取り組むべきエネルギー革新技術 —

エネルギー源毎に、供給側から需要側に至る流れを俯瞰しつつ、効率の向上と低炭素化の両面から、CO2大幅削減を可能とする「21」技術を選定。



\*EMS: Energy Management System, HEMS: House Energy Management System, BEMS: Building Energy Management System 平成20年3月 経済産業省策定

図 I.1-1 Cool Earth—エネルギー技術革新技術計画

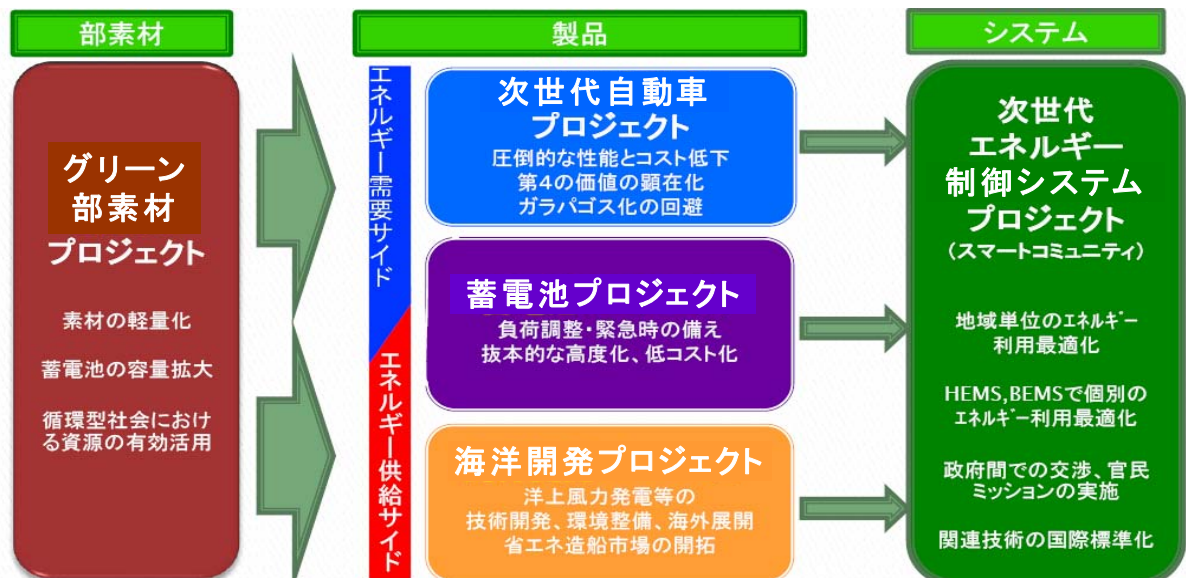


図 I.1-2 グリーン成長を先導する中核プロジェクト

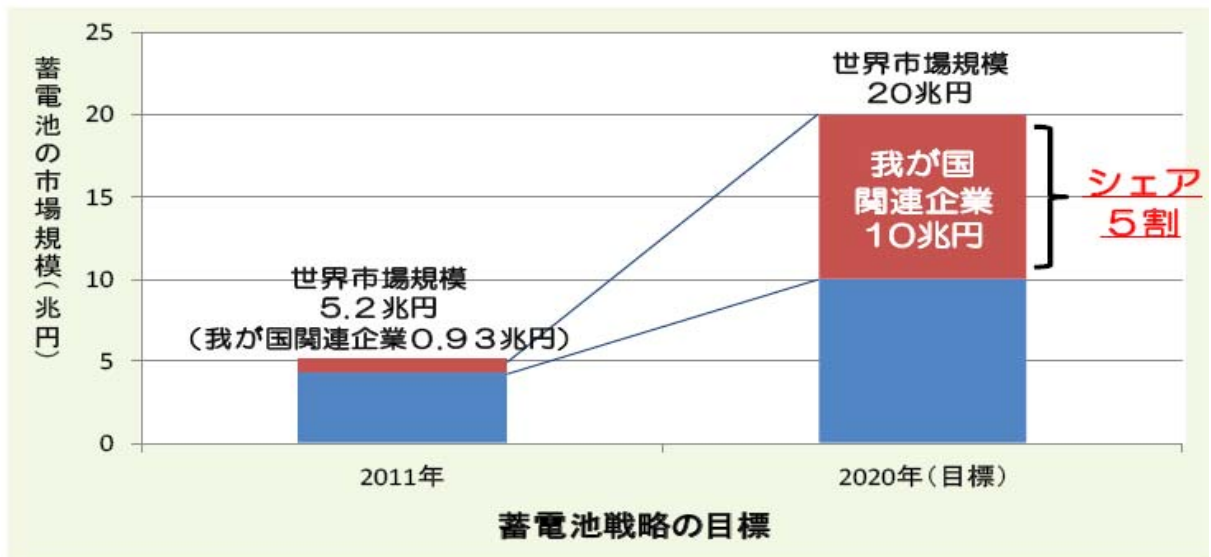


図 I.1-3 蓄電池戦略が想定する蓄電池の世界市場

(2) NEDOの関与の必要性

本事業は、ハイブリッド自動車（HEV）、プラグインハイブリッド自動車（PHEV）、電気自動車（EV）、燃料電池自動車等の早期実用化に資するために、高性能かつ低コストな蓄電池及びその周辺機器の開発に取り組むものである。我が国の自動車産業、蓄電池産業等の海外競争力強化に必須の高リスクな重要技術の研究開発に該当することから、NEDOの関与は適当である。

また、NEDOは、図 I.1-4に示すように、本事業と並行して「革新型蓄電池先端科学基礎研究事業」（平成21～27年度）、「次世代電池材料評価技術開発」（平成22～26年度）、「安全・低コスト大規模蓄電システム技術開発（平成23～27年度）」等、高性能・次世代型蓄電池の技術開発事業を基礎研究から材料開発、応用・実用化開発まで総合的に推進している。事業間の連携によるシナジー効果の創出という視点からも、NEDOの関与は適当である。



図 I.1-4 平成23年度のNEDO蓄電池技術開発事業

なお、本事業で開発したリチウムイオン電池の新材料や革新電池に関わる新材料／電池反応メカニズム等を実用化する上では、電池化を目指した次の開発ステップが必要である。その様な目的で、2020年以降に自動車用蓄電池に求められる高性能を備えた電池を開発する「リチウムイオン電池応用・実用化先端技術開発事業（H24～H28）」の新規公募、革新型蓄電池の実現を目指す「革新型蓄電池先端科学基礎研究事業（H21～H27）」の追加公募を平成24年に実施した。

## 1. 2 実施の効果

### (1) 世界市場

本事業の実施により安価で高性能なリチウム電池及びその周辺機器の開発・実用化が促進され、その結果最大の応用製品と目される次世代自動車（HEV、PHEV、EV）の市場導入が加速される。

次世代自動車の世界市場動向予測を台数ベースで整理したものを図 1-5 に示す。次世代自動車の中ではニッケル水素電池を搭載する HEV が当面の主体であるが、2014年頃よりリチウムイオン電池を搭載する次世代自動車の導入の本格化を見込む。リチウムイオン電池はニッケル水素電池に比べてエネルギー密度や入出力性能が高く、PHEV・EV の主要電源として期待されているが、その特徴により HEV においても小型・軽量化の利点が得られる。現時点では高コストが導入に際しての主たる課題であり、HEV では中大型車クラスへの搭載に適用が限られている。本事業が主要な開発課題とするエネルギー密度の向上、コスト低減、安全性の向上は、次世代自動車へのリチウムイオン電池の搭載を促進するものである。なお、2016年時点での世界の自動車生産台数を 8,300万台と見込んでおり、その中で次世代自動車の割合は 4%になる。

次世代自動車用の二次電池（ニッケル水素電池、リチウムイオン電池）の価格ベースでの市場規模を図 1-6 に示す。PHEV・EV に搭載される蓄電池は HEV に搭載される蓄電池に比べて容量的に一桁程度大きいいため、PHEV・EV の導入が進めば、電池容量や価格ベースでは、PHEV・EV 用蓄電池の占める割合が大きくなる。2016年にはリチウムイオンの市場規模として約 0.9兆円を予測している。

なお、他の調査事例（野村総合研究所資料：電気化学セミナー 2012）によると、世界における次世代自動車市場（HV、PHEV、EV）を 2015年で約 500万台、2020年で約 1,300万台、2020年における自動車用蓄電池市場を約 1.3兆円と見込んでいる。先の調査に比べ数字がやや大きいのが、予測のばらつきの範囲内と考えられる。

以上より、自動車用リチウムイオン電池の 2020年の世界市場は 1兆円前後から最大で 1.3兆円程度と推定できる。なお、民生用のリチウムイオン二次電池の世界市場は、2010年で約 1兆円規模である（株式会社富士経済等）。

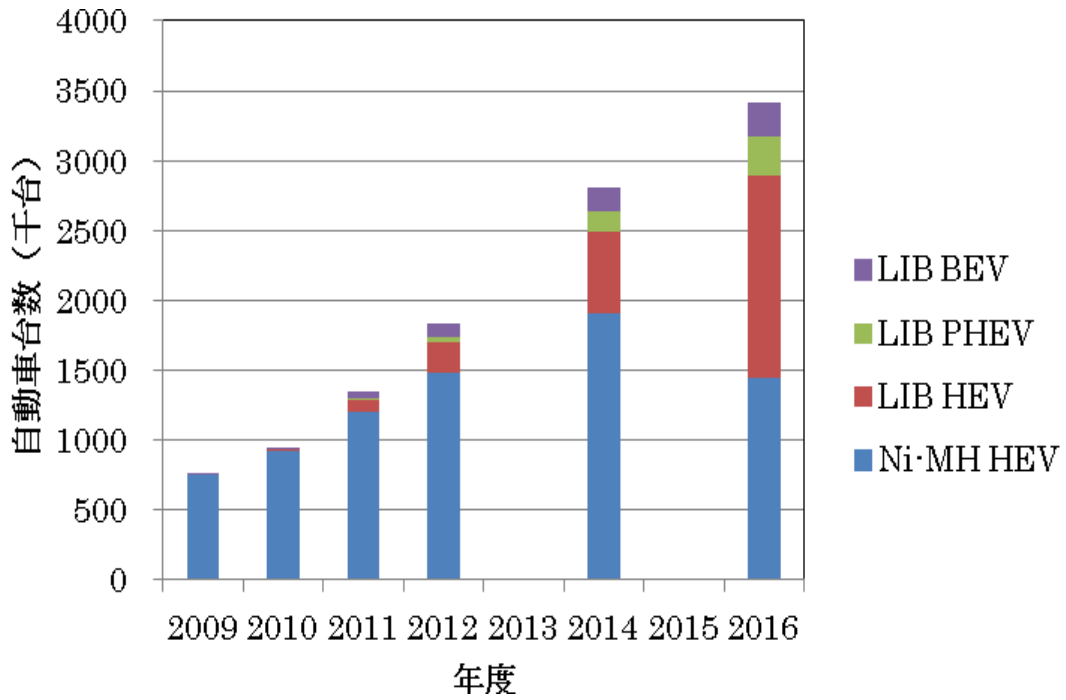


図 I.1-5 次世代自動車の世界市場動向予測 (台数ベース：トラック・バスを除く)  
(エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2011；株式会社富士経済)

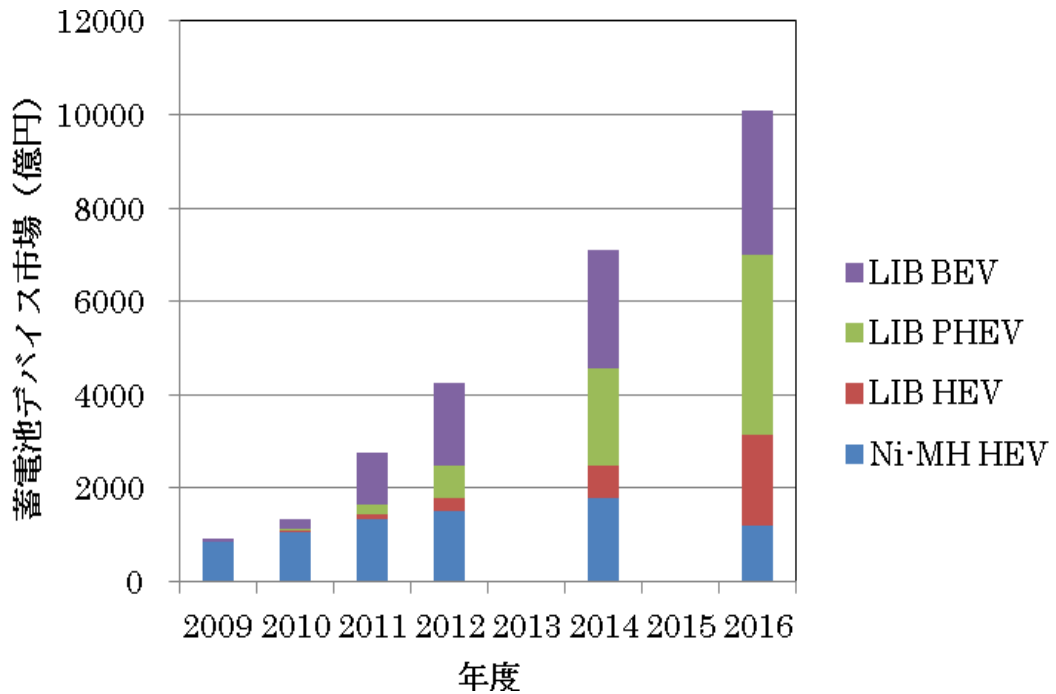


図 I.1-6 次世代自動車用蓄電池の世界市場動向予測 (価格ベース)  
(エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2011；株式会社富士経済)

(2) 日本市場

「次世代自動車戦略 2010」による日本国内での次世代自動車の導入量の見通しは以下の通りである。

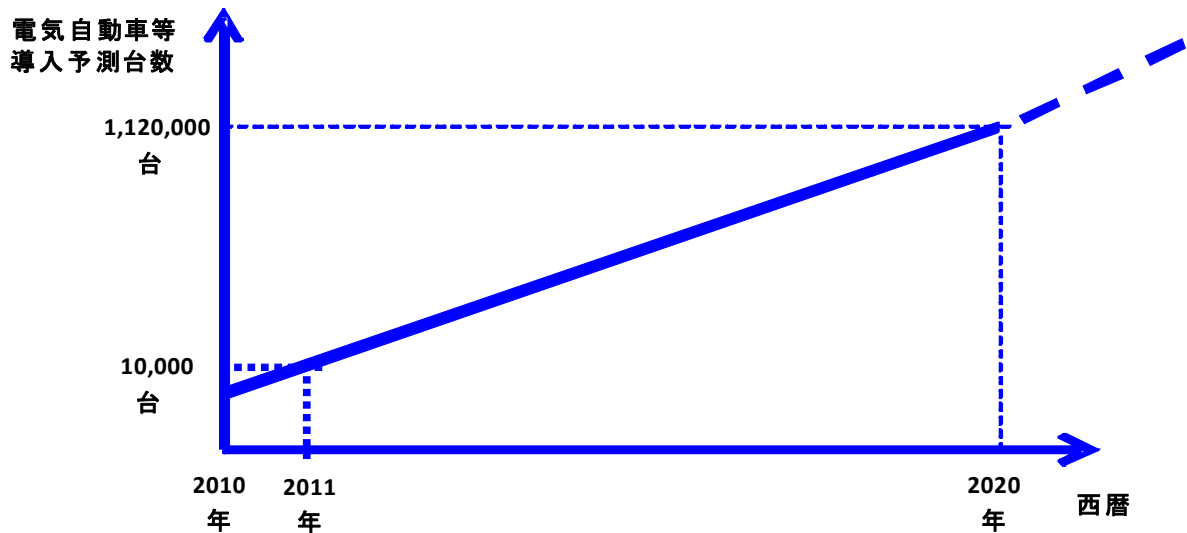
メーカーが今後燃費改善、次世代自動車開発等に最大限の努力を行う「民間努力」のケースでは、2020年のEVの車種別普及見通し（新車販売に占める割合）で5～10%と推定している。一方で、政府が積極的なインセンティブ施策（開発・導入補助、税制、インフラ整備等）を行い導入を加速する場合、「政府目標」として2020年のEV等の導入割合を15～20%に設定している（表 I.1-1）。「世界自動車統計年刊（FOURRIN）」によると2020年の国内の自動車販売台数予測が約560万台であり、それに基づくと同年のEV等の導入台数は民間努力のケースで最大56万台/年、政府目標のケースで最大112万台/年である。

次にCO<sub>2</sub>排出量の削減効果について検討する。

EV1台を導入すると年間で排出量が1.2t-CO<sub>2</sub>/年削減される（2.2-1.0=1.2 t-CO<sub>2</sub>）（表 I.1-2）。民間努力のケースでは2020年にEV等が最大56万台導入され、年間67万tのCO<sub>2</sub>量が削減される。政府目標のケースでは、最大で134万tのCO<sub>2</sub>量が削減される。EV等が導入された単年度のみの削減効果を考えると上記のとおりであるが、同自動車は社会に蓄積されその後も継続して稼働しCO<sub>2</sub>排出量を上積みする。従って、その後10年程度同自動車が稼働する前提では、本導入によりトータルとして10倍程度（670～1340万t-CO<sub>2</sub>/年）のCO<sub>2</sub>削減量が、10年間の中で期待できる。2010年の我が国のCO<sub>2</sub>全排出量が12億5600万トン/年、そのうち運輸部門が2億3200万トン/年であることを考慮すると、これは2010年の運輸部門のCO<sub>2</sub>排出量の約6%に相当する。

表 I.1-1 2020～2030年の乗用車種別普及目標（政府目標）

	2020年	2030年
従来車	80%以上	60～70%
次世代自動車	20%未満	30～40%
ハイブリッド自動車	10～15%	20～30%
電気自動車 プラグイン・ハイブリッド自動車	5～10%	10～20%
燃料電池自動車	僅か	1%
クリーンディーゼル自動車	僅か	～5%



導入予測台数の算出根拠（政府目標ケース）

- ・ 2020年の国内の自動車販売台数予測 約560万台（世界自動車統計年刊（FOURRIN））
- ・ 2020年の電気自動車等の新車販売に占める割合 最大20%
- ・ 2011年の電気自動車の国内販売台数 約1万台（野村総合研究所資料：電気化学セミナー2012）

図 I.1-7 EV等の導入台数予測例（政府目標のケース）

表 .1-2 EV等1台当たりのCO<sub>2</sub>排出削減量

【既存ガソリン車の年間CO<sub>2</sub>排出量】

=年間燃料消費量×CO<sub>2</sub>係数

=年間走行距離÷実燃費（2005年保有燃費×使用形態等の影響による効率）×CO<sub>2</sub>係数

=約9000km÷（13.4km/l×0.7）×2.32kg-CO<sub>2</sub>/l-gas=2.2 t-CO<sub>2</sub>

【電気自動車等の年間CO<sub>2</sub>排出量】

=約9000km÷（13.4×3(1)×0.7）×2.32×1.4(2)=1.0 t-CO<sub>2</sub>

- 1 電気自動車走行時のエネルギー効率をガソリン車の3倍程度と仮定
- 2 電気自動車は走行時CO<sub>2</sub>を排出しないが、使用電力の発電時に排出するため、これを排出量とみなし、一定の電源構成、発電効率等を考慮して補正

## 2. 事業の背景・目的・位置付け

### 2. 1 世界市場における次世代自動車の状況

世界の自動車市場は生産ベースで2010年に約6,700万台/年であり、そのうち半分を超える約4,000万台/年は日、米、欧州による先進国での生産である。このうち、日本の生産台数は約900万台である。残りの約2,700万台のうち約1,600万台/年は新興国である中国での生産であり、中国市場の拡大と共に年々増大し、米国、欧州と肩を並べるレベルである。一方、日本の国内市場規模は2009年に500万台を割り込んでおり、我が国の自動車産業は自国市場に留まることなく、技術的優位性をもとに先進国市場や新興国市場に幅広く製品を供給することで、企業として成長している。

今後については、一層の数的拡大が見込まれる新興国市場では低所得層向けの超低価格車が求められる。一方で環境意識が高い先進国市場では、燃費に優れた次世代自動車が求められる。但し、米国、欧州、日本の各市場において、求められる次世代自動車の種類が異なる。世界の各市場において今後必要とされる自動車像を表 2-1に示す。

超低価格車はこれまでの内燃機関自動車の技術を軽量化、簡素化、生産技術等の視点で一層高めることで得られる。一方で次世代自動車の商品化のためには、電源用の高性能な電池、電動モータ/パワートレイン等、新たな技術開発が必要であるが、複数種類の次世代自動車が存在するため幅広い対応が必要になると共に、開発車種の選定でリスクを伴う。

このように技術的な難易度が高く同時に開発リスクを伴う次世代自動車の開発に関し、政府は、種々のインセンティブ施策（開発・購入補助、税制、インフラ整備等）や前記の表 2-1に示した導入目標を掲げ、メーカーを支援している。

次世代自動車の一つであるHEVの市場の状況は「野村総合研究所資料：電気化学セミナー（2012）」によると、2010年の世界市場でHEVは約80万台/年であり、そのうち日本市場で約40万台/年、北米市場で約30万台/年、欧州市場で約10万台/年である。メーカーについては、国内はもとより北米市場でもトヨタ/プリウスのシェアが50%を越える等、市場とメーカーで共に世界をリードしている。国内に限れば、乗用車市場に占めるHEVの割合は2010年で1割程度で、一定のシェアを得つつある。

表 I.2-1 各市場で想定される今後のニーズ（経済産業省「次世代自動車戦略2010」）

市場	想定される今後のニーズ
新興国市場	第一に、低所得層向けの内燃機関自動車を中心とする超低価格車。 第二に、中流階級向けのポスト超低価格車（低燃費車）。
先進国市場 （米国）	米国市場では航続距離が求められるため、長距離走行が可能なプラグイン・ハイブリッド車のニーズが想定。
先進国市場 （欧州）	環境意識や小型自動車への志向が強い事により、EVが有望。一方で、長距離向けのディーゼル車需要も強い。
先進国市場 （日本）	環境性や燃費に優れた次世代自動自動車。 （EV、PHEV、HEV等）



一方でEVについては、2011年に世界市場で約3万台/年程度、日本市場で約1万台/年程度の市場であり、日本市場における新車の割合では0.4%に留まる。本事業が対象とするリチウムイオン電池を搭載した次世代自動車の商品例を、EV、HEV等を含め表 1.2-2に示す。同表のとおり現状のEVは航続距離が200km未満にとどまり、更にはコスト高や充電器の設置が不十分という課題があり、本格的な普及に至っていない。普及に向けて安価で高容量な電池の開発という本質的な課題が有り、本事業の目標設定の背景となっている。

表 1.2-2 次世代自動車の代表的な事例

種類	メーカー/車名	航続距離	価格	電池容量	電池メーカー
電気自動車	日産/リーフ	200km (JC08)	376万円～	24kWh	オートモーティブ エナジーサプライ
	三菱/アイミーブG	180km (JC08)	380万円～	16kWh	リチウムエナジー ジャパン
	三菱/アイミーブM	120km (JC08)	260万円～	10.5kWh	東芝
	テスラ/モデルS (2012秋から日本販売)	256km～ (55mph)	49900ドル ～	40～ 85kWh	パナソニック
プラグイン・ハイブリッド自動車	トヨタ/プリウスPHV	24.4～ 26.4km	320万円～	4.4kWh	三洋
ハイブリッド自動車	トヨタ/プリウス	—	300万円～	1.0kWh	三洋/プライムアースEVエナジー
	日産/フーガハイブリッド	—	539万円～	1.4kWh	オートモーティブ エナジーサプライ
	ホンダ/シビックハイブリッド (北米販売)	—	—	0.68kWh	ブルーエナジー

## 2. 2 蓄電池分野における国内外の情勢

高性能な蓄電池は次世代自動車用電源に留まらず、次世代型エネルギー利用社会の構築に不可欠なものであり、各国がその開発にしのぎを削っている。蓄電池分野における日本、米国、欧州、中国、韓国の情勢を以下に示す。国際エネルギー機関（IEA）や「気候変動に関する政府間パネル」（IPCC）などで、グローバルなCO<sub>2</sub>削減目標や電動化車両の導入目標の共有化が進みつつあるが、各国・各地域の研究開発、産業、エネルギー事情等に応じて目標の置き方や導入年度が異なっている。総じて日本が先行している。

### （1）日本

2006年8月、経済産業省は「新世代自動車の基礎となる次世代電池技術に関する研究会」において「次世代自動車用電池の将来に向けた提言」を報告書としてまとめた。この報告書では、次世代自動車用電池の性能向上とコストダウンを最重要課題に掲げ、短・中・長期にわけて3つの開発目標とその達成に必要な開発フェーズを設定した（図 2-1 および以下参照）。

改良フェーズ：2010年を目処とする、コストを半減する改良型電池の開発  
（民間主導）

先進フェーズ：2015年を目処とする、性能とコストを大幅に低減する先進型電池の開発（産官学連携）

革新フェーズ：2030年を目処とする、現状のリチウムイオン電池とは異なる新しい原理による革新的な電池の開発（大学・研究機関主導）

改良フェーズは、電池のコストダウンを中心に取組むフェーズで、民間主導で2010年を目処としてコスト半減を目指す。先進フェーズでは、コストのみならず性能（エネルギー密度）を大幅に向上することで、2015年頃のコミューター型EVやPHEVの量産化を目指す。そのためには産業界が行う実用化開発だけでは不十分であり、大学や公的研究機関等を含む産官学連携による基礎研究が必要としている。さらに長期を要する革新フェーズでは、電池のエネルギー密度を2006年当時の7倍とすることで、一回の充電で500kmの航続が可能な本格的なEVの量産を目指す。この実現は現行のリチウムイオン電池では原理的に不可能であり、基礎研究上のブレークスルーに基づく新たな原理の電池開発が必要としている。その開発の主体は大学や公的研究期間であり、且つ長期の粘り強い研究が求められる。

上記の次世代自動車用電池に関する開発目標は、その後の経済産業省による「次世代自動車戦略2010」にも踏襲されている。この戦略は、検討対象をそれまでの電池本体からEV全体に広げたもので、「全体戦略」、「電池戦略」、「資源戦略」、「インフラ整備戦略」、「システム戦略」、「国際標準化戦略」の6つの個別戦略より構成される。その中の一項目である「電池戦略」の中で、「次世代自動車用電池の将来に向けた提言」の内容が引き継がれている。次世代自動車戦略2010の全体像をを図 2-2 に示す。

本事業は上記の 先進フェーズ、 革新フェーズの目標達成に向けて取り組むものであり、次世代自動車戦略2010の中で本事業は、「アクションプラン：産官学連携による技術開発の推進（リチウムイオン蓄電池の性能向上）」として取り上げられている。

	2006年	改良型電池 (2010年)	先進型電池 (2015年)	革新的電池 (2030年)
	電力会社用小型EV	用途限定コンピューターEV 高性能HV	一般コンピューターEV 燃料電池自動車 Plug-in HV自動車	本格的EV
性能	1	1	1.5倍	7倍
コスト	1	1/2倍	1/7倍	1/40倍
開発体制	民主導	民主導	産官学連携	大学・研究機関

次世代自動車用電池の将来に向けた提言(2006年8月)より

図 .2-1 自動車用蓄電池の研究開発目標 (経済産業省、2006年策定)

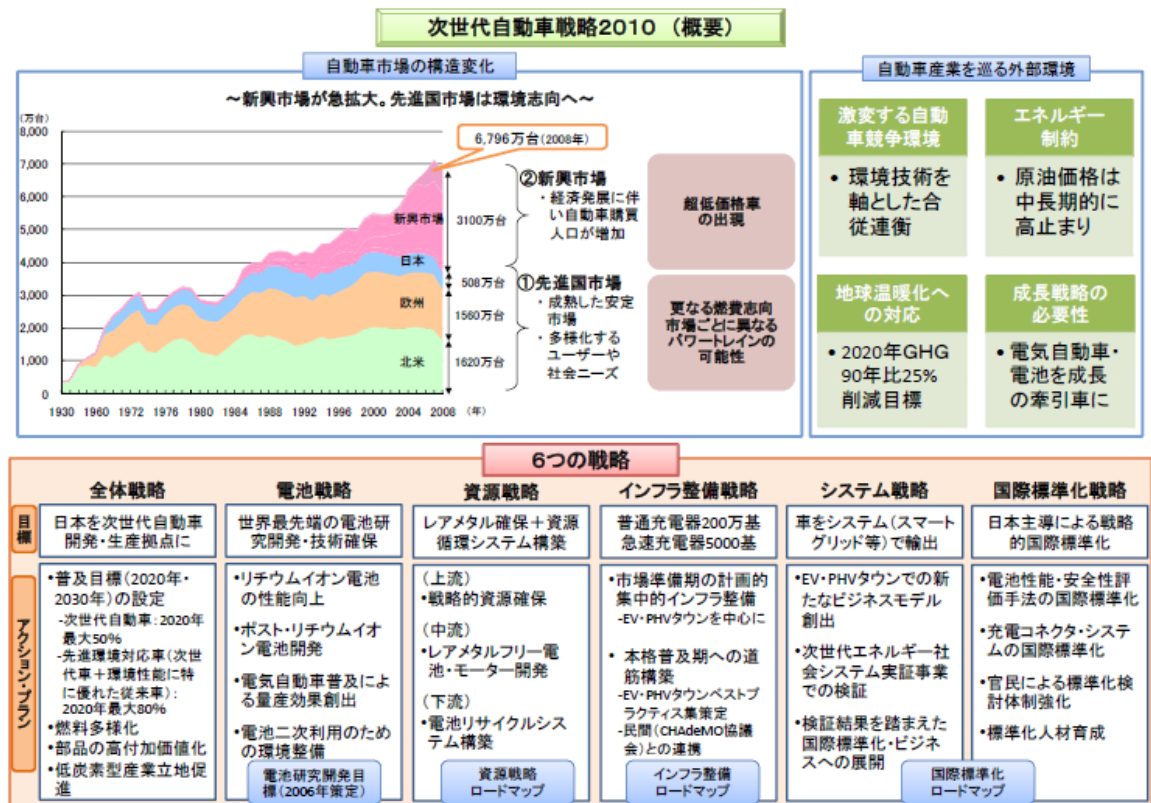


図 .2-2 「次世代自動車戦略 2010」の概要 (経済産業省、2010年4月)

## (2) アメリカ

2009年8月、オバマ大統領は米国再生投資法（ARRA）に基づき、自動車用電池製造及びEV普及促進に関する助成を宣言した。また、2011年1月の一般教書で、米国が2015年迄に世界で最初にEV100万台を走らせ、2035年にはクリーン電力比率を80%とすると宣言した。2010年時点では総額28億ドル規模の計画になっており、先進蓄電池及びEVの製造関連に15億ドル、EVの関連部品5億ドル、充電インフラや推進拠点基盤に4億ドル、先進蓄電池や先進自動車の研究開発には4億ドル相当と、多額な予算が配分されている。

主たる研究開発は、VTP（Vehicle Technologies Program）、ARPA-e（Advanced Research Project Agency-Energy）、BES（Basic Energy Science）の3プログラムで進められている。

### VTP

先進自動車に関連する総合的なプロジェクトで、2～3年の短期的な目標でマネジメントしている。2011年予算3億2,500万ドルのうち、蓄電池と電動機構に1億2,000万ドルが配分されている。蓄電池については、動作条件や車両仕様を細かく設定し目標値を定めている。電動化はHEV・PHEVを想定し、1,200ドル/kWh（2008年）から300ドル/kWh（2014年）と、短期取組では、日本の目標と同レベルの目標になっている。蓄電池の研究開発は、ABR（Applied Battery Research）でエネルギー省（DOE）傘下のアルゴンヌ、ブルックヘブン、ローレンスバークレー、サンディア、アイダホの5つの国立研究所が連携して進めている。

### ARPA-e

エネルギー関連の研究開発を統括したプロジェクトで、輸送用の蓄電池はBEEST（Batteries for Electrical Energy Storage in Transportation）プログラムで進められる。約5,000万ドル/3年間の予算で、LIB（リチウムイオン電池）革新、ポストLIB、キャパシタ等、14プロジェクトを進め、現在、予算を増額して2012年以降の第2期計画を進めている。LIB、ポストLIBの目標については、300～500マイル走行/1充電、ガソリタンクと同容量の蓄電池サイズ、充電時間は15分程度と、将来技術なので現時点では大まかな設定になっている。3年毎の短期更新で、大学、研究機関、ベンチャー系に分散して実施されている。

### BES

全米40余の国立研究所を統括して進めるプロジェクトであり、その統括下、2010年にエネルギー関連の基礎的な研究を担うEnergy Innovation Hubが作られ、その下で「Batteries and Energy Storage Hub」が輸送用蓄電池開発を担当している。2011年予算は初年度分1,000万ドル込みで3,400万ドルとなっている。蓄電池目標はARPA-eと同様であるが、ARPA-eが3年以内で単独機関による研究であるのに対し、BESは研究期間が5年で複数機関による研究と制度が異なっている。

上記の先進的な研究に加え、国内産業振興の観点から先進蓄電池製造関係の15億ドルがPHEV向けへの重点的投資となっている。2011年末までに10kWh級5万ユニット、2015年に10kWh級50万ユニットの製造能力を目標に掲げ、原材料製造とリサイクルに4,000万ドル、蓄電池セル及びパッケージ製造に14億6,000万ドルが、20社

に配分助成されている。

このように米国は、LIB 及びポスト LIB と EV・PHEV の電動機構技術について、基礎技術から事業化支援まで幅広く資源を投入し、支援プログラムを充実している。但し現時点では、豊富な基礎研究開発資源が国内に分散しており、要素としての基礎技術創出は期待できるものの、製品として強みを持つまでの進展には時間を要するものと予想される。事業化基盤と国内市場作りが進むと強力なライバルになりうる。

### (3) 欧州

EU 各国が集う場として ICT4FEV (Information and Communication Technologies for the Full Electric Vehicle) が設置され、EV 開発プログラム EGCI (European Green Cars Initiative) を進めている。EGCI は 2020 年代初めに 1.5 万ユーロ/台の EV 普及を目標に掲げている。予算総額 50 億ユーロのうち研究開発に 10 億ユーロの予算が配分されており、2010 年 11 月時点では約 1 億ユーロが 30 プロジェクトに配分されている。EU 各国協調で、総合的な先進自動車 (E3CAR: Energy Efficient Electrical Car) ドライバ支援システム、路車間の情報通信、充電システム、複合化パワートレーンシステム及び実証試験等を推進している。

EU をリードしているドイツ及びフランスの取組み状況を以下に示す。

#### ドイツ

2020 年までにドイツにおける EV の普及台数を 100 万台にすることを目標に掲げ、経済技術省 (BMWi)、運輸交通省 (BMVBS)、環境省 (BMU)、教育研究省 (BMBF) の 4 省連携で、E-モビリティ国家開発計画を推進している。この計画の目的は、EV の研究、開発、市場準備、市場導入を進めることであり、EV 普及にむけて種々プロジェクトが実施されている。蓄電池に関してはヘルムホルツ電気化学的エネルギー貯蔵技術研究所を中心にカールスルーエ技術研究所、ウルム大学などが共同で研究を実施しており、毎年 450 万ユーロが拠出されている。その他、「技術革新連合-リチウムイオン電池 2015」、「STORM (E-モビリティのための重要技術)」などのプロジェクトにおいても蓄電池の研究が進められている。

#### フランス

2020 年、EV と PHEV 合わせて 200 万台、充電ステーション 400 万ヶ所の目標を掲げ、2008 年～2012 年の 5 年間で予算 2 億ユーロで、ULC-V (Ultra Low Carbon Vehicle) を進めている。2015 年中に充電ステーションの設置完了を目指し、2009 年に予算 15 億ユーロの予算が計上された。

欧州は、日米の取組を迫るようにプログラム作りを進めている。蓄電池についての基礎的な研究では強みを持っているが、現計画は、従来 LIB の延長戦での改良と、改良 LIB を先進自動車に適用するための電動化のためのパワー半導体や電力制御技術への取組み、実証試験等が中心となっている。革新的な LIB やポスト LIB のための基礎技術開発、さらにそれらの蓄電池事業競争力を高めるには時間を要すると予想される。

### (4) 中国

2011 年末に EV と HEV を合わせて 50 万台、2020 年には導入割合 15%の目標を掲げ、ここ数年に 200 億人民元の予算が投入され、自動車電動化の研究開発及びインフ

ラ整備を進めている。2009 年から始めた米国とのクリーンエネルギーの協同プログラムを 1 億 5,000 万ドルに増額し、世界的な連携も強めている。未知数的な部分が多いものの、米国留学した研究者が多数で、論文投稿数も増えており、LIB 生産の世界シェアも 2008 年以降 15%を超え、ここ数年の伸びは著しい。世界一のエネルギー消費国であり自動車市場も急増し、2010 年国内全需は 1,600 万台に達している。中国は電動車、LIB の国内需要で世界最大の事業機会を有しており、今後、産業化と研究開発が加速されると、日本にとって最大の脅威となる。

#### (5) 韓国

2020 年に LIB 生産世界一の産業化に重点をおいた目標を掲げ、産官一体でグローバル展開を進めて急成長している。2009 年には、サムスン SDI と LG 化学の 2 社で LIB の世界シェアで 30%を超え、韓米欧の自動車メーカーとの提携により、電動車向けの事業機会作りを積極的に進めている。さらに、日本企業をキャッチアップするのみならず、グローバルに展開しており、米国企業と合弁で米国に蓄電池製造拠点を設けるなど、事業展開のスピードは速い。なお、電動車、ポスト LIB とともに研究開発力は未知数であるが、現代・起亜自動車グループは自国市場が小さいハンディを乗り越え、世界販売 600 万台規模で世界トップ 5 の目前まで急成長してきた実績がある。サムソン、LG 化学との連合体制を整え、グローバルに産業化主体で進める手強い競争相手である。

上記の各国の状況を整理したものを表 .2-4 及び表 .2-5 に示す。また、民生用小型リチウムイオン電池の世界シェアの状況を表 .2-6 に、車載用リチウムイオン電池の世界シェアの現状を図 .2-3 に示す。民生用電池においては価格競争の中で我が国企業のシェアは 4 割に落ち込んでいる。一方で車載用リチウムイオン電池については日本勢が高いシェアを確保している。背景として、車載用リチウムイオン電池に求められる大型化、安全性、出力/エネルギー密度、コスト面での要求度の高さがある。しかしながら、次世代自動車は現行のエンジン式自動車並みの利便性を得るには、蓄電池の一層のレベルアップが今後必要である。そのための開発競争の中で、現時点では日本の取組みが先んじているものの、世界各国の急速な追い上げが今後予想される。研究開発力では日本、米国、EU がリードしており、潜在ポテンシャルでは中国が 2 番手に位置し、事業化支援への国家的な取組では、日本、米国、中国、韓国がリードしている。また、急成長している大きな市場機会を自国内に持つ中国は、自国の事業機会を基にグローバルにもリーダーとなるポテンシャルがある。今後他国の動向に継続して注意を払う必要がある。

表 2-4 次世代自動車と蓄電池に関する各国の政策

国、地域	取組み状況、目標ガイドライン (CO <sub>2</sub> 削減、次世代自動車、蓄電池)				
	2010	'20	'30	'50	取組み、説明
グローバル			50%削減 新車の30%		IEAのガイドに沿えば、EV、PHEVの世界販売は、2020年800万台、2030年3,200万台となる (EV比率30%)。
日本			新車の50%	全車の50%	次世代自動車、革新型電池を、グリーン成長の中核技術として位置づけ、現時点で世界一の競争力の維持・強化を狙っている。他国に先行して世界トップの目標ガイドを掲げて取り組んでいる。
米国	2015	EV100万台			オバマ大統領就任後、アメリカ復興プランの目玉として、電動化重視が強まり、研究から産業化支援まで、広範に豊富な資源の投入を進めている。
	2014	200Wh/kg、\$300/kWh		長期 ガソリン車並	
欧州	2015	EV100万台			日米の後を追いつつ、EU協同で電動化への取組が強化されつつある。
	2015	175Wh/kg、 245Wh/kg			
		ドイツ EV 100万台 500万台			
		フランス EV 200万台			
中国	2011	EV 50万台			急激な経済成長下、電動化についても、世界の工場を目指して取組み始めている。LIB産業育成、主要25都市でのEV社会試行を進めており、2011年～2015年の国家研究計画でも重点分野として強化される。急成長の自動車国内市場(2010年1,600万台)が強みである。
		新車の20% (全需予想2,000万台)			
韓国			EV 新車10%		蓄電池の産業化政策が主体。素材から製品まで一貫した世界拠点を目指している。
			性能2倍、価格1/5		
			生産シェア 世界一		

表 I.2-5 蓄電池の研究開発と事業化に関する各国の競争力

国、地域	研究開発	事業化	説明
グローバル	—	—	日本の LIB 世界シェアは、2000 年 80% から 2009 年 40%、韓国、中国が急伸長中。
日本	トップ 基礎から応用まで広い	トップ 世界をリードしている	論文、特許、生産で、世界をリードしているが、円高、韓国・中国の追上げもあり、世界市場の拡大機会に向け、目標を早期達成できるように、一層の継続強化が必須。
米国	基礎が強い 応用は弱い	産業化で後手	全米の国研、拠点大学、蓄電池と自動車関連企業に広範に資金を投入しており、元来の優れた基礎研究実績も考えると、革新的な技術創出の可能性あり。手強いライバル
欧州	基礎が強い 応用は弱い	産業化で後手	蓄電池メーカーが少ないので、EU 内の産業振興には時間がかかる。革新技術創出の研究基盤は強い。
中国	基礎から応用まで広く強化中	急速に追上げ中	急増する自国市場向けを背景に、蓄電池、電動車ともに、基礎から製造まで最も手強いライバルになるポテンシャルがある。
韓国	応用重視で強化中	急速に追上げ中	蓄電池、自動車ともに、グローバルに急成長してきた実績あり、手強い。

表 I.2-6 民生用小型リチウムイオン電池の世界シェア

	2000 年度	2005 年度	2010 年度
日本企業	94%	72%	42%
韓国企業	3%	15%	39%
(セル数)	6億セル	18億セル	36億セル

※2011 年(暦年)は日本企業が 39%、韓国企業が 41% (矢野経済研究所推計)

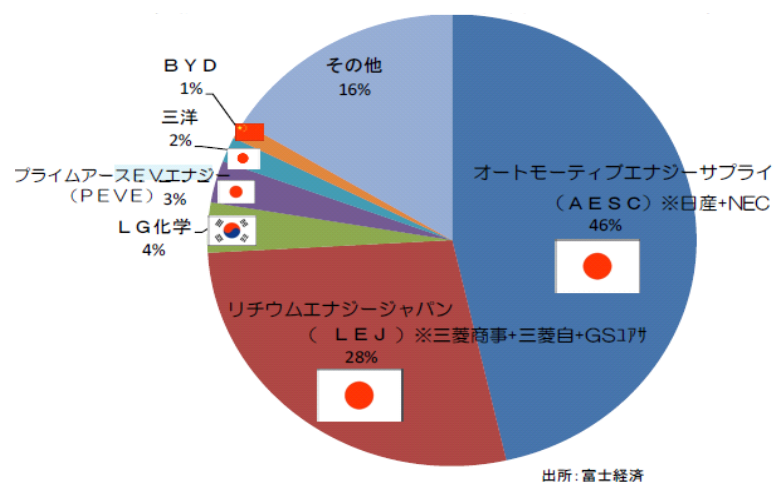


図 I.2-3 車載用リチウムイオン電池の世界シェア (2011年)  
(経済産業省「蓄電池戦略」)



### 2. 3 本事業の背景

本事業は、図 2-1 に掲げた 先進フェーズ、 革新フェーズの目標達成に向けて取り組むものであり、産官学の連携により技術開発を進めている。開発を効率的且つ効果的に推進する上ではステークホルダー間で技術開発シナリオを共有する必要があり、その一環として NEDO は、「NEDO 二次電池技術開発ロードマップ 2010」(Battery RM2010)を策定し情報を共有している。ロードマップは、我が国の蓄電池技術開発で取り組むべき技術課題を明確にして研究開発の方向性を示すと共に、産学の研究開発への取組みを的確に先導するものである。本事業の開発目標の設定においても、ロードマップはその背景をなす。

ロードマップの中で、EV 用途 (タイプ )、HEV/PHEV 用途 (タイプ ) の電池に関わる部分を図 2-4 に示す。図に示すとおりロードマップでは、各タイプの電池 (用途) に求められる電池性能 (エネルギー密度、出力密度)、耐久性 (寿命)、コストの目標を年代毎に設定している。今後の市場拡大が最も期待される車載蓄電池 (タイプ 、 ) について、2006 年当時、2015 年、2030 年頃の重量エネルギー密度、コストの目標を抜き出すと以下の通りである。例えば、2006 年当時から 2015 年、2030 年にかけて EV 用途の電池性能を各々 1.5 倍、7 倍に向上し、電池のコストを 1/7、1/40 に低減する。これらは、先の経済産業省による自動車用電池の開発目標 (図 2-1) に合致するものである。

#### 【EV用途：タイプ】

重量エネルギー密度：	2006年当時 100Wh/kg	2015年 150Wh/kg	2030年 700Wh/kg
コスト	： 2006年当時 100～200円/Wh	2015年 30円/Wh	2030年 5円/Wh

#### 【HEV/PHEV用途：タイプ】

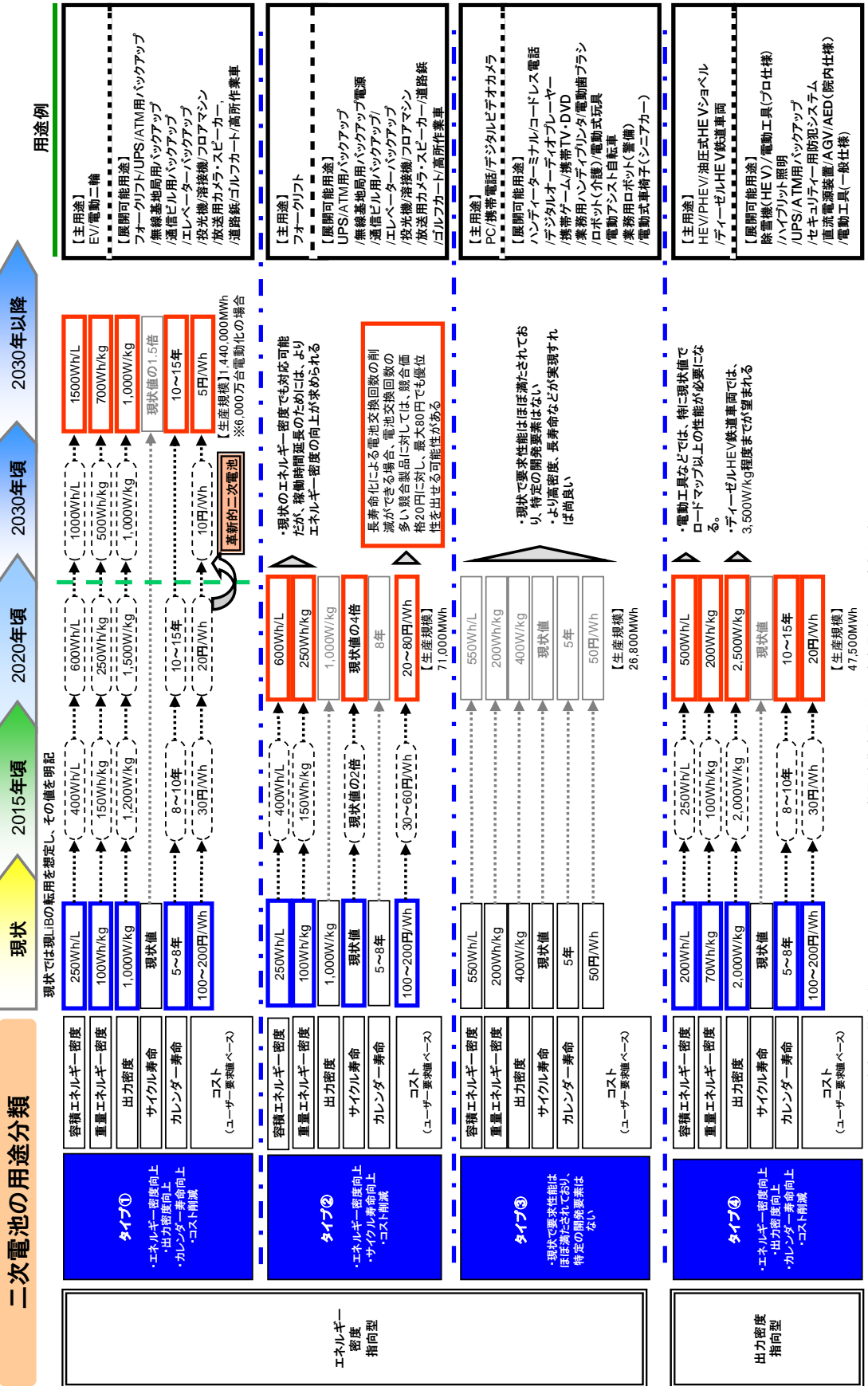
重量エネルギー密度：	2006年当時 70Wh/kg	2015年 100Wh/kg
コスト	： 2006年当時 100～200円/Wh	2020年 30円/Wh

本事業は上記目標設定の中で、2015年目標性能のHEV/PHEV向けの高性能な電池 (タイプ ) と、2030年目標性能のEV向けの革新的な電池技術 (タイプ ) を、並行して開発する。

図 I. 2-4 NEDO 自動車用二次電池技術開発ロードマップ 2010

# NEDO 二次電池技術開発ロードマップ (Battery RM2010)

開発段階の中間的な目標スペック値 より一層の向上が求められるスペック 普及に必要なスペック値(もしくは普及に向けた開発目標値)



## 2. 4 事業の目的・位置付け

前記2. 1及び2. 2で述べたように、我が国の次世代自動車／自動車用蓄電池の技術は現時点において世界をリードしているものの、海外の蓄電池メーカーも国家戦略と連携して技術開発を加速している。また生産面では、現時点では日系蓄電池メーカーの生産量が圧倒的であるものの、アジアや欧米のメーカーが大規模な設備投資を計画していると思われる。一方で電池そのものについては次世代自動車をより魅力的なものにするため、技術開発ロードマップ2010で示すように、今後も大幅な性能向上とコスト低減が求められる。具体的には、HEVをPHEVに進化するため、高出力と高容量を兼ね備えたりリチウムイオン電池が必要である。また、最終目標とされるEVにおいて現状のガソリン自動車並みのコストと走行距離を実現するため、革新的な動作原理や材料に基づく高いレベルの二次電池が必要である。熾烈な国際競争の中で、我が国の電池産業、自動車産業が今後も世界のリーダで有り続けるためには、図 1.2-5に示すように、現状に安住することなく短期から長期にかけて蓄電池・電動自動車に関わる技術や事業の戦略を明確にした上で、緩みなく計画を推進する必要がある。

本事業は、HEV、EV、燃料電池自動車等の早期実用化に資するために、高性能かつ低コストな二次電池及びその周辺機器の開発を行うことを目的とする。図 1.2-6に示す性能向上シナリオに基づいて、2015年頃から2030年以降に至るまで次世代自動車／蓄電池製品の性能やコストを継続的に向上する技術的な基盤を提供する。

- ・ 2015年を目途に高性能リチウムイオン電池の実用化を目指す。
- ・ 2015年以降を目途にリチウムイオン電池の性能を更に向上する構成材料の実用化を目指す。
- ・ 2030年以降を念頭に電池容量が大幅に増大する革新的な二次電池を開発する。
- ・ 格段の高性能化（脱／省レアアース）に資する周辺機器（モータ）の実用化を目指す。

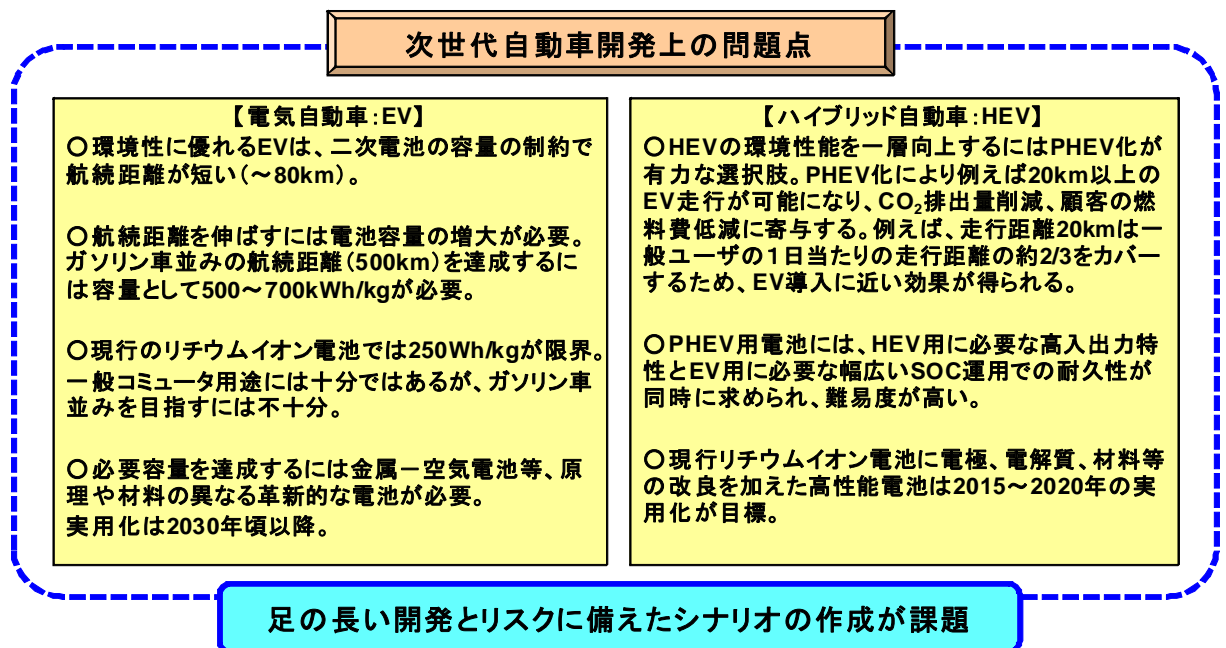


図 1.2-5 次世代自動車開発推進上の課題

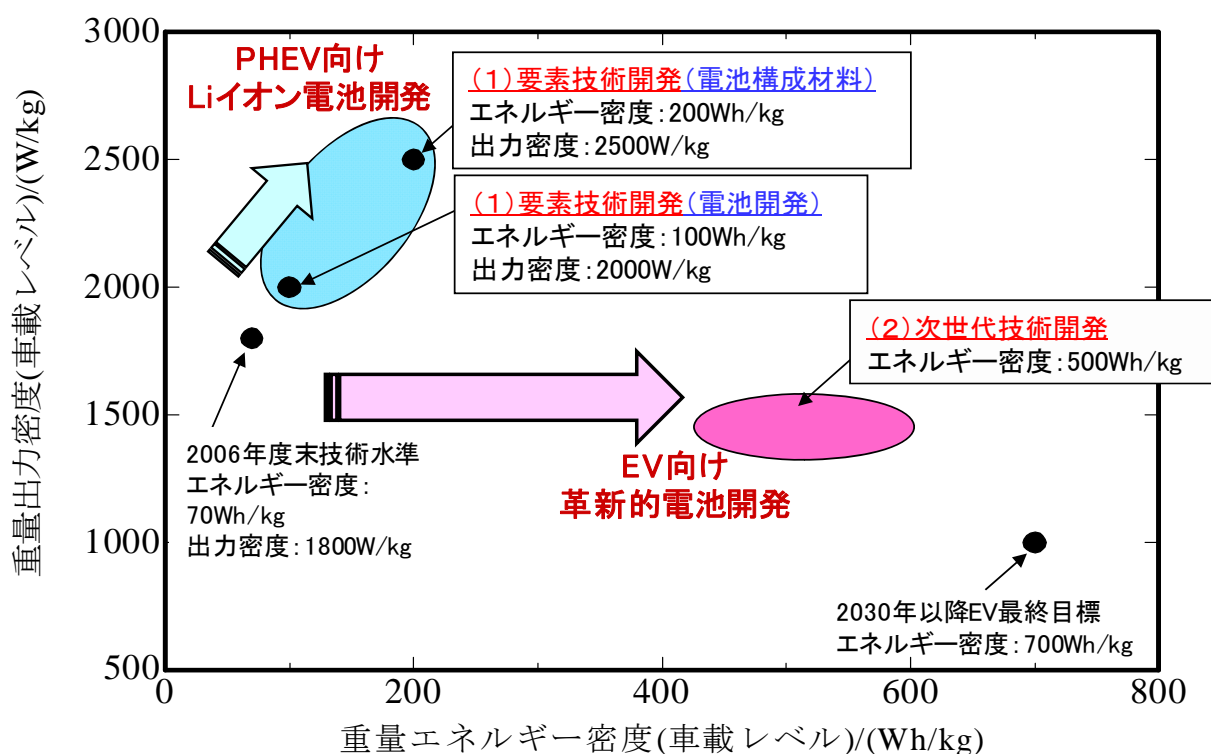


図 1.2-6 次世代自動車自動車向け二次電池の性能向上シナリオ

本事業は運営面では表 1.2-6に示す特徴を有する。体制、目標設定、国際標準化活動への関与の点で、戦略的に計画し実行したプロジェクトと考えている。

表 1.2-6 本事業の運営面の特徴

特徴	内容
関連する主要メーカ、大学等を網羅する開発体制	参画メーカ数 18 参画大学数 21 参画研究機関数 6
課題設定の際の開発領域や実用化時期を戦略的に複数設定	蓄電池の開発ロードマップ等を参考に中／長期の課題を設定。 開発領域：電池、材料、モーター 実用化時期：2015年、2015年以降、2030年以降
開発と同時並行的に、開発成果を自動車用蓄電池の国際標準化活動に活用	日本自動車研究所を中核として、電池評価や現象解析に優れる電中研、産総研、東北大学を加えた共同体で基礎基盤研究を実施。標準化活動に際しては、自動車メーカ、電池メーカ及び有識者よりなる複数の委員会を設け、各所の意見を反映。

## ． 研究開発のマネジメントについて

### 1. 事業の目標

エネルギー消費量の増加が著しい運輸部門における石油依存度はほぼ 100%の状況であり、今後、エネルギーの効率的な利用や石油代替エネルギーへの移行により、石油依存度を低減していく必要性が指摘されている。それゆえ、石油依存度を低減し、多様なエネルギーでかつ低環境負荷で走行することができる PHEV、EV、燃料電池自動車等の次世代クリーンエネルギー自動車の実用化・普及が期待されている。

本事業では、高性能リチウムイオン電池とその構成材料並びに周辺機器（モータ、電池制御装置等）の開発、新規の概念に基づく革新的な電池の構成とそのため材料の開発、電池反応制御技術の開発、加速寿命試験法の開発、劣化要因の解明、電池性能向上因子の抽出、安全性基準・電池試験法基準の策定等を実施し、PHEV、EV 等の早期実用化・普及に資する高性能かつ低コストな二次電池及びその周辺機器を開発することを目的とする。また、本事業の研究開発成果が、次世代クリーンエネルギー自動車の早期実用化・普及に資することはもちろんのこと、多くの波及効果をもたらし、日本がこの分野において今後も国際的に主導的役割を果たすことを目指している。

研究開発項目として、「要素技術開発」、「次世代技術開発」、「基盤技術開発」を設定して、包括的な研究開発を実施することとした。

各研究開発項目の概要を以下に示す。

#### 要素技術開発

蓄電池技術は、EV、PHEV等の次世代クリーンエネルギー自動車に共通するコア技術であり、多様な自動車エネルギー技術の中でも基盤的な性格を持つ。そこで、これらの次世代クリーンエネルギー自動車の早期実用化を促進するために、リチウムイオン電池等の高性能化・低コスト化のための要素技術開発、及び電池制御装置やモータ等の格段の高性能化に資する周辺機器の技術開発を行う。

要素技術開発では、下記3領域に関する開発を行う。

#### (a) 電池開発：

0.3kWh級モジュールを作製し、2015年を目途に目標値の特性を有するリチウムイオン電池の実用化を目指すための電池開発を行う。

#### (b) 電池構成材料及び電池反応制御技術の開発：

小型実用単電池を作製し、2015年以降での実用化を目途に高性能なリチウムイオン電池の構成材料の開発、電池反応制御技術の開発及び基本原理の解明などを行う。

#### (c) 周辺機器開発：

格段の高性能化（高効率化・軽量化・コンパクト化）に資する電池制御やモータ等の周辺機器の技術開発を行う。

#### 次世代技術開発

次世代の蓄電池に要求されるコスト、寿命、安全性、エネルギー密度、出力密度等での飛躍的な性能向上のためには、現状の技術レベルの延長線上にある技術開発だけではなく、新たな電池系の提案や構成材料レベルでのブレークスルーが期待できる新しい原理・構造

の技術開発が不可欠である。そこで、現状レベルでのコストや性能向上の見通しを打破するような新規の正極、負極材料や電解質等、材料レベルの革新的な技術開発等を実施する。

2030年以降において、パック電池レベルで重量エネルギー密度700Wh/kg以上という革新的な性能を実現することを目指して、現状の技術レベルの延長線上にない、経済性や性能面でのブレークスルーが期待できる新規材料（正極、負極、電解質等）や新規電池系（合金系、金属系等）の基礎研究開発を実施する。

#### 基盤技術開発

高性能蓄電池の実用化にあたっては、安全性を確保するとともに標準化を進め、研究開発の効率化を図ることが重要である。よって、蓄電池における寿命予測、耐久性、安全性試験方法の確立や標準化、技術開発の効率化に繋がる電池性能を向上させる因子の解明や反応メカニズムの解析手法の確立等、基盤的な技術開発を行う。

蓄電池における寿命予測、耐久性、安全性試験方法の確立や標準化、技術開発の効率化に繋がる電池性能を向上させる因子の解明や反応メカニズムの解析手法の確立等、基盤的な技術開発を行う。

### 1. 1 事業の最終目標（平成23年度末）

本研究開発においては、高性能な蓄電システムの要素技術開発、現状のリチウムイオン電池等の技術レベルをブレークスルーするための新材料等の次世代技術開発、耐久性評価・安全性試験方法の確立等の基盤技術開発を実施することにより、2015年において現状の蓄電池性能<sup>(注)</sup>の概ね1.5倍以上、コスト1/7を可能とする次世代クリーンエネルギー自動車の実用化を促進すること。また、2030年を目処に、現状の蓄電池性能<sup>(注)</sup>の概ね7倍を見通す革新的蓄電池技術への基礎確立を目標とする。

(注) 現状の蓄電池性能（下記の数値は、容量3kWh程度の電池パックを想定した値）

- ・電池システム重量エネルギー密度：70Wh/kg
- ・電池システムコスト：20万円/kWh

### 1. 2 研究開発項目毎の最終目標（平成23年度末）

本事業の代表的な開発目標値をまとめたものを図 1.1-1 に示す。

個別の研究開発テーマの目標（中間目標及び最終目標）は、実施者が公募時に研究開発テーマとともに提案し、採択決定後に NEDO 技術開発機構と協議のうえ個別に実施計画に定めることとした。

研究開発項目毎の開発目標値について以下で述べる。

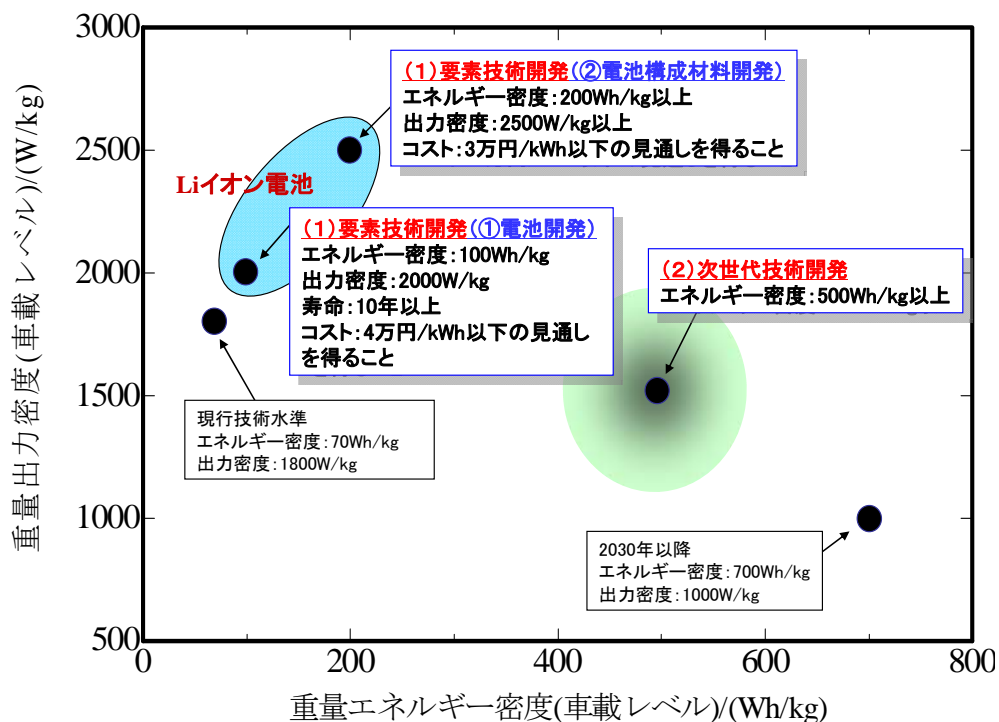


図 .1-1 「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発」の開発目標値

### 要素技術開発

#### (a)電池開発

0.3kWh級モジュールを作製し、以下の目標（性能目標は3kWh級パック電池の換算値）を満足すること。

- ・ 重量エネルギー密度：100Wh/kg
- ・ 重量出力密度：2,000W/kg
- ・ 体積エネルギー密度：120Wh/L
- ・ 体積出力密度：2,400W/L
- ・ 寿命：10年以上
- ・ 充放電効率：95%以上
- ・ コスト：4万円/kWhの見通しを示すこと（100万パック/年生産時）。
- ・ 安全性：車載時の濫用に耐えること。

#### (b)電池構成材料の開発

小型単電池を作製し、以下の目標（性能目標は3kWh級パック電池の換算値）を満足すること。但し、エネルギー密度と出力密度は、少なくともどちらか一方を満足し、他方については見通しを示すこと。なお、下記エネルギー密度及び出力密度のパック値から単電池への換算は、2006年8月経済産業省報告書「次世代自動車用電池の将来に向けた提言」を参照のこと。

<<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g60824b01j.pdf>>

- ・ 重量エネルギー密度：200 Wh/kg以上

- ・重量出力密度：2,500 W/kg以上
- ・コスト：3万円/kWh以下の見通しを示すこと（100万パック/年生産時）
- ・安全性：車載時の濫用に耐えること

#### (c)周辺機器開発

格段の高性能化（高効率化・軽量化・コンパクト化）に資する電池制御やモータ等の周辺機器の技術開発を行う。特に、脱・省レアアースを実現する車両駆動用モータ技術に重点を置くこととし、下記の性能を見通すことができる車両駆動用モータを開発することとした。

- ・総合効率：従来技術と同等程度
- ・出力密度：従来技術と同等程度
- ・レアアース使用量：零

または、

- ・総合効率：従来技術以上
- ・出力密度：従来技術の150%程度
- ・レアアース使用量：従来技術より50%程度以下

ここで、レアアースはネオジム、ジスプロシウム等の希土類元素を意味し、総合効率は自動車の走行条件等を考慮した上でのモータ単体あるいはモータを含めた駆動システムの効率を意味する。また、出力密度は、自動車の走行条件等を考慮した上での瞬時あるいは連続運転時における体積出力密度及び重量出力密度を意味する。

#### 次世代技術開発

2030年頃において、パック電池レベルで重量エネルギー密度700 Wh/kg以上という革新的な性能を実現することを目指し、本事業の終了時点で、重量エネルギー密度500 Wh/kgを見通せる電池構成材料及び電池反応制御技術を開発する。

#### 基盤技術開発

- ・加速寿命診断法の確立。
- ・高SOC保存時、高温保存時、高出力時、長期サイクル時等の劣化要因の解明とその抑制手法の提案。
- ・車載用電池安全性試験法の策定。
- ・電池性能を向上させる因子の解明。



## 2. 事業の計画内容

### 2. 1 研究開発の内容

本事業の実施期間は平成19年度から平成23年度までの5年間、研究開発の総費用は計画額で約110億円の事業である。

研究開発項目毎の運営方法は、基本計画において以下のように定めた。

#### (1) 各技術開発の運営方法

##### 要素技術開発

- ・初年度に公募により実施者を選定するが、2年目以降も必要に応じて公募を行う。
- ・「電池構成材料開発及び電池反応制御技術の開発」については、研究開発の進捗に応じて、「電池開発」の実施者等との連携を求める場合がある。
- ・安全性の技術開発目標については、研究開発項目「基盤技術開発」の安全性試験法や安全性評価基準策定の進捗に応じて、内容の高度化や具体化を求める場合がある。

##### 次世代技術開発

- ・原則として毎年度、研究テーマを公募する。
- ・各研究テーマについては2年目に延長審査（技術評価）を実施し、3年目以降の研究継続の可否を判断する。

##### 基盤技術開発

- ・初年度に公募により実施者を選定するが、必要に応じて2年目以降も公募を行う。
- ・安全性試験法や安全性評価基準の策定については、研究開発項目「要素技術開発」における安全性技術開発の進捗に応じて、内容の変更や修正を求める場合がある。

#### (2) 研究開発スケジュール

基本計画に則り、図 2-1に示すように事業を実施した。要素技術開発に関しては2年目に主にモータ技術開発を中心として追加公募を実施した。また、要素技術開発は基盤技術開発とともに平成21年度に延長審査を行った。次世代技術に関しては、2年目、3年目に追加公募を実施した。一方、平成21年1月に平成19年度から2年間実施した次世代技術開発の各テーマの延長審査を行なった。この結果、11件ある研究開発テーマのうち9件が延長を認められ、2件が終了となった。同様に平成22年2月に平成20年度からの11テーマについて、また、平成23年1月に平成21年度からの10テーマについて延長審査を行い、それぞれ、7件の延長が認められた。なお、延長審査は外部有識者6名からなる延長審査委員会により実施した。

	平成19年度	平成20年度	平成21年度 (中間評価)	平成22年度	平成23年度
①要素技術開発	公募 (12件)	(12件)	(12件)	(9件*)	(9件)
		公募 (6件)	(6件)	(6件)	(6件)
②次世代技術開発	公募 (11件)	(11件)	(9件)	(10件*)	(10件)
		公募 (11件)	(11件)	(7件)	(7件)
			公募 (10件)	(10件)	(7件)
③基盤技術開発	公募 (1件)	(1件)	(1件)	(1件)	(1件)
<b>テーマ数</b>	<b>24</b>	<b>41</b>	<b>49</b>	<b>43</b>	<b>40</b>

\*要素技術開発から次世代技術開発への移行テーマ:1件

図 .2-1 プロジェクトの年度計画 (括弧内は実施テーマ件数)

図 .2-2 に次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発の実施内容 (平成 23 年度) を示す。また、評価については技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義及び将来の産業への波及効果などについて、外部有識者による研究開発の中間評価を平成 21 年度に実施し、事後評価を平成 24 年度に実施することとした。

各開発項目のスケジュールは以下の通りである。

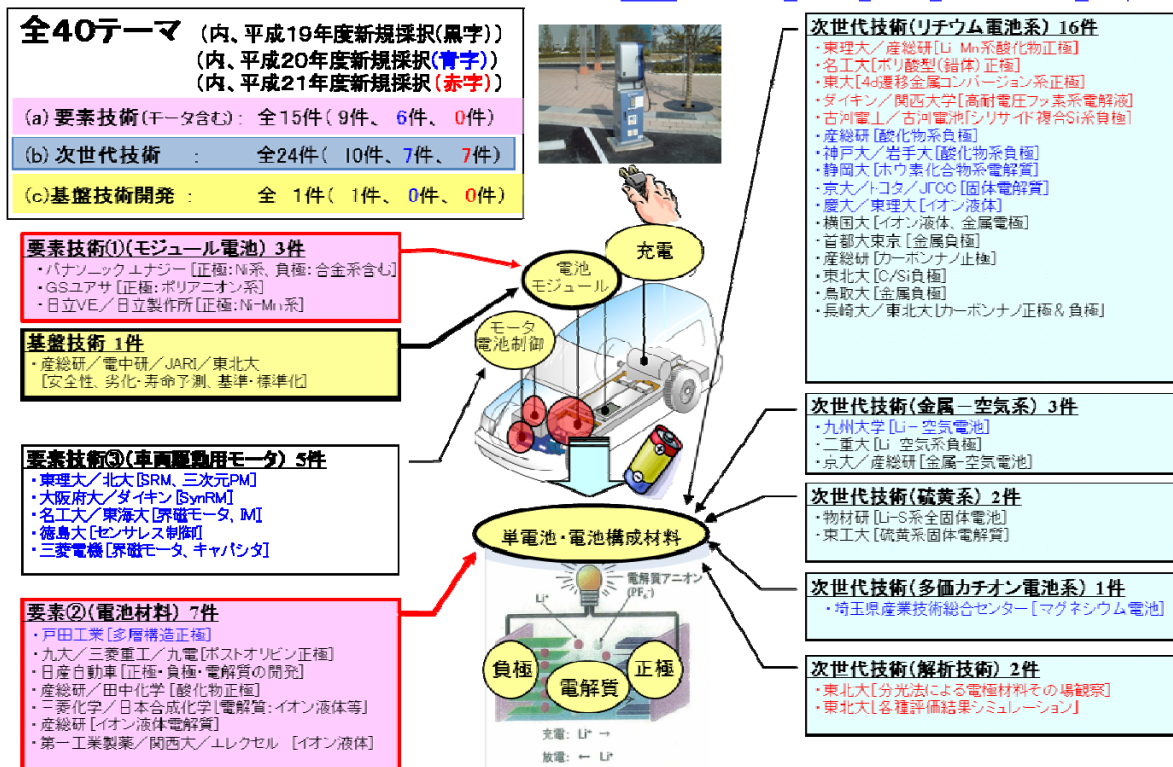


図 .2-2 次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発の実施内容（平成23年度）

要素技術開発

(a)電池開発

平成 21 年度（中間目標）までに、ポリアニオン系、NiMn 系、NiCo 系正極材料の開発と黒鉛系負極材料の改良を行うとともに、10 Ah 級単電池を試作・評価し、性能目標（中間目標）を達成する。さらに、劣化解析による要因の明確化と開発の方向性の検証を行い、入出力特性の改良など温度特性や安全性を含めた評価解析を実施する。平成 23 年度（最終目標）までには、最適な電池システムとしての設計を行い、0.3 kWh 級モジュール電池を試作・評価する。そして、3 kWh 級電池において性能の最終目標を達成する（0.3 kWh 級モジュール電池の性能値を、3 kWh 級電池における性能値への換算には換算係数を適用）。さらに、コスト目標、安全性についても達成する。

(b)電池構成材料開発及び電池反応技術の開発

平成 21 年度（中間目標）までには、リチウムイオン二次電池の電極材料としては、新規の酸化物型正極材料、新規のポリアニオン系正極材料の開発と合成方法の検討、コンビナトリアル法による新規電極材料等の探索、カーボンナノ構造正極の開発等を、電解質については、ポレート系や FSA(FSI)アニオン系のイオン液体電解質、ヘテロ元素含有電解質、不燃性ポリマーゲル電解質の探索、合成と創製等を実施することで、中間目標を達成する。また、反応制御技術開発の一環として、正極材料内でのリチウムイオンの出入りの様子をナノスケールで可視化する電子顕微鏡観察技術等の解析技術開発を実施することで、新規材料開発の目標達成に資する。平成 23 年度（最終目標）までには、開発した材料を用いた小型実用単電池を作製し、性能目標（最終目標）を達成する。

### (c)周辺機器開発

平成 21 年度（中間目標）までに、モータ開発では磁場解析等による磁性材料及び誘導コイルなどの形状及び構造の最適化と新規同期モータ、誘導モータの設計により、軽量化と高性能化等の開発を実施することで中間目標を達成する。また、制御技術開発では必要となる低損失インダクタの開発、コンバータを用いた SOC 均等化回路の開発等を実施するとともに、高効率を実現するため、高周波化に取り組むことで中間目標を達成する。平成 23 年度（最終目標）までには、モータ開発では適切なサイズのモータを試作・性能評価することで、性能目標（最終目標）を達成する。また、制御技術開発では必要に応じて IC を製作し、特性改善を実施することで、性能目標（最終目標）を達成する。

#### 次世代技術開発

平成 23 年度（最終目標）までには、金属-空気電池、リチウム硫黄電池、多価カチオン電池、新形態リチウムイオン二次電池などに代表される次世代の革新的な二次電池の構成とそのための構成材料及び電池反応制御技術等を開発する。最初の 2 年間で、革新的蓄電池の可能性のある電極材料、電解質等の新材料探索、反応メカニズムの解析、デンドライド等の発生及び抑制の検討、界面評価技術の開発等を実施する。残りの期間で開発した材料を用いたコイン型電池等を作製し、電池特性評価を実施することで、性能目標（最終目標）への達成を確認する。また、界面評価技術については 500Wh/kg のエネルギー密度の可能性のある電池系で分析法を適用し、有効性を実証することとする。

#### 基盤技術開発

平成 21 年度（中間目標）までには、リチウムイオン電池の加速寿命試験方法に資する運転パターンの検討、電池開発を行っている 3 委託先から提供を受けた最新電池の劣化要因の解明と抑制方法の検討、電池評価試験方法、電池安全性試験方法の開発、車載用リチウムイオン電池の国際標準化のための ISO/IEC 等への提案、リチウムイオン電池の輸送に関する国際規制の緩和、電池充電標準化に関する検討を実施する。平成 23 年度（最終目標）までには、リチウムイオン電池の加速寿命試験方法に資する運転パターンの策定、電池開発を行っている 3 委託先から提供を受けた最新電池の劣化機構の解明と抑制方法の提案、電池評価試験方法、電池安全性試験方法の策定、車載用リチウムイオン電池の国際標準化のための ISO/IEC 等への提案反映、リチウムイオン電池の輸送に関する国際規制の緩和の実現、電池充電標準化に関する IEC への提案を実施することで、性能目標（最終目標）を達成する。

### (3) 予算

3つの研究開発項目のうち、電池開発から材料開発、モータ開発、制御回路開発まで幅広く改良、開発を行なう要素技術開発については、試作や試験等に多くの費用が必要となるため、それらが円滑に実施できるよう、他テーマに比べて特に多くの予算を配分した。特に、電池開発においては、大型化技術の開発に重点を置く案件に予算を重点配分した。次世代技術開発については、原則としてテーマ毎に1年間で2000万円を上限として予算を割り当てた。また、基盤技術開発については、調査や各種性能・分析・安全性試験、国際標準化活動に必要な費用を配分した。表 2-1に技術開発項目毎の研究予算を示す。

表 .2-1 研究予算一覧

(単位：百万円)

		H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	総額
要素 技術 開発	電池開発	520.1	524.2	523.5	516.1	349.6	2433.5
	電池構成材料開発	638.2	718.9	507.5	496.5	368.1	2729.2
	周辺機器開発	39.8	366.9	347.8	276.1	221.7	1252.3
次世代技術開発		219.9	439.2	568.4	511.2	468.6	2209.1
基盤技術開発		386.6	693.9	537.9	521.0	363.0	2502.4
計		1804.5	2742.3	2481.5	2336.8	1795.0	11160.1

## 2. 2 研究開発の実施体制

本プロジェクトの実施体制としてはNEDO、委託先及び技術委員会から構成され、それぞれの役割は以下の通りである。

### NEDO

プロジェクトを推進し、目標達成に向けて研究開発全体のマネジメントを行なう。

### 委託先

本プロジェクトでは、3テーマ合計で62の実施者が委託先または再委託先として研究開発を実施している（平成23年度2月）。

### 技術委員会

外部有識者で構成され、第3者の立場で研究開発の方向性や技術的内容について審議を行う。なお、詳細については後述する。

図 .2-3 に平成 23 年度の事業推進体制を示す。

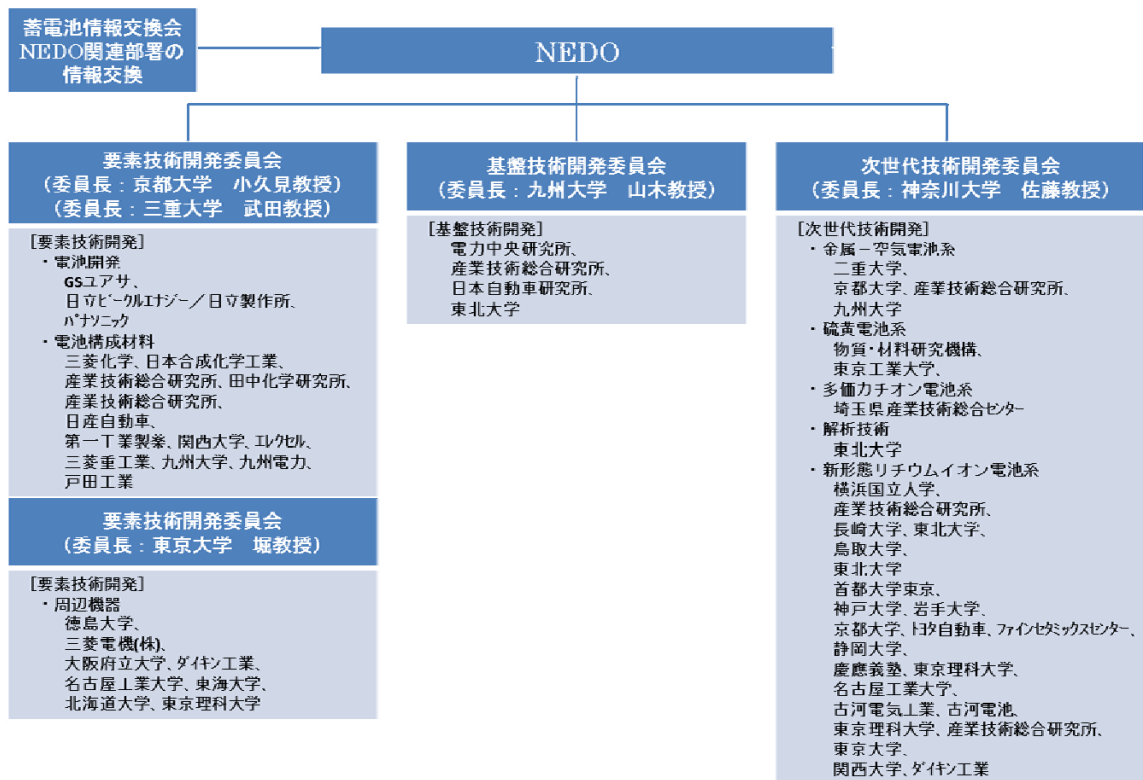


図 .2-3 事業推進体制（平成23年度）

要素技術開発（電池開発、電池構成材料、周辺機器）及び次世代技術開発については、委託先は目標達成に向けて競争的に研究開発を実施した。一方、要素技術開発（電池開発）と基盤技術開発は連携・協調して研究開発を実施した。即ち、要素技術開発（電池開発）参画企業が開発した電池等を基盤技術開発の委託先に提供し、評価技術開発並びにISO/IEC等での国際標準策定に貢献することとした。同時に、基盤技術開発の委託先が要素技術（電池開発）参画企業に評価結果等をフィードバックすることで研究開発の加速化に貢献することとした。

図 .2-4に要素技術開発と基盤技術開発の連携を示す。

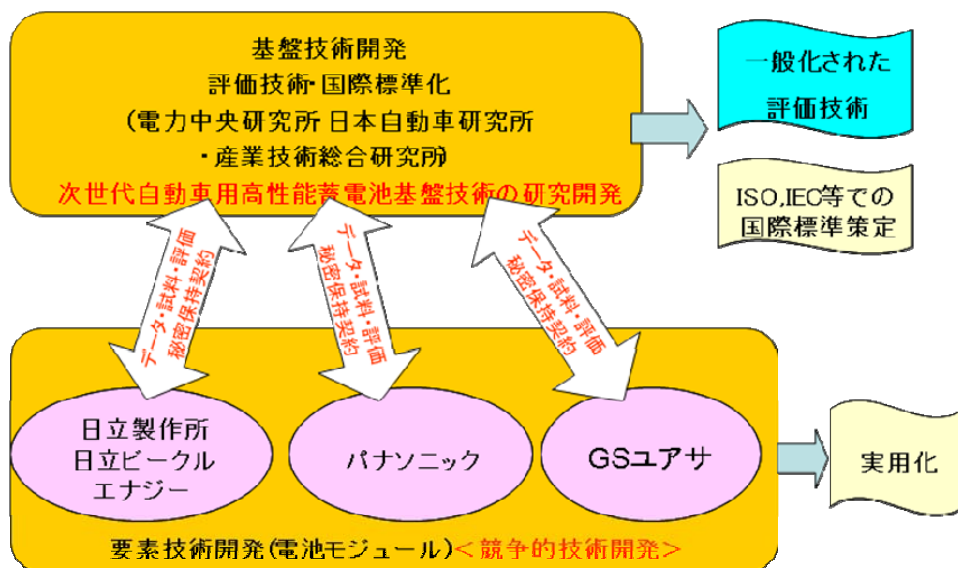


図 .2-4 要素技術開発（電池開発）と基盤技術開発の連携

## 2. 3 研究開発の運営管理

### (1) 技術委員会の開催

外部有識者を技術委員に委嘱して、第三者の立場で研究開発の方向性や技術的内容について審議・助言する技術委員会を設置した。要素技術委員会（電池モジュール開発・電池構成材料の開発）には京都大学の小久見教授（～平成21年度まで）、三重大学の武田教授（平成22年度～）を、要素技術委員会（周辺機器開発）には東京大学の堀教授を、次世代技術委員会には神奈川大学の佐藤教授を、基盤技術委員会には九州大学の山木教授を委員長として委嘱した。平成19～23年度にわたって、4つに分けたグループ毎で年1～2回の頻度で、それぞれの委託先が参加して開催した。また、基盤技術委員会については、プロジェクト全体に係わる評価技術等の共通的な課題を取り扱うため、全ての委託先に公開して実施することで情報の共有化を図った。

表 2-2～8に各委員会の開催日程並びに委員名簿を示す。

表Ⅱ.2-2 要素技術委員会（電池開発、電池構成材料、周辺機器）の開催実績

開催日	委員会名称
平成20年 4月 9日	平成20年度第1回要素技術委員会 (H19年度採択:電池構成材料・電池制御)
平成21年 4月 9日	平成21年度第1回要素技術委員会 (H20年度採択:周辺機器+H19年度採択:電池制御)
平成21年 4月 17日	平成21年度第2回要素技術委員会 (H19年度採択:電池構成材料)
平成21年10月15日	平成21年度第3回要素技術委員会 (周辺機器+電池制御)
平成21年10月30日	平成21年度第4回要素技術委員会 (電池開発、電池構成材料)
平成22年12月2日	平成22年度第1回要素技術委員会 (電池開発、電池構成材料)
平成23年5月20日	平成23年度第1回要素技術委員会 (電池開発、電池構成材料)
平成23年5月26日	平成23年度第2回要素技術委員会 (周辺機器)
平成23年12月16日	平成23年度第3回要素技術委員会 (電池開発、電池構成材料)

表Ⅱ.2-3 要素技術委員会(電池開発、電池構成材料)の委員名簿

	氏名	所属、役職
委員長	小久見 善八	京都大学 産学連携部門 特任教授 (平成21年度まで)
	武田 保雄	三重大学 工学部 教授 (平成22年度から)
委員	藤波 達雄	静岡大学 工学部 特任教授
	櫻井 庸司	豊橋技術科学大学 電気・電子工学系 教授
	神戸 良隆	トヨタ自動車(株) 車両技術本部第HV材料技術部 グループ長
	戸島 和夫	トヨタ自動車(株) HV材料技術部 シニアスタッフエンジニア
	三森 正仁	(株)ホンダ技術研究所 四輪開発センター 主任研究員
	木内 健雄	(株)ホンダ技術研究所 四輪R&Dセンター 主任研究員
	寺田 信之	電力中央研究所 材料科学研究所材料物性創製領域リーダー

表Ⅱ.2-4 要素技術委員会(周辺機器)の委員名簿

	氏名	所属、役職
委員長	堀 洋一	東京大学 生産技術研究所 教授
委員	小黒 龍一	九州工業大学 情報工学部 システム創成情報工学科 教授
	水谷 良治	トヨタ自動車(株) パワートレーン本部 HV先行開発部 シニアスタッフエンジニア
	米倉 光一郎	日産自動車(株) 総合研究所 電動駆動研究所 主任研究員
	渋谷 祐一	日産自動車(株) 総合研究所 EVシステム研究所 主任研究員
	山本 恵一	(株)本田技術研究所 四輪R&Dセンター 第5技術開発室 第1ブロック 主任研究員



表Ⅱ.2-5 次世代技術委員会の開催実績

開催日	委員会名
平成20年 1月11日	平成19年度第1回次世代技術委員会 (H19年度採択:硫黄系)
平成20年 2月28日	平成19年度第2回次世代技術委員会 (H19年度採択:空気系、リチウム系)
平成20年 9月30日	平成20年度第1回次世代技術委員会 (H19年度採択:硫黄系、空気系、リチウム系)
平成21年 3月16日	平成20年度第2回次世代技術委員会 (H20年度採択:空気系、多価カチオン系、リチウム系)
平成21年9月29日	平成21年度第1回次世代技術委員会 (空気系、多価カチオン系、リチウム系)
平成22年5月25日	平成22年度第1回次世代技術委員会 (平成21年度採択:リチウム系)
平成22年11月19日	平成22年度第2回次世代技術委員会 (平成19年度採択:空気系、硫黄系、リチウム系)
平成23年8月24日	平成23年度第1回次世代技術委員会 (空気系、硫黄系、多価カチオン、リチウム系、解析技術)
平成23年9月1日	平成23年度第2回次世代技術委員会 (リチウム系)

表Ⅱ.2-6 次世代技術委員会の委員名簿

	氏名	所属、役職
委員長	佐藤 祐一	(国)神奈川大学 工学部 工学部長・教授
委員	漆畑 広明	(国)東京工業大学 工学部 教授
	稲葉 稔	(学)同志社大学 工学部 教授
	宇恵 誠	三菱化学(株) イノベーションセンター フェロー
	宮本 丈司	(社)日本自動車工業会 EV 副部長(日産自動車)
	堀江 英明	日産自動車(株) EVエネルギー開発部 エキスパートリーダー
	堀場 達雄	日立ビークルエナジー(株) 主管技師
	村田 利雄	(株)GSユアサ 部長
	奥山 良一	(株)GSユアサ 部長
	湯浅 浩次	パナソニック(株)エナジー社 グループマネージャー

表Ⅱ.2-7 基盤技術委員会の開催実績

開催日	委員会名
平成20年 3月19日	平成19年度第1回基盤技術委員会
平成20年12月17日	平成20年度第1回基盤技術委員会
平成21年 6月24日	平成21年度第1回基盤技術委員会
平成22年9月30日	平成22年度第1回基盤技術委員会
平成23年10月26日	平成23年度第1回基盤技術委員会

表Ⅱ.2-8 基盤技術委員会の委員名簿

	氏名	所属、役職
委員長	山木 準一	(国)九州大学 先導物質化学研究所 教授
委員	鳶島 真一	(国)群馬大学 大学院工学研究科 教授
	成澤 和幸	(独)交通安全環境研究所 環境研究領域 上席研究員
	三根 浩二	電気事業連合会 技術開発部 副部長
	西 正貴	電気事業連合会 技術開発部 副部長
	宮本 丈司	(社)日本自動車工業会 EV 副部会長(日産自動車)
	菅原 浩	(社)日本自動車工業会 EV 副部会長
	森本 佳成	(社)電池工業会 二次電池技術担当部長
	村田 利雄	(株)GSユアサ 部長
	奥山 良一	(株)GSユアサ 部長
	堀場 達雄	日立ビークルエナジー(株) 主管技師
	井上 利弘	パナソニック(株)エナジー社 チームリーダー
	荻野 桂治	パナソニック(株)エナジー社 チームリーダー
	米津 育郎	三洋電機(株) モバイルエナジーカンパニー 統括部長
	内海 和明	オートモーティブエナジーサプライ(株) エグゼクティブ チーフエンジニア

## (2) 延長審査の実施

平成21年1月、次世代技術開発におけるステージゲートとして、平成19年度から2年間実施した研究開発テーマについて延長審査を行なった。この結果、11件ある研究開発テーマのうち9件が延長を認められ、2件が終了となった。

延長審査は外部有識者によるものとし、学識者2名、電池メーカーの専門家2名、自動車メーカーの専門家2名の合計6名を審査委員として委嘱した。委託先より表 2-9 に示す内容の「事前書面審査書類用評価資料」を提出してもらい、審査委員による事前書面審査を実施後、延長審査員委員会で委託先のヒヤリングを行い、事前書面審査の結果の見直しを行った。

表 2-10 に次世代技術開発延長審査における審査基準及び審査のポイントを示す。次世代技術開発の観点から成果の目標達成も重要な項目ではあるが、達成した目標の国際水準から見た優位性等、今後の研究計画の新規性・技術的優位性にも重きを置いた。また、延長に当たっては、審査委員の4名以上が3点以上かつ6人の平均点が3点以上であることを基準とした。

表 .2-9 次世代技術開発延長審査の評価用資料の構成

文書構成：	
A.平成19～20年度 の研究成果	(1) 本研究開発の目標（設定理由含む）および達成度 (2) 研究開発成果（得られた知見等） ・上記目標値、得られた知見は世界的に見てどの程度の水準にあるか？ ・得られた成果、知見は新規性、革新性のある成果であるか？
B.平成21～23年度 の研究開発計画	(1) 研究開発の目標 平成21年度目標 平成22年度目標 平成23年度最終目標 (2) 研究計画および研究内容の新規性、技術的優位性 研究内容（課題、課題解決のアプローチ） －a 平成21年度研究内容 －b 平成22年度研究内容 －c 平成23年度研究内容 研究内容の新規性、技術的優位性 研究体制（参考資料のフォームを活用）
*原則として、研究体制はH19年度採択時と同じとする。 *予算は2,000万円/年以下とする。	

表 .2-10 次世代技術開発延長審査における審査基準及び審査のポイント

			審査のポイント	重み付け
平成19年～20年度の 研究成果	A-(1)	研究開発の目標 【目標の達成度】	成果は目標を達成しているか？	2.0
	A-(2)	研究開発成果 【成果のレベル】	達成した目標、得られた知見は国際水準から見て優れた成果と言えるか？	1.5
得られた成果、知見は新規性、革新性のある成果と認められるか？			1.5	
平成21年～23年度の 研究計画	B-(1)	研究開発目標 【目標設定の妥当性】	最終目標に向け、年度目標は適切なレベルに設定されているか？	1.0
	B-(2)	研究計画および 研究内容の 新規性、技術的優位性 【目標設定の妥当性】	課題解決に向けた効果的なアプローチが示されているか？	2.0

※評点は1～5点(0.5点刻みでも可)  
※6名の総合評価点の平均が3点以上 かつ 4名が3点以上のテーマが延長候補。

同様に、平成 20 年度からの 11 テーマについての延長審査を平成 22 年 2 月に実施し、平成 21 年度からの 10 テーマについての延長審査を平成 23 年 1 月に実施し、それぞれ、7 件の延長が認められた。

要素技術開発及び基盤技術開発の各テーマについては、平成 21 年度に延長審査を実施して後年度の研究延長の可否を判定した。この結果、要素技術開発では、平成 19 年度からの 12 テーマ中、2 テーマが不採択、1 テーマが次世代技術開発に移行し、9 テーマの延長が認められた。

### (3) 成果の普及

委託先の成果については、積極的に特許出願、論文発表、講演発表及び広報等で普及を図ることとした。表 2-11 に平成 24 年度 7 月末時点での外部発表の実績を示す。なお、特許及び論文リストは巻末の添付資料を参照のこと。

表 2-11 外部発表の実績

項目	要素技術開発			次世代技術開発	基盤技術開発	総計
	電池開発	電池構成材料	周辺機器			
特許出願	94	129	53	41	2	319
うち、外国出願	10	31	7	13	0	61
国内登録	9	2	2	6	0	19
海外登録	1	0	1	3	0	5
論文	11	94	29	172	42	348
うち、査読付論文	4	49	8	154	19	234
研究発表・講演	46	360	128	848	176	1558
受賞実績	0	16	9	25	2	52
新聞・雑誌	1	41	22	78	4	146
展示会	12	9	8	13	0	42
国際標準	0	0	0	0	21	21

#### (4) 情報の共有化

委託先間の情報の共有化、さらには、外部への情報発信を図るため、研究計画発表会、研究成果報告会、電池討論会でのNEDO共催シンポジウム、海外調査報告会の開催等を実施した。

##### 基盤技術委員会の開催

プロジェクト全体に係わる評価技術等の共通的な課題について取り扱う基盤技術委員会は、全ての委託先に公開して実施することで情報の共通化を図った。

##### 研究成果報告会・研究計画発表会の開催

新規採択テーマの研究開発計画内容について委託先間での情報の共有化をするために、研究計画発表会を開催した。また、採択テーマの目標の達成度等について委託先間での情報の共有化並びにディスカッションをするために研究成果報告会を開催した。平成19年度研究成果報告会においては、「系統連系円滑化蓄電システム技術開発」と連携して報告会を開催することで、同じ蓄電池の技術開発を実施している委託者間の情報共有の機会を提供した。また、平成21年3月に蓄電技術開発室が発足したことを受け、平成21年及び平成22年にそれぞれ前年度成果報告会として開催した。

表 2-12に研究計画発表会・研究成果報告会の開催実績を示す。

表 2-12 研究計画発表会・研究成果報告会の開催実績

開催日	会議名（開催場所）
平成19年 8月24日	「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発」 研究計画発表会 要旨集（JAホール）
平成20年 5月26日 ～ 5月27日	次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発 「系統連系円滑化蓄電システム技術開発」ならびに「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発」に関する平成19年度成果報告会（コクヨホール）
平成20年 8月25日	「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発(Li-EADプロジェクト)」平成20年度新規採択テーマ研究計画発表会（JAホール）
平成21年 7月 9日 ～ 7月10日	NEDO蓄電技術開発室 平成20年度成果報告会／平成21年度公募研究計画発表会（東京国際交流会館）
平成22年 6月 8日 ～ 6月 9日	NEDO蓄電技術開発 平成21年度成果報告会（東京国際交流会館）

##### 電池討論会でのNEDOシンポジウムの設置

電池討論会は国内最大の蓄電池に関する学会である。平成20年度の第49回電池討論会（11／5～11／7、開催地：大阪）において3日間にわたり、NEDO共催シンポジウムを開催した。目標の達成度が重要視される成果報告会と異なり、学術的・技術的な議論がなされた。また、「系統連系円滑化蓄電システム技術開発」と連携してシンポジウムを開催することで、委託者間の情報の共有化並びにディスカッションの機会を提供した。以降、平成23年度の第52回電池討論会までNEDOシンポジウムが設置され、活発な議論が行われた。表 2-13に電池討論会の開催日を示す。

表 .2-13 電池討論会の開催実績

開催日	会議名（開催場所）
平成20年11月 5日～11月 7日	第49回電池討論会（リーガロイヤルホテル堺）
平成21年11月30日～12月 2日	第50回電池討論会（国立京都国際会館）
平成22年11月9日～11月11日	第51回電池討論会（愛知産業労働センター）
平成23年10月17日～10月20日	第52回電池討論会（タワーホール船堀）

#### 海外調査報告会の開催

NEDO委託費用で国際学会に参加した委託先に対して、専門分野における国際動向・興味深いトピックスについて講演を依頼した。「系統連系円滑化蓄電システム技術開発」と連携して報告会を開催することで、同じ蓄電池の技術開発を実施している委託者間の情報の共有化の機会を提供した。表 .2-14に海外調査報告会の開催実績を示す。

表 .2-14 海外調査報告会の開催実績

開催日	会議名（開催場所）
平成20年 8月16日	The 14 <sup>th</sup> International Meeting on Lithium Batteries 報告会（経済産業省）
平成20年11月20日	PRIME 2008 Meeting 報告会（経済産業省）

## 2. 4 研究開発の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性

NEDO は、本事業の実用化、事業化に向け、以下に示す取り組みを行った。

ユーザ視点の助言を得る機会を提供

外部有識者に技術委員を委嘱して、研究開発項目毎に技術委員会を年 1～2 回開催した。各技術委員会には、開発成果のユーザとなる自動車メーカー及び電池メーカーの専門家に委員として参加してもらい、実用化に向けたユーザ視点での助言を得た。

論文・学会等での広報活動

特許出願、論文発表、講演発表、広報等で成果の普及を図るよう委託先を指導した結果、前記の表 .2-11 に示したように、多数の外部発表実績となっている。特に、電池関連技術の学術発表の場としては国内最大の電池討論会で、NEDO シンポジウムを開催した。学会発表による広報活動を通じ、開発技術に興味を持つ企業等を探索する機会を提供した。

性能等の試験方法及び標準化動向に関する情報共有

基盤技術委員会を本事業に参画している全委託先に公開した。性能評価、安全評価及び寿命推定に関する試験方法等の検討進捗や IEC/ISO における国際標準化活動の状況について情報共有することにより、事業化環境把握の機会を提供した。

実用化、事業化を目的とした事業の推進

NEDO は、本事業の後継事業として、EV/PHEV 用途のリチウムイオン電池の実用化と自動車用途以外への適用拡大を目的とした「リチウムイオン電池応用・実用化先端技術開発事業」を平成 24 年度より開始した。この後継事業には本事業での研究開発成果を更に発展させたテーマが複数含まれている。この後継事業において、NEDO は、実施者より毎年四半期毎に定期報告を受けると共に、年 1 回の実地調査を行う等して研究開発の進捗をタイムリーに把握し、

かつ事業3年目において有識者による中間評価等を行う等の研究開発マネジメントを推進し、成果の実用化・事業化を図るものとする。また、平成21年度から7年計画で実施中の「革新型蓄電池先端科学基礎研究事業」において、平成24年度に実施した追加公募で本事業の次世代技術開発の成果を活用した提案が採択されており、これについても上記と同様、実用化・事業化に向けての研究開発マネジメントを推進していく。

#### ⑤成果報告会の開催

今年度中に本事業の「成果報告会」を開催し、本事業で最終的に得られた研究開発成果を発表し、研究開発成果と企業とのマッチングの場を設け、成果の普及促進を図る予定である。

### 3. 情勢変化への対応

国際標準化の際に、自動車メーカー及び電池メーカーの国際的な競争力の確保及び研究開発を効率化するために日本の実情にあわせて国際規格を作成することは極めて重要である。例えば、電池の安全規格が必要以上に厳しくなる規格では、日本の電池メーカーの市場拡大の阻害要因になる可能性が高いと考えられるからである。本事業では、日本自動車研究所を中心に基盤技術開発で自動車用リチウムイオン二次電池の国際標準化・規格化に対応している。標準化のスケジュールとしては、基盤技術開発で各種実験データを蓄積後に、データに裏付けされた国際標準化案を国際標準化機構（ISO）、国際電気標準会議（IEC）に日本案を提案することで主導権をとって標準化活動を進めることを当初目指していた。一方、ドイツからISOに電池の標準試験方法等の提案が先に行われたことから、標準化のスケジュールを大幅に見直す必要が生じた。そこで、国際標準化活動を前倒して実施するために必要な予算を配分した。その結果、IECでは日本がコンビナーを取ることで、自動車用リチウムイオン二次電池のモジュール並びに単電池の標準化活動について主導権を持ちながら実施することができた。

また、優れた成果及びその見通しが得られたものについては、委託費の増額などにより研究開発の加速を図っている。具体的な例として、三菱重工業／九州大学／九州電力のポスト鉄オリビン系高性能正極材料の探索において、合成装置・電極塗工装置の導入により研究開発が加速すると判断し、委託費の増額を行なった。

#### 4. 中間評価への対応

本事業の中間評価を平成21年に実施した。表 2-15 に研究評価分科会委員を示す。「概ね、現行どおり実施」との評価が得られた。また、表 2-16～17 に示すような提言がなされ、各提言に沿って対処方針の検討及び計画等への反映を実施した。

表 2-15 研究評価分科会委員（平成21年度中間評価）

	氏名	所属、役職
分科会長	脇原 将孝	東京工業大学 名誉教授
分科会長代理	佐藤 峰夫	新潟大学 自然科学系 教授
委員	狩集 浩志	日経BP社 日経エレクトロニクス 編集記者
委員	豊田 昌宏	大分大学 工学部 応用化学科 教授
委員	仁科 辰夫	山形大学 大学院理工学研究科 教授
委員	三木 一郎	明治大学 理工学部 電気電子生命学科 教授・理工学部長
委員	門間 聰之	早稲田大学 高等研究所 准教授



表Ⅱ.2-16 提言されたコメントとその後の対応（総論）

	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点
総合評価	<p>電池の国家的な研究開発が欧米や中国などで加速し始めており、この分野での競争力を確保するための本プロジェクトは非常に重要と考える。また、本プロジェクトは、自動車用の先進型電池から革新的電池へと明確に分類されて、段階的に研究開発が進められており、その多くの成果が中間目標をクリアしている。特に、電池モジュールの要素技術開発において単セルレベルの中間目標値として設定されたエネルギー密度及び出力密度がクリアされており、個々の材料開発の成果が単セル開発に貢献したと考える。電池の標準化・規格化に関する努力も評価できる。</p>	<p>近い将来の高性能・低コスト HEV（ハイブリッド電気自動車）並びに PHEV（プラグイン HEV）の実現のためには、コスト低減や安全性確保を進めつつ、電池モジュールレベルの高い目標値を達成できるよう更に努力して欲しい。また、<u>最終目標の達成に向けては、課題と解決の道筋を記述して欲しい。</u>【1】 さらに、<u>コスト低減については、どこまで進み、最終目標値を見通すことができるレベルに到達しているのかどうか</u>が明確になっていない。<u>安全性を含めて産業として十分成立していくことが確信できるようにして欲しい。</u>【2】</p> <p>本プロジェクトの成果は、波及効果が大きく世界に大きな影響を及ぼすと考えられ、是非とも我が国独自の技術として早急に確立して欲しい。</p>
	対処方針	計画等への反映
	<p>【1】委託先毎にこれまでの課題と解決の道筋を明確化する。</p> <p>【2】コスト・安全性の検証については各委託先とも主に H22-23 年度で取り組む計画となっている。また、安全性については「基盤技術開発」の技術委員会で既に検討がなされている。今後とも、コスト・安全性について技術委員会等で引き続き検討を重ねつつ、産業として成立するための技術開発を進めていく。</p>	<p>H22 年度の実施計画書へ反映</p> <p>H21 年度実施計画書に記載済</p>
事業の位置付け・必要性	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点
	<p>最近のハイブリッド電気自動車（HEV）への社会の関心の高まりを見ても明らかなように、高性能な大型移動体用電源のニーズが高まっている。その背景には CO<sub>2</sub>削減、省エネへの関心の高さにあり、本プロジェクトの目的は社会的にも十分受け入れられるものである。また、我が国は電池技術において世界をリードする立場にあり、本プロジェクトが NEDO の事業として妥当なことは疑う余地がない。</p>	<p>日本の大学における特許戦略は、米国に比べて経験が浅く、<u>NEDO が大学の実施者に特許戦略を積極的に展開するサポート体制を整備することも検討して欲しい。</u>【3】</p> <p>リチウムイオン電池は HEV 用電源として実用化レベルに達しており、その性能はニッケル水素電池を凌駕するものである。今後は、<u>残されているコストと安全性向上を目指しての技術開発についても検討する必要がある。</u>【4】</p>
	対処方針	計画等への反映
	<p>【3】大学の実施者に対して特許取得を積極的に行うよう働きかける等、サポートを行う。</p> <p>【4】【2】の再掲</p>	<p>特に計画への反映はしない</p>

研 究 開 発 マ ネ ジ メ ン ト	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点
	<p>研究開発の初期目標設定は、経済産業省「新世代自動車の基礎となる次世代電池技術に関する研究会」報告に則って、我が国の蓄電池研究開発能力を飛躍的に高めるものとなっており、妥当である。また、将来を見据えて、目標とするエネルギー密度やコストを設定している点が評価できる。さらに、情勢変化への対応等に関しては、国際標準化への動向の調査・対応が精力的に実施されている。</p>	<p>目標達成度を測定・判断するための指標として、充放電実験条件の記述や評価基準が統一されているのか、事業原簿に明確な記載がない。<u>図表のデータを具体的に評価するための付記が必要であろう。【5】</u> また、最終目標の 3 kWh 電池パックのエネルギー密度が 100 Wh/kg となっており、これは単セルの性能に限っての中間目標値でほぼ達成されたものであるが、<u>更に安全、コスト、信頼性をも含めた高い最終目標を設定することが求められる。【6】</u></p> <p>大型リチウムイオン電池の安全性は、この電池が産業として発展していくかどうかのカギを握っており、<u>多面的な安全性試験を実施して、確かな製品となる技術を確立して欲しい。【7】</u></p>
	対処方針	計画等への反映
	<p><b>【5】</b> 事業原簿に可能な範囲で数値を付記した。</p> <p><b>【6】</b> エネルギー密度のみならず、すでに基本計画で設定されている安全、コスト、信頼性を含めた最終目標を達成するため、必要な単セルの開発について協議する。</p> <p><b>【7】</b> 安全性試験については、「基盤技術開発」の中で現在実施中である。試験項目・試験条件等については、「要素技術開発（電池モジュール）」参画法人と「電池試験技術協議会」を随時開催することで密接に意見交換を行っている。今後とも、これらの取り組みを継続していく予定である。</p>	<p>事業原簿に追記</p> <p>H22 年度の実施計画書に反映</p> <p>H21 年度実施計画書に記載済</p>
研 究 開 発 成 果	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点
	<p>設定された中間目標値はほぼ全て達成されており、電池モジュールの要素技術開発を担当する企業3チームはいずれもエネルギー密度、出力密度の両面で単セルレベルの中間目標値をクリアしている。特に、単セルの性能向上を着実に進めることにより、電池パックとして、最終目標値も達成できる可能性が非常に高い。また、車載用として市販を目指すリチウムイオン電池としては世界最高水準にあり、HEV 用電池として既に市販レベルに近いと考える。さらに、新しい電極活物質が見出され、新たな展開が大いに期待できる。</p>	<p>近い将来の高性能・低コスト HEV 並びに PHEV の実現のためには、コスト低減や安全性確保を含めた高い目標を電池モジュールレベルで達成できるよう更に努力して欲しい。また、<u>最終目標の達成に向けては、課題と解決の道筋を記述して欲しい。【8】</u></p> <p>今後、最終目標のコスト 4 万円/kWh（2015 年）を見通すためには、材料の選択や生産ラインの簡素化が重要であり、<u>優れた材料特性の情報収集、電池制御技術の確立、安価な生産ラインの十分な検討も必要である。【9】</u></p>

	対処方針	計画等への反映
	【8】 【1】 の再掲	
	【9】 【2】 の再掲	
実 用 化 ・ 事 業 化 の 見 通 し	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点
	HEV 用リチウムイオン電池として自動車会社の受け皿が整いつつあり、十分に実用化を見通すことができる。大量生産へ向けた生産技術開発への新たな公的資金援助も必要となるだろう。また、本プロジェクトの研究開発成果は、定置型電源への応用にも展開することができる。	今後、実用化に至るには、多くの研究開発テーマの中から最終的に真の成果を有するテーマを見極める必要がある、そのためには更に <u>詳細な検証項目も必要と考える。【10】</u> また、 <u>安全性や寿命評価などに関しては、開発テーマ「基盤技術開発」の成果をフィードバックする計画となっており、その成果が待たれるところである。【11】</u> さらに、「次世代技術開発」では、 <u>特許の取得を確実にして事業化に結びつけて欲しい。【12】</u>
	対処方針	計画等への反映
	【10】 【2】 及び 【6】 の再掲  【11】 現在、「基盤技術開発」と「要素技術開発（電池モジュール）」では、「電池試験技術協議会」を適宜開催し、安全性や寿命評価の試験方法に関して密接に意見交換を行っている。引き続き本検討を続けることで本プロジェクトに適した安全性、寿命評価の実施を検討する。  【12】 各委託先に、重要な成果についての特許化を打診するなど、特許取得活動を促す。	H21 年度実施計画書に記載済  特に計画への反映はしない

今後に対する提言	指摘点	
	<p>今後も、研究開発能力の向上、実用化、国際的立場の向上を目指して欲しい。<u>安全性や寿命評価などに関しては、開発テーマ「基盤技術開発」の成果をフィードバックする計画となっており、その成果が待たれるところである。【13】</u> 電池の標準化・規格化に関しては、国際的にリードする努力が続けられており、技術力で勝る日本の地位を今後とも確保して欲しい。</p> <p><u>エネルギー密度などの数値は反応速度が違えば大きく変わるものであり、例えば、放電を1時間率としているものの各種の検証条件を明快に示して欲しい。【14】</u> また、<u>安全性についても電解質の改善など目標を定めて、問題の解決へ向けて努力して欲しい。【15】</u></p> <p><u>最終目標のコスト4万円/kWh（2015年）を見通すためには、材料の選択や生産ラインの簡素化が重要であり、優れた材料特性の情報収集、電池制御技術の確立、安価な生産ラインの十分な検討も必要である。【16】</u></p>	
	対処方針	計画等への反映
	<p><b>【13】【11】</b> の再掲</p> <p><b>【14】</b> 「要素技術開発（電池モジュール）」の目標到達度の評価に関しては、「基盤技術開発」で提案された評価方法が直接反映される。その他の検証条件については各技術委員会に諮り、それぞれの技術に関して適切な検証条件を検討する。</p> <p><b>【15】</b> 安全性目標に関して、各技術委員会に諮り、目標となる指針を検討する。</p> <p><b>【16】【2】</b> の再掲</p>	<p>特に計画への反映はしない</p> <p>特に計画への反映はしない</p>

研究評価委員会コメント	指摘点	
	<p><u>自動車用電池の寿命目標（10年以上）は、定置用の場合と考え方が大きく違うと考えられるため、更に詳細な使用条件を設定することが重要である。【17】</u></p>	
	対処方針	計画等への反映
	<p><b>【17】</b> 現在、「基盤技術開発」で自動車用電池の寿命評価の試験方法を開発中である。また「基盤技術開発」では「要素技術開発（電池モジュール）」と「電池試験技術協議会」を適宜開催し、自動車用電池としての寿命評価の試験方法に関して密接に連携して意見交換を行っている。引き続き本検討を続けることで自動車用電池に適した、寿命評価の実施を検討する。</p>	<p>H21年度実施計画書に記載済</p>

表 2-17 提言されたコメントとその後の対応（個別テーマ）

(a)要素技術開発（電池開発）

成果、実用化、今後に対する提言	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点
		<p>HEV 用リチウムイオン電池のエネルギー密度及び出力密度は、3 チームとも単セルにおいて中間目標値をクリアしている。また、数多くの特許が出願されていることは高く評価できる。既に独自の寿命試験法を提案している実施者がいる点も高く評価したい。</p>
	対処方針	計画等への反映
	<p>【18】 H22-23 年度での取り組みとしてコスト目標が掲げられており、これを達成するための課題と解決策を各委託先で明確化するための検討を行う。</p> <p>【19】「基盤技術開発」で充電標準化 WG での活動を既に実施している。また、経済産業省の研究会などでの情報収集にも努めており、インフラ環境に対する蓄電池側の対応についても必要に応じて検討を行う。</p>	<p>H22 年度の実施計画書へ反映</p> <p>H21 年度実施計画書に記載済</p>

(b)要素技術開発（電池材料）

成果、実用化、今後に対する提言	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点
		<p>ほとんど全ての項目で中間目標をクリアしており、エネルギー密度に関してはフッ化鉄ペロブスカイト系をはじめとして高容量で低コストな材料が見出され、出力密度も 10C を見通すなど、高く評価したい。また、電子顕微鏡による構造解析では、電気化学的に不活性と考えられてきた <math>\text{LiFeO}_2</math> ドメインより Li 脱離・挿入が起こることを明らかにするなど、新しい知見を得ており、学術的にも非常に興味深い。</p>
	対処方針	計画等への反映
	<p>【20】 H22-23 年度での取り組みとして、イオン液体自体のコスト低減の見通しについて詳細に検討を行う。</p>	<p>H22 年度の実施計画書へ反映</p>

	<p>【21】「要素技術開発」の技術委員会で、活物質系に関する共通検証項目/検証条件について検討する。</p> <p>【22】今年度末に、外部有識者（大学・研究機関・企業等の専門家）による「延長・終了審査」委員会を開催し、現在の課題と提案された解決手段の有効性を検討する。</p>	<p>特に計画への反映はしない</p> <p>H22年度の実施計画書へ反映</p>
--	--	---

(c)要素技術開発（周辺機器）

成果、実用化、今後に対	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点
	<p>周辺機器であるモータについて、強力な希土類磁石を減らすにも拘わらず効率をアップさせ、あるいはその磁石を使用せずとも現状効率を維持するという非常に難しい研究開発が、新しい考えや先端の設計・解析技術などを駆使して進められており、その成果は最終目標近くに到達できる可能性があるとして評価する。また、産業用モータ及びモータシステムとしても大きな影響があり、波及効果が大いと言える。</p>	<p>EV用モータの実用化のためには制約が非常に多く、最終的に検証する場合、自動車メーカーの協力を得るなどして<u>多くの追加検証項目を設定し、どの程度クリア可能かを示す必要があると考える。</u>【23】</p>
対する提言	<p>対処方針</p> <p>【23】今年度末に、外部有識者（大学・研究機関・企業等の専門家）による「延長・終了審査」委員会を開催し、現在の課題と提案された解決手段の有効性を検討する際に、追加検証項目の必要性についても併せて検討する。</p>	<p>計画等への反映</p> <p>H22年度の実施計画書へ反映</p>

次世代技術開発

成果、実用化、今後に対	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点
	<p>新しい概念や構造に基づく種々のタイプの電池が提案されており、基礎研究として大変興味深い。また、革新的な試みが成されており、評価できる。特に、未来材料の開拓という難しい研究開発内容であるため、課題の解決に向けた方策が成果として出ており、波及効果も大きい内容である。</p>	<p><u>実用化の可能性がどうかについては、2年くらいで早期に見極め、ポテンシャルの高いものに多く予算を配分していくことが重要と考える。</u>【24】 また、実施者には大学が多く、特許による知財権確保に問題の生じる場合があるが、本技術開発の分野が新規材料系であって有用特許の宝庫になるから、<u>もっと NEDO が知財戦略として関与することも検討して欲しい。</u>【25】</p> <p>今後も、全く新しい電池系を見出すための基礎研究を推進すると言う意味において、是非にも本技術開発を鋭意推進して欲しい。</p>

する 提 言	対処方針	計画等への反映
	<p><b>【24】</b> H19 年度採択分については昨年度末に既に外部有識者（大学・研究機関・企業等の専門家）による「延長・終了審査」委員会を開催し、それまでの課題と提案された解決手段の有効性を検討し、延長するテーマを絞り込むことで、予算配分の選択と集中を実施している。今後、H20 年度採択、H21 年度採択分についても同様に順次「延長・終了審査」委員会を開催し、選択と集中を実施する予定である。</p> <p><b>【25】【3】</b> の再掲</p>	<p>H22 年度実施方針へ反映</p>

基盤技術開発

成果、 実用化、 今後 に 対 す る 提 言	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点
	<p>電池の加速寿命試験、劣化要因、国際標準化など、それぞれ困難な課題に取り組んでおり、それらの努力を評価したい。また、電池内部の可視化技術など、新しい計測手法も実現されつつあり、中間目標のほぼ全てが達成されていると見受けられる。</p>	<p>研究開発のスピードについては、本成果が「要素技術開発」での寿命や安全性評価にフィードバックされ、最終目標を評価する基準になるので、<u>できるだけ早く仕様を決定し、「要素技術開発」実施者とのすり合わせを行って欲しい。【26】</u></p> <p>今後も、<u>本基盤技術開発こそ、技術委員会での実施者間の意見調整を活発に実施すべきものであろう。【27】</u> また、加速劣化試験を行うに際し、日米欧走行モードを総合したモード作成を目指すことは大変有意義であり、是非完成して欲しい。</p>
	<p>対処方針</p>	<p>計画等への反映</p>
	<p><b>【26】【11】</b> の再掲</p> <p><b>【27】</b> 「基盤技術開発」の技術委員会を全委託先に公開することで、実施者間の意見調整を図っている。加えて、「要素技術開発（電池モジュール）」参画法人とは「電池試験技術協議会」を随時開催することで密接に意見交換を行っている。今後とも、これらの取り組みを継続していく予定である。</p>	<p>特に計画への反映はしない</p>

## 5. 評価に関する事項

本事業「次世代自動車用高性能蓄電池システム技術開発」に対して実施された評価を表 2-18 に示す。

表 2-18 「次世代自動車用高性能蓄電池システム技術開発」事業に対する評価

名称	実施時期	評価手法	事務局
事前評価	平成 19 年 2 月	事前評価書	燃料電池・水素技術開発部
中間評価	平成 21 年 8 月	現地調査会 分科会 研究評価委員会	評価部
事後評価	平成 23 年 10 月（予定）	現地調査会 分科会 研究評価委員会	評価部



### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 1. 事業全体の成果

##### 1. 1 要素技術開発（電池開発）

要素技術開発（電池開発）では、2015年想定 of 次世代 PHEV に搭載可能な電池パック（3kWh 級）をターゲットとして、同電池パックの構成単位となる 0.3kWh 級電池モジュールおよび同モジュールを構成する単セル（10Ah 級）を、性能目標を設けて開発した。更には、それらを基に 3kWh 級電池パックを設計し、モックアップを試作した。

設定した性能目標は、3kWh 級電池パックに換算した性能値として表 Ⅲ.1-1 の通りである。電池開発の委託先 3 者（GS ユアサ、日立／日立ビークルエナジー、パナソニック）による成果を事業全体として以下の通りにまとめる。

##### （1）概要

3kWh 級電池パックの構成要素となる 10Ah 級単セル、0.3kWh 級電池モジュールを、委託先が独自に有する正極活物質等技術を基にそれぞれ開発した（表 Ⅲ.1-2、表 Ⅲ.1-3）。

##### （2）開発目標

各委託先において、電極活物質、合剤組成、電極製造条件等の最適化を行い、エネルギー密度、出力密度、安定性がバランスした高性能なリチウムイオン単セル、電池モジュールを開発した。基盤技術開発と連携し共通化した評価方法、評価基準（寿命、安全性）に従い、表Ⅲ.1-1 に掲げた項目の評価を行った。表Ⅲ.1-4 に示す通り全ての委託先、項目において目標を達成することができた。なお、特に初期性能については、基盤技術開発の中で第三者による確認も実施した。

##### （3）電池パックの設計検討

熱設計や構造設計等に基づき 3kWh 級電池パックの基本設計を行い、電池パックのモックアップの製作、性能予測を実施した。その結果、電池パックにおいても性能目標の達成が見込まれる事を、設計ベースで確認した。



##### （4）知的財産権、成果の普及

知的財産権や成果の普及に関わる活動結果を表Ⅲ.1-5 に示す。特許出願を中心に成果を着実に積上げた。


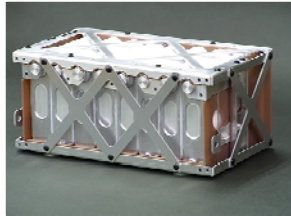




表Ⅲ.1-1 要素技術開発（電池開発）の性能目標

項目		目標（3kWh 級パック換算値）
初期性能	重量エネルギー密度	100Wh/kg
	重量出力密度	2,000W/kg
	体積エネルギー密度	120Wh/L
	体積出力密度	2,400W/L
	充放電効率	95%以上
寿命		10年以上
安全性		車載時の濫用に耐えること
コスト		4万円/kWh 以下の見通し（100万パック/年生産時）

表Ⅲ.1-2 委託先が開発した単セルの仕様

委託先	GSユアサ	日立・日立 VE	パナソニック
正極活物質	$\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$ + $\text{LiFePO}_4$	$\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$	$\text{Li}(\text{NiCoAl})\text{O}_2$
負極活物質	グラファイト	黒鉛	黒鉛
容量(Ah)	13	16	11
電圧(V)	3.62	3.66	3.6
寸法(mm)	112 × 21 × 81	97 × 120 × 25	80 × 154 × 12
質量(g)	365.0	454	288
エネルギー(Wh)	47.1	58.6	39.6
出力(W)	1,010	1,317	1,123
外観写真			

表Ⅲ.1-3 委託先が開発したモジュール、電池パックの外観

委託先	GSユアサ	日立・日立ビークルエナジー	パナソニック
0.3kWh 級 モジュール (実電池)			
3kWh 級 電池パック (モックアップ)			

表Ⅲ.1-4 開発電池の性能評価結果 (エネルギー密度、出力密度は3kWhパック換算値)

評価項目		目標	GSユアサ	日立・日立ビークルエナジー	パナソニック
初期性能	質量エネルギー密度	100Wh/kg	(110)	(111)	(106)
	質量出力密度	2,000W/kg	(2,691)	(2,400)	(2,770)
	体積エネルギー密度	120Wh/L	(158)	(141)	(129)
	体積出力密度	2,400W/L	(3,845)	(3,040)	(3,380)
	充放電効率	95%以上	(95.3)	(96)	(96)
寿命		10年以上			
安全性		車載濫用に耐える			
コスト		4万円/kWh以下の見通し			

大幅達成、 達成、 達成見込み、 × 未達

表Ⅲ.1-5 知的財産権、成果の普及に関わる活動結果

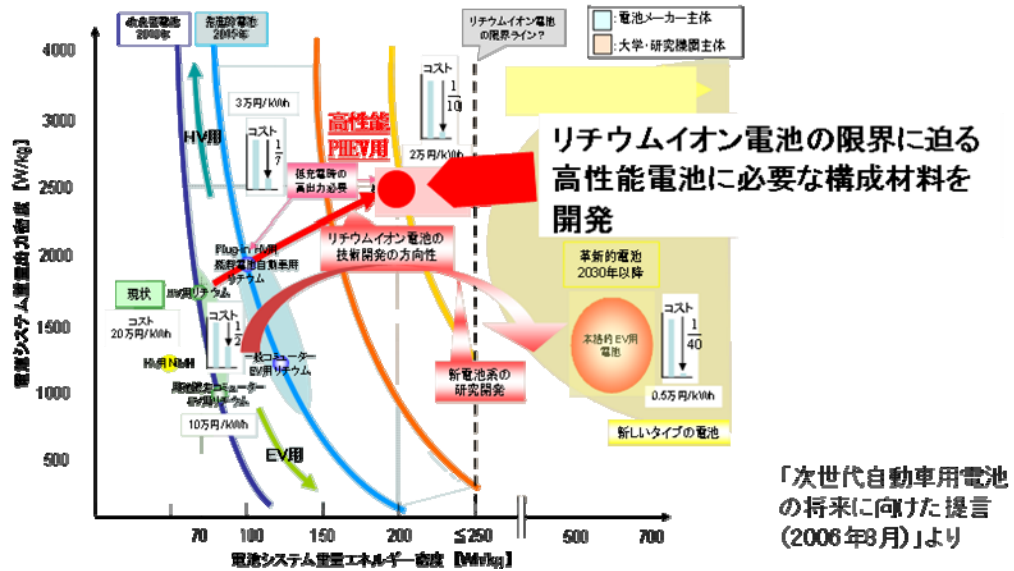
活動項目	GS ユアサ	日立／日立ビ クルエナジー	パナソニック	計
特許出願	26	49	19	94
うち、外国出願	1	8	1	10
うち、国内登録	8	1	0	9
うち、海外登録	0	0	1	1
論文	8	2	1	11
うち、査読付き	1	2	1	4
研究発表・講演	14	16	16	46
受賞実績	0	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載	1	0	0	1
展示会への出展	5	4	3	12

## 1. 2 要素技術開発（電池構成材料）

要素技術開発（電池構成材料）では、より高性能なりチウムイオン電池の 2015 年以降の実用化を目標に、高い性能を実現する上で必要な電池構成材料、電池反応制御技術、基本原理を開発した。電池としての目標を設定した背景を図 .1-1 に示す（経済産業省「次世代自動車用電池の将来に向けた提言」より）。同図に「高性能 PHEV 用（大きな赤丸）」として示す点が、本開発が目標とする電池性能である。質量エネルギー密度が 200Wh/kg、質量出力密度が 2500W/kg である。同目標と設定の根拠を表 .1-6 に示す。例えばエネルギー密度は、要素技術開発（電池開発）の目標値の 2 倍であり一段と高い。本開発のスケジュール、委託先／開発テーマ、予算をそれぞれ表 .1-7、表 .1-8、表 .1-9 に示す。

### （1）概要

一段と高い開発目標（高容量化、高出力化；表 .1-6）を達成するため、電池の主要な構成材料（正極、負極、電解液等）の開発およびそれらを電池化する技術を開発し、成果として表 .1-10 に掲げる材料や電池化技術等を得た。



図Ⅲ.1-1 高性能リチウムイオン電池の要求性能

表Ⅲ.1-6 研究開発目標と設定の根拠

研究開発項目	研究開発目標	根拠
①エネルギー密度	200Wh/kg	EV走行距離 (25km→50km) や運用性を向上しPHEVの普及を促す (「次世代自動車用電池の将来に向けた提言(2006年8月)」より)
②出力密度	2500W/kg	自動車搭載の必要条件
③安全性	車載時の濫用に耐えること	自動車搭載の必要条件
④コスト	3万円/kWhの見通し (100万ハック/年生産時)	要素技術開発電池開発目標(4万円/kWh)をベースに、材料開発の貢献分を想定して設定

表Ⅲ.1-7 要素技術開発 (電池構成材料) の開発スケジュール

	材料レベルで目標値を設定			単電池レベルで目標値を設定	
	平成19年度	平成20年度	平成21年度 (中間評価)	平成22年度	平成23年度
①要素技術開発 (電池構成材料開発 および電池反応制御技術の開発)	公募 (8件)	(8件)	(8件)	1件が延長不採択 1件が次世代技術開発に移行 (6件)	(6件)
		公募 (1件)	(1件)	(1件)	(1件)
テーマ数	8	9	9	7	7

表Ⅲ.1-8 要素技術開発（電池構成材料）の委託先／開発テーマ一覧

開発材料	実施者	テーマ名称
正極	産業技術総合研究所、田中化学	高容量・低コスト新規酸化物正極材料の研究開発
	九大、三菱重工、九電	ポスト鉄オリビン系高性能リチウム二次電池の研究開発
	戸田工業	多層構造粒子設計による高出力リチウムイオン電池用正極活物質の研究開発
正／負極	日産	高容量電池の研究開発
電解液	三菱化学、日本合成化学	大型リチウム二次電池用高安全性電解質の研究開発
	産業技術総合研究所	リチウム二次電池の安全性に資するイオン液体電解質の開発
	第一工業製薬、関大、エレクセル	高出力・高安全性リチウムイオン電池の開発

表Ⅲ.1-9 要素技術開発（電池構成材料）の研究予算

委託先	研究予算(百万円)					
	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	総額
(独)産業技術総合研究所／(株)田中化学研究所	49.9	57.1	76.4	96.3	63.7	343.3
(国)九州大学／三菱重工業(株)／九州電力(株)	124.7	123.3	71.8	92.9	77.9	490.6
戸田工業(株)	-	68.0	50.7	28	26	172.7
日産自動車(株)	131.0	167.9	105.0	72	55	530.8
三菱化学(株)／日本合成化学工業(株)	136.6	107.7	55.4	127	75	501.6
(独)産業技術総合研究所	40.0	50.0	55.0	50	40	235.0
(学)関西大学／第一工業製薬(株)	99.4	82.7	43.8	52	52	329.9
(国)山口大学	16.6	22.2	9.4	-	-	48.2
(国)長崎大学／(独)産業技術総合研究所	40.0	40.0	40.0	-	-	120.0
	638.2	718.9	507.5	518.2	389.6	2772.4

## (2) 開発目標

開発した電池構成材料等を用いて小型電池（ボタン電池、ラミネート電池、18650電池）を試作し、性能評価を実施した。開発により得られた電池構成材料の一覧を表Ⅲ.1-10に、主要な目標であるエネルギー密度、出力密度についての目標の達成状況を表Ⅲ.1-11に示す。

評価項目の中で、エネルギー密度の向上は優先的な課題として取り組まれており、全体的に目標をクリアあるいは一定の性能向上の見込みという成果が得られている。出力密度については一部の委託先で課題を残している。

開発技術の実用化に向けた課題と対策の一覧を表Ⅲ.1-12に示す。表の通り多くのメーカーで実用化に向けた電池化（実用化）の計画を有しており、次のステップとして電池メーカーとの連携／提案および量産技術の開発等を課題として上げている。NEDOにおいても、高性能な材料を適用した先進的なリチウムイオン電池の2020～2025年の実用化を目標とする新規事業「高性能リチウムイオン電池応用・実用化先端技術開発事業」を2012年より立ち上げる。本事業の委託先2テーマも開発技術をもとに事業に参画する（高容量・低コスト新規酸化物正極材料

の研究開発、高容量電池の研究開発)。NEDO としても開発材料の実用化に向けた活動を今後共支援する。

(3) 知的財産権、成果の普及

特許出願、論文、研究発表等、知的財産に関わる出願件数を表Ⅲ.1-13 に示す。特許では1社が特に多いが、それを除けば論文や研究発表など平均して行われている。

表Ⅲ.1-10 要素技術開発（電池構成材料）の開発成果

委託先	テーマ名称	開発した電池構成材料等
産業技術総合研究所 田中化学	高容量・低コスト新規酸化物正極材料の研究開発	・層状岩塩型正極材料(Li <sub>2</sub> MO <sub>3</sub> ; M=Mn、Fe、Ni、Ti) ・トンネル構造マンガ氧化物正極材料(Li <sub>0.44</sub> +XMO <sub>2</sub> ; M=Mn、Ti)
九大、三菱重工 九電	ポスト鉄オリビン系高性能リチウム二次電池の研究開発	・FeF <sub>3</sub> 正極材料 (微粉化及びカーボンコートによる利用率・導電性の向上) ・FeF <sub>3</sub> 正極材料のセル化技術
戸田工業	多層構造粒子設計による高出力リチウムイオン電池用正極活物質の研究開発	・多層構造を有する正極活物質粒子 (Li <sub>2</sub> MnO <sub>3</sub> ・LiMnNiCo複合系)
日産	高容量電池の研究開発	・固溶体系正極材料(Li <sub>2</sub> MO <sub>3</sub> 系) ・シリコン合金系負極材料
三菱化学 日本合成化学	大型リチウム二次電池用高安全性電解質の研究開発	・ヘテロ元素含有溶媒(スルホラン)電解液 ・新規イオン液体の創成(シアノスフェイト系、スルホナート系)
産業技術総合研究所	リチウム二次電池の安全性に資するイオン液体電解質の開発	・高安全・高出力なイオン液体(FTAアニオン系) ・新規酸素含有ポレート系アニオンからなるイオン液体
第一工業製薬 関大 エレクセル	高出力・高安全性リチウムイオン電池の開発	・FSIアニオン系イオン液体 ・FSIアニオン系イオン液体のセル化技術

表Ⅲ.1-11 開発した構成材料等による電池の性能評価結果

委託先	テーマ名称	目標達成状況		今後の課題
		エネルギー密度	出力密度	
三菱化学 日本合成化学	大型リチウム二次電池用高安全性電解質の研究開発	○	○	試験セル評価、イオン液体の物性評価を実施
産業技術総合研究所 田中化学	高容量・低コスト新規酸化物正極材料の研究開発	△	△	材料組成、作製条件の最適化
産業技術総合研究所	リチウム二次電池の安全性の資するイオン液体電解質の開発	—	△	出力密度の向上と安全性評価方法の確立
日産	高容量電池の研究開発	○	○	サイクル特性の確認
第一工業製薬 関大 エレクセル	高出力・高安全性リチウムイオン電池の開発	○	○	コスト検討
九大、三菱重工 九電	ポスト鉄オリビン系高性能リチウム二次電池の研究開発	○	×	出力密度とサイクル性能向上
戸田工業	多層構造粒子設計による高出力リチウムイオン電池用正極活物質の研究開発	○	×	評価用セル作製条件の検討

大幅達成、 達成、 達成見込み、 × 未達



表Ⅲ.1-12 実用化に向けた課題と対策

研究開発項目	実用化に向けた課題	対策	成果の実用化/活用
高容量・低コスト新規酸化物正極材料の研究開発 (産総研、田中化学)	①他の電池部材とのすり合わせ、実用化の開発	①材料メーカ、電池メーカとの共同開発体制構築 (出力、寿命、信頼性等改善)	・自動車用高容量LIB ・定置用大型蓄電池 ・材料2020年事業化 (2012NEDO新事業に参加、実用化開発)
ポスト鉄オリビン系高性能リチウム二次電池の研究開発 (九大、MHI、九電)	①性能向上 ・出力特性 ・サイクル特性 ②量産化検討	①・フッ化鉄の粒径制御、カーボンコート最適化	・移動体用電池 ・定置用大型蓄電池 40Ah級セル 自主開発/目標2015
多層構造粒子設計による高出力リチウムイオン電池用正極活物質の研究開発 (戸田工業)	①性能向上 ・出力特性 ・サイクル特性	①高電圧対応セル部材の入手及びそれを用いた開発材料の性能把握	・自動車、バイク、フォークリフト、モバイル用 ・自主開発 コア材?多層材を順次事業化
高容量電池の研究開発 (日産自動車)	①量産可能な工法でのSi合金試作 ②中～大型セル開発	①Si合金の量産技術開発及び量産Si合金による活物質の性能把握	・EV駆動用電源 ・2020年頃に高性能EVとして事業化 (2012NEDO新事業に参加、実用化開発)
大型リチウム二次電池用高安全性電解質の研究開発(三菱化学、日本合成化学)	①電池メーカ、自動車メーカへの提案(三菱化学) ②新イオン液体の充放電特性最適化、低コスト化 (日本合成化学工業)	①市場開発及び顧客電池設計に合わせた電解液組成チューニング	・自動車用LIB ・携帯用及び定置用電池 ・電池メーカ等と共同開発(2012～) ・サンプル提供 (2016頃～)
リチウム二次電池の安全性に資するイオン液体電解質の開発(産総研)	①耐熱性に優れる特徴を活かす電池構成や用途の探索	①・耐熱性添加剤としての検討 ・液媒体の開発	・耐熱性添加剤として利用 ・計算科学的手法による分子設計法の活用
高出力・高安全性リチウムイオン電池の開発(第一工業製薬、関大、エルクセル)	①イオン液体の低コスト化 ②高出力化 ③車載での性能実証 (自動車メーカとの関係)	①精製部分の効率化 ②電解液の最適化 ③小型EVでの実証試験	・イオン液体電解液の生産・販売 (2020頃) ・イオン液体を用いた高安全な電池の開発、事業化

表Ⅲ.1-13 知的財産権、成果の普及に関わる活動結果（電池構成材料）

	三菱化学 日本合成	産総研 田中化学	産総研	日産	第一工業製薬 関大 エレセル	九大 三菱重工 九電	戸田工業	計
特許出願	14	15	10	64	2	9	15	129
内外国出願	0	0	2	20	0	0	9	31
内国内登録	0	2	0	0	0	0	0	2
内海外登録	0	0	0	0	0	0	0	0
論文	3	29	28	6	6	22	0	94
内査読付き	2	13	13	6	4	11	0	49
研究発表・講演	36	91	69	46	52	61	5	360
受賞実績	0	2	3	1	2	8	0	16
新聞・雑誌等への 掲載	0	26	6	1	4	4	0	41
展示会への出展	0	2	1	0	4	0	0	9

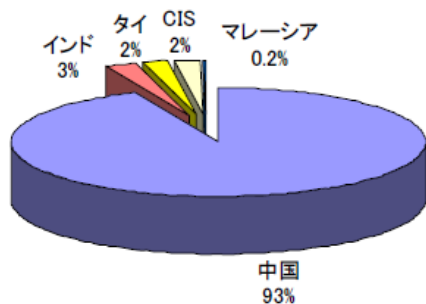
### 1. 3 要素技術開発（周辺機器開発）

次世代自動車の本格普及に必要な「技術戦略」として、電池の低コスト化に合わせて、希少資源の使用を大幅に削減できるモータの開発が、経済産業省による「新世代自動車の本格普及に向けた提言（2007年6月）」において、次のとおり指摘されている。

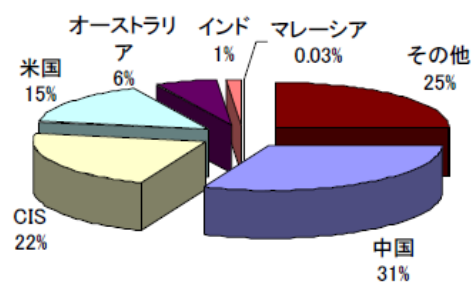
「次世代自動車の本格普及のためには、性能やコストの面でガソリン自動車に匹敵するレベルになることが欠かせない。そのためには、電池の更なる性能向上とコストダウンが欠かせない。一方、最近ではHVなどのモータに使用されているネオジムやジスプロシウムの資源制約が強まっている。今後、資源制約が更に強まるとモータの性能や価格に影響が生じる可能性が高いことから、希少資源の使用を大幅に削減できるモータの開発が求められている。」

世界レベルでのレアアースの国別の生産量及び国別のレアアースの埋蔵量をそれぞれ図 .1-2、図 .1-3 に示す。これらの図に示す通り、中国は世界のレアアースの埋蔵量の約30%を占め、更に生産量では90%を越え、独占的な状況にある。

以上を背景として要素技術開発（周辺機器開発）では、次世代自動車駆動用モータの格段の高性能化（高効率化・軽量化・コンパクト化）に資する電池制御やモータ等の周辺機器の技術開発を目的とする。特に脱／省レアアースを実現するモータ技術開発に重点を置いた。本事業の



図Ⅲ.1-2 レアアースの国別の生産量



図Ⅲ.1-3 国別のレアアースの埋蔵量

立ち上げに先立ち、NEDO 内で「電動車両用駆動モータ等に関する技術検討委員会」（平成 19 年 11 月～平成 20 年 2 月）を設け、脱・省レアアースモータの研究開発計画を、車両駆動用モータ等の技術者、学識経験者により策定した。同委員会で策定した脱レアアースモータ、省レアアースモータの各々の計画を表 .1-14、表 .1-15 に示す。脱レアアース型ではレアアース使用量をゼロにした上で現状のモータ性能を維持する先進型モータ、省レアアース型ではレアアース使用量を半減した上で現状モータより出力密度が大きい先進型モータをそれぞれ目指すこととした。それを受けて本事業の開発目標を表 .1-16 のとおり設定した。レアアース（ネオジム、ジスプロシウム等）の使用量ゼロを目指す開発では、モータの総合効率、出力密度は開発当時の既存モータと同等とし、一方レアアース使用量の 1/2 以下への削減を目指す場合は、モータの総合効率は従来機以上、出力密度は従来機の 150%以上とした。

本開発のスケジュール、予算をそれぞれ表 .1-17、表 .1-18 に示す。また、委託先／開発テーマの内容を図 .1-4 に示す。図に示すように、多様な方式のモータの脱レアアース、省レアアースへの可能性を、メンバー的には大学を主体にメーカーも加え、幅広く検証した。

表Ⅲ.1-14 脱レアアース型モータの研究開発計画

	現状	参考:改良型モータ (2010年)	先進型モータ (2015年)	革新型モータ (2020年)
総合効率	1.0	1.0	1.0	1.1
出力密度	1.0	1.2	1.0	1.2
レアアース使用量	1.0	1.0	0	0
開発体制	民主導	民主導	産学官連携	大学・研究機関

表Ⅲ.1-15 省レアアース型モータの研究開発計画

	現状	参考:改良型モータ (2010年)	先進型モータ (2015年)	革新型モータ (2020年)
総合効率	1.0	1.0	1.1	1.2
出力密度	1.0	1.2	1.5	2.0
レアアース使用量	1.0	1.0	0.5	0.5
開発体制	民主導	民主導	産学官連携	大学・研究機関

表Ⅲ.1-16 要素技術開発（周辺機器開発）の事業目標

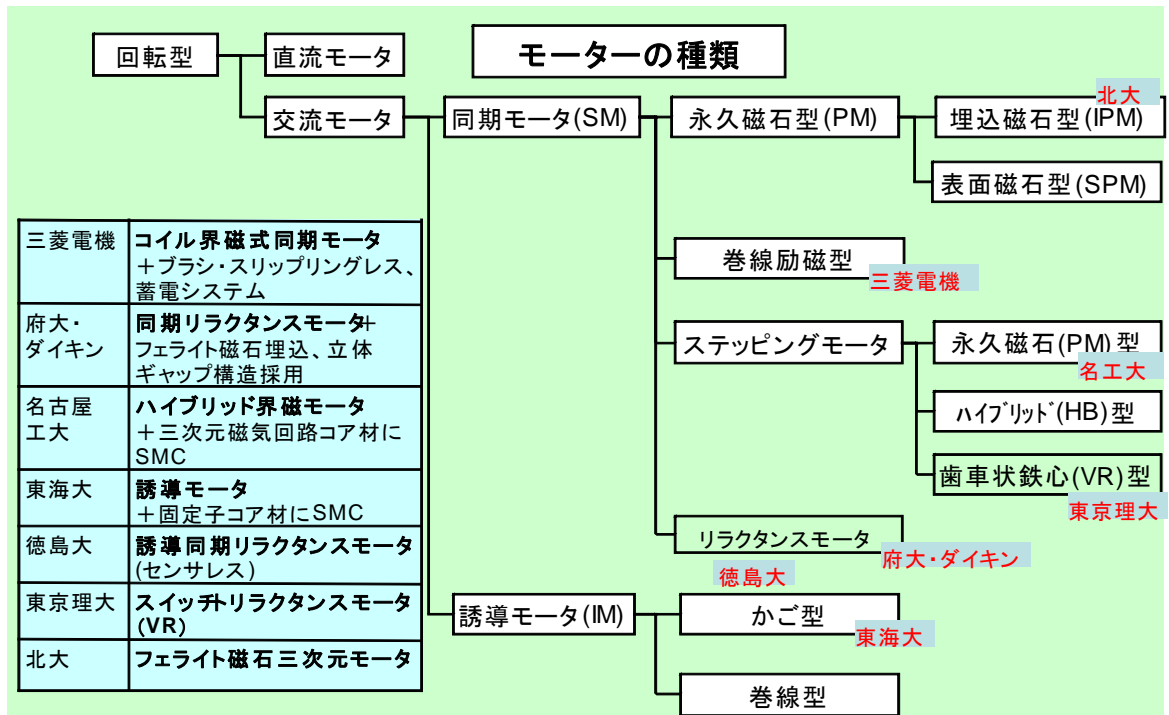
<p>脱レアアースを実現する車両駆動用モータ開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・レアアース使用量： 零</li> <li>・総合効率： 従来技術と同等程度</li> <li>・出力密度： 従来技術と同等程度</li> </ul>
<p>省レアアースを実現する車両駆動用モータ開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・レアアース使用量： 従来技術より 50%程度以下</li> <li>・総合効率： 従来技術以上</li> <li>・出力密度： 従来技術の 150%程度</li> </ul>

表Ⅲ.1-17 要素技術開発（周辺機器）の開発スケジュール

	平成19年度	平成20年度	平成21年度 (中間評価)	平成22年度	平成23年度
①要素技術開発 (周辺機器: モータおよび電池制御 技術の開発)	公募 → (1件)	(1件)	延長審査 → (1件)	1件が延長不採択	
		公募 → (5件)	延長審査 → (5件)	(5件)	(5件)
テーマ数	1	6	6	5	5

表Ⅲ.1-18 要素技術開発（周辺機器）の開発予算

委託先	研究予算(百万円)					総額
	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	
(国)徳島大学	-	17.7	19.8	19.7	15.2	72.4
三菱電機(株)	-	166.5	167.9	160.0	130.0	624.4
(公)大阪府立大学／ダイキン工業(株)	-	60.1	41.7	39.8	31.0	172.6
(学)東京理科大学／(国)北海道大学	-	36.7	44.0	40.5	34.3	155.5
(国)名古屋工業大学／(学)東海大学	-	32.6	12.5	10.7	23.1	78.9
FDK(株)	39.8	53.4	61.9	-	-	155.1
	39.8	367	347.8	270.7	233.6	1258.9



実施者	テーマ名称
徳島大学	レアアースレス電動機に適用可能なセンサレス制御に関する研究開発
三菱電機	次世代自動車用高性能モーター蓄電パワエレシステムの研究開発
大阪府立大学、ダイキン工業	等価狭ギャップ構造による脱レアアース高性能リラクタンストルク応用モーターの研究開発
名古屋工業大学、東海大学	脱レアアースを目指す自動車用モーターの研究開発
北海道大学、東京理科大学	脱レアアース次世代モーターの研究開発

図Ⅲ.1-4 要素技術開発（周辺機器）の委託先、開発テーマ一覧




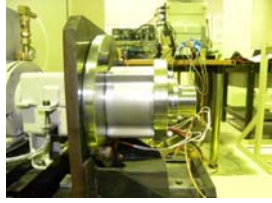
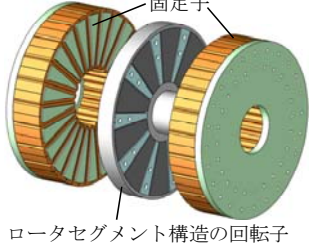
(1) 概要

各委託先においてそれぞれ特徴的な駆動原理を有するモーターの開発を行い、最終段階では実用規模に近い10~20kW級の評価機を試作し、脱/省レアアースモーターの実現に向けた要素技術を構築した(表 .1-19)。

(2) 開発目標

全体的な共通目標につき各委託先の達成状況、課題を表 .1-20 に示す。全体的に達成もしくはほぼ達成見込みであり良好である。今後の開発技術の実用化に向けた課題と対策の一覧を表 .1-21 に示す。メーカーの委託先においては、低コスト化や騒音対策、冷却等、実用化に向けた課題を上げている継続して解決を図る意向である。開発技術の直近の適用先として建機や産業用モーター分野を上げており、国による後継の助成事業や磁性体材料等の性能向上プロジェクトに参画しながら実用化を図る計画である。また大学主体のプロジェクトにおいても、産学連携を一層強め共同研究により産業界への技術の移転/実用化を図る計画である。一部の大学では既に共同研究を開始している。なお、経済産業省で平成24年度より、平成33年度を目処にレアアース元素を使わない新磁石、低損失な新軟磁性材料およびそれらの材料を用いる高効率なモーターを開発する新規事業を、産官学を結集して立ち上げる計画である。本事業の委託先においても複数のメーカー、大学が参加する意向である。

表Ⅲ.1-19 試作機（モータ等）の目標仕様、外観

テーマ名称	委託先	開発したモータ等
リアースレス電動機に適用可能なセンサ制御に関する研究開発	徳島大学	リアースレス電動機をセンサレス制御システムで駆動 ・リアース：ゼロ ・回転速度／位置センサ：不要 
次世代自動車用高性能モータ蓄電パワエレシステムの研究開発	三菱電機	20kW 級要素試験試作機 （写真はロータ部） ・リアース：ゼロ ・出力密度：従来機同等 ・効率：従来機同等 
等価狭ギャップ構造による脱リアース高性能リラクタンストルビオンモータの研究開発	大阪府立大 ダイキン工業	実用出力 20kW 級試作機 （写真はモータ完成状態） ・リアース：ゼロ ・出力密度：従来機同等 ・効率：従来機同等 
脱リアースを目指す自動車用モータの研究開発	名古屋工大	150%出力密度省リアースモータ （SMC コアを利用） ・リアース：従来比 50% ・トルク密度：従来機同等 ・出力密度：従来比 150% 
	東海大学	つば付き SMC コアによる最終試作機 ・リアース：ゼロ ・出力密度、効率：従来機同等
脱リアース次世代モータの研究開発	北海道大	フェライト磁石を用いた 50kW 級 3 次元モータ ・リアースゼロ ・効率：従来機同等 ・出力：従来機同等  <p style="text-align: center;">ロータセグメント構造の回転子</p>
	東京理科大	50kW 級スイッチドリランクスモータを開発 （駆動回路開発も含む） ・リアースゼロ ・出力、効率、トルク：従来機同等

表Ⅲ.1-20 試作機での性能評価結果

テーマ名称	委託先	目標達成状況			今後の課題
		リアースレス	効率／トルク	出力密度	
リアースレス電動機に適用可能なセンサレス制御に関する研究開発	徳島大学	—	○	○	・自動車以外の分野への応用 ・EV用モータとして近年注目を集めるスリットリラクタンスマータへの適用の検討
次世代自動車用高性能モータ蓄電システムの研究開発	三菱電機	—	○	○	・積層磁極(回転子)の安価量産化
等価狭ギャップ構造による脱リアース高性能リラクタンストルク応用モータの研究開発	大阪府立大 ダイキン工業	—	○	○	・高効率な運転範囲の拡大 ・量産設備、工法等の確立
脱リアースを目指す自動車用モータの研究開発	名古屋工大	○	△	△	・トルク密度、出力密度の向上
	東海大学	—	△	×	・圧粉磁心の特性向上(透磁率向上、成型時の劣化防止)
脱リアース次世代モータの研究開発	北海道大	—	○	○	・製品化に必要な信頼性、量産性の確保(企業との共同開発の推進)
	東京理科大	—	○	◎	・振動、騒音の低減 ・回生を含めた制御法、駆動回路

大幅達成、 達成、 達成見込み × 未達

表Ⅲ.1-21 実用化に向けた課題と対策

研究開発項目	実用化に向けた課題	対策	成果の実用化/活用
次世代自動車用高性能モータ蓄電パワエレシステムの研究開発(三菱電機)	①モータ回転子の積層磁極の低コスト化	①安価量産化のための技術開発を継続実施	・自動車用レアースレスモータ ・産業用レアースレスモータ(サーボモータ) (NEDO補正事業、METI磁性材料技術開発)
等価狭ギャップ構造による脱レアース高性能リラクタンストルク応用モータの研究開発(大阪府大、ダイキン工業)	①振動、騒音 ②高出力化時の冷却 ③低温時の減磁対策	①設計で対応(剛性アップ、防音・防振) ②冷却方式の見直し(巻線の直接液冷) ③耐減磁設計+実機試験	・建機機械用レアースレスモータ ・空調機用レアースレスモータ (H24METI補助事業)
脱レアースを目指す自動車用モータの研究開発(名工大)	①性能向上 ・トルク ・出力 ・サイクル特性	①・ロータリースのクローホール形状化 ・試験装置電源を容量アップし、追試/再評価	産官学連携の中で省レアース且つ高効率なモータとして提案を継続
脱レアースを目指す自動車用モータの研究開発(東海大)	①性能向上 ・出力	①・圧粉磁心の透磁率の向上(成形時の劣化防止、圧粉材料の特性向上)	今後も最新技術を誘導モータに適用し性能向上に努め、レアースが使えない状況の受け皿を作る
脱レアース次世代モータの研究開発(東京理科大)	①騒音、振動の低減 ②回生を含めた制御法の検討	①モータ構造、制御方法、取付方法の総合的な検討が望ましい ②回生側も含めた燃費を向上する制御の開発	・自動車用モータ ・ハイブリッド建機 ・モータ応用製品全般 国内企業との共同研究により技術移転を行う
脱レアース次世代モータの研究開発(北海道大)	①製品化に必要な信頼性、量産性の確保	①耐久試験、量産検討等をメーカーと共同研究	・小容量モータでの実用化 ・大容量モータの開発
レアースレス電動機に適用可能なセンサレス制御に関する研究開発(徳島大学)	①振動、騒音の低減 ②回生を含めた制御法、駆動回路	①モータ構造、制御方法の改良 ②回生時の特性把握、制御パラメータ最適化	・スイッチトリラクタン্সモータへの適用 ・他分野への展開(鉄道、産業用、風力用誘導発電機)



(3) 知的財産権、成果の普及

特許出願、論文、研究発表等、知的財産に関わる出願件数を表Ⅲ.1-22 に示す。特許はメーカーの委託先で多く出願されている。発表や講演は全般的に平均してなされている。

表Ⅲ.1-22 知的財産権、成果の普及に関わる活動結果（周辺機器開発）

	徳島大	三菱電機	大阪府大 ガイケン	名古屋工大 東海大	北海道大 東京理科大	計
特許出願	1	23	19	1	9	53
うち、外国出願	1	4	2	0	7	14
国内登録	1	1	0	0	0	2
海外登録	1	0	0	0	0	1
論文	1	13	3	0	12	29
うち、査読付き	1	4	3	0	12	20
研究発表・講演	20	13	26	30	39	128
受賞実績	0	1	0	1	7	9
新聞・雑誌等への掲載	2	3	3	7	7	22
展示会への出展	2	2	1	1	2	8

## 1. 4 次世代技術開発

次世代技術開発は、「次世代自動車用電池の将来に向けた提言」の中における、革新フェーズに対応している。革新フェーズは、2030年以降を念頭において、ガソリン自動車並の走行距離を持つ本格的なEVを量産することを目指したフェーズである。

図 1-5 に次世代技術開発の開発ターゲットを示す。で囲まれている「革新的電池」の電池システム重量エネルギー密度・出力密度が開発目標に対応している（目標の詳細については（2）開発目標で記す）。

本研究開発項目では2030年以降において、電池パックレベルで重量エネルギー密度700Wh/kg以上という革新的な性能を実現することを目指して、現状の技術レベルの延長線上にない、経済性、性能面でのブレークスルーが期待できる新しい材料（正極、負極、電解質等）や新しい電池系（合金系、金属系等）の基礎研究開発を実施することで、本格的EV等の実用化に資する革新的蓄電池技術を開発することを目的として開発を行った。

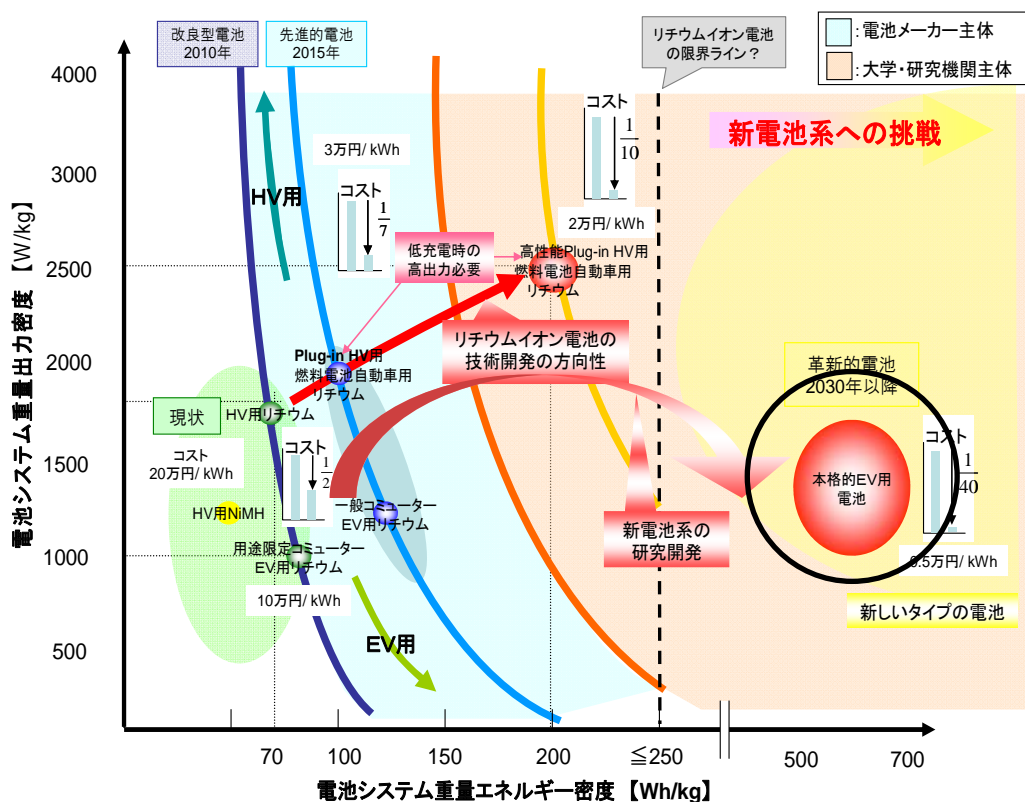


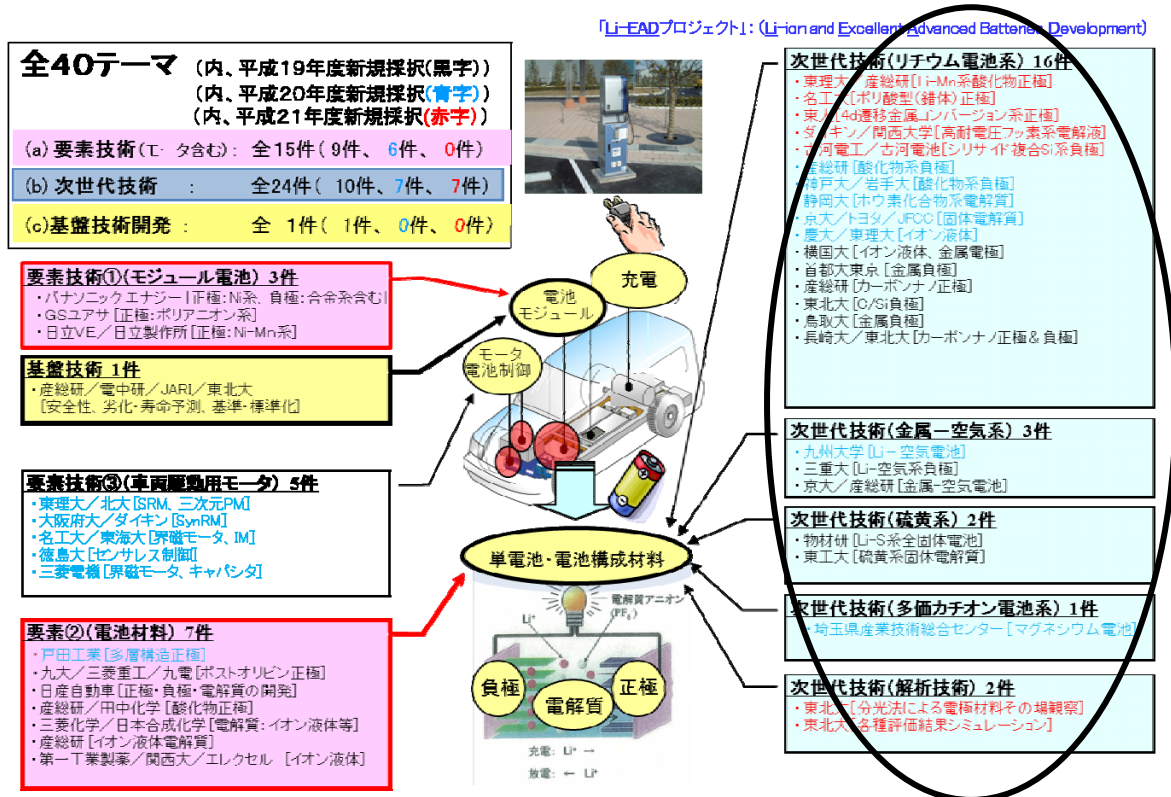
図 1-5 次世代技術開発の開発ターゲット

### (1) 概要

図 III.1-6 に本事業における各研究開発項目の位置付けを示す。

平成23年度までに、金属-空気電池、リチウム硫黄電池、多価カチオン電池、新形態リチウムイオン二次電池などに代表される次世代の革新的な二次電池の構成とそのための構成材料及び電池反応制御技術等を開発した。平成19年度からの最初の2年間で、革新電池の可能性のある電極材料、電解質等の新材料探索、反応メカニズムの解析、 dendrolyd等の発生及び抑制の検討、界面評価技術の開発等を実施し、残りの期間で開発した材料を用いたコイン型電

池等を作製し、電池特性評価を実施することで、性能目標（最終目標）への達成を確認した。また、界面評価技術については 500Wh/kg のエネルギー密度の可能性がある電池系で分析法を適用した。具体的な研究開発内容については表Ⅲ.1-23 に示す。



図Ⅲ.1-6 次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発の実施内容（平成23年度）  
（次世代技術開発の研究開発項目の対象テーマは楕円で囲われている）

表 Ⅲ.1-23 委託先の研究テーマ、研究開発内容

【金属-空気電池】

開始年度	研究テーマ【委託先】	研究開発内容
H19～	リチウム空気二次電池用リチウム/固体電解質複合負極の研究開発【三重大学】	本研究開発は、リチウム-空気電池向けの負極及び電解質の開発を目的とする。リチウム-空気電池の課題は空気中の水および炭酸ガスの影響を受けず、かつ充放電に伴うリチウムのデンドライトが生成しないリチウム極の開発である。水、炭酸ガスに安定なリチウムイオン導電性固体電解質でリチウム金属を被覆した電極を開発する。さらに、開発するリチウム極に適した電解質の探索を行う。

H19～	エネルギー密度の革新を目指した金属-空気電池の二次電池化【京都大学／産業技術総合研究所】	本研究開発は、金属-空気電池の開発を目的とする。金属極は亜鉛とアルミニウムを対象とし、亜鉛極はデンドライド成長制御手段の開発、アルミニウム極はアルミニウム負極が可逆的に充放電できるイオン液体の可能性検討と開発を行う。空気極についてはアニオン交換膜を導入することで固体高分子型空気極を開発する。
H20～	Li系金属-空気2次電池の性能向上に関する研究【九州大学】	本研究開発はLi系金属-空気2次電池開発を目的とする。可逆性の高い空気極触媒を開発するとともに、安全性の確保のためゲル電解質、イオン性液体などを応用する不燃性の電解液、安定性の高いLi合金などのLi系化合物負極の開発を行う。

#### 【リチウム硫黄電池】

開始年度	研究テーマ【委託先】	研究開発内容
H19～	全固体型リチウム電池における高容量負極の開発【物質・材料研究機構】	本研究開発は、Li-S電池を睨みながら金属微粒子、リチウム合金、金属リチウム等を用いた高容量負極材料の開発を目的とする。具体的には、これらの材料は、微粒子の凝集、合金の破壊、デンドライト生成などの課題が有るが、固体電解質を用い物質移動を抑制することで、金属微粒子を安定的に生成する。さらに、固体電解質中で安定して進行すると考えられるリチウムとの合金化、金属リチウムの生成反応を継続して生じさせることにより、負極材料の高容量化を達成することを目的とする。
H19～	全固体電池のための固体電解質および三次元メソ構造体電極の研究開発【東京工業大学】	本研究開発は、硫化物系固体電解質／硫化物正極の開発を目的とする。電解質については高い導電率を実現できる新規の結晶系硫化物電解質の創成を行い、正極についてはメソ構造体を用いた硫黄電極との複合化、電極と電解質の複合化を行い、新しい三次元構造体電極を開発する。

【多価カチオン電池】

開始年度	研究テーマ【委託先】	研究開発内容
H20～	カーボンフェルト電極マイクロ波放電を利用したマグネシウム二次電池正極活物質の研究開発【埼玉県産業技術総合センター】	本研究開発は、カーボンフェルトを用いた大気圧マイクロ波放電および加熱（CF-AMDH）により、マグネシウム二次電池正極活物質の開発を行うものである。CF-AMDHによって特徴的に合成されるディスオーダー構造の金属複合酸化物により、エネルギー密度の向上を狙う。

【新形態リチウムイオン二次電池】

開始年度	研究テーマ【委託先】	研究開発内容
H19～	リチウムイオン液体を用いた安全性と高性能を兼ね備える蓄電システム構築【横浜国立大学】	本研究開発は、イオン液体系新規電解質の開発を目的とする。リチウムイオン電池の安全性向上と高性能化を図るため、リチウム塩の分子設計により不揮発性（難燃性）と高いリチウムイオン導電性を備えたイオン液体を創成すると共に、高分子を用いて薄膜化したイオンゲルの創成を行う。更に、リチウム金属及びナノ構造制御した炭素系アノードとナノ構造制御した遷移金属酸化物系カソードを合成する。
H19～	ナノ界面制御による高容量電極の研究開発【産業技術総合研究所】	本研究開発は、ナノ界面制御により高容量正極の開発を目的とする。ナノオーダーサイズの電極活物質を合成する事により、従来のインターカレーションによる容量と共に表面疑似容量を利用することができる事が見出されており、表面疑似容量発現メカニズムを解明するとともに、ナノ構造を有する活物質の界面構造を制御することにより表面疑似容量を増大させる手法を見だし、バルク容量と表面疑似容量の併用によるリチウムイオン電池電極の高容量化を達成する。
H19～ (H22～次世代技術開発に移行)	活物質・カーボンナノ複合構造制御による高出力・大容量Liイオン二次電池の研究開発【長崎大学／東北大学】	本研究開発は、電極構成材料としての活物質・カーボン複合系材料に焦点を当て、効率的なイオン・電子移動ならびに固体内Li拡散を可能にするナノ複合構造の設計・構築を通して、Liイオン二次電池の高出力・大容量化に向けた高性能電極材料を開発する。

H19～	電極作製にガスデポジション法を利用したリチウム二次電池の研究開発【鳥取大学】	本研究開発は、ガスデポジション法により金属合金系、酸化物系負極の開発を行うことを目的とする。これら電極材料は充電第一サイクルにおける容量可逆性が低く、サイクル寿命が短い等の課題がある。ガスデポジション法で集電体上に活物質膜を形成させれば、活物質粒子間及び粒子-基板間の密着性が格段に向上するため、これらの課題解決が期待できる。この技術を正極の作製にも展開し、硫黄系正極の利用を踏まえて、全固体電池の構築も目指す。
H19～	鋳型法を利用した革新的リチウムイオン電池負極材料の開発研究【東北大学】	本研究開発は、ゼオライト微粒子を鋳型とするアプローチにより、Si-C系負極の開発を目的とする。具体的には、外側に緻密な炭素層、内部に多孔質構造の二重構造を持つ炭素微粒子を合成し、緻密な炭素層で被覆した多孔質炭素微粒子の負極材料を目指す。さらに、ゼオライト細孔内に炭素を充填した後にゼオライトの主成分であるSiO <sub>2</sub> をSiに還元し、さらに粒子外表面を緻密な炭素層で被覆することで、Siナノ粒子が高分散した炭素微粒子を合成する。
H19～	構造規制型新規金属負極の研究開発【首都大学東京】	本研究開発は、三次元規則配列多孔体を採用して、合金系負極、リチウム金属負極の研究開発を行うものである。このような構造を電極に適用することで局所電流密度を抑え電流分布を均一化し、電極表面形態の可逆性を維持することができる。
H20～	ソフト溶液プロセスを基盤とする高容量電極材料の研究開発【神戸大学／岩手大学】	本研究開発は、各種金属酸化物およびその複合体の合成において、低温プロセスを利用し、正極材料の高次構造化に対する課題抽出とその解決に向けた材料の最適化を図る。安価な高分子溶液を反応媒体とする液相析出法、溶液をベースとした低温プロセスを使用し、低コスト・低環境負荷プロセスにより高容量電極を作製する。
H20～	第一原理計算に基づいた次世代イオン伝導材料設計技術の開発【京都大学／トヨタ自動車／ファインセラミックスセンター】	本研究開発では、高性能無機固体電解質の材料開発を目指し、第一原理計算に基づき、原子の空間配置を非経験的かつ定量的に評価する複雑無機化合物構造シミュレーション法と無機化合物中の伝導イオンのジャンプを定量的に評価するシミュレーション法を開発する。

H20～	ホウ素化合物を用いた高性能液体電解質の研究開発【静岡大学】	本研究開発は、ホウ素化合物の特性を利用した高性能で燃焼性の低い新規なりチウム二次電池用電解質の開発することを目的とする。新規なホウ素化合物を分子設計、合成し、薄膜電極と組み合わせてその電気化学的及び熱的性質を明らかにする。
H20～	イオン液体電解液を用いたリチウム二次電池の研究開発【慶應義塾大学／東京理科大学】	本研究開発は、イオン液体を電解液として、グライムやクラウンエーテルといった新規添加剤およびポリアクリル酸などの高分子による電極の化学修飾によって負極および正極の性能向上を目指す。負極にはスズまたはケイ素を主体とした合金負極を、正極は主にマンガン酸リチウムおよびオリビン型リン酸鉄リチウムを用いる。
H20～	液相マイクロ波プロセスによる次世代高容量活物質の研究開発【産業技術総合研究所】	本研究開発では、ナノ粒子の合成技術として、粒度分布のない、均一な粒子を合成可能な液相マイクロ波プロセスを用いる。本手法により、粒子サイズ制御による高性能化、量産技術の検討を行う。
H21～	高容量化を目指した多価反応可能な自己組織生成リチウム電池正極材料の研究開発【名古屋工業大学】	本研究開発は、多価電荷移動により複数の化学量論リチウムイオンを脱挿入可能な正極材料の開発を目的とする。本提案では高酸化状態を有するケギン型 $K_4[PMo_{12}O_{40}]$ に代表されるポリ酸正極の改良、新規探索を進めて問題となるサイクル特性も併せて改善して、最終的に放電電圧 3V、容量 200-250 mA.g で 300 サイクル以上の安定性を実現することを目標とする。
H21～	シリサイド・ナノ・ハイブリッド負極材料【古河電気工業／古河電池】	本研究開発は、高容量化が期待される Si 系材料の耐久性を改善して、かつ高容量化を実現することを目的とする。本提案では既に開発済みの独自のシリサイドと Si 系活物質との球状複合ナノ粒子を用いた電極化技術を開発して 500 サイクルで 1,000 mAh/g の放電容量を達成する。
H21～	高压合成法による次世代高容量正極材料酸化物の材料設計【産業技術総合研究所／東京理科大学】	本研究開発は、高压合成手法を用いて新規の結晶構造を有する Li マンガン酸化物を合成して高容量正極材料を開発することを目的とする。本提案では既に開発済みの $Li_2Mn_2O_4$ 、 $Li_3Mn_2O_4$ をベースにして Mn を他の遷移金属に置換するなどして高性能化を図りつつ、更な

		る新結晶相の探索を行い、リチウム負極との組み合わせで酸化物当たり 1,200 Wh/kg 以上のエネルギー密度を達成することを最終目標とする。
H21～	4d 遷移金属コンバージョン系による高容量正極材料の研究開発【東京大学】	本研究開発は、4d 遷移金属コンバージョン反応を用いた高容量正極材料を開発する。材料には $(Ru_{1-x}Mo_x)O_2$ 固溶体を用いて理論容量特性、部分フッ素化で高電圧化などを行い、パック電池レベルで 500 Wh/kg を見通す材料特性を提示することを目標とする。
H21～	含フッ素溶媒による高電圧駆動電解液の研究開発【ダイキン工業/関西大学】	本研究開発は、従来の電解液溶媒では高電圧駆動が難しい問題があった。そこで 4.5 V 以上での高電圧駆動を可能にする含フッ素化合物を用いた電解液を創製することを目的とする。本提案では各正極材料に対しての組成の適正化、添加剤効果を通じて Li 金属以外の負極材料で 500 Wh/kg を実現可能な正極材料に適用して充電終止電圧 4.5V 以上、容量利用率と保持率 90%以上を達成することを最終目標とする。

#### 【解析技術】

開始年度	研究テーマ【委託先】	研究開発内容
H21～	実験融合マルチレベルコンビナトリアル計算化学にもとづく次世代電池技術開発支援シミュレータの開発と応用【東北大学】	本研究開発は、電池開発のための新しい研究手法支援ツールを開発することを目的とする。具体的には材料探索のためのコンビナトリアル計算化学を用いた高速理論スクリーニング法、3次元原子配置の同定ができる計測シュミレーション手法、新規電池系の性能シュミレーションソフトの開発である。最終的には十分にデータのない電池系の事前評価が可能なものに仕上げることが目標となる。
H21～	リチウムイオン2次電池の過剰な負荷条件下における電極界面の原子・分子レベル解析技術開発【東北大学】	本研究開発は、分光法を用いたその場観察の解析手法を開発して材料設計に関する指針を得ることを主目的とする。具体的には近年研究が盛んな 5V 級正極において不安定な高電圧 (4.5 V) での正極電極、過剰な負荷条件下での負極材料の電極界面構造を明らかにして材料設計の指針を得ることを最終目標とする。併せて新規な正極薄膜化技術を開発する。



表Ⅲ.1-23 で示した開発内容について、構成部材（正極材料、負極材料、電解質材料）の観点からまとめた技術分野マップを図Ⅲ.1-7 に示す。また、表Ⅲ.1-24 に革新的蓄電池の特徴をまとめて示す。

イオン		負極	電解質	正極		
Li <sup>+</sup>	C	東北大/長崎大 Si/C	ダイキン/調大 フッ素系電解液	産総研 VO <sub>2</sub> , LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 等	酸化物	
	Si系	古河電工/古河電池 シリサイド/Si 物材研 Li <sub>2</sub> SiS <sub>3</sub> 等	鳥取大 遷移金属/Si合金 横国大 鋳体-Li塩イオン液体 慶応大/東理大 添加剤/界面修飾	東理大/産総研 Li-Mn系酸化物 名工大 鋳体 東大 4d遷移金属酸化物		
	酸化物	神戸大/岩手大 SnO <sub>2</sub> 等	産総研 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 等	静岡大 ホウ化物 京大/日油/JCC 無機固体		東北大 V <sub>2</sub> O <sub>6</sub> 等
	合金	首都大 Sn合金/Li				
	金属			チオリシコン SiC 東工大		S (硫黄系)
Zn <sup>2+</sup>		東大/産総研 ZnO	アルカリ液/アニオン交換膜 アルミニウム極 イオン液体		O <sub>2</sub> (空気系)	
Al <sup>3+</sup>						
Mg <sup>2+</sup>				埼玉産技セ 硫黄ドーパ酸化物	Mg化合物	
解析		東北大 電極劣化解析	東北大 シミュレーション			

図Ⅲ.1-7 次世代技術開発の採択テーマ技術分野マップ

## (2) 開発目標

本次世代技術開発の研究開発目標として、最終目標を「2030年以降において、電池パッケレベルで重量エネルギー密度 700Wh/kg 以上という革新的な性能を実現することを目指して、現状の技術レベルの延長線上にない、経済性、性能面でのブレークスルーが期待できる新しい材料（正極、負極、電解質等）や新しい電池系（合金系、金属系等）の基礎研究開発を実施する」と定めた。各委託先の達成目標については、それぞれの中間目標、最終目標を、採択決定後に NEDO と委託先との間で最終目標を踏まえ、協議して決定した。表 Ⅲ.1-25 に開発項目毎に目標と達成度および成果例と課題例のまとめを示す。

表Ⅲ.1-24 革新的蓄電池のまとめ

	空気電池		Mg 電池	LiS 電池	
	Zn	Li		(全固体系)	(液体系)
エネルギー密度 (理論容量) Wh/kg	1350 (酸素を含まない)	11966 (酸素を含まない)	513 (MgMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	4350	4350
主な課題	空気極 (正極) 触媒の性能向上 サイクル特性・低温特性 デンドライトの析出抑制		ホスト化合物 (正極)・電解質の探索  サイクル特性  最適な電池構成の構築	電子導電性の確保 水との反応による H <sub>2</sub> S 生成	
		Li 負極の安全性		固体電解質界面での反応制御	有機電解液への S の溶出
実用例	一次電池としては実用化 (補聴器用)				

表Ⅲ.1-25 開発目標と達成度

開発項目	個別目標	最終目標 (コインセル相当)	達成度	成果と課題
金属-空気電池	<ul style="list-style-type: none"> <li>・デンドライト析出制御</li> <li>・充放電容量</li> <li>・重量エネルギー密度</li> <li>・充放電効率</li> <li>・電解質膜の開発</li> </ul> 等の目標を委託先ごとに設定	重量エネルギー密度: 500Wh/kg の見通しを示すこと		成果例: プロトタイプセルで充放電サイクル (~100 回) を確認。 課題例: セル抵抗の低減、電解質の改善等の検討が必要。
リチウム硫黄電池	<ul style="list-style-type: none"> <li>・初期放電容量 (活物質)</li> <li>・サイクル寿命 (活物質)</li> <li>・出力特性 (固体電解質)</li> <li>・電位窓 (固体電解質)</li> <li>・輸率 (固体電解質)</li> <li>・イオン伝導率 (固体電解質)</li> </ul> 等の目標を委託先ごとに設定			成果例: 正極の可逆容量、サイクル数の目標値を達成。 課題例: 固体電解質の導電率向上と可逆性向上が必要。

多価カチオン電池	<ul style="list-style-type: none"> <li>・初期放電容量</li> <li>・サイクル寿命</li> </ul> 等の目標を委託先ごとに設定		成果例：初期放電容量とサイクル寿命は目標を達成。 課題例：正負極に対して安定な電解液探索が必要。
解析技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ラマン分光測定・解析技術</li> <li>・性能評価ソフトウェア</li> </ul> 等の目標を委託先ごとに設定		成果例：FT ラマン分光法によるその場解析に成功。電池材料の理論スクリーニング手法の開発に成功。 課題例：実電池の性能向上への寄与と新規電池への適用。
新形態リチウムイオン二次電池	<ul style="list-style-type: none"> <li>・初期放電容量(活物質)</li> <li>・サイクル寿命(活物質)</li> <li>・出力特性(固体電解質)</li> <li>・電位窓(イオン液体、有機電解液)</li> <li>・輸率(イオン液体、有機電解液)</li> <li>・イオン伝導率(イオン液体、有機電解液)</li> <li>・バインダー探索</li> <li>・計算化学(無機固体電解質)</li> </ul> 等の目標を委託先ごとに設定		成果例：コンバージョン系正極活物質の高初期容量を確認するとともに、平均放電電圧の向上技術を見出した。導電性付与負極材料を合成、高初期容量を確認するとともに、サイクル寿命も目標を達成。新規電解液材料を合成、高耐電圧、高イオン伝導度を達成。 課題例：量産化技術、電極製造プロセスの開発、低コスト化等の検討が必要。また他の構成材料との組み合わせ、セル試作による安全性・信頼性についての検討が必要。

○：達成、△：達成見込み、×：未達

(3) 知的財産権、成果の普及

知的財産権や成果の普及に関わる活動結果を、表 1-26 (委託先ごとに集計) および表 1-27 (開発項目ごとに集計) に示す。論文発表、研究発表/講演を中心に成果を堅実に積上げている。

表Ⅲ.1-26 知的財産権、成果の普及に関わる活動結果 (次世代技術開発)

研究テーマ名	委託先	特許 出願 (外国 出願)	国内 登録 (外国 登録)	論文 発表 (査読 付)	研究 発表/ 講演	受賞	新聞/ 雑誌	展示会
リチウムイオン液体を用いた安全性と高性能を兼ね備える蓄電システム構築	横浜国立大学	2	0	17 (14)	86	0	0	0
全固体型リチウム電池における高容量負極の研究開発	物質・材料研究機構	1 (1)	0	18 (9)	85	0	0	1
リチウム空気二次電池用リチウム-固体電解質複合負極の研究開発	三重大学	3	0	17 (16)	50	0	5	0
エネルギー密度の革新を目指した金属-空気電池の二次電池化	京都大学、産業技術総合研究所	3 (2)	0	4 (2)	11	0	0	0
ナノ界面制御による高容量電極の研究開発	産業技術総合研究所	0	0	9 (9)	15	0	0	0
活物質・カーボンナノ複合構造制御による高出力・大容量Liイオン二次電池の研究開発	長崎大学、東北大学	5 (3)	0	12 (12)	82	0	11	0
電極作製にガスデポジション法を利用したリチウム二次電池の研究開発	鳥取大学	3 (1)	0	9 (8)	68	3	20	0

鋳型法を利用した革新的リチウムイオン電池負極材料の開発研究	東北大学	2 (1)	0	2 (2)	19	4	0	1
構造規制型新規金属負極の研究開発	首都大学 東京	1	1	3 (3)	29	0	3	1
全固体電池のための固体電解質及び三次元メソ構造体電極の研究開発	東京工業 大学	2	1	4 (4)	35	0	1	0
ソフト溶液プロセスを基盤とする高容量電極材料の研究開発	神戸大学、 岩手大学	2	0	3 (2)	42	1	1	0
第一原理計算に基づいた次世代イオン伝導材料設計技術の開発	京都大学、 トヨタ自動車、 ファインセラミックス センター	0	0	0	8	1	0	0
ホウ素化合物を用いた高性能液体電解質の研究開発	静岡大学	2 (2)	2 (3)	2 (2)	20	1	2	0
Li系金属-空気2次電池の性能向上に関する研究	九州大学	0	0	6 (6)	19	2	8	0
イオン液体電解液を用いたリチウム二次電池の研究開発	慶応義塾、 東京理科大学	2 (1)	0	21 (20)	138	3	10	0
カーボンフェルト電極マイクロ波放電を利用したマグネシウム二次電池正極活物質の研究開発	埼玉県産業技術総合センター	4	0	2 (2)	4	0	9	2
液相マイクロ波プロセスによる次世代高容量活物質の研究開発	産業技術総合研究所	0	0	3 (3)	21	0	0	1

高容量化を目指した多価反応可能な自己組織生成リチウム電池正極材料の研究開発	名古屋工業大学	1	0	2 (2)	12	1	0	0
シリサイド・ナノ・ハイブリッド負極材料の研究開発	古河電工、古河電池	6 (2)	0	2 (2)	3	0	0	0
実験融合マルチレベルコンビナトリアル計算化学にもとづく次世代電池技術開発支援シミュレータの開発と応用	東北大学 未来科学 共同研究 センター	0	0	29 (29)	43	9	5	5
リチウムイオン2次電池の過剰な負荷条件下における電極界面の原子・分子レベル解析技術開発	東北大学 学際科学 国際高等 研究センター	0	0	4 (4)	23	0	1	0
高圧合成法による次世代高容量正極材料酸化物の材料設計	東京理科大学、産業技術総合研究所	2	2	1 (1)	15	0	0	1
d遷移金属コンバージョン系による高容量正極材料の研究開発	東京大学	0	0	0	5	0	0	0
含フッ素溶媒による高電圧駆動電解液の研究開発	関西大学、ダイキン工業	0	0	2 (2)	15	0	2	2
合計（次世代技術）		41 (13)	6 (3)	172 (154)	848	25	78	13

表Ⅲ.1-27 知的財産権、成果の普及に関わる活動結果（次世代技術開発－開発項目ごと）

開発項目 (テーマ数)	金属－空気 電池 (3)	リチウム硫 黄電池 (2)	多価カチオ ン電池 (1)	解析技術 (2)	新形態リチ ウムイオン 電池 (16)	計
特許出願	6	3	4	0	28	41
うち、外国出願	2	1	0	0	10	13
国内登録	0	1	0	0	5	6
外国登録	0	0	0	0	3	3
論文	27	22	2	33	88	172
うち、査読付き	24	13	2	33	82	154
研究発表/講演	80	120	4	66	578	848
受賞実績	2	0	0	9	14	25
新聞・雑誌	13	1	9	6	49	78
展示会	0	1	2	5	5	13

## 1. 5 基盤技術開発

本事業の狙いは、次世代自動車用蓄電池の安全性、寿命予測、性能評価などの共通基盤的な技術の開発とそれらの標準化・規格化を推進し、高性能蓄電池の実用化、市場形成に資することである。そのためには、電池反応や劣化メカニズム等の解析技術、高度な材料分析技術、電池性能評価技術、自動車の安全性や標準化・規格化に関わる知見など、幅広い学識、経験を結集する必要がある。本事業では以下の4つの委託先が連携し開発する体制を構築した：電力中央研究所、産業技術総合研究所、日本自動車研究所、東北大学。本事業の最終の開発目標は表 1-28 に示すとおりである。事業全体としての成果を以下の通りまとめる。

### (1) 開発目標

開発目標に対する開発内容および達成度を表 III.1-29 に示す。次世代自動車用高性能蓄電池用の基本性能、寿命、安全性に関わる共通的な試験方法を策定し、且つ要素技術開発（電池開発）の開発電池の評価にも適用している。また開発した基本性能評価法は IEC62660-1 として、安全性試験方法は IEC62660-2 として国際規格化されており、標準化・規格化活動としても成果を上げている。劣化要因の解明においては、放射光施設を用いた分光法や新規な *in situ* の分析手法（アコースティックエミッション（AE）法による電極破壊機構の解明等）を開発し、劣化解析技術の高度化、電極の劣化モデル（正・負極）の提案等の成果につなげている。以上、計画した成果を着実に達成すると共に、要素技術開発（電池開発）への適用や国際標準化活動等、外部に向けても成果出しが十分行われている。

### (2) 知的財産権、成果の普及

特許出願、論文、研究発表等、知的財産、標準化活動に関わる活動件数を表 III. 1-30 に示す。本事業は個別の機器を直接開発するものではないため、特許出願が殆ど無い。一方で、国際的な規格会議の場で標準化の新規提案や既に成立している規格の修正提案等の活動を行っている。標準化・規格化活動における規格や内容等の詳細を表 III. 1-31 に示す。

学会発表等は積極的に行われている。

表 III.1-28 基盤技術開発の開発目標

開発項目①	基本性能評価試験方法の選定 ・基本性能評価項目、試験条件の明確化 ・開発電池（要素技術開発）への提案
開発項目②	加速劣化試験による寿命評価手法の開発 ・加速寿命診断法の提案（5倍加速）
開発項目③	劣化要因の解明とその抑制手法、解析手法の開発 ・劣化要因の解明とその抑制手法の提案
開発項目④	安全性試験方法 ・自動車用蓄電池の安全性評価試験法の策定 ・開発電池（要素技術開発）への提案
開発項目⑤	次世代自動車用蓄電池評価試験方法の標準化・規格化 ・有識者委員会を設け試験法の標準案・規格案を策定 ・国際標準（IEC、ISO）の活動情報を入手し、標準化に適切に対応する



表Ⅲ.1-29 基盤技術開発の達成度評価

項目	目標（最終）	開発内容	達成度
①基本性能試験法の選定	・試験方法選定 ・開発電池への提案、適用	・PHEV自動車の要求性能、自動車走行パターン等に基づき試験項目、方法を策定。 ・IECにも採用された共通的な試験方法 ・要素技術開発の電池の共通評価条件に採用	
②加速劣化試験による寿命評価手法	加速寿命診断法の確立(5倍加速)	・サイクル試験と保存試験からの外挿による寿命推定手法を提案 ・要素技術開発の電池の共通評価条件に採用	
③劣化要因の解明とその抑制手法	劣化要因の解明とその抑制手法の提案	・各種条件における劣化要因を推定(劣化モデル提案) ・電池劣化の解析手法として放射光分光法や in situ 分析手法(AE法等)を開発 ・電池性劣化の抑制手法を提案(粒子正面修飾)	
④安全性評価試験方法	車載用電池安全性試験法の策定	・安全性評価項目、手法を提案 ・IECにも採用された共通的な試験方法 ・要素技術開発の電池の共通評価条件に採用	
⑤次世代自動車用蓄電池評価試験法の標準化・規格化	IEC/ISO制定、国連輸送規程の適正化	・IEC62660-1,2など日本新規提案で制定。 ・その他IECやISO制定の国際活動に対応。(計21件の国際規格審議に参加)	

表Ⅲ.1-30 知的財産権、成果の普及に関わる活動結果（基盤技術開発）

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	0	0	1	0	1	2
うち、外国出願	0	0	0	0	0	0
国内登録	0	0	0	0	0	0
海外登録	0	0	0	0	0	0
論文	0	2	17	12	14	45
うち、査読付き論文	0	0	9	5	8	22
研究発表・講演	3	33	52	45	43	176
受賞実績	0	0	0	1	1	2
新聞・雑誌等への掲載	0	0	4	0	0	4
展示会への出展	0	0	0	0	1	1
規格・標準	0	0	0	3	3	6 <sup>a)</sup>
うち、日本提案	0	0	0	2	1	3 <sup>b)</sup>
合計	3	35	74	61	63	236

a)上記に加え、2012年度発行2件、継続審議中13件 b)上記に加え、継続審議中4件

表Ⅲ.1-31 標準化・規格化活動の詳細

項目	目標値（最終）	達成値	達成度	備考
IEC 62660-1	IS	IS		日本新規提案
IEC 62660-2	IS	IS		日本新規提案
ISO 12405-1	IS	IS		
ISO 12405-2	IS	IS(発行準備中)		
ISO 12405-3	CD	CD		
IEC 61982	FDIS	FDIS		改訂
IEC 62196-1	IS	IS		改訂
IEC 62196-2	IS	IS		日本新規提案
IEC 62196-3	CD	CD		日本新規提案
IEC 61851-1	IS	IS		改訂
IEC 61851-21	CD	CD		改訂
IEC 61851-22	CD	CD		改訂
IEC 61851-23	CD	CD		日本新規提案
IEC 61851-24	CD	CD		日本新規提案
ISO/IEC 15118-1	DIS/CDV	DIS/CDV		
ISO/IEC 15118-2	CD	CD		
ISO/IEC 15118-3	CD	CD		
IEC 61980-1	CD	WD		
ISO/IEC 16898	CD	CD		日・独新規提案
ISO 17409	WD	WD		
国連輸送規制の適正化	2008年勧告に適正化反映	2008年勧告に適正化反映		

## 2. 研究開発項目毎の成果

### 2. 1 要素技術開発（電池開発）

#### 2. 1. 1 高性能リチウムイオン電池（複合システム）の研究開発 （GSユアサ）

##### （1）事業目的

本研究開発では、次世代自動車、特に次世代 PHEV のエネルギー効率の向上につながる高性能リチウムイオン電池の開発を目的とした。具体的には、リチウムイオン電池の正極として、「層状酸化物材料」に、「ポリアニオン材料」を加えた複合活物質を適応することで、本プロジェクトの開発目標として掲げられた質量エネルギー密度、質量出力密度、体積エネルギー密度、体積出力密度、寿命、充放電効率、コスト、安全性という多岐の性能を単電池および電池モジュールにて具現化し、次世代自動車の実用化を促進することを目指した。

##### （2）事業概要

図 .2.1.1-1 に研究開発の概要を示す。リチウムイオン電池の正極として、「層状酸化物材料」に、「ポリアニオン材料」を加えた複合活物質を適応することで、質量エネルギー密度 129 Wh / kg、質量出力密度 2770 W / kg の 13Ah 級リチウムイオン電池と、この単電池を使った電池モジュールとを開発した。この単電池を用いてサイクル、保存、安全性などの試験をおこなうことで、10 年以上の寿命や安全性について実証し、本プロジェクトの目標性能に十分到達していることを明らかにした。また、この単電池を用いて 0.3 kWh 級電池モジュールを作製し、振動試験、結露試験、熱衝撃試験、衝撃試験をおこない、車載を想定した試験を実施した。開発した電池モジュールは、これらの全ての試験で目標性能を満足した。さらに、電池モジュール 10 個からなる 3 kWh 級の電池パックが、年間 100 万パック生産されると仮定し、コスト試算を行った。電池モジュールの Wh 当たり単価は 37,484 円となり、このプロジェクトの価格目標を満足した。

これらの結果から、開発した単電池および電池モジュールは、次世代 PHEV の実用化に十分な性能を備えていることを明らかにした。当社は、本プロジェクトの成果をもとに、次世代 PHEV 用電池システム技術を完成させ、これらの電池の早期量産化を進める予定である。

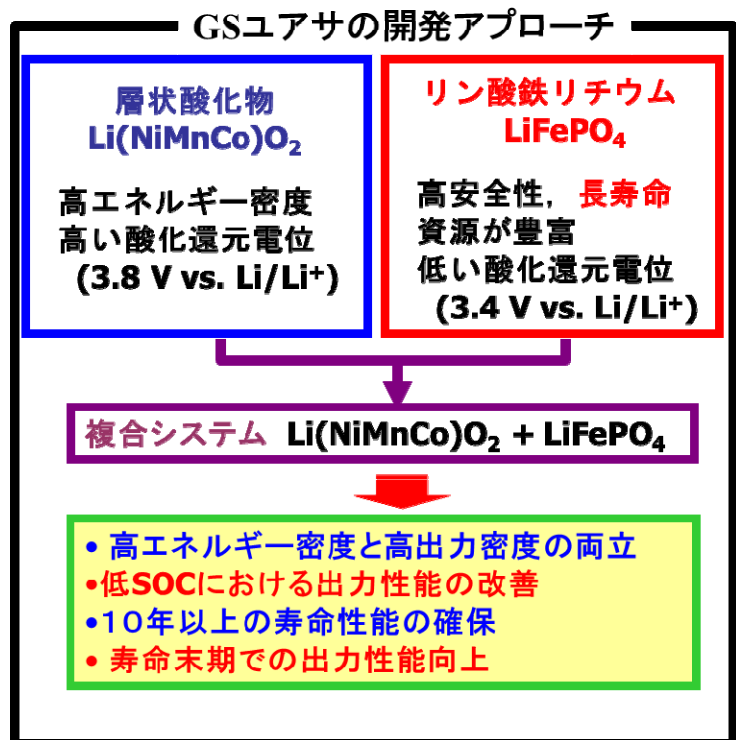


図 .2.1.1-1 研究開発の概要

(3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.1.1-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
(a) 単電池開発						
材料要素技術開発	← 21年度(▲) 22年度(●) →					
電池要素技術開発	← 21年度(▲) 22年度(●) →					
電池構造要素技術開発	← 21年度(▲) 23年度(●) →					
(b) モジュール電池開発						
回路要素技術開発	← 20年度(▲) 21年度(●) →					
モジュール電池要素技術開発		← 22年度(▲) 23年度(●) →				
開発費用(百万円)	135.1	128.2	127.1	120.0	84.0	計594.4

(4) 研究開発の実施体制

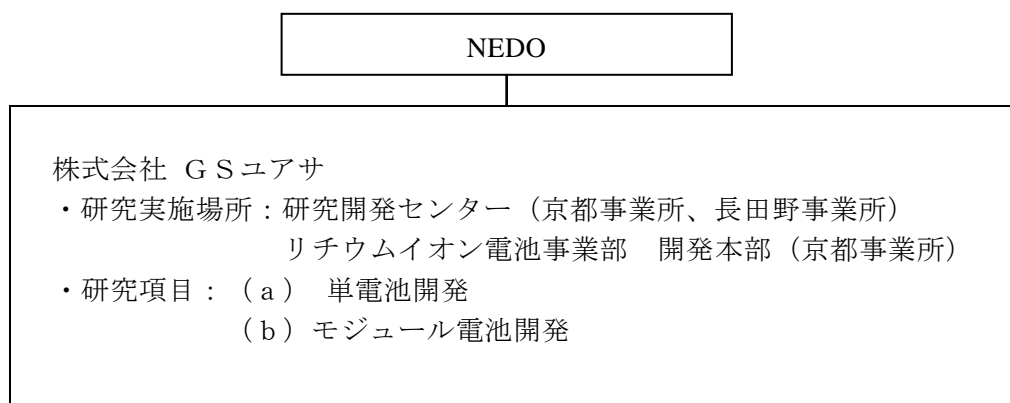


図 .2.1.1-2 研究開発の実施体制

(5) 研究開発目標と根拠

表 .2.1.1-2 研究開発目標と根拠

研究開発項目	研究開発目標	根拠
①質量エネルギー密度	100 Wh/kg	2015年を目途にコンピューター型電気自動車(航続距離150km程度、4人乗り)、燃料電池自動車、プラグインハイブリッド自動車の量産が可能な電池性能として目標を設定 ・エネルギー密度が現状の約1.5倍 ・コストが現状の約1/7  (参考)現状の蓄電池性能 ・電池システム重量エネルギー密度: 70Wh/kg ・電池システムコスト: 20万円/kWh
②質量出力密度(SOC50%)	2000 W/kg	
③寿命	10年以上	
④充放電効率	95%以上	
⑤コスト	4万円/kWh (100万パック/年生産時)	
⑥安全性	車載時の濫用に耐える	

## (6) 研究開発成果

表 2.1.1-2 に、本プロジェクトにおける研究成果の一覧を示す。

表 2.1.1-3 研究成果 (一覧)

項目		目標値	達成値	達成度	備考
質量エネルギー密度		100 Wh / kg	110 Wh / kg		
質量出力密度 (SOC50%)		2000 W / kg	2691 W / kg		
体積エネルギー密度		120 Wh / l	158 W / l		
体積出力密度		2400 W / l	3845 W / l		
充放電効率		95%以上	95.3%		
安全性能 ・ 信頼性能	単電池	圧壊試験	車載時の濫用に耐えること (破裂発火なきこと)	変化なし	
		外部短絡試験		変化なし	
		過充電試験		安全弁開放	
		加熱試験		変化なし	
		強制放電試験		変化なし	
	モジュール	振動試験	車載時の濫用に耐えること (試験前後の外観に変化なきこと) (容量変化 50%以下であること) (設計絶縁抵抗以上であること)	達成	
		衝撃試験		達成	
		結露試験		達成	
		熱衝撃試験		達成	
コスト試算		40,000 円 / kWh (100 万パック / 年 生産時)	37484 円 / kWh		
寿命性能	質量エネルギー密度	10 年後 63 Wh / kg	67 Wh / kg		
	質量出力密度	10 年後 750 W / kg	1161 W / kg		

### (a) 単電池開発

本プロジェクトの開発目標を達成するために、層状酸化物材料として  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$  と、各種ポリアニオン材料として  $\text{LiFePO}_4$ 、 $\text{LiMn}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{PO}_4$ 、および  $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  との複合正極の検討を行った。まず、電池設計のために、これらの活物質を種々の割合で混合した正極について単極セルを作製し、その電気化学的特性を評価した。その結果、初期の充電電気量および放電容量は、混合するポリアニオン活物質に関係なく、ポリアニオン活物質の含有率の増加にともなって低下した。ただし、その放電容量は複合酸化物の含有率が 80% 以上では変化しないことがわかった。 $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$  と  $\text{LiFePO}_4$  との複合正極の各種混合割合での初期放電曲線を図 2.1.1-6 に示す。

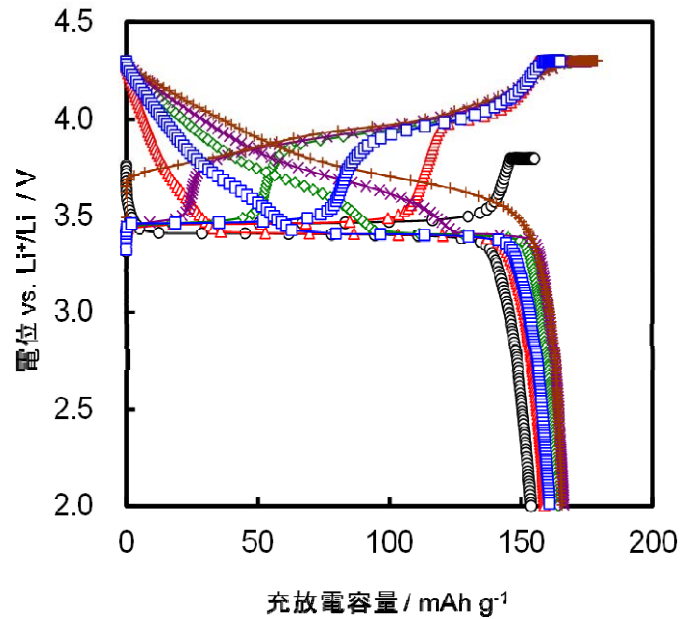
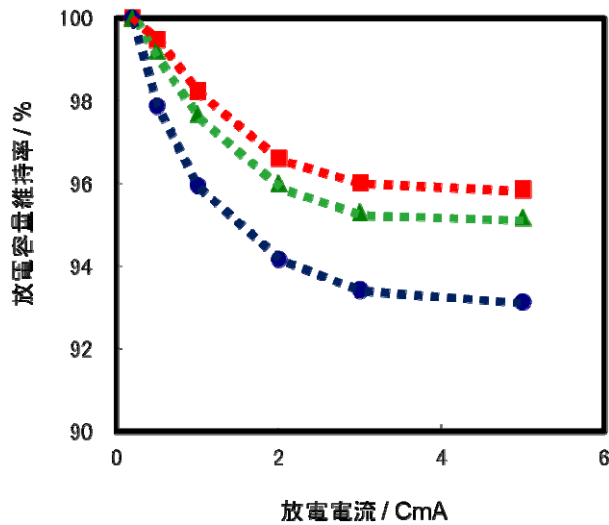


図 2.1.1-6  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$  と  $\text{LiFePO}_4$  との複合正極の初期充放電曲線  
 (  $\text{LiFePO}_4$  100% (○)、 $\text{LiFePO}_4$  80% (□)、 $\text{LiFePO}_4$  60% (△)、 $\text{LiFePO}_4$  40% (◇)、  
 $\text{LiFePO}_4$  20% (×)、 $\text{LiFePO}_4$  0% (+))

つぎに、各複合正極を適用した各小形電池を作製し、初期特性評価をおこなった。放電電流と放電容量維持率との関係を図Ⅲ2.1.1-7 に示す。



図Ⅲ2.1.1-7  $\text{LiFePO}_4$  複合電池 (○)、 $\text{LiMn}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{PO}_4$  複合電池 (□)、および  $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  複合電池 (△) における負荷率放電性能

この図から、小形電池における負荷率放電特性は  $\text{LiFePO}_4$  複合電池が最も優れ、次いで  $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  複合電池も良好であることがわかる。しかしながら、これらの複合正極をもちいた実規模電池化を検討すると、 $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  複合電池は  $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  自身の真密度が低いため、エネルギー密度の設計値がプロジェクト目標値よりも下回ることがわかった。

以上の結果より、複合正極に適用するポリアニオン材料として、開発コンセプトにマッチした  $\text{LiFePO}_4$  を選択することとした。

構造面では、単電池の高エネルギー密度化を目的に、電池の蓋とケースとの密閉にはデッドスペースのより少ない電極巻回式角型電池を採用した。その 13 Ah 級単電池の外観を図 .2.1.1-8 に、単電池の仕様を表 .2.1.1-4 に示す。

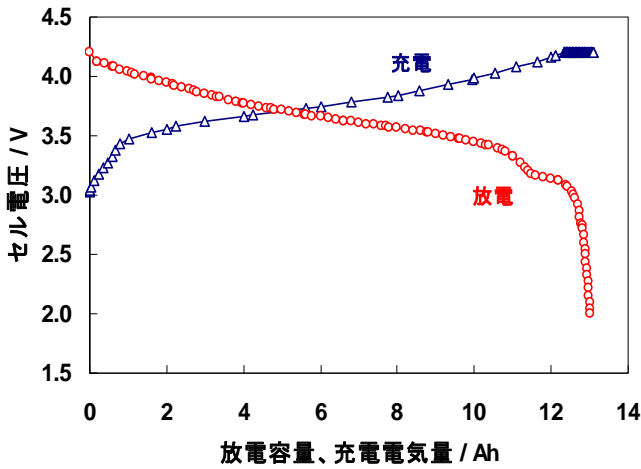


図 .2.1.1-8 13 Ah 級単電池の外観写真

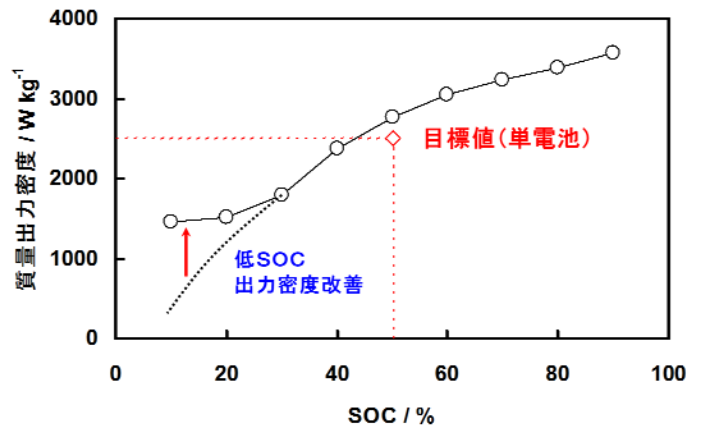
表 .2.1.1-4 単電池仕様

単電池仕様	
正極	Li(NiMnCo)O <sub>2</sub> + LiFePO <sub>4</sub>
負極	グラファイト
容量	13 Ah
平均電圧	3.62 V
寸法	112W 21D 81H mm
質量	365.0 g

これらの結果をもとに作製した最終仕様の単電池に対して、充放電試験、および入出力試験をおこなった。その結果、質量エネルギー密度が 129 Wh / kg、SOC50%における質量出力密度が 2770 W / kg、充放電効率が 95.3%と、いずれも単電池の開発目標性能を達成した。最終仕様単電池の充放電曲線を図Ⅲ.2.2.1-9 に、入出力特性を図Ⅲ.2.1.1-10 に示す。



図Ⅲ.2.1.1-9 最終仕様単電池の充放電曲線



図Ⅲ.2.1.1-10 最終仕様単電池の入出力特性

質量エネルギー密度、質量出力密度の寿命を評価するためにサイクル試験、保存試験、実使用模擬サイクル試験をおこなった。サイクル試験結果と保存試験結果からの推定と、実使用模擬サイクル試験結果からの推定との 2 つの推定方法によって評価した。表 .2.1.1-5 に寿命評価の考え方についてまとめた。

表Ⅲ.2.1.1-5 寿命評価の考え方

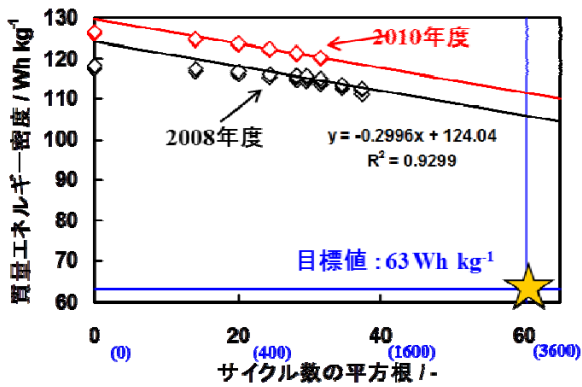
**【寿命目標】**  
 10年 (3,650 サイクル)後に、  
 質量エネルギー密度  $63 \text{ Wh kg}^{-1}$ 、  
 質量出力密度  $750 \text{ W kg}^{-1}$   
 を維持すること。

**【寿命評価の考え方】**  
 サイクル劣化および保存劣化によって電池性能が低下するものと考え、サイクル劣化試験および保存劣化試験から得られた劣化速度式から、  
 10年後の電池特性の推定を行った。  
 サイクル劣化試験：25 SOC30～90% P-CLT サイクル試験  
 保存劣化試験：25 SOC90%

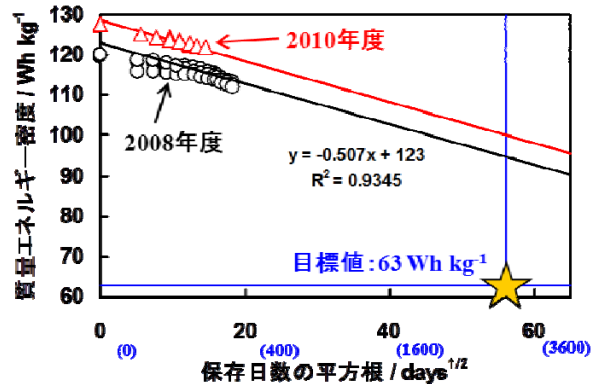
**【寿命推定方法】**  
 保存劣化試験およびサイクル劣化試験の加成性が成り立つと仮定し、サイクル劣化(3,650 サイクル)時、保存劣化(3,133 日)時の劣化を推定し、目標性能との対比を行った。

3650 日－517 日 (3,650 サイクル日数)

開発した単電池のサイクル劣化試験と保存劣化試験の結果から、質量エネルギー密度の寿命推定をおこなった。サイクル劣化試験の結果を図Ⅲ.2.1.1-11 に、保存劣化試験の結果を図.2.1.1-12 に、質量エネルギー密度の10年後の推定値を表.2.1.1-6 に示す。



図Ⅲ.2.1.1-11 サイクル劣化試験の結果



図Ⅲ.2.1.1-12 保存劣化試験の結果

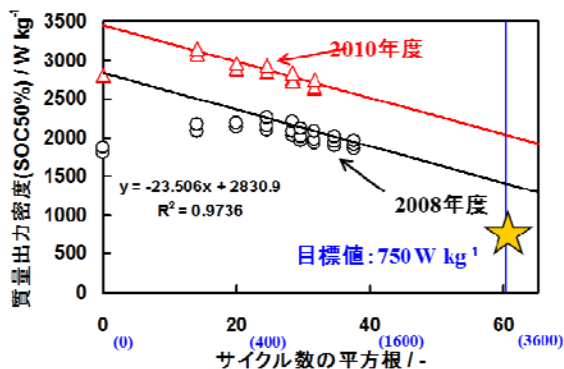
表.2.1.1-6 質量エネルギー密度の10年後の推定値

	初期	10年後の推定値【低下量】			プロジェクト 目標値	達成
		サイクル劣化分 (3650サイクル)	保存劣化分 (3133日)	劣化推定値		
質量エネルギー密度 ( $\text{Wh kg}^{-1}$ )	129	111 【△18】	100 【△28】	83 【△46】	63	○

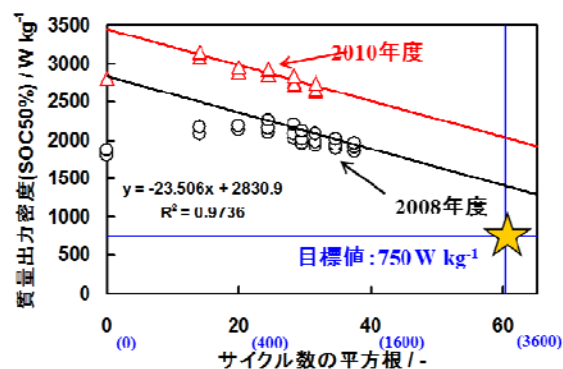


これらの結果より、10年後の質量エネルギーの寿命推定値は、83Wh/kg となり、目標(63 Wh/kg)を達成できることがわかった。

次に、開発した単電池のサイクル劣化試験と保存劣化試験の結果から、SOC50%における質量出力密度の寿命推定を行った。サイクル劣化試験の結果を図Ⅲ.2.1.1-13に、保存劣化試験の結果を図Ⅲ.2.1.1-14に、質量出力密度の10年後の推定値を表 .2.1.1-7に示す。



図Ⅲ.2.1.1-13 サイクル劣化試験の結果

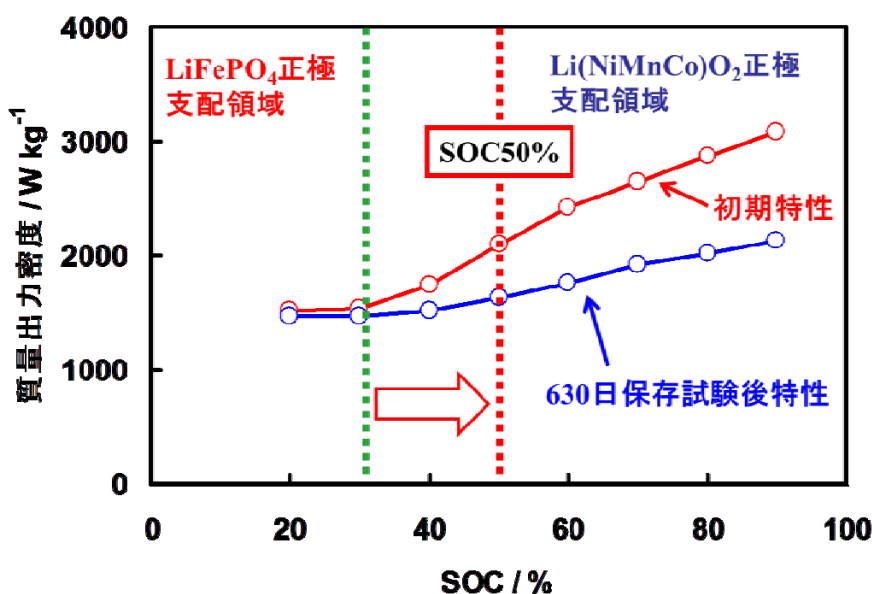


図Ⅲ.2.1.1-14 保存劣化試験の結果

表 .2.1.1-7 質量出力密度の10年後の推定値 (SOC50%)

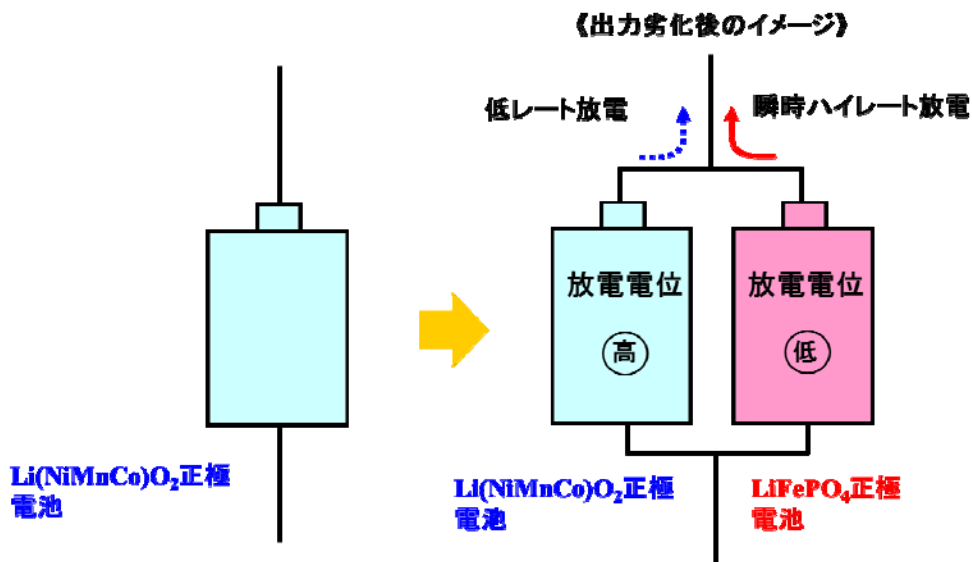
	初期	10年後の推定値【低下量】			プロジェクト 目標値	達成
		サイクル劣化分 (3650サイクル)	保存劣化分 (3133日)	劣化推定値		
質量出力密度 (W kg <sup>-1</sup> )	2770	2030 【△740】	550 【△2220】	- 【△2960】	750	×

これらの結果より、SOC50%の劣化挙動をもとに出力性能を予測すると、目標値達成が困難であることがわかった。しかしながら、保存劣化前後での出力特性を比較すると、興味深いことがわかった。図Ⅲ.2.1.1-15に、保存劣化前後での出力特性を示す。



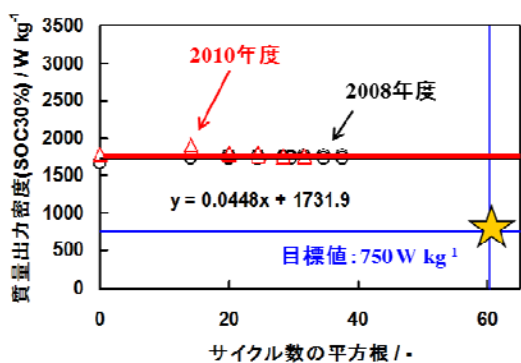
図Ⅲ.2.1.1-15 保存劣化前後での出力特性

図 .2.1.1-15 から、保存によって出力劣化は大きいものの、SOC30%以下の出力劣化はほとんど生じていないことがわかる。これは、出力特性として  $\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$  正極が支配する領域と、 $\text{LiFePO}_4$  正極が支配する領域とがあり、それぞれの劣化メカニズムが異なり、 $\text{LiFePO}_4$  正極の出力劣化が小さいことが原因であることがわかった。図Ⅲ.2.1.1-16 に、出力劣化後の出力バックアップイメージを示す。

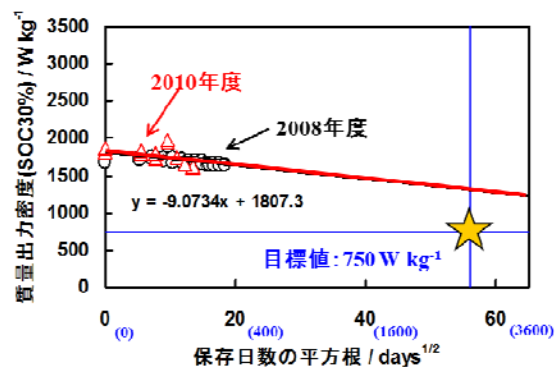


図Ⅲ.2.1.1-16 出力劣化後の出力バックアップイメージ

そこで、開発した単電池のサイクル劣化試験と保存劣化試験の結果から、SOC30%における質量出力密度の寿命推定をおこなった。サイクル劣化試験の結果を図Ⅲ.2.1.1-17 に、保存劣化試験の結果を図Ⅲ.2.1.1-18 に、質量エネルギー密度の10年後の推定値を表 .2.1.1-8 に示す。



図Ⅲ.2.1.1-17 サイクル劣化試験の結果



図Ⅲ.2.1.1-18 保存劣化試験の結果

表 .2.1.1-8 質量出力密度の10年後の推定値 (SOC30%)

	初期	10年後の推定値【低下量】			プロジェクト 目標値	達成
		サイクル劣化分 (3650サイクル)	保存劣化分 (3133日)	劣化推定値		
質量出力密度 ( $\text{W kg}^{-1}$ )	1730	1676 【△54】	1215 【△515】	1161 【△569】	750	○

これらの結果を考え合わせると、 $\text{LiFePO}_4$ を加えた複合正極を用いた開発電池は、SOC50%においても質量出力密度の目標値（750 W / kg）を達成できるものと判断した。

次に、安全性能を評価するために、圧壊試験、外部短絡試験、過充電試験、加熱試験、強制放電試験を行った。その結果、いずれの試験項目においても、破裂発火がみられなかったため、安全性能においても本プロジェクトの目標性能を達成した。表 .2.1.1-9に 単電池に安全性試験結果の一覧を示す。

表 .2.1.1-9 単電池の安全性試験結果（一覧）

評価項目	SOC	温度	試験条件※	試験結果	判定
圧壊試験	100%	RT	Φ150 mm指定ジグで指定条件まで継続	No Effect	○
加熱試験	100%	RT~130℃	RTから5℃/minで130℃まで昇温し30 min保持	No Effect	○
外部短絡試験	100%	RT	5 mΩ以下の抵抗で短絡し、10 min維持	No Effect	○
過充電試験	100%	RT	1 CAで終止電圧の2倍またはSOC200%まで充電	Venting	○
強制放電試験	0%	RT	1 CAで90 min放電	No Effect	○
貫通試験 (参考)	100%	RT	Φ 3 mmの釘で、10 mm/sの速度で貫通	Smoking	—

#### (b) モジュール電池開発

電池監視回路基板の部品点数の低減・小形化をおこなうため、部品探索をおこない、小形パッケージのヒューズやツェナーダイオード、電池の過電圧／過放電を検出する IC を採用した。

そして、柔軟性材料によるハーネスレス化の開発として、耐久性や信頼性、段差配置への柔軟性に有利であった「Flexible Printed Circuits (FPC)」を採用した。この「FPC」に電池温度測定用のサーミスタを実装することで、サーミスタ用のハーネスも削減できた。開発した電池監視回路基板および FPC を図Ⅲ.2.1.1-19に示す。

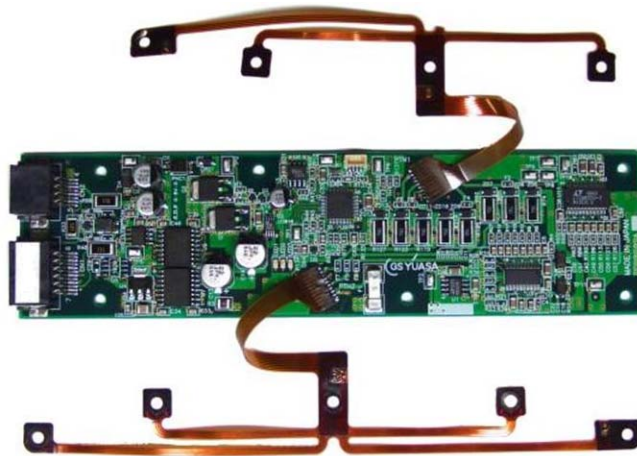
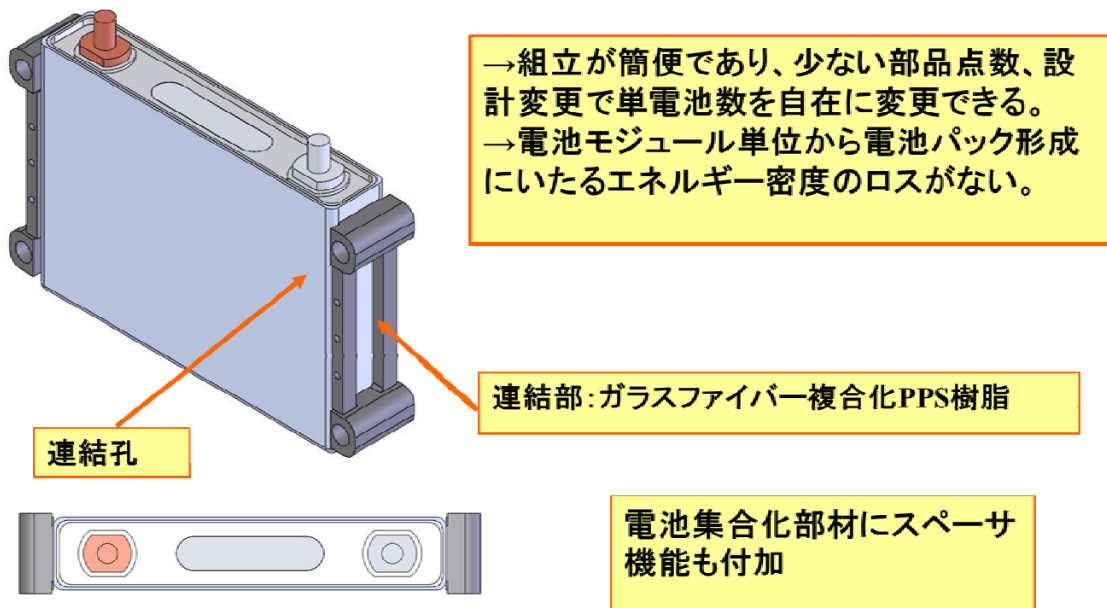
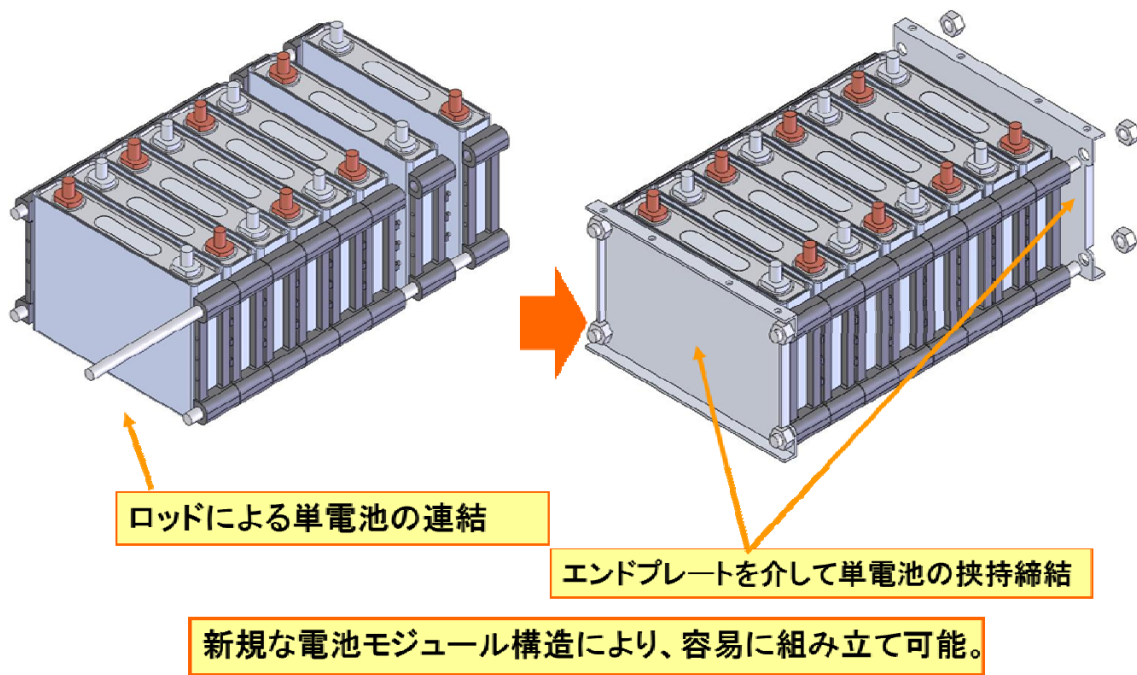


図 .2.1.1-19 電池監視回路基板および FPC

電池モジュールの設計にあたり、予備検討として、簡易モデルで冷却シミュレーションを行い、配置する単電池間隔を 2 mm とした。電池の集合方式は、電池の集合化部材が接着により一体化された電池ケースを有する単電池をその集合化部材により連結接続したのちエンドプレートで挟持締結して電池モジュールや電池パックを形成する方式（エンドプレートタイプ）を考案し、単電池を設計した。図Ⅲ.2.1.1-20 に、電池集合化部材を一体化した電池ケースを採用した単電池を、図Ⅲ.2.1.1-21 に、電池モジュール構造を示す。



図Ⅲ.2.1.1-20 電池集合化部材を一体化した電池ケースを採用した単電池



図Ⅲ.2.1.1-21 電池モジュール構造

設計した電池モジュールの強度シミュレーションをおこない、十分な耐衝撃性を有することを予測した。さらに模型を作製して衝撃試験により耐衝撃性を確認した。これによりエンドプレートタイプによる電池モジュール化を採用することとした。この方式によれば、複数の電池モジュールの出力端子同士を接続して電池パック化するという従来の構成によらなくても、任意の数の単電池を直接電池パック化することが可能であるため、最終の電池集合体である電池パックにおいて体積効率がよく、体積エネルギー密度に有利である。

以上より、電池モジュールの最終仕様を決定した。最終仕様の電池モジュールの外観写真を図 .2.1.1-22 に、電池モジュール仕様および特性を表 .2.1.1-10 に示す。

表 .2.1.1-10 電池モジュール仕様および特性



図 .2.1.1-22 電池モジュールの外観写真

電池モジュール仕様および特性	
寸法	127W 197D 96H mm
質量	3530 g
容量	13 Ah (0.37 kWh)
平均電圧	28.8 V
充放電効率	97%
質量エネルギー密度	108 Wh kg <sup>-1</sup>
質量出力密度	2630 W kg <sup>-1</sup>
体積エネルギー密度	158.8 Wh L <sup>-1</sup>
体積出力密度	3865 W L <sup>-1</sup>

最終仕様の電池モジュールに対し、車載を想定した信頼性試験を実施した。振動試験、衝撃試験、結露試験、熱衝撃試験のいずれの試験においても試験前後の外観変化、容量変化はほとんど認められず、試験後の絶縁抵抗も  $1000\text{M}\Omega$  未満と設計値以上であったことから、本プロジェクトの目標性能を達成した。表 .2.1.1-11 に電池モジュール信頼性試験結果の一覧を示す。

表 .2.1.1-11 電池モジュール信頼性試験結果（一覧）

評価項目	SOC	温度	試験条件※	判定
結露試験	50%	試験条件通り	温度 $25\leftrightarrow 80^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $55\leftrightarrow 98\%\text{RH}$ (/300 min)を5サイクル	○
振動試験	50%	RT	周波数上限200 Hz, rms加速X, Y, Z方向指定, 各方向21 h	○
熱衝撃試験	50%	試験条件通り	$-40^{\circ}\text{C}$ 1 h $\leftrightarrow$ $85^{\circ}\text{C}$ 1 h のサイクルを5サイクル実施	○
衝撃試験	50%	RT	500 m/s 2-6 msec で、最大6方向を各10回実施	○

最後に、9 モジュールユニットによる 3 ユニット×3 列配置と 10 モジュールユニットによる 5 ユニット×2 列配置による 2 種の電池パックの基本設計を行い、これらの電池パックに適合する単電池および電池モジュールをそれぞれ設計した。シミュレーションによって各々の電池パックの冷却性、および各々の電池モジュールの耐衝撃性を検討した。その結果、5 ユニット×2 列配置による電池パックが冷却性に優れ、また、同電池パックに適合する電池モジュールが耐衝撃性にすぐれることがわかった。5 ユニット×2 列配置による電池パックのコンセプトモデルの外観写真を図Ⅲ.2.1.1-23 に、その電池パック仕様および特性（試算）を表 .2.1.1-12 に示す。

表 .2.1.1-12 電池パック仕様および特性（試算）



図 .2.1.1-23 電池パックの外観写真

電池パック仕様および特性		電池パック目標値	達成
寸法	131W 971D 190H	—	—
質量	34.4 kg	—	—
容量	3.7 kWh	—	—
質量エネルギー密度	110 Wh $\text{kg}^{-1}$	100	○
質量出力密度	2691 W $\text{kg}^{-1}$	2000	○
体積エネルギー密度	157.6 Wh $\text{l}^{-1}$	120	○
体積出力密度	3845 Wh $\text{l}^{-1}$	2400	○

### (c) 経済性の検討

本事業の目標である 3 kWh 級電池パックの生産量 100 万パック/年を想定し、生産体制は、NEDO「分散型電池電力貯蔵技術開発 大型電池・モジュール技術開発平成 10 年度評価報告書（平成 11 年 3 月）」、NEDO「新型電池電力貯蔵システム開発 分散型電池電力貯蔵技術 モジュール電池開発 報告書（平成 14 年 3 月）」、および NEDO「燃料電池自動車等用リチウム電池技術開発 車載用リチウム電池技術開発 平成 17 年度～平成 18 年度 成果報告書（平成 19 年 3 月）」を参考にコスト試算の結果、最終仕様の電池モジュールを用いた 3 kWh 級電池パックシステムの電池コストは、37,484 円/kWh となり、目標である 40,000 円/kWh 以下を達成した。

### (7) 知的財産権等

プロジェクト期間中の知的財産権等の件数を表Ⅲ.2.1.1-13 に示す。

表 .2.1.1-13 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	0	6	8	6	6	26
うち、外国出願	0	0	1	0	0	1
国内登録	0	3	4	0	1	8
海外登録	0	0	0	0	0	0
論文	0	1	2	3	2	8
うち、査読付き論文	0	0	0	1	0	1
研究発表・講演	0	3	5	3	3	14
受賞実績*	0	0	0	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	1	0	1
展示会への出展	0	0	0	2	3	5
合計	0	10	15	15	14	54

### (8) 今後の課題と課題解決の見通し

本開発により、本事業の目標は達成したものの、その後の情勢変化等により、さらなるコスト低減やエネルギー密度の向上が求められている。これに加え OEM からは、低温特性などの新たな課題解決が求められている。

GS ユアサは、本プロジェクトの成果に加え、新たな材料開発や電池技術開発をすすめ、PHEV の早期普及に貢献する所存である。

### (9) 成果の実用化／活用

本事業の成果は、比較的簡便に、また大幅にコストアップすることなく PHEV 用電池に必要な特性を図ることができるものである。本事業で得られた成果を加えた PHEV の実用化を図り、その後出力バックアップが要求される新たな製品へ展開する所存である。

## 2. 1. 2 高出力可能な高エネルギー密度型リチウムイオン電池の研究開発 (日立製作所、日立ビークルエナジー)

### (1) 事業目的

我が国における現在の運輸部門の石油依存度はこれまで 100%に近い状況であったが、近年ではエネルギー戦略および環境面からの要求により、石油依存度の低減とともに、環境負荷を軽減できる次世代クリーンエネルギー自動車の早急な開発が望まれるようになり、市場に HEV、EV が複数車種展開されるようになった。

本事業では HEV のコンセプトをさらに進化させ、HEV よりさらに石油消費量を低減でき、EV の課題である最大航続距離の問題を補うことのできる PHEV の実用化に資する高性能リチウムイオン電池技術の研究開発を目的とした。

### (2) 事業概要

このテーマの中の研究開発項目を株式会社日立製作所と日立ビークルエナジー株式会社の 2 社で分担して担当した。本研究開発の対象は、PHEV 用リチウムイオン電池である。この電池は、電池のみでの走行(EV 走行)距離をより長くすることが望ましいために、高いエネルギー密度と高い入出力密度を兼備することが求められる。さらに、家庭における夜間充電が基本であり、高い SOC における保存時間が長くなることから、そのような条件での十分な保存寿命が要求される。また、EV 走行ののちに HEV 走行に移行するので、低い SOC における高い出力密度も求められる。このように、従来のリチウムイオン電池にとっては、非常に困難と思われるいくつかの課題を解決するには、電池の材料のみならず、電池構造設計、制御までに及ぶ広汎な研究開発が不可欠と想定された。

5 年計画の前半 2 年では、主として電池材料と単電池構造の研究開発に重点を置きながら、モジュール電池の一次設計まで進め、平成 20 年度には単電池で 110 Wh/kg、2,500 W/kg の性能を、モジュール電池で 100 Wh/kg、2,200 W/kg の性能をマイルストーンとして設定し、これを達成した。この成果を踏まえ、後半の 3 年間では、さらなる単電池の性能向上を進めながら、長寿命化を図り、モジュール電池については、二次、三次の設計検討を進めて、段階的に一層の軽量化・コンパクト化を推進した。それらの成果を用いて、3 kWh 級組電池の設計を最適化し、モックアップによる試算によって最終目標の 100Wh/kg、2,000W/kg を達成することを確認した。寿命予測については、開発の各段階での開発電池をサイクル試験、保存試験に投入してデータの蓄積を進め、基盤技術開発法人の(財)電力中央研究所、(独)産業技術総合研究所、(財)日本自動車研究所の策定した寿命予測手法により予測寿命を算出し、最終年度開発電池において最終目標の 10 年寿命を達成することを確認した。コスト目標については共通条件として提示された一定の生産規模での試算において、開発目標の 4 万円/kWh を達成することを確認した。



### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.1.2-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
材料の研究開発	→					
小型電池の試作・評価	→		→			
単電池の研究開発				→		
モジュール電池の研究開発	→					
組電池の研究開発			→			
劣化機構の解析			→			
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
日立ビークルエナジー	128.0	122.9	159.0	168.6	104.9	683.4
日立製作所	70.9	76.0	40.0	27.8	20.9	235.6

### (4) 研究開発の実施体制

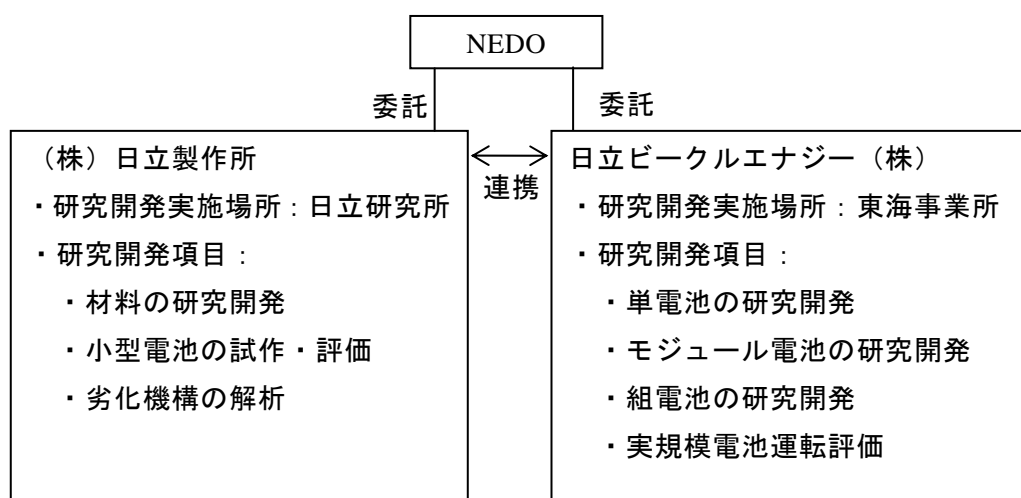


図 .2.1.2-1 研究開発の実施体制

### (5) 研究開発目標と根拠

本プロジェクトの実施にあたり、年次毎の研究開発目標を下記表のように設定した。

表 .2.1.2-2 年次毎研究開発目標

項目	平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22年度	平成23年度
重量エネルギー密度	100 Wh/kg	110 Wh/kg	115 Wh/kg	120 Wh/kg	
重量出力密度	2,500 W/kg				

(a) 中間目標

- ・単電池の特性検証: 115 Wh/kg 、 2,500 W/kg
- ・単電池の寿命予測 : 7年以上
- ・単電池の安全性試験の実施
- ・300Wh級モジュール電池の特性検証: 105 Wh/kg 、 2,200 W/kg
- ・3 kWh組電池の一次設計に基づく特性推算: 95 Wh/kg 、 2,000 W/kg

目標設定の根拠

本電池の最大の課題は、エネルギー密度や出力密度などの基本特性と寿命・安全性の並立を図る点にある。そのため、年次ごとのマイルストーンとしての性能目標を設定するにあたり、研究期間の前半には基本特性の目標値を前倒しで達成することを目指し、研究期間の後半には、寿命向上、安全性の確保に主眼を置いて研究開発を推進し、最終目標全体の達成につなげることとした。

測定方法、測定条件

測定方法及び条件は、基盤技術開発担当法人から提案された下記の通りの「初期性能試験法」及び「寿命性能試験方法」に従った。

表 .2.1.2-3 初期性能試験方法

容量試験	充電 : 1時間率定電流定電圧 (定電圧値4.2V、1.5h終止)
	放電 : 1時間率定電流放電 (終止電圧3.0V)
出力特性試験	1、0.33、0.2、0.1時間率放電の10秒目電圧から算出

表 .2.1.2-4 寿命性能試験方法

サイクル特性	PHEVの実用負荷を模擬したパルスサイクル試験 (HEVモード、EVモード、帰宅後充電の3モードで構成)
保存特性	PHEVの駐車時の状態を模擬した25 90%SOC保存。

安全性試験は、国際規格である IEC62660-2 に準じて、単電池で評価を行った。また、信頼性試験は、国際規格である ISO12405-1 に準じて、モジュール電池で評価を行った。

(b) 開発目標 (最終年度)

1)単電池目標

- ・重量エネルギー密度 : 120 Wh/kg
- ・重量出力密度 : 2,500 W/kg
- ・寿命 : 10年以上
- ・充放電効率 : 95% 以上
- ・単電池の安全性試験による安全性の確立 : 安全性試験において破裂・発火なし

2)モジュール電池目標

- ・重量エネルギー密度 : 110 Wh/kg

- ・重量出力密度：2,200 W/kg
- ・充放電効率：95% 以上

### 3)組電池目標

300Wh級モジュール電池の特性評価結果から3kWh組電池への換算値において、以下の特性を満足する。

- ・重量エネルギー密度：100 Wh/kg
- ・重量出力密度：2,000 W/kg
- ・充放電効率：95% 以上
- ・コスト：4万円/kWhの見通しを示すこと（前提条件：100万パック/年 生産時）
- ・劣化機構解析の総合検討

### 目標設定の根拠

PHEVの実用化に資する高性能リチウムイオン電池として必要な特性に基づいて設定された本プロジェクトの目標値は、組電池レベルの数値であり、それを実現するために必要な単電池、および300 Wh級モジュール電池の性能目標をこれまでの電池開発と試作の実績に基づき設定し、それぞれの段階において目標を達成することを目指した。それと同時に 3 kWh組電池の設計を進めてプロジェクト目標の達成度の推算根拠を確立することを目指した。

### 測定方法、測定条件

測定方法及び条件は基盤技術開発担当法人から提案された試験法に従った。そして、得られた結果から、サイクル特性、保存特性の劣化推移を1次もしくは1/2次の直線近似で10年後の容量劣化、出力劣化を算出し、それらの和を実用負荷による劣化と定義して寿命予測を行い、評価した。

コストは生産規模を3kWhパックで100万パック/年、直接材料費の6%がエネルギー費、建屋90億円、製造設備540億円で取得価格の10%までの定額償却という前提条件を共通条件とし、で1kWhあたりの製造コストを試算した。

## (6) 研究開発成果

開発した単電池、8セルモジュール、3kWh組電池のモックアップの写真および単電池の初期充放電曲線、入出力特性図を以下に示す。



図 .2.1.2-2 開発単電池及び8セルモジュール



図 .2.1.2-3 3kWh 組電池のモックアップ

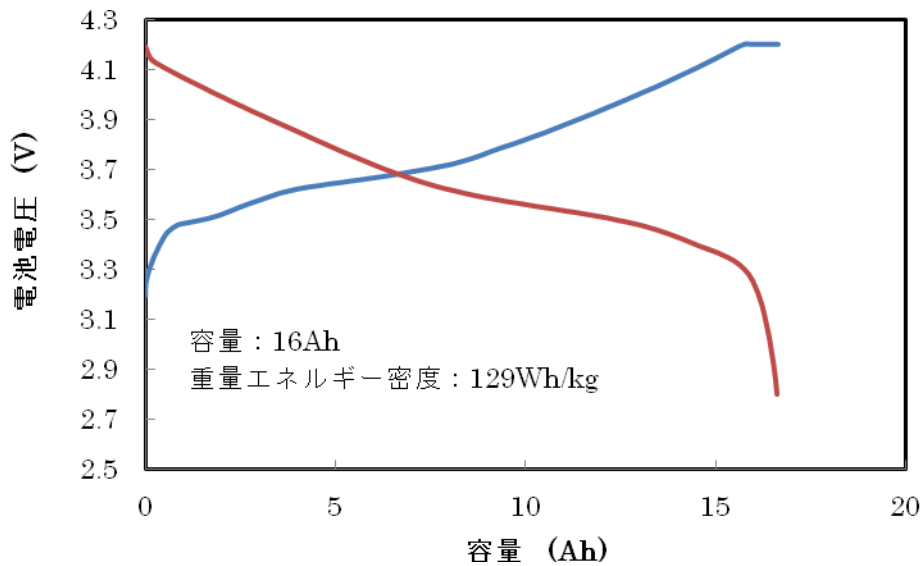


図 .2.1.2-4 平成 23 年度開発単電池の充放電曲線

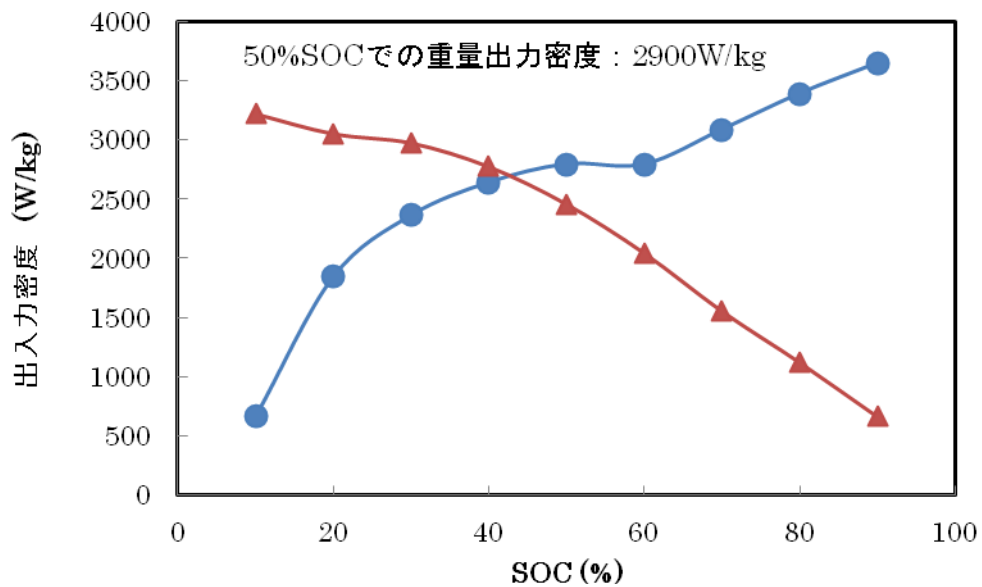


図 .2.1.2-5 平成 23 年度開発単電池の入出力特性

表 .2.1.2-5 研究成果 (一覧)

項目	目標値 (最終年度)	達成値	達成度	備考
重量エネルギー密度	100Wh/kg	111Wh/kg		セル: 129Wh/kg
体積エネルギー密度	120Wh/L	141Wh/L		セル: 222Wh/kg
重量出力密度	2,000W/kg	2,400W/kg		セル: 2,900W/kg
体積出力密度	2,400W/kg	3,040W/L		セル: 5,010W/L
寿命	10年	10年以上		
安全性 (セル)	IEC62660-2	基準を満足		
信頼性 (モジュール)	ISO12405-1	基準を満足		
コスト	¥40,000/kWh	¥35,890/kWh		

### <成果1>

(内容) エネルギー密度

(達成度)

(成果の意義)

正極活物質に Ni 含有率を高めた Ni-Mn 系層状酸化物、負極活物質には黒鉛を用い、合剤密度や容量比等の電極設計を最適化した。また必要な機能を備えつつ簡便、堅牢な電池構造設計をすることによって高いエネルギー密度を実現した。

(課題と取り組み)

正極活物質は単に Ni 比率が向上すると、不可逆容量の増大や、製造プロセス上の管理条件が違ってくること等によって、事前に想定した性能を引き出せない場合があった。これらの課題に対し、Ni 比率や粉体物性、合剤組成の最適化や製造条件の管理の厳格化により電極性能を最大限に引き出した。負極活物質は粒径、比表面積の最適化、および表面修飾などにより不可逆容量を低減し、可逆容量を増大した。電池構造は容器を比重の軽いアルミ製とし、発電要素たる電極群以外の部品体積および余剰空間を最小化することにより小型、軽量の電池構造を開発した。さらにモジュール、組電池の付加部品点数を最小限に抑え、パックでのエネルギー密度開発目標を達成した。

### <成果2>

(内容) 出力密度

(達成度)

(成果の意義)

高エネルギー密度化と相反する要素とも言える出力性能について、活物質の粒子設計、電極設計、集電構造設計の最適化により、エネルギー密度を低減することなく、開発目標値を達成した。

(課題と取り組み)

負極活物質の黒鉛は、従来の難黒鉛化炭素に比べて出力性能が低いという課題があった。そこで、黒鉛の反応活性面であるエッジ面の比率に着目し、これの高い粒子設計とすることで出力性能を向上した。また電極群からの通電パスを最短経路とする集電構造設計も出力性能の向上に大きく寄与した。さらに、モジュールと組電池にする際の直列接続の方法についても、通電パスを最短として接続抵抗による出力低下を最低限に抑えた。

### <成果3>

(内容) 寿命

(達成度)

(成果の意義)

広い SOC 範囲を使用する PHEV での使用条件に対しても、10 年という長寿命の開発目標を達成した。

(課題と取り組み)

負極活物質は比表面積を大きくすると出力性能が向上するが、表面での副反応等により抵抗膜の成長等が起り、寿命性能が低下する。前述のエッジ面比率と共に粉体物性を最適化する

ことにより寿命性能の向上を果たした。また、電解液組成および添加剤を最適化することにより、電池内部でのガス発生や抵抗膜成長を抑制し、寿命性能向上に寄与した。

充放電曲線の詳細解析により非破壊で電池の劣化状態を診断する手法を開発した。さらに、解体分析により電極の劣化機構について種々解析し、劣化要因を明らかにした。

#### <成果4>

(内容) 安全性、信頼性

(達成度)

(成果の意義)

高エネルギー密度化、高出力化は本質的に電池の安全性とトレードオフの関係にある。正極活物質の元素比率、電池構造、電解液添加剤の最適設計により開発目標の基準を満たした。またモジュール構造は堅牢に電池を固定出来る構造とし、振動や熱履歴に対して開発目標の基準を満たす信頼性を確保した。

(課題と取り組み)

ガス排出弁を構造上取りうる最大面積とし、ガス流路についても最適設計をした結果、異常使用時に電池内部でガスが発生した場合にも安全にガスを排出できる電池構造を開発した。さらに、電解液添加剤の最適化により、最も過酷な条件である過充電の安全性も改善した。

モジュール構造設計にはコンピュータシミュレーションを活用し、応力、振動、熱流についての解析をした。その結果、車載に置いて想定される振動にも共振が起こらず、空冷による冷却性も十分な性能を有するモジュール、組電池構造とすることができた。

#### <成果5>

(内容) コスト

(達成度)

(成果の意義)

コストは普及の可否を握る重要な要素である。一定の生産規模を確保できれば、開発目標を達成できることが確認できた。

(課題と取り組み)

開発プロセスの各段階で構成部品のコストを確認し、さらにコスト算出の条件についてモジュール担当の他2社と協議し、共通条件を策定した上でコストを算出し、開発目標の達成を確認した。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクト期間中の知的財産権等の件数を表 .2.1.2-6 に示す。

表 .2.1.2-6 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	1	11	13	13	11	49
うち、外国出願	1	0	1	3	3	8
国内登録	1	0	0	0	0	1
海外登録	0	0	0	0	0	
論文	0	0	0	2	0	2
うち、査読付き	0	0	0	2	0	2
研究発表・講演	0	3	2	7	4	16
受賞実績	0	0	0	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	1	3	4
合計	3	14	16	28	21	74

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

．単電池の研究開発

### 1) 材料開発

本プロジェクトでは、PHEV用に高エネルギー密度リチウムイオン電池を開発目標として、高Ni含有Ni-Mn層状酸化物正極を対象に、充電状態と構造安定性との関係に注目し研究開発を行った。また、負極として黒鉛を対象に、耐久性と負荷特性の向上を目的に研究開発を行った。今後は、さらなる高エネルギー化を踏まえて、リチウム過剰層状酸化物等の新規正極、及び小形電池に適用され始めている合金系負極の研究開発とともに、本質安全化を追求する研究開発が重要となる。

### 2) 電池適用技術の開発

本プロジェクトで、これまでの弊社検討実績を加案して単電池の構造及び組立工程の検討を行った。今後は、さらなる高エネルギー化、安全化の技術開発が重要となる。本プロジェクトでは、材料及び構造を主としたハードの開発を進め、その目標を達成したが、さらに、長寿命化し、信頼性を向上させるためには、電池の状態管理をさらに進め、制御含めた電池の使用技術の開発し、ハードと融合させた技術開発が必要となる。

．モジュール構造の研究開発

最小体積に単電池を配置した300Whモジュール構造を開発した。制御回路の配置場所も考慮した設計としたが、制御回路ハーネスの配置の最適化や、結線の信頼性向上等は未検証となった。実際の製品では、これらの事項もコストやシステム全体の信頼性を向上する上で、重要な研究開発項目であると考えられる。



#### ・ 組電池の研究開発

一般的な車両のシート下の搭載を前提に連結方法を決定したが、車両の設計によっては違った配列となる可能性もあり、複数の配列方法について検討すべきであったかも知れない。また、モジュール間の接続方法も、接続抵抗を決定付ける要素であり、より低抵抗な接続方法について検討する必要がある。さらには、組電池を構成する単電池やモジュールの一部が不良となった場合に個別に交換できる構造にするなど、保守を念頭においた検討も、今後重要になると考える。

#### ・ 評価解析研究

本プロジェクトでは、放電曲線の精密解析による非破壊分析を提案したが、現状、得られる情報が限定される。今後は、さらに技術開発を進め、逐次に劣化要因の進行度がわかる技術開発を目指す必要があると考える。

#### ・ 経済性評価

今回の試算では、**PHEV** を含めた **EV** が大幅に普及することを前提に、原材料費と製造コストを試算した。そして、そのシナリオを実現させるためには、**EV** の性能を大幅に向上し、魅力ある製品とする必要がある。そのための革新的な材料及び技術の開発が重要と考える。

### (9) 成果の実用化／活用

本プロジェクトで開発した **PHEV** 用単電池、モジュール及び組電池設計の要素技術は、現在製品化検討中の **PHEV** 用及び **EV** 用単電池に活用する計画である。

開発した要素技術の中で、正極は高エネルギー化を狙い、**Ni-Mn** 層状酸化物正極で **Ni** 含率を向上させたため、プロセス条件の管理を厳しくする必要が生じた。言い換えると、これは量産時の性能ばらつき要因、ひいては不良率が上がる要因となる。よって、今後プロセス条件の管理手法を開発するとともに、プロセスの条件変動に対する感度を低くする材料改良が必要と考えている。また、高エネルギー正極の特徴を生かして **EV** 用単電池への適用するため、要因解析によって得られた知見をもとに、さらなる高エネルギー正極材料の開発を加速させる。一方で、負極に関しては、開発した黒鉛材料及びその要素技術を製品に適用することが比較的容易であることから、寿命解析、劣化メカニズム解明により得られた知見を元に、実用化に結び付ける。

単電池形状及びサイズは、顧客要求に合わせる必要があるとともに、現在、欧米自動車メーカーが中心となり、単電池の形状及びサイズは標準化されつつあることから、本プロジェクトで開発した単電池そのものを製品化することは困難である。ただし、得られた知見及びシミュレーションによる解析手法は、単電池及びモジュールの内部構造設計等々に反映させていき、今後の製品開発を加速させる。

具体的には、本プロジェクトの成果である要素技術をさらに錬成し、現在開発段階の平成 29 年度以降に製品化計画中の **PHEV** 及び **EV** 用単電池、モジュールにその成果を活用する。また、本プロジェクトで開発した黒鉛負極の高出力化技術および劣化解析技術等々の要素技術の一部は、現在の弊社の主力製品である **HEV** 用単電池の新製品開発に積極的に活用していく。

## 2. 1. 3 高耐久形高容量リチウム二次電池の研究開発 (パナソニック)

### (1) 事業目的

エネルギー資源の石油依存度を低減し、多様なエネルギーでかつ低環境負荷で走行する EV、PHEV 等の次世代クリーンエネルギー自動車の普及に向けて、キーテクノロジーであるリチウム二次電池の高エネルギー密度化、高出力密度化、耐久性の向上、低コスト化についての技術開発を行うことを目的とする。

### (2) 事業概要

正極活物質としてはニッケル酸リチウムを用い、利用率の向上、出力特性の向上および耐久性向上を検討していく。負極活物質としては従来からのカーボン系負極の利用率を高めた黒鉛系負極を用いて、低温から高温までの幅広い温度領域における入出力特性などのセル特性の向上を考慮に入れながら、活物質表面の解析等を行い、材料開発を進める。一方、合金系負極活物質においては Si 系等の活物質材料の選定および開発に努め、極板およびセルとしての評価を開始していく。特に、合金系極板の課題である、充放電（リチウムの吸蔵脱離）における体積変化の抑制手段の検討等を行いながら、極板空間容積の確保等による活物質体積変化の抑制を図り、同時に車載用としての高入出力特性や耐久性などの信頼性の確保を検討していく。

初めの 2 年間は、さらなる高エネルギー密度、高入出力における電池の劣化要因を明らかにしながら、黒鉛系負極活物質と組合わせた正極活物質の開発を進めるとともに、合金系負極活物質の劣化解析と研究開発を進める。エネルギー密度の向上により入出力特性の低下と耐久性の低下が予想されるため、この期間で正極活物質はニッケル酸リチウムにおける Co 量および Al 量を減少させて活物質の利用率の向上などを図り、負極は黒鉛化度を高めることにより利用率の向上と入出力特性の向上などを図り、課題解決を図る。さらに、重量エネルギー密度 100Wh/kg と重量出力密度 2,000W/kg の実現見通しを小型セルを用いて検証する。3 年目以降は、ニッケル酸リチウム正極と合金系負極を組合わせた単電池研究開発を進め、ニッケル酸リチウム正極と黒鉛系負極を用いた単電池との比較検討を行いながら出力の達成を図る。4 年目にはモジュール制御開発へと進め、エネルギー密度および出力密度の実証と寿命評価推定を行う。最終年度には目標への実証検証を行う。

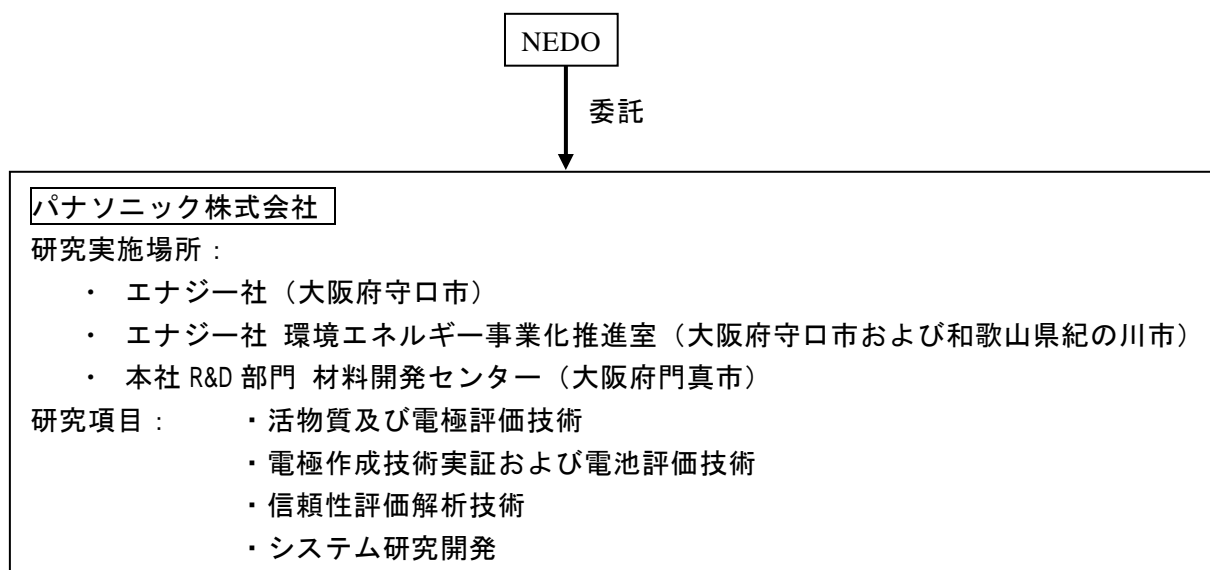
(3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表Ⅲ.2.1.3-1 主な実施項目と開発費用

▲: 基本原理確認 ●: 基本技術確立

	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	最終目標値
1.エネルギー密度向上研究開発	正極の開発 (▲) (●) (実用化検討)					130Wh/kg, 270Wh/L(単電池) 100Wh/kg, 120Wh/L(電池パック) 充放電効率 95%以上
	負極の開発 (▲) (●)					
2.入出力特性向上の研究開発	課題抽出 (▲)					2,600W/kg, 6,750W/kg(単電池) 2,000W/kg, 3,000W/L(電池パック)
	種板抵抗低減化 (▲) (●)					
	接続抵抗低減化 (▲) (●)					
3.耐久性向上の研究開発	劣化モードおよび耐久性向上の研究 (▲) (●)					10年以上
	加速評価技術の研究開発 (▲) (●)					
4.セルおよびモジュール設計研究開発	セル設計最適化 (▲) (●)					車載時の濫用に耐えること 低コスト化(4万円/kWhの見通し)
	モジュール設計開発 (▲) (●)					
	発熱制御開発 (▲) (●)					
5.充放電制御システム研究開発	SOC制御の研究 (▲) (●)					車載時の濫用に耐えること 低コスト化(4万円/kWhの見通し)
	電池診断に関する研究 (▲) (●)					
開発費用 (単位:百万円)	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	計
	186.1	197.0	197.5	199.7	139.8	920.9

(4) 研究開発の実施体制



図Ⅲ.2.1.3-1 研究開発の実施体制

(5) 研究開発目標と根拠

本研究開発の目的は、リチウムイオン電池の高出力化、高エネルギー密度化、長寿命化、電池管理システムの小型化および量産に適した構造に関する要素技術開発と、それら要素技術を導入した実規模電池（単電池）、0.4kWh 級電池モジュール、および、3kWh 級電池システムの研究開発を行うことである。具体的には、下記の開発目標（3kWh 級パック電池の換算値）を達成する次世代自動車用高性能蓄電システムを開発することであり、セル・モジュール・パック

の各々について表Ⅲ.2.1.3-2に示す中間目標および最終目標を設定した。また研究開発目標の前提条件を表Ⅲ.2.1.3-3に示す。

- ・ 重量エネルギー密度：100Wh/kg 以上
- ・ 重量出力密度：2,000W/kg 以上
- ・ 体積エネルギー密度：120Wh/L 以上
- ・ 体積出力密度：2,400W/L 以上
- ・ 寿命：10 年以上
- ・ 充放電効率：95%以上
- ・ コスト：4 万円/kWh の見通しを示すこと（100 万パック/年生産時）
- ・ 安全性：車載時の濫用に耐えること

表Ⅲ.2.1.3-2 開発目標

					中間目標		最終目標
		セル目標	19 年度	20 年度	21 年度	22 年度	23 年度
セル	重量エネルギー密度	130Wh/kg	100Wh/kg	130Wh/kg	<b>130Wh/kg</b>		<b>130Wh/kg</b>
	体積エネルギー密度	270Wh/L	190Wh/L	270Wh/L	<b>270Wh/L</b>		<b>270Wh/L</b>
	重量出力密度	2,600W/kg	1,900W/kg	2,300W/kg	<b>2,600W/kg</b>		<b>2,600W/kg</b>
	体積出力密度	5,400W/L	3,600W/L	5,000W/L	<b>5,400W/L</b>		<b>6,750W/L</b>
	寿命	10 年以上					<b>10 年</b>
	充放電効率	95% 以上		93%	<b>95%</b>		<b>95%</b>

		NEDO 目標			自主最終 開発目標		
		パック目標	19 年度	20 年度	21 年度	22 年度	23 年度
パック	重量エネルギー密度	<b>100Wh/kg</b>			100Wh/kg	110Wh/kg	<b>100Wh/kg</b>
	体積エネルギー密度	<b>120Wh/L</b>			120Wh/L	123Wh/L	<b>120Wh/L</b>
	重量出力密度	<b>2,000W/kg</b>			2,000W/kg	2,200W/kg	<b>2,000W/kg</b>
	体積出力密度	<b>2,400W/L</b>			2,400W/L	3,100W/L	<b>3,000W/L</b>
	寿命	<b>10 年以上</b>					<b>10 年以上</b>
	充放電効率	<b>95%以上</b>			95%	95%	<b>95%</b>
	コスト	<b>4 万円/kWh の見通し</b>					<b>4 万円/kWh の見通し</b>
	安全性	<b>車載濫用 に耐える</b>			21 年度のパックの 目標は推定値		<b>車載濫用 に耐える</b>

(注) 22 年度は電池モジュールでの目標値

表Ⅲ.2.1.3- 3 研究開発目標の前提条件

項目	仕様条件
重量（又は体積）エネルギー密度	25 1/3ItA 放電時
重量（又は体積）出力密度	25℃、SOC50%において、最大電流 10ItA、10 秒間の I-V 特性から外挿した時の I×E で算出
寿命	(財)日本自動車研究所提案の PHEV 走行模擬充放電パターン (P-CLT サイクル) 試験および保存試験で 10 年相当を模擬
充放電効率	動的負荷試験におけるエネルギー変換効率
コスト	100 万台/年の車両搭載時の見直し検証
安全性	単電池は IEC62660-2 の 5 項目、電池モジュールは ISO12405-1 の 4 項目に準拠した試験の実施と、試験技術協議会で提案された判定条件に基づく

#### (a) 中間目標

高い数値目標の達成を見通すための単電池およびモジュール電池の開発を行う。具体的にはエネルギー密度の向上と入出力密度の向上、さらには耐久性向上を視野に入れながら、正極と負極それぞれの研究開発を小容量小型セルでの評価・解析を中心に進め、課題抽出と改善の方向性を明らかにする。そしてエネルギー密度と耐久性の改良を進め、パックの最終目標を見通すことができる単電池の設計検討を行う。

また、組電池評価による発熱の制御を検討するとともに、モジュールの設計検討を行う。システム研究開発としては PHEV 用としての SOC 制御および入出力時の電池およびモジュールの熱制御に関する研究開発を実施する。

#### (b) 最終目標

安全性、信頼性をさらに向上することを目的とした単電池および電池モジュールの改良を検討し、改良品におけるエネルギー密度、入出力密度の評価・確認を行う。また耐久性、信頼性評価の結果を各種設計にフィードバックすることで耐久性・信頼性の向上を図り、寿命 10 年以上の見通しを得るとともに電池パック構成部材の耐久性、信頼性等をシミュレーション技術の活用で 10 年の耐久性を検証する。

さらに、各種安全性、信頼性評価試験を実施し、車載時の濫用に耐える安全性、信頼性を確保する。目標コストの実現のために、単電池、電池モジュール、電池パックの各構成部材、設計、製造プロセス等の見直しならびに電池パックの製造コストの精査を通して、4 万円/kWh の見通しを立てる。

そして上記モジュール・パック電池開発と並行して、各単電池の充放電挙動を制御するための電池管理システムについても検討し、モジュール用 ECU の設計、信頼性評価、および、電池モジュールへの実装による電池管理システムの制御ロジックを検証し、3kWh 級電池システムの仕様を確立する。

(6) 研究開発成果

表Ⅲ.2.1.3- 4 研究成果一覧 (単電池)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
重量エネルギー密度	130Wh/kg	144Wh/kg		
体積エネルギー密度	270Wh/L	280Wh/L		
重量出力密度	2,600W/kg	3,900W/kg		
体積出力密度	6,750W/L	7,700W/L		
寿命	10 年	10 年相当見込み		
充放電効率	95%	96%		

表Ⅲ.2.1.3- 5 研究成果一覧 (パック)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
重量エネルギー密度	100Wh/kg	106Wh/kg		} 3kWh 級 パック設計 値からの 算出値
体積エネルギー密度	120Wh/L	129Wh/L		
重量出力密度	2,000W/kg	2,770W/kg		
体積出力密度	3,000W/L	3,380W/L		
寿命	10 年以上	10 年相当見込み		
充放電効率	95%	96%		
コスト	4 万円/kWhの見通し	約 3.5 万円/kWh		
安全性	車載濫用に耐える	前提条件達成		

<成果 1 >

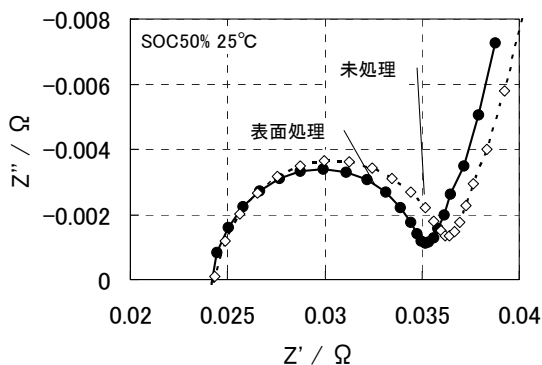
(内容) 重量 (又は体積) エネルギー密度、重量 (又は体積) 出力密度、充放電効率 (達成度) 、 、

(成果の意義) 正極にニッケル系酸化物、負極に黒鉛材料を使用し、電池構成部材および電極群設計を最適化することで、自主目標を達成し、業界最高水準のエネルギー密度および入出力密度を有する 11Ah 級単電池を開発できた。またこの 11Ah 級単電池を 10 セル直列接続した小型かつ軽量の 0.4 kWh 級電池モジュールを設計開発し最終仕様を確立した。さらに電池モジュールを 8 直列接続した 3kWh 級電池パックの設計に取り組み、達成度の確認を電池モジュールの性能実績値からの換算値のみにとどまらず、実際にモックアップ製作を行うことで検証した。そしてパックに求められる高い数値目標であった最終目標値を達成するエネルギー密度および出力密度を有することを確認した。

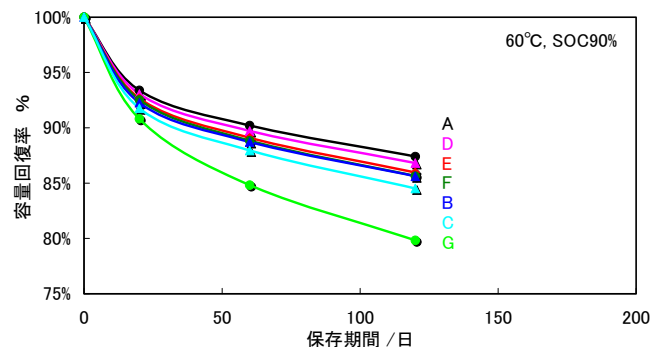
(課題と取り組み) 本研究開発は PHEV 車への適用を目的として目標値が設定されていることから、高エネルギー密度化、幅広い SOC 範囲を使用したサイクル耐久特性、高 SOC 領域での保存耐久特性を改良のポイントとして、正・負極活物質および極板設計の仕様を検討した。正極では、その組成・粒子形状・合成プロセスの最適化と表面処理技術を導入し、これら要求特性を満足する正極活物質を見出した。一例として、図Ⅲ.2.1.3- 2 に表面処理の効果を小容量小型セルでの AC インピーダンス測定結果で示す。活物質表面での Li<sup>+</sup>イオン挿入脱離反応に相当するインピーダンスの円弧成分の大きさが表面処理により 15%低減する結果が得ら

れ、分極測定から得られた DC-IR においても 4%の改良効果が確認できた。

他方、黒鉛負極においては粒子径・表面修飾構造の最適化を試み、とりわけ負極が容量劣化の主要因であると考えられる保存特性で、最も容量劣化抑制に優れる負極活物質(A)を見出した(図 2.1.3- 3)。なお、合金系負極に関しては高エネルギー密度化に効果があるものの、サイクル寿命特劣化が大きいという重大課題があり、負極活物質材料としては黒鉛を用いることが好ましいと判断した。



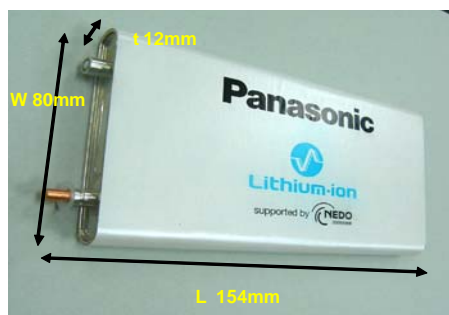
図Ⅲ.2.1.3- 2 正極表面処理の効果



図Ⅲ.2.1.3- 3 負極材料の保存特性

これら開発した正・負極材料と、電解液やセパレータなどの電池構成部材および電極群設計を最適化し 11Ah 級単電池の最終仕様を確立した。性能評価試験の結果、電気容量 11.4Ah、重量エネルギー密度 144Wh/kg、体積エネルギー密度 280Wh/L、重量出力密度 3,900W/kg、体積出力密度 7,700W/kg、充放電効率 95.9%が得られ、電池特性に関する自主目標を達成し、とりわけ出力密度に優れる単電池を得た。図 2.1.3- 4 に単電池の入出力特性の SOC 依存性を示す。

表Ⅲ.2.1.3- 6 単電池の外観と仕様



項目	仕様
形状	角形
体格	W80×L154×t12 mm, 148mL
正極/負極	LiNi <sub>0.76</sub> Co <sub>0.14</sub> Al <sub>0.10</sub> O <sub>2</sub> /黒鉛
セパレータ	PE
電解液	LiPF <sub>6</sub> /EC+EMC+DMC
容量	11 Ah
電圧	3.6 V
重量	289 g

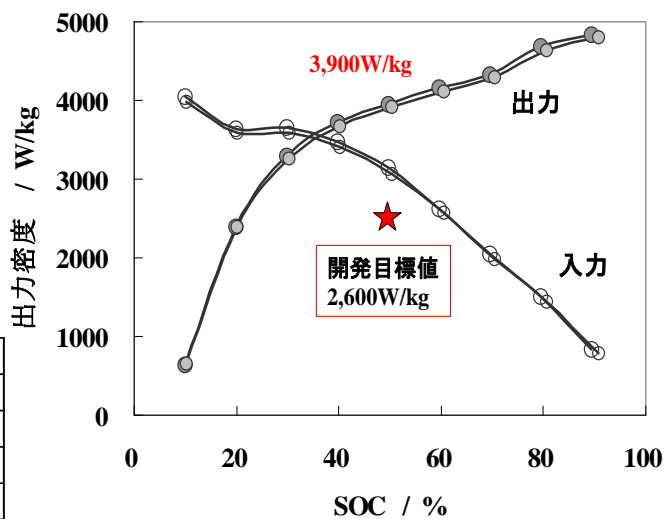




図 2.1.3- 4 単電池の入出力特性 (25°C)

11Ah 級単電池を 10 セル直列接続した 0.4 kWh 級電池モジュールの仕様を、放熱性（熱シミュレーション等）と機械強度（強度シミュレーション等）を考慮し、最適な単電池の固定方法および単電池間の接続方法を検討し、小型かつ軽量の最終仕様を確立した。また電池モジュールを 8 直列接続した 3kWh 級電池パックの設計に熱シミュレーションや構造強度シミュレーションを用いて検討し、さらにモックアップ製作を行うことで電池パックとしての最終目標値に対する達成度の確認を実施した。表 2.1.3-7 に 0.4kWh 級電池モジュールおよび 3kWh 級電池パックの最終仕様を示す。電池モジュール性能評価試験、および電池パックの重量および体積の検証結果から、重量エネルギー密度 106Wh/kg、体積エネルギー密度 129Wh/L、重量出力密度 2,770W/kg、体積出力密度 3,380W/kg、充放電効率 95.9% が得られ、最終目標達成の達成を確認した。

表Ⅲ.2.1.3-7 電池モジュールおよび電池パックの最終仕様

項目	0.4kWh 級モジュール	3kWh 級電池パック (モックアップ)
外観		
定格容量	11 Ah	11Ah
体格	H166×W90×D179 mm	H108×W389×D625.5 mm
構成	10 セル直列	8 モジュール直列
重量	3,480 g	31kg
上限電圧	42.0V	336V
下限電圧	25.0V	200V

## < 成果 2 >

(内容) 寿命

(達成度)

(成果の意義) 開発目標である電池の寿命 10 年以上を検証するために、走行を模擬した充放電サイクル試験 (SOC30-90%) と保存試験 (SOC90%) を実施した。しかし、実証評価時間が数ヶ月から 2 年程度と限定されている。そこで実証評価データからの外挿法による寿命予測を実施し 10 年以上の寿命が期待できることが明らかになった。また同時に、電池劣化反応の解析を行い電池劣化メカニズムの考察・検証をあわせて試みた。

(課題と取り組み) 実規模単電池の耐久性評価は、(財)日本自動車研究所より提案の PHEV 走行模擬充放電パターン (P-CLT サイクル) を用いて充放電サイクル試験評価を実施した。また、保存試験については電池使用条件内では SOC90%での保存が最も過酷であると考え、保存温度の劣化加速要因も加え保存耐久性を評価した。P-CLT サイクルでの劣化と SOC90%保存での劣化が単純な加成性が成立すると仮定した場合の、最終仕様の平成 23 年度設計の開発電池の 10 年後の推定特性を表 2.1.3-8 に示す。容量であるエネルギー密度は 122Wh/kg と推定でき、寿命値の 63Wh/kg の 2 倍程度を示す。また、出力密度は 1,218W/kg と推定され、これ



表Ⅲ.2.1.3- 8 開発電池の 10 年後の推定特性

	初期	P-CLTサイクル	保存試験	10年後推定	寿命(定義)	
エネルギー密度 (Wh/kg)	145	132 損失	123 損失	122	63	Wh/kg
出力密度 (W/kg)	3,900	3,094 損失	1,631 損失	1,218	750	W/kg
		3650サイクル後	3133日後	※単純加成		

も寿命値の 750w/kg を上回ることが分かる。したがって、開発した電池は 10 年以上の寿命が期待できることが明らかとなった。

電池の各種劣化反応解析の結果から、電池の容量劣化は正極および負極それぞれで起こる不可逆 Li 生成で生ずる電池内での正極と負極の容量バランスのズレ、可逆 Li 量の減少や活物内・粒子間隙間の増加による抵抗上昇、活物質そのものの充放電能力低下、等の複数の要因で生じていること、また電池の出力劣化反応は主に正極に起因した反応であることが明らかとなった。

< 成果 3 >

(内容) コスト

(達成度)

(成果の意義) 最終の 3kWh パック電池の経済性目標値、40,000 円/kWh を見通すために、単電池材料および電池モジュール部材の直材費の低減を図るとともに、製造コストの見直し、生産性の合理化等を含めた低コスト化技術の開発を進めた。

(課題と取り組み) リチウム電池の製造コストは、前プロジェクトである「燃料電池自動車等用リチウム電池技術開発」の考え方、スキームを基に労務費、エネルギー費、設備費等の再評価、再試算を行った。また最終仕様の電池設計に基づいて、各構成部材の単量、単価から正極関係、負極関係等の直材費コスト見積もりから電池直材費を試算し、電池モジュール構成部材と単電池の電圧監視や電圧均等化回路など電池モジュールとして必要な制御回路の部材を含め、電池製造コストを求めた。結果、100 万パック/年の量産時における、電池製造コスト見積もりを表 2.1.3-9 に示す。表より 35,000 円/kWh 程度のコストが見積もられ、目標の 40,000 円/kWh 以下を達成する見通しが得られた。この試算の直材費に歩留りや不良率は含まれていないが、例えば平均歩留り 98%とした場合に、直材費で 600 円/kWh 程度コストが上昇を加味しても、目標値を達成できるレベルが得られた。

直接材料費		円/kWh
正極材料		8,469
負極材料		2,952
電解液		3,705
セパレータ		3,831
セル部品		5,065
モジュール部品		6,336
計		30,358
製造コスト		
工場労務費		1,288
間接材料費		1,800
間接労務費		70
工場建屋		90
製造設備費		1,350
計		4,598
合計		34,957

表Ⅲ.2.1.3- 9 コスト試算結果一覧

#### <成果4>

(内容) 安全性

(達成度)

(成果の意義) 11Ah 級単電池および 0.4kWh 級電池モジュールに、種々の安全性評価を実施し、「車載濫用に耐える」安全性・信頼性が確保されていることを明らかにした。

(課題と取り組み) 安全性に対する開発目標として、「車載濫用に耐える」ことが必要とされている。より具体的には、単電池では「IEC62660-2」、電池モジュールでは「ISO12405-1」に準拠して試験を行い、試験技術協議会で提案された判定条件をそれぞれクリアすることが可能な単電池の安全性と電池モジュールの信頼性が求められる。単電池においては「IEC62660-2」で定められた 8 項目（外部短絡、過充電、強制放電、振動、衝撃、圧壊、高温、温度サイクル）を実施し、安全性の判定基準である破裂・発火（Explosion, Fire）がないことを確認した。一例として、単電池で実施した外部短絡試験の結果を図Ⅲ.2.1.3- 5 に示す。最大電流は 1300A、最高温度は 115℃まで上昇し、安全弁が作動したが、それ以上の不安全事象は確認されず、「弁作動(Venting)」という結果が得られた。

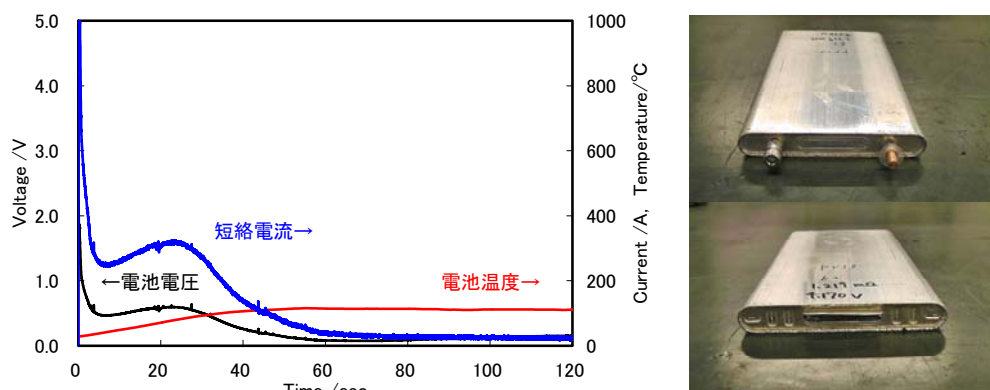
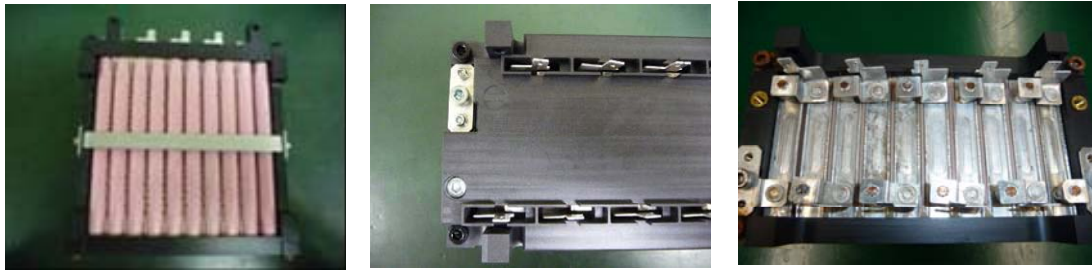


図 Ⅲ.2.1.3- 5 単電池の外部短絡試験結果

電池モジュールの信頼性評価としては、「ISO 12405-1」に準じた 4 項目（結露試験、振動試験、熱衝撃試験、衝撃試験）を実施し、各試験後の評価および本研究開発における判定基準をモジュールの外観上に顕著な変化がないこと、試験後のモジュールの絶縁抵抗値が設計範囲であること、試験後のモジュールの定格充放電試験での放電容量が定格容量の 50%以上であることの 3 項目とし評価した。結果、開発した電池モジュールは、全ての試験項目で上記 3 項目の判定基準を達成していることを確認した。一例として、0.4kWh 級電池モジュールで実施した結露試験後の電池モジュール外観を図Ⅲ.2.1.3- 6 に示す。単電池の封口板付近に一部腐食が確認されたが、安全弁の作動や変形等、その他の外観変化は観察されなかった。また、絶縁抵抗の変化も見られず、試験後の容量回復率は 99.4%が得られ、信頼性試験の判定基準の達成を確認した。



図Ⅲ.2.1.3- 6 結露試験後の電池モジュール外観写真

<成果 5 >

(内容) 電池管理システム

(達成度)

(成果の意義) モジュール・電池パック開発と並行して、各単電池の充放電挙動をリアルタイムに監視・制御するとともに、システムの故障診断を行うための電池管理システムについても開発を行い、3kWh 級電池システムの仕様を確立することができた。

(課題と取り組み) PHEV を前提とした車載用途で電池パックを使用する場合、安定した走行性能や電池パックシステムの長期信頼性を確保するためには、各単電池の電圧、温度、充放電電流の情報から電池の状態をリアルタイムに監視し、SOC の演算や充放電電力の制限値の算出、システムの故障診断を行う電池管理システムが必要である。電池管理システムは ECU (Electric Control Unit)、電流センサー、サーミスタ、コンタクタ、ワイヤーハーネス、I/F (Interface) ユニット等から構成される。本研究開発では、電池モジュール単位で各単電池の電池電圧・温度情報を計測しつつ、外部より CAN (Controller Area Network) 経由で送付される電流情報をもとに SOC (充電状態) 演算ができる機能を有し、さらに他の電池モジュールに接続されたモジュール ECU 同士が I/F ユニットの介して連携制御を行える ECU (図 .2.1.3- 7) の設計と電池管理システムの構成検討を行った。また、開発した電池モジュールを用いた動作検証を実施し、そのシステムが設計通りに機能することを確認するとともに、ECU の長期信頼性評価として、高温作動試験・低温作動試験・熱衝撃試験・高温高湿試験を実施した。結果、電圧と電流の取得の同時性、セルバランス機能、長期信頼性や SOC 演算精度 (図 .2.1.3- 8) 等が正常動作することを確認し、実使用上において問題がないことがわかった。



図Ⅲ.2.1.3- 7 ECU 外観写真

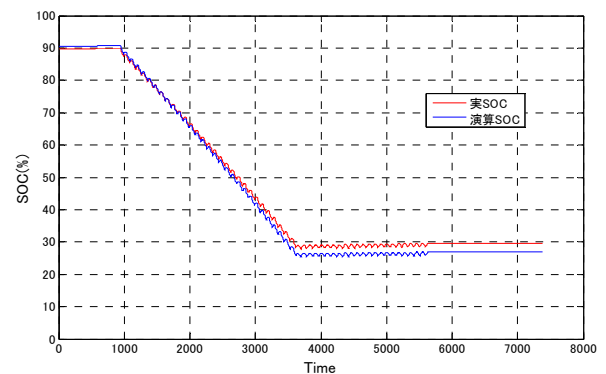


図 .2.1.3- 8 実 SOC と演算 SOC との比較

## (7) 知的財産権等

プロジェクト期間中の知的財産権等の件数を表Ⅲ.2.1.3-10に示す。

表Ⅲ.2.1.3-10 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	1	2	5	8	3	19
うち、外国出願			2	2		4
国内登録						
海外登録			1			1
論文					1	1
うち、査読付き論文					1	1
研究発表・講演	2	2	7	3	2	16
受賞実績*						
新聞・雑誌等への掲載						
展示会への出展	1	2				3
合計	4	6	12	11	6	39

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

本研究開発では、11Ah 級単電池、0.4kWh 級電池モジュールの原型仕様を確立し、性能評価の結果から期首目標を満たすことを確認した。また、3kWh 級電池パックシステムの設計を行い、開発した電池モジュールを用いた評価やモックアップの製作を通じて電池パック性能を見積もることができた。今後は、開発したパックを実際に実車に搭載した際の課題抽出とその対策や、搭載車種に最適化したパック構成の検討、ならびに生産性や品質向上に向けた製造プロセス改善などが必要となる。

また、寿命推定については、容量劣化はルート則、出力劣化は直線則による寿命予測が良い近似となることがわかった。本研究開発で開発した電池系は寿命劣化メカニズムの支配因子に変化が少なく、ルート則や直線則においても一定の予測精度を有している。今後、電池構成部材（正・負極材料や電解液等）の変化と電池全体の抵抗上昇部分の分離を行い、より精度の高い寿命推定手法を導き出す必要がある。

## (9) 成果の実用化／活用

11Ah 級単電池、0.4kWh 級電池モジュールの原型仕様を確立し、性能評価の結果から期首目標を満たすことを確認できた。また 3kWh 級電池パックシステムの設計を行い、開発した電池モジュールを用いた評価やモックアップの製作を通じて電池パック性能を見積もることもできた。今後、車載時の課題抽出とその対策、搭載車種に最適化したパック構成の検討し量産仕様を確立するとともに、コストダウンと信頼性、安全性、生産性の向上を図ることで実用化への目処付けをする必要がある。

本研究開発での成果をベースに、残された開発課題を解決し電源システムとしての仕様確立、量産化検討に着手する。カーメカ等の他企業との連携を模索し、平成 27 年度には少量生産

の検討、平成 30 年度には本格普及に向けた事業化を実現していきたい（表 2.1.3- 11）。

表Ⅲ.2.1.3- 11 実用化に向けての開発マイルストーン

項目	~H21 年度	~H23 年度	~H25 年度	~H27 年度	~H30 年度
研究段階	→				
開発段階		→			
製品化段階					
市場出荷段階					
他企業との連携			→		

また、本研究開発で得られた電池材料、単電池、モジュール電池、ECU 等の要素技術成果は、車載用途のみならず、風力・太陽光発電などのエネルギー源の多様化にともない必要とされる電力貯蔵用途、バックアップ電源などの定置型用途や、搬送ロボット、電動工具、電動バイクなどの高出力用途へ展開される可能性が期待される。今後、これらマーケットの拡大が展望されることから、さらなる性能向上と低コスト化を推進し普及促進を図る。

## 2. 2 要素技術開発（電池構成材料）

### 2. 2. 1 大型リチウム二次電池用高安全性電解質の研究開発 （三菱化学、日本合成化学工業）

#### （1）事業目的

リチウムイオン二次電池は従来自動車用電池として大型化されてきた鉛蓄電池やニッケル水素電池をエネルギー密度、出力密度の点で本質的に上回る可能性を有している。しかしながら、エネルギー密度や出力密度が大きいという長所を裏返すと、誤用・濫用した場合や事故時の発火・爆発の危険性が必然的に高くなるという短所を有する。現在 HEV 用に開発が推進されている大型リチウムイオン二次電池は寿命や安全性を確保するために、小型民生用リチウムイオン二次電池と比較して、活物質の使用電位領域を低く抑えているため、本系が本質的に有するエネルギー密度を有効に利用できていないという課題が存在する。

本研究開発は高安全性電解質を創製することで、電池安全性のみならず、電極活物質の使用電位領域を拡大することにより、大型リチウム二次電池の高エネルギー・出力密度化を達成することを目的としている。本研究が達成された暁には、電池のエネルギー密度と出力密度を向上させることが可能となるだけでなく、電池の安全性を向上できるため、安全保護回路・制御システム等を簡素化でき、周辺機器も含めた電池コストを削減させることが可能となる。

#### （2）事業概要

本研究開発は「高安全性電解質材料の探索」および「高安全性電解質材料を用いた電池の特性試験と安全性試験」により構成される。前者はヘテロ元素含有溶媒、イオン液体、およびそれらのゲル化電解質を使用した「各種電解質電池の電気化学検討および安全性予測」、「高安全・高耐久電解液の開発」に加えて、新規イオン液体の設計・合成・評価とその固体化に特化した「機能性イオン液体の創製」を含む。

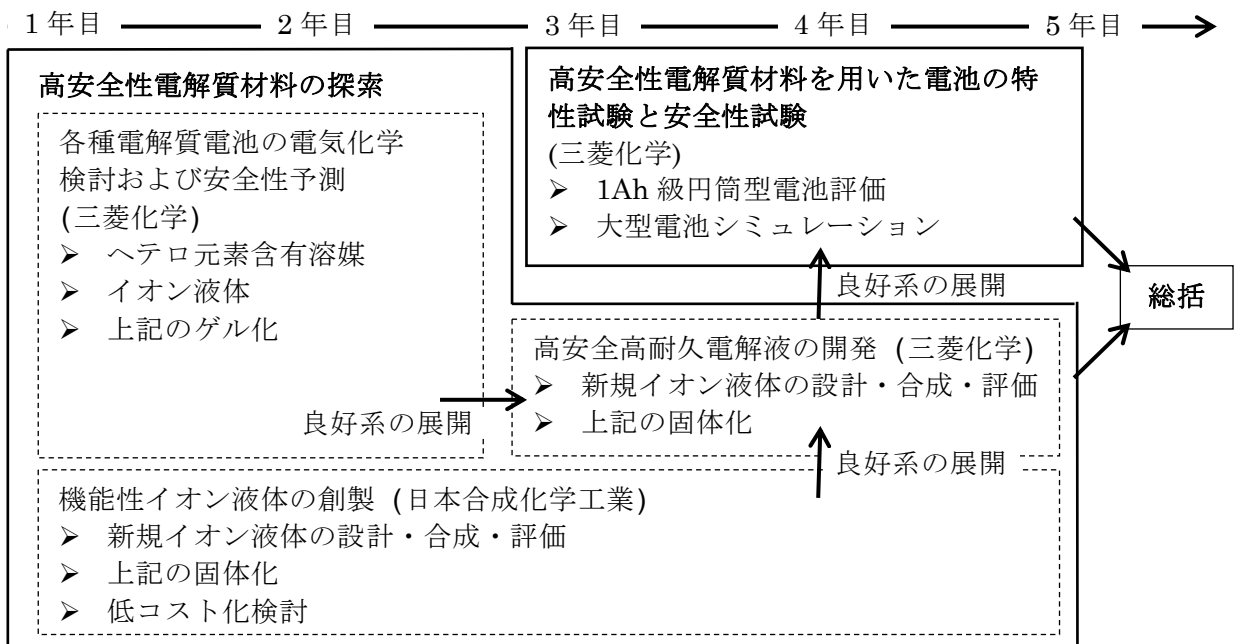


図 .2.2.1-1 事業概要とスケジュール

(3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.2.1-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	
(3)-1 高安全性電解質材料の探索：各種電解質電池の電気化学検討および安全性予測	→		→			
(3)-2 高安全性電解質材料の探索：機能性イオン液体の創製	→				→	
(3)-3 高安全性電解質材料の探索：高安全・高耐久電解液の開発					→	
(3)-4 高安全性電解質材料を用いた電池の特性試験と安全性試験			→		→	
	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	総額
開発費用（百万円）	136.574	107.679	55.403	126.963	74,978	501,597

(4) 研究開発の実施体制

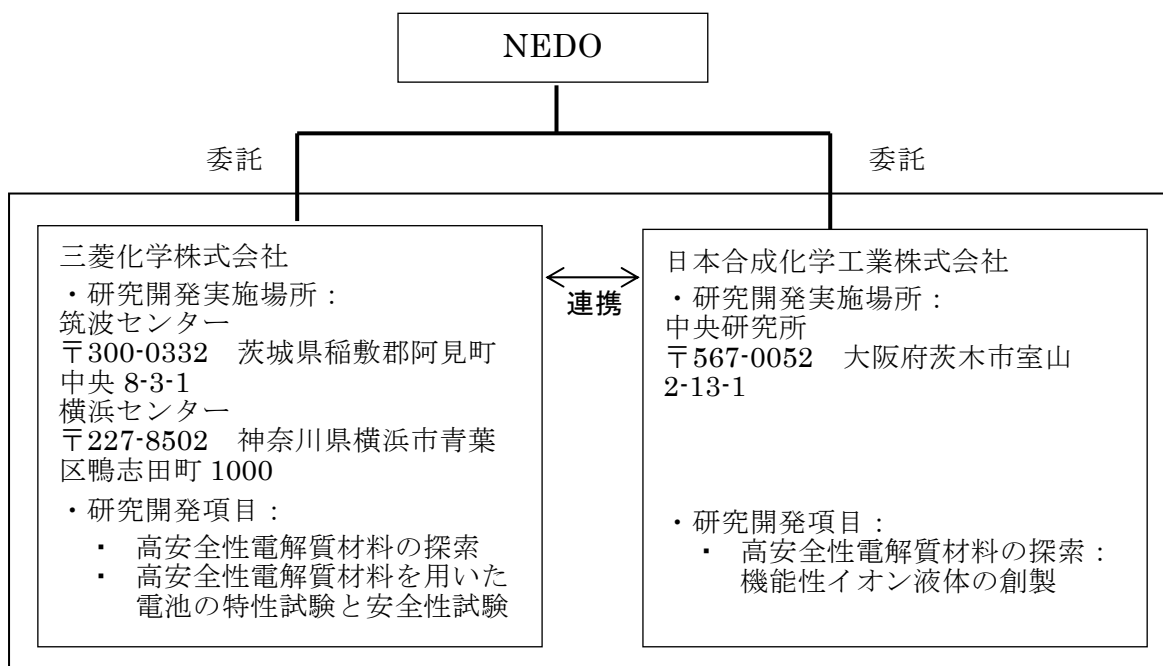


図 .2.2.1-2 研究開発の実施体制

(5) 研究開発目標と根拠

中間目標

(a)高安全性電解質材料の探索：各種電解液電池の電気化学検討および安全性予測

フッ素、硫黄、リンといったヘテロ元素を含有する溶媒を用いた電解液や高分子ゲル電解質、イオン液体の電池性能と安全性について、20mAh級小型ラミネート電池レベルで精査する。基本電極構成をNiMnCo三元系正極/グラファイト負極とし、釘刺し試験を想定した安全性シミュレーションで釘刺し後30秒以内に熱暴走を示さないこと、20 mAh級小型ラミネート電池において正極活物質基準で10 Wg<sup>-1</sup>の出力を達成することを目標とする。

(想定条件・根拠)

正極活物質重量が電池重量の1/4と想定された18650円筒型電池において、出力が正極活物質基準で10 Wg<sup>-1</sup>以上となれば重量出力密度：2500 Wkg<sup>-1</sup>に相当する。大型電池では正極活物質重量に対する電池重量の割合が更に増加するため本目標値は十分な値と考える。出力評価を行う電池は電解質スクリーニングが容易な20mAh級小型ラミネート電池を採用し、正極活物質基準で10 Wg<sup>-1</sup>以上とする。出力測定・算出法はJEVS D713:2003を本研究開発用に若干修正したものを採用する。安全性シミュレーションでは、仮想大型電池の熱バランス計算により、大型電池の電池内部短絡時の熱暴走有無をシミュレートする。具体的には、カルベ式熱量計により得られる上記小型電池の熱分解速度と、電気化学測定で得た抵抗より短絡ジュール熱の推算値を、18650円筒型電池や仮想大型電池の放熱速度を考慮したシミュレータに導入し、有限要素法による非定常解析を行う。

(b)高安全性電解質材料の探索：機能性イオン液体の創製

新規イオン液体4種類/年を目標に合成し、熱物性、粘性率、イオン伝導度、電気化学的安定性等の基礎物性評価、充電正極接触熱分析による安全性評価、2032コイン型電池による充放電特性検討を行う。

表 .2.2.1-2 機能性イオン液体の創製：中間目標

	既存系の例 (EMI・BF <sub>4</sub> )	平成21年度目標
融点	15	0
粘度 (25 )	32 mPa・s	32 mPa・s
イオン伝導度 (25 )	14 mScm <sup>-1</sup>	14 mScm <sup>-1</sup>
イオン伝導度 (-30 )	< 0.1 mScm <sup>-1</sup>	0.1 mScm <sup>-1</sup>
電位窓	0.9 - 5.5 V (vs. Li/Li <sup>+</sup> )	0.5 - 5.5 V (vs. Li/Li <sup>+</sup> )
安全性	評価法が未確立	初年度設定の熱安定性の目標値

(想定条件・根拠)

代表的なイオン液体である EMI・BF<sub>4</sub> よりも低温でのイオン伝導度に優れ、より広い電位窓と高い安全性を有する新規イオン液体を創製する。なお、初年度設定の熱安定性の目標値は、DSC による正極活物質 (例えば充電状態にある Li<sub>0.5</sub>CoO<sub>2</sub>) との接触分解試験において、発熱開始温度 200、350 までの累積発熱量 800 J である。



(c)高安全性電解質材料を用いた電池の特性試験と安全性試験

有望な高安全性電解質材料に対して、1 Ah級18650円筒電池を作製し、加熱や釘刺し等の電池安全性試験を実施する。電極活物質の使用電位領域を拡大することにより、電池性能として重量出力密度：2500 Wkg<sup>-1</sup>または重量エネルギー密度：200 Whkg<sup>-1</sup>を達成する見通しを得ると共に、電池安全性試験時の電池表面温度や電圧等のモニタリングからデータを取得し、環状・鎖状カーボネート系電解液電池に比べて高い安全性を示すことを目標とする。

最終目標

(a)高安全性電解質材料の探索：高安全・高耐久電解液の開発

電池電圧が4.4 V以上である20 mAh級小型ラミネート電池を作成し、充放電測定ならびに電池熱量測定、釘刺し試験を想定した安全性シミュレーションを実施する。良好系については高安全性電解質材料を用いた電池の特性試験と安全性試験にて、18650型円筒電池レベルでの安全性評価を行う。

表 .2.2.1-3 高安全性電解質材料の探索：最終目標

開発項目	目標
20 mAh級小型ラミネート電池 (電池電圧：4.4 V以上)	正極活物質基準で13 Wg <sup>-1</sup> の出力。
	300サイクル、SOC=15～90%で容量維持率80%以上。
	環状・鎖状カーボネート系電解液を用いた現行4.1V電池系以下の電池発熱量・発熱速度を有すること。
大型電池シミュレーション	環状・鎖状カーボネート系電解液を用いた現行4.1V電池系以上の電池安全性を有すること。

(想定条件・根拠)

LiNi<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub>正極の高電位利用により、例えば炭素負極を用いた4.4V電池系を考えると、平均電圧は3.8V、正極活物質基準での容量は180mAh/gとなり、出力増加と容量増加の双方が見込まれる。中間目標にて正極活物質基準で10Wg<sup>-1</sup>以上の出力(25 )を掲げているが、最終目標では更に高い目標として13Wg<sup>-1</sup>以上の出力を掲げた。一方で容量エネルギー密度は、正極活物質重量が電池重量の1/4と想定された電池では上記平均電圧と正極容量から計算すると200Wh/kgに到達しないが、大型電池では正極活物質重量に対する電池重量の割合が増加することから、200Wh/kg到達への見通しが得られると判断した。また、大型電池化された際の電池安全性が重要視されることから、カーボネートのみを構成成分とする現行電解液を用いた現行電池系と同等以上の電池安全性を得ることを目標とした。

(b)高安全性電解質材料の探索：機能性イオン液体の創製

下表の最終目標を満足するイオン液体を開発し、低コスト化を視野に入れた合成・精製技術を確立する。18650円筒型電池レベルでの電池動作と安全性検証から、車載用リチウム二次電池電解液としてのイオン液体の可能性を見極める。また、イオン液体の毒性に関する考察を行い、低毒性なイオン液体を開発する。

表 .2.2.1-4 機能性イオン液体の創製：最終目標

	既存系の例 (EMIBF <sub>4</sub> )	H23年度目標
融点	15	-15
粘度	32 mPa・s	32 mPa・s
イオン伝導度 (25 )	14 mScm <sup>-1</sup>	14 mScm <sup>-1</sup>
イオン伝導度 (-30 )	<0.1 mScm <sup>-1</sup>	1 mScm <sup>-1</sup>
電位窓	0.9 - 5.5 V (vs. Li/Li <sup>+</sup> )	0.0 - 5.5 V (vs. Li/Li <sup>+</sup> )
安全性*1 発熱開始温度	220	200
累積発熱量	800J/正極g	800J/正極g
毒性 (LD <sub>50</sub> )	300~2000mg/kg	>50mg (非毒物)
充放電特性	電池動作不可	コイン電池で100サイクル後の容量維持率85%
コスト	有機溶剤系電解質の数10倍	有機溶剤系電解質の10倍以内

\*1 DSCによる正極活物質 (Li<sub>0.5</sub>CoO<sub>2</sub>) との接触熱分解試験

(想定条件・根拠)

既存のイオン液体では、自動車用電解液として必要な上表の目標値を満足できない。コスト的な観点も含めてイオン液体の可能性を見極める。

#### (c)高安全性電解質材料を用いた電池の特性試験と安全性試験

車載用大型リチウム二次電池のモデルにて、電池特性試験と安全性試験を実施する。電池特性は大型化した際に電池性能として重量出力密度：2500 Wkg<sup>-1</sup>(または重量エネルギー密度：200 Whkg<sup>-1</sup>)を達成する見通しを得ること、安全性は釘刺し時に熱暴走しないことを目標とする。

(想定条件・根拠)

電池大型化による蓄熱現象は電池安全性を大きく左右するため、18650円筒型電池よりも更に大きな電池にて自動車の実走行に近いモードで充放電性能と安全性レベルを確認することで、上記高安全性電解質を用いて目標値達成が可能か否かを見極める。

(6) 研究開発成果

表 .2.2.1-5 研究成果 (一覽)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
重量出力密度	2500W/kg	正極活物質基準で10Wg <sup>-1</sup> 以上の出力(25)、大型電池換算で2500Wkg <sup>-1</sup> 以上を達成。		電池重量に対する正極活物質重量の比率が25%を想定。
重量エネルギー密度	200Wh/kg	平均電圧 3.8V、容量180mAh/g、電池重量に対する正極活物質重量の比率を25%に想定すると約170Wh/kg、30%に想定すると200Wh/kg以上。		安全性の向上で正極活物質比が30%以上になると目標を達成できる見通し。
コスト	3万円/kWh以下。	現行電解液と同等の価格で供給可能の見通し。		
安全性	車載時の濫用に耐える安全性を示す。	現行電解液を用いた電池系と同等以上。		4.4V 高電圧動作時。

と はいずれか一方を満足し、他方については見込みを示す。

<成果1> 高安全性電解質材料の探索：高安全・高耐久電解液の開発

(内容) イオン液体電解液、ゲル化電解質、ヘテロ元素含有溶媒電解液といった広範な電解質材料の電池特性に加えて安全性を精査した。難揮発性の特徴を持つイオン液体の電池内発熱量は、典型的なりチウムイオン電池用電解液 1M-LiPF<sub>6</sub>/EC:EMC(3:7)と同等であるが、充放電性能は通常の水系電解液より劣ることが示された。ゲル化電解質は単電池当たりの電解質重量を低減できる点で低発熱量を与えるが、電解質重量当たりに換算するとゲル化剤の影響により従来の水系電解液に劣ることが示された。一方、ヘテロ元素含有溶媒電解液の探索では、スルホラン(SLF)が電池内発熱速度や発熱量が低い溶媒として有望であることを見出した。新規電解液組成を用いた電池では、充電上限電圧 4.4V で動作可能な高電圧電池が実現し、正極活物質基準で 13Wg<sup>-1</sup>の出力、300 サイクル後の容量維持率 80%以上の充放電性能を示した。また、環状・鎖状カーボネート系電解液を用いた現行電池系以下の電池発熱量・発熱速度を有することを見出した。電池の安全性と正極活物質の相転移との間に相関があり、SLFを用いると、加熱時に正極表面に硫黄元素を含んだ分解物が堆積し、正極の結晶変化を抑制させることにより安全性が向上したことが示唆された。

(達成度)

(成果の意義) リチウムイオン電池用電解液は、LiPF<sub>6</sub>とカーボネート溶媒により構成され、特にエチレンカーボネート(EC)は高極性溶媒としてのイオン解離機能や、炭素負極上での負極皮膜形成機能を有しており、ほぼ全てのリチウムイオン電池に搭載されている。一方で本研究開発により、EC比率が増加すると電池内発熱量が増加する傾向にあることを見出された。すなわち、本研究開発目標を達成する電解質としては、ECを代替する、あるいはEC組成を極力低減させる設計が求められる。SLFは沸点が高く、蒸気圧が低い、かつ耐熱性も高い汎用溶媒で

あり、電気二重層キャパシタや電解コンデンサ用電解液溶媒として使われている。本研究開発により得られた新規組成は汎用溶媒から構成されることから、カーボネートのみを構成成分とする現行電解液と同等の価格で供給可能となる見通しを得た。また、正極活物質基準で $10\text{Wg}^{-1}$ 以上の出力(25%)を達成したことは、電池重量に対して正極活物質重量が1/4以上である単セルを想定した場合、 $2500\text{Wkg}^{-1}$ の重量出力密度を満足することになり、本受託事業の目標値を達成できることを示すものである。

(課題と取り組み) 本研究開発により基本的な電解液組成の設計方法が確立できたことから、今後は電池メーカー・自動車メーカー各社への顧客紹介(市場開発)を展開していく。電極活物質や電極設計を含めた電池設計は各メーカー多用であることから、各メーカーの電池設計に合わせた電解液組成ファインチューニングを共同実施する。

### <成果2> 機能性イオン液体の創製

(内容) 計算科学により有望な化学構造を選定し、実際に新規なイオン液体を16個合成した。具体的には、イミダゾリウム系カチオンと、フッ素化アセチルアセトナート系アニオン、シアノホスフェイト系アニオン、及びシアノメチルスルホナート系アニオンを有するイオン液体である(図参照)。

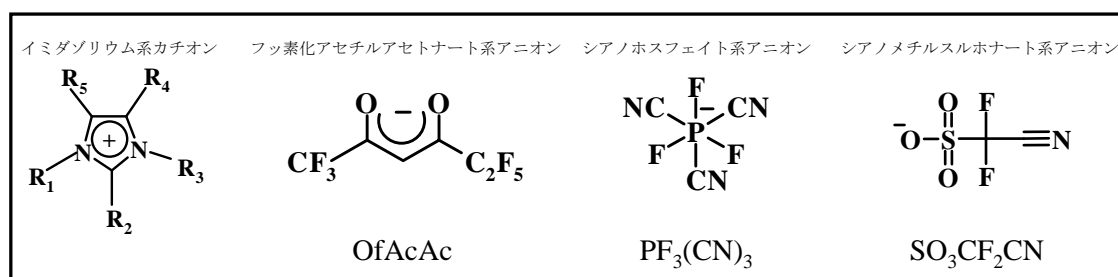


図 .2.2.1-3 合成された新規イオン液体

得られた新規イオン液体の代表的な性能は下表の通りである。これらの中でも、EMI・ $\text{PF}_3(\text{CN})_3$ は、低融点であり電気化学特性も良好である。しかし強毒性であることから開発を断念した。EMI・ $\text{SO}_3\text{CF}_2\text{CN}$ は非毒物である。イオン液体単体の電位窓は目標値未達ながら(4V)、 $\text{LiPF}_6$ などのLi塩添加により5V以上に改善される。

表 .2.2.1-6 新規イオン液体の創製：目標到達度

項目	目標値（最終）	シアノスフェイト系新規イオン液体 EMI・PF <sub>3</sub> (CN) <sub>3</sub>		スルホネート系新規イオン液体 EMI・SO <sub>3</sub> CF <sub>2</sub> CN	
		達成値	達成度	達成値	達成度
融点	-15	-23		-27	
粘度	32 mPa・s	15 mPa・s		24 mPa・s	
イオン伝導度（25℃）	14 mScm <sup>-1</sup>	17 mScm <sup>-1</sup>		10 mScm <sup>-1</sup>	
イオン伝導度（-30℃）	1 mScm <sup>-1</sup>	2 mScm <sup>-1</sup>		1 mScm <sup>-1</sup>	
電位窓	5.5 V	6 V		5.3 V *2	-
安全性*1 発熱開始温度	200	220	-	240 *3	
累積発熱量	800J/g	1600 J/g		830 J/g *3	
毒性（LD <sub>50</sub> ）	>50 mg/kg	<5 mg/kg	×	>300 mg/kg	
充放電特性	100サイクル後容量維持率 85%	<10 %	×	<10 %	×
コスト	有機溶剤系の10倍以内	約190万円/kg	×	約40万円/kg	×

\*1 DSCによる正極活物質（Li<sub>0.5</sub>CoO<sub>2</sub>）との接触熱分解試験

\*2 LiPF<sub>6</sub>0.4 mol/kg を添加

\*3 LiPF<sub>6</sub>0.4 mol/kg と 1,3-プロパンサルトン 5wt% を添加

一方、イオン液体を充電状態の正極活物質と接触させて熱安定性を評価した。その結果、確かに有機溶剤よりも分解開始温度は高いがたかだか数十度程度であり、分解反応は同様に進行し分解ガスも発生する。ただしアニオンの最適化、1,3-プロパンサルトンなどの添加剤配合、アルミナ添加による固体化などで改善できる。

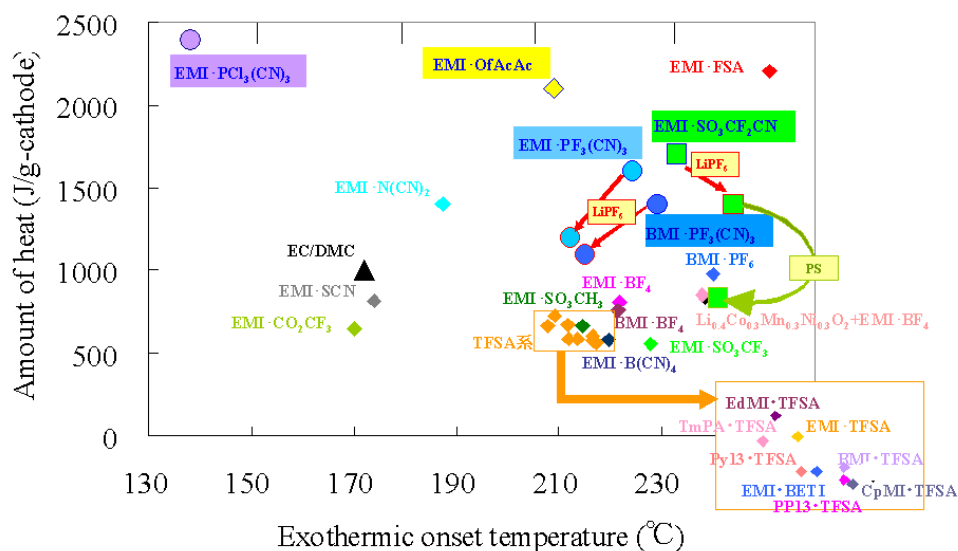


図 .2.2.1-4 イオン液体の正極活物質存在下での熱安定性

(達成度)

(成果の意義) シアノホスフェイト系アニオンという新しい化学構造を提案し、現時点では世界最高レベルの電気化学特性を有するイオン液体を創製した。特に-30℃でのイオン伝導性は、低温でも動作する自動車用電池を可能にする。また、安全性に関して、単純な難燃性(引火点)だけでなく、電極材料との接触熱分解による評価手法を確立し、イオン液体の位置付けを行った。

(課題と取り組み) 本プロジェクト期間中に問題提起する形となった毒性問題は、今後の開発においても課題である。充放電特性は、一般的な電極やセパレータを用いてイオン液体単体の確認を行ったのみである。検討不十分で改善には至っていない。また、イオン液体の原料メーカー(イミダゾールやイミダゾリウム化合物)の最大手である弊社をもってしても有機溶剤並みのコストに目処は付いていない。

### <成果3>高安全性電解質材料を用いた電池の特性試験と安全性試験

(内容) 高電圧・高耐久電解液の開発にて得られた新規電解液組成は、4.4V充電状態の18650型円筒電池を用いた安全性試験にて、電池安全性が汎用電解液組成と比較して改善されることを実証した。18650型円筒電池の安全性試験結果を用いて、釘刺し、および、微小内部短絡に対する大型電池シミュレーションを行ったところ、本研究開発で開発した電解液を用いた電池の釘刺し試験シミュレーションにおいては電池の熱暴走の有無に対する短絡部のジュール熱の閾値が大きく改良され、単セル容量として2.8倍までが許容されることが示された。また、加熱試験シミュレーションでは本研究開発で開発した電解液を用いた4.4V電池系は現行カーボネート電解液を用いた4.1V電池系以上と同等の安全性であることが示された。

(達成度)

(成果の意義) 電池の熱暴走の有無に対する短絡部のジュール熱の閾値が大きく改良され、単セル容量として2.8倍までが許容されることは、電池モジュール作成時の単セルの個数を減らすことができ、その分、単セルの筐体、端子類等の数の減少によるパックとしてのエネルギー密度の向上、保護回路の簡略化により、製造コストを下げることに効果がある。例えば、本受託事業で用いた充電上限電圧4.4Vの高電圧電池は、平均電圧3.8V、容量180mAh/gであり、電池重量に対する正極活物質重量の比率が25%である電池を想定すると、重量エネルギー密度は171Wh/kgである。一方、大型電池では電池重量に対する正極活物質重量の割合が増加するため、例えば本受託事業で開発された高安全性電解液を用いた場合、電池重量に対する正極活物質重量の比率を30%まで増加できると試算すると、200Wh/kg以上の重量エネルギー密度となり、本受託事業目標を達成する見込みとなる。

(課題と取り組み)

本受託開発では、釘刺し安全性及び加熱安全性について検証を重ねてきたが、過充電試験や圧壊試験、衝撃試験等は未実施である。また、大型電池での実証も必要であるが、これは各電池メーカーや自動車メーカーと共同実施する必要がある。上記の高安全性電解液を活用したセル設計概念を電池メーカー・自動車メーカーに提案し、共同開発(実証試験)することで市場を開拓し、新規電解液組成の拡販につなげていく予定である。

## (7) 知的財産権等

プロジェクト期間中の知的財産権等の件数を表 2.2.1-7 に示す。

表Ⅲ.2.2.1-7 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	2	4	5	2	1	14
うち、外国出願			1			
国内登録						
海外登録						
論文			2		1	4
うち、査読付き			1		1	
研究発表・講演	2	14	8	9	3	36
受賞実績						
新聞・雑誌等への掲載				1		
展示会への出展						
合計	4	18	15	12	5	54

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

高安全性電解質材料の探索：高安全・高耐久電解液の開発

本受託事業を通じて、高安全性電解液を活用した高出力あるいは高エネルギー密度セル設計の方向性が示された。今後は採用・上市に向けて電池メーカー・自動車メーカー各社への顧客紹介（市場開発）を展開していく予定であるが、電極活物質や電極設計を含めた電池設計は各メーカー多用であることから、各メーカーの電池設計に合わせた電解液組成ファインチューニングを共同実施する。

高安全性電解質材料の探索：機能性イオン液体の創製

2009年度末に毒性問題から最も有望なイオン液体（シアノホスフェイト系）の開発を断念した。2010年度から新たにイオン液体（スルホナート系など）の設計と合成に注力したため、最終年度の課題である 充放電特性と 低コスト化は検討不十分である。実用化に向けて新たな課題として 低毒性が挙げられる。各課題の解決方針と今後の取り組みは以下の通りである。

課題 充放電特性：新規イオン液体に適した添加剤（電極保護膜形成剤など）、正／負極、セパレータなどの選定及び最適化。コイン電池による充放電特性の確認。

課題 低コスト化：合成原料、合成ルート、精製法の最適化。新規に開発されたスルホナート系など単純な化学構造を有するイオン液体の工業化技術。

課題 低毒性：計算科学による分子設計技術。原料や合成中間体段階からの毒性チェック。

## (9) 成果の実用化／活用

高安全性電解質材料の探索：高安全・高耐久電解液の開発

本委託事業では、電池安全性に資する有機電解液の開発指針が確立された。これを活用すると、大型電池搭載時の安全性能向上に由来する容量エネルギー密度や出力エネルギー密度の向上が予想されることから、今後は採用・上市に向けて電池メーカー・自動車メーカー各社への顧客紹介（市場開発）を展開していく予定である。電極活物質や電極設計を含めた電池設計は各メーカー多用であることから、各メーカーの電池設計に合わせた電解液組成ファインチューニングを共同実施する。関連分野としては、携帯用及び定置用電池への展開が期待できる。

高安全性電解質材料の探索：機能性イオン液体の創製

新規に開発されたシアノホスフェイト系やスルホナート系のイオン液体は、全ての要望（低毒性、高特性、低コストなど）を満足できていないのが現状であるが、今後、イオン液体単独、あるいは電解質として市場開拓を継続しながら商品化・特許ライセンスなどの道を探りたい。

本プロジェクトの成果は、既存イオン液体以外にも有望な化学構造が存在することを示した点である。その分子設計技術や安全性の評価技術は、自動車以外にパソコンなどのデバイス用電解液の基礎技術として有効であり、燃料電池や色素増感太陽電池などへの応用も期待される。更に、特殊な合成溶媒として、あるいはセルロース溶解能力やCO<sub>2</sub>吸収能力を活かした新規用途への展開が期待される。



## 2. 2. 2 高容量・低コスト新規酸化物正極材料の研究開発 (産業技術総合研究所、田中化学研究所)

### (1) 事業目的

次世代クリーンエネルギー自動車用リチウムイオン電池の高エネルギー密度化・高出力密度化に資するため、低コストかつ資源的に豊富な元素 (Mn、Fe、Ti 等) を主体とする新規高容量酸化物正極材料を開発する。

### (2) 事業概要

次世代クリーンエネルギー自動車用リチウムイオン電池の高エネルギー密度化・高出力密度化に資するため、低コストかつ資源的に豊富な元素 (Mn、Fe、Ti 等) を主体とする新規高容量酸化物正極材料を開発する。

より具体的には、現行の正極材料の約 2 倍 (1 時間率放電において 1,000 Wh/kg (負極を Li 金属と仮定した場合) ) のエネルギー密度を有し、かつ 1/20 時間率放電において 1 時間率放電の容量の 80%以上を維持する新規正極材料を見出す。

最終的 (H23 年度終了時) には、小型実用単電池作製及び実用化促進のため、上記性能を有する正極材料の品質安定化技術 (電池メーカーでの評価が可能な数 kg オーダー) を検討し、小型実用単電池あたりの重量エネルギー密度 250 Wh/kg を達成する。また、重量出力密度 3,125 W/kg を見通すための高出力化技術を確立する。

上記小型単電池の性能値により、最終目標である電池パックあたり重量エネルギー密度 200 Wh/kg、重量出力密度 2,500 W/kg を見通す。

(3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.2.2-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
1)新規酸化物正極材料の開発						
1)-1.高容量化・高出力化の検討			→			
1)-2.長寿命化の検討		→	→			
1)-3.化学組成、合成条件の最適化				→	→	
1)-4.活物質-導電材複合体の作製技術の検討				→	→	
2)正極材料の品質安定化技術の開発						
2)-1.バッチ合成の検討	→					
2)-2.品質安定合成技術の検討・塗布型電極試作		→	→	→	→	
2)-3.小型実用単電池を用いた実用化可能性の検討			→	→	→	
3)電極素材特性評価					→	
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
独立行政法人産業技術総合研究所	42.4	41.5	36.3	80.0	40.0	240.2
株式会社田中化学研究所	7.5	15.6	40.1	16.3	22.3	101.7

#### (4) 研究開発の実施体制

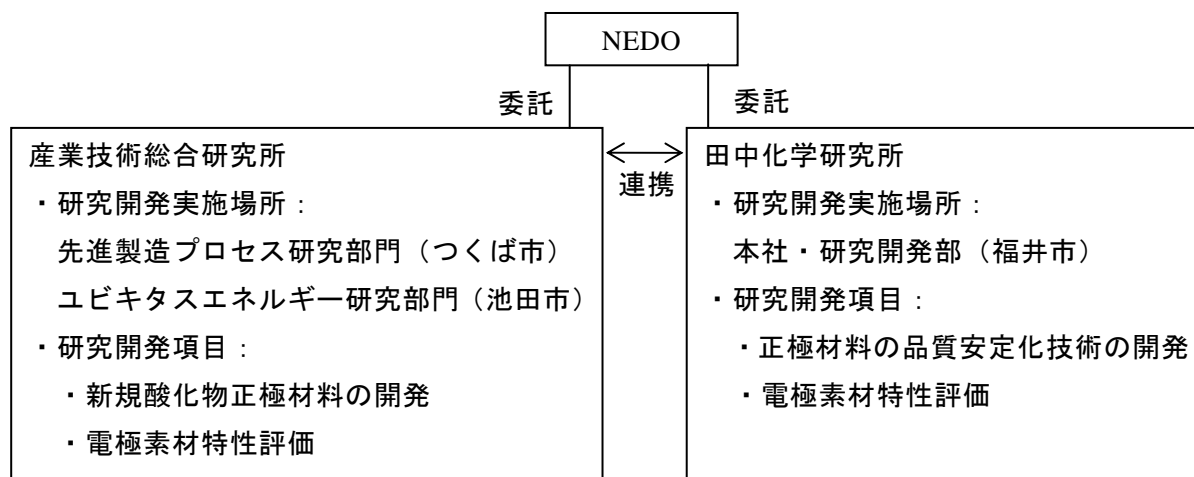


図 .2.2.2-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

##### (a) 中間目標

新規酸化物正極材料の開発に関しては、2時間率放電において1,000 Wh/kgのエネルギー密度を有し、かつ1/10時間率放電においても1時間率放電容量の80%以上の容量を有する正極材料を見出すこと。5時間率放電において-20℃においても室温の50%以上の容量を有していること。5時間率、室温において50サイクル後に初期容量の80%を維持していること。

正極材料の品質安定化成技術の開発に関しては、2時間率放電において1000 Wh/kgのエネルギー密度を有する正極材料を得る複合水酸化物（前駆体）基礎プロセス技術（数キログラム/月）ならびにリチウム化技術による最終生成物を得るプロセスを田中化学研究所内で確立する。また産総研開発品を100とした場合の充放電特性値を80%以上に高める。少なくともこの年度内に電池メーカーへ数キログラム程度のサンプル供給が可能となるレベルに達することを目標とする。

電極素材特性評価に関しては、低温動作時の電極特性の解析と素材物性の解析を並行し低温特性支配因子を見出す。これらの知見から低温特性に影響を及ぼす複合水酸化物の仕様ならびに最終生成物の仕様決定へ反映させる。また、前駆体合成、リチウム化工程における品位安定の条件を確立するため、割付条件と諸物性の因果関係について上記仕様をベースに決定する。

評価対象として、5時間率充放電条件におけるサイクル劣化率0.4%（50サイクル時 初期容量比率80%維持）、且つ-20℃での5時間率放電条件で対常温時50%の容量維持を達成する。

##### (b) 最終目標

新規酸化物正極材料の開発に関しては、1時間率放電において1,000 Wh/kgのエネルギー密度を有し、かつ1/20時間率放電においても1時間率放電容量の80%以上の容量を有する正極材料が見出せること。5時間率放電において-20℃においても室温の60%以上の容量を有していること。5時間率、室温において100サイクル後に初期容量の80%を維持させるための寿命見通しを立てる。

正極材料の品質安定化成技術の開発に関しては、1時間率放電において1,000 Wh/kgのエネルギー密度でかつ、1/20時間率放電において1時間率放電容量の80%以上の容量を有し、100サイクル後に初期容量の80%を維持できる正極材料の量産プロセス、すなわち産総研開発品と同等の充放電特性を有する複合水酸化物（前駆体）ならびにそれらをリチウム化した正極材料の品質安定化技術（数キログラム/月）を確定する。その粉末を用いて電池メーカー等で、小型実用電池作製を行い、小型単電池あたりの重量エネルギー密度250 Wh/kgを達成する。また、重量出力密度3,125 W/kgを見通すための高出力化技術を確立する。

上記小型単電池の性能値により、最終目標である電池パックあたり重量エネルギー密度200 Wh/kg、重量出力密度2,500 W/kgを見通す。

電極素材特性評価に関しては、上述手法を発展させ、結晶構造、化学組成、粉体特性から「1時間率放電において1,000 Wh/kgのエネルギー密度を有し、かつ1/20時間率放電においても1時間率放電容量の80%以上の容量を有する正極材料」の仕様策定に資すること。加えて、長寿命化、低温特性改善を含むさらなる高性能化へ向けた開発指針を明らかにする。

（想定条件・根拠）

公募要領においては3 kWh級パック電池の換算値で200 Wh/kgを達成することとなっている。一方で当該要素技術開発では小型実用単電池を試作し、そのエネルギー密度で上記目標を達成することとなっている。単電池からパック電池への換算値は、経済産業省の2006年8月の報告書「次世代自動車の将来に向けた提言」内の補論「性能目標設定の考え方」から単電池重量エネルギー密度の80%がパック電池のエネルギー密度に相当すると記述されていることから、 $200 \text{ Wh/kg} \div 0.8 = 250 \text{ Wh/kg}$ と計算した。

重量エネルギー密度250 Wh/kgを達成するためには、電池構成素子（正極、負極）部分が電池全体の重量にしめる割合が50%以上に達している（以前のLIBESプロジェクトにおいても、移動体用Ni-Co系大型単電池における材料素子重量割合（正極、負極、電解液、セパレータを含み、集電体は除く、H14年3月のモジュール電池開発報告書内の表4-3-1に基づき計算）が69%である）ことを考慮すると、電池構成素子換算で500 Wh/kgの重量エネルギー密度達成が必要。

電池構成素子換算で500 Wh/kgの重量エネルギー密度達成のためには、小型実用単電池容量を1 Ah、平均作動電圧3 Vとして3 Whの電池設計することを考えると、黒鉛系負極材料（容量360 mAh/g、平均電圧0.2 V（対Li金属極））は2.78 g、 $\text{Li}_2\text{MO}_3$ を例とした正極材料（容量310 mAh/g、平均電圧3.2 V（対Li金属極））は3.23 g必要となり、活物質の総量は6.01 gとなる。重量エネルギー密度は、 $3 \text{ Wh} \div 6.01 \text{ g} = 0.499 \text{ Wh/g} = 499 \text{ Wh/kg}$ となり、正極材料の素材特性として平均作動電圧3.2 V、310 mAh/gの容量から計算される正極重量エネルギー密度992 Wh/kgとなることから、本事業における正極材料のエネルギー密度設定値1,000 Wh/kgは妥当である。

また、正極材料の開発である本提案においては、エネルギー密度の検証のためにも、また、実用化により適した材料開発を推進する上でも、電池メーカーへの試料提供が不可欠である。本事業でのバッチ量の定義は、電池メーカーが例えば18650形円筒電池の試作を行う際に供給可能な量として2 kg/回（試作）としており、試作歩留まりを考慮の上数kg/月程度の合成が可能な装置が必要と考える。

(6) 研究開発成果

表 .2.2.2-2 研究成果（新規酸化物正極材料の開発）

項目	目標値（最終）	達成値	達成度	備考（試料）
エネルギー密度 vs.正極活物質 高レート時容量 維持率@1/20 時 間率	1,000 Wh/kg (@1 時間率)	762 Wh/kg	76%	Li <sub>1+x</sub> (Fe <sub>0.2</sub> Ni <sub>0.2</sub> Mn <sub>0.6</sub> ) <sub>1-x</sub> O <sub>2</sub> (KMnO <sub>4</sub> 由来、800 1 時 間窒素中焼成品)
安全性低温特性 (-20 )@5 時間率	80% vs. 1 時間率容量	43%	54%	
寿命 (100 サイクル後 @5 時間率)	60% vs.+25°C容量	38% vs.+30°C容量@3 時 間率	63%	
	80%	76% @3 時間率	95%	

表 .2.2.2-3 研究成果（正極材料の品質安定化技術の開発）

項目	目標値（最終）	達成値	達成度	備考（試料）
目標とする重量 エネルギー密度 を備えた正極活 物質製造プロセ スの確立	900 Wh/kg (@1 時間率) が達成 可能なリチウム 化合物合成プロ セス技術開発	792 Wh/kg	88%	Li <sub>1+x</sub> (Fe <sub>0.2</sub> Mn <sub>0.6</sub> Ni <sub>0.2</sub> ) <sub>1-x</sub> O <sub>2</sub> (750 空気-窒素中焼成 品)
前記製造プロセ スで得られた正 極活物質の充放 電特性	AIST 試作品の 100% の性能を 確保	100%	100%	
目標とする性能 を備えた正極活 物質サンプル供 給量	サイクル維持率 (@1/20 時間率、 100 cycle):70%、 レート容量維持 率(@1/20 時間率 /@1 時間率):70% 複合水酸化物 数 kg/月 リチウム化合物 数 kg/月	サイ ク ル 維 持 率 :0.05C,100cycle: 70% レ ー ト 容 量 維 持 率:30% 3 kg/月 3 kg/月	サイクル 維 持 率:70% レ ー ト 容 量 維 持 率:43% 100% 100%	

## <成果 1 >

(内容) 既存  $\text{Li}_2\text{MO}_3$  系正極との電位整合性に優れたコバルトフリー新規  $\text{Li}_2\text{MO}_3$  系酸化物正極材料、高容量鉄及びニッケル置換  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  正極材料の開発に成功

(達成度)

(成果の意義)

現在、既存  $\text{Li}_2\text{MO}_3$  系正極として国内外においてコバルト及びニッケル置換  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  ( $\text{Li}_{1.2}\text{Co}_{0.13}\text{Ni}_{0.13}\text{Mn}_{0.54}\text{O}_2$  等) が精力的に実用化可能性が検討されている。この材料は約 3.7 V の平均初期放電電圧を有し、約 250 mAh/g の初期放電容量を有する魅力的な正極材料であるが、資源的に偏在しかつ高価なコバルトを含むため、さらに安価で魅力的な充放電特性を有する新規  $\text{Li}_2\text{MO}_3$  系正極が求められている。

我々は、これまでに新規  $\text{Li}_2\text{MO}_3$  系正極として鉄置換  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  を見出し、その充放電特性の鉄含有量依存性を検討してきた。鉄置換  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  は室温で 200 mAh/g 以上の初期放電容量を有する高容量正極材料となりうることはわかってきたが、初期平均放電電圧が鉄含有量によらず 3.0 V と低いことから、上記既存  $\text{Li}_2\text{MO}_3$  系正極に対する電位の違いが大きく、実用化には放電電圧を上昇させる必要があった。そこでニッケルと鉄を同量マンガンに対して置換させる組成式  $\text{Li}_{1+x}(\text{Fe}_y\text{Ni}_y\text{Mn}_{1-2y})_{1-x}\text{O}_2$  ( $0 < x < 1/3, 0 < y < 0.4$ ) で表される正極材料を産総研が独自に開発した合成手法である共沈-水熱-焼成法で作製し、その充放電特性評価等を実施した。その中で  $y=0.2$  組成 ( $\text{Li}_{1+x}(\text{Fe}_{0.2}\text{Ni}_{0.2}\text{Mn}_{0.6})_{1-x}\text{O}_2$ ) を選択し、かつ高温で短時間(800 1 時間)の窒素中焼成を行うこと、さらにマンガン源として過マンガン酸カリウム( $\text{KMnO}_4$ )を選択することにより、最終目標値を概ね達成しうる、3.5 V 級鉄及びニッケル置換  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  正極を作製することに成功した。またこの材料は塗布型電極作製後、対極を黒鉛系負極とした実用リチウムイオン二次電池構成においても約 230 mAh/g の初期放電容量が得られ、30 サイクル程度まで安定にサイクルすることがわかり、車載用リチウムイオン二次電池正極としての潜在能力を有していることがわかった点で意義深いと考える。

(課題と取り組み)

上記鉄及びニッケル置換  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  正極材料の実用化のためには、上記目標達成度において達成度の相対的に低い、レート特性と低温特性の改善が必要である。これらの特性を改善するためには、遷移金属組成の配合比の再検討、一次粒子径の低減(比表面積増大)が必要である。平均放電電圧の大幅な低下やサイクル特性劣化を避けつつ上記目標を達成するためには、作製技術のさらなるブラッシュアップが求められる。またサイクル経過に伴う一部スピネル相への構造変化の抑制技術確立も必要である。これらの課題を解決すべく新たな添加金属元素や電解液組成の検討なども行なう必要があると考える。

## <成果 2 >

(内容) 既存  $\text{Li}_2\text{MO}_3$  系正極に匹敵する充放電特性を有するコバルト及びニッケルフリー新規  $\text{Li}_2\text{MO}_3$  系酸化物正極材料、鉄及びチタン置換  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  正極材料の開発に成功

(達成度)

(成果の意義)

上記鉄及びニッケル置換  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  正極は 3.5 V 級正極として優れた特性を有しているが、まだ高価なニッケルを含んでいる。さらなる低コスト化と充放電特性改善(特に初回の充放電効

率の大幅な改善)のため、ニッケルを外した鉄及びチタン置換  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  系正極を遷移金属配合比の再設定と遷移金属価数制御のための作製方法の抜本的見直しを通じて検討した。

まず遷移金属配合比の設定を実施した。鉄の含有量に関しては、鉄置換  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  の充放電特性の鉄含有量依存性において、高容量を維持しつつ最も優れたレート特性、低温特性を示す鉄含有量である 30%を指定した。チタン含有量に関しては、充放電時に起こる Mn 溶出の抑制を行うために全遷移金属量に対して 20%とした。従って組成式は  $\text{Li}_{1+x}(\text{Fe}_{0.3}\text{Ti}_{0.2}\text{Mn}_{0.5})_{1-x}\text{O}_2$  とした。

次に鉄またはチタン置換  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  正極材料の初回および 2 回目の定電流充放電特性比較とその化学組成変化に関する報告から、1 サイクル後の状態を作製法の工夫により作製できれば上記問題は解決できるものと考え、有機物共存下での不活性雰囲気焼成(炭素還元法)を用いて目的物質の合成を行った。また炭素還元前に試料をあらかじめ高温で大気中焼成すること、焼成前の原料は上述の水熱処理品ではなく水熱処理前の共沈物を用いることにより作製工程の複雑化を防ぎ、共沈-焼成-炭素還元法として新たな作製プロセスを構築した。

得られた鉄またはチタン置換  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  正極材料は、炭素還元により充放電容量は 250 mAh/g と既存  $\text{Li}_2\text{MO}_3$  正極とほぼ同等となり、初回充放電効率も 2.0-4.8 V の電位範囲で 80%以上に改善した。またこの材料は対極黒鉛での実用電池構成で 20 サイクルまでサイクル劣化がほとんどないことが判明した。この材料も車載用リチウムイオン二次電池正極材料として優れた特性を有していることがわかった点で意義があるものとする。

(課題と取り組み)

上記材料の平均電圧は 3.2 V であり、さらなる改善が必要と考える。ニッケル以外での電圧向上元素を探索する必要がある。また作製方法もさらに改良してゆく必要がある。またこの材料は、塗布型電極試作時の特性がまだ十分に引き出せておらず、今後金属配合比の再検討も含めた継続的な改善が必要である。

### <成果 3>

(内容) 新規トンネル構造マンガ氧化物系正極材料の開発

(達成度) ○

(成果の意義)

本事業で得られた  $\text{Li}_{0.44+x}\text{MO}_2$  系正極材料は、今までほとんど検討されてこなかった新規材料系であり、前述の  $\text{Li}_2\text{MO}_3$  系と同様に電池メーカー等への正極活物質材料の多様性を付与するという観点から意義深いと考えている。また、出発原料を田中化学研究所で試作した Mn-Ti 水酸化物原料とすることで、より高容量化が可能であることを見出した。このような新規マンガ氧化物系正極は、含有するリチウムが少ないことから、現状のリチウムイオン二次電池の電池構成の標準仕様である負極が Li イオンを含まない材料(例:炭素材料、合金系材料)での適用が困難であったが、本事業の中でリチウム処理技術を確認し、 $\text{Na}_{0.44}\text{MnO}_2$  型のトンネル構造を保持した新規マンガ氧化物正極材料  $\text{Li}_{0.83}\text{MnO}_2$  およびそのチタン置換体である  $\text{Li}_{0.90}\text{Mn}_{0.90}\text{Ti}_{0.10}\text{O}_2$  が合成可能であることを見出すと共に、平均放電電圧が 3.7-3.5 V で、充放電容量が 200 mAh/g 程度の高容量正極であることを明らかにし、実用化可能性が高まったと考える。本材料系は、現在高容量酸化物正極として知られている NMC 系正極 ( $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ )等と比較して、資源量、価格の観点から低減することが望ましい Ni およ

び Co を含まず、安価で資源的に豊富な Ti、Mn を活用した材料系であることから、実用化が期待される。

(課題と取り組み)

本材料系はリチウム化処理技術の適用によって、初期充放電特性を改善することはできたが、200 mAh/g を大幅に超えるような更なる高容量化は困難であり、目標とした重量エネルギー密度と比較すると 70% 程度の性能であった。また、寿命特性、レート特性、低温特性が目標値に未達であり、今後の取り組みで、今回明らかにされた性能を実用的な電極組成で実証していくことが必要である。そのためには、電解液、セパレータ等の他の電池部材とのマッチングや、電池システムとしての評価が重要と考えられ、素材メーカー、電池メーカーとの連携が必要と考えている。また、実用化のためには、本研究開発で見出したリチウム化処理技術の工業化への展開、低コスト化の検討が必須であり、そのための製造プロセスの検討を進める必要がある。

< 成果 4 >

(内容) 電極素材特性評価

(達成度)

(成果の意義)

分析電子顕微鏡により、鉄含有  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  正極材料 ( $\text{Li}_{1+x}(\text{Fe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_{1-x}\text{O}_2$ ) の微視構造評価を実施し、走査型透過電子顕微鏡-電子エネルギー損失分光 (STEM-EELS) スペクトラムイメージング法やナノビーム電子回折法などにより、正極材料の一次粒子内にナノスケールで Fe と Mn の遷移金属の濃度分布が存在し、2 つの結晶相が存在することを明らかにした。また、充放電過程における各状態の試料に対して STEM-EELS スペクトラムイメージング法を用いて、一次粒子内の Li の分布像をナノスケールで得ることに成功し、充放電時の Li の脱離・挿入過程と遷移金属分布の関係などを明らかにすることができ、充電過程で初めに  $\text{LiFeO}_2$  相から優先的に Li が脱離することをナノスケールで明らかにすることができた。また EELS、EDS による酸素の定量測定や電子回折法による結晶構造評価を行い、充電時に Li の脱離とともに酸化物イオンが脱離し、スピネル構造が形成され、放電後には酸化物イオンが一部戻って、スピネル構造が元の結晶構造に戻ることを明らかにし、FM 系試料の高い容量の起源として酸化物イオンが反応に関与していることを明らかにすることができ、ナノスケールの微細構造から充放電メカニズムに関する知見を得ることができた。酸化物イオンの挙動をさらに詳しく調べることにより電極の劣化を抑えることが可能になると考えられる。

近年の電子顕微鏡技術の発展により、高分解能 TEM や環状明視野 STEM で結晶中の Li 原子列の直接観察も行われるようになってきているが、ここで実施した電気化学特性評価や X 線回折法等との密接な連携により総合的に行った微細構造解析を基にして、電極材料の充放電メカニズムに迫るアプローチは優位性がある。

(課題と取り組み)

ナノスケールでの構造解析は局所領域の現象を捉えることになるが、電極全体の特性との関連付けをするために多くのデータ取得が必要となる。STEM-EELS 法では 1 つの測定領域に対してデータの取得、データの処理に多くの時間を要するが、測定手順のスキームを最適化することでデータ取得を短時間で行えるようにし、より多くの試料に対して測定を行い、得られたデータを統計的に処理する必要がある。また、データの定量性を向上させることも重要な課題



である。STEM-EELS法の測定スキームは確立しつつあり、従来の半分の時間で同等のデータが得られつつある。データ処理における定量性の向上には多変量解析を用いたデータ処理が効果的であることを確認している。今後、測定データの質と量の向上により、電極特性と微細構造の関係を明らかにしていく。

#### <成果5>

(内容) 正極材料の品質安定化成技術の開発

(達成度)

(成果の意義)

産業技術総合研究所が開発した2つの正極材料系、層状岩塩型  $\text{Li}_2\text{MO}_3$  ( $M=\text{Mn, Fe, Ni, Ti}$ ) 及び  $\text{Li}_{0.44+x}\text{MO}_2$  系 ( $M=\text{Mn, Ti}$ ) について、ラミネートセル作製・評価のための塗布型電極作製に必要な数量(数百g/月)を確保できる反応合成設備を導入し、産業技術総合研究所開発品と同等の電極性能の達成が可能かを検討し、異なる反応設備であっても反応条件を適宜変更することにより層状岩塩型  $\text{Li}_2\text{MO}_3$  系及び  $\text{Li}_{0.44+x}\text{MO}_2$  系材料について、同等性能の確保を可能とした。上記開発材料の中から、放電容量を最重要項目として各種電気化学特性を吟味し、層状岩塩型  $\text{Li}_2\text{MO}_3$  (Ni:Fe:Mn=2:2:6 組成)を選定しより詳細に合成条件を検討した。具体的には塗布型電極作製に適する粉末物性を得るため、充填密度、粒子形状、表面積等の粉末物性を制御する技術並びに同等の充放電特性を有する正極材料の品質安定化技術(数キログラム/月)を確立した。次に電池としてのエネルギー密度、出力密度のデータの改善を目的として、焼成プロセスを2段階に分けることにより最終生成物のタップ密度向上等、物性制御を図った。この材料について塗布型電極試作・評価を行い、電極密度や充放電特性に及ぼす効果を検討したところ約220mAh/gの放電容量が得られた。そこで、ラミネート型セル等の実用小型単電池を試作可能な量の試作と塗布型電極を用いた充放電特性評価を実施した。負極をMCMB(メソカーボンマイクロビーズ)としたラミネートセルの試作・評価データを基に重量エネルギー密度を算出したところ、重量エネルギー密度:171Wh/kg、体積エネルギー密度:407Wh/Lとなることを確認した。重量エネルギー密度の目標値250Wh/kgに対して約70%となった。また、サイクル特性についてはサイクル経過とともに充電電圧を上昇させるいわゆるステップ充放電を行うことにより概ね目標値を達成することができたものの、出力特性に関しては未達となった。

(課題と取り組み)

電池としての抵抗解析結果から、現在最も一般的に使用されている正極材料であるコバルト酸リチウムと比較してどのSOC状態でも交流抵抗が大きく、特に充放電末期の抵抗増大が著しい結果となった。この点より、出力特性の改善には電極組成もしくは構造の変更・改良により抵抗値の低い極板を作製する検討を行うことが必須であると考えられる。また、今回の検討により電池の高容量化の観点からよりシリコン系負極などの高容量の負極との組み合わせが必須ということが改めて確認できた。また、本材料の電池評価結果を外部機関に紹介し、結果として電池メーカー2社、他部材の材料メーカー等2者の計4機関にサンプル提供を実施した。今後はこれらの材料メーカー、電池メーカーの協力も仰ぎ、実用化を目指した取り組みを推進したい。

## (7) 知的財産権等

プロジェクト期間中の知的財産権等の件数を表 .2.2.2-4 に示す。

表 .2.2.2-4 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	3	1	0	6	5	15
うち、外国出願	0	0	0	0	0	0
国内登録	0	0	0	0	2	2
海外登録	0	0	0	0	0	0
論文	1	6	9	4	9	29
うち、査読付き	1	5	3	0	4	13
研究発表・講演	10	26	20	16	19	91
受賞実績	0	1	0	0	1	2
新聞・雑誌等への掲載	0	8	8	0	10	26
展示会への出展	0	0	1	1	0	2
合計	15	47	41	27	50	180

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

本事業においては、まず電池メーカー等に提供可能な酸化物正極材料の選択肢を増やすという目的で、開発を行ってきたため、電池のエネルギー密度に直結する塗布型電極時の密度向上手法の開発や、レート特性、低温特性を改善するための粉体特性制御技術、各種電解液とのマッチング、各種負極との組み合わせ検討といった、本材料にあった電池構成の構築検討が十分ではないと考える。今後は材料提供し始めている電池メーカー等との連携により、個別の正極材料の問題点の把握とその解決のための作製方法、金属配合比設定へのフィードバックが欠かせないと考える。まずは放電電圧の高い鉄及びニッケル置換  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  系を中心に数年かけて実用化検討を行い、その後さらに安価な鉄及びチタン置換  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  系正極材料へと開発を移行させていきたい。

## (9) 成果の実用化／活用

本研究開発事業の成果である「高容量・低コスト新規酸化物正極材料」について、田中化学研究所において 2020 年頃の商品化を見込んでいる。販売先としては主に EV 用リチウムイオン電池を生産している企業を想定している。また、EV 用リチウムイオン電池はその性能はもちろん、信頼性、耐久性も高いレベルでの両立が求められている。そのため、この分野で採用がかなえば他の分野、例えばスマートグリッド用大型蓄電池等にも採用されると見込んでいる。

しかし、現段階においては EV 用リチウムイオン電池用正極活物質として採用されうるレベルには至っておらず、出力特性、寿命特性、信頼性など改善しなければならない点が多い。これら問題点の改善を効率的に行うためには他の電池部材とのすり合わせ技術が重要であり、そのためには材料開発者間の連携だけでなく電池システム全体での評価・解析が不可欠であり、電池メーカーの協力が必須となる。言い換えれば、現段階で EV 用正極材料として電池メーカーの興味を引くレベルに到達していなければならない。この点に関しては (6) で述べた通り

複数の電池メーカーに本研究成果を紹介し、サンプルを提出しており今後の協力関係構築に向けた活動を継続中である。

また、本研究成果の波及効果としては学会や講演会を通じて成果を発表しており、最近特に話題となっているリチウム過剰型正極材料の候補の一つとして認知されている。現在実用化されている正極活物質ではユーザーが満足するレベル（価格、航続距離など）でEVを提供することが難しいと認識されており、本研究成果をはじめとした次世代正極材料の開発についても大変活発になっている。また、前述した通り、EV分野で採用がかなえば他の分野、例えば最近話題となっているスマートグリッド用途などの大型蓄電池等への採用も見込まれ、その波及効果はとても大きい。

実用化の為には負極や電解液等の他の電池部材メーカーとの連携はもちろん、電池メーカーの協力を得ることが不可欠を考えている。そのため、まずはこれらのメーカーとの共同研究的な枠組みを構築することが当面の目標となる（この際には公的プロジェクトの活用を視野に入れる）。連携体制の構築後、5年程度をかけ先に述べた技術課題の改善及び量産化技術の開発を行う。この検討結果を踏まえ、事業化できると判断した場合、設備投資を実施する。事業化時期の目途としては2020年頃を見込んでいる。

#### （10）その他（プレス発表3件）

1. 2008年8月18日発表 「リチウムイオンの出入りを可視化する電子顕微鏡観察技術を開発」、産総研プレス発表（吉川純、秋田知樹）
2. 2009年8月17日発表 「リチウムイオン二次電池用のコバルトを含まない正極材料を開発」、産総研・田中化学共同プレス発表（田淵光春、竹内友成、秋本順二、今泉純一）
3. 2011年10月12日発表 「安価で高性能なリチウムイオン二次電池正極材料の開発に成功」、産総研・田中化学共同プレス発表（田淵光春、秋本順二、今泉純一）

## 2. 2. 3 リチウム二次電池の安全性に資するイオン液体電解液の開発 (産業技術総合研究所)

### (1) 事業目的

リチウム二次電池の安全性を高める液体電解質媒体として、難燃性・難揮発性が主な特徴である“イオン液体（常温溶融塩）”の適用を検討し、既存の有機電解液系リチウム二次電池の構成を生かしつつ、安全性に優れた車載用リチウム二次電池システムの実現に資するイオン液体電解質を開発することを目的とする。

### (2) 事業概要

次世代自動車用高性能蓄電システムとしてのリチウム二次電池の安全性向上に資する車載環境での実用温度域で少なくとも  $2 \times 10^{-2}$  S/cm のイオン伝導度を示しうる低粘性かつ低融点のイオン液体の開発を行う。これに際し、計算科学的手法を用いたスクリーニングによる効率的なイオン構造の探索を行い、また実際に合成によって得られたイオン液体の電池模擬環境での熱安定性評価を行う。さらにイオン液体に適した電極やセパレータの探索により、開発したイオン液体を用いて小型実電池を試作し、2,500 W/kg のピーク出力が得られることを実証する。それぞれについての研究開発実施項目を以下に記す。

#### 計算科学的手法によるイオン液体電解質の推定

非経験的分子軌道法による正イオンおよび負イオンの構造から開始、続いて正負イオン対の相互作用計算へと展開し、イオン液体物性の解明に資する手法であることを中間報告年度までに確認する。その後、それらの結果を踏まえた分子動力学計算法の確立を目指した後、低粘性、低融点イオン液体の設計指針導出に利用する。公知イオン種から未知イオン種の物性予測に活用し、高性能イオン液体開発のスクリーニングに活用できることを示す。一方、これらの分子レベルの計算に加え、中間目標以後は、第一原理 DFT 法によるリチウム金属／イオン液体界面構造計算の検討を行い、電池電極界面反応のような不均一反応場におけるイオン構造の影響について検討することにより、低粘性、低融点といった基礎物性だけでなく、電池系に適したイオン液体構造の導出を目指す。

#### アニオン原料合成及びイオン液体合成

高い耐熱性を示すアミドアニオンである TFSA アニオンと耐熱性には若干劣るものの、これまで知られているイオン液体では最も高い電池特性を示しうる FSA アニオンの双方の特徴を兼ね備えると予想される FTA アニオンの合成を検討し、それからなるイオン液体を 30 種以上合成する。室温域で  $10 \text{ mS/cm}^2$  の伝導度、車載環境での導電率としては、 $20 \text{ mS/cm}^2$  となるイオン液体を見出す。また中心原子が窒素であるこれらアミド系アニオンとは根本的に構造が異なる中心原子がホウ素のボレート系アニオンの新規物質を開発し、実施項目 で示された設計指針を導入し、低粘度、低融点化の実証を行う。中間評価後は、未知アニオンとして中心原子が炭素のメサイド系の新規物質合成を目指す。

### 電解質特性評価

イオン液体の基本物性（粘性、伝導率、密度）、電気化学安定性、融点、固体-固体相転移挙動、耐熱性評価を順次検討する。中間評価まではイオン液体に焦点をあて、伝導率や粘性と関連する、イオンの自己拡散係数の計測を行う。

### 電池部材との親和性評価及び最適化

イオン液体と既存の有機溶媒系電解液に最適化された電池部材との親和性はあまり良好ではない。特にセパレータへの含浸を改善するべく、これらとイオン液体の馴染み（接触角、表面張力測定等）に関する情報を収集する。さらにカチオン、アニオン構造との相関について検討し、イオン液体に適したセパレータ構成の探索を行う。引き続き、合剤電極との親和性に関する情報を収集する。特に出力を左右する電極の厚みと電池特性の相関と濡れに関する情報を関連させ、小型実電池での検証に向けて、イオン液体に適した合剤電極の構成についての知見を得る。

### 出力特性評価

上記で見出された新規イオン液体ならびに電池材料を組みあわせ、小型実電池の設計を行い、出力特性評価を行う。一般的な有機溶媒電解液と対比させながら、中間目標として小型実電池においてピーク出力1,800 W/kg を、最終目標はプロジェクト目標値である2,500 W/kgを見通す。

## (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.2.3-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
計算科学的手法によるイオン間相互作用推定						
アニオン原料合成およびイオン液体合成						
電解質特性評価						
電池部材との親和性評価及び最適化						
出力特性評価						
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
産業技術総合研究所	40	50	55	50	40	235

#### (4) 研究開発の実施体制

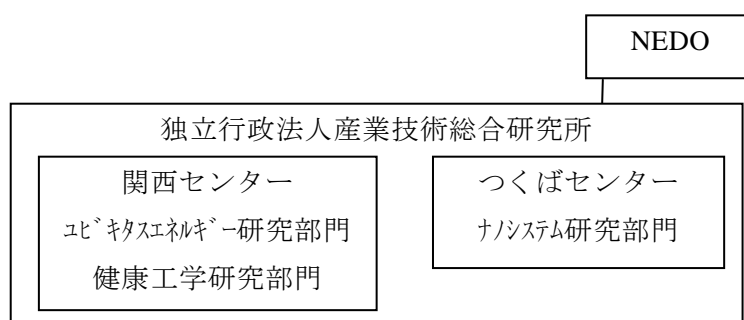


図 .2.2.3-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

##### 中間目標

##### (a) 計算科学的手法によるイオン液体電解質の推定

高性能イオン液体となる分子の設計指針導出のために、物性情報が公知のアミド系イオン液体を中心にイオン間相互作用と実測のイオン解離度（イオニシティー）との相関について明確にする。その後、これらの計算結果を活用し分子動力学計算のための力場設計を目指す。より多彩なアニオン（例えば中心原子がホウ素のボレート系や同炭素原子のメサイド系アニオン）からなるイオン液体への分子動力学法の適用可能性を確認する。

イオン液体は正負イオンの膨大な組み合わせが考えられるものの、合成に手間がかかるため電池系に適した優れたイオン液体の合成については試行錯誤の連続であったが、近年著しく計算機の性能が向上し、かつ計算機コストが急激に低下し、かつては現実的には困難であった高精度計算（第一原理計算）を短時間で行う事ができるようになった。一方、イオン液体の合成例も多くなり、計算化学的手法による物性予測の検証が可能となりつつあるが、蓄電池系への適用に特化した研究はあまり見られない。本研究で特に重視する低粘度・低融点イオン液体の開発には分子動力学法が適しているが、その活用のためには力場の設計が欠かせない。力場設計には、まず多種多様な構造が考えられるイオン単独の計算からはじめ、イオン間相互作用の詳細な計算を行う必要があるが、これらの計算結果から粘性や融点以外の情報（例えば電気化学安定性、電荷分布、リチウムカチオンとの相互作用）が得られる。中間評価までは、これらの情報の活用を検討し、非対称構造の導入の意味、側鎖へのエーテル酸素導入効果、の2つの性能向上法の解明に繋がり、新規物質開発に計算化学的手法が有用であることが示されたことは限られたリソースの元での新規物質開発にとって意義深いものであると考えられる。

##### (b) アニオン原料合成及びイオン液体合成

耐酸化性に優れたアニオンの合成は、フッ素化学の専門知識が必要であり、また慎重な合成作業が要求されることから、試行錯誤で高性能イオン液体となるアニオンの合成を行う事は非常に非効率である。実施項目①で計算科学的手法による設計法の確立を目指しているが、それと同時に、これまで研究担当者らが見だしてきた新規イオン液体を土台とし、非対称 FTA アニオンからなるイオン液体の合成をまず検討した。開発目標としては、車載環境温度での伝導率を  $2 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$  となるものとした。その根拠は以下の通りである。

一般的な構成の高出力タイプの電池の実績から、エネルギー密度を大きく低下させずに出力

2,500 W kg<sup>-1</sup> を達成するためには、リチウムイオンによる伝導の寄与が少なくとも  $2 \times 10^{-3}$  S/cm であることが必要と見積もられた。よって本研究で開発すべきイオン液体電解質に求められる伝導度は、所定量（たとえば 0.3~ 1.5 mol/dm<sup>3</sup>）のリチウム塩添加後、作動温度におけるリチウムイオンの伝導の寄与が最低  $2 \times 10^{-3}$  S/cm と設定される。さらにイオン液体中でのリチウムイオンの輸率が濃度によって数%から 10%に変化する事を考慮し、少なくとも車載環境における実用温度域において  $2 \times 10^{-2}$  S/cm 以上のイオン伝導度を示しうる低粘性かつ低融点のイオン液体が必要となる。

リチウム二次電池系において内部抵抗因子は、単にリチウムイオン輸送抵抗だけでなく、電極界面電荷移動抵抗の総和である。よって伝導度が目標値に若干届かないものであっても、電極界面電荷移動抵抗が小さくなるようなイオン液体が見出されれば、必ずしも伝導度の目標値を達成していなくても、中間目標(e)で述べる出力特性の目標を達成する可能性はある。

#### (c)電解質特性評価

実施項目②で開発するイオン液体の基礎物性（粘度、導電率などの輸送特性から、融点、熱分解温度などの熱物性）の測定を行う一方、磁場勾配 NMR 法によるイオンの自己拡散係数計測、さらに安全性についての評価（質量分析計と熱天秤を組み合わせた熱分解ガス組成の解明、示差走査型熱量計と耐熱容器を用いた模擬電池内部環境での熱安定性評価）の実施を検討する。中間評価までは、主として本研究でまず検討する FTA 系イオン液体から開始し、イオン液体を構成するイオン種の構造とこれらの物性との相関性について明らかにすることを目標とする。

#### (d)電池部材との親和性評価及び最適化

電池のピーク出力 1,800 W/kg を達成しうるイオン液体電解質で、かつ少なくとも既存の有機電解液の発熱開始温度よりも高い温度でも発熱しないイオン液体と電池構成材料との組合せを見出す。

#### (e)出力特性評価

出力評価に使用する電池の設計、試作を行い、中間評価時の目標として、前プロジェクト（燃料電池自動車等用リチウム電池技術開発 高性能リチウム電池要素技術開発）における目標値 1,800 W/kg を見通すこととした。

### 最終目標

#### (a)計算科学的手法によるイオン液体電解質の推定

中間評価までに前倒しで達成した、分子動力学計算による粘性予測を利用し未知アニオンについて検討し、低粘性イオン液体となるイオン構造の特徴を抽出する。また固体電極とイオン液体界面構造のモデルとしてリチウム金属/イオン液体界面のエネルギー構造を検討するために、第一原理 DFT 計算の適用を行い、リチウム金属表面とアニオン種の相互作用について詳細に検討する。

#### (b)アニオン原料合成及びイオン液体合成

最終目標は、中間目標から同じく車載環境温度での伝導率を  $2 \times 10^{-2}$  S/cm とした。根拠は前述の通りである。アミド系アニオンからボレート系など構造が異なるアニオン種へ展開する。

#### (c)電解質特性評価

引き続き新規に開発したイオン液体の物性評価を行う。安全性についての評価については、イオン液体からリチウム塩の熱安定性についてアニオン構造との相関性について検討する。

(d)電池部材との親和性評価及び最適化

最終目標における電池のピーク出力  $2500 \text{ W kg}^{-1}$  を達成しうるイオン液体電解質で、かつ少なくとも既存の有機電解液の発熱開始温度よりも高い温度でも発熱しないイオン液体と電池構成材料との組合せを見出す。

(e) 出力特性評価

出力評価に使用する電池の設計、試作を行い、有機溶媒電解液との対比を行いつつ、本プロジェクトにおける目標値  $2,500 \text{ W kg}^{-1}$  を見通す。

(6) 研究開発成果

表 .2.2.3-2 研究成果 (一覧)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
(a)計算科学的手法によるイオン液体電解質の推定	粘性の予測法の確立とそれに基づく設計指針導出 固体/イオン液体界面でのアニオン吸着挙動解明	分子動力学法による粘性とイオン構造のトレンド再現に成功。 リチウム金属上での吸着エネルギーがアニオンに依存することを解明。		
(b)アニオン原料合成及びイオン液体合成	室温で $10 \text{ mS / cm}$ 、車載環境温度で $20 \text{ mS / cm}$ の伝導度を示す低粘性、低融点イオン液体合成。	新規イオン液体 40 種以上(新規アニオン種は2種)合成。 $65$ ではほぼ $20\text{mS/cm}$ となるイオン液体を合成。 非対称アニオンにより $100$ 以上の融点低減効果およびアニオンへのエーテル酸素導入による低粘度、低融点化を実現。		
(c)電解質特性評価	熱安定性(熱分解ガス分析)評価 電池構成材料共存下での安定性評価(DSC)	最も熱安定性が弱いと考えられるリチウム塩についての分解ガス分析、およびリチウム金属共存下での熱安定性について検討し、開発に注力した FTA 塩が当初の予想の通り、FSA よりも高い熱安定性を示すことを明らかにした。		



(d)電池部材との親和性評価及び最適化	イオン液体に適した電池構成部材を見出す。	イオン液体の含浸性に優れたセパレータとしてシリカナノ粒子含有セパレータを見出した。	
(e)出力特性評価	2,500 W/kg	1,868 W/kg	従来の有機溶媒を上回る出力を見通したが、プロジェクト目標値には達せず。

### <成果 1 >

(内容) 計算科学的手法によるイオン液体電解質の推定

(達成度) ◎

(成果の意義) 合成が困難なフッ素アニオンが主体であるイオン液体およびリチウム塩の効率的な開発に資する成果。

(課題と取り組み)

最も高精度な第一原理計算の適用を当初から念頭におき、その迅速な計算に必要なコンピュータの導入は、開発の進捗、性能向上を考慮しつつ毎年度積み増した。特に中間評価以降取り組んだ分子動力学計算では膨大な計算結果の蓄積を要するため、計算結果を高速に保存するファイルサーバの導入も行い、256 イオン対に及ぶ膨大な計算を円滑に行えるように整備した。

これらの計算科学的手法により、イオン液体の物性とイオン構造の相関性について詳細に検討した結果、電荷分布、正負イオン間相互作用エネルギーの強さとその方向性がイオンの解離性に重要であることを見出した。さらにこれらの結果を踏まえた分子動力学計算から得られる自己拡散係数が実測と良い相関性を持つ計算手法を見出し、低粘性イオン液体開発のための仮想実験が可能な環境の構築に成功した。未知イオン液体の粘性の推測だけでなく、より積極的にイオン構造の特定の部位の運動性を凍結させる等の計算ならではの試みによって、どのような構造、運動性が粘度に強く影響するのかを明らかにした。(図 .2.2.3-2 (左)) これらはそのまま低粘性イオン液体の設計指針となることを意味する。経験と勘からなる新規物質開発から、狙った化合物をピンポイントで開発しうる環境が実現しつつある。

一方、電池系では固体と液体が接する不均一反応場におけるイオン構造の影響についての検討が必要である。そこでこのような計算に向いている第一原理 DFT 計算を中間報告後に導入した。モデルとしてもっとも単純な系ではあるがリチウム金属 (出力評価セルの負極として使用) とイオン液体界面のシミュレーションを行い、アニオン種の構造の相違によって界面におけるリチウム金属との相互作用 (吸着エネルギー) が大きく異なること、その度合がバルクイオン液体中でのリチウムカチオンとアニオンの相互作用エネルギーとは真逆であることを見出した。(図 .2.2.3-2 (右)) これらの結果とリチウム金属上での界面電荷移動抵抗等の結果を総合すれば、どういったアニオン構造がリチウム二次電池系に好ましいかについて理解が進むものと考えられる。

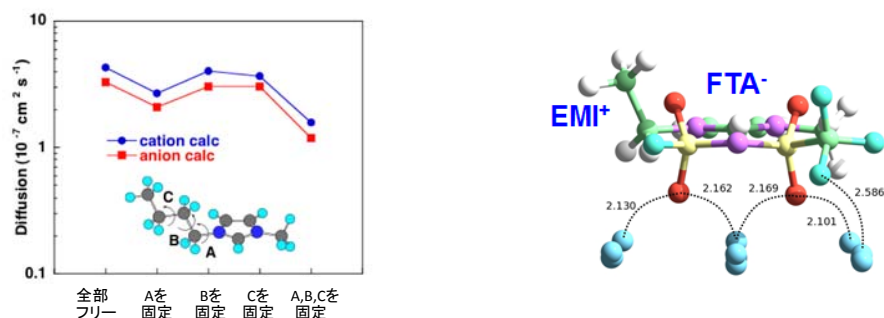


図 2.2.3-2 計算結果の例 (左) イオンの任意の位置での運動性を凍結した場合の自己拡散係数—運動性が重要であることを示唆 (右) Li(100)上での EMI[FTA]の吸着状態—Li 金属表面にはアニオンが強く吸着。

### <成果 2>

(内容) アニオン原料合成及びイオン液体合成

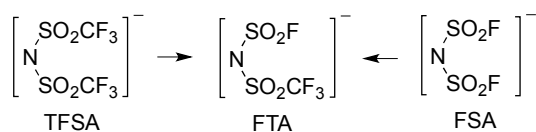
(達成度) ◎

(成果の意義) 新規なパーフルオロアニオン種の合成により熱安定性の改善とリチウム二次電池に適するアニオン種の構造因子が明らかとなった。

(課題と取り組み)

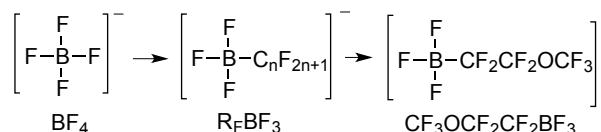
イオン液体の物性や電池特性はアニオン種の影響を大きく受けることは、本プロジェクトの開始前にある程度明らかにしてきたが、新規なアニオン種の合成は非常に合成が困難であることから、アニオン構造と物性や電池特性の相関について詳細に検討することがままならなかった。そこでまず、本プロジェクト開始前に明らかにした FSA アニオン (別称: FSI) と TFSA アニオン (別称 TFSI) の両者の特徴を兼ね備える FTA アニオンの合成を検討し、非対称構造を有する FTA アニオンでは従来のアニオンでは固体となってしまう対称性の高いカチオンをほぼすべてイオン液体化することが可能であることを見出し、さらに電池特性については現時点で最も優れた電池特性を示す FSA アニオンに次ぐ高いレート特性を示しうることを明らかにした。粘性は FSA に次いで低く、伝導度は FSA について高いことが高いレート特性を示す原因ではあるが、さらに電極界面電荷移動抵抗が FSA に次いで小さいことから、アニオン構造中に FSO<sub>2</sub> 基を含むことが電池性能に大きく影響していることが明確になった。成果 1 で得られた計算結果から、リチウムカチオンとアニオンの相互作用エネルギーが小さいこと、アニオン内部における電荷分布の分散性が TFSA に比べるとより広範囲であること、リチウム金属への吸着エネルギーが高いことなどが相まって電極界面での電荷移動抵抗を小さくしているものと考えられる。次に、成果 1 で低粘性、低融点のイオン液体の設計指針として、側鎖の運動性を高めることが効果的であるという結果を得たが、それを実現すべくエーテル酸素を含むパーフ

アミド系アニオン



本事業で開発

ボレート系アニオン



本事業で開発

図 2.2.3-3 本事業で開発したイオン液体構成アニオン種

ルオロ側鎖をボレート系アニオンに導入し、確かに粘性や融点が劇的に低下することを明らかにすることができた。成果1によって得られた分子設計指針の導入が確かにイオン液体の物性改良に効果を示すことの実証となった。これらの結果はリチウム二次電池系においては合成が困難なパーフルオロアニオンの合成が電池特性改良の鍵を握っていることを如実に示している。

### <成果3>

(内容) 電解質特性評価

(達成度) ○

(成果の意義) イオン液体の物性とイオン構造の相関性について、計算科学的手法の結果の妥当性を明らかにした。また電池電解液の熱安定性にとって重要なリチウム塩の熱安定性に関する知見を得ることができた。

(課題と取り組み)

合成したイオン液体の輸送物性や熱物性のような基本特性の集積によって、計算科学的手法によって得られる結果の検証に用いた。特に磁場勾配 NMR 法によるイオンの自己拡散係数測定から、イオン液体中での拡散挙動においてアニオンは系の粘性にほぼ依存するが、EMI カチオンでは粘性では説明できない高い拡散係数を示すという結果を得た。これはイオン液体中でのアニオンとカチオンがそれぞれ異なる環境に存在することを示唆する重要な知見であり、計算科学的手法で求めた自己拡散係数とも良い一致を示すことが分かった。

本事業ではイオン液体が安全性に資するかどうかの検討が最も重要な知見を与えると考えられ、熱天秤と質量分析計を組み合わせた独自に開発した装置によって、様々なイオン液体やリチウム塩の熱分解機構の解明を検討したが、イオン液体については、分解ガスが質量分析計内部の機構に影響し装置の不具合が頻発したことから、イオン液体の分析よりも、より熱安定性に劣るリチウム塩について重点的に検討した。その結果から、一般の電解液に用いられている PF<sub>6</sub> 塩よりも、TFSA のようなアミドアニオンが熱安定性が高いこと、FTA は FSA よりも高い熱安定性を有すること、ボレート系はパーフルオロオアルキル側鎖が 150°C という比較的低い温度で脱離することから総合するとアミド系アニオンの耐熱性が優れているという結果を得ることができた。さらに Li 金属共存下での DSC 測定の結果 (図 .2.2.3-4)、LiFTA は他の主だったリチウム塩に比べて発熱温度が高く、また発熱マイルドであることが確認できた。そこで次に Li 金属負極を用いたラミネートセルでラミネートの耐熱限界温度 (ほぼ 140°C) まで、LiFePO<sub>4</sub> 正極とリチウム金属負極からなるセルが作動することを確認し、さらに、LiFTA 塩が融点 100°C とこれまで知られているパーフルオロアニオンのリチウム塩では最も低い融点を示し、100°C 以上の熔融状態での LiFePO<sub>4</sub> 正極の作動を確認することができた。このことは開発した FTA 塩の耐熱性が優れていることを示唆するものである。

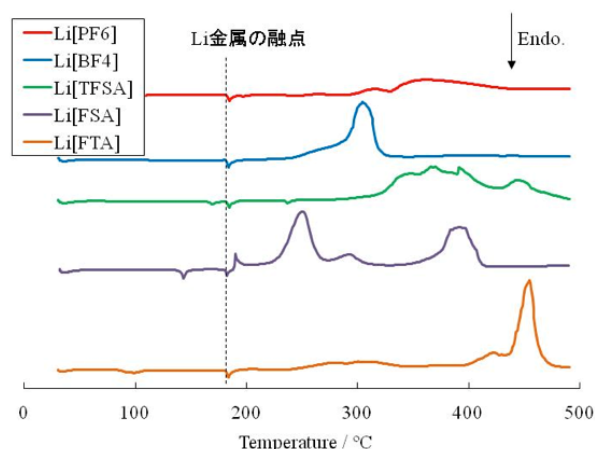


図 .2.2.3-4 Li 金属共存下での Li 塩の熱安定性

#### <成果4>

(内容) 出力特性評価

(達成度) Δ

(成果の意義) イオン液体のように従来の有機溶媒と比べて一桁以上高い粘性を有する電解液であっても、アニオン構造を工夫することによって出力特性が有機溶媒電解液よりも高くなることを実証した。

(課題と取り組み)

高出力を得るために、正極、負極ともに様々な材料を検討し、出力評価用セル (0.3A 級) の構築が可能となる電極系としてコバルト酸リチウムとリチウム金属負極を選定し、0.3A 級電池の構築と有機溶媒電解液で所定の容量での充放電試験が可能であるものが構築できた。しかしながら、グローブボックス中での手作業でのセル構築のため歩留まりが悪いこと、本セルの電解液の必要量が多く、イオン液体の大量合成が困難であることから、この出力評価セルでの出力評価の代わりに、コイン型セル (直径 2cm のディスク電極) での出力評価結果に出力評価セルで用いた活物質とセル重量の比を乗じることで、出力の評価検討を行った。(図 .2.2.3-5)

その結果、FSO<sub>2</sub>基を含有するアミドアニオン、FSA および FTA からなる EMI イオン液体において、コイン型セルの出力は、室温 25℃、および 55℃ の加温条件のいずれにおいても、有機溶媒電解液 (1M LiPF<sub>6</sub> / EC:DMC(1:1)) の 2 倍以上の出力となっていることが明らかとなった。有機溶媒電解液では 55℃ でほぼ頭打ちの傾向を示すのに対し、いずれのイオン液体でも温度を増加させると出力も増加していくことから、より高い温度ではさらに出力が高くなるものと考えられる。0.3A 級電池の活物質とセル重量の比を用いた出力評価値は EMI[FSA] では 1,908 W/kg、EMI[FTA]では 1,868 W/kg となり、有機溶媒 (928 W/kg) の 2 倍の出力が得られていることが分かった。

また伝導率は目標値には達していないはずのスピロアンモニウム型カチオン (azoniaspiro[4.4]nonane, AS<sub>44</sub><sup>+</sup>) からなる FTA 塩では、55℃ の出力が 888 W/kg と有機溶媒に匹敵する値となった。2500 W/kg の出力目標には全く及ばないが、この結果は、イオン液体の粘性や伝導度だけでは説明できず、正負イオン間の解離性の指標であるイオニシティーが 0.84 と他のイオン液体が 0.6 程度であることからすれば大きいことが、粘度の割には小さい電極界面電荷移動抵抗であることの一因となっているものと考えられ、カチオン種が電池特性に及ぼす影響が存在することを示唆する結果を得ることができた。

本事業の目的である 2,500W/kg を実証するためには、少なくとも有機溶媒電解液で 2,500W/kg を見通しうる実証セルの自作が必要であったが、十分に検討できなかつた点が反省点として残る。また、仮に有機溶媒電解液で目標が達成できても、イオン液体に適した構成ではない可能性もある。このことは、要素部材のみの開発では不十分である事を意

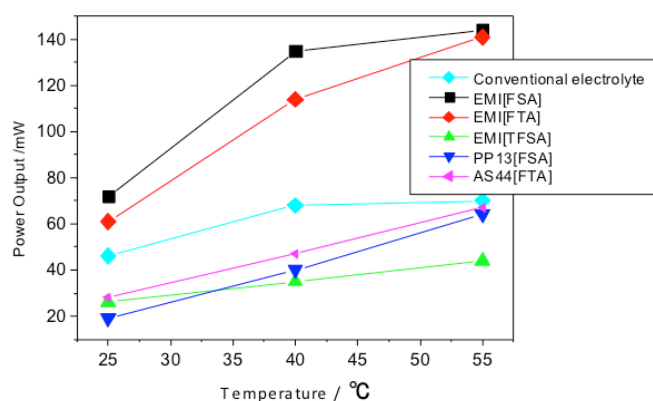


図 .2.2.3-5 SOC50%における出力評価結果

味する。

### (7) 知的財産権等

本プロジェクト期間中の知的財産権等の件数を表 .2.2.3-3 に示す。

表 .2.2.3-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	0	2	2	2	4	10
うち、外国出願	0	0	0	1	1	2
国内登録	0	0	0	0	0	0
海外登録	0	0	0	0	0	0
論文	1	2	7	9	9	28
うち、査読付き	0	1	2	6	4	13
研究発表・講演	5	12	12	21	19	69
受賞実績	0	1	0	2	0	3
新聞・雑誌等への掲載	0	2	1	2	1	6
展示会への出展	0	0	0	0	1	1
合計	6	19	22	36	34	117

### (8) 今後の課題と課題解決の見通し

比較として用いた有機溶媒電解液よりもイオン液体単独でも2倍の出力を示す好結果を得たものの、1,900 W/kg の見通しに留まり、プロジェクト開発目標 2,500 W/kg の75% であった。イオン液体では耐熱性が高く、100 以上でもイオン液体が電池電解液として作動することを確認し、さらに、アルカリ金属塩のみでも本事業で開発してきた FTA アニオンを使用すれば65 以上では、従来の有機溶媒電解液を超える良レート特性を示すことも見出した。よって55 以上での出力は温度とともに大きく改善することが十分に予想される。ただしあまり高温では車載用としての用途に見合わないが、少なくとも高温環境における安全性に資する電解液としてのイオン液体、アルカリ金属溶融塩の実証となると考えられる。これらはゼロソルベントの特徴を最大限に発揮させることを目的としているが、安全性に優れたリチウム二次電池蓄電システムの構築が最終目標であり、そのシステムに資する高温でも安定に作動する電解液の構成材料としてこれらの塩を活用することも検討したい。具体的には少量の添加で粘性が低下する耐熱性添加剤、あるいは液媒体の開発が重要であると考えている。

### (9) 成果の実用化／活用

近年自然エネルギーの活発化に伴い、安全性に優れた大型の蓄電システムの重要性が認識されており、高温においても安全性に優れたメンテナンスフリーの蓄電システムに要求される高温でも安全性が高い電解液として本事業で開発したイオン液体やリチウム金属溶融塩の適用可能性があると考えている。溶媒を全く含まず、難揮発性、難燃性でかつ電極を選べば比較的高い温度でも安定して充放電ができると、大型の蓄電池で重要な熱管理のコストが低減できる可能性がある。もちろん、そのためには電解液自体のコスト低減についても積極的に取り組む必

要があると認識している。また本事業では様々なイオン液体を合成し、カチオン、アニオンバリエーションを増加させた。特にアニオンは合成が容易ではなく、代表的なアニオンの利用にとどまっていたことから、今後、イオン液体に関する基礎研究から応用開発に、開発したイオン液体のみならず、計算化学的手法による分子設計法が利用されるものと期待する。

#### (10) その他

最近の研究の進展からイオン液体のようなゼロソルベントでは従来の有機溶媒では用いることができない材料の充放電が可能になるなど、今後も研究開発の進展が期待される。

## 2. 2. 4 高容量電池の研究開発 (日産自動車)

### (1) 事業目的

本事業の目的は、EV及びPHEVを実用化して広く普及させるため、高エネルギー密度の先進型リチウムイオン電池を開発することである。

### (2) 事業概要

大学と協力・分担して最高レベルの高性能正極材料及び高性能負極材料を開発し、これらに適応できる多機能高性能電解質材料を開発し、これまでに培ってきた日産自動車株式会社の電池作製・評価技術を活用することによってテーマ目標を満足する電池として作り上げる。なお、本事業では、電池材料の研究開発方法の変革を目指して、特徴的研究手法として、量子力学・統計力学に基づくコンピュータ材料設計技術とコンビナトリアル実験手法を開発・適用して、これらを組み合わせることで研究開発スピードと効率を格段に向上することを一つの特徴とする。

本事業における高性能正極材料の技術的ポイントは、現行のリチウムイオン電池正極材料  $\text{LiNO}_2$  (N:遷移金属) の理論限界 (275 mAh/g) を越える容量 (280 mAh/g以上) を目指して、多電子化 (一つの元素が複数の電子を供給) という一貫した基本方針のもと、現実的なものからより挑戦的なものへと3段階で高容量化の可能性を追求することである。また、高性能負極材料のポイントは、リチウムイオン電池の究極的高容量負極材料と考えられるLi-Si合金負極の、充電による3倍を超える体積膨張というサイクル寿命上の基本的に難しい問題を基礎的側面から検討して、ナノ粒子化をはじめとする新規な技術を駆使し、サイクル寿命を確保しつつ段階的に容量向上 (800 mAh/g以上) できるように、エンジニアリング面から纏め上げることである。

(3) 研究開発の実施スケジュールと予算

平成19年度～平成23年度の研究計画並びに開発費用を表Ⅲ.2.2.4-1に示す。

表 .2.2.4-1 主な実施項目と開発費用

事業項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
<b>1. 高性能正極材料</b>						
<b>固溶体系正極</b>						
高容量発現機構の解明 (神奈川大学)	■					
更なる高容量化検討 (神奈川大学)		■				
充放電サイクル安定化 (神奈川大学)	■					
組成の最適化		■				
放射光・中性子線による構造解析		■				
高容量・高耐久化				■		
<b>2. 高性能負極材料</b>						
Si多元合金化負極検討		■				
コンビナトリアル組成探索				■		
体積変化、電解液分解抑制策検討				■		
サイクル耐久性試験				■		
<b>3. 電池試作評価</b>						
フルセルのサイクル耐久性改善				■		
フルセルの出力評価/改善					■	
フルセルでの安全性試験					■	
<b>開発費用(百万円)</b>	<b>19年度</b>	<b>20年度</b>	<b>21年度</b>	<b>22年度</b>	<b>23年度</b>	<b>総額</b>
日産自動車株式会社	118.3	153.9	91.1	69.9	53.5	486.7

(4) 研究開発の実施体制

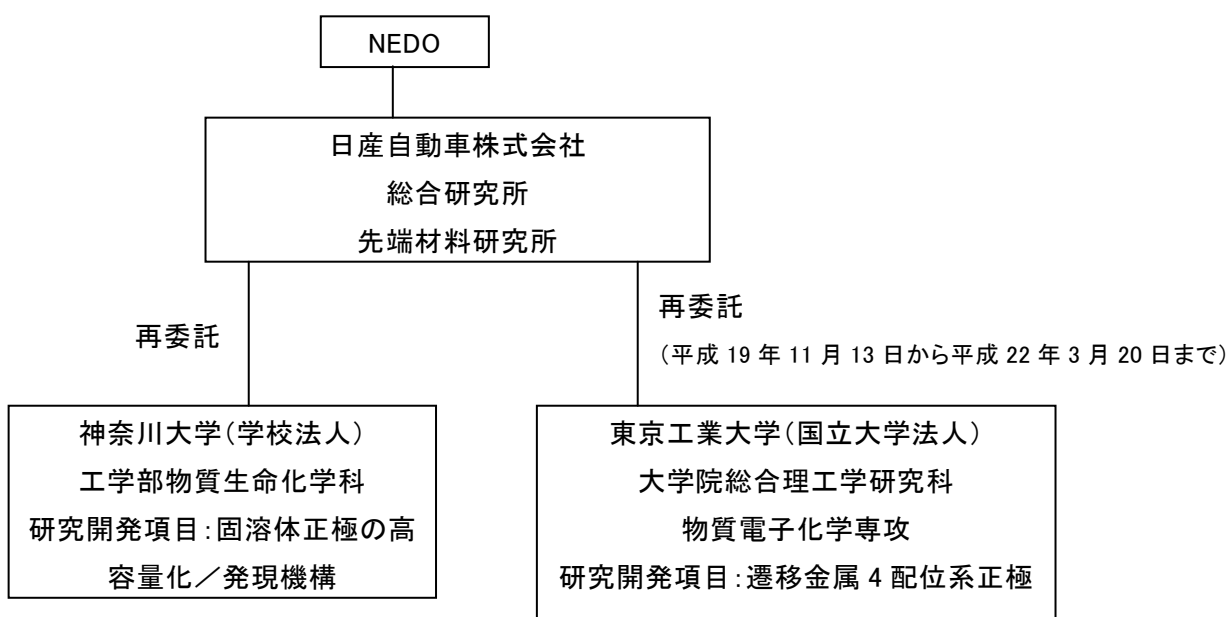


図 .2.2.4-1 研究開発の実施体制



## (5) 研究開発目標と根拠

### 中間目標

平成23年度にセルとして最終目標を達成できるよう、平成21年度末に中間目標を設定した。具体的には、正極、負極の各材料が、セルとしてのエネルギー密度の最終目標を達成可能な水準まで高容量化が可能なことを示すとともに、サイクル耐久性向上の可能性を示すことを目標とした。

### 平成21年度末中間目標

#### 高性能正極材料

初期容量 280mAh/g

容量維持率 80%@100cycle

#### 高性能負極材料

初期容量 800mAh/g

容量維持率 80%@100cycle

### 最終目標

セルとしての重量エネルギー密度の目標値については、将来のEVを想定しNEDO提示の値（セルで、250 Wh/kg）よりも一段高い値（セルで、300 Wh/kg）に設定した。出力、コスト、安全性はNEDO提示の目標値を用いた。サイクル寿命は、自動車適用を想定して自主設定した。

### 最終目標

- ・重量エネルギー密度：250 Wh/kg（セルで、300 Wh/kg）以上。
- ・重量出力密度：2,500 W/kg（セルで、3,125 W/kg）以上。
- ・コスト：3 万円/kWh以下の見通しを示すこと。（100万パック/年生産時）
- ・安全性：車載時の濫用に耐えること。
- ・サイクル寿命：1,000回以上。

## (6) 研究開発成果

本研究開発の成果一覧を、表Ⅲ.2.2.4-2に示す。全項目で最終目標を達成できた。

表 Ⅲ.2.2.4-2 研究成果（一覧）

項目	目標値（最終）	達成値	達成度	備考
セル・エネルギー密度	300Wh/kg	302Wh/kg		平成24年6月に測定完了
セル・出力密度	3,125W/kg	3,253W/kg		
サイクル耐久性	1,000cyc 時容量維持率：80%	1000cyc 時容量維持率：83%		
コスト	3 万円/kWh	2 万 5 千円/kWh		
安全性	車載時の濫用に耐える	1Ah 級セル釘刺しで42°C上昇、発煙発火無		

<成果 1 >

(内容) 高性能正極材料の研究開発

(達成度) ○

(成果の意義)

世界最高レベルの容量を持つ正極材料が得られた。

(課題と取り組み)

研究開発の基本方針を多電子化 (一つの遷移金属元素が複数の電子を出し入れできる) として中間目標 (初期容量 280mAh/g、寿命 300 サイクル (80%)) を設定して、3 種類の正極材料の可能性を比較検討した。研究後半は固溶体系正極材料に集中し、結晶構造解析、性能向上に取り組んだ結果、目標を達成できた。

(a) 固溶体系正極材料における組成検討

$\text{Li}_2\text{MnO}_3$  と  $\text{LiMO}_2$  (ex.  $\text{LiCoO}_2$ ) の固溶体が、高容量を示す理由の一つは結晶構造内に存在する Li 量の豊富さにある。 $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  は遷移金属層(TM 層)にリチウム(Li)が存在する点があるが、 $\text{LiMO}_2$  とは大きく異なる。

図 .2.2.4-2 は我々が検討している組成領域を示したものである。末端組成には  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ 、 $\text{Li}[\text{Ni}_{1/2}\text{Mn}_{1/2}]\text{O}_2$ 、 $\text{Li}[\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}]\text{O}_2$  を置いている。

組成式を  $\text{Li}/y\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1-y)\text{LiMO}_2$  と表現した時に、(a)  $y=0.4$ , (b)  $y=0.5$ , (c)  $y=0.6$ , (d)  $y=0.7$ , (e)  $y=0.8$  にて合成した試料について、電圧範囲 2.0-4.8V、電流レート 1/12C、室温条件下で定電流充放電試験を行った結果を図 .2.2.4-3 に示す。初期放電容量は  $y=0.7$  までは  $y$  の増加に伴い増加し、 $y=0.8$  は  $y=0.7$  と比べて減少する傾向を示した。 $y=0.7$  と  $0.8$  を比較すると、初期充電容量はそれぞれ 340 と 332mAh/g であり大差はないが、放電容量では 298mAh/g ( $y=0.7$ ) と 263mAh/g ( $y=0.8$ ) を示し、 $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  組成の増加に伴って大きな低下を示した。これは  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  が絶縁性物質であることから、 $y=0.8$  以上では  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  組成から生じる物性の影響が大きく反映するものと考えられる。したがって  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  の電気化学活性を最大にするには組成の約 3 割を  $\text{LiMO}_2$  に置き換える必要がある。

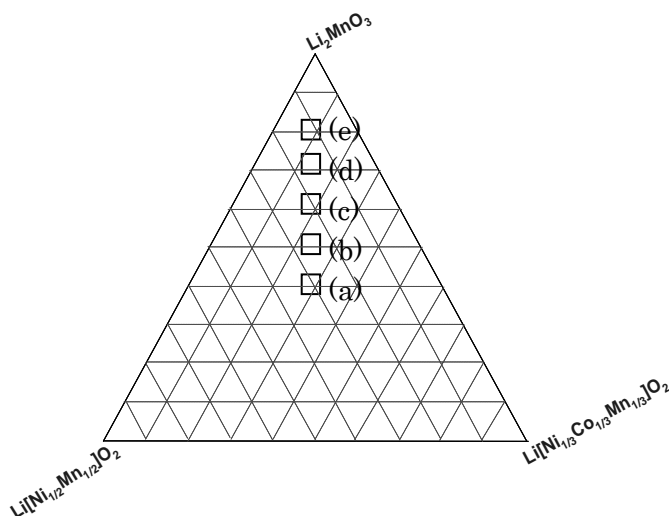


図 .2.2.4-2  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ - $\text{LiMO}_2$  三相組成図.

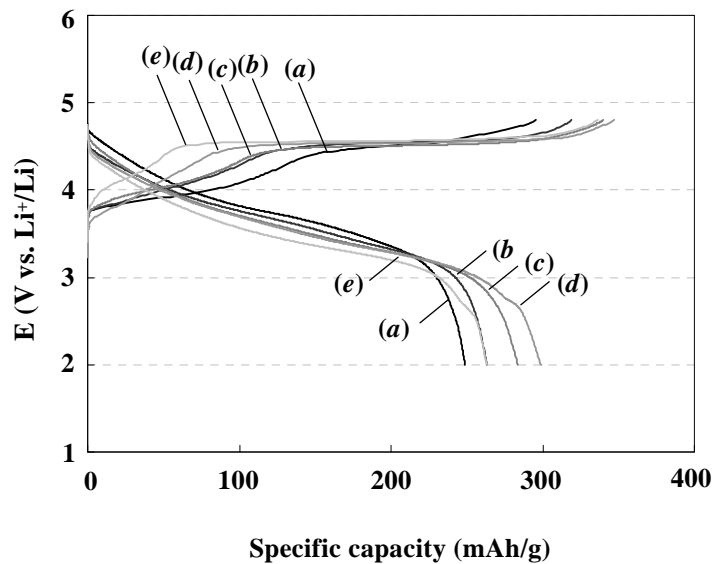


図 2.2.4-3  $\text{Li}/y\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1-y)\text{LiMO}_2$  の充放電曲線.  
(電流レート: 1/12C、電圧範囲 2.0 V - 4.8 V、測定温度: 25 )

(b) サイクル耐久性評価結果

上述した知見に基づき、固溶体系正極 $\text{Li}_2\text{MnO}_3\text{-LiMO}_2$  (M: Ni, Mn, Co) の容量とサイクル耐久性の両立に向けて、活物質の諸条件及び電極設計諸条件を最適化した。その結果、正極の最終目標を満足する系を見出すことに成功した。図 2.2.4-4に、サイクルを多数繰り返すために実施した1/3Cレートにおける放電容量と、容量確認のために実施した1/12Cレートにおける放電容量を同時に示す。

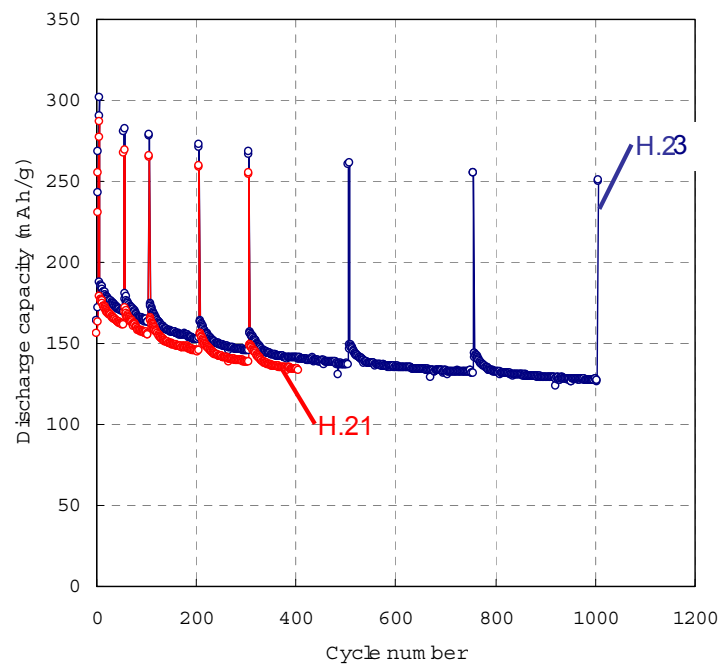


図 2.2.4-4 正極のサイクル寿命特性試験結果

## <成果2>

(内容) 高性能負極材料の研究開発

(達成度) ◎

(成果の意義)

Si アモルファス合金化、Si/黒鉛との混合化により、黒鉛負極の2倍以上の容量を持たせながら、目標とする1000サイクルの耐久性が得られることが分かった。また、Si 三元合金系12種についてPCT出願を行っており、初期に出願した2種は国際予備調査見解書で特許性ありの状態となっている。網羅的な特許網を構築できる見込みである。

(課題と取り組み)

シリコン負極のサイクル劣化の問題を正確に把握してサイクル耐久性を向上するために、Si 薄膜での基礎検討、Si 粒径、導電助剤種類、バインダー種類、電極組成、電極内の分散性などをパラメータとして合剤電極での詳細を実施した。これと平行して、3元素同時スパッタが可能なコンビナトリアル薄膜電極作製装置を試作して広範な組成のSi合金を作製し、更に、コンビナトリアル電気化学測定システムを試作することで、多種類のSi合金による大量の電極を効率的に評価した。3元素のSi合金の電気化学測定においては、高い初期放電容量を維持しながら100サイクル後においても放電容量維持率が高い合金系が、多数見つかっている。

上記薄膜電極の試験結果を基に遊星ボールミルを用いて最適なSi-Ti合金粉末を作製し、各階層(①活物質、②複合化材料、③導電助剤・バインダー、④集電箔、⑤試作プロセス、⑥Li源)ごとに耐久性を改善する方策を積み重ねることで、負電極のサイクル耐久性を向上した。初期800mAh/gで、1000サイクル時の容量維持率が80%を超える良好なサイクル耐久性が得られた。(図 .2.2.4-5)。

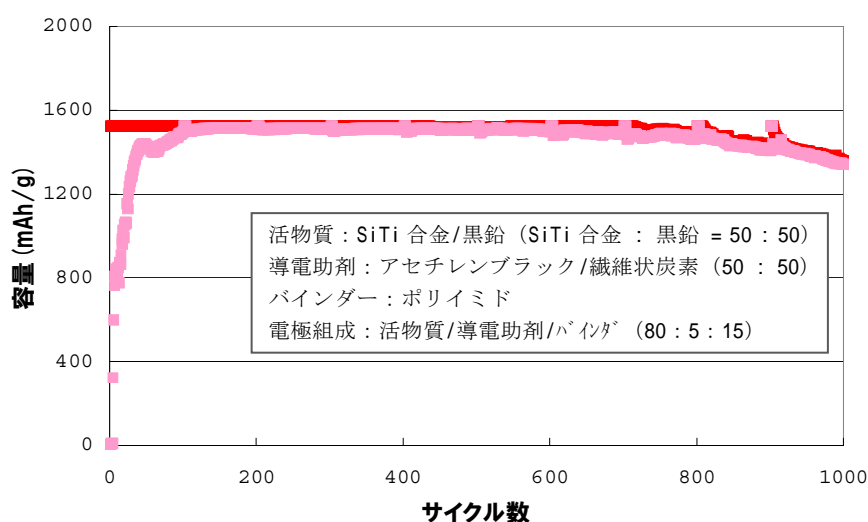


図 .2.2.4-5 各種 Si 合金の初期容量とサイクル特性の関係

### <成果3>

(内容) 電池セル試作評価

(達成度) ○

(成果の意義)

セルとして 300Wh/kg、1,000 サイクルの耐久性を達成でき、次世代 EV 用として有望であることを示した。

(課題と取り組み)

#### (a)セルエネルギー密度

研究期間は平成 19 年度から平成 23 年度であったが、高性能正極については当初 3 種類の候補を上げていた。3 年間の検討の結果平成 23 年度終了時点で固溶体系正極を選定し、その後 2 年間固溶体正極の検討を進めた。高性能正極として選択された固溶体正極では、 $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  -  $\text{LiNiMnO}_2$  -  $\text{LiNiCoMnO}_2$  からなる 3 成分組成図内で種々の条件を検討した結果、最終年度には室温での初期放電容量 300mAh/g を達成しうる正極活物質が見出した。また、正極を構成する導電助剤種、バインダー種、配合比等諸因子について検討を行い、実電池向けの正極として適用可能な電極設計を明確にした。

高性能負極については、シリコンを主たる元素とする負極活物質を主として検討していたが、シリコンは充放電過程において非常に大きな体積変化を伴うためサイクル耐久性に大きな問題があることが明らかになった。その対策として、シリコンを主元素とする種々の合金活物質の可能性について、コンビナトリアル合成システムとコンビナトリアル評価システムを用いて材料探索の評価を行い、有望な材料としてシリコン合金活物質を見出した。この負極活物質を用い、さらに負極組成等を種々検討した結果、黒鉛を超える高い放電容量を有し 1000 サイクル後の容量保持率 80% を達成しうる負極を見出すことに成功した。

これら正極および負極の検討結果を用いて、車両用電池のデザインに基づいてセルのエネルギー密度を算出した結果、300Wh/kg を越える高エネルギー密度の電池が設計可能であることが見出された。また、正負極活物質が高容量であったため、構成する活物質の平均放電電位を考慮してセル設計を行うことで、負極について黒鉛を混合する場合においても、最終目標値である 300Wh/kg を達成しうることが示された。

#### (b)セル出力密度

セルの出力密度については、最大容量60mAhの小型ラミネートセルを試作して、SOC50%での定電流での10秒後の最大出力(放電カットオフ2.0V)が重量出力密度で3253W/kgとなり、最終目標(3125W/kg)を達成できた。本出力密度は、電池系として極めて高い値であるものの、本出力における放電レートは15C程度であり、極端に高い放電レートではない。この理由としてシリコン系負極と固溶体正極から構成される高容量電池は、電池容量が既存の電池に比較して非常に大きいことが挙げられる。即ち本電池系においては、大電流であっても放電レート上は比較的小さく設計できるため、高出力が達成できたものと考えられる。

### (c) サイクル耐久性

エネルギー密度の項目において述べたように、高性能正極として選択された固溶体正極活物質について、活物質及び正極組成等について種々の検討を実施した結果、初期放電容量300mAh/gを示しつつ1000サイクル時容量保持率80%を達成しうる高い耐久性能を有する正極が得られた。負極についても、コンビナトリアル合成システムとコンビナトリアル評価システムを用いて多くの活物質構成元素組成を試作/評価することで見出した、シリコン合金活物質について、さらに負極組成等を検討し、黒鉛を超える高い放電容量を有し1000サイクル後の容量保持率80%を達成する負極を見出した。しかしながら、これらを単純に組み合わせて設計した高容量電池ではサイクル耐久性の最終目標値を達成できなかった。そのため、高いエネルギー密度を保持しつつサイクル特性を改善するための方策として、負極活物質としての黒鉛の併用、正負極中の活物質組成の増加/正負極塗工量の増加による電極容量の改善、サイクル耐久上下限電圧の最適化、電解液種の検討、セル活性化方法の検討、負極初期不可逆容量をキャンセルするためのプレドーピング処理などを順次検討、適用した。その結果、1,000サイクル時の容量保持率は83%と、目標を達成した。

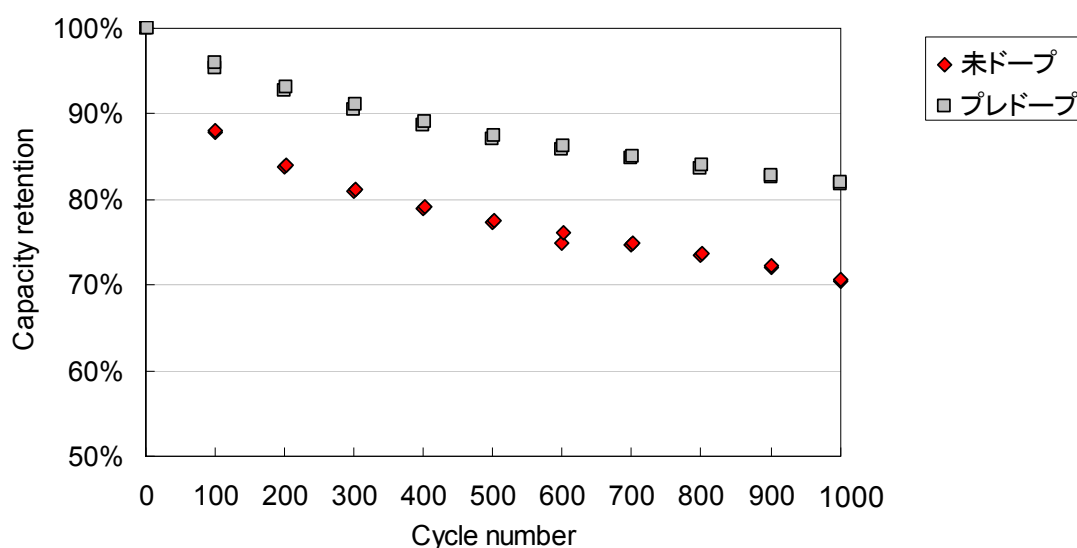


図 .2.2.4-6 固溶体正極とSi合金/黒鉛混合負極の小型ラミセルのサイクル耐久性

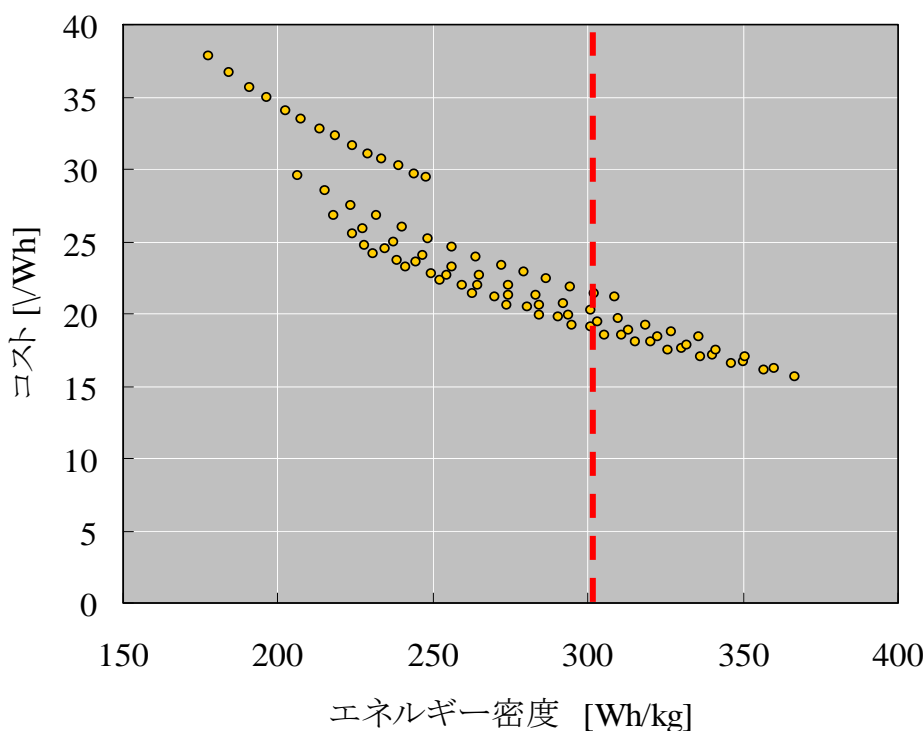
### (d) コスト

セルのエネルギー密度を算出する際に用いた電池セル設計用計算式を基に、各種構成材料について1セル当りの使用量に単価を掛けてセル当り価格を算出し、全ての構成材料の価格を合計し、これに弊社の平均的なプロセスコストを上乗せして、セルのコストを算出した。このセルコストとセルエネルギーを比較して、セルのエネルギー当りのコストを算出した。なお、各種電池構成材料の単価は、「次世代蓄電システム実用化戦略技術開発/系統連系円滑化蓄電システム技術開発」の事後評価報告書、p.176に記載されたデータのうち、10MWh/年生産時の値

を引用した。

正負極活物質の容量をそれぞれ変化させることでエネルギー密度を変化させて、エネルギー密度に対してセル・エネルギー当たりコストをプロットすると、図Ⅲ.2.2.4-7のようになる。

エネルギー密度の増大、すなわち、正負極活物質の容量の増大に伴って、単位エネルギー当たりの正負極活物質及びその他の構成材料の使用量が減るため、図Ⅲ.2.2.4-7は右下がりの曲線となる。エネルギー密度 300Wh/kg でのセル・エネルギー当たりのコストは、おおよそ¥20,000～25,000/kWh と見積もることができ、目標コストを達成できたものと判断した。



図Ⅲ.2.2.4-7 セルエネルギー密度とエネルギー当たりコストの関係

#### (e)安全性

高容量電池セルの安全性は、正負極を充電状態にした場合の熱安定性と、小型試作セルの釘刺し試験により評価した。

充電状態の正極の熱安定性について既存正極と比較した結果、熱安定性が比較的高いと言われる  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  正極活物質と比較すると発熱ピーク温度が低く、重量当たりの発熱量が大きい傾向にあった。しかしながら、単位容量当たりに換算すると、 $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  の半分以下の発熱量であった。この結果は、 $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  正極から構成される電池と固溶体正極から構成される電池が同容量である場合には、正極からの総発熱量が半分となることを意味しており、電池に適用した場合の熱安定性が高いと考えられる。

負極についても充電状態での熱安定性評価を行った結果、重量当たりの発熱量は黒鉛以下であったことから、少なくとも黒鉛より熱安定性が高いと考えられる。ただし、負荷サイクルを経て材料が変質、あるいは活物質が微粉化して反応比表面積が増大した場合にはこの限りではない。

以上の正負極の熱安定性評価結果を鑑みて、車載時の濫用に耐えうることを実証するため、ラミネートセルによる釘刺し実験を行った。本検討においては最大1Ahのラミネートセルを満充電状態にて釘刺し試験を実施した。この試験において発火等の異常は発生せず、温度上昇はラミネートセル表面において40℃ 上昇にとどまった。このことから、本委託研究における目標を達成できたと判断した。

## (7) 知的財産権等

特許出願、論文投稿、研究発表等の活動結果を表Ⅲ.2.2.4-3 に示す。特に特許出願の面で満足できる成果が得られた。

表 Ⅲ.2.2.4-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	3	11	8	9	33	64
うち、外国出願	0	0	3	5	12	20
国内登録	0	0	0	0	0	0
海外登録	0	0	0	0	0	0
論文	0	1	1	2	2	6
うち、査読付き	0	1	1	2	2	6
研究発表・講演	3	10	12	12	9	46
受賞実績			1			1
新聞・雑誌等への掲載				1		1
展示会への出展						
合計	6	22	22	24	44	118

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

本研究開発にて設定した目標は全て達成できた。現状の成果として、Si 合金負極については、コンビナトリアル薄膜電極作製システムを用い、Si 三元系合金で有望な合金組成を見出すことができた。これを基に、遊星ボールミルで作製した Si 合金粉末と黒鉛を併用した負極を開発し、初期容量 800mAh/g、容量維持率 80%@1000cycle を達成した。また、この負極と、固溶体正極と組み合わせたセルとしても、Li プレドープを適用することにより、初期エネルギー 300Wh/kg、容量維持率 80%@1,000cycle を達成した。

この Si 合金負極、及び、これを用いた高エネルギー密度の電池の本格的な実用化に向け、本プロジェクトの後継となる「リチウムイオン電池応用・実用化先端技術開発事業」へ参画し、以下を行う計画である。

- 1) 本研究開発で得られた耐久性に優れる Si 合金を、各種の量産可能な工法で試作し比較・検討を行ない、優れる工法にて最適化を実施する。
- 2) 負極複合材としての電極構成最適化を行なった Si 合金負極を用い、中～大型ラミネートセルを作製し、サイクル耐久性、出力特性、安全性などのセル性能の評価確認を行なう。



## (9) 成果の実用化／活用

### 産業界における具体的利用の形態

EV の駆動用バッテリーとして用いる。本研究開発のエネルギー密度目標値である車載用電池パックとして 250Wh/kg が達成できれば、日産リーフ相当の 24kWh の電池パックが、質量 100kg 以下、容積 50L 程度とすることができる。航続距離を現行型リーフ並みの 200km (JC08 モード) とすれば、ほぼガソリン ICE 車の燃料タンク同等の容積となり、電池搭載スペースを後部座席下のみに抑えられる。これにより、スタイリングの自由度を飛躍的に向上でき、様々な車型の EV 化が可能となり、EV のラインナップを増やすことができる。

また、本研究開発のコスト目標である 3 万円/kWh が達成できれば、バッテリーコスト低減により EV の販売価格を低減できるため、EV の販売を増やすことができる。

上記 EV の駆動用バッテリーは、家庭への電力供給源 (スマートハウス) としての使い方も可能である。現在、当社では、日産リーフの大容量バッテリーから電力を取り出し、分電盤を通じて家庭用の電力として使うことができる電力供給システム「LEAF to Home」の販売を開始した。一般家庭では自動車は 1 日 24 時間の内、走行しているのは 1~2 時間程度であり、22~23 時間は停車していることになる。この停車中のリーフのバッテリーを家庭用の電力供給源として用いるもので、電力の値段が安く電力供給に余力がある深夜に EV のバッテリーに充電しておき、EV バッテリーに溜めた電力を昼間に家庭の電源として使用するものである。日産リーフのエネルギー量 24kWh は、一般的な家庭の消費電力の 2 日分に相当する。最高出力は 6kW であり、一般家庭が使用するのには十分な高出力である。

### 技術としての見極め (適用可能性の明確化)

本プロジェクトの後継となる「リチウムイオン電池応用・実用化先端技術開発事業」で取り組む予定である「将来量産可能な工法での Si 合金の試作」及び「中～大型セルでのセル性能確認」が本開発技術を実用化する上で重要と考えている。

## (10) その他

特になし。

## 2. 2. 5 高出力・高安全性リチウムイオン電池の開発 (第一工業製薬、関西大学、エレクセル)

### (1) 事業目的

本研究開発事業は、次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発／要素技術開発／高出力・高安全性リチウムイオン電池の開発に基づいて、PHEV、EV 等の早期実用化へ貢献するために高出力・高安全性リチウムイオン二次電池の開発を目的とした。この目的を達成するためにイオン液体を主体とする新規電解質材料の開発とリチウムイオン二次電池への適用における研究開発を推進した。同材料を適用することで従来のリチウム電池と比較して飛躍的な安全性と信頼性の向上と、また同時に同用途への実用化に対応する高入出力特性・高寿命が可能な電池の各構成材料の開発、電極・セル設計等の研究開発を実施した。

### (2) 事業概要

入出力特性・安全性に優れたリチウムイオン電池の実用化を目指して、リチウム電池に適用可能なイオン液体電解質の開発を行った。電池性能に直結するイオン導電率、粘度、耐酸化還元性に優れた新規イオン液体の設計・合成・改良を実施し、ビス（フルオロスルホニルイミド）アニオン(以下 FSI アニオン)を中心に新たなカチオン種の合成を含めた成分の最適化を検討した。さらに電極の反応性や電極界面解析を進めることで、過充電等の安全性を向上させ、同時に高入出力特性を兼ね備えた電池を実現するイオン液体電解質を開発した。

セル構造は放熱性に優れた薄型積層アルミラミネートタイプを採用し、0.1Ah 以下クラスの小型電池にてイオン液体系電解質を適用した電池性能評価および正極・負極・セパレータを含めた各種構成材料の最適化検討を実施した。また各電池性能評価・充放電挙動解析から課題抽出を行い、さらに各構成材料の改良に加え実用化に向けた電池設計を行った。最終評価として、1.5 Ah クラスの中型電池を試作し目標とした重量エネルギー密度 130 Wh/kg 重量出力密度 2,500 W/kg といった電池性能を達成することができた。また安全性試験も実施し高出力・高安全性のリチウム二次電池を開発した。

(3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.2.5-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
新規カチオンを持つ FSI アニオン系イオン 液体の合成			→			
高純度・低コストイオン 液体の製造法					→	
カチオン・アニオン複合 基礎物理物性				→		
黒鉛負極/イオン液体の 可逆性の説明		→				
添加剤含有イオン液体 の電極挙動				→		
イオン液体中の新規負 極系の適用とその評価					→	
高電圧作動正極材料の 電極特性評価					→	
既存カチオン種・FSIア ニオン系 IL 評価					→	
セパレータ種等のその 他部材評価					→	
大容量電池の組立てと 特性評価					→	
安全性評価					→	
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
第一工業製薬株式会社	60.4	45.2	34.0	9.1	9.1	157.8
学校法人関西大学	38.9	37.4	9.8	21.4	21.4	129.0
エレクトセル株式会社	-	-	-	21.5	21.5	43.0

#### (4) 研究開発の実施体制

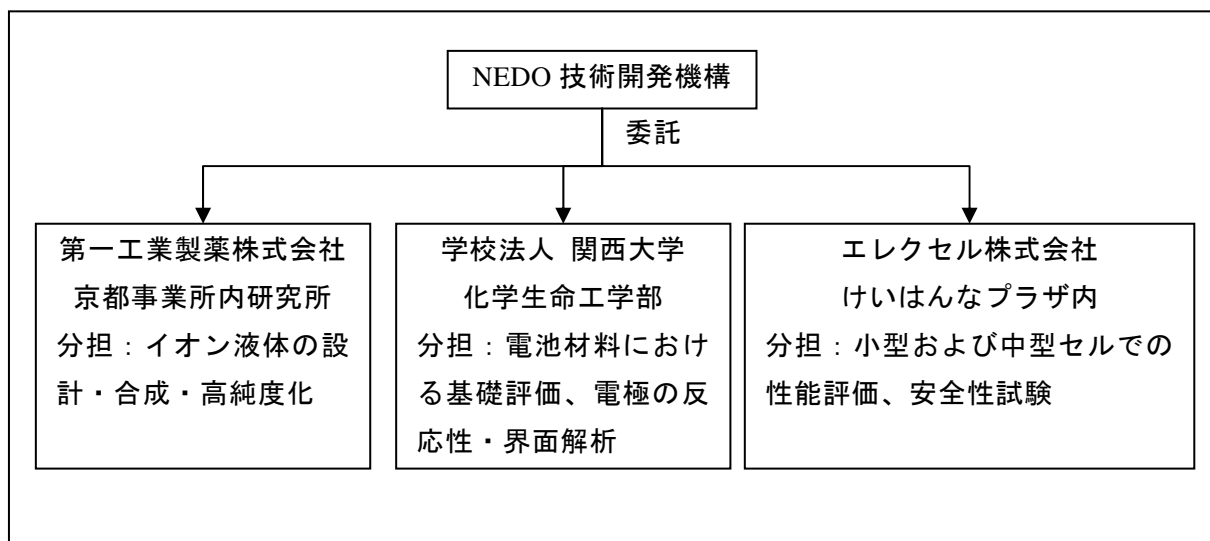


図 .2.2.5-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

##### 中間目標

##### (a) 第一工業製薬株式会社

イオン液体を使用した電解液（カチオン・アニオン複合、添加剤含む）としてイオン導電率 10 mS/cm 以上、熱安定性 120 °C 以上、引火点 300 °C 以上を実現する見通しを得ることにより、関西大学・エレクトセル株の目標値を達成する特性を実現する見通しを得る。

##### (b) 学校法人 関西大学

- ・既存負極ならびに新規負極材料に対して、0.5 C レート以上で理論容量の 90 % 以上に相当する初期容量を示し、50 サイクル後の容量保持率が 90 % 以上のイオン液体系を見いだすこと（新合成プロセスによるイオン液体を含む）。
- ・既存正極ならびに新規正極材料に対して、0.2 C レート以上で理論容量の 90 % 以上に相当する初期容量を示し、50 サイクル後の容量保持率が 90 % 以上のイオン液体系を見いだすこと（新合成プロセスによるイオン液体を含む）。

##### (c) エレクトセル株式会社

新規に設計・合成された種々のイオン液体および複合電解質材料としての最適化を実施しリチウム二次電池に適用することでセル性能を評価する。セル性能の目標として 0.5~1.0 Ah 容量セルにおいて重量エネルギー密度 100 Wh/Kg、重量出力密度 2000 W/Kg、1.0 C サイクル寿命として 2000 サイクル 80 % 保持率とする。

## 最終目標

### (a) 第一工業製薬株式会社

- ・ 複合イオン液体（カチオン・アニオン複合、添加剤、ゲル電解質技術含む）としてイオン導電率 10 mS/cm 以上、熱安定性 120 °C 以上、引火点 300 °C 以上、融点-30 °C 以下を実現し、関西大学およびエルクセル㈱の目標値を達成する特性を実現するイオン液体電解液を得る。
- ・ 電池に使用可能な品質のイオン液体を実用可能なトータルコストでの製造原料・製造プロセスの見通しを得る。目標コストは FSI と類似化合物であり上市されているビス（トリフルオロスルホニル）イミド（TFSI）の市販価格以下を実現する。

### (b) 学校法人 関西大学

- ・ 既存負極ならびに新規負極材料に対して、1.0 C レート以上で 100 サイクル後の容量保持率が 90 %以上のイオン液体系を見いだす。
- ・ 既存正極ならびに新規正極材料に対して、充電電圧を 4.5 V 以上とし、かつ 1.0 C レート以上で 100 サイクル後の容量保持率が 95 %以上のイオン液体系を見いだす。

### (c) エルクセル株式会社

セル性能の目標として重量エネルギー密度 130 Wh/Kg、重量出力密度 2,500 W/Kg とする。

## (6) 研究開発成果

表 .2.2.5-2 研究成果（一覧）

項目	目標値（最終）	達成値	達成度	備考
イオン液体電解質	イオン導電率 10 mS/cm、融点-30 °C 以下	イオン導電率 14.0 mS/cm、融点-46°C		
FSI イオン液体のコスト	市販されている TFSI イオン液体の半分以下	精製条件の改良で TFSI イオン液体以下の値段になる可能性有		
新規負極材料	90 % / 100 サイクル	100 % / 100 サイクル		
新規正極材料	95 % / 100 サイクル	97.3 % / 100 サイクル		
重量エネルギー密度	130 Wh/kg	128 Wh/kg		
重量出力密度	3,000 W/kg	3,130 W/kg		

## <成果1>

(内容) イオン液体電解質

(達成度) ◎

計算化学によるスクリーニングの後、化合物を合成・検証することにより、カチオンの構造を選ぶことで融点、耐電圧を制御できることを確認した。アリル基を1つ有する AEIm-FSI、アリル基を2つ有する DAIm-FSI とアリル基が増えるにつれてイオン液体の分子量も増加するため、粘度が増加し、イオン導電率も減少するものの、DAIm-FSI でも 11.3 mS cm<sup>-1</sup> と非常に高いイオン導電率を示した。また、EMIm-FSI の酸化電位が 5.0 V vs. Li/Li<sup>+</sup>であるのに対し、AEIm-FSI の酸化電位は 5.1 V vs. Li/Li<sup>+</sup>、DAIm-FSI の酸化電位が 5.4 V vs. Li/Li<sup>+</sup> とアリル基が増えるにつれて酸化電位が上がるのが分かった。また、AEIm-FSI はイオン導電率 14.0 mS/cm、融点 -46 °C、酸化電位 5.1 V vs. Li/Li<sup>+</sup> とであった。融点が -30 °C 以下でリチウムイオン電池として適用可能なイオン液体としては世界初となるイオン導電率を示した。

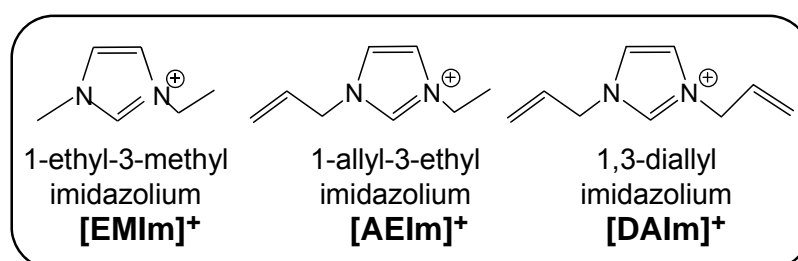


図 .2.2.5-3 新規 FSI 系イオン液体に含まれるカチオンの構造.

表 .2.2.5-4 新規 FSI 系イオン液体の諸物性.

カチオン種	[EMIm] <sup>+</sup>	[AEIm] <sup>+</sup>	[DAIm] <sup>+</sup>
アニオン種	[FSI] <sup>-</sup>	[FSI] <sup>-</sup>	[FSI] <sup>-</sup>
融点 (°C)	-12.9	-46.0	8.0
粘度 (mPa · s at 25 °C)	17.0	18.6	20.8
イオン導電率 (mS/cm at 25 °C)	16.5	14.0	11.3
酸化電位 (E vs Li/Li <sup>+</sup> )	5.0	5.1	5.4

## <成果2>

(内容) FSI イオン液体のコスト

(達成度)

電解液として使用するための FSI 系イオン液体の必要な純度を検証できていない。特に FSI 系イオン液体の電極挙動の解析および Li イオン電池の評価・検証ではノイズ因子を避けるため過剰な精製を行い、高純度の FSI イオン液体を用いた。そのため、精製等により FSI 系イオン液体の収率が低下しており、本収率を前提とした場合、目標値である TFSI イオン液体の市販価格の半額以下に到達できていなく、約 1.0~1.5 倍となる。今後、FSI 系イオン液体の必要純度検証による過剰生成ロスの削減、FSI 系イオン液体の精製工程の改良、製造工程ロスの回収方法の開発課題に取り組むことで、収率を 50 %アップさせ、目標コストを目指すことができると考えられる。

<成果 3 >

(内容) 新規負極材料

(達成度)

Si 微粉末および炭素からなる複合材料(以下 Si-C)を Mechanical Milling 法により調製した。本研究開発では、この Si-C 複合材料から炭素系導電助剤やバインダーを用いて合材電極を作製する過程に置いて、Ni を混合し、Si の充放電における形状変化に対する緩衝材かつ導電助剤としての役割を担わせることとした。シリコンの劣化を最小限に排除し、電解質支配の性能を明らかにするため充電容量を 800 mAh/g に規制し、充放電試験を行った。容量規制により体積変化を抑制することで、イオン液体電解質および有機溶媒電解液での評価セル共に 100 サイクル後においても容量低下は見られなかった。このことから充放電条件を最適化することで実電池においても Si-C/Ni 複合電極が適用可能であると考えられる。

<成果 4 >

(内容) 新規正極材料

(達成度)

従来の正極活物質と比べて高電圧で充放電する 5V 級  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  正極に対し、FSI 系イオン液体を適用し、その高電圧下における充放電特性を評価した。図 .2.2.5-5 に初回 0.1 C、以後 1.0 C で 400 サイクルさせたサイクル試験を示す。MPPy-TFSI イオン液体電解質系は 1.0 C レートの 2 サイクル目以降ほとんど容量発現していない。有機溶媒電解液系と MPPy-FSI イオン液体電解質系の放電容量の差はサイクルを重ねるごとに明確になり、有機溶媒電解液系では 200 サイクルの時点ですでに初期容量(2 サイクル目)に対して、90 %を下回る容量の保持率となっている一方、MPPy-FSI イオン液体電解質系では、400 サイクル後でも 94 % (100 サイクル後 97.3 %)と高い容量を示した。

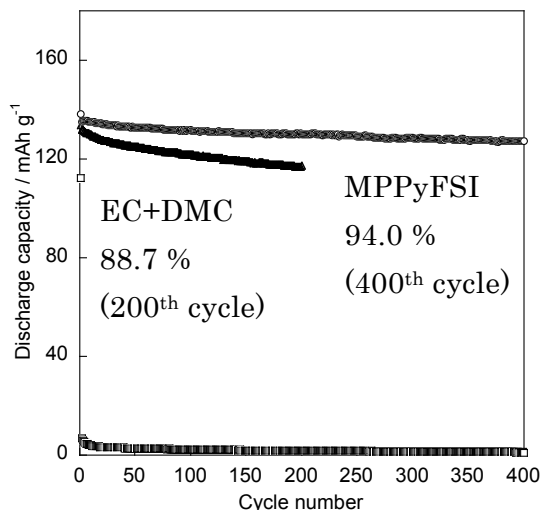


図 .2.2.5-5 種々の電解質中における  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  正極のサイクル特性.

(○) MPPy-FSI ; ( ) EC+DMC ; (□) MPPy-TFSI

<成果5>

(内容) 重量エネルギー密度、重量出力密度

(達成度)

電解液組成やセパレータ種といった重要なファクターでの電池性能を検証する上で、多くのセルを作製し、かつ信頼性のある実質的に 3~10 Ah 以上の大容量セルと相関のある結果が得られる 1.0 Ah 以上の中型セルを作製、評価することとした。評価セルの仕様およびセル外観写真を以下に示す。

表 .2.2.5-6 評価用中型セルのセル仕様

正極活物質		$\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$
片面正極厚み(箔抜き)		25 $\mu\text{m}$
負極活物質		天然黒鉛
片面負極厚み(箔抜き)		24 $\mu\text{m}$
セパレータ		シリカ含有ポリオレフィン系A, B アラジド系A, B
電解質	イオン液体電解質系	1.2 mol kg <sup>-1</sup> LiTFSI / EMIm-FSI
		1.2 mol kg <sup>-1</sup> LiTFSI / EMIm-FSI : フッ素含有溶媒 (8:1 v/v)
	有機溶媒系	1.2 mol l <sup>-1</sup> LiTFSI / EC:DCC (3:1 v/v)



図 .2.2.5-7 評価用中型セルの外観写真

本試作電池については、更なるエネルギー密度向上を目的として高電圧作動における性能評価も実施した。これまで充電電圧を 4.2 V としていたが、充電電圧を 4.5V まで 0.3V 上昇させてセル基本性能評価を実施した。充電電圧を 4.5 V とすると、重量エネルギー密度は有機溶媒電解液での評価セルが 144 Wh/kg であったのに対し、イオン液体電解質での評価セルでは最大で 126 Wh/kg であり、エレクセル株式会社における最終年度の自主目標である重量エネルギー密度 130 Wh/kg に迫る値を得た。

次に FSI 系イオン液体電解質の重量出力密度を算出するため、充電電圧を 4.5V と設定し I-V 特性試験を行った。4.5 V 充電による重量出力密度評価試験の結果を図 .2.2.5-8 にまとめた。イオン液体電解質での評価セルでは、SOC10 %で 1,360~1,530 W/kg、SOC50 %で 2,900~3,130 W/kg であった。シリカ含有ポリオレフィン系を用いたイオン液体電解質での評価セルにおいて最終目標とである重量出力密度 2,500 W/kg(単セル相当で 3,000 W/kg)といった電池性能を得ることができた。また、有機溶媒電解液での評価セルでは SOC10 %で 740 W/kg であり、低 SOC においてイオン液体電解質での評価セルは有機溶媒電解液での評価セルの 2 倍近い値を示している。



一方で、有機溶媒電解液での評価セルでは SOC10% で 740 W/kg、SOC50% で 4,190 W/kg であり、SOC50% での重量出力密度には大きな差があり、イオン液体やリチウム塩、セパレータの改良による重量出力密度の向上が今後の課題である。

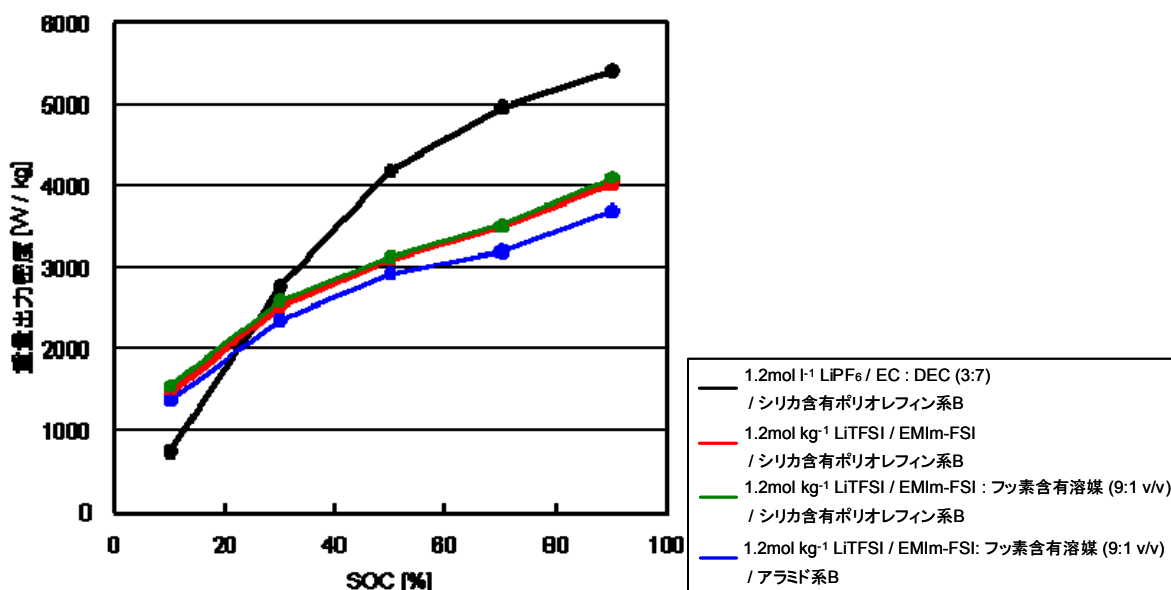


図 2.2.5-8 各評価セルの重量出力密度データ

また、安全性評価として過充電試験を実施した。有機溶媒電解液の評価セルでは内部ガス発生とともに膨張、開口したのに対して、イオン液体電解質での評価セルでは開口が確認されなかった（発火なし）。さらにアラミド系セパレータを使用した評価セルで所定充電容量の約 4 倍程度まで充電を継続しても、充電電圧が 5.0 V まで上がらず、このときの最大セル表面温度は 61 °C となった。これらの結果からセパレータ種によって安全性に差が生じる可能性があることが示唆された。以上の結果からイオン液体電解質において高い安全性を示すことを確認した。

### (7) 知的財産権等

本プロジェクト期間中の知的財産権等の件数を表 2.2.5-8 に示す。

表 .2.2.5-8 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願			1		1	2
うち、外国出願						0
国内登録						0
海外登録						0
論文		2	3	1		6
うち、査読付き論文		1	2	1		4
研究発表・講演	4	11	11	12	14	52
受賞実績					2	2
新聞・雑誌等への掲載		2	1		1	4
展示会への出展		1	1	2		4
合計	4	16	17	15	18	70

#### (8) 今後の課題と課題解決の見通し

一般の工業品を出発物質としたイオン液体の合成フロースキームは本プロジェクトにおいて確立した。今後、目標コストに到達するために、過剰な精製を避け、効率の良い精製法を創製し、反応・精製を含め効率的なプロセスを確立することで課題を解決することを目標となる。具体的には、不純物の影響の解析を学校法人関西大学に委託し、除去すべき不純物を取り除いた必要レベルの純度を電気化学的評価の元に明確にすることで、コストを見据えた十分な収率でイオン液体を得るプロセスを組み上げ、同プロセスを基に製造工程を確立させる。

電池評価に関してはイオン液体電解質単独にてなんら添加剤なしでリチウムイオン電池系が十分に作動することを実証した。得られた出力密度は単セルレベルで 3,130 W/kg であった。しかし、今回のプロジェクトにおける出力密度目標はモジュールにて 2,500 W/kg であり、今後は単セルレベルでの到達出力密度を少なくとも 4,000 W/kg 程度まで高める必要がある。これに対して、学校法人関西大学の成果より、リチウム塩として LiTFSI だけではなく、LiBOB の添加により出力密度向上が図られるという知見が得ることが出来た。一方で、FSI アニオンを含むことによるイオン液体の低粘性化、高イオン伝導度化の観点から、リチウムソースである電解質塩についてもアニオンを FSI、つまり共通アニオンをもつ LiFSI の使用による特性の向上の可能性が大いにあり、一部予備検討の結果から、事実、非常に有望なデータが得られている。このような観点から従来用いてきた LiTFSI 塩以外のリチウム塩の検討は目標達成に有望であると考えられる。

#### (9) 成果の実用化／活用

今回のプロジェクトでは要素技術開発としてイオン液体を用いた小型電池の製作まで行い、一定の成果を得ることが出来た。この成果を基にセルの大型化による評価・検証を実施する。単セル容量については車載用を想定し 5~20Ah クラスまでの大容量セルを用いて、性能および安全性評価・検証が必須である。また一定数量確保した試作からセル製造プロセスの課題抽出を行う。

得られた電池をモジュール化して小型 EV への搭載を行い、初のイオン液体電解質電池搭載

EV を試作・発表する予定である。この小型 EV はシティコミューターとして実用的価値を有するほか、この実証試験からイオン液体電解質を用いた電池の問題点抽出を行い、この成果を基にプロジェクトにおける自動車メーカーの参画を促し、またここで得られるデータを後の計画である本格 EV 搭載に活かす予定とする。

(10) その他

なし

## 2. 2. 6 ポスト鉄オリビン系高性能リチウム二次電池の研究開発 (三菱重工業、九州大学、九州電力)

### (1) 事業目的

本研究開発では、次世代クリーンエネルギー自動車である PHEV 用の新規高性能リチウム二次電池の開発を目的とした。開発最終目標は、2015 年の実用化を目処に単電池を製作し、単電池当たり重量エネルギー密度 200Wh/kg 以上を満足するとともに重量出力密度 2,500W/kg 以上の見通しを得ることとした。また、寿命 10 年以上、コスト 3 万円/kWh 未満を目指して開発を行った。

### (2) 事業概要

高エネルギー密度かつ高出力密度の PHEV 用リチウムイオン二次電池を開発するためには、新規正極活物質を開発する必要がある。本研究では新規正極材料として (a)  $\text{LiMnPO}_4$  の高電圧系、(b) フッ素化  $\text{Li}_2\text{MPO}_4\text{F}$  や (c) ケイ酸化  $\text{Li}_2\text{MSiO}_4$  等のオリビン類縁系、(d)  $\text{FeF}_3$  フッ化金属ペロブスカイト系の中から有望な候補材料を絞り込み、フッ化鉄 ( $\text{FeF}_3$ ) 正極材料について材料製造方法、電極製造最適化を行った。最終的には小型ラミネートセル試作と特性評価及び安全性評価を行い、次世代正極電極材料として有望であることを見いだした。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.2.6-1 主な実施項目と開発費用 (単位: 千円)

主な実施項目	19 年度	20 年度	21 年度	22 年度	23 年度	
①正極材料高性能化及び 安全性評価						
a 正極材料開発	—————→					
b 材料製造方法の開発	—————→					
c 電池材料安全性評価		—————→				
②電極材料特性評価及び 安全性評価						
a 電極材料特性評価	—————→					
b 電極材料寿命評価・改 善指針作成		—————→				
c 電極安全性評価					—————→	
a 単電池材料特性評価			—————→			
開発費用	19 年度	20 年度	21 年度	22 年度	23 年度	総額
三菱重工業株式会社	46,862	55,223	36,440	59,811	49,919	248,255
国立大学法人九州大学	70,422	64,999	32,336	30,070	25,030	222,857
九州電力株式会社	7,411	3,045	3,045	3,000	3,000	19,501

#### (4) 研究開発の実施体制

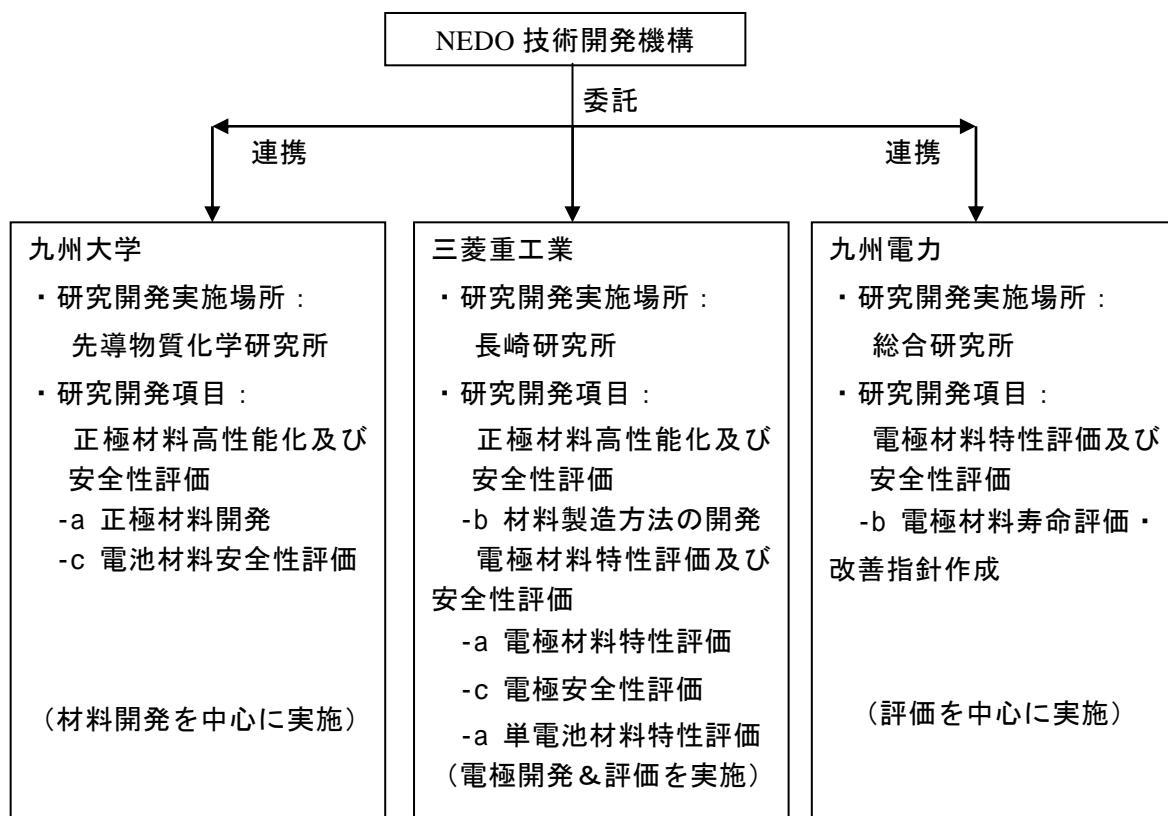


図 .2.2.6-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

本研究では 2015 年の PHEV への実用化を目指して開発を進めるために、最終年度である H23 年度 (2011 年) の目標値は、電極材料としての完成を目標とし、単セル (単電池) 換算での目標値を以下の通りとした。また、中間目標である H21 年度 (2009 年) 末では開発する正極材料系がほぼ決まることから、推定コストは最終年度と同じ値とし、それ以外は最終年度目標との中間の数値を目標値と設定した。安全性については、最終的な単電池とするまで評価が難しいが、民生用小型電池で採用されている単セルホットボックス試験での評価における、破裂・発火無しであることを中間目標とした。最終的には試作単セルでの過充電、過放電、釘刺し、圧壊試験等の各種安全性試験にて破裂・発火無しであることを目標とした。

##### 中間目標

##### (a) 正極材料高性能化及び安全性評価

- 重量エネルギー密度：700Wh/kg (活物質) 以上
- 材料構成コストの見通し<sup>注1)</sup>：3 千円/kg 以下 (活物質当り)<sup>注2)</sup>

注1) 100 万パック/年の量産時に見通しが得られるコスト

注2) (財団法人 電力中央研究所殿の NEDO 殿平成 13 年度委託業務成果報告書「分散型電池電力貯蔵技術開発トータルシステムの研究」を参照。)

- 発熱開始温度 150 以上であること。

(b)電極材料特性評価及び安全性評価

- ・ 単セル当たりのエネルギー密度：160Wh/kg以上
- ・ コスト：100万パック/年の量産時に3万円/kWh以下の見通しが得られる材料構成とすること。

(材料構成比と量産化コストの推算式は財団法人電力中央研究所殿のNEDO殿平成13年度委託業務成果報告書「分散型電池電力貯蔵技術開発トータルシステムの研究」を参照)

- ・ 予想寿命：6年(600サイクル)以上で容量比70%以上の見通しを得る
- ・ 安全性：単セルホットボックス試験（130 ）にて発火、破裂がないこと。  
(既存の金属酸化物系正極を凌駕する安全性であることを単セルレベルで検証する。)

最終目標

(a)正極材料高性能化及び安全性評価

- ・ 重量エネルギー密度：1,000Wh/kg（活物質）以上。
- ・ 重量出力密度：5,000W/kg（活物質）以上の見通しを得ること。
- ・ 材料構成コストの見通し<sup>注1)</sup>：3千円/kg以下（活物質当り）<sup>注2)</sup>

注1) 100万パック/年の量産時に見通しが得られるコスト

注2) (財団法人 電力中央研究所殿の NEDO 殿平成 13 年度委託業務成果報告書「分散型電池電力貯蔵技術開発トータルシステムの研究」を参照。)

(b)電極材料特性評価及び安全性評価

- ・ 重量エネルギー密度：200Wh/kg以上
- ・ 重量出力密度：2,500W/kg以上の見通しを得ること
- ・ 予想寿命：10年(1,000サイクル)以上で容量比70%以上の見通しを得る。<sup>注3)</sup>
- ・ コスト：100万パック/年の量産時に3万円/kWh以下の見通しを得ること。
- ・ 安全性：単セル安全性試験（過充電、過放電、釘刺し、圧壊試験）にて破裂、発火がないこと。

注3) 数ヶ月のサイクル試験からの予想

(6) 研究開発成果

表 .2.2.6-2 (a)正極材料高性能化及び安全性評価の研究成果 (一覽)

項目	目標値(最終)	達成値	達成度	備考
エネルギー密度	1,000 Wh/kg 以上	1,400 Wh/kg		FeF <sub>3</sub> の3電子サイクル深度での可逆コンバージョン反応では2電子反応でも2.3 V × 474 mAh/g = 1,090 Wh/kgを見通せることを確認した。
重量出力密度	5,000 W/kg 以上	1,659 W/kg		現状出力密度は約1,659W/kgであり目標未達であるが、カーボコート方法により導電性向上を確認した。今後バインダーの検討や導電材添加量等の最適化が必要である。
項目	目標値(最終)	達成値	達成度	備考
材料構成コストの見通し <small>注1)</small>	3千円/kg以下(活物質当たり) <small>注2)</small>	1,400円以下		低コスト材料である酸化鉄とフッ化水素酸を出発原料とするFeF <sub>3</sub> の合成法と合成したFeF <sub>3</sub> をLiドープしたLiFeF <sub>3</sub> の合成法を検討し、量産時原料価格1,400円/kg以下の目途を得た。今後、炭酸リチウム等の低コストリチウムドープ方法を開発できれば、更に低コスト化が可能。
安全性	発熱開始温度150℃以上であること	200℃以上		FeF <sub>3</sub> 正極のDSC測定により発熱開始温度は200℃以上であった。電解液共存下でも電解液単独を超える発熱はなく、目標を達成。

◎ : 大幅達成 (特筆すべき成果有り)    ○ : 達成    △ : 一部未達    × : 未達

表 2.2.6-3 (b)電極材料特性評価及び安全性評の研究成果（一覧）

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
エネルギー密度	200Wh/kg (単セル) 以上	200 Wh/kg 以上		1 電子挿入反応のみで単セル 160Wh/kg と推定。2 電子目以降のコンバージョン反応を用いることで材料当たり 1,000Wh/kg 以上、単電池目標値 200Wh/kg を達成可能である。
出力密度	2,500W/kg 以上の見通しを得る。	1,000 W/kg 以上		LiFeF <sub>3</sub> 材料は高容量であるが、導電材混合のみでは出力を向上させることは困難であったが、フッ化鉄を 1 μm 以下に小粒径化し、更に粒子表面をカーボコートすることで導電性が向上し、出力密度 1,000W/kg 以上可能であることを確認した。今後さらにカーボコート法を最適化することで目標達成可能である見通しを得た。
コスト	3 万円/kWh 以下の見通しを得る。 <sup>注1)</sup>	3 万円 /kWh 以下の見通しを得た。		正極材料コスト 3 千円/kg 以下を達成可能であることから電池コストを試算した結果、量産時には 3 万円/kWh 以下を達成できる見通しを得た。
寿命	10 年 (1,000 サイクル) 以上で容量比 70% 以上の見通しを得る。 <sup>注3)</sup>	800 サイクルの見通しが得られた。		サイクル特性については 1C 充放電、SOC0% ~100% 範囲にて 350 サイクルで容量維持率 84% 以上まで向上し、800 サイクルの見通しは得られている。1C 充放電、SOC30% ~80% 範囲では 450 サイクルで容量維持率 83% 以上、1,000 サイクルの見通しが得られた。
項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
安全性	過充電、過放電、釘刺し、試験にて破裂、発火が無いこと。	過充電、過放電、釘刺し、試験にて破裂、発火無し。		FeF <sub>3</sub> 正極を用いた 10Ah 級ラミネート型セルを試作し、安全性試験として圧壊試験、釘刺し試験、過充電・過放電試験を実施した。その結果、いずれの試験でも破裂・発火が無く、安全性を確認し目標を達成した。 フッ化鉄 (FeF <sub>3</sub> ) 正極は電極の DSC 測定においても金属酸化物正極 (NCM:三元系) に比べ全体発熱量が 1/5 から 1/10 程度と少なく熱的に非常に安定であることが判明した。

◎ : 大幅達成 (特筆すべき成果有り)    ○ : 達成    △ : 一部未達    × : 未達



<成果1>

(内容) 正極材料開発

オリビン系リン酸鉄を凌ぐエネルギー密度を有する正極候補として、下記図 .2.6.6-2に示した、(a)  $\text{LiMnPO}_4$ の高電圧系、(b)  $\text{FeF}_3$ フッ化金属ペロブスカイト系、ポリアニオンであり材料中にアルカリ金属を2つ含む系である(c)フッ素化 $\text{Li}_2\text{MPO}_4\text{F}$ や(d)ケイ酸化 $\text{Li}_2\text{MSiO}_4$ 等のオリビン類縁系の中から有望な候補材料を絞り込み、材料合成、材料改良、電気化学的特性の取得などを行った。その結果、 $\text{FeF}_3$ 系が有望な候補材料であることが判明した。

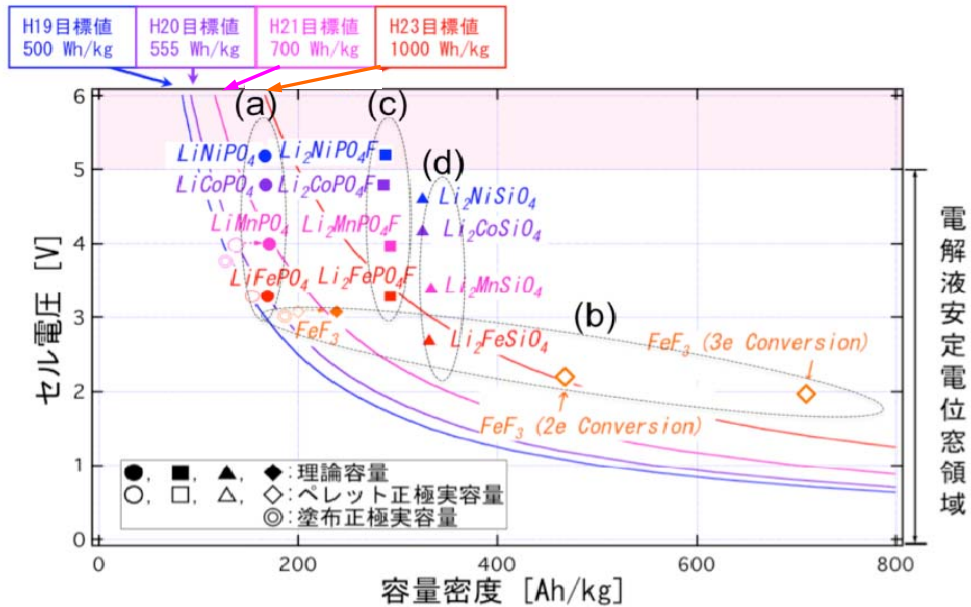


図 .2.6.6-2 新規正極材料の容量密度と電圧の関係

カーボンコート処理した $\text{FeF}_3$ を用いたペレット正極のコインセルでの充放電特性評価結果を図 .2.6.6-3に示した。Li金属を負極としたセルでは、初期放電容量として $\text{LiFePO}_4$ を凌ぐ200 Ah/kg (約620 Wh/kg) 以上を達成した。対Liおよび対Na負極に対する $\text{FeF}_3$ および $\text{VF}_3$ の正極反応機構を $^{56}\text{Fe}$ メスバウア法、EXAFS法により局所構造解析を実施し、充放電により $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ の価数変化が起こることとそれに伴い $\text{Fe-F}$ の原子間距離が変化することを確認した。

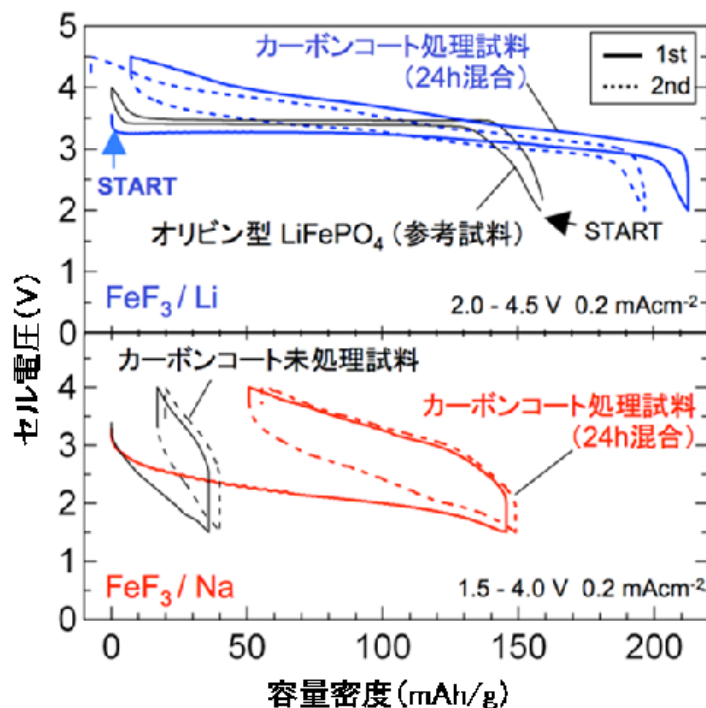


図 2.2.6-3 FeF<sub>3</sub>カーボンコート処理正極の充放電特性評価結果

また、新規フッ化物系正極として Li<sub>3</sub>FeF<sub>6</sub> や Li<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> の合成を試み、Li<sub>3</sub>FeF<sub>6</sub> では、1.6 電子深さの可逆コンバージョン反応が可能であることを確認した。今後、高エネルギー遊星ミルを用いた LiF+FeF<sub>2</sub> メカノケミカル反応でのプレドーブ LiFeF<sub>3</sub> 相の合成や FeF<sub>3</sub> 塗布正極にてレート特性、サイクル性、安全性の見極めを行う一方、MnF<sub>3</sub> 等他の未知の高電圧新規フッ化物系正極系の探索も順次行っていく必要がある。

200 mAh/g の可逆容量が得られたペロブスカイト型フッ化物 FeF<sub>3</sub> の欠点は、Li を内包しないため、炭素負極に対し、イオン電池を組めないことである。そこで、Li ナフタレンや n-ブチルリチウム等、様々な還元剤を用いた化学的 Li 化処理による LiFeF<sub>3</sub> 合成を試み、化学的に挿入された Li が電気化学的活性を保って充放電動作可能なことを確認した。(図 III.2.6.6-4 参照)さらに LiFeF<sub>3</sub> のインターカレーション反応(Li<sup>+</sup>+e<sup>-</sup>+FeF<sub>3</sub>→LiFeF<sub>3</sub>)の理論容量は 237mAh/g であるが、さらに放電電位を低電位側へ拡大することにより最終的にコンバージョン反応 (3Li<sup>+</sup>+3e<sup>-</sup>+FeF<sub>3</sub>→Fe+3LiF) による 3 電子分の可逆容量を得ることができることを確認し、その重量エネルギー密度は 1,422 Wh/kg と最終目標値 1,000 Wh/kg を凌駕する値が得られた。(図 2.2.6-5 参照) しかも、Li だけでなく、より安価ながらイオン体積が 2 倍ある Na に対しても少なくとも 2 電子反応までは可逆なコンバージョン系を組める可能性がある有望な系であることがわかった。さらに、この反応メカニズムは九州シンクロトロン光研究センターにおける XAFS 測定において Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>0</sup> のレドックス反応であることを確認した。(図 2.2.6-6 参照) 但し、コンバージョン反応領域の可逆性改善のためには、放電副生成物である絶縁性 LiF に起因する、過電圧増大、電解液への溶出によるサイクル容量劣化防止が不可欠であることも新たな課題として明らかになった。

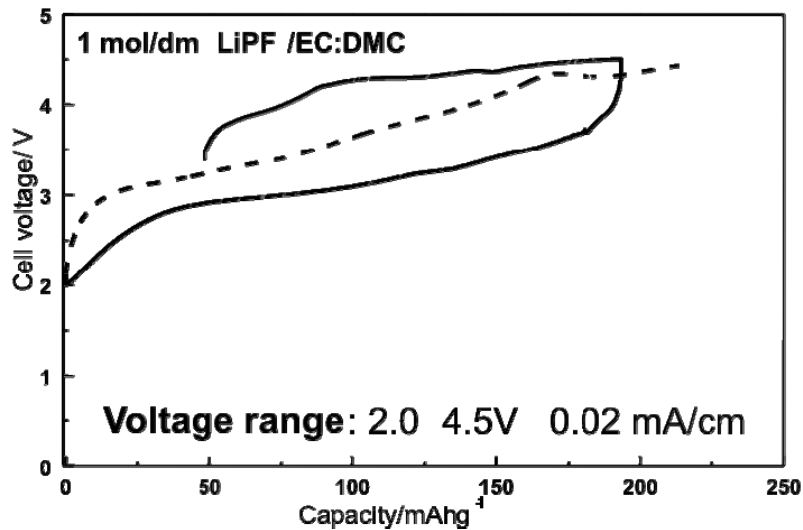


図 2.6.6-4 化学的 Li 化処理された  $\text{Li}_x\text{FeF}_3$  の充放電特性

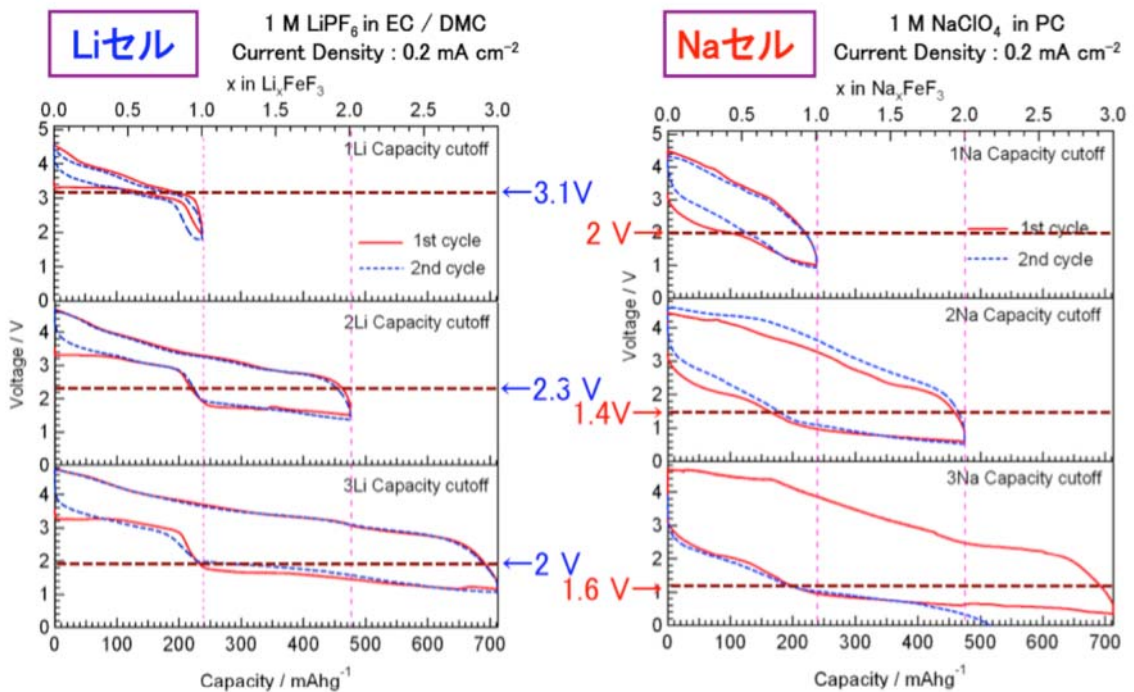


図 2.6.6-5  $\text{Li}_x\text{FeF}_3$  及び  $\text{Na}_x\text{FeF}_3$  正極の充放電特性

(達成度) ○

(成果の意義)

本研究で開発したフッ化鉄 ( $\text{FeF}_3$ ) 正極材料は、従来の金属酸化物系正極材料や安全性に優れた鉄オリビン ( $\text{LiFePO}_4$ ) 正極材料を超える高容量かつ安全性に優れた新規正極材料であり、コスト的にも安価であることから、PHEV 用正極としては最適である。

(課題と取り組み)

今後はレート特性 (出力特性) とサイクル特性 (寿命) 向上が課題であり、正極材料の粒径制御やカーボンコートによる出力特性向上を目指す。また、サイクル特性向上のためには、コンバージョン反応領域の可逆性改善が必要であり、放電副生成物である絶縁性  $\text{LiF}$  に起因する、過電圧増大、電解液への溶出によるサイクル容量劣化防止方法を検討する予定である。

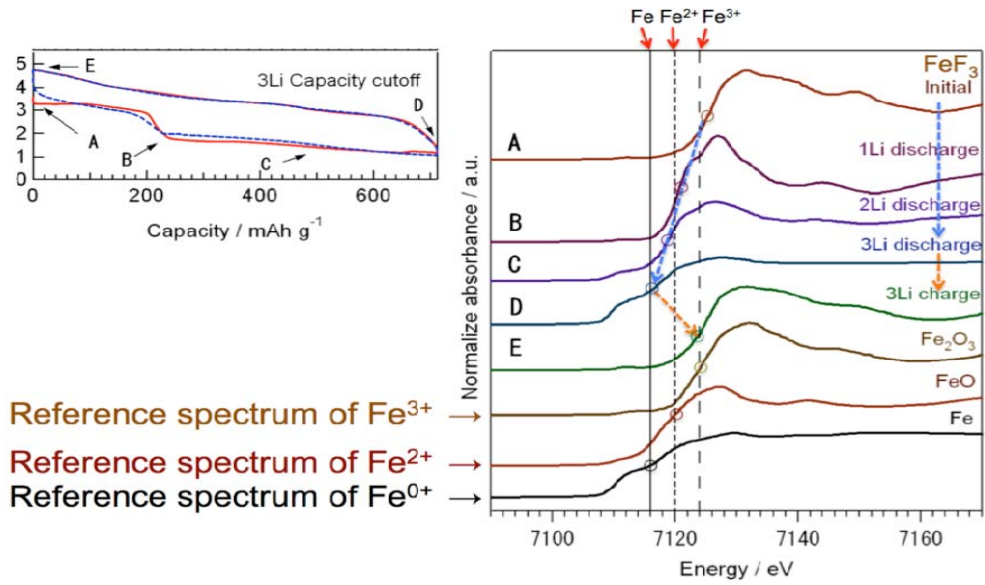


図 .2.6.6-6 FeF<sub>3</sub>の充放電サイクルに伴う Fe K 端 XANES プロファイル挙動

<成果 2 >

(内容) 電極安全性評価 (10Ah 級ラミネートセル試作と安全性試験結果)

上記<成果1>で開発したFeF<sub>3</sub>正極を用いて10Ah級のラミネート型セルを試作し、安全性評価として釘刺し試験、圧壊試験、過充電試験及び過放電試験を実施した。試作セルの外観と容量確認試験結果を下記図 .2.6.6-7に示した。試作したセルは、設計値12Ahに対して初期容11.6Ahを確認できた。

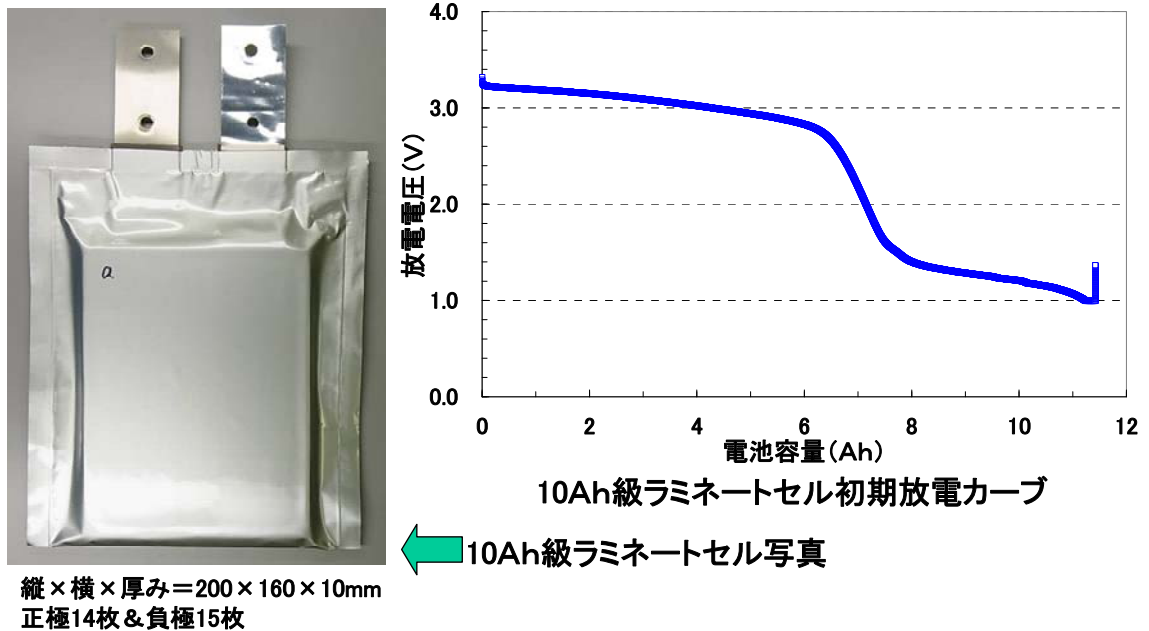


図 .2.6.6-7 10Ah 級 FeF<sub>3</sub> ラミネート型セル外観と初期容量確認試験結果

次に上記10Ah級試作セルを用いて、釘刺し試験を実施した。釘刺し試験前後の試験状況とセルの外観写真を図 .2.6.6-8に示した。また、試験中のセル電圧及びセル温度の変化を図 .2.6.6-9に示した。その結果、釘刺し直後は電圧が一瞬低下し、その後少しずつ低下し、最終的に0Vまで低下した。温度は最高65 (室温+40) まで上昇したが、破裂・発火は無く、安全性を確認できた。

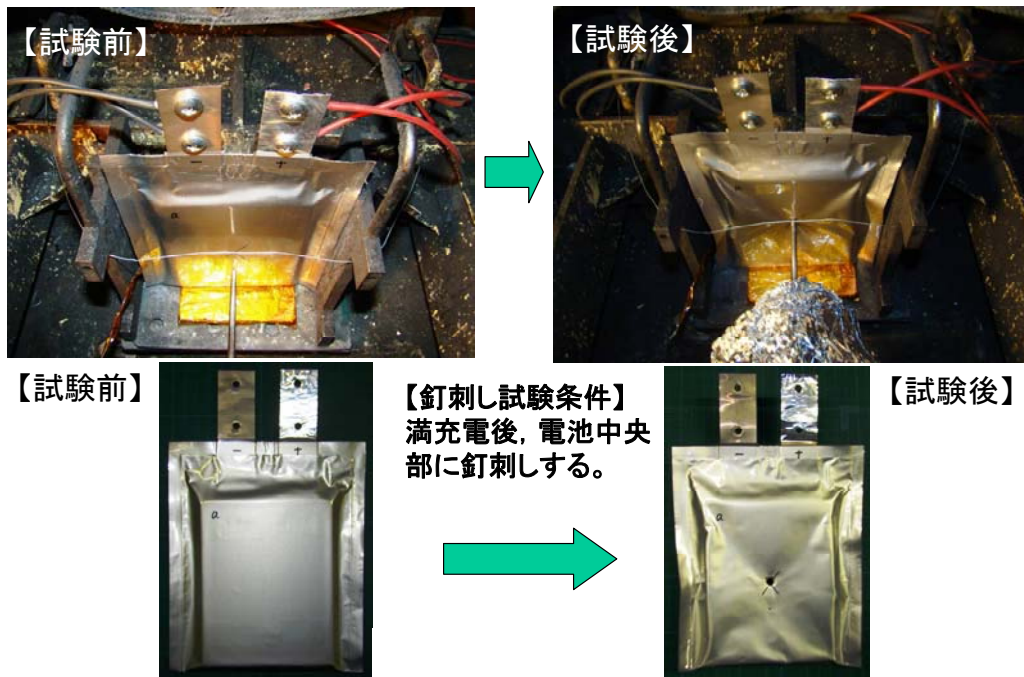


図 .2.6.6-8 10Ah 級  $\text{FeF}_3$  ラミネート型セル釘刺し試験前後の外観写真

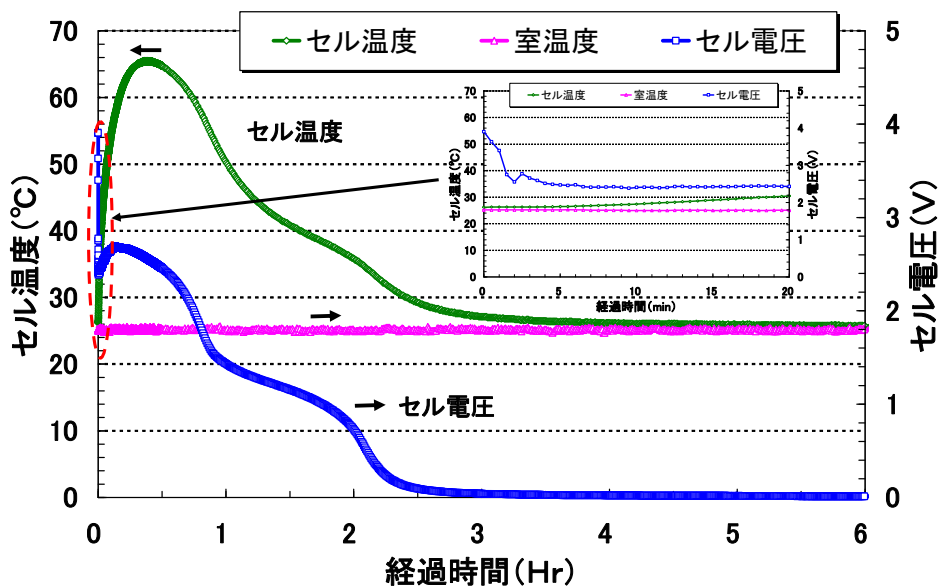


図 .2.6.6-9 10Ah 級ラミネート型セルの釘刺し試験でのセル温度とセル電圧の変化 (達成度)。(成果の意義)

フッ化鉄 ( $\text{FeF}_3$ ) 正極材料を用いて試作した 10Ah 級ラミネートセルは圧壊試験、釘刺し試験、過充電・過放電試験を実施したが、いずれの試験でも破裂・発火が無く、安全性を確認し目標を達成した。また、フッ化鉄 ( $\text{FeF}_3$ ) 正極は電極の DSC 測定においても金属酸化物系正極 (NCM: 三元系) に比べ全体発熱量が 1/5 から 1/10 程度と少なく熱的に非常に安定であることが判明し、高容量かつ安全性の高い正極材料であることが証明できた。

(課題と取り組み)

今後は、出力特性とサイクル特性の向上が課題であり、粒径制御とカーボンコート法の最適化を行うことで更に性能向上を目指す。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクト期間中の知的財産権等の件数を表 .2.2.6-4 に示す。

表 .2.2.6-4 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願 (H24.09.03 現在)	0	1	1	5	2	9
うち、外国出願	0	0	0	0	0	0
国内登録	0	0	0	0	0	0
海外登録	0	0	0	0	0	0
論文	1	2	7	6	6	22
うち、査読付き論文	1	1	4	1	4	11
研究発表・講演	12	10	7	26	6	61
受賞実績	2	1	1	2	2	8
新聞・雑誌等への掲載	1	0	3	0	0	4
展示会への出展	0	0	0	0	0	0
合計	17	15	23	40	20	115

(詳細リストは別紙に記載済み)

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

本研究開発の目標値と達成状況は上記表 .2.2.6-2 と表 .2.2.6-3 に示したとおり、出力密度とサイクル特性（寿命）の目標が一部未達であった。出力特性が低い原因としては、フッ化鉄（ $\text{FeF}_3$ ）正極材料の電子導電性が低いことが一因であることを突き止め、粉体粒子表面をカーボンコートすることで大幅に出力特性が向上することを確認している。更に粉体粒径を制御することで出力特性が向上することも確認しており、今後フッ化鉄粉体の粒径制御とカーボンコート方法の最適化を検討することで、目標達成を目指す。もう一つの課題であるサイクル特性低下の要因としては、コンバージョン反応に伴う放電副生成物である絶縁性  $\text{LiF}$  に起因する、過電圧増大や電解液中への溶出が考えられることから、今後新規バインダーによる最適化や最適電解液組成の検討を行い、サイクル特性向上を目指す。

## (9) 成果の実用化／活用

本研究で開発した新規正極材料であるフッ化鉄は、高容量、低コスト（資源確保性含む）及び高安全性が特徴であり、出力特性とサイクル特性を更に向上することで、今後の量産化検討は必要であるが、PHEVやEV用の電池として実用化可能な正極材料であると考えられる。現在、2015年度の実用化に向けた正極材料の量産化検討や、上記正極特性の未解決課題の解決のための検討を並行して実施中である。今後当社製品である40Ah級単電池へ適用することで、移動体用電池への活用を目指している。更に当社では定置用蓄電池としての製品化も実施中であり、上記フッ化鉄は安全性に優れていることから、大型電池への展開も検討中である。本材料が適用可能となれば、低コスト電池実現への可能性もあり今後の二次電池市場拡大にも貢献できるものと考えられる。

(10) その他

本研究開発を実施するにあたり、定期的に NEDO 技術開発機構殿及び要素技術委員会の皆様から貴重なご意見・ご指導を頂きましたことに感謝致します。

## 2. 2. 7 多層構造粒子設計による高出力リチウムイオン電池用正極活物質の研究開発（戸田工業）

### （1）事業目的

長距離走行と高燃費な PHEV、EV に適したリチウムイオン電池の主要材料である正極活物質の多層構造粒子設計を検討することにより、高エネルギー、高出力、高安定で安全性に優れたリチウムイオン電池用正極材料を開発することを目的とし、18650 単セルでの特性がエネルギー密度 240Wh/kg 以上且つ出力密度 3,000W/kg 以上を満足するリチウムイオン電池用正極材料を開発する。

### （2）事業概要

既存の正極材料のニッケル酸リチウムと三元系ニッケル・コバルト・マンガン酸リチウムを複合した粒子を設計することで両者の長所を活かしつつ、短所をカバーし、更に表面改質技術を加えることにより、正極材料表面と電解液の酸化還元反応を制御する技術開発を目指す。更に、これまでにない高密度で球状性に優れた前駆体合成技術を開発することにより、高エネルギーと高出力の両立を目指す。

### （3）研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.2.7-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
1.多層構造粒子の研究開発						
容量増加に対する組成の検討		→				
容量と安全性に対する多層構造粒子設計の検討			→			
出力・容量・安全性に対する粒子サイズの検討			→			
出力特性とサイクル特性に対する多層化プロセスの検討				→		
多層化材料のサイクル特性及び高温保存特性の改善検討					→	
2.前駆体粒子合成技術の研究開発						
球状・高密度前駆体の合成方法の検討		→				



前駆体の微粒子化の検討			→			
前駆体種の最適化検討				→		
湿式合成による多層構造化の検討				→		
多層化構造粒子用前駆体の安定生産技術の確立					→	
3.開発材料の検証及び評価						
ラミネートフルセルによる評価		→				
18650 セルによる評価			→			
18650 セル技術でのエネルギー密度・出力密度の検討				→		
18650 セルにおける多層構造粒子の特性評価					→	
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
戸田工業株式会社	0.0	68.0	50.7	28.0	26.0	172.7

(4) 研究開発の実施体制

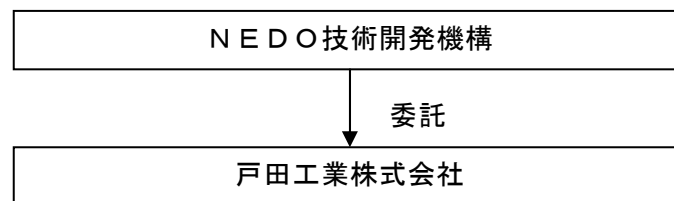


図 .2.2.7-1 研究開発の実施体制

(5) 研究開発目標と根拠

中間目標

多層構造粒子の研究開発においては、中間層用および最外層用の材料を検討し、多層化プロセスの最適化を検討する。これにより 0.1C 放電容量：250mAh/g 以上、圧縮密度：2.5g/cc 以上、出力密度：2,500W/kg 以上、DSC 発熱開始温度：200 以上、DSC 発熱ピーク温度：

230 以上、材料コスト：市販の正極材料(¥/kg)以下である多層構造材料の開発を行なう。

前駆体粒子合成技術の研究開発においては、前駆体種と Li 化したコア材料の諸特性の関係を調査して、0.1C 放電容量：250mAh/g 以上、圧縮密度：2.5g/cc 以上、出力密度：2,500W/kg 以上、DSC 発熱開始温度：200 以上、DSC 発熱ピーク温度：230 以上を安定的に達成できる前駆体種を決定する。

開発材料の評価及び検証については、上記材料について 18650 セルを用いての評価を実施して、圧縮密度：2.5g/cc 以上、エネルギー密度：240Wh/kg 以上、出力密度：2,500W/kg 以上の達成度を検証する。

このためには 18650 セル作製技術と評価法の最適化についても検討を行う必要がある。

(想定条件・根拠)

ハーフセルにて、充放電電圧範囲：4.6-2.0V における 0.1C 放電容量と 4.6V 充電状態における電極の熱安定性を確認するとともに、材料の圧縮密度等を確認する。中間目標値は、市販されている  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$  を用いた 18650 セルの特性から設定した。

最終目標

最適な多層構造粒子構造(コア・中間層・最外層)及びプロセスの設計を実施し、電極密度：2.5g/cc 以上、18650 セル容量：3,000mAh 以上、エネルギー密度：240Wh/kg 以上、出力密度：3,000W/kg 以上、サイクル特性：200 サイクルで 90%以上、DSC 発熱開始温度：200 以上、DSC 発熱ピーク温度：230 以上、材料コスト：市販の正極材料(¥/kg)以下の達成度を検証する。

(想定条件・根拠)

多層構造粒子の 18650 セル評価において、材料の圧縮密度（電極密度）、負極に炭素を用いて、充放電電圧範囲：4.6-2.0V における 0.1C-18650 セル容量、エネルギー密度、出力密度、安全性、材料コスト等を確認する。

最終目標値は、事業目的である「18650 単セルでの特性がエネルギー密度 240Wh/kg 以上且つ出力密度 3,000W/kg 以上を満足するリチウムイオン電池用正極材料」を満足する各特性を 2011 年度 2 月末までに達成することを目標に設定した。

(6) 研究開発成果

表 .2.2.7-2 研究成果 (一覽)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
電極密度	2.5 g/cc	2.6 g/cc		
18650 セル容量	3000 mAh	2800 mAh		
エネルギー密度	240 Wh/kg	235 Wh/kg		
出力密度	3000 W/kg	1000 W/kg	×	
サイクル特性	90%@200cycle	50%@200cycle	×	
DSC 発熱開始温度	200	234		
DSC 発熱ピーク温度	230	261		
材料コスト	市販正極材レベル	同等		

凡例： ○：達成、△：一部未達、×：未達

<成果1>

(内容) 電極密度：2.5g/cc 以上を達成する為に、多層構造粒子用コア前駆体合成条件の最適化と、多層構造粒子の平均粒子径の異なる大小2種類の粒子の混合比率の最適化及び電極作成条件を最適化することで、電極密度：2.6g/cc を達成した。(図Ⅲ.2.2.7-2)

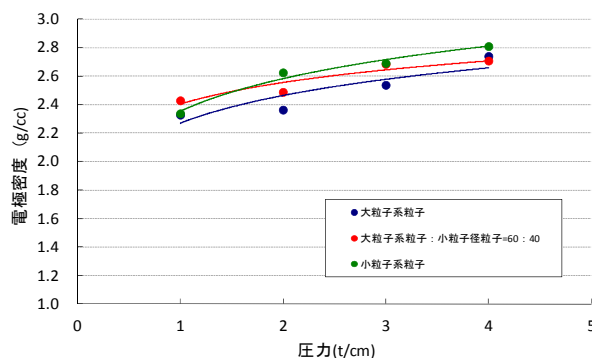
(達成度)

(成果の意義)

電極密度を高めるために、多層構造粒子用コア前駆体合成条件の最適化と、多層構造粒子の平均粒子径の異なる大小2種類の粒子の混合比率の最適化及び電極作成条件を最適化することで目標値をクリアし、18650 セルにおける 0.1C 初期容量が、市販されている  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$  を用いた 18650 セルを上回る可能性を見出した。

(課題と取り組み)

今回目標値を達成したが、電極密度の更なる向上のためにはコア材やシェル材の前駆体合成条件及び焼成条件の最適化により、高密度の多層構造材料の設計が可能であると考え。また、電極作成の際に使用する導電材、バインダー比の調整や圧延手法の最適化による電極仕様の最適化によっても、更なる電極密度の向上が見込まれる。



図Ⅲ.2.2.7-2 大小粒子混合材料のプレス圧力に対する電極密度変化

### <成果 2>

(内容) 18650 セル容量 : 3,000 mAh を達成するために、多層構造粒子を用いた 18650 セルを作製し、18650 セル容量 : 2,800 mAh を達成した。(図Ⅲ.2.2.7-3)

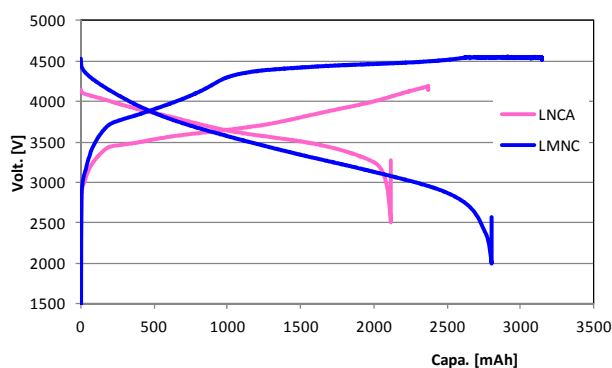
(達成度)

(成果の意義)

18650 セル容量 : 3,000 mAh を達成するために、多層構造粒子の各層を構成する材料の設計と、18650 セル仕様の最適化を実施した。その結果、コア材料を用いた 18650 セルで、2,500mAh のセル容量、多層構造粒子を用いた 18650 セルで 2,800mAh のセル容量を達成し、目標値の 3,000mAh に対し、目標値までもう一步のところまで達成でき、実現の可能性を見出すことが出来た。一方、同条件で作製した市販されている  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$  を用いた 18650 セル容量の 2,210mAh に対しては、約 120% の特性を示し、多層構造粒子の優位性を確認した。

(課題と取り組み)

LMNC 多層構造粒子の 18650 セルの容量については、現在市販されているセルに対して 4.5V 以上の高電圧充電を行う必要があると共に、コアに用いる LMNC の真密度が他の正極材料に比べて低いという課題がある。一方で LMNC 多層構造粒子設計と電極作成条件の最適化によって、18650 セル容量を向上させることが出来る事を確認している。今後は、多層構造粒子設計の見直しよりは、更なる 18650 セル評価法の改善と高い充電電圧に耐えうる導電材、バインダー、セパレータ及び電解液のブレークスルーを実施することで、更なる高容量を有する LMNC 多層構造粒子使用したセルが作製できると推察する。



図Ⅲ.2.2.7-3 18650 セルの初期充放電特性

### <成果 3>

(内容) エネルギー密度 : 240 Wh/kg を達成する為に、多層構造粒子の各層を構成する材料の設計と、18650 セル仕様の最適化を実施した結果、LMNC 多層構造粒子を用いた 18650 セルで、235Wh/kg のエネルギー密度を達成した。(図Ⅲ.2.2.7-4)

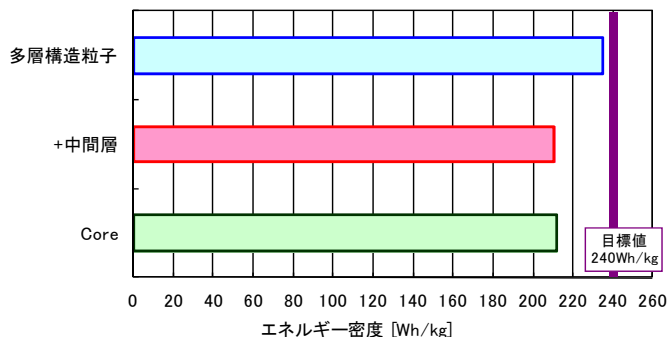
(達成度)

(成果の意義)

多層構造粒子化により、コア材料 中間層多層化材料<最外層多層化材料のエネルギー密度改善効果を確認し、リチウムイオン電池用正極材料の多層化が電池のエネルギー密度改善に優位性があることを立証できた。また、18650 セル仕様の見直しにより、LMNC コア材料を用いた 18650 セルで、初期の 150Wh/kg のエネルギー密度から、210Wh/kg と大幅な改善を達成でき、セル仕様の最適化によっても、エネルギー密度改善の可能性を見出すことが出来た。

(課題と取り組み)

エネルギー密度についての課題は、まずは評価法を確立することが先決である。成果2でも述べたが、高い充電電圧に耐えうる18650セル部材の開発が急務と考える。そのうえで、多層構造粒子の物性のチューニング及び、18650セル部材の軽量化を図ることで、目標の240Wh/kgを超えるLMNC多層構造粒子を用いた18650セルの作製も可能と考えている。



図Ⅲ.2.2.7-4 各多層化材料を用いた18650セルの重量エネルギー密度

<成果4>

(内容) 出力密度：3,000 W/kgを達成する為に、多層構造粒子の粒子径の設計と電極作成仕様の検討を行った結果、出力密度：1,000W/kgを達成した。(図Ⅲ.2.2.7-5)

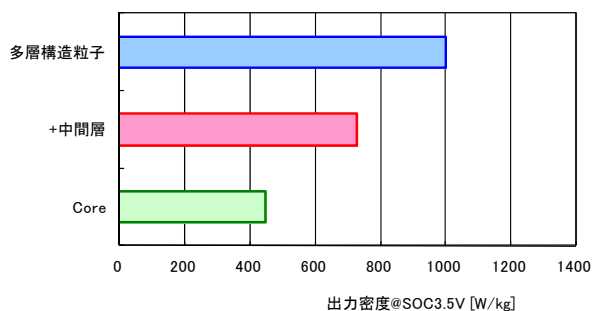
(達成度) ×

(成果の意義)

多層構造粒子の粒子径の設計と電極作成仕様を最適化し、目標とする出力密度とエネルギー密度を両立する18650セルの作製を目指したが、結果としてこの二つの特性を同時に満足させる事は出来なかった。今回の設計は、エネルギー密度を重要視した為、それに合う電極の仕様およびセルの仕様で検討した結果、1,000W/kgの出力密度を得ることしかできず、目標とした3,000W/kgの出力密度には遠く及ばない結果となった。

(課題と取り組み)

今回の目標値については、18650セルという前提があり、その仕様の中で、エネルギー密度と出力密度を大幅に向上させるためにはどうするかという検討を実施してきた。しかし、エネルギー密度と出力密度の両立を考えた場合、18650セルという前提の中では、其々の特性を最大限に導き出す電極の条件を見つけることが非常に難しく、目標値を達成できなかった。今後は、他の電池仕様(たとえばラミネートセル等)における特性についても可能性を調査する必要がある。また、高い充電電圧に耐えうる18650セル部材のブレークスルーも必要である。



図Ⅲ.2.2.7-5 各多層化材料を用いた18650セルの重量出力密度

### <成果 5>

(内容) サイクル特性：90%@200cycle を達成する為に、最適化した多層構造粒子のサイクル特性を評価した結果、50%@200cycle を達成した。(図Ⅲ.2.2.7-6)

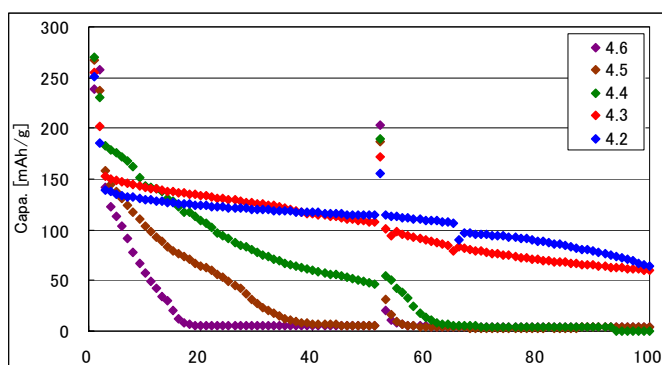
(達成度) ×

(成果の意義)

多層構造粒子設計によるサイクル特性の改善効果については残念ながら、確認できなかった。この要因については、やはり、高い充電電圧による多層構造粒子以外のセル部材の分解反応による悪影響を省くことが出来なかったことが主要因であると考えている。現在高電圧対応の電解液も含めたセル構成部材の検討も盛んに行われており、高充電電圧に耐えうるセル構成部材が開発された時点で、再度 LMNC 多層構造粒子のサイクル特性を再検証する必要があると考える。

(課題と取り組み)

サイクル特性の検証には、まずは高電圧対応のセパレータ、バインダー、導電材及び電解液の開発が急務である。そのうえで、18650 セル仕様を最適化し、現在の多層構造粒子が目標値に対して、どのレベルにあるのかを検証する必要がある。今後は、高電圧対応のセル構成部材の開発状況を継続して調査し、良い部材が開発された場合には、その影響も含めて調査を行う。



図Ⅲ.2.2.7-6 多層化材料を用いた 18650 セルの充電電圧とサイクル特性の関係

### <成果 6>

(内容) DSC 発熱開始温度：200 以上を達成する為に、多層構造粒子の各層を構成する材料の設計を実施した結果、発熱開始温度：230 を達成した。(図Ⅲ.2.2.7-7)

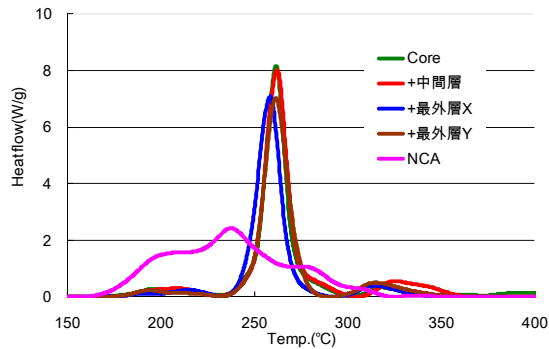
(達成度)

(成果の意義)

発熱開始温度：200 という目標値は、現在、リチウムイオン二次電池用の正極活物質として市場に出回っている  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$  の特性である。今回開発した LMNC 多層構造粒子の発熱開始温度は 230 であり、安全性に関して市販されているリチウムイオン電池用正極材料に対して、同等以上の安全性を維持している。

(課題と取り組み)

今回の目標値については DSC による評価のみを設定したが、今後はより実際の使用条件に近い 18650 セルにおける釘差し試験、過充電試験及び加熱試験など、より過酷な試験を実施する必要がある。しかし、これらの試験においても、高電圧対応のセル部材の開発は必要になる。



図Ⅲ.2.2.7-7 三層多層化 LMNC の DSC プロファイル

<成果 7>

(内容) DSC 発熱ピーク温度：230 以上を達成する為に、多層構造粒子の各層を構成する材料の設計を実施した結果、発熱ピーク温度：260 を達成した。(図Ⅲ.2.2.7-7)

(達成度)

(成果の意義)

発熱ピーク温度：230 という目標値は、現在、リチウムイオン二次電池用の正極活物質として市場に出回っている  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$  の特性である。今回開発した LMNC 多層構造粒子の発熱ピーク温度は 260 であり、安全性に関して市販されているリチウムイオン電池用正極材料に対して、同等以上の安全性を維持している。

(課題と取り組み)

本プロジェクトの目標はクリアできたが、成果 7 と同様に、今後はより実際の使用条件に近い 18650 セルにおける釘差し試験、過充電試験及び加熱試験などのより過酷な試験を実施する必要がある。しかし、これらの試験においても、高電圧対応のセル部材の開発は必要になる。

<成果 8>

(内容) 材料コスト：市販の正極材レベルを達成する為に、原材料コスト及びプロセスコストを試算した結果、LMNC 多層構造粒子のコストは、現在市販されている  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$  のコスト同等以下であることを確認した。

(達成度)

(成果の意義)

LMNC 多層構造粒子の原材料コスト及びプロセスコストを試算した結果、市販されている  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$  のコスト対比、原材料コストで安価であること、また多層化に要するプロセスコストは、 $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$  のプロセスコストよりも高くなるが、そのコストは原材料コストの差以下で製造できることを確認した。また、量産時におけるプロセスの効率化が図られることで更なるコストダウンも可能であると考えている。

(課題と取り組み)

コスト低減に対する取り組みは、随時実施する必要がある、その時々で最も安価な原料を調達すること、また、量産プロセスにおけるプロセス改善活動に継続的に取り組む必要がある。これらの取組みについては、今後も継続的に実施するとともに他の正極材料の価格動向についても調査を行い、LMNC 多層構造粒子の優位性を確認していく。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクト期間中の知的財産権等の件数を表 .2.2.7-3 に示す。

表 .2.2.7-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	0	1	5	9	0	15
うち、外国出願	0	0	2	7	0	9
国内登録	0	0	0	0	0	0
海外登録	0	0	0	0	0	0
論文	0	0	0	0	0	0
うち、査読付き	0	0	0	0	0	0
研究発表・講演	0	1	2	2	0	5
受賞実績	0	0	0	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0	0	0
合計	0	2	7	11	0	20

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

本研究開発は、長距離走行と高燃費な PHEV、EV に適したリチウムイオン電池の主要材料である正極活物質の多層構造粒子設計を検討することにより、高エネルギー、高出力、高安定で安全性に優れたリチウムイオン電池用正極材料を開発することを目的としたが、18650 セルでの出力密度:3,000W/kg、サイクル特性:200 サイクルで90%の維持率、セル容量:3,000mAh の3項目に対して、残念ながら目標値を達成することが出来なかった。

特に出力密度とサイクル特性については、目標には遠く及ばなかった。これは、18650 セルを用いた多層構造粒子の評価において、高い容量を得るために、高い充電電圧(4.5V 以上)が必要であり、セパレータや電解液、バインダーなどの部材の劣化を招いたことが大きな要因の1つと考えている。

しかし、その他の特性についてはほぼ目標値を達成していること、また多層構造粒子設計によるコア材料に対する特性改善も、高電圧対応ではないセル部材においても確認できていることから、多層構造粒子化の技術は各特性の改善に効果があったと確信している。18650 セル評価法についても、電池メーカーレベルには到底及ばないものの各特性の改善に向けた評価レベルは確実に上がってきており、今後は高電圧対応のセル構成部材が開発された際には、それらを用いた多層構造粒子の特性が、より詳細に把握できると考えている。今後は、高電圧対応のセル構成部材の開発動向の調査を行うと共に、他正極材料の技術開発動向、コスト動向など幅広く注視したうえで、LMNC 多層構造粒子の優位性を継続して確認していきたい。

## (9) 成果の実用化／活用

本研究で開発した多層構造粒子は、現行の正極材料と比較して、高い放電容量[mAh/g]を得ることができ、さらに、高エネルギー密度および高い安全性を併せ持つことを特徴としているが、出力密度及びサイクル特性についてはその実力は検証できていない。高容量と高エネルギー



一密度、高安全性を必要とする自動車、バイク、フォークリフトなどの大型用途やパワーツール向けの小型用途においても、近い将来、高電圧対応のセル構成部材が開発された際には、実用化される有望な材料である。

当然、特に高出力を必要としないモバイル用途としても高いエネルギー密度と高い安全性の特徴を活かし、展開することも充分可能である。

ただし、繰り返しにはなるが、高い放電容量を得る為には、高い充電電圧で充電することが必須であり、電荷液などの他のセル構成部材の耐電圧化が必須であろう。それらのセル構成部材の開発が成された後に、まずは、既存材料からの置き換えとして、本プロジェクト内で最適化した高容量を有するコア粒子をベースとした実用化が先行し、その後、高い安全性や高出力特性を付与することができる多層構造粒子の実用化に繋がると考える。

これらの市場動向に対応する為に、必要に応じて、本研究において培った前駆体合成技術の量産化を実現し、安定生産かつ低コスト化に向けた量産レベルでの検証を実施していく。同時に、中間層形成、および最外層形成に必要な多層化プロセスにおいても量産スケールでのプロセスの効率化を進め、安定生産につなげていきたい。

#### (10) その他

なし

## 2. 3 要素技術開発（周辺機器）

### 2. 3. 1 レアアースレス電動機に適用可能なセンサレス制御に関する研究開発（徳島大学）

#### （1）事業目的

本事業は、レアアースを全く使わない主電動機に対して簡単で安全な電動機駆動システム開発を行い、資源問題の少ない次世代EVの開発に資することを目的とする。

本研究では、レアアースを使わない電動機として新しく開発した誘導同期リラクタンス電動機に対して新しいセンサレス制御インバータによる主電動機駆動制御システムがEVとして求められる種々の駆動性能を達成することを目標に研究開発を行った。

#### （2）事業概要

本研究では、1) レアアース磁石を全く使わない新しい電動機として誘導同期リラクタンス電動機の提案開発と、この電動機に対して、2) 新しいセンサレス制御により始動から高速運転まで連続的に制御出来る電動機制御システムを開発し、高い電動機出力密度（0.5 kW/kg）を達成できることを目標に実験を行う。また、3) EVの駆動規模として数十kWの誘導同期リラクタンス電動機を試作し、実験結果を通じて電動機駆動システムの実用化の可能性を検証する。

#### （3）研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.3.1-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
・センサレス制御によるレアアースレス電動機の初期始動特性を検討する。	→	→	→	→		
・センサレス制御による始動から高速までの広範な連続的制御システムの構築する。		→	→	→		
・センサレス制御の始動特性運転特性を改善するレアアースレス電動機を試作する。	→	Type A	Type B	Type C		
・センサレス制御システムにより試作したレアアースレス電動機の運転実験を行う。			→	→	→	
・レアアースレス電動機に適したセンサレス制御法の確立と定量的評価する。		→	→	→	→	
開発費用（百万円）	19年度	20年度 17.70	21年度 20.49	22年度 19.73	23年度 15.26	総額 73.18

#### （4）研究開発の実施体制

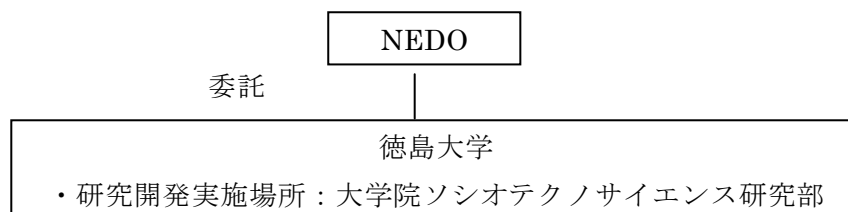


図 .2.3.1-1 研究開発の実施体制

## (5) 研究開発目標と根拠

本研究開発の最終目標とそれに対する根拠は以下のとおりである。

- ①目標：レアアースレス誘導同期電動機をセンサレス制御で、逆回転トルクを発生しないで、確実に一定方向に始動できること。  
根拠：新しいセンサレス制御は回転子の初期位置を推定しないため、永久磁石同期電動機を駆動する時、回転子の位置によっては原理的に逆回転をする場合があるが、回転磁界の方向に始動トルクを発生する誘導電動機と運転効率特性に優れた同期電動を組み合わせたハイブリッド構造の誘導同期電動機を主電動機として新しいセンサレス制御インバータで駆動すると確実に一定方向に始動することができる。商用電源での始動トルクを得る目的の誘導同期電動機は市販実用化されているが、インバータ駆動への適用はほとんど無く、同期リラクタンス電動機と誘導電動機を組み合わせたものはまだ市販実用化されていない。
- ②目標：インバータの正弦波PWM (Pulse Width Modulation: パルス幅変調) 制御による始動から、高速でのワンパルス方形波駆動まで連続的なセンサレス制御を可能とすること。  
根拠：EVの駆動においては、できるだけ損失を少なくするために高速運転時はワンパルス方形波制御に切り換えられている。一般的な制御手法では、波形制御手法が異なるため正弦波PWM制御からワンパルス方形波制御に切り換えられているため、切り換え時の連続性に難点があり制御システムの複雑さを招いていた。これに対して新しいセンサレス制御は、始動時と高速運転時の波形制御に関わらず共通の運転位相の追従制御原理に基づいているため連続的な制御が可能である。
- ③目標：レアアースレス誘導同期電動機をセンサレス制御で駆動し、毎分250回転(8極機)で、定格の200%以上のトルクを発生すること。  
根拠：電動機始動時付近の低速回転において、定格値を十分超えるトルクの発生が要求されるため極数は8極機としているが、低速での十分なトルク発生ができれば高速回転時での構造面、周波数制御面からは極数が少ないほうが望ましい。
- ④目標：レアアースレス誘導同期電動機をセンサレス制御で毎分1.5万回転(8極機)以上の高速回転ができ、電動機出力密度も(0.5kW/kg)を達成可能とすること。  
根拠：毎分1.5万回転程度の高速回転での運転は、現在のエンジン搭載自動車と同程度である。また、現在、EVに搭載されている電動機は油冷等の冷却構造のため出力密度は高いが、目標値の(0.5kW/kg)は、電動機研究室の実験が行える空冷駆動時の電動機出力密度としては十分な密度である。

## (6) 研究開発成果

本研究では、EVの主電動機駆動用電動機として、レアアースを一切使わない同期リラクタンス電動機と誘導電動機構造を組み合わせた構造の新しい誘導同期リラクタンス電動機を試作し、新しいセンサレス制御による電動機駆動システムを構築し、研究を行った結果、以下の成果が得られ、上記の目標を達成することができた。

- ①成果：試作した誘導同期リラクタンス電動機を新しく提案したセンサレス制御により、逆回転トルクを発生しないで、確実に一定方向に始動できることを実験で実証した。
- ②成果：インバータの正弦波PWM制御による始動から、高速でのワンパルス方形波駆動まで連続的なセンサレス制御が達成できることを実験で実証した。

③成果：試作した誘導同期リラクタンス電動機をセンサレス制御で駆動し、低速の毎分100回転で、300%以上の発生トルクが得られることを実験で実証した。

④成果：試作した誘導同期リラクタンス電動機（2kW、4極）に対して、センサレス制御により高速回転（毎分1.5万回転）と電動機出力密度（0.57kW/kg）が達成できることを実験により実証した。

表Ⅲ.2.3.1-2 研究成果（一覧）

項目	目標値（最終）	達成値	達成度	備考
・センサレス制御インバータ始動特性	回転子の初期位置に関係なく逆回転なし始動	任意の回転子位置でも一定方向に位相が増加		
・センサレス制御インバータの波形制御特性	正弦波PWM制御から方形波まで連続制御	低速で正弦波PWM制御、高速で方形波駆動動作		
・誘導同期リラクタンス電動機の低速トルク	毎分250回転で200%以上のトルク発生	毎分100回転で300%以上のトルクを発生		
・誘導同期リラクタンス電動機の高速回転	毎分1.5万回転以上の高速回転駆動	毎分1.5万回転以上の高速回転駆動		
・誘導同期リラクタンス電動機の出力密度	電動機出力密度 0.5kW/kg	電動機出力密度0.58kW/kg以上		

#### <成果1> 誘導同期リラクタンス電動機の開発

（内容）：レアアースレス電動機として、誘導電動機と同期リラクタンス電動機を組み合わせた誘導同期リラクタンス電動機を3タイプ試作し、センサレス制御インバータで駆動した結果、研究目標を達成できることを実験で実証した。

（達成度）○

（成果の意義）：定常運転時の高い運転効率と、始動時、過大負荷時の安定性に優れた特性が実験により確認できた。EVの主電動機として実用化できるめどがたった。

（課題と取り組み）：誘導電動機と同期リラクタンス電動機のトルク特性割合をどのように設計するかなど電動機の回転子構造の設計手法が今後の課題である。

#### <成果2> 新しいセンサレス制御法の開発

（内容）：新しいセンサレス制御手法により誘導同期リラクタンス電動機が、正弦波PWM制御による始動回転からワンパルス方形波による高速回転まで連続的に制御でき、駆動制御特性が研究目標を達成できることを実験で実証した。

（達成度）◎

（成果の意義）：新しいセンサレス制御は電動機モデルを必要としないため、新しい誘導同期リラクタンス電動機に対しても適用することができ、センサレス制御システムの有効性が確認できた。

（課題と取り組み）：誘導同期リラクタンス電動機としての運転効率を高くするためには、d軸成分電流とq軸成分電流が等しくする必要があるが、インバータの出力電圧軸 軸で制御しているため、正確には適正な補正が必要である。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクト期間中の知的財産権等の件数を表 .2.3.2-3 に示す。

表 .2.3.2-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願						(1) *
うち、外国出願						(1)
国内登録						(1)
海外登録						(1)
論文			1			1
うち、査読付き			1			1
研究発表・講演		2	5	4	9	20
受賞実績						0
新聞・雑誌等への掲載			1		1	2
展示会への出展				1	1	2
合計						25 + (1)

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

本研究では、誘導同期電動機として、全く磁石を使わない構造の同期リラクタンス電動機の提案と有効性の実証試験を行ってきた。

<課題1> 誘導電動機構造は、新しいセンサレス制御で対応できない始動トルクの問題解決と、同期はずれ時の制動効果が期待できるが、同期リラクタンス電動機と誘導電動機とのトルク特性割合をどのように設計するかなど誘導機としての導体の配置法や材質など電動機の回転子構造の設計手法が今後の課題である。

<課題2> 極数に関しては、低速での高トルクを得るために試作機を当初8極機で設定していた。しかし、誘導同期リラクタンス電動機の試作過程で、多極機になると特に小容量機ではフラックスバリア構造の回転子の製作は鉄心の溝幅が狭くなり、高速回転による遠心力による強度低下が懸念され、4極機を製作し特性評価試験を行ったところ、低速で十分なトルクが得られたが、毎分1万回転を超える高速回転では遠心力のため回転子にワイヤで強度補強をすることにより毎分1.5万回転を達成した経緯もあり、遠心力に耐えられる回転子構造設計法が課題である。

<課題3> なお、誘導同期リラクタンス電動機は、低速で十分大きなトルクを発生させる必要のある用途には、大きな励磁電流が必要となるので、レアアースを使わないフェライト磁石を埋め込んだ誘導同期電動機についても検討の余地のある課題である。

<課題4> 本研究の電動機制御システムをEV用主電動機駆動に用いる場合、過渡的な過負荷耐量が求められるが、誘導電動機構造による制動効果により同期はずれを起こしかけても誘導電動機としてのトルクが発生のため過負荷範囲が広くできた。また、すべり補償制御ループを付加することにより、インパルス付加に対してI成分が自動的に大きくレベル補正できるので、過負荷耐量を上げることができた。しかしながら、さらにより大きな負荷に対してはセン

サレス制御システムでは同期はずれを起こし脱調してしまう。この課題に対しては、ホール素子などによる簡単な位置センサと組み合わせることによる位相補正や過負荷による速度偏差をもとに位相補正制御をかけるなど、十分な過負荷耐量を持たせるための位相補正制御法を負荷することが制御システムの実用化に向けての適用範囲を広げる上で大変重要な課題であり、これら、過負荷時の位相補正制御法については今後更に検討する必要がある。

<課題5> さらに、同期リラクタンス電動機を少ない電流で大きなトルクを発生させるには、 $d$  軸成分電流と  $q$  軸成分電流が等しくする必要があり、飽和の影響も含め、より正確な  $d$  軸電流基準の与え方についても更に検証をする必要がある。

<課題6> また、リラクタンスモータのうち、スイッチトリラクタンス電動機はレアアース磁石を用いず、単純な構造で製造費用が安行こともあって EV の主電動機に用いる生産計画も出されている。しかし、振動、騒音が大きいなどの課題もある。これは構造によるものに加えて駆動方法にもよるものと思われるので、新しいセンサレス制御手法でこのモータを駆動することにより、システム構成が簡単で転流エネルギーの処理が容易で効率の改善や低振動、低騒音化が期待できると想われるので今後の発展課題としたい。

### (9) 成果の実用化／活用

本研究で実施した誘導同期リラクタンス電動機のセンサレス制御システムは、実用化上で必要と思われる事項に対する設定目標を達成することができたので、実用化に供することができるものと思われる。

<実用化1> 特に、自動車分野の適用において、課題となっているネオジウム等のレアアース磁石を使った電動機は、資源の枯渇化や供給不安の問題と価格上昇等の抱えている中、レアアース磁石を全く用いないで、熱的に安定性が高く、運転効率も低くないことから実用化が期待できる。現在、研究室では今回の実用化の可能性を実験で検証するため、15 kW の誘導同期リラクタンス電動機のセンサレス制御システムとセンサ付き制御システムで駆動できる EV を製作し、走行実験を始めた段階である。今後、駆動試験により改善を行いながら、EV の主電動機駆動システムとして実用化を目指した研究を進めることにしている。

<実用化2> なお、電気鉄道分野への適用に関しては、滑り損失を伴う誘導電動機駆動に比べて高い運転効率が期待できる。永久磁石同期電動機では、同期速度でしか運転できないので電動機単位でインバータが必要となるが、誘導同期リラクタンス電動機では誘導電動機作用によりシステムの単純化が期待できるものと思われる。

<実用化3> また、本研究の誘導同期リラクタンス電動機のセンサレス制御システムは、一般産業で用いられている誘導電動機の  $V/f$  制御システムに比べて、誘導電動機のすべり損失が低減できるだけでなく、二軸成分電流が独立に制御できるので、軽負荷時には励磁電流を小さくすることによって鉄損を低減することもできるなど産業分野でも省エネ効果が期待できる。

<実用化4> 一方で、風力発電分野においても一般に多く用いられている誘導発電に比較して、インバータを用いた可変速運転システムにおいては、本研究の電動機駆動システムを発電機動作として適用することで、発電効率の高い可変速風力発電システムとしても期待することができる。

<実用化6> 本研究では、誘導同期リラクタンス電動機のセンサレス制御システムについて主に検討を加えてきたが、当面は実用化の実績の高いスイッチリラクタンス電動機のセンサレス制御システムに関心が高く、<課題6>についての検討をはじめている段階にある。

この研究課題については、要素技術開発、及び次世代技術開発（メーカー）と協議段階にある。

#### （10）その他

特になし。

## 2. 3. 2 次世代自動車用高性能モータ蓄電パワエレシステムの研究開発 (三菱電機)

### (1) 事業目的

レアアースを用いないで（開発開始時点での）PM モータ並みの性能が得られる HEV、PHEV や EV 等に使用するコイル界磁式同期モータの実現を旨とした研究開発を実施する。

### (2) 事業概要

コイル界磁型同期モータの研究開発、蓄電パワエレ部要素技術の研究開発、トータルシステムの研究開発 の3つの研究開発項目に取り組むと共に、国内外の技術動向調査を実施する。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.3.2-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
①コイル界磁型同期モータの研究開発						
-1 コイル界磁型同期モータ要素技術の研究開発		→				
-2 20kW 級コイル界磁型同期モータ要素試験機の研究開発				→		
②蓄電パワエレ部要素技術の研究開発		→				
③トータルシステムの研究開発		→			→	
④国内外の技術動向調査		→				
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
三菱電機	—	166.5	167.9	160.0	130.0	624.4

### (4) 研究開発の実施体制

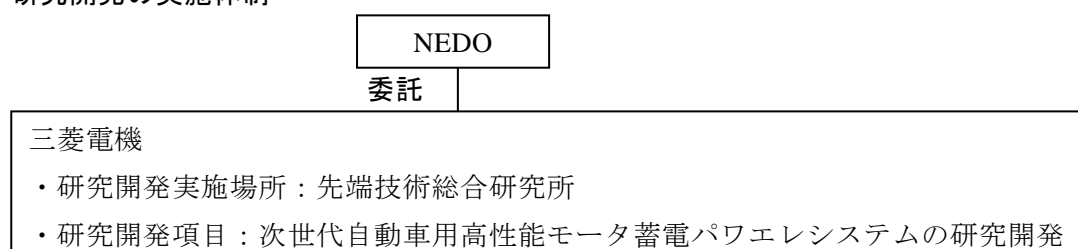


図 .2.3.2-1 研究開発の実施体制



## (5) 研究開発目標と根拠

レアアースを用いないコイル界磁型同期モータの試作機(中間目標 10kW 級、最終目標 20kW 級)を完成させ、HEV への搭載を想定し、レアアース使用量 ゼロで、開発開始時のレアアース利用 PM モータ相当の出力密度と総合効率を得ることを目標とした。ただし、モータ単体での総合効率でレアアース利用 PM モータ並みを達成することは困難であるため、リチウム電池では回生困難な瞬時のブレーキ回生を電気二重層キャパシタで余分の回生電力として界磁電力に活用するため、蓄電パワエレ部に対しても付加的に目標を設定した。

### (a) 中間目標 (平成 21 年度末)

(i)レアアースレス、非接触回転子給電を実現したコイル界磁型同期モータ基本構造確立と要素試験機の試作完了。

(ii)瞬時の最大トルク値において産業用 PM モータ相当の出力密度(トルク密度 3Nm/kg 以上、出力密度 0.6kW/kg 以上) が得られる見通しを得る。

3. コイル界磁型同期モータ要素試験機の要素試験結果とシミュレーション結果から、最終年度目標の達成見込みがあることを確認する。

### (b) 最終目標 (平成 23 年度末)

( )瞬時の最大トルク値において従来の自動車用レアアース利用 PM モータ相当の出力密度(トルク密度 5Nm/kg、出力密度 1kW/kg 以上) が得られる見通しを得る。

( )JC08 モード等を模擬した場合の総合効率が同等程度以上になる見通しを得る。

(以下、蓄電パワエレ部の付加的目標)

( )瞬発キャパシタを開発し、105℃、3000 時間の寿命性能の目処と 500 万回の急速充放電寿命の目処を得る。

( )20kW 級システムを構成するキャパシタ急速充放電用 DC/DC コンバータの電力変換効率 90%以上を達成する。

( )蓄電パワエレ部でバッテリーの寿命を長寿命化(目標 1.5 倍) できることを見通す。

## (6) 研究開発成果

表 .2.3.2-2 研究成果 (一覧)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
モータ出力密度	1kW/kg 以上	1kW/kg 以上		
モータトルク密度	5Nm/kg 以上	5Nm/kg 以上		
モータ総合効率 (JC08 モード)	PM モータ同程度 以上の見通し (消費電力) JC08	86% (PM モータ 91%) 90% (PM モータ 90%) PM モータと同程度		1000rpm65Nm 3000rpm25Nm キャパシタ使用
キャパシタ寿命	105 で 3000 時間	4000 時間目処		実測 2100 時間
サイクル寿命	500 万回目処	500 万回目処		実測 175 万回
DC/DC コンバータ 電力変換効率	90%以上	最大 93.5% 最大 92%		コンバータ 1 コンバータ 2
リチウム電池長寿 命化	サイクル寿命 1.5 倍目処	実測を基にシミュレーシ ョンで 1.5 倍目処		キャパシタ並列 時

<成果1>実施項目①-1 コイル界磁型同期モータ要素技術の研究開発

(内容) モータ構成材料(電磁鋼板)の引張応力による鉄損解析

(達成度) ◎ (世界初レベル)

(成果の意義) 電磁鋼板を加工してモータに組み上げた後の鉄損(ヒステリシス損と渦損)はモータ駆動時の引っ張り応力によって大きく変化する。これを把握した上で電磁鋼板の材料を選択し加工する必要がある。本成果はレアアースレスモータの鉄損を低減する上で役立った。

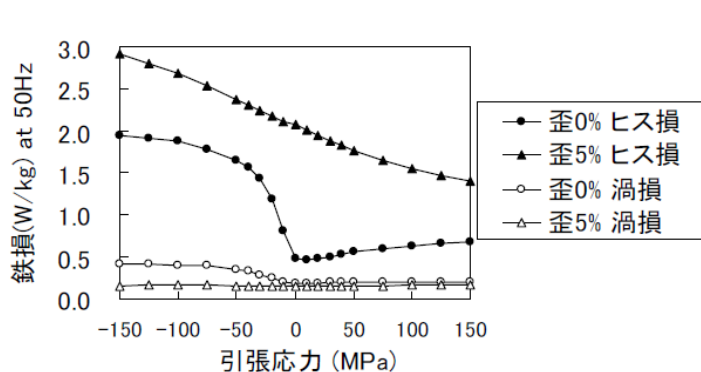


図 .2.3.2-2 引張応力による鉄損の変化

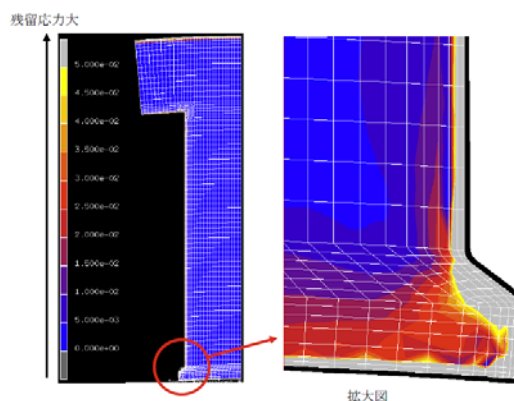


図 .2.3.2-3 応力解析結果

(課題と取り組み) 材料温度の影響を含めてコイル界磁型同期モータのキーパーツである回転子の積層鉄心と固定子の加工方法および鉄損低減の最適化検討に反映させる。

<成果2>実施項目①-2 20kW級コイル界磁型同期モータ要素試験機の研究開発

(内容) 20kW級コイル界磁型同期モータのレアアース利用PMモータ相当の出力密度目処

(達成度) 新聞、雑誌、展示会での反響大

(成果の意義) 開発当初、レアアース磁石を界磁コイル式で代替する回転子構造をオルタネータ(1kW級)と同じ塊状磁極で試作したが、鉄損が大きく出力密度を得ることができなかった。そこで積層磁極を用いフェライト磁石で磁気飽和を緩和した独自の回転子構造を考案して適用し鉄損を大きく低減することができた。当初の10kW級から20kW級に目標レベルを上げて開発を推進し、レアアース利用PMモータ相当の出力密度(1kW/kg以上、5Nm/kg以上)の目処を得ることができた。開発したコイル界磁型同期モータは新聞雑誌でも大きく報じられ、展示会で展示されてカーメーカー各社から問い合わせをいただいた。

表 .2.3.2-3 2次および3次試作機の諸元

	3次試作機	2次試作機
固定子外径 [mm]	φ 260	φ 260
固定子コア長 [mm]	45	45
スロット数	24	36
巻線方式	集中巻	集中巻
極数	32	24
回転子外径 [mm]	φ 190	φ 185
回転子コア長 [mm]	70	70
空隙長 [mm]	0.7	0.7



図 .2.3.2-4 3次試作機の回転子

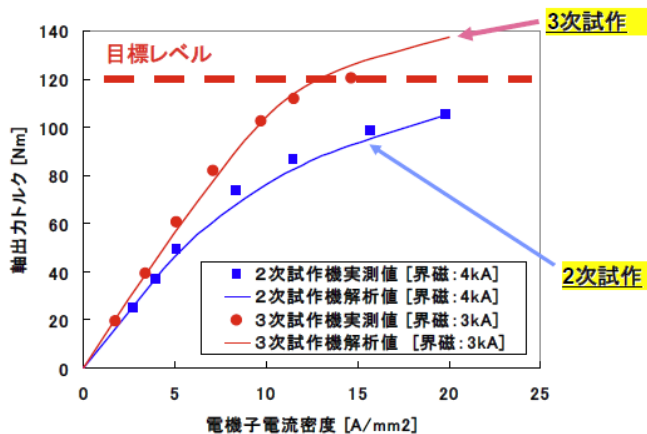


図 .2.3.2-5 2次及び3次試作機のトルク

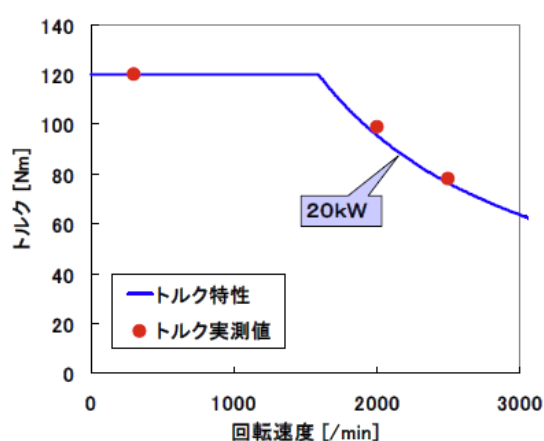


図 .2.3.2-6 3次試作機のトルク特性

(課題と取り組み) オルタネータと同じ塊状磁極であれば冷間鍛造で安価に製造できたが、積層磁極をいかに安価に製造するかは新たな課題であり、今後自主研究で取り組み早期の実用化を目指す。

<成果3>実施項目② 蓄電パワエレ部要素技術の研究開発 (瞬発キャパシタ開発)

(内容) キャパシタ寿命 (105 で 3000 時間) およびサイクル寿命 (500 万回)

(達成度)

(成果の意義) 扁平積層形の数百 F 級の瞬発キャパシタを開発し、エンジンルームに搭載可能な 105 での寿命性能 (1.8V/セル) を確認した。世界初のレベルである。なお、100F 級扁平積層形でのサイクル試験は期間の関係で 175 万回であったが、超瞬発の小形セルでは、3000 万回を達成して、世界最多記録 (これまでの報告は 30 万回程度) である。



図 .2.3.2-7 瞬発キャパシタ 10 セルモジュール

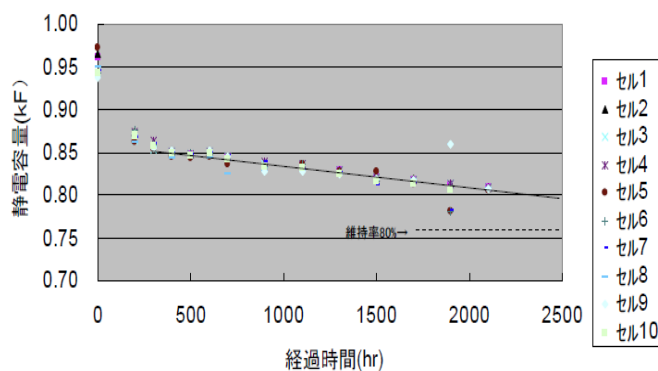


図 .2.3.2-8 105°Cでの試験結果

(課題と取り組み) 量産技術開発が必要であり、キャパシタメーカーへの技術供与を含めて今後検討する。

<成果4>実施項目② 蓄電パワエレ部要素技術の研究開発 (DC/DC コンバータ開発)

(内容) 電力変換効率 90%以上

(達成度) ○

(成果の意義) 瞬発キャパシタとバッテリー間の双方向 DC/DC コンバータ (コンバータ 1) として、「アクティブクランプ方式カップルドインダクタ型双方向 DC/DC コンバータ」を新たに設計・製作し、最大効率 93.5%を得た。また、瞬発キャパシタと回転子コイル間の降圧 DC/DC コンバータ (コンバータ 2) として、「並列接続・ZVS-PWM ハーフブリッジ方式 DC/DC コンバータ」を新たに設計・製作し、最大効率 92%を得た。

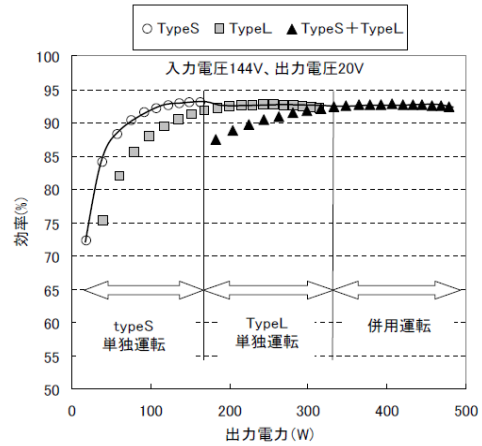
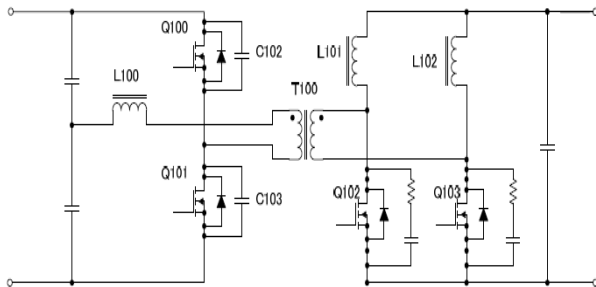


図 .2.3.2-9 DC/DC コンバータ 2 の回路構成 図 .2.3.2-10 コンバータ 2 の試験結果

(課題と取り組み) 今後、新たに開発した DC/DC コンバータの実用化について検討する。

<成果 5 >実施項目② 蓄電パワエレ部要素技術の研究開発

(内容) リチウム電池長寿命化 (キャパシタ並列化でサイクル寿命 1.5 倍目処)

(達成度) ○

(成果の意義)開発したキャパシタモジュールと EV 用のリチウム電池モジュールを用いて電流分配を調べ、これを基にマトラボシミュリンクでリチウム電池のダメージ数を試算し、広い温度範囲でサイクル寿命 1.5 倍以上に延命できる目処を得た。

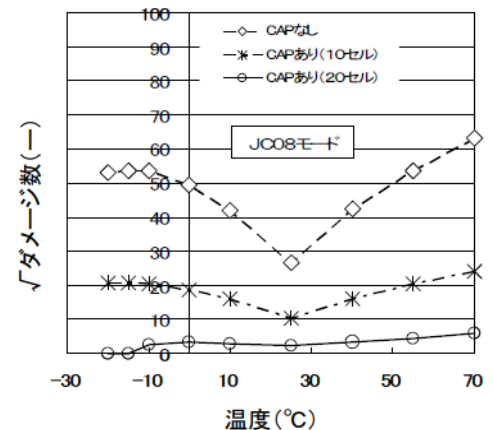
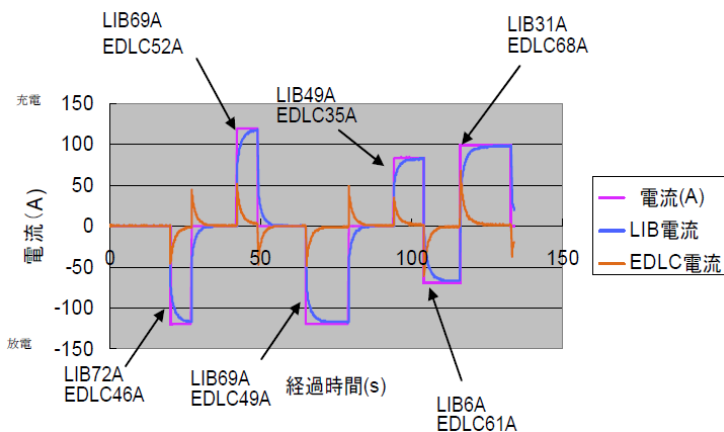


図 .2.3.2-11 キャパシタ並列時の電流分配 図 .2.3.2-12 リチウム電池のダメージ試算

(課題と取り組み) 今後、本方式の実用化について検討する。

<成果6>③トータルシステムの研究開発

(内容) モータ総合効率 (JC08 モード) PM モータ同程度以上の見通し

(達成度) ○

(成果の意義) 低速高トルクでは、回転子の界磁電力を消費する分、PM モータに劣る。そこで、開発した瞬発キャパシタモジュールを用いてブレーキ回生電力を瞬時回生により JC08 モードにおける消費電力が PM モータ並みになり、モータ総合効率 (JC08 モード) が PM モータ同程度以上の見通しを得た。

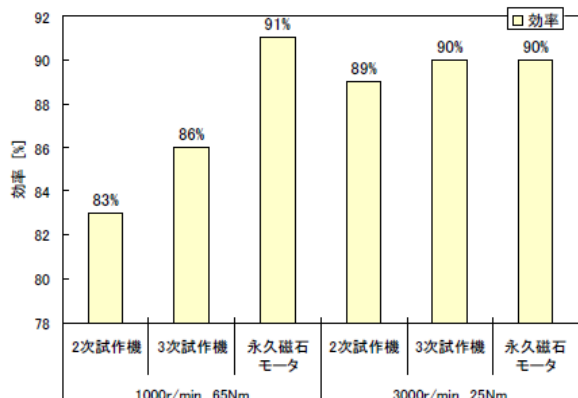


図 .2.3.2-13 モータ単体の効率

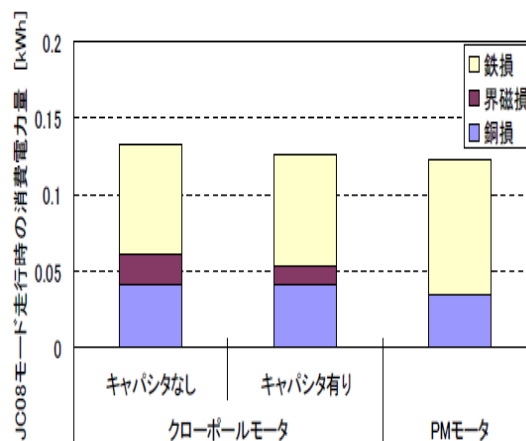


図 .2.3.2-14 モータの消費電力

(課題と取り組み) 今後、本方式の実用化について検討する。

(7) 知的財産権等

本プロジェクト期間中の知的財産権等の件数を表 .2.3.2-4 に示す。

表 .2.3.2-4 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度*	計
特許出願	—	1	10	8	4	23
うち、外国出願	—	0	1	2	1	4
国内登録	—	0	1	0	0	1
海外登録	—	0	0	0	0	0
論文	—	0	2	2	9	13
うち、査読付き	—	0	0	1	3	4
研究発表・講演	—	1	3	3	6	13
受賞実績	—	0	0	0	1	1
新聞・雑誌等への掲載	—	0	1	2	0	3
展示会への出展	—	0	0	0	2	2
合計	—	2	16	15	22	55

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

レアアースレスモータの今後の課題として、開発したコイル界磁型同期モータの爪状磁極部、特に積層鉄心部分の量産レベルでの安価な構成方法が挙げられる。当初開発したレアアースレスモータの回転子について、オルタネータと同じ塊状磁極の場合には、冷間鍛造で安価に製造できたが、積層鉄心で爪状磁極を構成する場合には、各磁極を個別に積層鉄心で構成し、これをさらに一体化して回転子を構成する必要がある。課題解決の見通しとして、原理的な成立性については本プロジェクトで確認済みである。すなわち、個別磁極の積層構造と、これを回転子ベース部に嵌め込む構造を採用することで磁気回路と耐遠心力性の両立を図ることができる。今後はこれを量産ベースで実現するため、積層鉄心の公差設計、すなわち各々の寸法ばらつきの許容度を決めると共に、実際に寸法がばらついた場合の位置決め方法、バランス取りの方法などを設計レベルで詰める必要がある。また、これらを踏まえた長期信頼性についても残された課題であり、これについては破壊試験などを行った後、得られたデータを元に設計にフィードバックしていく。

蓄電パワエレ部については、まず、DC/DC コンバータについて、昇降圧比が大きな場合でも効率よく変換できる DC/DC コンバータが開発できたので、変換効率の更なる高効率化を目指すとともに、蓄電デバイスに悪影響を及ぼす恐れのあるリップル電流の発生を防ぐなどの改良を行なっていく予定である。キャパシタについては、瞬発性に優れ、耐熱性に優れたものが開発できたので、キャパシタメーカーと協力しながら、コストを含めて、改良開発を進めていきたいと考える。

## (9) 成果の実用化／活用

HEV、EV 用レアアースレスモータとしては、上に述べたように積層磁極をいかに安価に量産化できるかの課題解決を図りながら、HEV や EV が今後爆発的に普及すると予想されている、数年後の実用化を目指して研究開発を継続していく。ただし実用化にあたっては、鉄心材料やフェライト磁石の性能向上とあわせて、モータ性能の更なる向上も図っていく必要がある。

経済産業省主導の基で、モータに関するレアアース対策として本年度から開始される『高効率モーター用磁性材料技術研究組合』にも参画し、本プロジェクトの開発成果を活用して更なる次世代モータの研究開発に邁進する所存である。

また、本プロジェクト開発したレアアースレスモータの技術は、平成 23 年度に実施された NEDO 補正事業（希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業／産業用レアアースモータの省・脱レアアース化技術実用化開発）に生かし、現在自主研究としてサーボモータへの適用を進めている。特に、本プロジェクトで開発した電磁鋼板についての損失の評価手法はすぐに実用化可能なレベルにあり、現状レアアースを用いているサーボモータ（三菱電機でのモータ用レアアース年間使用量の過半数を占める）の損失を削減し、使用するレアアース量を削減するための解析評価にも活用して早期の実用化を目指す。

蓄電パワエレ部については、回生エネルギーを最大限に活用し、リチウムイオン電池の延命を図ることができるという意味で、HEV、EV に限らず、モータを用いたさまざまな製品群への活用が考えられるので、ビジネスチャンスを生かして、早期の実用化を図っていく。また、開発したキャパシタの技術については、キャパシタメーカー各社への展開を図る。

(10) その他

2012年3月

山口信一、大穀晃裕、谷良浩、田中敏則、藤野千代

「鉄心打ち抜き時の磁気特性の変化を考慮したモータ磁気設計技術」

日本電気協会 従業員功績者表彰(考案表彰) 最優秀賞

## 2. 3. 3 等価狭ギャップ構造による脱レアアース高性能リラクタンストルク応用モータの研究開発（大阪府立大学、ダイキン工業）

### （1）事業目的

フェライト磁石を補助的に用いる同期リラクタンスモータの高トルク化および実ギャップ長を短縮することなく超狭ギャップモータと同等の性能となる立体ギャップ構造を組み合わせるにより、レアアース永久磁石の使用量がゼロで従来技術と同等の総合効率および出力密度となる、脱レアアース高性能リラクタンストルク応用モータおよびその実用化のための設計技術、および生産技術を開発する。

### （2）事業概要

「高トルク構造の開発」において同期リラクタンスモータ（以下、SynRM と略す）のロータ内に補助的にフェライト磁石を挿入することにより高トルク化を図るとともに、さらなるトルク向上のために極数の最適化を行い、最適なフラックスバリア構造や磁石埋込方法を有限要素法による磁界解析および試作機による試験により検討し、高トルク化に適した永久磁石補助型同期リラクタンスモータ（以下、PMASynRM と略す）の開発を行う。PMASynRM ではエアギャップ長を短縮することで出力特性・力率・効率の改善が期待できるが、本研究開発では立体ギャップ構造を用いることで等価的なギャップ長の短縮を図る。「等価狭ギャップ構造の性能把握と課題抽出」において有限要素法による磁界解析および試作機による試験により、ギャップを立体化することによる付加的な損失が小さく等価ギャップ短縮効果が大きい立体ギャップ構造（等価狭ギャップ構造）の開発を行う。これらの研究開発成果を組み合わせることにより「脱レアアース高性能リラクタンストルク応用モータの構築」において、レアアース永久磁石の使用量がゼロで従来技術と同等の総合効率および出力密度となる脱レアアース高性能リラクタンストルク応用モータ（以下、立体ギャップ PMASynRM と略す）を開発する。モータ駆動制御システムと試験ベンチシステムを組み合わせた特性評価システムを用いた試作機による試験および構造の改良により、希土類磁石を用いた従来の埋込磁石同期モータ（以下、IPMSM と略す）と同等性能の立体ギャップ PMASynRM を開発し、平成 21 年度末にモータコアの外形寸法である直径 145mm、積厚 30mm にて最大出力 5kW、最大トルク 20N・m、最高回転数 10,000min<sup>-1</sup>の実性能立体ギャップ PMASynRM 試作機でモータピーク効率 94%以上を達成する。このモータコア体積当りの出力密度とモータピーク効率はトヨタハイブリッド自動車である第 2 世代プリウスと同等の性能である。

また、IPMSM に比べ複雑な形状となる本研究のモータは、インバータの高調波以外にモータ構造に起因する磁束の高調波成分による鉄損増加が予測され、高効率化を実現する最適構造設計のために、高精度の鉄損測定とその要因となる磁束分析を同時に行えるシステムの構築を「試験評価装置の開発」において行う。「試作モータの試験評価」において平面ギャップおよび立体ギャップ PMASynRM 試作機について損失評価試験、トルク評価試験、振動評価試験を実施する。

平成 21 年度までの上記研究開発の成果をもとにして、磁界解析による最適設計、試作機による試験評価などを繰り返し、平成 23 年度の最終目標として車載仕様において課題となる大出力化を検証するために、モータ最大出力・トルクを平成 21 年度目標の 3~4 倍程度に設定し、



第2世代プリウス駆動用モータと同等の出力密度とモータ効率を目指す。

(3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.3.3-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
高トルク構造の開発				→		
等価狭ギャップ構造の性能把握と課題抽出		→		→		
脱レアアース高性能リラクタンストルク応用モータの構築					→	
試験評価装置の開発			→			
モータ生産方法の開発・研究					→	
試作モータの試験評価			→		→	
冷却構造・電磁加振 力成分可視化の開発				→		
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
大阪府立大学	0.0	27.9	22.3	15.9	12.0	78.0
ダイキン工業株式会社	0.0	32.2	19.4	26.0	17.0	94.6

(4) 研究開発の実施体制

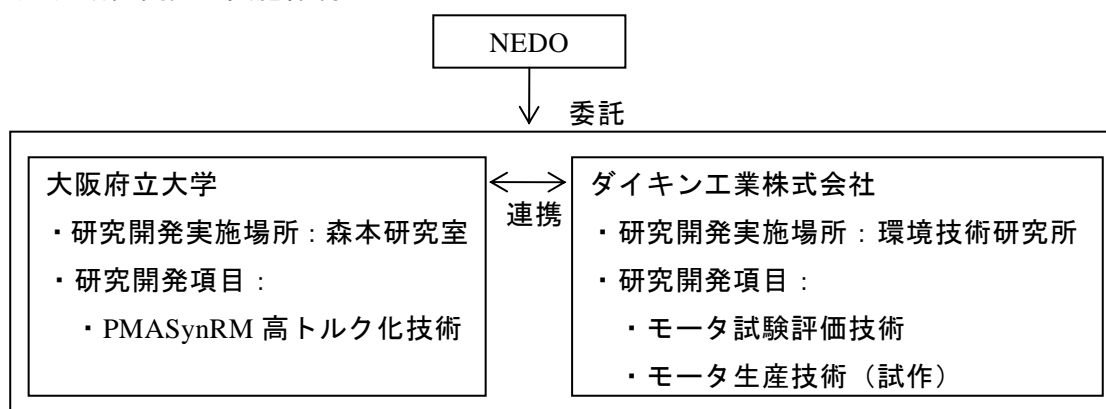


図 .2.3.3-1 研究開発の実施体制

## (5) 研究開発目標と根拠

### (a) 中間目標

本研究開発の平成 21 年度末の中間目標は次の通りである。

(i)レアアース (Nd, Dy, Tb) の使用量がゼロで、下記の性能を満たす脱レアアース高性能リラクタンストルク応用モータの設計・試作が完了していること

- ・定格出力 2.5 kW
- ・最大出力 5 kW
- ・定格回転数 2,400 min<sup>-1</sup>
- ・最大回転数 10,000 min<sup>-1</sup>
- ・出力密度 0.010 W/mm<sup>3</sup>
- ・モータピーク効率 94 %以上
- ・モータ直径 145mm、積厚 30mm

(ii)試作機の試験により、出力・速度・効率特性の評価、モータ損失の分析と振動評価が完了していること

目標値を定めた根拠は、現在、市販されている IPMSM 形式で、モータ最大出力が 50kW、最大回転数が 6,000~10,000min<sup>-1</sup> の第 2 世代プリウス駆動用モータを参考にして、最大出力 1/10 の実性能モデルを設定した。また、モータピーク効率も同様に第 2 世代プリウス駆動用モータのピーク効率と同等とした。従って、モータコア体積当りの出力密度とモータピーク効率はトヨタハイブリッド自動車である第 2 世代プリウスの駆動用モータと同等程度の性能である。さらに、フェライト磁石を補助として使用し、ネオジム磁石は一切使用しない構成とすることでレアアース (Nd, Dy, Tb) の使用量をゼロとしている。

### (b) 最終目標

本研究開発の平成 23 年度末の最終目標としては車載仕様において課題となる大出力化を検証するために、モータ最大出力・トルクを平成 21 年度末の目標の 4 倍程度に設定し、第 2 世代プリウス駆動用モータと同等の出力密度とモータ効率を目指す。

- ・定格出力 10 kW
- ・最大出力 20 kW
- ・定格回転数 2,400min<sup>-1</sup>
- ・最大回転数 10,000min<sup>-1</sup>
- ・出力密度 0.010W/mm<sup>3</sup> (平成 21 年度目標と同等)
- ・モータ高速運転損失 IPMSM 比 1/2 以下
- ・モータピーク効率 94%以上
- ・レアアース (Nd, Dy, Tb) の使用量 ゼロ

## (6) 研究開発成果

表Ⅲ.2.3.3-2 研究成果（一覧）

項目	目標値（最終）	達成値	達成度	備考
・定格出力	10 kW	10 kW		
・最大出力	20 kW	—		最大トルク目標値をクリアしており達成見込み
・定格回転数	2,400 min <sup>-1</sup>	2,400 min <sup>-1</sup>		
・最大回転数	10,000 min <sup>-1</sup>	6,000 min <sup>-1</sup>		達成見込み
・出力密度	0.010 W/mm <sup>3</sup>	—		最大トルク目標値をクリアしており達成見込み
・モータピーク効率	94 %以上	95.5 %		
・レアアース（Nd, Dy, Tb）の使用量	0	0		

試験ベンチ仕様による制限

<成果>

（内容）

レアアースの使用量がゼロで出力密度が 0.010 W/mm<sup>3</sup>、最高効率 95.5%となる最大出力 20kW のリラクタンストルク応用モータを開発した。

（達成度）100%

（成果の意義）

第2世代プリウス駆動用モータ（ネオジウム磁石を使用した IPMSM 形式）と同等の出力密度を、レアアース（Nd, Dy, Tb）を使用せずに実現できることは、高価なネオジウム磁石を使用しないため価格面で優位であり、持続的な安定供給の面においても優位である。また、EV/HEV 駆動用モータとして高頻度運転点となる高速軽負荷時において高い効率となっており、実使用時においても高い燃費性能となると考えられる。

（課題と取り組み）

さらなる燃費向上のためには、高効率で運転できる範囲の拡大が必要となり、そのためのモータ設計を検討する必要がある。

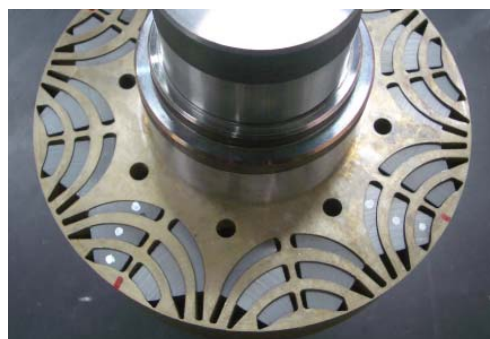


図 Ⅲ.2.3.3-2 20kW-PMASynRM 回転子

## (7) 知的財産権等

本プロジェクト期間中の知的財産権等の件数を表 Ⅲ.2.3.3-3 に示す。

表 .2.3.3-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	0	0	7	5	7	19
うち、外国出願	0	0	1	0	1	2
国内登録	0	0	0	0	0	0
海外登録	0	0	0	0	0	0
論文	0	0	1	0	2	3
うち、査読付き	0	0	1	0	2	3
研究発表・講演	0	1	9	9	7	26
受賞実績	0	0	0	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載	0	0	1	1	1	3
展示会への出展	0	0	0	0	1	1
合計	0	1	20	15	21	57

(8) 今後の課題と課題解決の見通し

実用化するために想定された課題とその対策、実現の見通しを下表に示す。

表 .2.3.3-4 課題と課題解決の見通し

実用化するための課題	解決の見通し	解決手段と見通し
量産設備・工法		本開発では立体ギャップ構造を採用せず、モータの磁気構造最適化を図ることにより通常のギャップ構造で目標値を達成しており、量産設備および工法ともに従来のモータコア製造、巻線と同じ方式を採用でき、実用化のための障壁は無いと考えられる。
振動・騒音		高トルク化により、エアギャップ部に発生する電磁加振力が増大し、振動・騒音が大きくなることが懸念されたが、エアギャップ中の磁束密度測定により顕著な高調波成分がないことを確認しており、大きな課題とはならないと考えられる。また、試験ベンチの回転数制限のため測定を行えなかった高速時の電磁加振力および振動についても、モータ構造・制御方式による低振動・低騒音化を行うとともに、剛性アップや遮音材・防振材による必要な防音・防振対策を行うことで対応可能と考えられる。
放熱・冷却		高出力化により、モータの放熱面積に対する発熱量が増加し温度上昇が大きくなるため、巻線の樹脂モールドおよびモータフレームの液冷によりモータ冷却を行い、定格運転時において連続運転可能であることを確認した。ただし、巻線の発熱が増大する最大トルク出力時については、さらに十分な冷却性能を確保するために巻線への直接液冷方式等を採用することにより対応可能と考えられる。

外気温度	<p>レアアースの代わりにフェライト磁石を用いた場合には、外気温が低い温度環境下での低温減磁が問題となる。そこで耐減磁の磁気回路設計を行い、磁石温度<math>-40^{\circ}\text{C}</math>、最大電流値の1.5倍通電時においても減磁率を十分小さくできることを解析により確認し、耐減磁設計技術を確立した。実用化のためには、これに加えて実機による低温環境下での減磁評価および耐減磁を考慮したモータ起動・運転制御の対策を検討することにより、低外気温下においても適用可能と考える。</p>
------	---

### (9) 成果の実用化／活用

#### (a) 建設機械用モータとして取り組み

乗用車と比較して、建設機械やトラック・バスにおいては、作業・操作系として大きな出力でエネルギー消費の大きいエンジン駆動の油圧ポンプが動力源として搭載されている。そのため、建設機械の分野でも自動車の様にハイブリッド化が始まっており、例えば、ショベルでは、エンジンとモータを併用するハイブリッド式駆動システムが採用されており、ダイキン工業株式会社は基幹部品の供給で貢献している。具体的には、旋回エネルギーをバッテリーに蓄える「旋回モータ」、発電し、かつエンジンをアシストする「発電モータ」、それらをコントロールする「コントローラ」を提供している。旋回用モータ、及び、発電モータはネオジウム磁石を用いた高効率・低発熱の埋込磁石同期モータ (IPMSM) を採用しており、大きな省エネ効果とCO<sub>2</sub> 排出削減効果が見込むことができる。さらに本研究開発の成果であるフェライト磁石補助形同期リラクタンスモータを用いることで、同等のパワー密度と効率を維持しながら、レアアース・レスで実現可能性が見えてきた。量産化への課題、詳細仕様への落とし込みなどの課題があるものの、今後、適用可能性については引き続き検討を行っていく。



図 .2.3.3-3 ハイブリッド建機の例

#### (b) 空調機用モータへの展開

空調機においても、省エネ規制のため、ネオジウム磁石を用いた高効率な埋込磁石同期モータ (IPMSM) が多く採用されている。特に日本国内においては、インバータエアコンが普及し、圧縮機用モータとしては IPMSM 形式がほぼ100%となってきた。

よって、本研究開発の成果であるフェライト磁石補助形同期リラクタンスモータの技術を展開することでフェライト磁石などの磁力の弱い磁石を採用しても従来の IPM モータ

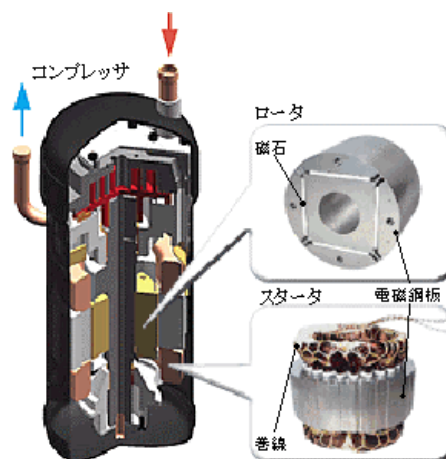


図 .2.3.3-4 空調機用コンプレッサの例

と置き換えできるモータを実用化できる目処がたってきた。

そのため、ダイキン工業株式会社としては、本研究開発の成果を含むレアアース・レス技術の実用化を加速するために、資源偏在性が高く、入手困難性の高いレアアース・レアメタルを主対象として削減・代替・リサイクルの技術開発・実証評価等を行うための補助事業として、経済産業省が実施する平成23年度「レアアース・レアメタル使用量削減・利用部品代替支援事業」に公募申請を行い、H24年2月に採択されるに到った。具体的には「省・脱ジスプロシウム磁石モータ搭載空調機用コンプレッサの実用化開発」、「空調機用コンプレッサ用ジスプロシウム・フリー磁石補助型モータの実用化開発（ダイキン工業株式会社と大阪府立大学との共同研究）」の2テーマにおいて実用化に取り組んでいく。

#### (10) その他

なし。

## 2. 3. 4 脱レアアースを目指す次世代モータの研究開発 (名古屋工業大学、東海大学)

### (1) 事業目的

本事業開発では、希土類系磁石使用量を従来比 50%以下に抑えた省レアアースタイプのハイブリッド界磁モータ、希土類系磁石を一切使用しない脱レアアースタイプの誘導モータ、計 2 種類のモータを対象に、HEV/EV 等の次世代自動車の早期実用化に資するため、高密度かつ高効率なモータの実現を目的とする。

### (2) 事業概要

#### (a) 「SMCコアを利用したハイブリッド界磁モータの研究開発」 (名古屋工業大学)

名古屋工業大学が有する希土類系磁石使用量の大幅削減可能な省レアアースタイプのハイブリッド界磁モータを技術シーズに、HEV/EVの駆動用実スケールモータとしての開発性能目標を達成する最適電磁構造設計指針を明らかにし、実スケールとの互換性を維持したダウンスケール機の試作試験評価を通じて、開発性能目標の実現性を明示する。

#### (b) 「SMCコアを利用した誘導モータの研究開発」 (東海大学)

レアアースが原理的に不要な誘導モータをSMC (圧粉磁心) により構成することにより、自動車用モータの生産性を向上させ、さらに銅資源のリサイクルが簡単に行えることを可能にする。誘導モータはレアアースを使ったモータを大きくしのぐ効率は期待できないが、リサイクル性を鑑みれば、総合的な環境負荷という観点では現状と同等の総合性能が期待できる。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

#### (a) 「SMC コアを利用したハイブリッド界磁モータの研究開発」 (名古屋工業大学)

表 .2.3.4-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	20年度	21年度	22年度	23年度	
( )20,000r/min対応実スケールハイブリッド界磁モータの最適電磁構造設計	→				
( )モータ試験評価ベンチ製作	→				
( )スケールダウン機設計とその試作		→			
( )スケールダウン機試験評価		→			
( )実スケール実現性確認と課題整理		→			
( )30,000r/min 対応実スケールハイブリッド界磁モータの最適電磁構造設計			→		
( )平成 20-21 年度設計 20,000r/min 仕様実スケールモータ試作と試験評価			→		

( ) 30,000r/min 対応スケール ダウン機設計とその試作				→	
( ) 30,000r/min 対応スケール ダウン機試験評価				→	
( )実スケール実現性確認と課 題整理				→	
開発費用 (百万円)	20 年度	21 年度	22 年度	23 年度	総額
名古屋工業大学	11.9	7.0	10.9	7.1	36.9

(b) 「SMC コアを利用した誘導モータの研究開発」(東海大学)

表 .2.3.4-2 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	20 年度	21 年度	22 年度	23 年度	
( )自主研究製作機の評価	→				
( )最適設計のための解析評価	→				
( )圧粉磁心モータの基本設計	→				
( )圧粉磁心の実物性値の把握		→			
( )予備試作ー最適設計機試作			→		
( )予備試作ー高効率機試作			→		
( )制御システム構築				→	
( )最終試作				→	
( )弱め界磁制御				→	
開発費用 (百万円)	20 年度	21 年度	22 年度	23 年度	総額
東海大学	20.7	5.5	10.5	5.2	41.9

(4) 研究開発の実施体制

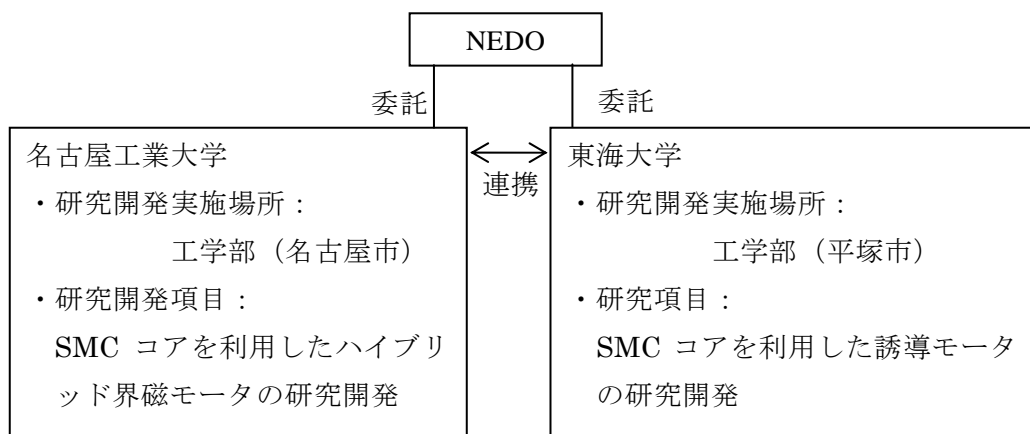


図 .2.3.4-1 研究開発の実施体制



## (5) 研究開発目標と根拠

(a) 「SMC コアを利用したハイブリッド界磁モータの研究開発」(名古屋工業大学)

### (i) 中間目標

実スケール水準ハイブリッド界磁モータの最適電磁構造設計を実施し、その準相似形ダウンスケール試作機による実運転評価を行い、ハイブリッド界磁モータによるトルク重量密度  $6 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{kg}$  以上、出力重量密度  $3.5 \text{ kW}/\text{kg}$  以上の実現可能性を検証する。

### (ii) 最終目標

水冷方式水準のトルク重量密度  $6 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{kg}$  以上、液冷(ATF)方式水準の出力重量密度  $5.3 \text{ kW}/\text{kg}$  以上を実現する最高回転数  $30,000 \text{ r}/\text{min}$  の実スケールハイブリッド界磁モータの最適電磁構造設計の実施とその準相似形スケールダウン試作機試験による目標値実現可能性の検証を行う。加えて、中間目標時の最高回転数  $20,000 \text{ r}/\text{min}$  の実スケール試作試験を実施し、 $6,600 \text{ r}/\text{min}$  以下での最大トルク、最大出力の実現性評価ならびに多用動作点におけるモータ効率の絶対値評価、弱め界磁制御による引きずり鉄損低減性能評価を実施する。

(b) 「SMC コアを利用した誘導モータの研究開発」(東海大学)

### (i) 中間目標

圧粉磁心を使った自動車用誘導モータにおいて、ロータにも圧粉磁心を使用すべきか判断し、さらに最適設計機の設計基本方針を決定する。その上で、圧粉磁心を使った誘導モータの設計式における係数を明確にし、最終目標の効率と出力密度を達成する設計の見通しを立てる。3次元形状コアを採用し、出力の増加を確認し、分割コアで試作した誘導モータの組み立て法を確立する。これにより最終目標の実現可能性を明らかにする。

### (ii) 最終目標

自動車用を想定して設計試作された誘導モータの出力密度が  $1 \text{ kW}/\text{kg}$  を上回り、定格点の効率が  $90\%$  を上回る。さらに弱め界磁制御を行っても効率の低下が  $2\%$  以下であること。

## (6) 研究開発成果

(a) 「SMC コアを利用したハイブリッド界磁モータの研究開発」(名古屋工業大学)

最終開発目標値(従来技術比でレアアース磁石使用量を半減、出力密度を  $150\%$  化= $5.3 \text{ kW}/\text{kg}$ )に対する研究成果を表 2.3.4-3 に纏める。

表 2.3.4-3 研究成果(一覧)

項目	目標値(最終)	達成値	達成度	備考
レアアース磁石使用量	550g 以下	517g		NEOMAX-38AH 使用
最大トルク	$140 \text{ N}\cdot\text{m}$ 以上	$122.6 \text{ N}\cdot\text{m}$	×	シミュレーション値
最大出力@9-10kr/min	$123 \text{ kW}$ 以上	$125 \text{ kW}@9.8 \text{ kr}/\text{min}$		シミュレーション値
トルク密度	$6 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{kg}$	$4.6 \text{ Nm}/\text{kg}$	×	シミュレーション値
出力密度	$5.3 \text{ kW}/\text{kg}$	$4.7 \text{ kW}/\text{kg}$		シミュレーション値

(b) 「SMC コアを利用した誘導モータの研究開発」(東海大学)

最終開発目標値(レアアースを一切使用せず、従来技術と同等相当(空冷)の出力密度=1kW/kg)に対する研究成果を表 2.3.4-4 に纏める。

表 2.3.4-4 研究成果(一覧)

項目	目標値(最終)	達成値	達成度	備考
出力密度	1kW/kg	0.33 kW/kg	×	目標値の設定ミス
定格点効率 弱め界磁制御	90%を上回ること 効率の低下が 2% 以下である	88.4% 効率低下は 1%	×	50kW 換算

(7) 知的財産権等

(a) 「SMC コアを利用したハイブリッド界磁モータの研究開発」(名古屋工業大学)

表 2.3.4-5 に纏める。

表 2.3.4-5 知的財産権等 件数

知的財産権	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	0	0	0	0	0
うち、外国出願	0	0	0	0	0
国内登録	0	0	0	0	0
海外登録	0	0	0	0	0
論文	0	0	0	0	0
うち、査読付き	0	0	0	0	0
研究発表・講演	1	2	7	2	12
受賞実績	0	0	1	0	1
新聞・雑誌等への掲載	1	1	4	0	6
展示会への出展	0	0	0	1	1
合計	2	3	12	3	20

(b) 「SMC コアを利用した誘導モータの研究開発」(東海大学)

表 2.3.4-6 に纏める。

表 2.3.4-6 知的財産権等 件数

知的財産権	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	0	1	0	0	1
うち、外国出願		0			
国内登録		0			
海外登録		0			
論文	0	0		0	
うち、査読付き					
研究発表・講演	0	3	8	7	18
受賞実績	0	0	0	0	
新聞・雑誌等への掲載	0	1	0	0	1
展示会への出展	0	0	0	0	
合計	0	5	8	7	20

(8) 今後の課題と課題解決の見通し

(a) 「SMC コアを利用したハイブリッド界磁モータの研究開発」(名古屋工業大学)

トルク密度が目標値の87%程度に留まるため、この点の改善が課題である。課題克服のための設計方策としては、ロータティースのクローポール形状化によるトルク発生面積の増大が挙げられる。この場合、高速回転に耐えうる機械強度対策に十分に留意して設計を実施することとなる。最大出力密度については、試験装置のインバータ容量の関係上、実験的に明らかになっていない。この点については、大容量インバータを導入した追試験を行い、目標達成の実現性の確認を進めていく予定である。モータ効率については、従来技術に比して、2~2.5%程度の低下がみられるが、巻線の高占積率化による銅損低減、0.3mmなど薄板低鉄損電磁鋼板を採用することで、これらの効率低下を回避できるものと考えている。

(b) 「SMC コアを利用した誘導モータの研究開発」(東海大学)

出力密度の目標値を達成するためにはつばの長さをさらに伸ばすことだけでは難しいと推定できる。さらにつばの形状の最適化、および巻線の占積率の向上は出力密度の増加および効率の向上に寄与できると考えられる。しかしこれらの定量的な予測は困難であるためどの程度寄与できるかは明らかにすることはできない。圧粉磁心の透磁率の向上画不可欠である。また、効率の目標を達成するためには圧粉磁心の成形による特性の劣化を防ぐ方法を開発するか、または鉄損そのものを低下させる必要がある。

本研究により圧粉磁心の実用的な性能が明らかになり、モータとして圧粉磁心を適用する際のさまざまな技術課題を明確にすることができた。また誘導モータに圧粉磁心は適用可能であるが、自動車用モータの性能を満たすためには圧粉磁心材そのものの一層の改良が必要である。

## (9) 成果の実用化／活用

### (a) 「SMC コアを利用したハイブリッド界磁モータの研究開発」(名古屋工業大学)

ハイブリッド界磁モータの特長は巻線界磁と永久磁石界磁の併用により、現行の固定永久磁石界磁の永久磁石形同期モータの二律背反を克服するものである。その原理をより有効に多岐渡る産業分野へ展開するために必要な1つの技術は、用途の要求特性に対する普遍的なハイブリッド界磁モータの設計法の確立である。また、それを実現するためのより低コストなモータ磁気回路と構造(製造容易性、材料歩留まりを含む)の開発が重要になる。省レアアースかつ用途指向形の高効率モータとして、他のモータに対して優位性を持つことは明らかであり、ハイブリッド界磁モータの研究開発は今後も継続的に行われるべきである。

### (b) 「SMC コアを利用した誘導モータの研究開発」(東海大学)

レアアース資源がモータ用途にはほとんど使えなくなった場合、レアアースレスモータとしては誘導モータが有望なチョイスとなる。しかし、レアアース資源を節約して使うという前提であれば、誘導モータはそれらより性能が低下する。産業界では資源問題というよりコストという捉え方をするため、レアアース磁石がコスト的に成立しなくなった場合、バックアップ的技術として今後も最新の技術を適用するための誘導モータの技術開発の継続が必要である。

本研究開発では SMC を実際に適用することにより適用上の問題も明らかにすることができた。SMC のメリット・デメリットを試作レベルで明確にすることができたので産業分野への波及効果は大きい。

## 2. 3. 5 脱レアアース次世代モータの研究開発 (東京理科大学、北海道大学)

### (1) 事業目的

脱レアアース次世代モータの開発を行う。主として2つの大学で異なったアプローチを取りながら研究開発を進める。いずれもレアアース使用量をゼロとする方式であり、目標としては研究開発当初にもっとも普及しているハイブリッド自動車 NHW20 型トヨタプリウス搭載の IPM モータと等しい大きさ、効率を実現するものである。すなわち、目標：直径 269 mm、軸長 156 mm (コイルエンドを含む) の寸法で軸出力 50 kW、運転効率同等(負荷点により 85-95%)を実現する。具体的には、次の三項目について、2つの大学で連携を取りながら研究を進める。

①「スイッチドリラクタンスモータ 研究開発」(東京理科大学)、②「3次元のフェライト磁石モータ 研究開発」(北海道大学)、③「負荷試験装置の開発」(北海道大学)。

### (2) 事業概要

各項目の技術課題は次の通りである。

「スイッチドリラクタンスモータ 研究開発」 (担当：東京理科大学)

- (①-1) 「制限されたサイズ内での高出力化設計」
- (①-2) 「効率向上」
- (①-3) 「ドライバ、振動、音などの問題点」

「3次元のフェライト磁石モータ 研究開発」(担当：北海道大学 システム変換学研究室)

- (②-1) 「巻線設計」
- (②-2) 「不可逆減磁の防止」
- (②-3) 「最適な3次元モータ形状の検討」
- (②-4) 「軸方向の不均衡吸引力の抑制」

「50 kW 負荷試験装置 開発」 (担当：北海道大学 システム変換学研究室)

- (③-1) 「負荷機の世界速度範囲拡大」
- (③-2) 「低速回転域での効率向上」
- (③-3) 「測定精度の向上」

(3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.3.5-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	20年度	21年度	22年度	23年度	
(①-1) 高出力モータ設計	→	→			
(①-2) 高効率の検討	→	→	→	→	
(①-3) ドライバ、振動、音		→	→	→	
(②-1) 短節集中巻の適用	→	→	→		
(②-2) フェライト磁石を磁気障壁として活用する回転子形状の検討	→				
(②-3) 最適な3次元モータ形状の検討		→	→	→	
(②-4) 不平衡吸引力の抑制に適した回転子形状の検討			→	→	
(③-1) 高速誘導機による回転速度範囲拡大	→	→			
(③-2) 降圧チョッパの製作			→		
(③-3) トルク検出と電力検出の同期が取れる測定システムの開発				→	
開発費用（百万円）	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
東京理科大学	11.4	18.2	18.0	13.0	60.6
北海道大学	25.3	25.8	25.9	17.9	94.9

#### (4) 研究開発の実施体制

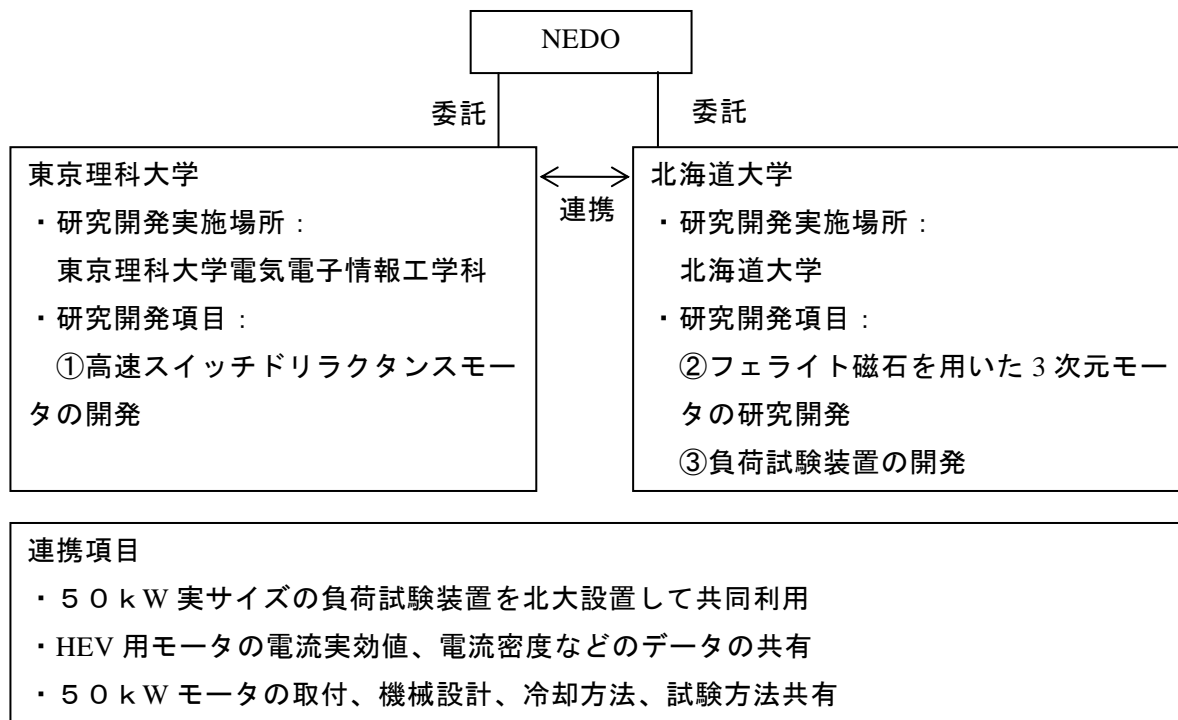


図 .2.3.5-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

##### (a) 中間目標

##### 項目① (東京理科大学)

- ・ 固定子直径 269mm、軸長 156mm (コイルエンドを含む) の寸法で軸出力 50kW、95%の設計効率のスイッチドリラクタンスモータ1台以上の設計。
- ・ スイッチドリラクタンスモータで、10kWの軽負荷試験の結果より、固定子直径 269mm、軸長 156mm (コイルエンドを含む) の寸法で軸出力 50kW、92%の外挿効率を達成。

##### 項目② (北海道大学)

- ・ フェライト磁石を用いた2次元モータについて、最適な回転子・固定子形状・巻線構成についての設計指針を明確化。解析上、規定速度において軸出力 50 kW、最高効率 92%以上を達成するフェライト磁石を用いた2次元モータを設計。
- ・ 試作1号機は、レアアースを使用せずに NHW20 型プリウスと等しい寸法のフェライト磁石モータでありながら、規定速度において軸出力 50 kW、最高効率 92%以上を達成。

##### 項目③ (北海道大学)

- ・ 「50 kW 負荷試験装置」とその計測装置システムの全体設計を完了。「50 kW 負荷試験装置」で用いるインバータドライブシステムなどの電気関係の実験装置 (電気関係装置) を製作。
- ・ 1万から1万2千 rpm まで試験可能であり、そして、50 kW での実負荷試験が行える負荷試験装置を開発。

(b) 最終目標 (想定根拠・条件)

項目① (東京理科大学)

- ・レアアースを使用せずに NHW20 型プリウス搭載のモータと等しい大きさの固定子直径 269mm、軸長 156mm (コイルエンドを含む) の寸法で、トルク 400Nm, 出力 50kW、効率 95% を実負荷試験にて確認。
- ・試作した EV の走行条件 (速度、加減速) を変化させ、振動、音を測定することで、どのような条件で、音や振動の問題が顕著となるのか明らかにする。

項目② (北海道大学)

- ・レアアースを使用せずに NHW20 型プリウス搭載のモータと等しい大きさの直径 269mm、軸長 156mm (コイルエンドを含む) の寸法のフェライト磁石モータを製作し、軸出力 50kW が出力可能であり、幅広い運転範囲において NHW20 型プリウスと同等の効率 (85-95%) で、最高効率 95% を実負荷試験装置により確認する。

項目③ (北海道大学)

- ・プリウスクラスの 50kW モータの軸出力、トルクを 1% 程度の誤差範囲で計測し、1 万から 1 万 2 千 rpm まで試験可能な負荷試験装置、受電システム、電力巡回方式を構築し、実証する。

(6) 研究開発成果

表 2.3.5-2 研究成果 (一覧)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
項目① 最大トルク 最高効率 最大出力	400Nm 95% 50kW	400.4Nm 95.2% 70kW 以上		試験装置の関係から 70kW まで測定した
項目② モータ体積 最高効率 最大出力	直径 269mm、 軸長 156mm 95% 50kW	直径 269mm、 軸長 155mm 96.1% 51.5kW	○ ○ ○	
項目③ 試験容量 試験速度	50kW 1 万~1 万 2 千 rpm	70kW 1 万 rpm	○ ○	



### <成果 1 >

(内容)「スイッチドリラクタンスモータ 研究開発」

(達成度) ○

(成果の意義)

スイッチドリラクタンスモータでは、永久磁石同期電動機と同等の寸法で、同等のトルクを出力することが困難であると言われていた。しかし、固定子 18 極、回転子 12 極の試作機により、最大トルク 400.4Nm、最大効率 95.2%を達成することができた。スイッチドリラクタンスモータは、ケイ素鋼板と巻線のみで製作されているためリサイクルが容易であり、減磁の影響もないことから永久磁石同期電動機と比較し熱にも強い。その意味で、永久磁石同期電動機と同等の性能が実測により得られた意義は大きいと考える。

(課題と取り組み)

試作機を搭載した EV での騒音、振動の実験結果では、従来のガソリンエンジン車に比べて格段に音が小さくなっていることが確認はされた。しかし、永久磁石同期電動機を搭載した HEV の EV 走行モードと比べると音がやや気になるため、音の更なる低減と、回生も含めた制御法の検討、駆動回路の検討が引き続き必要である。

### <成果 2 >

(内容)「3次元のフェライト磁石モータ 研究開発」

(達成度) ○

(成果の意義)

3次元のフェライト磁石モータでは、フェライト磁石を用いたロータセグメント形アキシヤルギャップモータを新たに提案した。提案モータの回転子は、非磁性の回転子支持部材に、フェライト磁石と圧粉鉄心が交互に組み込まれており、磁石と鉄心がそれぞれセグメントを形成する構造となっている。提案モータの試作機による実負荷試験の結果、最大トルクは 301.1 Nm であった。最大エネルギー積が希土類磁石の約 1/10 のフェライト磁石を用いた脱レアアースモータにもかかわらず、希土類磁石を使用した市販 HEV 駆動用 PMSM と同等の体積で 75.3%のトルクを達成した良好な結果となった。そして、基底速度 1700 rpm において、目標出力 50 kW を上回る 51.5 kW を達成し、目標とする同等の体積で同等の出力を実現することができた。最大効率も 96.1%を達成し、最終開発目標をフェライト磁石を用いたモータで実現できた意義は大きいと考える。

(課題と取り組み)

提案モータの基本的な有効性は試作機により確認することができた。今後は、量産化に向けた安定性・信頼性・製造のしやすさなどを確立することが重要であり、使用する材料などを含めて、検討を引き続き行う必要がある。

### <成果 3 >

(内容)「50 kW 負荷試験装置 開発」

(達成度) ○

(成果の意義)

軸出力 70kW、1 万 rpm まで試験可能な負荷試験装置、受電システム、電力巡回方式を構築

した。海外の大学では実施されていた 50kW の実車サイズのモータの実負荷試験を国内の大学においても実施できるようになり、同じレベルで研究開発の競争ができるようになった意義は非常に大きいと考える。

(課題と取り組み)

測定スピードの効率化を図るために、測定データの収集システムの自動化などの実験装置の改良を引き続き行う必要がある。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクト期間中の知的財産権等の件数を表 2.3.5-3 に示す。

表 2.3.5-3 知的財産権等 件数 (成果 1 と 2 の合計)

知的財産権	20 年度	21 年度	22 年度	23 年度	計
特許出願	0	0	9	0	9
うち、外国出願	0	0	7	0	7
国内登録	0	0	0	0	0
海外登録	0	0	0	0	0
論文	0	0	3	9	12
うち、査読付き論文	0	0	3	9	12
研究発表・講演	0	9	13	17	39
受賞実績	0	2	3	2	7
新聞・雑誌等への掲載	0	0	7	0	7
展示会への出展	0	0	0	2	2
合計	0	11	35	30	76

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

スイッチドリラクタンスモータについては、前述の通り、騒音の更なる低減と、回生も含めた制御法の検討、駆動回路の検討が課題である。騒音、トルク脈動、振動の低減方法としては、モータの構造面からのアプローチのみならず、制御方法や利用する際の取り付け方法などにより、更なる低減が可能であると考えている。ただし、効率や出力の低下が伴う可能性もある。

本研究で提案した駆動回路では、小電力実験ではあるが、駆動範囲を拡大できるなどの効果が見られた。また、使用（制御）方法によっては、トルク脈動の低減をはかる用途に用いることが可能であることが確認できた。今後は、実車搭載可能な容量の変換器を製作し検討が望ましい。

本研究では、力行側に重点を置いて研究が行われたが、EV や HEV では、電力回生も重要であることから、回生における特性も検討する必要がある。スイッチドリラクタンスモータの制御には、励磁開始角、励磁終了角、電流制限値のパラメータが用いられるが、インバータの直流入力電圧も含めて検討することで、燃費が向上できるような適切な制御を行うことが可能になる。

3次元のフェライト磁石モータについては、前述のとおり、量産化に向けた安定性・信頼性・製造のしやすさなどを確立することが重要である。そのためには、試作および実験を繰り返す

と同時に、今回の研究プロジェクトでは実施しなかった耐久試験やコスト低減のための製造手法の確立などを行っていく必要がある。したがって、今後は、これらの観点から研究開発を推進するために、大学だけでなく企業などとの共同研究を積極的に推進することが重要である。そして、実際に、平成 23 年度より、今回の研究プロジェクトで得た知見を活かす形で複数の企業と共同研究を開始している。ただし、回転子の軸方向の挙動などといった基礎的な項目に関しては、大学として、これまでと同様に研究を行い知見を高めていくことが重要である。

#### (9) 成果の実用化／活用

開発成果の産業界における具体的利用の実用化イメージ／出口イメージとしては、EV、HEV、ハイブリッド建機その他、モータ応用製品全般が挙げられる。

スイッチドリラクタンスモータについては、構造が簡単であり、サイクルも容易であることから、量産により価格の低減が期待できる。2012年7月現在、材料コストは現状の永久磁石モータの1/3以下であり価格競争力がある。今後、トルク脈動や騒音、振動が許容される応用から適用が進む。既に、モータ量産の大手である日本電産がSRモータの量産を表明している。また、いくつかの自動車関連メーカー等からSRモータ開発の発表がある。また、問い合わせも多く、国内企業と共同研究などを開始して技術移転を行う。さらに、SR用のインバータ、コントローラ、試験装置などの開発を試験装置製作企業と行い、SRモータ開発企業のサポートを行う。自動車応用以外の分野でも関心が高く、原発事故以降に急速に工場の電力消費低減要求が高まり、効率が永久磁石なみであるSRモータの適用が進む。現在多くの機械メーカーはモータを内製化して競争力をつけつつあるため、機械メーカーへの技術移転プログラムを行い、技術の移転とさらに良い方式の研究開発を行う。なお、国外企業も発表論文を参考にしてコンプレッサなどの自動車以外の用途にSRモータの開発に成功した状況にある。また、今後、トルク脈動、騒音、振動を低減することで、さらなる応用分野の開拓が期待できる。

3次元のフェライト磁石モータについては、前述の課題の箇所で述べたよう、具体的な製品への応用を前提として、平成 23 年度より、今回の研究プロジェクトで得た知見を活かす形で複数の企業と小容量のモータについて共同研究を開始している。まずは、これらの共同研究を通じて、小容量のモータに関する安定性・信頼性・製造のしやすさなどの技術を確立し、実用化するといった実績を積むことが重要であると思われる。さらに、これらの共同研究を通じて、大容量のモータについても、上記課題の解決に取り組むと同時に、積極的に実用化を図っていきたい。

#### (10) その他

いずれのモータにおいても、引き続き研究を継続していくことで、性能改善が可能であると考えている。その際、モータ単体だけではなく、駆動回路、制御法を含め、総合的なシステムレベルの視野での研究が望ましい。

## 2. 4 次世代技術開発

### 2. 4. 1 リチウムイオン液体を用いた安全性と高性能を兼ね備える蓄電システム構築（横浜国立大学）

#### （1）事業目的

本質的に安全性の高い高効率リチウム系二次電池蓄電システムを構築するためには、電解質の不燃化、固体化、さらには電極－電解質界面構造の最適化が不可欠である。これまでにイオン液体、高分子固体電解質などを用いたリチウム系二次電池が提案され、その安全性は著しく向上することが示されてきた。しかしこれらのシステムでは安全性は向上するものの性能（特に低温特性や出力特性）は汎用の有機電解液を用いたシステムと比べて著しく劣るため、電解質の難燃化や固体化による安全性向上と高性能化は一般に二律背反と考えられてきた。

本事業では、これまでの電池系構築研究の典型的な方法論である、優れた電極活物質を探索し、これに適合する電解質を選択するという手法ではなく、リチウム系二次電池の安全性を材料側で本質的に確保できる新規リチウムイオン液体の開発を前面に据える。さらに、このリチウムイオン液体に適合する負極および正極開発を、特にそのナノ構造制御に力点を置いて進め、安全性と高性能を兼ね備える蓄電システムを構築することを目的とした。

#### （2）事業概要

安全性と高性能を兼ね備えたリチウム系二次電池蓄電システムを構築するために、非水系リチウムイオン伝導体としてのイオン液体およびこれを高分子を用いて薄膜化したイオンゲルに注目した。これまでにリチウムイオン液体の新規概念を提案するとともに、これが難揮発性、難燃性、高解離性、高リチウムイオン活量、高リチウムイオン輸率を示し、リチウム系二次電池の電解質へ適用可能であることを確認している。

本プロジェクトでは、①新規リチウムイオン液体のための分子設計を進め、広い温度範囲で優れた伝導特性を有するイオン液体を得る。さらにこれを高分子を用いて薄膜化したイオンゲルを創製する。②リチウムイオン液体をデザインすることで、従来の有機電解液では安定な電池作動が困難である高容量電極材料の適合を目指し、 $500 \text{ W h kg}^{-1}$  レベルの電池構築の見通しを得ることを目標とした。③電池の高エネルギー密度化と同時に、電極の多孔構造や電解質を最適化することで高出力化についても検討した。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.1-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
リチウムイオン液体 およびリチウムイオン ゲルの研究開発					→	
炭素系ナノ負極の研 究開発		→				
メソ構造テンプレ ート法によるナノ正極 開発		→				
イオン液体とナノ構 造電極を用いた蓄電 システム構築					→	
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
横浜国立大学	20.000	20.000	19.255	19.255	19.255	97.765

### (4) 研究開発の実施体制

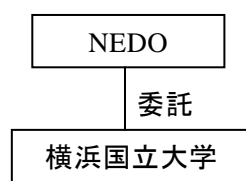


図 .2.4.1-1 研究開発の実施体制

### (5) 研究開発目標と根拠

中間目標

#### (a)-1 リチウムイオン液体の研究開発

開発目標：イオン伝導率： $10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ 、リチウムイオン濃度： $2 \text{ M}$ 以上、解離度： $0.5$ 以上、リチウムイオン輸率： $0.5$ 以上、電位窓： $0 \sim 4.5 \text{ V vs. Li/Li}^+$ 以上、耐熱性： $100 \text{ }^\circ\text{C}$ での重量減少  $1 \text{ wt\% h}^{-1}$ 以下、融点（ガラス転移点）： $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ などの特性を満足するリチウムイオン液体を開発する。

目標設定理由：安全性かつ高性能を兼ね備える電池系を構築するために、難燃性・難揮発性かつ広い温度範囲で優れたイオン伝導特性を兼ね備える電解質材料が必要であるため。

#### (a)-2 炭素系ナノ負極の研究開発

開発目標：細孔容量が  $1.8 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ 、比表面積が  $1800 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 以上、高速充放電が可能で、放電容量として  $800 \text{ mA h g}^{-1}$ 以上を有するナノ負極の開発。

目標設定理由：メソチャンネル中で、嵩高いイオン液体の物質移動を促進することにより、

リチウムイオンと電極内部への高速移動を可能とし、リチウム二次電池としての高性能化を図るため。さらに、メソチャンネルの内壁は大きな表面積をもつため、リチウムイオンの吸着容量が大きく、高容量が期待されるため。

(a)・3 メソ構造テンプレートによるナノ正極の研究開発

開発目標：メソ規則性細孔固体正極を作製し、放電容量 180 mA h g<sup>-1</sup> 以上。

目標設定理由：高い構造規則性を有する規則性メソポーラス遷移金属酸化物を正極物質として用いることは、表面積が大きいゆえに高出力に対応可能になるため。

最終目標

(b)・1 リチウムイオン液体のリチウムイオンゲル研究開発

開発目標：（リチウムイオン液体）イオン伝導率:  $3 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ 、電位窓: 5.0 V vs. Li/Li<sup>+</sup> 以上、耐熱性:100 °C での重量減少 1wt% h<sup>-1</sup> 以下などの特性を満足するリチウムイオン液体を開発する。

（リチウムイオンゲル）イオン伝導率:  $10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$  以上の特性を満足するリチウムイオンゲルを開発する。

目標設定理由：安全性かつ高性能を兼ね備える電池系を構築するために、難燃性・難揮発性かつ広い温度範囲で優れたイオン伝導特性を兼ね備える電解質材料が必要であるため。

(b)・2 イオン液体とナノ構造電極を用いた蓄電システム構築

開発目標：リチウムイオン液体を用いた電池で、高エネルギー密度電池構築 (500 W h kg<sup>-1</sup>) の見通しを得る。

目標設定理由：「リチウムイオン液体を用いた安全性と高性能を兼ね備える蓄電システム構築」を実現するため。

(6) 研究開発成果

表 .2.4.1-2 研究成果 (一覧)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
リチウムイオン液体	イオン伝導率: $3 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ 、電位窓: 5.0 V vs. Li/Li <sup>+</sup> 以上、耐熱性:100 °C での重量減少 1wt% h <sup>-1</sup> 以下	イオン伝導率: $6.2 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ 、電位窓: 4.8 V vs. Li/Li <sup>+</sup> 、耐熱性:100 °C での重量減少 1wt% h <sup>-1</sup> 以下	イオン伝導率: ○、電位窓: △、耐熱性:	不燃性溶媒添加
リチウムイオンゲル	イオン伝導率: $10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$	イオン伝導率: $1.3 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$		50 °C

炭素系ナノ負極	細孔容量：1.8 cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> 、比表面積：1800 m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> 、放電容量：800 mA h g <sup>-1</sup>	細孔容量：2.0 cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> 、比表面積：1760 m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> 、放電容量：1200 mA h g <sup>-1</sup>	細孔容量：○、比表面積：○、放電容量：	
ナノ正極	放電容量：180 mA h g <sup>-1</sup>	放電容量 330 mA h g <sup>-1</sup>		
イオン液体とナノ構造電極を用いた蓄電システム構築	エネルギー密度電池構築：500 W h kg <sup>-1</sup>	エネルギー密度電池構築：500 W h kg <sup>-1</sup> 以上		活物質（硫黄正極および金属リチウム負極）の重量あたりのエネルギー密度

### <成果1>

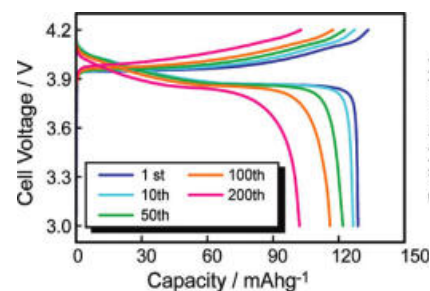
(内容) リチウムイオン液体の研究開発

(達成度)

(成果の意義) イオン液体をリチウム系二次電池の電解質に用いようとする研究は世界的に活発に行われており、電池の安全性は著しく向上することが示されてきた。しかし、イオン液体を溶媒として用いるリチウムイオン伝導体は、リチウムイオンの濃度（活量）が低い、リチウムイオン輸率が低い、濃度分極が起こるなどの課題が残る。本事業で着目したリチウムイオン

液体の特徴は、高いリチウムイオン濃度、高リチウムイオン輸率、広い電位窓を有する点である。さらに、リチウムイオン液体は、難燃性・難揮発性など良好な熱安定性を示すとともに、配位子とリチウム塩を混合するというシンプルなプロセスで得られるため、安価で汎用性のある電解質を提供し得る。本事業で開発したリチウムイオン液体は、リチウムイオン濃度が3 M程度と高く、その濃厚イオン媒体中でも解離度が0.4~0.7と大きな値を示した。通常の有機溶媒やイオン液体にリチウム塩を添加する電解液系では、リチウムイオン輸率が0.5を上回ることはないが、リチウムイオン液体のリチウムイオン輸率は0.5~0.6と大きいことがわかった。リチウムイオン液体の電位窓は0.0~4.8 Vと広く、リチウムイオン液体を電解液に用いLiCoO<sub>2</sub>の充放電を行ったところ、図III.2.4.1-2に示すように、200サイクル以上安定して充放電可能であった。これは、エーテル系電解質として4 V級リチウム二次電池の長期安定性を示した世界で初めての例である。

(課題と取り組み) 本事業では、新規リチウムイオン液体のための分子設計を進め、広い温度範囲で優れた伝導特性を有するリチウムイオン液体を得ることを目的とした。具体的には、ルイス塩基性が極めて低くかつ安定なアニオンのリチウム塩と、リチウムイオンに対してすべての極性基が相互作用した状態の配位子からなる錯体を合成し、その熱的性質を検討することにより、低融点（低ガラス転移温度）、難揮発性、難燃性を兼ね備える物質群を探索した。



図III.2.4.1-2 4 V級リチウム二次電池 Li | リチウムイオン液体 | LiCoO<sub>2</sub> の電池セルの充放電曲線。

## <成果 2 >

(内容) リチウムイオンゲルの研究開発

(達成度)

(成果の意義) リチウムイオン液体の特徴を保持したままゲル化できれば、電池系の安全性の向上やデバイスの軽量化が期待できる。本事業で作製したリチウムイオンゲルは  $1.3 \text{ mS cm}^{-1}$  ( $50^\circ\text{C}$ ) のイオン伝導率を有し、電解質に適用すると、リチウム金属の可逆な析出・溶解反応が可能であったことから、リチウムイオン伝導が可能であることがわかった。電位窓は  $0.0\sim 4.8 \text{ V}$  であり、リチウムイオン液体と同程度の耐酸化安定性を示した。

(課題と取り組み) リチウムイオン液体のゲル化手法に、ABA 型トリブロック共重合体の自己組織化を利用した。この手法は、シンプルなプロセスでリチウムイオン液体をゲル化することができる。

## <成果 3 >

(内容) 炭素系ナノ負極の研究開発

(達成度)

(成果の意義) メソチャンネルの内壁は非常に大きな表面積をもつため、リチウムイオンの吸着容量が大きい。また、メソチャンネル内のリチウムイオンの拡散性も優れていると考えられ、リチウム二次電池としての高出力化が期待できる。本事業で合成したメソポーラスカーボンを用い、充放電試験を行った結果、図 III 2.4.1-3 に示すように、グラファイトの理論容量である  $372 \text{ mA h g}^{-1}$  よりも高い放電容量を示した。カーボン源をスクロースにした場合は、初期の放電容量が  $1600 \text{ mA h g}^{-1}$  と高く、本事業で設定した目標値の  $800 \text{ mA h g}^{-1}$  を大きく上回った。

(課題と取り組み) 直径数ナノメートルの規則的な細孔をもつメソポーラスシリカを鋳型とし、細孔を炭素で埋めることにより、規則的なナノ構造炭素を合成し、シリカを溶解除去することによって規則性ナノ多孔体炭素材料を得た。このような手法でカーボンをメソチャンネル化して負極材料に用いた。

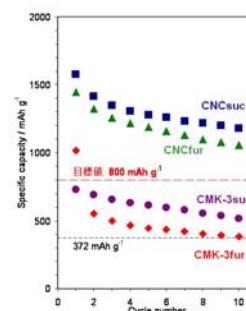


図 III 2.4.1-3 メソポーラスカーボンの定電流充放電サイクル試験の結果。電解液：  $1 \text{ mol kg}^{-1}$   $\text{LiPF}_6/\text{EC}+\text{DMC}$  (1:1 v/v) 溶液。

## <成果 4 >

(内容) メソ構造テンプレートによるナノ正極の研究開発

(達成度)

(成果の意義) 作製した複合電極は、透過電子顕微鏡の写真から、規則性メソポーラス炭素細孔中に粒系の揃った  $\text{Li}_2\text{MnSiO}_4$  が存在することがわかった。この複合電極の放電容量は  $330 \text{ mA h g}^{-1}$  となり、理論通りの容量が実現することが明らかとなった。

(課題と取り組み) 正極容量を向上させるためには組成式の中でリチウムの量論が大きいため、リチウムメタルシリケート ( $\text{Li}_2\text{MSiO}_4$ ,  $M=\text{Mn, Fe, Ni}$  など) は注目されているが、電子伝導性が低く、微粒子化や炭素との複合化がなされているが、構造の均一性は実現しにくい。この問題を解決するため、規則性メソポーラス炭素細孔中に  $\text{Li}_2\text{MSiO}_4$  を成長させ、複合電極とした。



## <成果5>

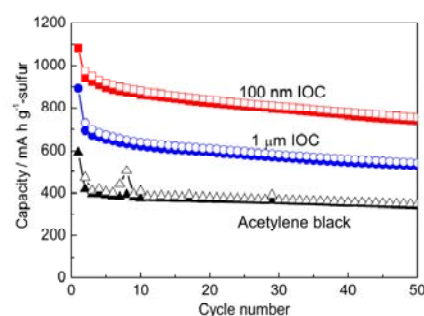
(内容) イオン液体とナノ構造電極を用いた蓄電システム構築

(達成度) ◎

(成果の意義) 硫黄正極およびリチウム金属負極は、理論容量が既存の挿入脱離型の電極活物質の10倍以上であるため、電池の高エネルギー密度化が期待できる電極活物質である。しかし、従来の電解液系では充放電クーロン効率が低いことが知られている。しかし、リチウムイオン液体を電解液に用いて充放電すると、100サイクル後も90%程度のクーロン効率を示した。リチウムイオン液体のような濃厚リチウムイオン溶液では、金属電解研磨と類似の現象がリチウムイオン液体/リチウム電極界面で生じ、リチウム金属が平滑に析出溶解を繰り返しているためであると考えている。

一方、硫黄正極は、従来の有機電解液系では、電池反応過程で生成するリチウムポリスルフィドの溶出のため、クーロン効率が低いことが問題となっている。リチウムイオン液体を電解液に用い、規則性多孔構造を有する逆オパール炭素(IOC)(図III 2.4.1-4)に硫黄を担持体を用いて正極を作製し、Li | リチウムイオン液体 | S 電池の特性を検討した。初期放電容量は  $1000 \text{ mA h g}^{-1}$  を超えた。この値は現行の正極材料である  $\text{LiCoO}_2$  の理論容量の7倍以上に相当する。クーロン効率が50サイクル後も97%以上と良好なサイクル特性を示したことから、リチウムイオン液体中ではこれまで問題となっていたリチウムポリスルフィドの溶出は抑制されていることがわかる。硫黄正極の高いクーロン効率は、固体電解質を用いた場合には報告があるが、液体電解質を用いた場合の前例はない。以上より、液体電解質にもかかわらず、リチウムイオン液体を用いると硫黄正極(理論容量  $1672 \text{ mA h g}^{-1}$ ) および金属リチウム負極 ( $3861 \text{ mA h g}^{-1}$ ) が高いクーロン効率で安定な充放電可能であることが見出され、高エネルギー密度 ( $500 \text{ W h kg}^{-1}$ ) 電池構築の見通しを得ることができた。

(課題と取り組み) 成果1~4で開発したリチウムイオン液体およびナノ構造電極の知見を総合し、高エネルギー密度電池構築の可能性を検討した。電池の高容量化に向けて、 $1672 \text{ mA h g}^{-1}$  と高い蓄電容量をもち、資源的制約のない硫黄正極の適用を検討した。もし、硫黄正極と金属リチウム負極(理論容量  $3861 \text{ mA h g}^{-1}$ ) とを組み合わせることができれば、電極活物質のみの重量あたりで  $2000 \text{ W h kg}^{-1}$  を超えるエネルギー密度を構築することができる。本事業で開発したリチウムイオン液体を電解液とし、硫黄正極と金属リチウム負極を組み合わせた電池系を構築し、充放電特性を検討した。



図III 2.4.1-4 Li 負極 | リチウムイオン液体 | 硫黄/炭素複合正極の充放電容量のサイクル数依存性。Open plot: 充電容量。Closed plot: 放電容量。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.1-3 に示す。

表 .2.4.1-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	0	0	1	1	0	2
うち、外国出願	0	0	0	0	0	0
国内登録	0	0	0	0	0	0
海外登録	0	0	0	0	0	0
論文	2	2	2	4	7	17
うち、査読付き論文	0	2	2	3	7	14
研究発表・講演	12	13	17	18	26	86
受賞実績	0	0	0	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0	0	0
合計	14	15	20	23	33	105

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

本事業では、新規リチウムイオン液体のための分子設計を進め、広い温度範囲で高いイオン伝導率を有するイオン液体を開発した。さらに、このリチウムイオン液体に適合する電極を設計することで、安全性と高性能を兼ね備える蓄電システム構築を目指した。その結果、本事業で開発したリチウムイオン液体を電解液に用いると、大容量電極材料である硫黄正極および金属リチウム負極が高いクーロン効率で充放電可能であることが見出され、安全性に優れ、高エネルギー密度 ( $500 \text{ W h kg}^{-1}$ ) 構築の見通しを得ることができた。

しかしながら、さらなる性能向上のために、①長期充放電サイクル試験などの基礎データの蓄積、②電極の多孔構造の最適化、③電池セル内での物質輸送抵抗の低減などが課題となる。①これまでの電池試験で、100 サイクルまで安定した充放電が可能であることを見出したが、実用化に向け、500 サイクル以上の充放電の実証実験が必要であると考えます。②硫黄正極の担持体として、様々な種類の規則構造炭素を検討してきた。これまでの検討した中では、炭素担持体に逆オパール炭素を用いた場合に、硫黄の放電容量が最も高いことが実験的にわかった。しかし、硫黄の充放電性能は、炭素の比表面積などのパラメータで単純に整理されるわけではことがわかり、性能向上には電極構造と性能の相関の理解、およびその硫黄正極に最適な炭素材料の探索が今後の課題である。③電池セル内での物質輸送のしやすさを評価する指標である限界電流密度が増大すれば、電池の出力特性は改善される。リチウムイオン液体中での限界電流値は、汎用イオン液体系より1桁ほど高いものの、有機溶媒系と比較すると1桁ほど小さい。限界電流密度の増大を目指す方法論として、分子性溶媒の添加が考えられる。実際、リチウムイオン液体に不燃性のヒドロフルオロエーテルを添加すると、グライム-リチウムイオンの錯体構造を維持したまま、媒体の粘性率が低下し、物質輸送特性が向上するため、限界電流密度も増大することがわかった。今後は、添加溶媒を最適化し、各種電極活物質との適合

を図り、出力特性も優れた電池系構築することが課題である。

#### (9) 成果の実用化／活用

本事業で開発したリチウムイオン液体は、難燃性・難揮発性の安全性に加え、配位子とリチウム塩を混合するというシンプルなプロセスで得られるため、安価で汎用性のある電解質を提供し得る。また、本研究で見出された基礎概念はすでに特許出願済みである。これらの知見に関して興味を示す企業は多い。企業も研究組織に加え、(8)で示した課題の解決を目指し、実用デバイスとして応用するため、研究を継続していきたい。

#### (10) その他

特になし。

## 2. 4. 2 全固体型リチウム電池における高容量負極の研究開発 (物質・材料研究機構)

### (1) 事業目的

電池のエネルギー密度を飛躍的に向上させるためには、高容量電極材料の使用が必須である。しかしながらインターカレーション材料を使用する限りにおいては、容量密度の限界がホスト骨格の重量や体積により決められてしまうため、革新的なエネルギー密度の向上は達成し得ない。この限界を打破するためには、インターカレーション材料に代えて、スクラップアンドビルド型の電極材料の使用が不可欠であるが、有機溶媒電解質中では安定に動作させることは困難であった。本研究開発は、電解質として固体電解質を用いることによりスクラップアンドビルド型の高容量電極材料の使用を可能とすることを目的とする。

### (2) 事業概要

スクラップアンドビルド型の高容量負極材料としては、金属微粒子やリチウム合金、金属リチウムなどがあげられるが、これらの材料を有機溶媒電解質中で繰り返し動作させると、凝集状態の変化や微粒子化が進行し、いずれも安定に動作させることは困難であった。本研究開発では、電解質として固体電解質を用いることで電解質中における物質移動とそれともなう電極構造の変化を抑制することで高容量負極の使用を可能とする。具体的には、これまで独立に研究されてきた(1) コンバージョン反応と呼ばれる化合物からの金属微粒子生成反応および(2) リチウムとの合金化反応を段階的に進行させることで負極の高容量化を達成するとともに、これらの反応により生成する高表面積の合金粒子上での(3) 金属リチウムの析出反応を調べることで、将来的な金属リチウム負極の可能性を探る。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.2-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
金属微粒子生成(コンバージョン)反応の研究					→	
金属微粒子における合金化反応の研究					→	
金属リチウム析出反応の研究					→	
全固体型リチウム電池に関する調査	→				→	
開発費用(百万円)	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
物質・材料研究機構	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	100.0

#### (4) 研究開発の実施体制

本プロジェクトの実施体制を図 .2.4.2-1 に示す。

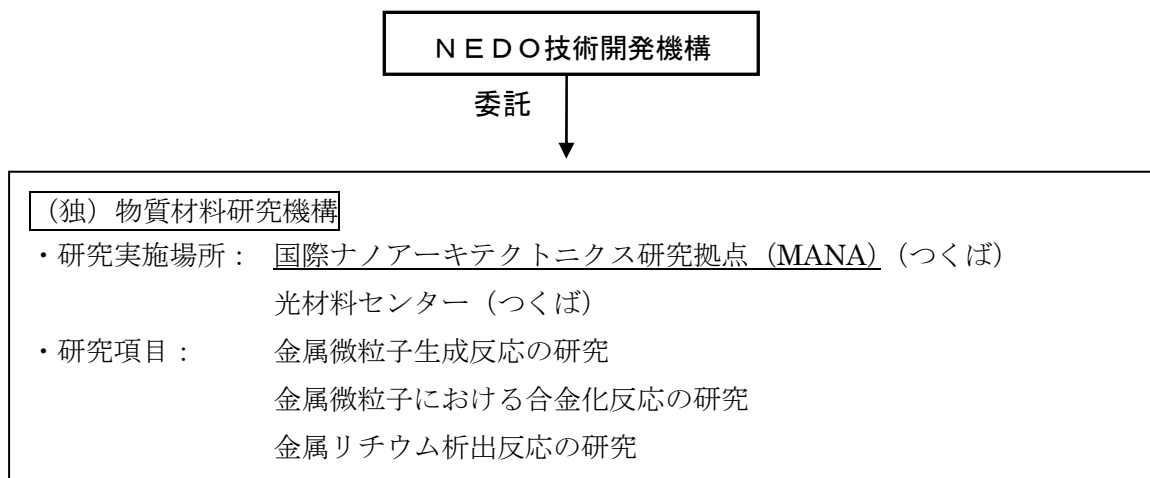


図 .2.4.2-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

##### 中間目標

(想定根拠・条件) 本研究開発の目標とする負極材料を硫黄正極と組み合わせ、 $500 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$  の重量エネルギー密度を達成しようとする負極材料に求められる容量密度は  $380 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  となる。現在の車載用 C/LiCoO<sub>2</sub> 系電池における理論エネルギー密度に対する実効エネルギー密度の比は約 20% であるようであり、この値を用いると負極材料の容量が  $1,800 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  であれば実電池で  $500 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$  を達成することができることになる。以上の根拠に基づき、本研究開発では金属原子あたり  $1800 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  の容量を発生する負極材料の開発を目標とした。中間目標としてはこの最終目標を実現可能な、(1)金属微粒子生成反応 (コンバージョン反応) において  $600 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  以上の容量、(2)金属原子あたり  $1200 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  の容量をとまない、硫化物から生成した金属微粒子がリチウムとの合金を形成することを確認することとした。また、出力性能、サイクル性能として、各々  $1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  以上と 20 サイクル経過後の容量維持率 70% 以上を中間目標とした。

##### 最終目標

(想定根拠・条件) 本研究開発の最終目標が金属重量あたり  $1800 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  の容量の達成であることはすでに述べたとおりであり、金属微粒子の生成反応 (コンバージョン反応) と金属微粒子における合金化反応を逐次的に進行させ、これら 2 つの反応における容量の合計としてこの容量を達成することを最終目標とした。さらに出力性能、充放電サイクル性能として、各々  $5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  以上の出力電流密度と 100 サイクル後の容量維持率が 80% 以上を目標とした。

(6) 研究開発成果

表 .2.4.2-2 研究成果 (一覽)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
容量密度	金属元素あたり 1800 mAh g <sup>-1</sup> 以上	硫化物系 : 5000 mAh g <sup>-1</sup> 窒化物系 : 2000 mAh g <sup>-1</sup> 合金系 : 3000 mAh g <sup>-1</sup>		
出力密度	5 mA cm <sup>-2</sup> 以上	合金系 : 9.7 mA cm <sup>-2</sup> (10C) で 2500 mAh g <sup>-1</sup> の放電容量		
寿命	100 サイクル経過後の容 量維持率が 80% 以上	窒化物系材料 : 79%~87% 合金系材料 : 84%~95%		

<成果 1 >

(内容) ケイ素硫化物においてコンバージョン反応と合金化反応が逐次的に進行することを確認した。また気相合成法により可逆性を高め、図 .2.4.2-2 に示したようにケイ素重量当たり 5000 mAh g<sup>-1</sup> 以上 (硫化物あたり 1000 mAh g<sup>-1</sup> 以上) の容量密度を達成した。

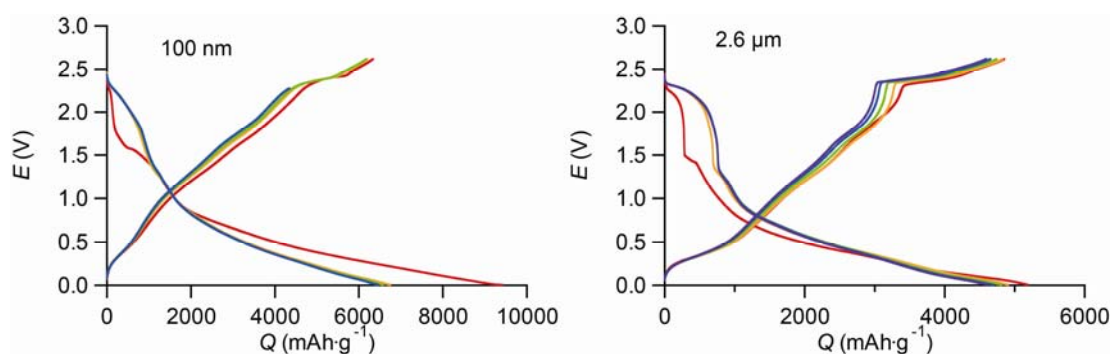


図 .2.4.2-2 FeS を添加した Li<sub>2</sub>SiS<sub>3</sub> 薄膜の充放電特性

(達成度) △ (容量、サイクル特性については○)

(成果の意義) 逐次反応を安定に進行させることで高い容量密度を達成するとともに、原子レベルで導電材を均一分散する効果を明らかにした。

(課題と取り組み) コンバージョン反応が貴な電位領域で進行するため、電池電圧が低下するという課題が残された。本研究開発では課題解決のため、以下に示す窒化物系材料と合金系材料の検討を行った。

<成果2>

(内容) 低電位化を目指した材料探索の結果、窒化物系材料の電極反応が 0.5 V 以下の電位領域において進行することを見出した (図 .2.4.2-3)。観測されたケイ素あたりの容量は 2000 mAh·g<sup>-1</sup>(窒化物あたり 1300 mAh·g<sup>-1</sup>) であり、100 サイクル後の容量維持率は 79~87% であった。

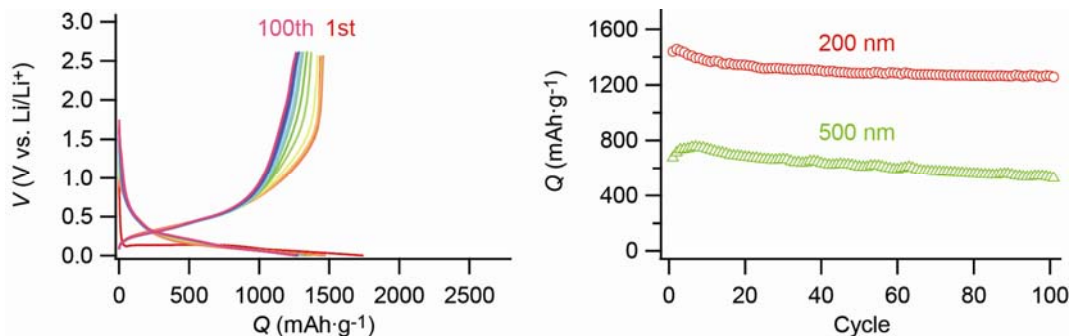


図 .2.4.2-3 窒化ケイ素系薄膜の充放電特性

(達成度) △ (容量、サイクル特性については○)

(成果の意義) 窒化物系材料の電極反応は卑な電位領域で進行することから、電池の高電圧化が可能となる。また、ケイ素重量当たりの容量は Li<sub>2</sub>SiS<sub>3</sub> に比べて低いものの、Si の含有率が高いものであるため、化合物あたりの容量としては遜色ないものであった。

(課題と取り組み) 今回作製した窒化物系電極は出力性能に乏しいものであったが、硫化物系において電極の高活性化に効果を示した電子導電材の付与などの検討を加えることで、出力性能についても一定の向上を得ることができると考えられる。

<成果3>

(内容) 逐次反応の一段階であるケイ素の合金化反応単独の特性についても検討を加え、図 .2.4.2-4 に示したように 3500 mAh·g<sup>-1</sup> の容量と高い出力性能を示すことを明らかにした。また、固体電解質を用いることで 100 サイクル経過後の容量維持率を 80% 以上にまで改善した。

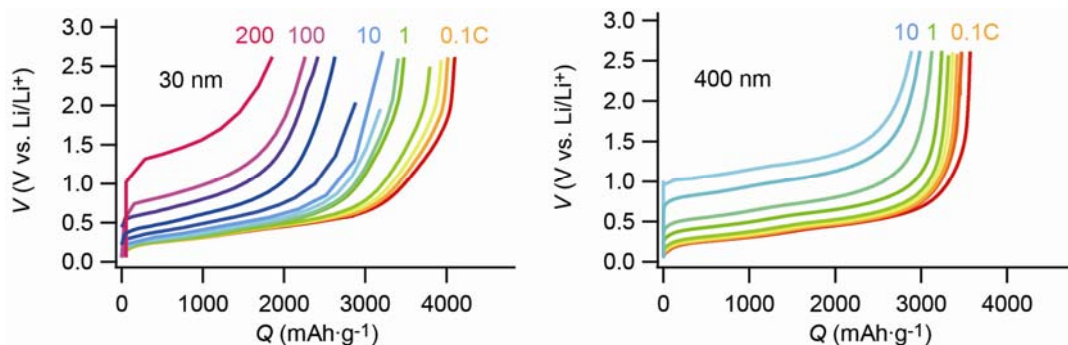


図 .2.4.2-4 薄膜化した合金系負極の出力性能

(達成度) ○

(成果の意義) 合金化反応はながらく研究されてきた系であるが、充放電の繰り返しによる容量低下の問題は解決には至っていない。本研究開発で得られた成果は、サイクル特性向上の方向性を示すもののみならず、高い出力性能を有する合金系負極開発につながる可能性をもつものである。

(課題と取り組み) 今回固体電解質を用いることで観測されたサイクル性能は、有機溶媒電解質中のものに比べてはるかに高い値であるとはいえ、改善の余地があるものと思われる。電気化学反応界面が固固界面となる固体電解質系では、活物質の体積変化による接合性の変化が電極性能の低下として現れやすく、この課題解決には材料の機械的特性に基づくアプローチも重要であると考えられる。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクトでの知的財産権等の件数を表 .2.4.2-3 に示す。

表 .2.4.2-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願		1				1
うち、外国出願		1				1
国内登録						
海外登録						
論文	3	1	2	5	7	18
うち、査読付き論文	2	1	0	3	3	9
研究発表・講演	10	8	19	25	23	85
受賞実績						
新聞・雑誌等への掲載						
展示会への出展				1		1
合計	15	12	21	34	33	115

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

本研究開発において、合金系材料では容量密度以外の総合性能についても目標値を達成したが、そのほかの材料系についてはすべての目標値を満たすまでの検討を加えることができなかった。硫化物系材料ではコンバージョン反応が貴な電位領域で進行するという根源的な課題が明らかとなったが、窒化物系材料は実用材料となりうる容量密度と作動電位を示しており、硫化物系材料に対して施した方策を適用すれば、初の逐次反応系実用材料となりうるものと期待される。



#### (9) 成果の実用化／活用

気相法を経由して薄膜化した材料はマイクロメートルオーダーの膜厚でも高い電極性能を発揮しており、このことから描くことのできる実用化イメージは、薄膜状に作製した電極をそのまま電池に組み込む方法である。一方、広く実用化の道を求めようとするならば本研究開発で得られた材料を固相反応などの大量生産に適した方法で合成する必要があり、そのためには新たな反応前駆体からの合成経路の開発が必要と考えられる。また、気相を経た合成法により電子導電材を均一分散する手法は、導電性に乏しい電極活物質の高活性化に有効であり、様々な電極材料への適用が可能であると考えられる。

## 2. 4. 3 リチウム空気二次電池用リチウム－固体電解質複合負極の研究開発 (三重大学)

### (1) 事業目的

現在の自動車用内燃機関と代替可能な高いエネルギー密度（700Wh/kg）を供しうる電池系であるリチウム空気二次電池を想定し、その実用化に向けた要素技術の研究を行う。特に長寿命を達成するための最大の課題である安定なリチウム負極の開発を目指す。

### (2) 事業概要

700Wh/kg のエネルギー密度を達成するには、金属リチウムもしくはそれに準ずる負極を開発することが必要である。リチウム空気電池の実現はリチウム金属負極の性能に大きく依存し、本研究は、空気極からの混入が避けられない空気中の水分および二酸化炭素の影響を受けることなく、かつ、充放電に伴うリチウムのデンドライト形成が抑制できるリチウム電極系を開発しようとするものである。具体的には、リチウム金属を水、二酸化炭素に安定なリチウムイオン導電性固体電解質で被覆した電極の開発である。この系の構成材料の検討を通じて、金属リチウムをリチウム空気電池の長期に安定な負極として作動させる。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.3-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
(a) リチウム複合負極の抵抗低減		→				
(b) リチウム溶解析出の高効率化					→	
(c) 固体電解質の開発		→				
(d) 液体電解質の開発		→				
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
三重大学	19.7	18.8	19.8	19.8	19.9	98.0

#### (4) 研究開発の実施体制

本事業の実施体制を図 .2.4.3-1 に示す。

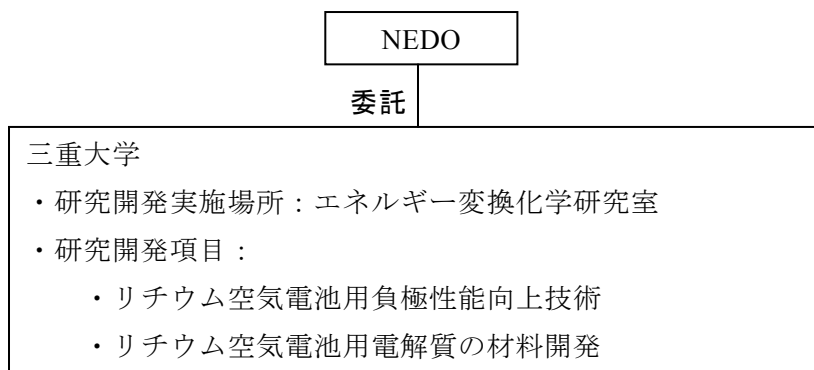


図 .2.4.3-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

中間目標

(a) Li/PEO/  $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$  (LATP)/1M LiCl のセル抵抗  $100\Omega\text{cm}^2$  を 80 以下で達成する。  
(想定条件・根拠)

本事業では  $1\text{mA}/\text{cm}^2$  で数 100mV 程度の分極に止めることを目標とする。予備的な実験において Li/Lipon/LATP 系で  $170\Omega\text{cm}^2$  のセル抵抗値を 80 で得ている。より高出力を目指し抵抗を  $100\Omega\text{cm}^2$  に設定する。

(b) 充放電電流密度とリチウム析出形態の関係を解明する。インピーダンス測定を併用して Li/PEO 界面の抵抗値の変化と界面形状の関連性を解析する。

(想定条件・根拠)

金属リチウムの PEO 上での析出反応の制御がサイクル特性の向上に直接関わる。Li/PEO 界面の電気化学的検討は Li/空気電池の実用化に不可欠。

(c) 期間が 2 年間なので最終目標のみ設定。

(d) 弱酸である酢酸水溶液系での LATP 固体電解質の安定性を検討し、酢酸電解液の組成の影響を明らかにする。また、Li/PEO/LATP 電極の有機溶媒系電解質への適応性につき検討する。

(想定条件・根拠)

酢酸水溶液系は LATP 電解質が安定に存在できるリザーバーとして唯一見出されている。酢酸水溶液系の組成についてより詳細な検討を加える。

Li/PEO/LATP 電極と有機溶媒系電解質を組み合わせ、有機系リチウム/空気電池を構築する。

## 最終目標

(a)低温でのセル抵抗の低減を目指す。40℃でのセル抵抗  $100\Omega\text{cm}^2$  を目標とする。

(想定条件・根拠)

セルの室温作動を目指し、40℃で目標抵抗値を達成する。

(b)抵抗の経時変化率を通電しない状態で  $0.1\%/100\text{h}$ 、また、リチウムの析出溶解のサイクルを繰り返した際の劣化率  $5\%/100$  サイクルを目標とする。

(想定条件・根拠)

5年程度の耐久性を考慮すると、上記の劣化率に止めることが必要である。

(c)固体電解質 LATP および  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ (LLZ)の各種水溶液中での安定性を検討し、最適な水溶液電解質とその組成を探索する。

(想定条件・根拠)

耐水性固体電解質とリザーバー水溶液の安定な組み合わせを見出すことが、水溶液系 Li/空気電池の長期安定作動に必要不可欠である。

(d)酢酸水溶液系電解質で、エネルギー密度  $500\text{Wh/kg}$  の実現に向けて、正極容量  $300\text{mAh/g}$  を目標とした電池の試作。

有機溶媒系電解質で、エネルギー密度  $500\text{Wh/kg}$  の実現に向けて、正極容量  $400\text{mAh/g}$  以上で、容量の劣化が  $1\%/1000\text{h}$  を目標とする。

(想定条件・根拠)

$500\text{Wh/kg}$  を達成するには少なくともその2倍の  $1000\text{Wh/kg}$  を理論値として発揮することが必要。酢酸水溶液系では  $3.7\text{V}$  程度の起電力、有機電解液系で  $3.1\text{V}$  であるから、正極の容量としてこの程度が必要である。

## (6) 研究開発成果

本事業の研究成果(一覧)を表 2.4.3-2 に示す。

表 . 2.4.3-2 研究成果（一覧）

項目	目標値（最終）	達成値	達成度	備考
リチウム複合負極の抵抗低減	40 でセル抵抗 100Ωcm <sup>2</sup>	45Ωcm <sup>2</sup> (60 °C) 529Ωcm <sup>2</sup> (40 °C)		
リチウム溶解析出の高効率化	セル抵抗変化率 0.1 %以下 (100h 経過時) 劣化率 5% (100 サイクル経過時)	最小変化率-6.78%  抵抗値 47%増大		25~100 サイクルでは-16%
固体電解質の開発	導電率 10 <sup>-5</sup> Scm <sup>-1</sup> 以上	LATP について、 1.92~3.11×10 <sup>-4</sup> Scm <sup>-1</sup> (酢酸・酢酸リチウム水溶液) 2.42×10 <sup>-4</sup> Scm <sup>-1</sup> (飽和 LiCl+飽和 LiOH 水溶液)	○	
液体電解質の開発	酢酸系の正極容量 300 mAhg <sup>-1</sup> 以上 有機溶媒系での正極容量 400 mAhg <sup>-1</sup> 以上 有機溶媒系での容量劣化率 1%以下 (1000h 保存時)	280mAhg <sup>-1</sup>  有機系では空気極に対し安定な有機溶媒が見つからず、検討に至らなかった		セル構造最適化で 300mAhg <sup>-1</sup> は達成見込み。

<成果 1 >

(内容) 安定なりチウム複合負極の開発と抵抗低減

(達成度)

(成果の意義) 60 においてはポリマー電解質に SiO<sub>2</sub> と PP13TFSI を共添加すると 45Ωcm<sup>2</sup> にまで抵抗低減する。60 においては、最も抵抗が小さく安定な金属リチウム/固体電解質系である。

(課題と取り組み) 40 においては抵抗の内訳は以下の通りである。

抵抗計算値 (1cm<sup>2</sup>あたり)

Li/polymer 界面抵抗	321 Ω
ポリマー電解質抵抗	108 Ω
LATP 電解質抵抗	100 Ω
計	529 Ω

従って Li/polymer 界面抵抗を小さくすることが 40 における目標達成には不可欠である。界面の三次元化が今後の重要な課題となる。

<成果 2 >

(内容) リチウム溶解析出過程の解明と高効率化

(達成度)

(成果の意義) 界面の安定性向上、デンドライト生成の抑制にフィラーやイオン液体をポリマー電解質に添加することが効果的であることを見出した。

(課題と取り組み) リチウムの溶解析出を行わせると、初期 25 サイクルまでに大きな抵抗増

大が観測される。またデンドライトの抑制は可能であるが、完全に停止するわけではない。従って、デンドライト生成機構と添加物効果を解明することが今後の課題。

#### <成果3>

(内容) 新規耐水性固体電解質の探索

(達成度) ○

(成果の意義) 固体電解質には安定な pH 領域が存在する。従って、固体電解質自身に広い安定領域を求めることも重要だが、水溶液電解質に pH が中性付近で安定に推移するものがあれば汎用性が高い。そのような水溶液として酢酸/酢酸リチウムおよび LiCl 飽和水溶液を見出した。

(課題と取り組み) これらの水溶液は複合負極に対しては優れた性能をもつが、空気極に対する影響は未知である。空気極にこれらの電解液を組み合わせた際の課題を抽出する作業が必要である。

#### <成果4>

(内容) リチウム空気二次電池用電解質の開発

(達成度)

(成果の意義) Li/PEO/LATP/HOAc-H<sub>2</sub>O-LiOAc(saturated)/carbon プロトタイプセルを作成し、0.5 mA cm<sup>-2</sup>、60 °C の条件で 250mAh<sup>-1</sup> の容量で劣化なしに 15 回サイクルさせた。これは水溶液系空気電池で唯一フルセルとしてサイクルしたデータである。エネルギー密度の問題を除けば、このシステムは空気電池の可能性を端的に示すものである。

(課題と取り組み) 有機電解液系の空気電池に関しては空気極の問題が大きい。我々は水溶液系の空気電池に特化して材料開発に取り組む。酢酸系の電解液にはエネルギー密度の問題がある。総合的な視点でみた場合、酸系電解液は再検討の余地があると思われる。

#### (7) 知的財産権等

本事業の知的財産権等の件数のまとめを表 .2.4.3-3 に示す。

表 . 2.4.3-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	0	0	1	2	0	3
うち、外国出願	0	0	0	0	0	0
国内登録	0	0	0	0	0	0
海外登録	0	0	0	0	0	0
論文	0	2	4	6	5	17
うち、査読付き論文	0	2	4	5	5	16
研究発表・講演	1	7	12	15	15	50
受賞実績	0	0	0	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載	0	0	5	0	0	5
展示会への出展	0	0	0	0	0	0
合計	1	9	22	23	20	75

#### (8) 今後の課題と課題解決の見通し

達成できなかった課題のうち重要なものは、複合負極の抵抗低減である。抵抗は大部分がリチウムとポリマー電解質の界面イオン移動抵抗に由来する。材料依存の値であるためポリマー電解質を使用する限り大幅な改善は期待できない。本質的解決には□ポリマーを他の材料に置換する、□界面面積を物理的に増やす、の2つの方法がある。ポリマー電解質に代わる材料として無機固体電解質である LLZ が候補に挙げられる。また、非水電解液でデンドライト抑制可能とする報告もみられる。界面面積増大はシリコン合金負極による三次元化が一法である。これらを組み合わせることで、複合負極の抵抗低減の見通しを立てることができる。

一方、抵抗を生む要素としての寄与は小さいものの、LATP 由来の抵抗低減は薄膜化に依らざるを得ない。薄膜化の技術を開発することも重要であるが、薄膜において機械的強度をどう確保するかが極めて難しい。強度に優れた多孔質の支持体の上に析出させるなどの工夫が必要であるが、次ステップの課題として取り組みが必須である。

本事業では対象としなかった空気極に関する課題も多い。LiOH や  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  の析出を防ぐことが重要であり、イオンやガス分子の選択透過膜が解決の糸口になる可能性がある。また電解液の揮発抑制も重要な課題である。

本事業では水溶液系リチウム空気電池のリチウム負極に関する開発を重点的に行ったが、全ての構成部材に課題は山積している。実用化につなげるには学術的な立場から一つずつ解決する姿勢が必要である。

#### (9) 成果の実用化／活用

水溶液系空気電池は重量エネルギー密度が大きいことが強調されるが、使用される材料のコストが低い点も注目されるべきで、ポストリチウムイオン電池の候補の一つである。体積エネルギー密度が低いという指摘もあるが、金属リチウムが余分に必要との前提に基づく計算であり、新材料や新技術の登場により計算結果は変化しうる。

出口イメージは電気自動車用の電源であるが、小型軽量の蓄電池として応用の幅は広いと思われる。ただ現状は次世代電池の域を出ず、引き続き基礎的な研究開発を続けることが肝要で

ある。次のステップに進むには、以下のマイルストーンをクリアする技術開発が求められる。

①負極の高出力化とデンドライト抑制の両立

②負極の体積変化に対する界面の物理的安定性の維持

機械的強度に優れた固体電解質薄膜の実現

可逆性と安定性に優れた空気極と電解液の組み合わせ開発

この電池の提案により当該の研究分野には既に大きな影響が現れている。最近5年間で論文数は爆発的に増え、特に米国における研究の広がりや深化は、極めて速いスピードで進んだ。この結果、空気電池が一つの研究分野として認知されるに至っている。実用化が達成された場合は、当然のことであるが自動車産業に及ぼすインパクトは大きい。

ところで、上記のマイルストーンは同時に全てが達成されなくても、個別の達成にも大きな意味がある。①は金属リチウム電池の開発につながり、③は全固体リチウムイオン電池の開発を促進する。また空気電池の実用化には④の達成が必要不可欠であるが、燃料電池の研究開発で培われた技術が流用できる。空気電池の研究において膜開発は重要になると予想され、実際に搭載されれば経済的にも波及効果が大きい。

#### (10) その他

水溶液系リチウム空気電池は国内外のプレーヤーが多くない。この情勢を生かして先行するためには鍵となる研究開発を可能な限り早く行うことが必要である。上で述べたマイルストーンをクリアし、実用化を見通せるレベルの充放電性能を提示することが重要である。本事業受託の5年間で、空気電池の可能性と課題は明らかになった。これからの数年間はこの電池が大きく発展するか否かを定める重要な期間になると考えられる。当研究室において研究開発を継続し、上記課題を解決したいと考えている。



## 2. 4. 4 エネルギー密度の革新を目指した金属—空気電池の二次電池化 (京都大学、産業技術総合研究所)

### (1) 事業目的

「空気二次電池のための亜鉛負極の反応制御」(京都大学)

「空気二次電池のためのアルミニウム負極の可逆化」(京都大学)

電気自動車用電池の飛躍的な高性能化をはかるためには現行の最も優れている二次電池であるリチウムイオン電池のエネルギー密度の約7倍、電池システムの単位重さあたり500 Wh/kgのエネルギー密度が求められている。現行のリチウムイオン電池では負極に高黒鉛化性炭素材料、正極にはリチウム含有遷移金属酸化物が使用されており、小型携帯機器用電源で広く用いられている円筒型のリチウムイオン電池(18650型)では200 Wh/kg程度の高いエネルギー密度を有する。一方、リチウムイオン電池を大型化し、自動車用電源に用いる場合、出力も要求され、電極の厚みを薄層化するなど内部抵抗を低減する工夫が種々なされている。そのため、現行のリチウムイオン電池では出力の向上をはかるためにはエネルギー密度を犠牲にする必要がある。

金属—空気電池を二次電池化すれば革新的にエネルギー密度の向上をはかることができ、その利点は非常に大きい。たとえば、亜鉛—空気一次電池では亜鉛(Zn)が $ZnO_2^{2-}$ として溶解し、ZnOとして析出すると報告されている。亜鉛—空気電池では約1350 Wh/kgの容量を示す。デバイス全体の重量となると当然この値から低減するが、エネルギー密度の革新をはかるためには金属—空気電池は非常に魅力的であることが分かる。

空気電池の空気極には体積当たりの比表面積を大幅に大きくする燃料電池のスタック技術の応用が可能であり、また、電池活物質を100  $\mu\text{m}$ 以下に薄く塗るリチウムイオン電池の電極作製技術を応用することができる。これらを組み合わせると、幾何面積当たりの電流密度で10~50  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 程度が達成できれば十分大きな出力の電池を作製できると考えられる。そこで、幾何面積当たり50~200  $\text{mAh}/\text{cm}^2$ 程度の容量を持つ活物質ができればエネルギー密度も高い電池とすることができる。実際、現在のポータブル機器用のリチウムイオン電池の幾何面積当たりの容量密度は10  $\text{mAh}/\text{cm}^2$ 程度である。したがって、これまで亜鉛—空気電池で使われてきたmmオーダーの厚さの亜鉛負極を適用する必要はなく、ナノテクを活用した電極構成とすることでデンドライト成長を抑制した負極とすることが期待できる。また、スタック構造を持たせて大面積化することによって充電電流密度が比較的低くても短時間で充電できることになる。これらの工夫によって、新概念の金属—空気二次電池が実現されると考えている。しかし、金属—空気電池の二次電池化には多くの課題がある。それらを解決していくためには長期的に基礎的な研究開発を多く積み重ねる必要がある。

そこで本研究開発では理論電圧の高い電池系を構成するために、負極には亜鉛、アルミニウムを用いる。亜鉛極では二次電池化のための重要な課題の一つであるデンドライト成長を制御することを目的とする。アルミニウム負極については非常にチャレンジングな研究であり、負極として使用できる可能性を検討する。

「空気電池のための可逆空気極の研究開発」(産業技術総合研究所)

産業技術総合研究所関西センターでは、これまで長年に渡る研究開発実績のある固体高分子水電解、固体高分子形燃料電池(PEFC)、固体高分子形燃料電池・水電解可逆セルに関する技

術を金属-空気電池用空気極に応用し、空気電池の二次電池化と高電流密度化を図る。空気電池はこれまで高電流密度化、長寿命化、二次電池化が困難とされてきたが、近年著しい技術進歩を遂げている PEFC の技術を生かし、最近開発されつつあるアニオン交換膜 (AEM) を電解質材料として空気極に導入するとともに、実用的な可逆触媒・可逆電極の開発により大幅な性能向上と高機能化を目指す。

## (2) 事業概要

「空気二次電池のための亜鉛負極の反応制御」(京都大学)

本項目では亜鉛負極の充電過程を調べ、デンドライト析出を抑制するための基礎的知見を得る。そのために新しい“その場”測定手法を用いたデンドライト成長観察を行う。

亜鉛のデンドライト成長を抑制する従来の研究手法は試行錯誤による研究が大半である。本研究ではレーザー顕微鏡や原子間力顕微鏡などの新しい手法を用い、亜鉛のデンドライト成長について基礎的段階から知見を得る。また、電解質の選定や、特異吸着剤や錯形成剤などの添加物を加えることによるデンドライト析出の初期段階の反応をその場観察することによって電解液、添加物の効果を迅速且つ正確にその場観察し、それによってデンドライト析出の抑制に結びつく電解液を開発する。さらに、核生成と核成長をナノオーダーで設計し、亜鉛極の反応性を制御する。また、多孔基板をナノ構造制御することによって析出時の核生成を制御し、これによってデンドライト析出を抑制する。また、電気化学振動現象を用い、亜鉛のデンドライト成長が起こるかどうかの知見を得る。これにより、上述の添加剤の効果についても判断を行う。

「空気二次電池のためのアルミニウム負極の可逆化」(京都大学)

アルミニウム負極の研究を行う。アルミニウム-空気電池が 6140 Wh/kg、亜鉛-空気電池が 1350 Wh/kg の容量をもつ。現行のリチウムイオン電池の限界が 250~300 Wh/kg であり、アルミニウム-空気二次電池が実用化すれば、アルミニウムの資源的優位性、安全性、高環境調和性、経済性等の特性を勘案すると、まさに究極の電池系といえることができる。そこで、アルミニウム負極の可能性を検討する。

亜鉛-空気電池の場合に用いられるアルカリ水溶液や、本研究で開発するアルカリ交換膜を用いたアルミニウム-空気電池の実現は困難である。そこで、近年精力的に研究されているイオン液体に着目し、アルミニウム負極の充放電可能なイオン液体を検討する。また、充電時に平滑なアルミニウムが生成せず、デンドライト成長が起こる可能性があるが、近年進展が著しいナノ構造制御と同時に、従来取り組まれてきたようにアルミニウムの合金化、有機物もしくは無機塩の添加物によるデンドライト抑制と同時に近年進展が著しいナノ構造制御により、アルミニウムの結晶成長と析出粒子径の制御を行う。

「空気電池のための可逆空気極の研究開発」(産業技術総合研究所)

金属-空気電池の二次電池化を困難にしている諸問題のうち、主として空気極側に起因する問題や課題として以下のような点が挙げられる。①過電圧が大きいと電圧ロスが大きく電流密度を高められない。②アルカリ電解液による電極濡れの進行で濃度過電圧が上昇するとともに、液漏れの危険性がある。③長期間の使用でアルカリ電解液が空気中の CO<sub>2</sub> を吸収して中和

される。④アルカリ電解液が空気中のCO<sub>2</sub>と反応してガス拡散電極細孔内に炭酸塩が析出し酸素電極反応を阻害する。⑤負極金属の放電生成物により酸素電極反応が阻害される。⑥酸素還元反応（ORR）と酸素発生反応（OER）の両反応に対して高活性で耐久性に優れた可逆空気極触媒の開発が必要である。実施項目「固体高分子形空気極の基礎研究」では、空気極内およびその近傍に電解質としてAEMを用いる新しい空気極構造を提案し、AEMのイオン選択性と全固体型ガス拡散電極により、①～⑤の問題点の克服に努める。実施項目「可逆空気極触媒の探索」では、⑥の課題に取り組み、白金系触媒に加え、種々の金属触媒やペロブスカイト型酸化物触媒を作製し、可逆空気極特性を評価する。

### （3）研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.4-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
空気二次電池のための垂鉛負極の反応制御（京都大学）	—————→					
空気二次電池のためのアルミニウム負極の可逆化（京都大学）	—————→					
固体高分子形空気極の基礎研究（産業技術総合研究所）	—————→					
可逆空気極触媒の探索（産業技術総合研究所）	—————→					
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
京都大学	22.3	22.3	10.0	10.0	10.0	74.5
産業技術総合研究所	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	57.3

#### (4) 研究開発の実施体制

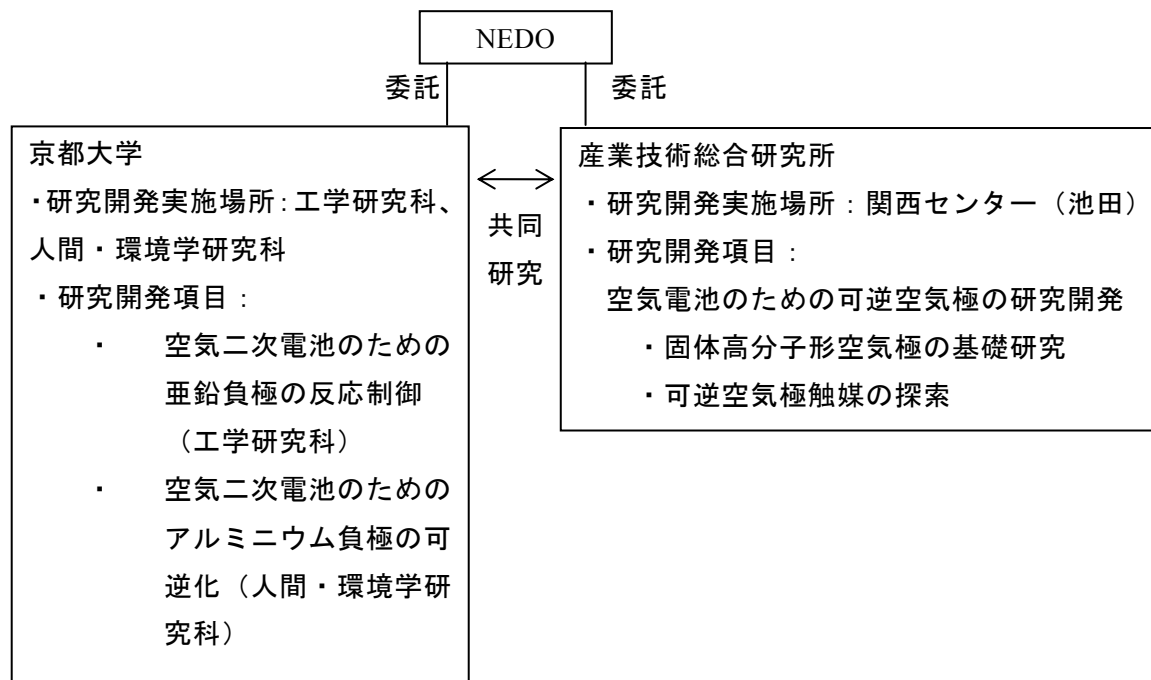


図 .2.4.4-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

##### 中間目標

「空気二次電池のための亜鉛負極の反応制御」（京都大学）

電気化学振動現象を利用することによって、デンドライト析出の“その場”診断を行う。これによりデンドライト析出を抑制する電解質、特異吸着剤、錯形成剤などの添加物の選定を行う。さらに、レーザー顕微鏡などの新しい“その場”測定手法を用いたデンドライト成長観察についても試みる。また、亜鉛の析出担体として多孔性材料を検討し、 $20 \text{ mA/cm}^2$  でデンドライト析出を抑制することを目指す。亜鉛-空気二次電池を実用化するための大きな課題の一つが亜鉛極のデンドライト析出制御である。

「空気二次電池のためのアルミニウム負極の可逆化」（京都大学）

アルミニウムの充放電可能なイオン液体を見出す。また、さらに溶液の酸塩基性を考慮して、イオン液体の分子設計を行い、 $100$  において、クーロン効率  $70\%$ 以上を目標とする。さらに、イオン液体構成イオンと電析形態の関係を明らかにする。

「空気電池のための可逆空気極の研究開発」（産業技術総合研究所）

三相界面の形成方法と可逆な電極構造を工夫することにより、炭酸塩析出が抑制できることを実証する。また、種々の組成のペロブスカイト型酸化物を中心に空気極活性についてスクリーニングを行い、可能性のある可逆空気極触媒を1つ以上見出す。電流密度  $100 \text{ mA/cm}^2$  における空気極電位（内部抵抗補正值）として、可逆水素極（RHE）基準で放電時  $700 \text{ mV}$  以上、充

電時 1650 mV 以下、放電効率 57%、総合効率 42%（根拠：PEFC でよく使用される Dupont 社製 Nafion を使って作製した当所可逆セルの性能に相当する）を目指す。

#### 最終目標

「空気二次電池のための亜鉛負極の反応制御」（京都大学）

その場測定系の構築によるデンドライト成長観察を行い、電解液や添加剤の効果についての知見を迅速に得る。また、引き続き、電気化学振動現象も用い、同様に電解液や添加剤のデンドライト成長を抑制する効果について知見を得る。その場測定および電気化学振動現象測定により、効果のあった添加剤を用いて亜鉛-空気二次電池の試作を行い、簡単なセルレベルで添加剤が有効であるかどうか検証する。電気自動車用電池であることを考え、電流密度 100 mA/cm<sup>2</sup> までデンドライト成長を抑制できる電解液および充放電可能な負極開発を達成する。クーロン効率は 90%を目指す。また、産総研で開発された空気極触媒を用いて、亜鉛-空気二次電池を試作する。

「空気二次電池のためのアルミニウム負極の可逆化」（京都大学）

ナノ界面修飾により、デンドライト成長の抑制を図り、クーロン効率 75%を目指す。イオン液体をはじめとする電解質とその添加物、充放電条件を明らかにし、アルミニウム二次電池のための負極を開発する。

「空気電池のための可逆空気極の研究開発」（産業技術総合研究所）

固体高分子形の電極設計と可逆空気極触媒開発の両面から空気極性能の向上に取り組み、電流密度 100 mA/cm<sup>2</sup> における RHE 基準の空気極電位（内部抵抗補正值）として、放電時 850 mV 以上、充電時 1500 mV 以下、放電効率 69%（850/1229）、総合効率 57%（850/1500）を目標とする。可逆性が高く安定な空気極触媒開発の指針とアニオン交換膜の CO<sub>2</sub> 透過を抑制する手法を見出し、従来の空気極の耐久性を大きく改善する。また、共同提案している京都大学と協力して負極を含めた電池系全体から見た場合の固体高分子形空気極の開発課題を抽出する。根拠としては亜鉛-空気電池の理論エネルギー密度（1350 Wh/kg）と放電効率 69%から重量エネルギー密度を計算すると、1350 Wh/kg×0.69=931 Wh/kg となり、2030 年の目標である 700 Wh/kg を越える。これはガソリン自動車と同等の走行距離が得られることを意味しており、本研究開発において設定された目標値が達成されるとともに、本提案の空気極構造により炭酸塩析出が抑えられることを実証できれば、自動車用蓄電池の空気極性能としては実用化レベルに達すると考えられる。

## (6) 研究開発成果

表 .2.4.4-2 研究成果 (一覽)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
空気二次電池のための亜鉛負極の反応制御	デンドライトの抑制とクーロン効率 90%	デンドライト抑制手法の開発とクーロン効率 85%		
空気二次電池のためのアルミニウム負極の可逆化	デンドライト抑制とクーロン効率 75%	デンドライト抑制手法の開発とクーロン効率 80%		
空気極の耐 CO <sub>2</sub> 特性	耐 CO <sub>2</sub> 特性の改善	CO <sub>2</sub> による空気極性能低下と炭酸塩析出を抑制		
空気極充放電効率	57%	55%		

### 「空気二次電池のための亜鉛負極の反応制御」(京都大学)

(内容) 亜鉛負極の反応制御では、まず、デンドライト析出に伴う電気振動現象を利用し、どのような場合にデンドライト析出が生じるか、また、界面活性剤などによる制御法を確立することができた。さらに、アニオン交換性イオノマーを用いることにより、亜鉛極の可逆性を大幅に向上させることも可能となった。

(達成度) ◎

(成果の意義) 亜鉛負極は過去において企業を含めて二次電池化が研究されてきたが、材料系の制限などから開発は進まなかった。本研究では基礎的研究から始め、デンドライト析出条件を明確にすることで、界面活性剤を用いたデンドライト成長抑制技術を見いだした。また、アニオン交換性イオノマーを用いて、亜鉛溶解種の移動を制限するという技術を確認し、デンドライト抑制と比較的高いクーロン効率を達成した。

(課題と取り組み) 現在のアニオン交換性イオノマーは強塩基条件下では長期にわたって安定に使用することが難しいと考えられるため、今後は無機のアニオン伝導体などを用いることを考えている。

### 「空気二次電池のためのアルミニウム負極の可逆化」(京都大学)

(内容) アルミニウム負極の可逆反応を進行させるために、クロロアルミネート系イオン液体を電解液として基礎的な電気化学挙動を調べた。基板組成の違いによる析出挙動の違いなどをもとに、三次元多孔カーボンを基板に用いることで実効電流密度を低下させ、デンドライトの抑制を可能とした。また、塩化物系の添加剤に関して、その効果を調べた。

(達成度) ◎

(成果の意義) クロロアルミネート系イオン液体を用いたアルミニウム金属の析出溶解反応は従来から行われていたが、基板のナノ構造制御は当時の技術では容易でなく、本研究においてその有効性が実証された。

(課題と取り組み) アルミニウムを負極に用いた電池系では正極の問題があるため、正極に適応した電解質および新しい正極の検討が必要である。

「空気電池のための可逆空気極の研究開発」(産業技術総合研究所)

(内容) アルカリ電解液と空気極触媒層との界面にアニオン交換膜(AEM)を用いる固体高分子形空気極構造を採用し、多孔性膜を隔膜とした従来の空気極に比べてCO<sub>2</sub>の影響による空気極性能の低下を緩和できることを実証した。これは、AEMによりアルカリ電解液中のアルカリ金属イオンの空気極側への透過が遮蔽され、空気極細孔内での炭酸塩析出が抑制されたことに起因すると考えられる。また、AEMがCO<sub>2</sub>の透過速度そのものを低下させるバリアーとなること、負極金属イオンの空気極側への透過を抑制すること、電極濡れと液漏れを防ぐなどの効果も見出すことができた。

(達成度) ◎

(成果の意義) 正極活物質として空気中の酸素を利用する金属-空気電池は密閉不可能であるため、空気中のCO<sub>2</sub>とアルカリ電解液との反応による性能低下は、二次電池として長期耐久性を確保する上で致命的な問題である。本研究開発では、アルカリ電解液と空気極触媒層との界面を全固体型の構造とすることにより空気極での炭酸塩析出を防ぎ、空気極性能を維持することができた。空気をソーダライムなどの吸着剤に通してCO<sub>2</sub>を除去してから電池に供給する方法と比べて、システムの簡略化やメンテナンス性の上で優位性が高いと考えられる。

(課題と取り組み) 固体高分子形空気極の耐CO<sub>2</sub>特性をさらに高めるためには、固体高分子膜の表面修飾などの方法により、一価アニオンの選択透過性向上やCO<sub>2</sub>透過抑制などの機能を付与することが有効であるという知見を得ている。実用化を目指した次の課題として、金属-空気電池二次電池に適した高機能な高分子電解質膜の開発を挙げるができる。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.4-3 に示す。

表 .2.4.4-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願		3				3
うち、外国出願		2				2
国内登録						
海外登録						
論文			1	2	1	4
うち、査読付き論文				2		2
研究発表・講演		6	1		4	11
受賞実績						
新聞・雑誌等への掲載						
展示会への出展						
合計		11	2	4	5	22

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

「空気二次電池のための亜鉛負極の反応制御」(京都大学)

亜鉛空気電池における亜鉛負極の課題としてクーロン効率の向上が必要である。これは用いたアニオン交換性イオノマーのアニオン伝導性や強アルカリ溶液中での化学的安定性に問題があったことによると考えている。この課題を解決するために、無機のアニオン伝導体の開発を行っている。

「空気二次電池のためのアルミニウム負極の可逆化」(京都大学)

目標としていた数値は達成可能であったが、空気-アルミニウム二次電池の実用化にあたっては正極の開発が必須となる。空気-亜鉛二次電池系のように水溶液系の電解液が使用できないことから電解液との相性を含めて、基礎的に行う必要がある。

「空気電池のための可逆空気極の研究開発」(産業技術総合研究所)

可逆空気極触媒として PtIr 触媒を用いて作製した固体高分子形空気極の充放電試験において、電気自動車への応用を視野に入れた非常に高い目標値を 25°C 程度の室温においてほぼ達成できている。しかし、金属-空気二次電池の本格的な普及段階では、Pt 系触媒に代わり、低コストで資源量の豊富な非貴金属系の空気極触媒を利用する必要がある。本研究開発で検討したペロブスカイト型酸化物触媒では、現時点において充放電性能の目標値には到達していない。触媒組成の検討に加え、導電助剤との複合化や酸素の拡散性向上など観点から、電極構造の設計について検討を深めることが今後の重要な課題と考えている。

## (9) 成果の実用化/活用

次世代蓄電池の開発は昨今のエネルギー事情を踏まえると喫緊の課題である。本研究では水系および非水系での負極、水系での空気極の要素研究を遂行した。それぞれの要素においては一定の成果が得られたが、実用化を考えた場合には企業等による電極の作り込みを最適化する必要がある。また、作り込みの段階で新たな問題が生じることも考えられる。これらを解決することで要素技術としては産業界で具体的に利用可能なステージに達すると考えている。すでに、固体高分子形空気極は亜鉛負極と組み合わせた電池系で充放電可能であることを確認しているため、実用化への基礎段階には達していると考えている。空気極に関する研究開発は、アルカリ形燃料電池や水電解・燃料電池可逆セルの研究開発にも重要な知見を提供すると考えられる。また、金属負極および空気極に関しての知見は NEDO で実施している RISING 事業でも活用されると考えている。



## 2. 4. 5 ナノ界面制御による高容量電極の研究開発 (産業技術総合研究所)

### (1) 事業目的

次世代電気自動車用のエネルギー源として二次電池が注目されており、特にリチウムイオン電池についての研究と開発が盛んに行われている。しかしガソリン自動車と競合するためにはリチウムイオン電池のエネルギー密度の大幅な向上が要求されている。負極活物質に関しては、従来使用されているリチウム吸蔵黒鉛 ( $\text{LiC}_6$ ) の理論容量が  $372 \text{ mAh g}^{-1}$  であるのに対し、合金型材料である  $\text{Li}_{4.4}\text{Sn}$  や  $\text{Li}_{4.4}\text{Si}$ 、および金属リチウムはそれぞれ  $994$ 、 $4200$ 、 $3861 \text{ mAh g}^{-1}$  という高容量が見込まれている。しかし正極活物質に関しては、従来の  $\text{LiCoO}_2$  や  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  や  $\text{LiFePO}_4$  の容量はそれぞれ約  $130 \text{ mAh g}^{-1}$ 、 $120 \text{ mAh g}^{-1}$ 、 $160 \text{ mAh g}^{-1}$  程度である。リチウムイオン電池の高容量化は正極側の容量向上の難しさに阻まれている。そこで、新しい概念の電極反応の併用によって正極の容量を大幅に向上させることが必要と考えられる。

我々は過去の研究において、一部のナノメートルオーダーの活物質に関して、バルク材料へのリチウムインターカレーション反応以外の反応機構に基づく容量成分が見られる材料が見いだされた。この容量成分は、粒子のサイズが小さくなるに伴って比表面積が大きくなるということから、活物質の表面に関連して生じた現象と考えている。この表面反応による容量成分を、インターカレーション反応によるバルク容量と区別するために、我々は表面疑似容量と呼んでいる。本研究では、活物質のナノサイズ合成に取り組み、大きな表面疑似容量を発現させて、バルク容量と表面疑似容量の併用することにより、リチウムイオン電池の電極、特に正極活物質の容量を飛躍的に向上させることを目的とする。

### (2) 事業概要

#### (2-1) ナノ材料活物質の研究開発

表面疑似容量を発現させるためには活物質の比表面積を大きくすることが重要という考えから、ナノサイズに制御した正極活物質を合成し、電極を作成して電極特性を評価する。活物質材料としては、価格観点から、マンガンや、バナジウム系の酸化物材料を中心に検討を進める。様々な化学的手法を用いて、ナノサイズに制御した  $\text{VO}_2(\text{B})$ 、 $\text{V}_6\text{O}_{13}$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$ 、 $\text{LiV}_3\text{O}_8$ 、 $\text{H}_2\text{V}_3\text{O}_8$ 、 $\text{NaV}_6\text{O}_{15}$ 、 $\text{Li}_{0.44}\text{MnO}_2$ 、 $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Na}_{0.44}\text{MnO}_2$  等を合成し、種々の電気化学測定方法により、リチウムイオン電池の活物質としての性能評価を行う。

負極活物質としてはシリコンに注目し、容量劣化の要因である  $\text{Li}$  イオン挿入・脱離に伴う体積膨張率が緩和されることを期待して、ナノサイズ化試料の作成を試みる。具体的には、半導体産業で使い捨てされるシリコンを腐食してナノポーラスシリコンを作製し、更に細孔表面にカーボンコーティングして電極を作成し、サイクル特性の評価を行う。

#### (2-2) ナノ材料電極特性評価技術開発

表面疑似容量を増大させるためには比表面積が大きい材料を合成して反応サイトを増加させることが重要と考えられるが、粒子の凝集によって粒子間に空隙が生じ、電解液と接触できず、容量発現に寄与できない表面も存在する可能性がある。疑似容量を発現する表面の面積を正しく評価し、容量と面積の相関を見いだすことが疑似容量発現メカニズムを理解するために重要であると考えられるため、BET法や浸漬熱測定等の種々の方法によりナノ材料電極の表面積

測定を行い、結果を比較検討するとともに、ナノ材料電極を用いたリチウムイオン電池の充放電試験や階段状定電圧容量測定（SVSC）等によって電極特性を評価し、表面疑似容量発現機構について考察する。

### （３）研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.5-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
ナノ材料活物質の研究開発					→	
ナノ材料電極特性評価技術開発					→	
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
産業技術総合研究所	19.8	20.0	19.9	19.9	19.9	99.6

### （４）研究開発の実施体制



図 .2.4.5-1 研究開発の実施体制

### （５）研究開発目標と根拠

中間目標

- (a)平成 20 年度終了時点で重量エネルギー密度  $700\text{Wh kg}^{-1}$  を達成するとともに、20 サイクル経過時の容量維持率を 75%以上に改善することを目指す。
- (b)ナノ材料電極のバルク容量および表面疑似容量のそれぞれに関与する表面の面積評価法を構築する。また表面疑似容量の発現メカニズムを解明し、容量向上のために材料開発についての指針を得る。

（目標設定の根拠）本研究開始時において、既に我々は正極のナノワイヤ正極材料の合成に成

功した実績を有し、約 250 mAh g<sup>-1</sup> の容量を達成していた。これはバルクの Li<sub>1</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> の容量 140 mAh g<sup>-1</sup> に比べると、はるかに高い容量である。電極電位は 1.5~4.5 V (Li/Li<sup>+</sup>) の範囲で推移し、平均電位を 2.7 V とすると、単極活物質レベルでの重量エネルギー密度は 675 Wh kg<sup>-1</sup> となる。ただし 20 サイクル経過時に 70%程度にまで低下するという問題を残していた。そこで中間目標としては、表面疑似容量発現による容量向上を期待して重量エネルギー密度の目標値を 700Wh kg<sup>-1</sup> とし、更にサイクル特性を 75%以上にまで改善することとした。

#### 最終目標

(a)平成 23 年度のプロジェクト終了時においては、パック電池レベルで重量エネルギー密度 500 Wh kg<sup>-1</sup> の実現を見通すために必要な、正極単極活物質レベルで 1000 Wh kg<sup>-1</sup> のエネルギー密度と、100 サイクル経過時での 75% (750 Wh kg<sup>-1</sup>) 以上の容量維持を達成することを目標とする。

(b)ナノ材料電極の表面疑似容量評価法を確立する。また、トラップ準位の変化と表面疑似容量増減の相関を解明する。

(目標設定の根拠)

正極活物質レベルで 1000 Wh kg<sup>-1</sup> (平均電極電位 2.5 V vs. Li/Li<sup>+</sup> で400 mAh g<sup>-1</sup>) の重量エネルギー密度を達成することが出来れば、リチウム金属等の高容量負極との組み合わせによってパック電池を構成することを過程した場合、以下の概算によりパック電池レベルで 500 Wh kg<sup>-1</sup>の重量エネルギー密度達成を見通すことが出来る。

リチウム金属負極の理論重量エネルギー密度は3861 mAh g<sup>-1</sup>であるが、実質的に利用できるのは 2000 mAh g<sup>-1</sup>程度であると仮定すると、リチウム金属 1 g に対し、正極活物質は等価な容量分として

$$2000 \text{ (mAh)} \div 400 \text{ (mAh g}^{-1}\text{)} = 5 \text{ (g)}$$

というように、5 g 必要になる。この場合、正極と負極を合わせた電極活物質レベルでの容量密度は、

$$2000 \text{ (mAh)} \div \{1 \text{ (g)} + 5 \text{ (g)}\} = 333.3 \text{ (mAh g}^{-1}\text{)}$$

となる。平均作動電圧を 2.5 V と仮定すると、重量エネルギー密度は

$$333.3 \text{ (mAh g}^{-1}\text{)} \times 2.5 \text{ (V)} = 833.3 \text{ (Wh kg}^{-1}\text{)}$$

となり、833.3Wh kg<sup>-1</sup> が期待できる。ラミネート型電池など、ケース重量の少ない電池を仮定し、活物質の重量が電池パック全体の60%を占めると考えると、電池パックレベルでの重量エネルギー密度は、

$$833.3 \text{ (Wh kg}^{-1}\text{)} \times 0.6 = 500 \text{ (Wh kg}^{-1}\text{)}$$

と求まり、ほぼ 500 Wh kg<sup>-1</sup>達成を見通すことが出来る。

寿命に関しては、自動車用途を想定した場合、電池に自動車本体と同程度の耐用年数が要求されると考えると、10~15年が要求性能となる。1日に1回、夜間にフル充電を行い、走行中の回生による細かい充電の影響を無視しうると仮定すると、少なくとも3500~5000回のサイクル寿命を達成することが必要である。仮に電池の寿命を容量が初期値の75%まで低下した時点と考えた場合、時間やサイクル数の平方根に比例して進行されていることから、70<sup>2</sup> (= 4900) サイクル経過時に75%容量維持とすると14<sup>2</sup> (= 196) サイクル経過時に95%の容量維持が達成されていれば、ほぼ15年の使用を見通せる。以上より、200サイクル経過時の容量維

持率95%を2030年段階の目標値に想定する。しかし、その前段階として、10年後の2017年段階で現在市販されている小型リチウムイオン電池のレベルに到達することを1つの指標として考える。現状の市販電池のサイクル寿命は概ね500~1000回程度とされている。目標値として25<sup>2</sup> (= 625) サイクル経過時に75%容量維持とすると、200サイクル経過時では86%となる。その前段階として、5年後のプロジェクト終了時に200サイクル経過時に容量80%維持を達成することを目標に据えた。

平成20年の継続審査の段階で、LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ナノワイアについては、単極当たりのエネルギー密度として、初期値 918 Wh kg<sup>-1</sup> を達成し、20 サイクル経過時において 700 Wh kg<sup>-1</sup> (76%) を維持することを確認した。またナノサイズ VO<sub>2</sub>(B相)では初期値 840 Wh kg<sup>-1</sup>、LiV<sub>3</sub>O<sub>8</sub> ナノワイアでは 950 Wh kg<sup>-1</sup> が得られ、50 サイクル経過後でも初期値とほぼ同等の容量が維持されており、最終目標値は妥当なもの判断された。

## (6) 研究開発成果

表 .2.4.5-2 研究成果 (一覧)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
重量エネルギー密度	1000 Wh kg <sup>-1</sup>	1057Wh kg <sup>-1</sup> (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ナノロッド) 950 Wh kg <sup>-1</sup> (LiV <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ナノワイア) 918 Wh kg <sup>-1</sup> (LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ナノワイア) 1500 mAh g <sup>-1</sup> (ナノポーラスシリコン)		
サイクル特性	200 サイクル経過時において 80%以上の容量維持	20 サイクル経過時において 60% (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ナノロッド) 20 サイクル経過時において 100% (LiV <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ナノワイア) 20 サイクル経過時において 76% (LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ナノワイア) 50 サイクル安定 (ナノポーラスシリコン)		LiV <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ナノワイアは、0.1 A g <sup>-1</sup> の高レート条件においては 100 サイクル経過後も顕著な容量低下なし (ただし重量エネルギー密度は 500 Wh kg <sup>-1</sup> 程度)
電極特性評価技術開発	表面疑似容量評価法確立	浸漬熱測定による表面積評価法開発。 SVSC 測定による反応解析		

#### <成果1>バナジウム酸化物

(内容)  $V_2O_5$  ナノロッドで約  $423 \text{ mAh g}^{-1}$ 、 $V_6O_{13}$  ナノワイヤで約  $400 \text{ mAh g}^{-1}$ 、 $VO_2(B)$  ナノリボンで約  $410 \text{ mAh g}^{-1}$ 、 $LiV_3O_8$  ナノロッドで約  $350 \text{ mAh g}^{-1}$  という非常に高い初回放電容量を得ることに成功した。 $V_2O_5$  ナノロッドは平均電位が約  $2.5 \text{ V}$  であることを考えると、活物質レベルでの単極の重量エネルギー密度は  $1057 \text{ Wh kg}^{-1}$  となり、目標値の  $1000 \text{ Wh kg}^{-1}$  を達成することが出来た。

(達成度) ○

(成果の意義) ナノサイズ微粒子の合成法を確立するとともに、ナノサイズ微粒子を用いた電極ではバルク結晶では実現できなかった電位領域の反応が利用できるようになることが確認された。

(課題と取り組み) サイクル特性には課題を残したが、 $LiV_3O_8$  ナノロッドにおいては、容量は低いものの低レートでの充放電で 100 サイクル以上安定に充放電が可能な材料も得られており、高容量の  $V_2O_5$  ナノロッドにおいても今後の検討によって長寿命化が期待できると考えられる。

#### <成果2>マンガン酸化物

(内容)  $LiMn_2O_4$  (スピネル) において、通常の  $4 \text{ V}$  領域に加えて  $3 \text{ V}$  領域での充放電も可能となり、初回放電容量  $270 \text{ mAh g}^{-1}$  を実現した。平均電位を 約  $3.4 \text{ V}$  すると、活物質当たりの重量エネルギー密度は  $918 \text{ Wh kg}^{-1}$  という高い値を得ることができた。更に、導電助剤や結着剤と混練した実用条件に近い塗布膜状態において、in-situ AFM により充放電過程の形態変化を可能とする条件を見出した。

(達成度) ○

(成果の意義) ナノオーダー化することにより相転移に伴う結晶歪みが緩和され、バルク結晶では利用できなかった  $3 \text{ V}$  領域での充放電も可能となることが確認された。また、これまでは理想的な結晶粒子に対してのみ行われてきた in-situ AFM 測定について、塗布膜状態での測定も可能となり、実用電池への応用への道を切り開くことに成功した。

(課題と取り組み) ナノサイズ化により結晶歪みが緩和されることが確認されたが、サイクル特性には改善の余地が残されている。

#### <成果3>ナノポーラスシリコン

(内容) 腐食法によりナノポーラスシリコンを作製し、更に細孔表面にカーボンのコーティングを施した結果、50 サイクル経過後でも c 高容量を維持する安定な材料を合成することに成功した。

(達成度) ○

(成果の意義) 従来のシリコンナノ粒子では僅か 3 サイクルしか  $1500 \text{ mAh g}^{-1}$  の容量を維持することが出来なかったところ、大幅なサイクル安定性を実現することが出来た。

(課題と取り組み)

#### <成果4>ナノ材料電極特性評価技術開発

(内容) アナターゼ酸化チタンナノ微粒子を電極活物質として用いた時の表面疑似容量の発現機構について考察するために、BET 法による微粒子の比表面積測定、浸漬熱測定、電池の充放

電試験や SVSC 測定等の電気化学的評価を実施し、以下の結論を得ることが出来、各手法がナノ材料電極の特性評価に有効であることを確認した。

- 1) 試料の純水への浸漬熱は比表面積に関連しており、平均粒径の小さな試料ほど大きな浸漬熱を示した。
- 2) 粒径の減少に伴い、バルク容量は低下するのに対し、表面疑似容量は増大した。
- 3) 表面疑似容量は比表面積とある程度関連していることが示唆された。
- 4) 電極反応の主反応の平衡電位は約 1.8 V [Li/Li<sup>+</sup>]である。
- 5) 約 2.7 V [Li/Li<sup>+</sup>]以下の電位領域に、反応速度の遅い自己放電反応が見られる。
- 6) 約 1.4 V [Li/Li<sup>+</sup>]以下の電位領域で、表面疑似容量は比較的短時間で自発的に解消する。放電時および充電時の電圧曲線に低電位領域にショルダーが見られるのは表面疑似容量の解消が並行して進行するためであり、見かけ上放電容量が増大し、充電容量が減少する。表面疑似容量を電池の反応に利用しようとするためには表面疑似容量の安定化が不可欠である。
- 7) 容量劣化は、主反応のバルク容量で顕著に生じる。充放電間に休止時間を設けると劣化が加速する。

(達成度) ○

(成果の意義) 電池材料の評価手法として一般的で無かった浸漬熱測定の有効性を示した。また、電池の反応において複数の反応が並行して進行する系における階段状電圧ステップ容量測定 (SVSC) の有効性も示すことが出来た。

(課題と取り組み) 浸漬熱測定において、浸漬媒と試料粒子の重量比に依存する領域があり、安定な結果を得るための重量比の策定が課題として残された。また浸漬熱は浸漬媒にも依存すると考えられるので、電池の試料の評価法として最適な溶媒についても検討が必要と思われる。容量の向上に向けて表面疑似容量の利用が期待されていたが、アナターゼ酸化チタンナノ微粒子においては、低電圧領域で自発的に短時間のうちに消失してしまうことが確認され、電池の充放電反応に利用するためには表面疑似容量の安定化が不可欠であると結論づけられた。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.5-3 に示す。

表 .2.4.5-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	0	0	0	0	0	0
うち、外国出願						
国内登録						
海外登録						
論文	0	0	3	2	4	9
うち、査読付き論文	0	0	3	2	4	9
研究発表・講演	1	2	3	6	3	15
受賞実績	0	0	0	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0	0	0
合計	1	2	9	10	11	33

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

バナジウム酸化物やマンガン酸化物等の正極活物質、およびシリコン負極活物質について、ナノサイズ化により高容量化が可能であることが確認された。しかしサイクル特性には課題があり、将来自動車用電池に用いることを考えると、革新的なサイクル特性向上技術の開発が不可欠である。また、ナノサイズ粒子を使用した電極は、空隙率が大きくなるため体積エネルギー密度が低くなる傾向にあり、車載のためのコンパクトな電池に用いるためには電極の空隙率を下げる方法を検討する必要がある。実際に民生用電池を作成するためには試料の大量生産が不可欠であるが、本研究で開発したナノサイズ粒子の作成方法は実験室レベルでの技術であるため、大量生産に向けた改良が必要である。

## (9) 成果の実用化／活用

得られた研究成果に基づき、試料の大量生産方法を検討するとともに、サイクル特性向上のための改良を重ね、実用化に向けて企業に働きかけて共同研究を行うことで、産業界への普及が図られると考えられる。

電池の性能評価には従来は定電流法による容量評価が中心であったが、SVSC法などの定電圧充放電による反応解析も、複数の反応が並行して進行するような電池系において今後は重要な評価技術になっていくと考えられる。

## 2. 4. 6 活物質・カーボンナノ複合構造制御による高出力・高容量 Li イオン二次電池の研究開発（長崎大学、東北大学）

### （1）事業目的

本研究開発は、電極構成材料としての活物質・カーボン複合系材料に焦点を当て、効率的なイオン・電子移動ならびに固体内 Li 拡散を可能にするナノ複合構造の設計・構築を通して、Li イオン二次電池の高出力・大容量化に向けた高性能電極材料の開発を目的とした。

### （2）事業概要

平成 19～21 年度は「要素技術開発」において研究開発を進め、ナノ活物質や活物質・カーボン複合ナノ構造制御のための新しい技術を開発した。平成 22～23 年度は「次世代技術開発」に移行し、「要素技術開発」の成果を活かして、特に大容量特性を得るための新規正極および負極ナノ複合材料の開発を行った。

### （3）研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.6-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19 年度	20 年度	21 年度	22 年度	23 年度	
活物質・カーボンナノ複合多孔構造制御電極の開発						
(1)多孔カーボン合成			→			
(2)多孔カーボンの表面修飾と特性評価					→	
(3)オリビン系活物質多孔体の合成と特性評価			→			
(4)大容量負極材料の合成と特性評価					→	
ナノ活物質・ナノカーボン集積電極の開発						
(1)高出力型ナノサイズ活物質の合成プロセス開発					→	
(2)活物質／カーボンのナノ集積化電極作製プロセス開発と電極性能評価		→			→	
(3)大容量正極材料の合成と性能評価					→	
開発費用（円）	19 年度	20 年度	21 年度	22 年度	23 年度	総額
長崎大学	19,999,000	19,999,000	19,999,000	10,000,000	10,000,000	79,997,000
産総研・東北大	19,988,850	19,988,850	19,988,350	9,999,150	10,000,000	79,968,200



#### (4) 研究開発の実施体制

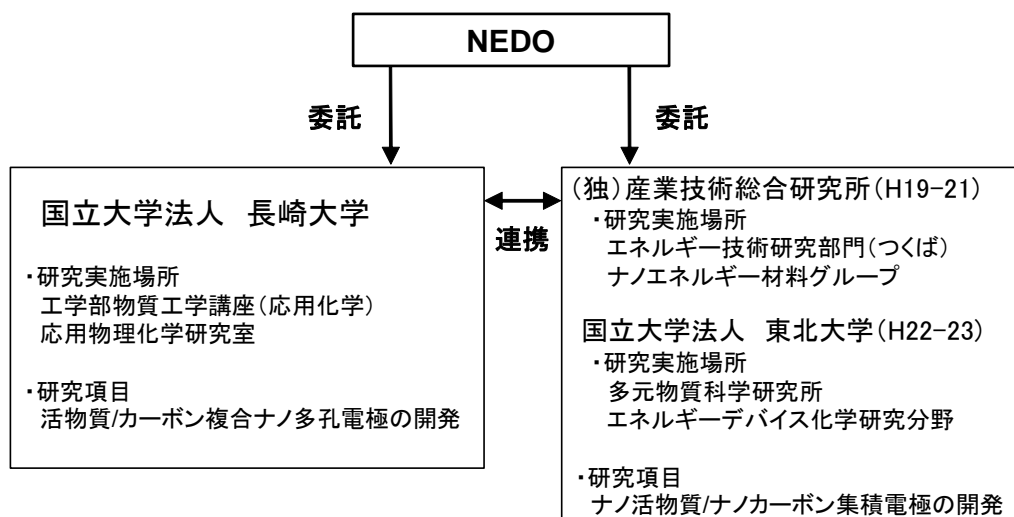


図 .2.4.6-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

##### 中間目標

平成 19～21 年度は「要素技術開発」の研究開発を行っており、その最終目標値 2.5 kW/kg, 200 Wh/kg に対する中間目標として、一方が最終目標値近く、片方が目標の半分程度を可能にする材料開発を設定した。そのために、活物質のナノ多孔化、ナノ結晶化、カーボンナノ複合化のための新規技術開発を行い、以下の材料性能の発現を目指す。

[正極材料] 活物質重量基準で 250Wh/kg, 5kw/kg または 500Wh/kg, 2.5kW/kg, 活物質・カーボン複合体重量基準で 200Wh/kg, 4kw/kg または 400Wh/kg, 2kW/kg

[負極材料] 電流密度 1.5～2 A/g の条件で 300～400 mAh/g 程度

##### 最終目標

平成 22～23 年度は「次世代技術開発」に移行し、「要素技術開発」で開発した技術を高容量活物質に適用し、新規な活物質・カーボンナノ複合材料の開発を目指した。

[正極材料] 2 電子容量活物質のナノ結晶合成およびカーボンコーティング技術を確立するとともに、各種のナノ結晶活物質の電極特性の評価を行い、以下の電極性能の発現を目指す。

・エネルギー密度：活物質基準で 1300Wh/kg, 複合体基準で 1160Wh/kg レベルの容量 (4.V 級材料の場合、活物質重量基準で 330mAh/g, 活物質・カーボン複合重量基準 290 mAh/g 程度)

・サイクル安定性：室温, 500 回サイクル後において活物質・カーボン複合重量基準で 80%以上の放電容量維持率

[負極材料] 合金系ナノ活物質のカーボンコーティング手法の開発, 合金系ナノ活物質のカーボンナノ多孔体への高分散担持法の開発。

・室温, 500 回サイクル後において, 活物質・カーボン複合重量基準で 1000 mAh/g 以上の可逆容量発現。

[電池性能評価] 正極・負極材料から 500Wh/kg 以上のエネルギー密度達成の見込みを示す。

## (6) 研究開発成果

### <成果1> ナノ多孔構造制御技術の開発（「要素技術開発」）

（内容）平成 19～21 年度「要素技術開発」において、コロイド結晶テンプレート法により、 $\text{LiMnPO}_4$  ナノ多孔体、 $\text{LiMnPO}_4$ ・カーボンナノ複合多孔体、 $\text{V}_2\text{O}_5$ /多孔カーボン複合体、ナノ多孔グラファイトの作製に成功し、これらのナノ構造制御が高速充放電特性や高容量化に有効であることを証明するとともに、中間目標の材料性能以上を引き出した。例えば、 $\text{V}_2\text{O}_5$ /多孔カーボンナノ複合体は 3 A/g の電流密度で 122 mAh/g, 5 A/g で 96 mAh/g の複合体重量基準容量を示し、480 Wh/kg で 14 kW/kg の優れた充放電特性が発現した。 $\text{LiMnPO}_4$ ・カーボン複合ナノ多孔体は、世界最高レベルの高いレート特性を発現し、エネルギー密度は活物質重量当りで 600～350Wh/kg であった。グラファイト材料は、ナノ多孔化することにより、一般の人造黒鉛粒子よりも出力特性に優れることを見出し、触媒による低温での簡便合成技術の開発にも成功した。

（達成度）合成技術開発◎，容量・エネルギー密度○，出力特性○

（成果の意義）カーボンナノ複合多孔構造制御により、高容量，高出力の両方の特性を兼ね備える新しい材料設計指針を提示するものであり，そのための新しい合成技術を開発するとともに，その効果を実証した。

（課題と取り組み）空隙が多くなると体積当りの特性は低下するため，活物質の充填率を向上させる取組みを進めている。

### <成果2> 活物質ナノ結晶合成技術の開発（「要素技術開発」）

（内容）平成 19～21 年度「要素技術開発」において，短時間で精密にサイズ制御されたナノ結晶を合成する新しい超臨界流体プロセスを開発し， $\text{LiFePO}_4$  や  $\text{LiMnPO}_4$  オリビン系活物質のナノ結晶材料の開発に成功した。また， $\text{Li}_2\text{Mn}_2\text{O}_4$  ナノ結晶材料において，ナノサイズ化による相転移エネルギーの低減により 2 電子反応容量の発現に初めて成功し，活物質基準で約 560Wh/kg, 5.6kW/kg の優れた充放電特性を発現させた。

（達成度）合成技術開発◎，容量・エネルギー密度○，出力特性○

（成果の意義）精密にサイズ制御された活物質ナノ結晶を簡便かつ大量に合成する新しい技術を開発するとともに，バルクでは発現しないナノ結晶特有の機能発現を見出し，充放電機能向上のためのナノサイズ化の有用性を実証した。

（課題と取り組み）活物質のナノ粒子は，導電性確保のためのカーボン複合など，電極作製上の工夫を必要とする。そこで，ナノ結晶の効率的なカーボンコーティング技術の開発についても研究を進めている。

### <成果3> 高容量正極材料の開発（「次世代技術開発」）

（内容）上記で開発した超臨界流体プロセス技術を利用して，平成 22～23 年度「次世代技術開発」において， $\text{LiCoPO}_4$  などの高電位オリビンナノ結晶材料や，より高容量が期待できるホウ素系活物質（ $\text{LiMBO}_4$ : M= Fe, Mn）ナノ結晶材料，さらには 2 電子反応容量が期待できるケイ酸塩系活物質（ $\text{Li}_2\text{MSiO}_4$ : M= Fe, Mn, Co, Ni）ナノ結晶材料の開発に成功した。ケイ酸塩系活物質ナノ結晶材料において 300 mAh/g 超の高容量発現に成功し，材料の容量そのものは目標値に達している（放電電位が低めであるため，エネルギー密度は 760Wh/kg 程度）。サ

イクル安定性については、500 サイクルまでの測定を行うまでには至っていないが、数十回の測定においては、良好なサイクル特性を示すことを確認している。

(達成度) 材料合成◎, 容量 , エネルギー密度△, サイクル安定性△

(成果の意義) ケイ酸塩系活物質において 2 電子反応相当の容量発現に成功したのは、これまでに例のない画期的な成果である。

(課題と取り組み) 高容量発現に成功したが、放電電位が低いためエネルギー密度の値としては不十分であった。材料組成の制御等を行ってより高電位化を図ることで、高エネルギー密度を有する正極材料の開発に取り組んでいる。

#### <成果 4> 高容量負極材料の開発 (「次世代技術開発」)

(内容) カーボン細孔内でナノ Si を *in situ* で合成して得た Si/多孔カーボン複合材料の合成および Si ナノ粒子の新規なカーボンナノコーティング技術の開発に成功した。カーボンコート Si 試料においては、初期は 3000 mAh/g 程度の放電容量が発現するものの、サイクルとともに容量が低下する。しかしながら、30 サイクル以降は 700mAh/g で一定の放電容量を維持し、サイクル安定な可逆容量の発現が可能であることを示した。一方、Si/多孔カーボン複合材料は、Si 複合化量が少なく 600~400 mAh/g 程度の放電容量の発現にとどまるが、Si 重量当りの容量は 3000 mAh/g 以上の大きなものであった。サイクル安定性にも優れ、安定な負極材料として大いに期待できる。

(達成度) 材料合成◎, 容量○, サイクル安定性△

(成果の意義) ナノ多孔カーボン細孔内でナノ Si を *in situ* 合成することにより、サイクル安定性を大幅に向上できることを見出した。また超音波照射のみで Si ナノ粒子表面にカーボンナノ薄膜を形成させる新しい技術を開発し、またこれは正極ナノ活物質などにも適用可能であり、従来のカーボン複合化技術よりも効率的な新技術として大いに期待される。

(課題と取り組み) 複合体としての容量がまだ小さい状況にある。ナノ Si のカーボン細孔内への担持量が少ないため、その最適化による高容量かつ安定な負極材料の開発に取り組んでいる。

表 .2.4.6-2 研究成果 (一覧)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
材料合成技術	新規かつ簡便技術の開発			上述の通り
正極材料開発 ・エネルギー密度	活物質基準 1300Wh/kg (4V 級想定 325mAh/g) 複合体基準 1160Wh/kg (4V 級想定)	330mAh/g 以上 762Wh/kg(2.5V 級)		300mAh/g 以上の高容量発現を可能にしたので、高電位化により達成できる見込あり。
・サイクル安定性	500 サイクル後の維持率 80%	20 サイクル後 75%		
負極材料開発	複合体基準で、500 サイクル後 1000mAh/g 以上	60 サイクル後 700 mAh/g		Si 含有量等の最適化により達成できる見込あり。
セル特性	500Wh/kg 以上の見込を示す。	上記正極・負極材料で 440Wh/kg が見込まれる。		2.5V 級セルでセル重量として負極の 4 倍を仮定

## (7) 知的財産権等

本プロジェクトにおける知的財産権等の件数のまとめを表 .2.4.6-3 に示す。

表 .2.4.6-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	0	0	2	2	1	5
うち、外国出願	0	0	0	2	1	3
国内登録	0	0	0	0	0	0
海外登録	0	0	0	0	0	0
論文	0	2	2	3	5	12
うち、査読付き論文	0	2	2	3	5	12
研究発表・講演	2	17	21	19	13	82
受賞実績	0	0	0	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載	0	2	1	3	5	11
展示会への出展	0	0	0	0	0	0
合計	2	21	26	27	14	100

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

正極、負極材料ともに、ナノ構造制御による高容量材料開発のある程度のメドを立てることができたが、最終目標を十分に満足するまでには至っていない。「要素技術開発」から「次世代技術開発」に移行し、最終目標を睨んで対象材料が変わり、研究開発期間2年の短期間で目標到達するには不十分であったと考えられる。しかしながら、両極材料ともに、新しい材料開発技術を開発し、さらなる高性能化に向けて研究開発するための指針は明確に見通せている。すなわち、正極材料開発においては、ナノ結晶合成を通して高容量特性の発現に成功していることより、材料組成の制御等により高電位化を図ることで、目標の高エネルギー密度を有する材料開発が期待できる。負極材料開発においても、カーボンナノ細孔内でのSiの*in situ*合成を可能にし、得られた複合材料が高いサイクル安定性を示すことを明らかにしていることより、担持量の最適化による高容量かつ安定な負極材料の開発が期待できる。

## (9) 成果の実用化／活用

本開発で得た材料は、高容量電極材料として高いポテンシャルを有しており、エネルギー密度のさらなる向上に加えて、数千～数万のサイクル安定性等の実用レベルの性能がクリアできれば、十分な候補材料になり得る。製造プロセスにおいても、開発した新技術（超臨界合成、超音波によるカーボンコーティング、Siの*in situ*合成）は大量合成への展開も可能であり、活物質構成元素の資源も豊富であるため、コストダウンも可能である。以上について、研究開発を5年程度行い、その後実電池としての性能評価、安全性評価を行うことにより、電気自動車用電池等への実用化が視野に入ると期待される。

本研究開発は、ナノレベルでの活物質構造制御およびカーボンナノ複合化による材料性能の飛躍的向上を行うもので、従来のLiイオン二次電池材料開発にはなかった視点での開発である。従来のLiイオン二次電池の限界を超えた高性能な電池開発に向けて新しい開発指針を提案す

るもので、そのインパクトは大きいと考えられる。

(10) その他

## 2. 4. 7 電極作製にガスデポジション法を利用したリチウム二次電池の研究開発（鳥取大学）

### （1）事業目的

現在のリチウム二次電池の負極には黒鉛が用いられているが、さらなる高容量化のために、その代替材料として金属・合金系活物質が提案されている。しかしながら、これらには充放電第1サイクルにおける容量可逆性が低く、またサイクル寿命が短いなどの課題がある。この問題を解決するために、本研究では新しい電極作製法としてガスデポジション（GD）法を採用して検討を行った。GD法では、原料となる活物質粉末と加圧されたキャリアガスとで構成されるエアロゾルがノズルから音速程度の高速度で集電体基板上に吹き付けられ、その際に活物質同士が塑性変形を起こして凝着し基板に強く密着して厚膜電極が得られる。また厚膜内部の随所に空隙が形成されることで充放電時の活物質の体積変化で発生する応力が緩和されるものと期待できる。そこで、本研究ではこの手法を用いることにより活物質粒子間および粒子-集電体基板間の密着性を格段に向上させた電極を創製し、高エネルギー密度と高出力密度を併せ持つ革新的な電池の開発を実施した。特に、高容量かつ長サイクル寿命の金属・合金系負極の創製を最も重要なテーマと位置づけ、これについて、高容量のケイ素と高サイクル安定性を有する活物質とのコンポジット化、高容量活物質の性能を活かすための処置、高容量活物質に適した電極/電解質界面の形成の3種類のアプローチにより研究開発を行った。

### （2）事業概要

炭素以外の14族元素（Si、GeおよびSn）もリチウム貯蔵性物質として知られる。なかでもケイ素は、最も高い容量を生み出す可能性のある元素として期待されている。しかしながら、ケイ素は電子伝導性が低く、また充放電時の激しい体積変化が原因となり活物質層が微粉化してしまうため、そのサイクル安定性は非常に乏しいものになってしまう。これを改善させる目的で合金化を行うと容量が大きく損なわれる結果となり、今のところ有望な材料は見出されていない。そこで上記の のアプローチにおいては、やはり主として単体のケイ素を負極材料に用いることが肝要であるととらえ、上記の欠点を補う性質を持つ様々な金属、合金、もしくは化合物をケイ素とコンポジット化させ、さらにGD法を適用してこれを厚膜化することにより、高容量と高サイクル安定性を兼ね備えた電極の創製を試みた。コンポジット化させる物質としてRu、Cu、Ni、Ni-Pなどを選択し、これらは無電解析出（ELD）法を用いてケイ素粒子上に部分的に被覆させたコンポジット粉末を負極材料に用い、被覆による電極性能の改善を検討した。

一方、高容量活物質の性能を活かすための処置として（ ）メカニカルアロイング（MA）法によりケイ素にリチウムをプレドープした負極についても性能の評価を行い、プレドープ量の調節による初回不可逆容量の低減を試みた。また、現行の黒鉛負極の場合と同様に、ケイ素負極においても電極-電解質界面が電極性能に多大な影響を与えることも最近わかってきた。そこで、創製したケイ素系電極の性能を最大限に発揮させるためのアプローチ（ ）として、リチウムイオンの移動を効率的に行える電極-電解液界面を形成するイオン液体を電解液として用いケイ素負極の充放電サイクル性能の向上を目指した。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.7-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
ケイ素と他の活物質とのコンポジット化						
高容量活物質に適した電極/電解質界面の形成						
高容量活物質の性能を活かすための処置						
開発費用 (百万円)	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
鳥取大学	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	99.6

### (4) 研究開発の実施体制

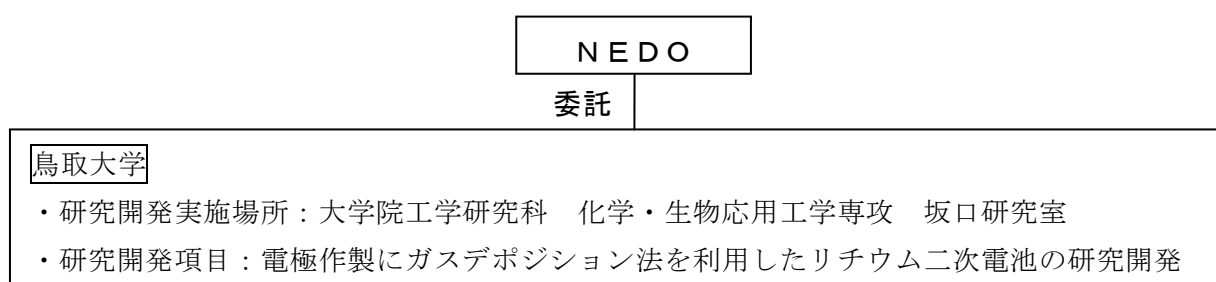


図 .2.4.7-1 研究開発の実施体制

### (5) 研究開発目標と根拠

#### 中間目標

Si を含有する種々のコンポジット厚膜電極を作製し、1000 サイクル( 1)後の負極放電容量 (Li 脱離) として 780 mAh g<sup>-1</sup>( 2)を目標値とする。また、初期容量可逆性の向上については、85%以上の初期可逆率を目指す。

1 ...電気自動車に搭載する電池を想定し、1 充電走行距離を約 500 km、年間平均走行距離を 10000 km、平均車齢を 15 年とすると、サイクル寿命の最終目標値は 300 サイクルとなる。実際にはその 3 倍程度の余裕が必要とみなし、サイクル寿命の目標値は 1000 サイクルとした。

2 ...負極容量の目標値を設定するために、現在市販されている 150 Wh kg<sup>-1</sup>のパック電池(単セルレベルで 185 Wh kg<sup>-1</sup>、2250 mA h、3.7 V) を基に電極活物質量を推定した。この電池においては全体の重量が 45 g となるため、正極と負極の活物質量は全量で半分の約 23 g になる。活物質以外の部材の重量は減らすことができないものとして、この 23 g の活物質量を前提にした場合、現行の最大の正極理論容量で 220 mA h g<sup>-1</sup>から正極活物質重量 17.6 g、負極重量 5.4 g となるため、負極容量 780 mA h g<sup>-1</sup>という目標値を算出した。

## 最終目標

Si を含有する種々のコンポジット厚膜電極を作製し、1000 サイクル後の負極放電容量として  $2000 \text{ mAh g}^{-1}$  ( 3 ) を目標値とする。また、初期容量可逆性の向上については、90%以上の初期可逆率を目指す。

3 ...電気自動車に搭載する電池の単位重量当たりのエネルギーが  $1 \text{ Wh kg}^{-1}$  であればその航続距離は約 1 km であると言われている。1 充電走行距離が 500 km となる電気自動車には  $500 \text{ Wh kg}^{-1}$  のエネルギー密度が要求される。したがって、上記の中間目標値 ( $780 \text{ mAh g}^{-1}$ ) の 3 倍程度の負極容量が必要であると考え、 $2000 \text{ mAh g}^{-1}$  を最終目標値とした。

## (6) 研究開発成果

表 .2.4.7-2 研究成果 (一覽)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
1000 サイクル後の放電 (Li 脱離) 容量	$2000 \text{ mA h g}^{-1}$	$780 \text{ mA h g}^{-1}$		
初回容量可逆率	90%	100%		
イオン液体電解液の Si 負極への適用	負極性能の改善, およびそのメカニズム解明			

### <成果 1 >

(内容) 高容量のケイ素と高サイクル安定性を有する活物質とのコンポジット化

(達成度) △

(成果の意義) 機械的強度に優れた Ni-P を Si 粒子上に少量被覆させることで厚膜電極の耐久性を向上させ、Si 系負極の欠点であるサイクル安定性の乏しさを大幅に改善できた。これに加え、被覆層の形状を最適化することで高性能な電極を安定して再現することにも成功した。

(課題と取り組み)

ELD 法により種々の金属・化合物をケイ素粒子上に部分的に被覆させたコンポジット粉末を原料に用いて GD 厚膜電極を作製しこれらの性能を評価した。被覆層を Ru, Cu, Ni, および Ni-P とした電極においてサイクル性能が顕著に改善されることを見出した。特に、ケイ素の利用率を増大させるため少量の Ni-P を被覆させた電極はこれまでにない高性能を発揮した。一方で、その小さい被覆量のために性能にばらつきが生じやすいという問題が発見されたため、被覆形状の最適化による性能の改善を目的として、Ni-P 層の被覆条件の一つであるめっき浴の pH を酸性から中性へ変化させて検討を行った。その結果、図 .2.4.7-2 に示す透過型電子顕微鏡 (TEM) 写真のように、酸性浴において調製した従来の試料(b)では Si 粒子上に Ni-P 層が偏析していたが、中性浴のもの(a)は偏析することなく広範囲に斑点状で析出していることが確認された。図 .2.4.7-3 は Ni-P/Si 厚膜電極の充放電サイクル性能を示す。再現性評価のため各電極に対して全く同じ手法で作製した二つの試料について充放電試験を行ったところ、酸性浴で調製した Ni-P/Si を用いた電極では初回サイクルで約  $600 \text{ mAh g}^{-1}$ 、1000 サイクル後で  $300 \text{ mAh g}^{-1}$  の放電容量の差異が認められたが、中性浴の場合のそれではその差異を半分程度にまで大きく低減できることが明らかになった。この中性浴での電極は、1000 サイクル



ル後においても  $780 \text{ mA h g}^{-1}$  の大きな放電容量を維持し、研究代表者のグループがこれまで得たものの中で最も優れた性能を有する電極であることがわかった。これらの電極の押し込み弾性率を評価した結果、従来の酸性浴での試料を用いて作製した厚膜は、Si 単独電極のものよりも大きな値を示したものの、その標準偏差は非常に大きかった (図 .2.4.7-4)。これに対し、新たに検討し電極性能の差異が大きく改善された中性浴の試料においては、その弾性率のばらつきは酸性のものに比べ大幅に低減された。これは膜全体に Ni-P 層が均一に存在していることが原因であると考えられ、このことから Ni-P 層を Si 粒子上の広範囲に斑点上に析出させたことが電極性能のばらつきの低減につながったことが裏付けられた。

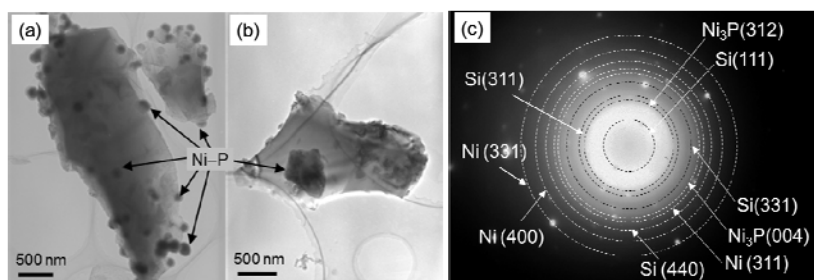


図 .2.4.7-2 (a) 中性めっき浴、および (b) 酸性めっき浴中で調製した Ni-P 被覆 Si 粒子の TEM 像. (c) 試料(a)の制限視野電子回折パターン.

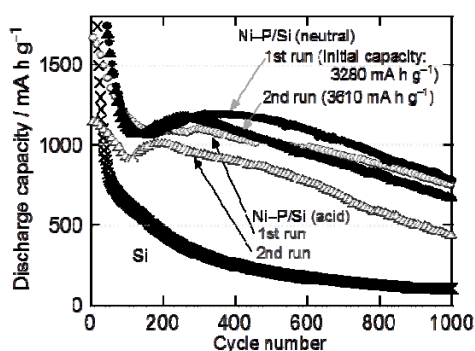


図 .2.4.7-3 中性および酸性めっき浴中で調製した Ni-P 被覆 Si を用いた電極のサイクル性能.

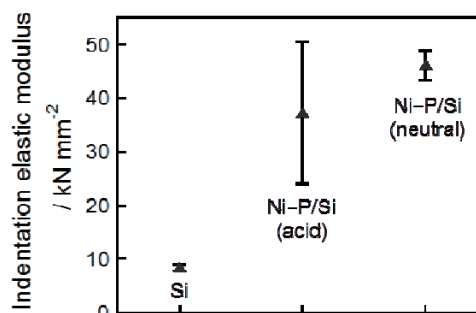


図 .2.4.7-4 それぞれの Ni-P 被覆 Si 電極の押し込み弾性率の比較.

## < 成果 2 >

(内容) 高容量活物質の性能を活かすための処置

(達成度) ◎

(成果の意義) Si 系負極の欠点の一つである初回容量可逆率の低さについて、Li プレドープが特筆すべき効果があることを明らかにした。

(課題と取り組み)

Si 負極は初回サイクルの不可逆容量が大きくサイクル安定性に乏しいという問題を抱えていることは先に述べた通りである。これに対する一つの試みとして、Si に Li をプレドープ(合金化)することが有効であると考えている。そこで、MA 法を用いて Si に Li を様々な濃度でプレドープさせた試料を合成し、初期容量可逆性の向上を図った。種々の組成の  $\text{Li}_x\text{Si}$  ( $x=0.34, 0.78, 1.71$ ) を室温下での MA 処理を行うことにより合成した。得られた MA 処理試料粉末を原料として、GD 法により銅箔基板上に  $\text{Li}_x\text{Si}$  の厚膜を形成させて電極を作製し、こ

れを試験極とした三極式セルを構築し充放電試験を実施した。なお、Li 添加した試料は大気中で活性であるため、研究代表者らが独自に設計した MA 装置、GD 装置、および精密電子天秤を組み込んだガス循環精製機付グローブボックスを本事業の助成により新たに導入し、これを用いて水分と酸素が十分に除去された不活性ガス雰囲気内で試料調製から電極作製・セル構築までの一連の操作を行った。図 .2.4.7-5 に  $\text{Li}_x\text{Si}$  厚膜電極の初期充放電曲線を示した。いずれの電極においても、充電側 0.1 V、放電側 0.5 V 付近において Si の Li 挿入-脱離にともなう相変化に起因する電位プラトーが観測された。初回容量可逆率については、Li 添加量の増加とともに向上し、特に  $\text{Li}_{1.71}\text{Si}$  の組成のときについては、ほぼ 100%の可逆率を達成できた。このように、Si への Li 添加量を調節することで初回サイクルの容量可逆性を改善できることが示された。しかしながら、2 サイクル目以降では容量可逆率は大きく減少し、これらの電極のサイクル安定性は特に改善される兆候は見られなかった (図 .2.4.7-6)。

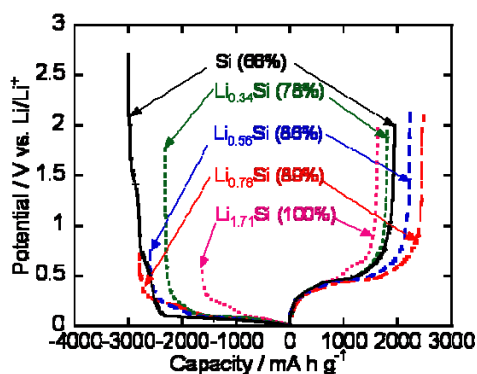


図 .2.4.7-5 MA 法により Li を事前に添加したケイ素電極の初回充放電曲線の比較。

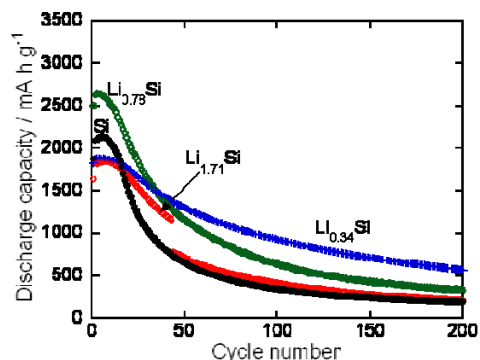


図 .2.4.7-6 Li を事前に添加したケイ素電極の充放電サイクル性能。

### < 成果 3 >

(内容) 高容量活物質に適した電極/電解質界面の形成

(達成度) ○

(成果の意義) 車載用電源には高容量のみならず高い安全性も要求されるため、難揮発性、難燃性、広い電位窓などの特長を有するイオン液体電解液の適用が期待されている。このサブテーマでは、リチウムイオンの移動を効率的に行うことができるケイ素負極-電解質界面を形成し、研究代表者らのグループが創製したケイ素系負極の性能を最大限に発揮させることができるイオン液体電解液を見つけ出すことに成功した。

(課題と取り組み)

基礎的知見を得るため、まずコンポジット粉末ではなく単体の Si 粉末を原料とした GD により Si 厚膜負極を作製し、この電極を試験極として対極に Li 板を用いた二極式のコインセルを構築して定電流充放電試験を行った。N-methyl-N-propylpiperidinium bis(fluorosulfonyl)amide ([PP13<sup>+</sup>][FSA<sup>-</sup>])、および N-methyl-N-propylpiperidinium bis(trifluoromethanesulfonyl)amide ([PP13<sup>+</sup>][TFSA<sup>-</sup>]) に対してリチウム塩である lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)amide (LiTFSA) を濃度 1 M となるように溶解させ電解液として使用した。一般的な有機溶媒系の電解液として 1 M  $\text{LiClO}_4/\text{propylene carbonate}$  (PC) を用いた実験も行った。図 .2.4.7-7 はこれらのイオン液体および PC を用いた電解液中における Si 厚膜電極の初回充放電曲線を示す。充電側 0.1 V 付近と放電側 0.4 V 付近にプラトー

がみられ、これは Si と Li の合金化・脱合金化反応を示している。したがって、本研究で取り上げたイオン液体電解液の場合においても有機溶媒系電解液の時と同様の反応が行われていることを確認できた。これまでの研究では GD 法で得た Si 負極に対しては、従来の有機溶媒を用いる限り初回可逆率は最高で 80%程度であった。一方、本研究で検討した [PP13<sup>+</sup>][TFSA<sup>-</sup>]イオン液体電解液においてはこれを上回る 85%の初回可逆率を達成できた。他方、[PP13<sup>+</sup>][FSA<sup>-</sup>]の場合では PC をしのぐような値は示さなかったものの、初回充放電容量では他の電解液を大幅に上回る非常に高い値 (2980 mA h g<sup>-1</sup>) が得られた。図 .2.4.7-8 はこれらのイオン液体電解液を用いたときの充放電サイクル性能を示している。イオン液体電解液中での Si 負極では PC 電解液でみられるような急激な容量衰退が起きず、良好なサイクル性能を示した。特に、[PP13<sup>+</sup>]と[FSA<sup>-</sup>]との組み合わせからなるイオン液体では、150 サイクルまで約 1500 mA h g<sup>-1</sup>の容量を維持することができた。この性能改善のメカニズムを探るため、これらの電解液に対する電気化学的インピーダンス分光 (EIS) 測定を実施した。[PP13<sup>+</sup>][FSA<sup>-</sup>]の場合の電極-電解液界面を Li<sup>+</sup>が通過するときの界面抵抗 ( $R_{if}$ ) はサイクル後も安定して低い値に留まっており、この電極が優れた性能を示したことと対応しているものと考えている。一方、[PP13<sup>+</sup>][TFSA<sup>-</sup>]電解液の場合に  $R_{if}$  の値が非常に高くなったのは、[FSA<sup>-</sup>]と[TFSA<sup>-</sup>]の Li<sup>+</sup>に対する配位構造の違いによるものと考えられる。すなわち、[TFSA<sup>-</sup>]の方がより Li<sup>+</sup>を脱配位しにくいいため Si への Li<sup>+</sup>挿入が困難になっているものと思われる。

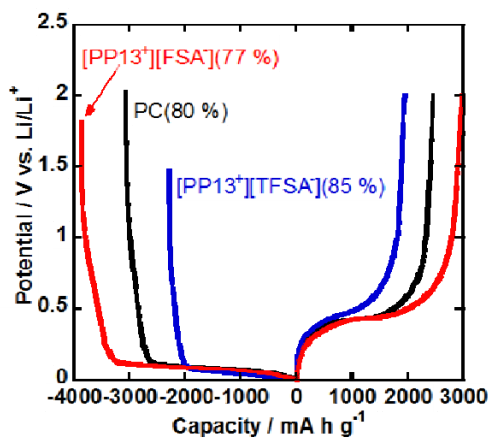


図 .2.4.7-7 イオン液体電解液を適用したケイ素単独負極の初回充放電曲線の比較.

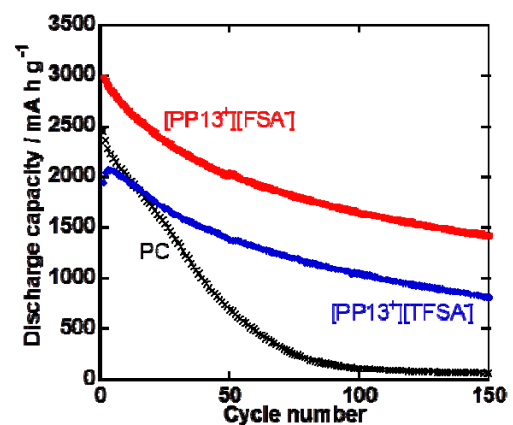


図 .2.4.7-8 イオン液体電解液中のケイ素電極の充放電サイクル性能の比較.

### (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.7-3 に示す。

表 2.4.7-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	1	0	0	2	0	3
うち、外国出願	0	0	0	1	0	1
国内登録	0	0	0	0	0	0
海外登録	0	0	0	0	0	0
論文	0	0	1	3	5	9
うち、査読付き論文	0	0	1	3	4	8
研究発表・講演	4	13	16	19	16	68
受賞実績	0	0	0	2	1	3
新聞・雑誌等への掲載	1	4	8	6	1	20
展示会への出展	0	0	0	0	0	0
合計	6	17	26	36	27	112

#### (8) 今後の課題と課題解決の見通し

・未達成課題とその理由について

1000 サイクル後での放電容量については、黒鉛の理論容量の 5 倍以上にもおよぶ値 ( $2000 \text{ mA h g}^{-1}$ ) を目標値として掲げた。Ni-P を斑点状に析出させた Si 粒子を用いた厚膜負極は 1000 サイクル後においてさえも  $780 \text{ mA h g}^{-1}$  という高容量を維持した。これは黒鉛の理論容量の 2 倍以上の値であり注目に値する成果ではあるものの残念ながら目標値には至らなかった。この主な理由は、充放電時の Si の体積変化にともなう応力の蓄積に、活物質のコンポジット化と GD 法による厚膜化を適用してもなお電極が耐えられなかったためであると考えられる。

#### (9) 成果の実用化／活用

本研究開発で実施した GD 法による電極作製は導電助剤や結着剤を必要とせず、活物質本来の性質を短い試験期間で見極めるのに最適な手法である。したがって、様々な活物質に対して GD 厚膜電極によるスクリーニングを実施し、目立った成果が得られた活物質について従来の塗布法などを用いて巻回型もしくはラミネートシート型のセルを作製し電池の充放電性能や安全性の試験を行う。本研究開発で得た高容量ケイ素系負極を、本事業の他のグループで開発された機能性結着剤、高性能イオン液体電解液および高容量酸化物系正極等を組み合わせることで電池性能が飛躍的に向上するものと期待される。したがって、ケイ素の高容量を活かした高エネルギー密度型の電池が実現し、電気自動車・電動自転車への用途が有望である。

## 2. 4. 8 鋳型法を利用した革新的リチウムイオン電池負極材料の開発研究 (東北大学)

### (1) 事業目的

「鋳型」を利用することで、ナノレベルで構造を制御した純炭素負極材料および Si/炭素複合負極材料を調製し、これを利用した超高エネルギー密度リチウムイオン電池の開発を行う。

### (2) 事業概要

無機鋳型物質を利用し、高性能負極材料の開発を行う。最終的に炭素/Si負極にて初期可逆容量2000 mAh/g以上、100サイクル後の容量1500 mAh/g以上の達成を目指す。Siのみならず炭素側の容量を最大限に利用する検討も行う。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.8-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
研究項目A-1 緻密な炭素層の形成		→				
研究項目A-2 多孔質炭素内部構造の最適化		→				
研究項目A-3 キャビティ容量発現のメカニズム解明		→				
研究項目B-1 ゼオライトの電気還元		→	→			
研究項目B-2 炭素/SiO <sub>2</sub> ナノ複合体の電気還元		→	→	→		
研究項目B-3 炭素/Si 複合体の構造最適化			→	→	→	
開発費用 (百万円)	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
東北大学	14.8	19.8	20.0	20.0	20.0	94.6

#### (4) 研究開発の実施体制

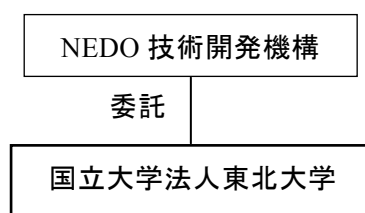


図 .2.4.8-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

##### 中間目標

平成 19 年度目標値	初回充電時の容量が 1000 mAh/g 以上
平成 19 年度目標値	初回充電効率が 80 %程度
平成 19 年度目標値	表面積が 40 m <sup>2</sup> /g 以下
平成 20 年度目標値	可逆容量が 1300 mAh/g 程度
平成 20 年度目標値	1000 サイクル後の可逆容量が初期可逆容量の 60 %以上
平成21年度目標値	キャピティ容量が最大となる細孔径を明らかにする
平成21年度目標値	初期可逆容量が1300 mAh/g以上
平成 21 年度目標値	電気還元において、還元率 80%以上を達成。
平成 21 年度目標値	Si 粒子の周囲に空隙が存在することによる不可逆容量低減効果を実証。
平成 21 年度目標値	炭素/Si 複合体において、可逆容量で 800 mAh/g を達成。
平成22年度目標値	リチウムが不可逆的にトラップされるサイトの解明
平成22年度目標値	初回クーロン効率が60%以上
平成 22 年度目標値	電気還元により合成される炭素/Si 複合体において、空隙サイズを Si 粒子サイズの 4~5 倍に調整。
平成 22 年度目標値	炭素/Si 複合体において、可逆容量 1600 mAh/g を達成。

【根拠】炭素の容量と Si の容量を最大限に引き出し、最終目標を達成するためのマイルストーンとして、各年度で達成すべき性能値を見積り、これらを目標値として設定した。

##### 最終目標

最終目標値 炭素/Si/複合体において可逆容量 2000 mAh/g 以上、100 サイクル後の容量 1500 mAh/g 以上を達成。

最終目標値 負極材料として高容量かつ長寿命を実現する炭素/Si 複合体の理想構造を提案

【根拠】正極容量 183 mAh/g、4 V にての作動を仮定してリチウムイオン電池パックのエネルギー密度を負極の容量に対して計算すると、負極容量が 1000 mAh/g を超えた時点で電池パックのエネルギー密度の増加率は鈍化し、負極容量を 2000 mAh/g 以上に増加させても殆ど効果が無くなる。そこで初期容量 2000 mAh/g を目標値とした。また、最低限のサイクル特性目標として、100 サイクル後に初期容量の 75%保持 (1500 mAh/g) を掲げた。単に数値目標の達成だけではな

く、理想構造を提示できれば産業界に対する貢献が大きいものと考え、この点も最終目標に掲げた。

## (6) 研究開発成果

表 .2.4.8-2 研究成果 (一覧)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
初期可逆容量	2000 mAh/g	2550 mAh/g		
100サイクル後の可逆容量	1500 mAh/g	1500 mAh/g		
炭素/Si 複合体	理想構造の提案	汎用の Si ナノ粒子から出発し、1つの理想構造を実現できた。		

### <成果1>

(内容) 純炭素系負極および炭素/Si 負極に関し、様々な新規ナノ構造を持つ材料を調製し充放電性能評価を行った結果、最終的に製造コストが最も低く抑えられなおかつ高容量・長寿命を達成できる材料として、市販の Si ナノ粒子を厚さ約 10 nm の炭素ナノ薄膜で均一に被覆した炭素/Si 複合体が最も優れていることを見出した。初期放電容量は 2550 mAh/g (0.08C レート)、初期クーロン効率は 86%である。

(達成度) ◎

(成果の意義) 近年論文ベースでは炭素/Si 負極材料で初期容量 1500 mAh/g を上回りなおかつサイクル特性に優れるものも多くみられる。しかしこれらはいずれも特殊な方法によって合成された材料ばかりであり、量産化は困難である。本研究において開発した材料は、市販の Si ナノ粒子を出発材料として利用しているため量産化が容易である。

(課題と取り組み) 単純に充放電を繰り返すと、100 サイクル後の容量は 1390 mAh/g に低下する。これを回避する方法として<成果2>を見出した。

### <成果2>

(内容) <成果1>で調製した炭素/Si 複合負極の充放電サイクルに伴う構造変化を詳細に調べたところ、試料の構造は 5~20 サイクルの間に大きく変化し、20 サイクル目には Si と炭素が均一に混合した樹枝状骨格となり、高レート特性と良好なサイクル特性を示した。しかし、更にサイクルを続けると樹枝状構造は完全な乱雑構造に変化し、充放電特性が低下した。そこで、構造変化を抑制するため、Li 挿入容量を 1500 mAh/g ( $\text{Li}_{1.8}\text{Si}$  相当) に制限して充放電測定を行った結果、100 サイクル後にも樹枝状構造が維持され、良好なレート特性 (3.3C で 1500 mAh/g) とサイクル特性 (100 サイクル後に約 1500 mAh/g) を示した。

(達成度) ◎

(成果の意義) 従来の黒鉛負極 (372 mAh/g) の約 4 倍である 1500 mAh/g もの容量を 100 サイクルの間一定に保つことに成功した。また、3.3C のレートでも 1500 mAh/g を達成した。すなわち、大容量、高出力、長寿命の負極材料の開発に成功した。

(課題と取り組み) 100 サイクル以上の 1000 サイクル程度までの長期の安定性についてはまだデータ採取ができておらず、今後の課題として残っている。

### <成果 3 >

(内容) Si ナノ粒子を厚さ約 10 nm の炭素ナノ薄膜で均一に被覆した材料を、充電深度  $Li_{1.8}Si$  以下でサイクルさせると、Si/炭素複合体は構造変化により Si と炭素が均一に混合した樹枝状構造となる。この樹枝状構造の枝の幅は数 nm~数十 nm と細いため Si の内部抵抗は小さく、しかも炭素が導電パスの役割をしているためレート特性に優れる。また、枝の間隙には Si の膨張を緩和するバッファ空間が存在するためサイクル特性に優れる。充放電に伴う構造変化により自然に形成されるナノサイズの樹枝状構造が 1 つの理想構造であることを見出すことができた。(達成度) ◎

(成果の意義) 高容量、高出力、長寿命を実現する理想的な構造をもつ炭素/Si 複合体が、比較的安価なプロセスにより実現できる点を明らかにした。

(課題と取り組み) 100 サイクル以上の 1000 サイクル程度までの長期の安定性についてはまだデータ採取ができておらず、今後の課題として残っている。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.8-3 に示す。

表 .2.4.8-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19 年度	20 年度	21 年度	22 年度	23 年度	計
特許出願			1		1	2
うち、外国出願					1	1
国内登録						
海外登録						
論文					2	2
うち、査読付き論文					2	2
研究発表・講演		3	3	5	8	19
受賞実績		1	1	1	1	4
新聞・雑誌等への掲載						
展示会への出展					1	
合計		4	5	6	13	28

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

今後の課題としては、1000 サイクル以上の長期サイクル耐久性の達成である。「Si/C ハイブリッド樹枝状構造」を基にし、Si ナノ粒子のダウンサイズ化や炭素層の構造最適化によりこの要求はクリアできると予想される。



## (9) 成果の実用化／活用

成果の実用化／活用に関しては大量生産、製造コストの低減が求められる。現在、企業との連携を進めている。「Si/C ハイブリッド樹枝状構造」は充放電のサイクル中に自己組織化的に形成される構造なので、その前駆体である Si/C ナノ複合体さえ低コストで大量生産できればこの問題もクリアできる。今回開発した方法では、前駆体となる Si/C ナノ複合体は、Si ナノ粒子に CVD 法で炭素被覆するという極めて単純な方法である。したがって、プロセスの工夫を行えば大量生産はそれほど困難ではないと予想され、今後広く普及することが十分に期待できる。

## (10) その他

我々は鋳型法によるアプローチにより、Si、Si の周囲の空間、炭素の各構造を精密に制御し、どの構造がどのように充放電特性に影響するのかを精密に調べた。その結果、Si を負極として利用するには下記の点が重要である事を見出した。

- 1) Si のドメインサイズは数十 nm 以下であること
- 2) 導電パスの役割をする炭素が均一に Si に接触していること
- 3) Si と炭素は強固に接触していること
- 4) Si の含有量は 70～80%程度にすること
- 5) 充電深度を  $\text{Li}_{1.8}\text{Si}$  以下でサイクルさせることで劣化を劇的に改善できること

鋳型法は材料調製の方法としては高コストで実用化が困難であるが、我々は鋳型法により得られた知見を利用する事で、最終的に鋳型を用いない安価なプロセスにより上記の要求 1)～5) を全て満たす材料の調製に成功した。

特に近年、Si/C を含む Si 系負極材料の開発が世界中で活発である。しかし、特殊な合成法により調製した Si ナノワイヤーなどの Si ナノ材料を用いるものや高価なシラン CVD による調製法が殆どであり、量産化および実用化は極めて困難であった。本研究開発では、世界に先駆けて実用化に極めて近い簡便な方法で高容量、高出力、長寿命な負極材料を調製する事に成功した。

## 2. 4. 9 構造規制型新規金属負極の研究開発 (首都大学東京)

### (1) 事業目的

リチウム二次電池のエネルギー密度を向上させるためには、炭素に代わる負極材料や新規な考え方に基づいて開発された負極材料が必要である。金属リチウム負極および合金系負極は高容量・高出力の電極材料として注目され、これまでに多くの研究がなされてきた電極群である。しかし、それぞれに問題点があり実用化には至っていない。本研究では、これまで行われてきた研究開発の延長線上に大きな期待を持つことはできないと考え、これまでの視点とは異なる切り口で研究開発を進めた。電極の構造をマイクロメートルオーダーで規則化することで、金属リチウム負極および合金系負極へ実用レベルの性能を付与し、自動車に搭載可能な性能を有した新規リチウム二次電池の実現を図った。

### (2) 事業概要

リチウム二次電池の新規負極（金属リチウム、合金系）の研究開発を、三次元規則配列多孔体を用いて行った。このような構造を使用するメリットは、局所電流密度を抑えることで電流分布を均一化できる点、電極表面形態の可逆性を維持できる点である。金属リチウム負極に関しては、多孔構造の最適化と適切な材料選択を行い、合金系負極に関しては、孔サイズ、合金組成の最適化を行い、それぞれ実用的な性能の達成を目的とした。また、これらの負極材料の研究開発を通して、実電池の性能として重量エネルギー密度  $500 \text{ W h kg}^{-1}$  の見通し（ただし、正極のエネルギー密度が  $250 \text{ mA h g}^{-1}$  程度と仮定する）を立て、各電極に関して事業化を念頭に安価な作製プロセスについて検討を行った。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 2.4.9-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
(3)-1 金属リチウム負極						
多孔性金属リチウム負極の開発 (Ni および Cu 集電体の開発)	→					
多孔性金属リチウム負極の開発 (金属リチウムの三次元多孔化)		→				
構造規制多孔性ポリイミド膜を用いたデンドライト状リチウム金属の析出抑制			→			
リチウムランタンジルコニア多孔体の導入				→		
高容量正極材料を用いたフルセル試験					→	
界面 (SEI) の制御および解析 (添加剤の効果および電解質の種類) の検討	→					

界面 (SEI) の制御および解析 (イオン性液体および高分子電解質系)		→				
電解液および電解質の検討による充放電効率の改善			→			
添加剤の検討による充放電効率の改善				→		
電子顕微鏡による充放電反応過程のその場解析 (リチウム析出過程の in-situ 観察)	→					
電子顕微鏡による充放電反応過程のその場解析 (デンドライト発生要因の解明)				→		
(3)-2 合金系負極						
多孔性合金負極の開発		→				
集電体基板との密着性の改善 (Sn-Cu 合金の検討)			→			
Sn-Co、Sn-Sb 合金の検討				→		
大型電池の開発に向けた検討 (ラミネートセルを用いた充放電試験)					→	
開発費用 (百万円)	19 年度	20 年度	21 年度	22 年度	23 年度	総額
首都大学東京	19.998	19.998	19.998	19.998	19.998	99.990

#### (4) 研究開発の実施体制

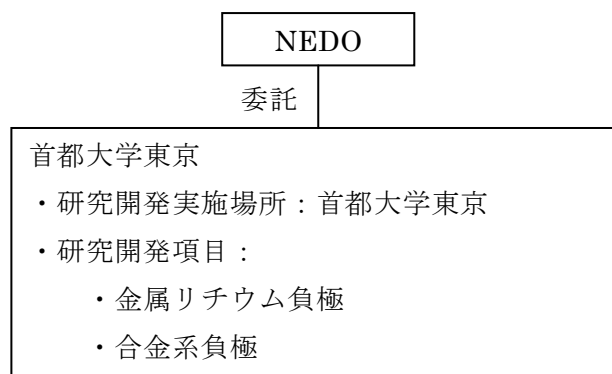


図 .2.4.9-2 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

金属リチウムの重量当たりのエネルギー密度は  $3861 \text{ mA h g}^{-1}$  と非常に高く、次世代のリチウム二次電池用負極材料として注目されている。しかしながら、充放電に伴いデンドライト状のリチウム金属が析出することが問題となっている。デンドライト状リチウムの析出は、サイクル特性を劣化させ、最悪の場合には電池の短絡を招き、電池の発火を引き起こす。デンドラ

イトの生成は、金属リチウム負極上の不均一な電流分布に起因することが明らかにされているが、電極反応を均一化し、デンドライト生成を抑制する方法は具体化されていない。一方、容量的に金属リチウムに劣るものの、より安全性が高いことから実用化が期待されている高容量負極材料の一つに Sn 合金がある。Sn 合金の電気化学反応は単体の Sn と同様にリチウムとの合金化および脱合金化によって進行し、その容量は Sn の含有率に依存し、最大で  $994 \text{ mA h g}^{-1}$  (Sn 単体) である。しかし、充放電時の体積変化が大きく、それに伴う容量低下が問題となっている。リチウムと反応しない金属と Sn を合金化することで、充放電過程における電極の膨張収縮を緩和できることから、本手法が多くの研究グループで検討されているが、実用レベルの要望を十分に満たすような結果は得られていない。

本研究では、上述の問題を解決し、金属リチウム負極および Sn 合金負極を実用化する方法として、電極の構造化を実施した。構造化のメリットは、局所電流密度を抑えることで、電極表面形態の可逆性を維持することが可能な点である。すなわち、自動車用途で求められる大電流での充電を行っても、局所的な電流密度が小さくなり、金属リチウム負極の場合にはデンドライト発生を原理的に抑制でき、 $\mu\text{m}$  オーダーの形態を可逆的に変化させることができる。また、合金系においては、局所的な機械的応力の集中を防止し、安定で可逆な  $\mu\text{m}$  オーダーの形態変化を促すことができる。本研究では、電極の構造化手法の確立、およびサイクル安定性と高容量を両立するための具体的な構造の解明を通して、本プロジェクトの最終目標値(実電池の性能として重量エネルギー密度  $500 \text{ W h kg}^{-1}$ )に必要な負極エネルギー密度  $700\sim 1000 \text{ mA h g}^{-1}$  の達成を目的とした。

#### 中間目標

平成 20 年度末(中間評価)までに、金属リチウム負極に関して、1000 サイクルで 50%以上の容量維持及び  $1000 \text{ mA h g}^{-1}$  程度の可逆充放電容量、合金系負極に関して、1500 サイクルで 60%以上の容量維持及び  $600 \text{ mA h g}^{-1}$  程度の可逆充放電容量の達成を目的に研究開発を行った。特に電極のサイクル安定性を確保するために必要な電極設計要素技術の確立を目的とした。

#### 最終目標

平成 23 年度終了までに、金属リチウム負極に関して、2000 サイクルで 80%以上の容量維持率及び可逆充放電容量  $1000\sim 1500 \text{ mA h g}^{-1}$  程度、合金系負極に関して、3000 サイクルで 80%以上の容量維持率及び可逆充放電容量  $800\sim 1000 \text{ mA h g}^{-1}$  程度の達成を目標に研究開発を行った。実用電極に求められる特性は高容量以上にサイクル安定性であり、この点についてさらに重点的に研究を進めるため、充放電過程における電極の構造変化や電極表面に形成される皮膜の状態を明らかにすることを目的とした。また、セパレーターの構造や添加剤、電解液の種類など高容量負極をより実用的に運用するための検討も実施し、最終的にフルセルで  $500 \text{ W h kg}^{-1}$  を実現するために必要となる電池設計指針(極板設計や電池重量における活物質占有量など)の確立を目的とした。

## (6) 研究開発成果

表 . 2. 4. 9 - 3 研究成果 (一覽)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
金属リチウム負極				
- エネルギー密度	1000~1500 mA h g <sup>-1</sup>	986 mA h g <sup>-1</sup>	98.6%	
- サイクル安定性	2000 サイクルで 80%以上の容量維持率	3000 サイクル 容量維持率 100% (電極利用率 25%)	100%	
合金系負極				
- エネルギー密度	800~1000 mA h g <sup>-1</sup>	500 mA h g <sup>-1</sup>	62.5%	
- サイクル安定性	3000 サイクルで 80%以上の容量維持率	200 サイクル 容量維持率 100% (電極利用率 77%)	6.6%	

### <成果 1 >

(内容) 金属リチウム負極(セパレーターの開発)

(達成度) ◎

(成果の意義) 金属リチウム負極を実用レベルで使用可能なセパレーター技術を開発した。現行の電解液を用いた二次電池へ適用可能な技術であり、金属リチウム負極の使用を可能とするだけでなく、炭素負極を用いた従来の電池の安全性を大きく向上できる。

(課題と取り組み) 金属リチウムを負極に用いると、充電時にデンドライト状に金属リチウムが析出し、電池のサイクル劣化や発火を招く。充放電時の電流分布を均一化してデンドライト生成を抑制することを考え、三次元規則配列多孔(3DOM)構造を有するポリイミド膜をセパレーターへ適用した。その結果、金属リチウムの析出形態が 3DOM 構造の孔径に依存して粒状に変化することを見出した。電解液に関する検討も進め、最終的に溶解析出反応を 3000 サイクル以上繰り返しても容量が低下しない優れたサイクル安定性を金属リチウムに付与することに成功した。また、本結果に基づいて作製したラミネート型の金属リチウム二次電池において約 300 Wh kg<sup>-1</sup>の重量エネルギー密度を達成し、高容量の正極材料を適用して 500 Wh kg<sup>-1</sup>を実現できることを明らかにした。

### <成果 2 >

(内容) 合金系負極

(達成度)

(成果の意義) Sn 系合金のサイクル安定性を高め、実用レベルで使用するための電極構造化技術を開発した。Sn 系合金のみならず、充放電に伴って大きな体積変化を示す電極材料へも本技術を展開できる。

(課題と取り組み) 充放電時の体積変化に伴う容量低下が Sn 系合金の実用化を阻んでいる。Sn-Ni 合金負極を三次元規則配列多孔(3DOM)化し、さらにその構造を数十μm の大きさのドメインへ分割することで、200 サイクルを超えても 500 mA h g<sup>-1</sup>の容量が維持される良好なサイ

クル特性を実現した。また、本構造を負極用集電体である銅箔上に大面積で形成する方法を開発し、ラミネート型電池の負極として実用できることを明らかにした。銅箔の両面に本構造を安価に形成するプロセスの開発が今後の課題である。

### (7) 知的財産権等

本プロジェクトにおける知的財産権等の件数を表 2.4.9-4 に示す。

表 2.4.9-4 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	0	0	1	0	0	1
うち、外国出願	0	0	0	0	0	0
国内登録	0	0	1	0	0	1
海外登録	0	0	0	0	0	0
論文	0	0	1	1	1	3
うち、査読付き論文	0	0	1	1	1	3
研究発表・講演	3	4	6	10	6	29
受賞実績	0	0	0	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載	0	0	1	1	1	3
展示会への出展	0	0	1	0	0	1
合計	3	4	10	12	8	37

### (8) 今後の課題と課題解決の見通し

自動車に搭載可能な性能を有した新規リチウム二次電池の開発を目的とし、電極構造の三次元設計に基づき、金属リチウム負極、及び合金系負極の実用化を図った。金属リチウム負極については 3DOM 構造を有するポリイミドセパレーターを適用することで、実用上で問題であったデンドライト状のリチウム析出を抑制することに成功し、金属リチウム負極の高容量を安定・安全に利用可能な技術を開発するに至った。結果として、プロジェクト全体の目標達成への一つの具体的な道筋を示すことができた。既に本セパレーターを量産するための技術開発を行っている。合金系負極に関しては電極の三次元構造設計が有効であることを実証し、約 600 mA h g<sup>-1</sup> の容量を安定的に利用できる電極を実現した。合金系電極の優位性をさらに高めるためにはより高い容量の実現が求められる。そのための開発要素として、合金組成の最適化や集電体基板への電極の密着性の向上といった課題を抽出するに至った。また、実用化へ向けて、構造化された電極を集電体である銅箔上へ大面積で形成する技術も開発した。現時点では構造化電極の形成は銅箔の片面のみである。より実用的には両面への電極形成が必要であり、今後の課題である。

### (9) 成果の実用化／活用

本研究で開発した 3DOM ポリイミドセパレーターの早期実用化へ向け、大学発ベンチャーを設立した。既に材料メーカーや成膜メーカーと共同して製造技術の開発を進めている。また、本セパレーターに関する問い合わせを国内外の企業から頂いており、各企業の要望に合った形

でのセパレーター供給も進めている。数年内で実用化の予定である。Sn 合金系負極に関しても電池メーカーの要望に配慮しつつ、より実用レベルでの研究を企業と実施している。

(10) その他

特になし

## 2. 4. 10 全固体電池のための固体電解質および三次元メソ構造体電極の研究開発（東京工業大学）

### （1）事業目的

全固体電池は安全性に優れた究極の電池形態であるにもかかわらず、高容量・高出力が達成されていない。その最大の原因が電解質そのものの材料特性にある。本研究開発では、安全性を確保し高出力・高エネルギー密度が可能な全固体電池開発のために、新規な固体電解質の創成と、高電極利用効率を目指した新たな電極構造を創出する。これまでのリチウムイオン電池の容量を遙かに超える電池の開発には、材料開発が必須である。特に、硫黄を基本とする電池は理論容量が $1675\text{mAhg}^{-1}$ を越え、次世代型電池として有望であるが、その特性は達成されていない。

本研究開発では以下の目標で研究を進める。

- 1.電解質の創出：室温で最高のイオン導電率を持つ新規固体電解質の探索
- 2.電極の創出：新規な三次元メソ構造を有する電極構造の構築と硫黄電極開発

### （2）事業概要

エネルギー密度の向上を目指した固体電解質は、1990年代に硫化物ガラスが高いイオン導電性を示すことがフランスの研究グループによって開発され、その後、リン酸やケイ酸を少量添加した複合化ガラスが高耐圧性を示すことを見いだされて、全固体電池への展開が行われている。無機固体電解質のイオン導電率は、現在 $10^{-3}\text{Scm}^{-1}$ をわずかに越える程度である。本研究チームは、固体電池開発には初期から関与し、最高の出力をもつ銅固体電池の開発、最高のイオン導電性をもつ結晶性固体電解質チオリシコンの発見、電極・電解質界面接合を可能にする界面層の発見など、固体電池開発に大きな役割を果たしてきた。これまでの、最高のイオン導電率を持つチオリシコン固体電解質の発見や電極・電解質界面での自己形成機能の発見、電解質シート化、全固体電池の積層化などの、硫黄系固体電池の開発過程で、(i)固体電解質の特性向上（ $10^{-3}\text{Scm}^{-1}$ から $10^{-2}\text{Scm}^{-1}$ へ）と(ii)電極構造（集電構造、界面接合、高密度化）の課題が浮かび上がってきた、これらを解決するために、本研究では、(a)固体電解質を開発し、(b)新規電極構造を創出する。これまでに例のない高イオン導電性をもつ電解質開発に成功すると、(i)電極構造の設計が容易になり、(ii)界面設計が容易になることから、電池特性として、(iii)高出力化と、(iv)高容量化が可能になる。一方、固体電解質の開発とともに高容量高出力化における重要な課題は電極構造である。本研究では集電材としてメソ構造体を持つ炭素材料を利用し、電極・電解質・集電材の三次元構造を構築することを提案する。三次元のメソ構造体を持つ電極構造が、可逆性の乏しい大容量電極材料の特性を最大限に引き出す可能性を追求する。三次元電極構造体を溶液系・固体系の双方に最適化し、全固体電池における新たな電極構造を提案するものである。



(3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.10-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
相関係数検討による物質探索	→					
添加物系による物質探索		→				
多価金属イオン添加によるイオン導電率の向上			→			
チオリシコン合成過程の再検討				→		
チオリシコンの中性子散乱による構造					→	
全固体電池の検討	→					
メソ構造体の検討		→				
メソ構造体と電極との複合化技術の検討			→			
三次元メソ構造体電極作成手法の検討				→		
解析手法の検討					→	
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
東京工業大学	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	99.5

(4) 研究開発の実施体制

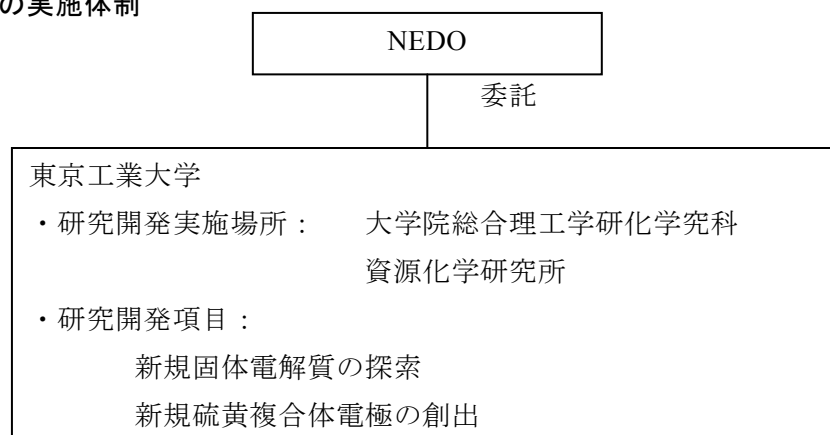


図 .2.4.10-1 研究開発の実施体制

## (5) 研究開発目標と根拠

### 中間目標

新規固体電解質：導電率  $5 \times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 全固体電池：可逆容量  $600 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$

固体電解質の導電率は  $10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$  オーダーであったが、有機系電解液の  $10^{-2} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$  を目指し、中間目標としては、その間の  $5 \times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$  を目標とした。

全固体電池では電池構成材料としての正極材料に着目し、理論容量が  $1672 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  の硫黄に着目した。パック電池レベルで  $500 \text{ Wh/kg}$  を見通せるためには、負極が現在のものと同じであるとした場合  $3230 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  の容量が必要となる。しかし、負極を炭素系（理論容量  $370 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ ）から合金系である Si 系や Li に代えることにより負極は  $2000 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  の容量が期待できる。従って、パック電池レベルで  $500 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$  を見通せる正極材料の可逆容量は  $1000 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  であり、中間目標としては間を取り  $600 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  を設定した。

### 最終目標

新規固体電解質：導電率  $10^{-2} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 全固体電池：可逆容量  $1000 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  (100 サイクル)

固体電解質は  $10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$  オーダーであったが、有機系電解液の  $10^{-2} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$  に匹敵する新規固体電解質の探索を目指したため、導電率  $10^{-2} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$  とした。

全固体電池では電池構成材料としての正極材料に着目し、理論容量が  $1672 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  の硫黄に着目した。パック電池レベルで  $500 \text{ Wh/kg}$  を見通せるためには、負極が現在のものと同じであるとした場合  $3230 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  の容量が必要となる。しかし、負極を炭素系（理論容量  $370 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ ）から合金系である Si 系や Li に代えることにより負極は  $2000 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  の容量が期待できる。従って、パック電池レベルで  $500 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$  を見通せる正極材料の可逆容量は  $1000 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  であるため、目標値を正極材料の硫黄換算で可逆容量は  $1000 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  とした。

## (6) 研究開発成果

表 .2.4.10-2 研究成果（一覧）

項目	目標値（最終）	達成値	達成度	備考
導電率	$10^{-2} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$	$1.4 \times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ (LiPS系)		本研究プロジェクトで確立した探索指針を用いた研究により、LiGePS系で $10^{-2} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ を達成
可逆容量	$1000 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$	$1000 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ (50 サイクル) $760 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ (100 サイクル)		$50 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ (数サイクル)以下の可逆容量を $1000 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ (50 サイクル)にまで向上

#### <成果1>

(内容) 固体電解質探索指針確立。Li<sub>3.35</sub>P<sub>0.93</sub>S<sub>4</sub> でイオン導電率  $1.4 \times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$  の新規相発見  
(達成度) △

(成果の意義)

Li-P-S 系で高イオン導電性に関わる新規相を発見し、導電率が向上した。この新規相は、0.1 – 5 V で安定な相であることも明らかにした。酸化還元状態での安全性を求めた場合、高導電体物質として構成が単純な Li-P-S 系物質で相関係を明らかにし、この系で高イオン導電性の新規相発見に至ったのは大きな成果である。なお、この研究プロジェクトから派生した研究により、本研究で確立した物質探索指針を適用して、液体電解質より高い伝導率である  $10^{-2} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$  を越えるイオン導電率をもつ Li-Ge-P-S(LGPS)系固体電解質を発見した。本研究で目指した探索指針を物質開拓に役立てることができたことから、本プロジェクトの成果の意義は極めて大きい。

(課題と取り組み)

Li-P-S 系物質の相関係を、詳細な構造解析を行い明らかにした。導電率向上のため、酸化物イオン置換によって新規固体電解質を探索し、新規相の発見に至った。この合成手法を用いて、Li-P-S 系物質での導電率向上に至った。実用材料としての Li-P-S 系物質の意義は極めて大きく、LGPS 系より実用上重要であるため、今後の導電率向上がさらに重要な取り組みとなる。

#### <成果2>

(内容) 可逆容量  $760 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ (100 サイクル)、および可逆容量  $1000 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ (50 サイクル)

(達成度) △

(成果の意義) 硫黄重量換算で  $50 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  以下であった充放電特性を、理論容量までの初期放電容量に達したことは劇的な電気化学特性の向上である。また、50 サイクルまでは  $1000 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  以上の充放電容量を得て、サイクル特性の向上も果たした。

(課題と取り組み)

硫黄重量換算で  $50 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$  以下であった充放電特性を、規則配列したメソポーラスカーボンを導電助剤とし、簡便に硫黄をメソポーラスカーボン内の細孔に微粒子化できる気相混合法を用いた。この手法により電気化学特性の劇的な向上が得た。

#### (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.10-3 に示す。

表 .2.4.10-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願		1			1	2
うち、外国出願						
国内登録		1				1
海外登録						
論文	2			1	1	4
うち、査読付き論文	2			1	1	4
研究発表・講演	6	12	8	7	2	35
受賞実績						
新聞・雑誌等への掲載					1	1
展示会への出展						
合計	10	14	8	9	6	47

#### (8) 今後の課題と課題解決の見通し

Li-P-S系固体電解質での導電率の更なる向上のためには、新規相を単一相として取り出す必要がある。組成を変化させる合成法の検討が今後必要である。新たな合成手法を用いて、 $\text{Li}_3\text{PS}_4$ 固溶系のP<sup>5+</sup>サイトへAl<sup>3+</sup>、Ga<sup>3+</sup>、In<sup>3+</sup>多価金属イオン添加し、結晶を構成する多面体ポリアニオンに歪みを与え、Li導電経路に密接に関係するボトルネックを変化させることや、Si<sup>4+</sup>などの4価イオンを置換し格子間により多くのLi導入をおこなうことで、Liイオン導電に寄与する因子を増やして導電率向上を図る。

全固体電池では、1000 mAh・g<sup>-1</sup>を50サイクルで達した。今後、不可逆容量の原因を明らかにすることで、さらなる可逆性の向上が可能である。ちなみに、カーボンへの表面修飾、表面処理を行う必要性に着目し、他のカーボン材料で表面処理を行うと可逆容量が飛躍的に向上した。メソポーラスカーボンでも同様の手法で目標値に近付くと考える。また、固体電解質との混合法の検討によっても特性改善が期待できる。

#### (9) 成果の実用化／活用

細孔を持つカーボンの細孔内に、高理論容量の硫黄と固体電解質を隙間なく組み込むことでエネルギー密度の高いリチウム二次電池が構築可能になる。細孔へ硫黄を挿入する技術を本研究で確立した。次なる技術課題は、細孔への固体電解質の挿入である。有機電解液を用いた硫黄電池とは全固体電池は異なる充放電挙動を示すが、この技術の確立により、硫黄全固体電池が実現可能となる。反応機構の解明は、リチウム硫黄電池実現のために最も重要な課題であり、硫黄と炭素との相互作用が存在することを本プロジェクトは明らかにした。本成果により、リチウム硫黄電池の実現に近づいたと考える。今後、炭素表面との硫黄との関係を構造面から明らかにすることで、カーボンへの表面修飾・表面処理の効果を全固体電池に展開することが可能となる。一方、固体電解質探索の指針を確立し、液体電解質以上のイオン導電率をもつ固体の発見の引き金を引いたことも重要な成果である。本成果のLi-P-S系は、化学・電気化学安定性においてLGPS系を越える潜在能力を持つ物質であり、その性能を引き出すためにも今後の研究がますます重要になっている。本プロジェクトの成果により、リチウム硫黄全固体電池の

実現が近づいたと考える。

なお、本プロジェクトの成果の波及効果は極めて大きい。プロジェクト終了時点で、全固体電池が次世代蓄電池の中で最も重要で実現可能性のある蓄電池であるとの認識が広がったのは、本プロジェクトの最大の成果である。全固体型の蓄電池が実現できれば、技術的・経済的にも関連分野への波及効果は大である。

#### (10) その他

## 2. 4. 1 1 ソフト溶液プロセスを基盤とする高容量電極材料の研究開発 (神戸大学、岩手大学)

### (1) 事業目的

酸化物ナノ粒子を用いる負極材料の高次構造化に対する課題抽出とその解決に向けた材料の最適化を図るため、以下の2つの課題の研究開発を遂行した。

「液相析出プロセスによる蓄電デバイス用材料の開発」(神戸大学)では、安価な高分子溶液を反応媒体とする液相析出法を用いて、常温常圧下において容易に単分散酸化物ナノ粒子を製造し、その反応系が有する様々な反応場の特異性によって得られる酸化物系材料が有する容量を理論容量まで出来る限り近接させる手法を確立した。また、「低温プロセスによる複合高容量電極材料の研究」(岩手大学)では、水溶液をベースとした低温プロセス、すなわち、液相析出(Liquid Phase Deposition: LPD)プロセスを用いて合成した単分散酸化物ナノ粒子に適した、よりシンプルな電極作製プロセスを開発することを目的とした。これらの手法により、電極材料の合成プロセスのみならず、電極作製プロセスにも高温加熱工程を最小限にとどめ、低コスト・低環境負荷プロセスにより高容量電極を作製することを目指した。これにより、低コスト、長寿命、高容量、および高入出力密度のみならず、次世代自動車用高性能蓄電システムに要求される過酷な作動環境下で使用できる高容量電極材料の設計に必要な知見を見出した。

### (2) 事業概要

#### ①液相析出プロセスによる蓄電デバイス用材料の開発 (神戸大学)

##### a. 液相析出プロセス由来のナノ粒子による電極材料評価

ソフトプロセスとして知られている LPD 法を適用し、高分子溶液中を反応場として、活物質として利用可能な金属酸化物ナノ粒子形成をさせ、その電気化学的特性を評価し、理論容量との関連を見出した。

##### b. イオン挿入脱離に伴うナノ粒子の構造変化と容量との相関の解明

主たる材料(例えば、 $\text{SnO}_2$ 等)について、学術的知見から中間目標として設定し、その後必要に応じて、①-a. と併せて検討した。

##### c. ナノ粒子近傍における電解質構造の変化とイオン移動への影響

LPD 反応に由来する各種酸化物の物性、すなわち、粒子径、比表面積、および結晶性と表面近傍における荷電状態、さらに電解質溶液中のイオン移動度との相関を検討した。

#### ②低温プロセスによる複合高容量電極材料の研究 (岩手大学)

##### a. 複合高容量電極材料の電気化学的特性に影響する要因の特定

①で適用した LPD プロセスにより得られた電極材料の電気化学的特性に影響する要因の特定を中心に行った。また、“泳動電着法”を用いて、ナノ粒子の固定化・複合化を図ることによって、最終的にナノレベルで組織制御された電極を作製し、電極特性に影響を及ぼす制御因子を見出した。

##### b. 水溶性ポリマーをコーティングした電極の作製

①で適用した液相析出プロセスにより得られた電極材料に対して、バインダーとして、低コスト・低環境負荷と考えられる水溶性ポリマーを用いた電極作製プロセスの導入を試み、この

ペースト式電極の作製上の問題点を抽出した。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.11-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	20年度	21年度	22年度	23年度	
-a. 液相析出プロセス由来の ナノ粒子による電極材料評価				→	
-b. イオン挿入脱離に伴うナ ノ粒子の構造変化と容量との相 関の解明				→	
-c. ナノ粒子近傍における電 解質構造の変化とイオン移動へ の影響				→	
-a. 複合高容量電極材料の電 気化学的特性に影響する要因の 特定				→	
-b. 水溶性ポリマーをコーテ ィングした電極の作製				→	
開発費用（百万円）	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
神戸大学	13.7	15.2	15.2	15.2	59.3
岩手大学	5.3	4.1	4.2	4.2	17.8

### (4) 研究開発の実施体制

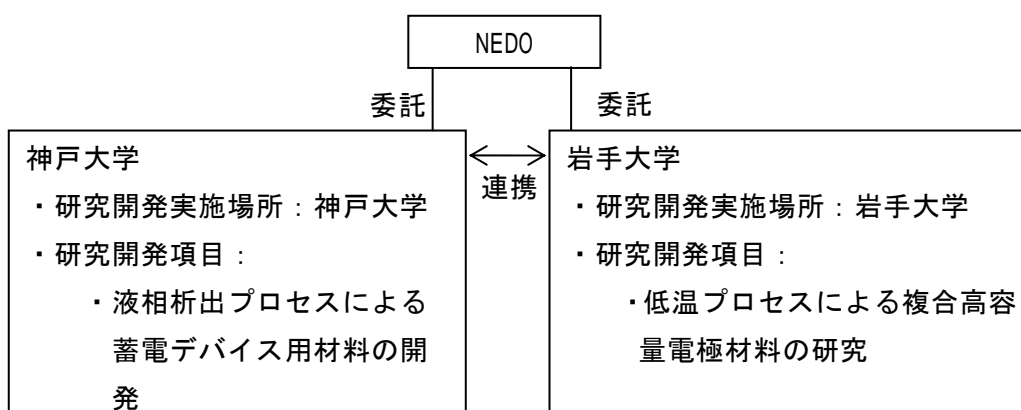


図 .2.4.11-1 研究開発の実施体制

## (5) 研究開発目標と根拠

### 中間目標

液相析出プロセスによる蓄電デバイス用材料の開発

- ・液相析出(LPD)プロセス由来のナノ粒子による電極材料評価  
粒子径 4nm 程度の SnO<sub>2</sub> 単分散粒子の合成方法の確立する。
- ・LPD-SnO<sub>2</sub> / C コンポジット電極を作製すること  
イオン挿入脱離に伴うナノ粒子の構造変化と容量の相関の解明 ナノ粒子の結晶型・形状に関する充放電時の変化とその特性との相関性を抽出する。
- ・ナノ粒子近傍における電解質構造の変化とイオン移動への影響  
LPD-SnO<sub>2</sub> 粒子表面における帯電状態の差異と表面近傍における電解質の溶液内構造との相関を解明する。
- ・複合高容量電極材料の電気化学的特性に影響する要因の特定  
合成法と負極特性の相関性から、負極特性の向上を図り、最終目標の数値の 60%程度 (470 mAh g<sup>-1</sup>) を達成すること
- ・水溶性ポリマーをコーティングした電極材料の作製  
水溶性ポリマーが電極特性に及ぼす影響を見出し、バインダー選択条件を最適化すること

本研究に関する目標設定は、負極活物質として研究開発が盛んに行われている金属酸化物についての国内外における開発状況を鑑みて設定した。とりわけ、物質の構造と電池特性との相関を見出し易い SnO<sub>2</sub> について充放電特性に関する知見を得ることを主たる中間目標とした。研究開発当初、充放電特性に関しては、約 800 mAh g<sup>-1</sup> の容量を示す結果 (D. Deng et al., *Chem. Mater.* **20**, 1841 (2008)) 等が知られていた。しかしながら、この研究をはじめとするほとんどの研究は充電過程において、導電助剤に用いているカーボンへも Li<sup>+</sup>イオンが挿入される 0V vs. Li/Li<sup>+</sup> の電位まで掃引されており、酸化物のみの特性を示しているとはいえないものが多い。カーボンが反応しない電位掃引領域 (0.2-2.0V) を掃引電位としている J. H. Lee らの研究 (*J. Power Sources*, **194**, 520 (2009)) では 500 mAh g<sup>-1</sup> 程度であり、プロジェクトの中間評価時期においても、目標値設定として 650 mAh g<sup>-1</sup> という値は妥当であったといえる。

### 最終目標

#### (a) 液相析出プロセス由来のナノ粒子による電極材料評価

中間評価までの LPD-SnO<sub>2</sub> の成果を受けて、LPD-SnSiO<sub>x</sub> および LPD-SiO<sub>x</sub> 系へと展開し、電極材料を対象とするナノ粒子合成とその電極への担持・集積方法の確立を行う。特に、LPD-SiO<sub>x</sub> の負極単電極評価 (実効値) において、放電容量 500 mAh g<sup>-1</sup> を達成し、セル試験に資する電極材料を構築する。

#### (b) イオン挿入脱離に伴うナノ粒子の構造変化と容量との相関の解明

LPD-SiO<sub>x</sub> 粒子の結晶型・形状に関するコンバージョン反応による変化とその特性との相関を抽出する。特に、表面電荷による容量成分についてバルク容量比 20%の容量を有する表面の構築を図る。

#### (c) ナノ粒子近傍における電解質構造の変化とイオン移動への影響



LPD-SiO<sub>x</sub> 粒子表面における電解質の溶媒和状態の解明と材料の最適化を試みる。特に、泳動電着法における使用溶媒の選択により、電極実効密度が最大となる溶媒の選択を図る。

(d) 複合高容量電極材料の電気化学的特性に影響する要因の特定

LPD-SiO<sub>x</sub> 粒子に関して、理論容量に近い容量を有することにより、電池の重量エネルギー密度 500 Wh kg<sup>-1</sup> を達成する。

(e) 水溶性ポリマーをコーティングした電極の作製

塗布法や泳動電着法など、LPD-SiO<sub>x</sub> に適した電極作製プロセスを確立する。

容量の増大が期待される SiO<sub>x</sub> 系を用いることにより、さらなる容量増大を目指した。ただし、SnO<sub>2</sub> と異なり、絶縁性非晶質を用いるため、SnO<sub>2</sub> との混合による電子の引き出しおよびその反応プロセスの確立を狙ったものである。材料合成プロセスには相違点は少なく、材料の最適化の可否を含めて検討する必要性からこのような目標を立てた。

(6) 研究開発成果

表 2.4.11-2 研究成果 (一覽)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
液相析出(LPD)プロセス由来のナノ粒子による電極材料評価	粒子径 4nm 程度の SnO <sub>2</sub> 単分散粒子 (LPD-SnO <sub>2</sub> ) の合成方法を確立すること。LPD-SnO <sub>2</sub> / C コンポジット電極を作製すること。さらに LPD-SnSiO <sub>x</sub> および LPD-SiO <sub>x</sub> からなる電極を作製すること。	LPD-SnO <sub>2</sub> 、一部の SnSiO <sub>x</sub> 、LPD-SnO <sub>2</sub> /C コンポジット電極を合成できた。しかしながら、SiO <sub>2</sub> 系は、本試料の絶縁性を補償することが困難であり、SnO <sub>x</sub> とのコンポジットを形成するに留まった。		
イオン挿入脱離に伴うナノ粒子の構造変化と容量の相関の解明	ナノ粒子の結晶型・形状に関する充放電時の変化とその特性との相関性を抽出すること	コンバージョン反応による Li <sub>2</sub> O が検知可能となった。		
ナノ粒子近傍における電解質構造の変化とイオン移動への影響	LPD-SnO <sub>2</sub> 粒子表面における帯電状態の差異と表面近傍における電解質の溶液内構造との相関を解明すること	バインダーとして PEO-PAA を用いた nano-SnO <sub>2</sub> 電極の放電出力特性を得ることにより 2C 時の容量を 30%向上できた。		
複合高容量電極材料の電気化学的特性に影響する要因の特定	合成法と負極特性の相関性から、負極特性の向上を図り、最終目標の数値の 60%程度 (容量 470 mAh g <sup>-1</sup> ) を達成すること	水溶性ポリマーである PVA をバインダーに用いた LPD-SnO <sub>2</sub> 電極の初回放電容量および充放電効率 は 1015 mAh g <sup>-1</sup> および 57.7 %を示し、最終目標値の 783mAh g <sup>-1</sup> を超えた。		
水溶性ポリマーをコーティングした電極材料の作製	水溶性ポリマーが電極特性に及ぼす影響を見出し、バインダー選択条件を最適化すること	水溶性ポリマーである PVA をバインダーに用いた LPD-SnO <sub>2</sub> 電極の初回放電容量および充放電効率は 1015 mAh g <sup>-1</sup> および 57.7 %を示し、最終目標値の 783mAh g <sup>-1</sup> を超えた。これに対して、SiO 系は 1 サイクル目の放電容量が 1059 mAh g <sup>-1</sup> で、最終目標値の約 66%であった。SiO の容量に課題があるものの、サイクル劣化が小さく、活物質の粒子径の低減と水溶性ポリマーをバインダーとして用いる電極設計のコンセプトを適用できるという知見を得た。		

## <成果 1 >

(内容)・ $\text{Si}_x\text{Sn}_{1-x}\text{O}_2$  ナノコンポジットの作製

(達成度)

(成果の意義)酸化物負極は Li 合金形成により高容量かつ体積変化の少ない負極として利用することが想定される。 $\text{SnO}_2$  とのナノコンポジット形成により、電子伝導性と容量増大との協調を図った。

(課題と取り組み)

試料の XRD 測定を行った結果、 $\text{SnO}_2$  (rutile) に帰属される回折パターンが確認された。これに対して、 $\text{SiO}_2$  系では回折パターンは生じず、 $\text{Si-O-Si}$  結合の振動に帰属される赤外吸収が確認され、アモルファス相を形成していることが示唆された。試料中の Sn 及び Si の組成は反応溶液中の初期  $\text{Sn}^{4+}$  及び  $\text{Si}^{4+}$  濃度によって制御可能であった。試料中の Si 含有量が増加するに従い  $\text{SiO}_2$  微粒子同士が架橋することでキセロゲルを形成していることが確認された。得られた各資料をマイクロトームにより切片化した試料の TEM 像から  $\text{SiO}_2$  キセロゲル中に結晶性の  $\text{SnO}_2$  ナノ粒子が分散して存在している様子が確認された。BET 法による比表面積は Si 含有量の増加に伴い増大した。その細孔径は約 10 nm であることが確認された。以上の結果より多孔質  $\text{Si}_x\text{Sn}_{1-x}\text{O}_2$  ナノコンポジットの合成が可能であることを明らかにした。また、 $\text{SnO}_2$  の還元・コンバージョン反応は非常に有効に寄与したが、 $\text{SiO}_2$  の還元はほとんど認められず、容量増大の効果は導電経路の確保の面での寄与の留まった。

## <成果 2 >

(内容) 水溶性ポリマーをコーティングした電極材料の作製

(達成度)

(成果の意義) 水溶性バインダーを用い、導電経路の確保を行うことによって、使用する酸化物の可逆性を引き出すことが可能となった。

(課題と取り組み)

$\text{SnO}_2$  ナノ粒子の平均粒子径が放電容量および充放電効率などの初期特性、バインダーの種類が  $\text{SnO}_2$  電極のサイクル特性に影響を及ぼす要因であることを見出した。具体的には、 $\text{SnO}_2$  粒子の平均粒子径が減少すると、初期放電容量と充放電効率を改善できるという成果を得たが、従来のバインダーであるポリフッ化ビニリデンを用いると、サイクル特性を効果的に改善できなかった。水溶性ポリマーであるポリビニルアルコールをバインダーに用いた LPD- $\text{SnO}_2$  電極の初回放電容量および充放電効率は  $1015 \text{ mAh g}^{-1}$  および  $57.7 \%$  を示し、最終目標値の  $783 \text{ mAh g}^{-1}$  を超えた。 $\text{SnO}_2$  ナノ粒子の検討で得られた上述の知見を用いて、 $\text{SnO}_2$  の理論容量よりも高い酸化シリコン  $\text{SiO}$  ( $2680 \text{ mAh g}^{-1}$ ) へ展開した。 $\text{SiO}$  の 1 サイクル目の放電容量は  $1059 \text{ mAh g}^{-1}$  で、最終目標値の約  $66\%$  であった。 $\text{SiO}$  は容量に課題があるものの、サイクル劣化が小さく、活物質の粒子径の低減と水溶性ポリマーをバインダーとして用いる電極設計のコンセプトを適用できるという知見を得た。

### (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.11-3 に示す。平成 20 年度からの参画のため、平成 23 年度までの 4 年間の数値である。

表 .2.4.11-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19 年度	20 年度	21 年度	22 年度	23 年度	計
特許出願	-	0	2	0	0	2
うち、外国出願	-	0	0	0	0	0
国内登録	-	0	0	0	0	0
海外登録	-	0	0	0	0	0
論文	-	0	1	0	2	3
うち、査読付き論文	-	0	1	0	1	2
研究発表・講演	-	2	9	18	13	42
受賞実績	-	0	0	1	0	1
新聞・雑誌等への掲載	-	0	0	1	0	1
展示会への出展	-	0	0	0	0	0
合計	-	2	12	20	15	49

### (8) 今後の課題と課題解決の見通し

#### SiO<sub>2</sub>系の還元・コンバージョン反応

SnO<sub>2</sub>系については、可逆的コンバージョン反応を見出し、従来の理論容量を超える成果を得ることが出来たが、SiO<sub>2</sub>については、絶縁相としての寄与に留まり、容量増大に対する効果は充分得られなかった。SiO<sub>2</sub>は非晶質性が高いネットワーク構造を有するため、SnO<sub>2</sub>との相分離が生じ、SnO<sub>2</sub>のコンバージョン反応の促進には寄与するが、SiO<sub>2</sub>相の反応は抑制されることが明らかとなった。Siについては、SiO ナノ粒子の反応は問題なく生じるため、今後 SiO の液相中における合成法の確立が必要となると考えている。

### (9) 成果の実用化／活用

現在、SnO<sub>2</sub>について、神戸大学および岩手大学からの技術移転についての活動を行っている。その一環として、この 9 月に開催される「イノベーション・ジャパン 2012 - 大学見本市」で展示する予定である。

### (10) その他

以下の雑誌に解説記事が掲載される。

表 .2.4.11-4 解説記事

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2012年8月号掲載予定	ケミカルエンジニアリング	泳動電着法を用いるリチウム二次電池用 SnO <sub>2</sub> ナノ粒子負極の作製	宇井幸一, 川村壮史, 水畑 穰

## 2. 4. 1 2 第一原理計算に基づいた次世代イオン伝導材料設計技術の開発 (京都大学、トヨタ自動車、ファインセラミックスセンター)

### (1) 事業目的

次世代自動車の蓄電システムとして、パック電池レベルで 700Wh/kg 以上の重量エネルギー密度が期待されている。既存技術の単純な延長線上でこのような高いエネルギー密度を実現することは容易ではなく、新しい発想による革新的な電池系の実現が望まれている。現段階では、酸化還元電位が最も卑な金属であり、また、重量当たりの電気容量が最も大きい金属リチウムを負極とし、正極には電気陰性度が高い単体である酸素（空気）あるいは硫黄を利用したリチウム空気電池やリチウム硫黄電池がこのような高エネルギー密度を実現可能な革新的電池系として注目されている。いずれの電池系においても、新規電解質の技術開発が不可欠である。本研究開発では、高精度の第一原理計算を用いたイオン伝導体中のイオン移動シミュレーション技術を新たに開発し、それに基づいて革新的な高性能無機固体電解質の開発を目指した。

### (2) 事業概要

これまで、イオン伝導体の探索は主に固体化学の知見に基づく多くの経験則に則って進められてきた。そして、このような研究により室温において  $10^{-3}\text{S/cm}$  のイオン伝導度を持つリチウムイオン伝導体が開発されている。しかし、革新的電池系の実用化のためにはイオン伝導度の更なる向上が必要である。このような材料開発を迅速かつ効果的に行うためには、実験的研究開発を計画的に推し進めることはもちろんのこと、それと並行して、経験的情報に基づかない第一原理からの計算科学手法を適用することが望ましい。しかし、現在に至るまで、固体電解質中のイオン伝導挙動を精緻にシミュレーションする一般的な技法は存在していない。

イオン移動現象を精緻にシミュレーションするためには、結晶構造を知るだけでは不十分であり、伝導イオンや添加元素の空間配置を明確にした上で（無機化合物構造シミュレーション）、伝導イオンのジャンプを取り扱わなければならない（イオン移動現象シミュレーション）。本研究開発では、この2つの内容に平行して取り組み、まず技術構築から開始する。シミュレーション技術は直ちにモデル材料の評価に応用され、その結果をシミュレーション技術の深遠化に繋げる。このような要素技術をイオン伝導体のイオン移動解析に適するレベルに仕上げた上で、平成23年度以降に具体的な高性能無機固体電解質の詳細なシミュレーションを行う。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.12-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	20年度	21年度	22年度	23年度	
無機化合物構造シミュレーションの技術開発	→	→			
無機化合物の構造評価	→	→			
イオン分布とエネルギー状態の第一原理計算			→	→	
イオン伝導性と結晶性無機化合物の構成元素に関する研究			→	→	
イオン移動現象シミュレーションの技術開発	→	→			
イオン移動の第一原理計算				→	
開発費用 (百万円)	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
京都大学	13.6	11.8	10.9	11.2	47.5
トヨタ自動車	0.2	0.1	0.1	0.1	0.5
ファインセラミックスセンター	6.2	8.1	8.8	8.7	31.7

### (4) 研究開発の実施体制

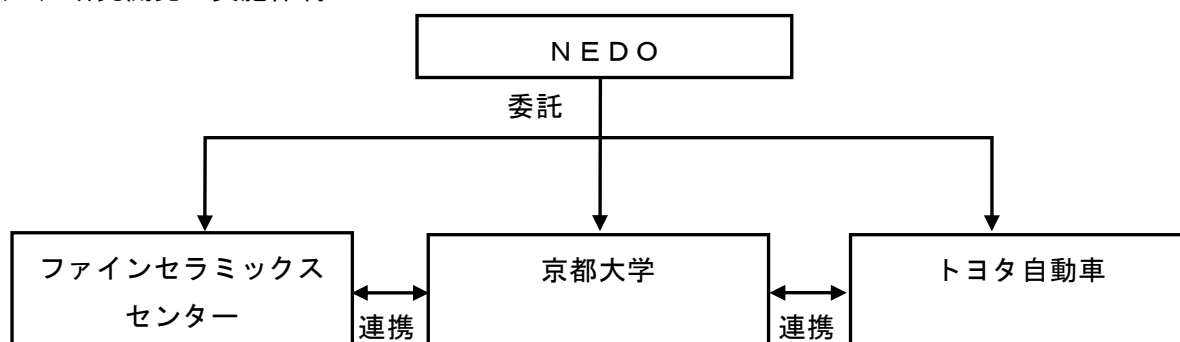


図 .2.4.12-1 研究開発の実施体制

### (5) 研究開発目標と根拠

研究開発項目「無機化合物構造シミュレーションの研究開発」

中間目標(H20,21年度)

単位格子が20原子以上からなり非稠密な結晶構造を持つ無機化合物について、1原子あたり平均値0.03eV以下の統計誤差で評価可能な構造シミュレーション手法を開発する。

(想定根拠・条件) イオン伝導体は複雑な結晶構造を持つ場合が多いことから上記条件の無機化合物とした。0.03eVは室温298Kにおける1原子あたりのエネルギーに相当する。

最終目標(H22,23年度)

開発した構造シミュレーション技術を用いて、イオンの空間分布変化に対して1原子あたり0.03eV以下の精度で評価する。結晶構造・原子種に応じたイオン分布とエネルギーの関

係を網羅的に把握し、イオン伝導性に関する結晶学的・化学結合論的な知見の獲得を目指す。

(想定根拠・条件) 同一の化学組成を有するが結晶構造の異なる系を対象として系統的な解析を実施する。これは低温相と高温相、常圧相と高压相のような多形に対応する。次に、類型の結晶構造を有するが構成元素が異なる無機化合物に対して系統的な解析を実施する。

#### 研究開発項目「無機化合物中イオン移動現象シミュレーションの研究開発」

##### 中間目標 (H20,21 年度)

無機化合物中のイオンジャンプについて、イオンジャンプの周辺環境を考慮に入れて、高精度第一原理計算により活性化エネルギー $0.1\text{eV}$ の精度で評価可能な手法を開発する。

(想定根拠・条件) イオンジャンプ頻度の活性化エネルギーはイオン伝導体の性能を表す重要な特性のひとつであり、一般に $0.1\text{eV}$ の桁で議論される。

##### 最終目標 (H22,23 年度)

開発したイオン移動現象シミュレーション技術を用いて、構成元素と化学結合状態の変化がリチウムイオン拡散の活性化エネルギーに与える影響を定量的に評価することを目指す。イオンジャンプにおける活性化エネルギーは $0.1\text{eV}$ 以下の高い精度で評価を実施する。

(想定根拠・条件) 平成 22,23 年度に実施するもう一つの項目「無機化合物構造シミュレーションの研究開発」での成果を踏まえ、活性化エネルギーを NEB 法に基づいて評価する。

## (6) 研究開発成果

表 2.4.12-2 研究成果 (一覧)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度
無機化合物構造シミュレーションの技術開発	1 原子あたり $0.03\text{eV}$ 以下の統計誤差でエネルギーを評価	クラスター展開法を適用し、 $0.03\text{eV}$ 以下を達成。	
イオン移動現象シミュレーションの技術開発	イオン移動の活性化エネルギーを $0.1\text{eV}$ の精度で得る	約 $0.01\text{eV}$ の誤差で評価。 従来考えられていなかった準格子間機構によるジャンプが示唆された。	
イオン伝導性と結晶性無機化合物の結晶構造に関する研究	結晶構造がイオン伝導性に与える影響を評価	3 種類の構造を系統的に解析。結晶構造がエネルギー分布・活性化エネルギーに与える影響を明らかにした。	
イオン伝導性と結晶性無機化合物の構成元素に関する研究	構成元素がイオン伝導性に与える影響を評価	8 種類の化合物を系統的に解析。構成元素がエネルギー分布・活性化エネルギーに与える影響を明らかにした。	

### <成果 1 : 無機化合物構造シミュレーションの技術開発>

(内容) モデル系に  $\text{Li}_{4-2x}\text{Zn}_x\text{GeO}_4$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) 固溶体を採用した。単位格子が 32~36 原子で構成され、対称性も斜方晶系と低く、目標の構造を満たす。系統的な第一原理計算によって、安定構造とはイオンの配置が大きく異なるがエネルギーがあまり高くない構造が多数存在することがわかった。この結果に対し開発したクラスター展開法を適用したところ、端組成において評価誤差  $0.03\text{eV}$  以下を達成し、本開発手法の有効性が確認できた (図 III.2.4.12-2(a))。

(達成度) ○

(成果の意義) 第一原理によるイオン配置とエネルギーの関係の解析から、優れたイオン伝導体を探索するための有用な知見が得られた。複雑で非稠密な無機化合物に対する第一原理計算に基づいたクラスター展開法の計算技術は未開拓であったが、本研究開発において第一原理計算で求めたエネルギーを高精度で再現できるクラスター展開法を開発できた。

<成果2：イオン移動現象シミュレーションの技術開発>

(内容)  $\text{Li}_4\text{GeO}_4$ におけるLiイオンのジャンプ頻度の評価を試みた。Liイオンは部分占有サイトである八面体位置間をジャンプして結晶中を伝導すると考えられていた。しかしNEB計算をおこなったところ、四面体位置のLiイオンも寄与する準格子間機構に類似の機構によることが示唆された(図III.2.4.12-2(b)(c))。ポテンシャル障壁の高さは、NEB計算によって得られたエネルギー変化を適切にフィッティングすることにより約0.01eVの誤差で評価できた。

(達成度) ◎

(成果の意義) NEB法は大規模な第一原理計算が必要であるため、イオン伝導体のような複雑な構造をもつ無機化合物への適用例は極めて少なかった。この課題に挑戦し、従来考えられていなかった準格子間機構に類似の機構でジャンプが起こり得ることが初めて明らかとなった。

<成果3：イオン伝導性と結晶性無機化合物の結晶構造に関する研究>

(内容)  $\text{Li}_{4-2x}\text{Zn}_x\text{GeO}_4(0 \leq x \leq 1)$ に対し、異なる三種類の結晶構造の系統的解析を実施した。この解析ではイオンの空間分布変化に対して1原子あたり0.03eV以下の精度でエネルギーを評価した。化学組成の変化によって安定な結晶構造が変化することが分かり、その安定構造は実験で報告される低温の結晶構造を再現した(図 .2.4.12-2(d))。また、さまざまなイオン配置に対応したエネルギー分布がイオン伝導性と密接な相関をもつことが明らかとなった。

$\text{Li}_4\text{GeO}_4$ におけるLiイオンの隣接サイトへのジャンプを評価した。活性化エネルギーをNEB法に基づいて0.1eV以下の高い精度で評価した。同様の準格子間機構であっても、隣接サイトや結晶構造の違いによってポテンシャル障壁が大幅に変化することが明らかとなった。

(達成度) ○

(成果の意義) 系統的計算による構造安定性解析は、高精度な第一原理計算を用いて初めて得られる結果である。本手法が未知化合物における構造探索にも十分適用可能であることを示唆しており、イオン伝導体の設計において大きな進歩といえる。

<成果4：イオン伝導性と結晶性無機化合物の構成元素に関する研究>

(内容)  $\text{Li}_3\text{A}_{0.5}\text{BO}_4(\text{A}=\text{Zn}, \text{Mg}, \text{B}=\text{Ge}, \text{Si})$ および  $\text{Li}_{3.5}\text{A}_{0.5}\text{B}_{0.5}\text{O}_4(\text{A}=\text{V}, \text{P}, \text{B}=\text{Ge}, \text{Si})$ に対し、結晶構造およびLiの相互配置を系統的に変化させた解析を実施した。このとき1原子あたり0.03eV以下の精度でエネルギーの空間分布依存性を評価した。 $\text{Li}_3\text{Mg}_{0.5}\text{SiO}_4$ の安定構造は $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ 型であるのに対し、その他の化合物の安定構造はいずれも $\gamma$ 型となった(図 .2.4.12-2(e))。

隣接サイトへのジャンプの評価を活性化エネルギー0.1eV以下の精度で実施した。 $\gamma$ 型という結晶構造の下ではSiを含む化合物の活性化エネルギーは0.2eVと見積もられ、Geを含む化合物より有利であることが明らかとなった。

(達成度) ○

(成果の意義) 構成元素の違いの影響は、これまでイオン半径やイオン分極率によって議論されてきた。しかしそういった定性的議論では説明困難な系が多数存在し、更に異種元素を添加した系には適応が困難である。従って各原子の相互作用を精確に評価するため電子状態を計算する必要があり、それは高精度な第一原理計算による本研究の手法で初めて可能となる。

Si系化合物が $\gamma$ 型を保持し LISICON ( $\text{Li}_{3.5}\text{Zn}_{0.25}\text{GeO}_4$ )と同じ前指数因子を有するならば、この結果は室温において  $10^{-2}\text{S/cm}$  という、有機電解液に匹敵するレベルの伝導度を達成できるポテンシャルがあることを示唆している。

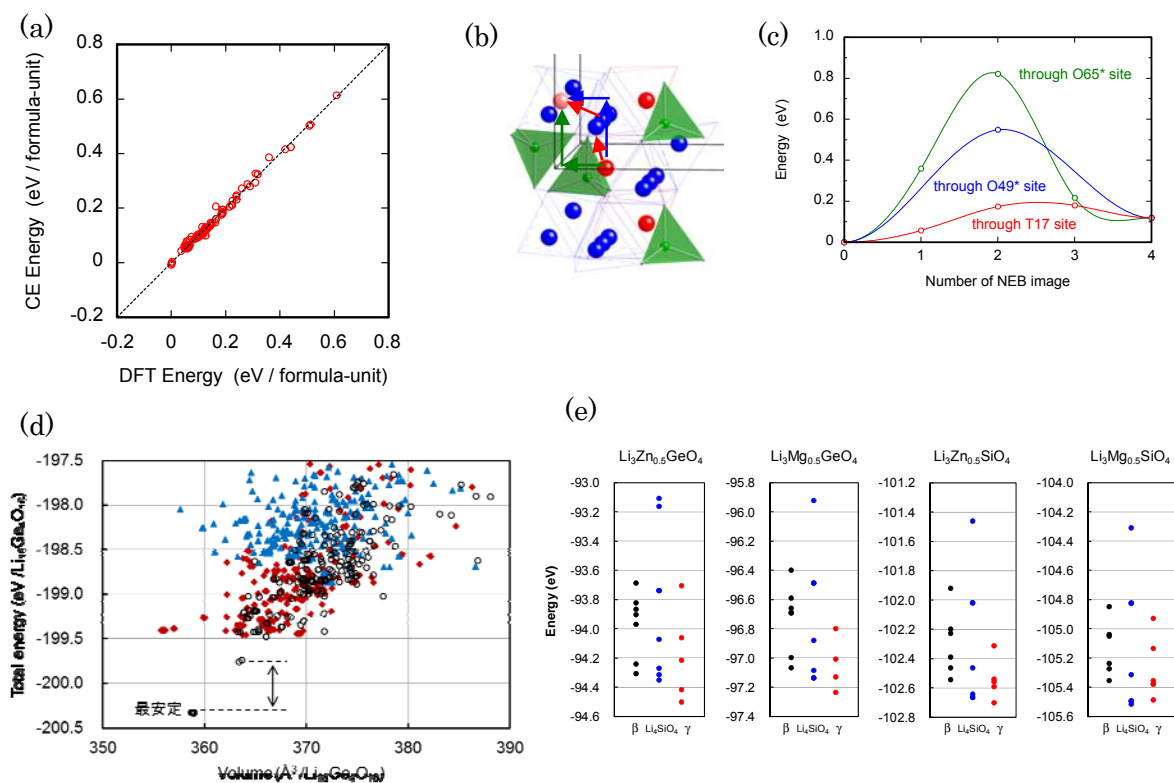


図 2.4.12-2(a)  $\text{Li}_2\text{ZnGeO}_4$ に対するクラスター展開法の適用結果。(b)緑および青の矢印は八面体位置のみを経由するジャンプ経路。赤の矢印は準格子間機構によるジャンプ経路。(c)3種類のジャンプにおけるエネルギーの変化。(d) $\text{Li}_4\text{GeO}_4$ における体積と全エネルギーの関係。各点でLiイオンの配置が異なる。赤色は $\gamma$ 型、青色は $\beta$ 型、黒色は $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ 型を示す。最安定構造は $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ 型から得られ低温の結晶構造を再現した。(e) $\text{Li}_3\text{A}_{0.5}\text{BO}_4$ ( $\text{A}=\text{Zn}, \text{Mg}$ ,  $\text{B}=\text{Ge}, \text{Si}$ )における、八面体サイトを部分占有する過剰Liの空間配置を系統的に変えた構造のエネルギー。



## (7) 知的財産権等

本プロジェクトでの知的財産権等の件数を表 .2.4.12-3 に示す。

表 .2.4.12-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願		0	0	0	0	0
うち、外国出願		0	0	0	0	0
国内登録		0	0	0	0	0
海外登録		0	0	0	0	0
論文		0	0	0	0	0
うち、査読付き論文		0	0	0	0	0
研究発表・講演		0	0	1	7	8
受賞実績		0	0	0	1	1
新聞・雑誌等への掲載		0	0	0	0	0
展示会への出展		0	0	0	0	0
合計		0	0	1	8	9

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

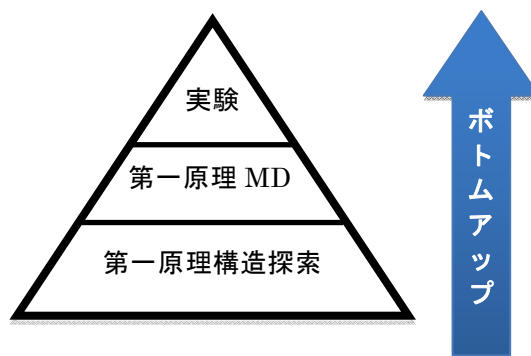
本研究では第一原理計算を用いて Li イオンの拡散素過程を解析した結果、複数の Li が協調的に移動する準格子間機構で Li が伝導することが明らかになった。LISICON のように結晶格子中に多数の伝導イオン種が存在する系では、1 個のイオンが移動する事象だけに着目してはイオン伝導現象を正確に把握できないということを意味している。この結果から、有限温度では結晶中の原子が熱振動を伴うため、多数のイオンの連動が拡散挙動に大きな影響を与えていることが容易に予想できる。これまで実施した第一原理計算による活性化エネルギーの評価は 0 K で実施されているために熱振動の影響は考慮されていない。究極的な目標として「計算機シミュレーションを用いた固体電解質の理論設計の実現」を目指す上で、これまでに確立した評価技術では現実の Li イオン二次電池の固体電解質における拡散挙動を正確にシミュレーションするには克服すべき課題が残されていると言える。

イオン伝導体で起こっている「多体運動を直接取り扱うシミュレーションの実現」という課題を解決する手段として、各原子に運動エネルギーを与えることで任意の温度での原子の集団運動を模擬する「分子動力学計算(MD)」の実施を検討している。全固体電池の実現に向けた計算機シミュレーションによる新規固体電解質の理論設計には、膨大なイオン配置に対する高精度な構造探索と第一原理 MD を組合せた解析技術の確立が必要不可欠である。MD で得られるイオンの拡散挙動はその初期配置に依存する。そこで、第一段階として本研究で確立した第一原理全エネルギー計算による網羅的かつ高精度な構造探索の実施と、拡散の統計情報を得るのに適切な初期構造モデル群の抽出を行う。計算負荷の大きい第一原理計算を効率的に行い、対象とする材料のイオン伝導率の予測に資する情報を得られる MD シミュレーション技術を実現させることには、極めて大きな意義があるだろう。

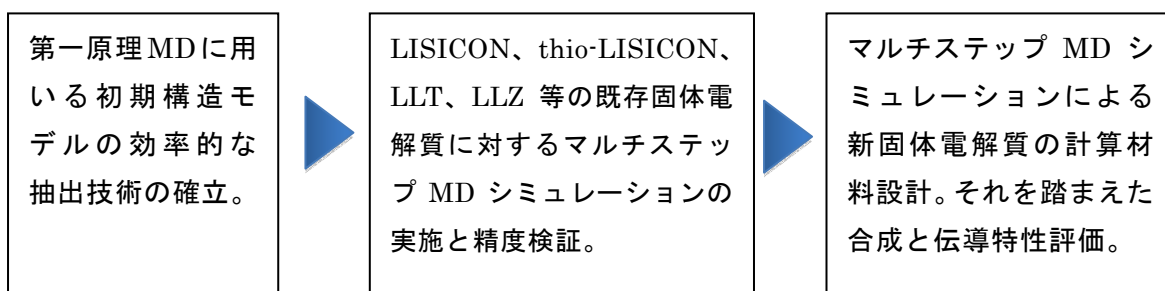
## (9) 成果の実用化／活用

[実用化イメージ]

第一原理全エネルギー計算による統計的構造探索と第一原理MDを組み合わせたマルチステップシミュレーションを用いた新規固体電解質材料の伝導率シミュレーションを実施。蓄電池の開発現場において、事前の計算機シミュレーションに基づいた材料スクリーニングによる新材料開発の効率化や最適組成の探索を実現。



[開発のマイルストーンイメージ]



[関連分野への波及効果]

第一原理計算に基づく計算機シミュレーションは原理的に全ての元素に対して実行可能である。したがって、マルチステップシミュレーションを用いた革新的蓄電池の研究は全固体型 Li イオン 2 次電池だけではなく、Na イオン蓄電池や Mg イオン蓄電池などの“ポスト Li 電池”の開発にも展開が可能であり、産業分野における開発手段として多大な波及効果が期待される。

## 2. 4. 13 ホウ素化合物を用いた高性能液体電解質の研究開発 (静岡大学)

### (1) 事業目的

小さくて軽い蓄電池創成のために、ホウ素化合物を用いた高い酸化電位を有する電解質を開発する。高性能液体電解質の開発（藤波グループ）と、薄膜電極を用いた新規液体電解質／電極の界面反応の評価とその高性能化（入山グループ）の二つを研究開発の中心とする。

### (2) 事業概要

ホウ素化合物としてホウ酸エステル類や環状ホウ酸エステル類の設計・合成を行い、イオン導電率、酸化電位等の電気化学的性質を明らかにすると共に、これら分子を電解質材料とした際の、電極/電解質界面の界面反応を評価し、最終的に電池を構成して評価を行う。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.13-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
ホウ素化合物を用いた高性能液体電解質の開発		→				
高性能液体電解質と電極活物質の界面反応の評価とその高性能化		→				
全ホウ素化合系液体電解質を用いた5V級二次電池の試作とその電池特性評価					→	
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
静岡大学		20.0	20.0	19.4	20.6	80.0

### (4) 研究開発の実施体制

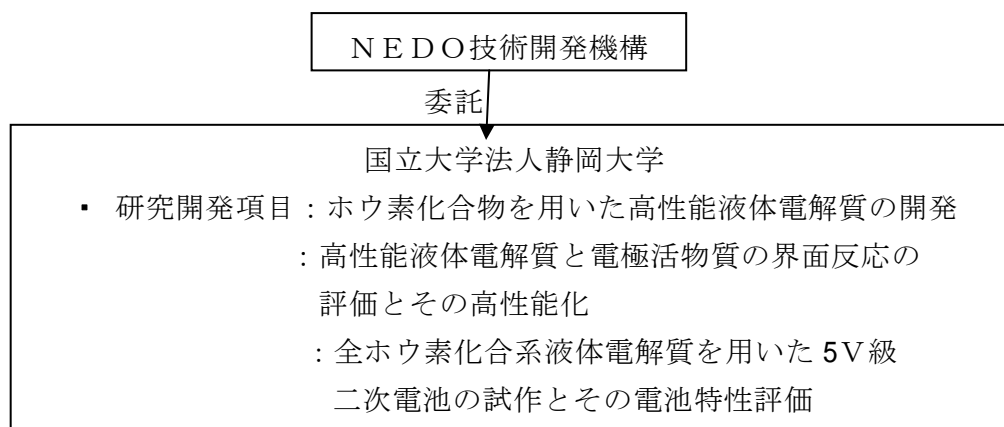


図 .2.4.13-1 研究開発の実施体制

## (5) 研究開発目標と根拠

### 中間目標

酸化電位 5.5 V 以上, イオン伝導度が室温で  $5 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$  以上, リチウムイオン輸率が 0.5 以上の全ホウ素化合物系液体電解質の創成. ホウ素化合物は酸化電位が高く, 室温で液体であり, ホウ素化合物のルイス酸のためアニオントラップ剤として機能し輸率上昇が期待できる.

### 最終目標

上記電解質を用いた, リチウム金属-高電位正極の組み合わせによる, リチウムイオン二次電池の創成. 充電電圧 5.0 V 以上, 作動電圧 4.5 V 以上, 安定なサイクル特性を示す事. 負極をリチウム金属とする事で電池容量を上昇させ,  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  等の高電位正極が既知である事から,

酸化電位 5.5 V 以上の電解質と組み合わせる事で, 4.6 V 以上の放電電位を有する二次電池創成が可能である.

## (6) 研究開発成果

本プロジェクトの研究成果 (一覧) を表 .2.4.13-2 に示す.

表 .2.4.13-2 研究成果 (一覧)

	目標値	電解質		
		ホウ酸エステル	ホウ酸エステル-炭酸エステル	ポロキシソ
酸化電位	5.5 V 以上	○	○	○
イオン導電率	5 mScm <sup>-1</sup> 以上	△	○	◎
リチウムイオン輸率	0.5 以上	○	○	—**
難燃性		○	○	—***
コイン電池サイクル		○	○	○
コイン電池サイクル*		—	—	—****
大型電池作成		—	—	○

◎ …… 目標値以上, ○ …… ほぼ達成, △ …… やや不足, × …… 未達成, — …… 未検討.

\* …… 充電上限 5.5 V, 1C, 50 サイクル後初期容量 98% 以上

\*\* …… 炭酸エステル電解液のため 0.3 程度

\*\*\* …… 炭酸エステル電解液のため難燃性は期待できない

\*\*\*\* …… 炭酸エステル電解液のため達成可能

### < 成果 1 >

(内容) 酸化電位 5.5 V, イオン伝導度が室温で  $3 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ , リチウムイオン輸率 0.5 のホウ酸エステル電解質創成.

(達成度)

(成果の意義) 現行の炭酸エステル電解質の酸化電位である 4.3 V を大きく上回る.

(課題と取り組み) 室温でのイオン伝導率が目標値を下回る.

## <成果2>

(内容) 酸化電位 5.0 V, イオン伝導度が室温で  $5 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ , リチウムイオン輸率 0.5 の  
ホウ酸エステル-炭酸エステル電解質創成.

(達成度)

(成果の意義) 現行の炭酸エステル電解質の酸化電位である 4.3 V を大きく上回る.

(課題と取り組み) 電池を構成した際のサイクル特性改善.

## (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.13-3 に示す。

表 .2.4.13-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願			1		1	2
うち、外国出願			1		1	2
国内登録			1		1	2
海外登録			3			3
論文				2		2
うち、査読付き論文				2		2
研究発表・講演				12	8	20
受賞実績				1		
新聞・雑誌等への掲載			2			
展示会への出展						
合計			8	17	11	

### ※電気化学会論文賞受賞

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

達成できなかった課題は, ホウ酸エステル電解質系およびホウ酸エステル-炭酸エステル電解質系においては, 最終的に高電位電池を構成した際のサイクル特性である. 新規電解質の負極での反応性の高さといオン伝導率がまだ不足していると考えられる. 負極界面に有効な添加剤を加える, あるいはイオン伝導率に関してはリチウム塩の種類の探索が有効であると考えられる. 事実, ある種のリチウム塩を用いると, 負極の反応が低減し, イオン伝導率も大きく上昇する事が解ってきた. 上記電解質系は極めて高い酸化電位を持っているので, 有効なリチウム塩と組み合わせる事で, 実用化が可能であると考えられる.

また, 添加剤としての環状ホウ酸エステル (ポロキシシ) に関しては, 酸化電位, イオン伝導率とも目標値をクリアしており, 実用化に極めて近いと考えられる. 課題としては, やはりここでもリチウム塩の選択であり, 現行のリチウム塩でも有効な環状ホウ酸エステル添加剤の開発に着手している.

### (9) 成果の実用化／活用

新規なふたつの電解質系に関しては、負極反応を制御する添加剤の探索（1年以内）、イオン伝導率の高いリチウム塩の探索（1年以内）、等を行う事で4.5Vを越える電圧を有する高電位蓄電池への可能性を示す事ができると考えられる。その後、ラミネート型や18650型等の大型電池への応用（3年以内）を検討する。

添加剤としての環状ホウ酸エステル（ボロキシソ）に関しては、18650型電池でも効果が実証されている。現行のリチウム塩でも有効な環状ホウ酸エステル添加剤の開発（1年以内）に着手しており、3年以内の実用化を目指している。

開発成果の産業界における具体的利用の実用化イメージ／出口イメージは、新規なふたつの電解質系に関しても、添加剤としての環状ホウ酸エステルに関しても、小さくて軽い蓄電池であり、そのために高い出力電圧を有する蓄電池である。後者に関しては3年以内、前者ふたつに関しては5年以内の実用化を目標とする。ここでホウ素化合物は、原子量も小さいので、軽い電池材料開発には極めて有効な元素である。また資源としても埋蔵量も多く、経済的にも大きな問題は見当たらない。このような観点から、電解質材料としてのホウ素含有化合物は有効である。ホウ素化合物は、強いルイス酸である事から、リチウム塩のカウンターアニオンのトラップ剤としても機能する。結果として、リチウムイオン輸率を上昇させる事に成功している。このような点は、ホウ素の元素としての特徴の利用であり、学術的にも波及効果が大きいと思われる。

### (10) その他

研究開発期間中2件の論文発表、2件の国内特許出願、20件の学会発表の外部発表を行ったが（別紙参照）、11社の企業の研究者から来訪を受けた。特にボロキシソ系の電解質は、以下に示す通り多くの企業からの問い合わせと訪問が相次いだ。内訳は、総合化学企業5社、総合電気関連企業1社、電池関連企業1社、自動車関連企業3社、無機化学関連企業1社である。NEDOの許可を得て、このうち3社に試料提供を行い、このうち2社と今年度から共同研究開始予定である。また、ほかの3社と共同研究の前段階としての、平成24年度から共同での研究開発に取り組む事で合意している。また1社から試料提供を受けて、その試料が今回の開発試料に適応できるかどうかを検査中である。この様に本研究成果を基に多数の国内企業に試料提供や共同開発につながった事は、特筆したい点である。

## 2. 4. 1 4 Li 系金属—空気 2 次電池の性能向上に関する研究 (九州大学)

### (1) 事業目的

現在の Li イオン 2 次電池では正極と負極に活物質が必要であり、このため重量当たりのエネルギー容量は低くなる。これに対し、金属—空気電池では、酸化側の活物質は空気なので、通常の電池に比べると、片方の活物質が不要であり、また金属 Li を用いるので、単位重量当たりのエネルギー密度が極めて大きく、Li 金属—空気電池は最も高エネルギー密度な電池として考えられている。この電池の理論容量は 5200Wh/kg ( $O_2$  を含む、11140Wh/kg ( $O_2$  を含まず)) と他の電池を圧倒して大きな値であり、次世代蓄電池として極めて魅力的な電池である。現在までに Li 金属—空気 2 次電池では容量として 1000mAh/g-C という比較的大きな容量が、初期には報告されているが、これは理論容量に比べるとはるかに小さい値であり、また、充電時に必要な電位が 4.2V と大きく、また繰り返し特性も低い。本事業では、Li 系金属—空気電池を 2 次電池として使用するために課題となる①再現性よく実験可能な電池構造の確立、②生成する  $Li_2O$  を可逆的に分解可能な触媒系の探索、③揮散しない電解液の検討、④安全性の高い Li 系合金負極の検討を行い、Li 系金属—空気電池を用いて、1000Wh/kg の達成、100 回以上の繰り返し充放電の達成を最終目的とする。

### (2) 事業概要

本研究では次世代型高エネルギー密度、出力密度の達成が期待できる Li 系金属—空気 2 次電池の開発のための要素技術の検討を行う。このために、本研究では①再現性よく実験可能な電池構造の確立、②生成する  $Li_2O$  を可逆的に分解可能な触媒系の探索、③揮散しない電解液の検討、④安全性の高い Li 系合金負極の検討を行う。とくに、種々の触媒について検討し、可逆性の高い空気極（正極）触媒を開発するとともに、金属—空気電池で課題となる安全性の確保のための電池構造の検討、およびイオン性液体などを応用する不燃性の電解液、安定性の高い Li 系化合物負極の開発を行う。実際に小型のセルを試作し、繰り返し特性の向上を検討するとともに、種々の条件での充放電特性を検討する。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

本プロジェクトにおける研究開発項目と開発費用について、表 2.4.14-1 にまとめる。

表 .2.4.14-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	20年度	21年度	22年度	23年度	
①再現性よく実験可能な電池構造の確立	→		→		
②生成するLi <sub>2</sub> Oを可逆的に分解可能な触媒系の探索			→		
③揮散しない電解液の検討				→	
④安全性の高いLi系合金負極			→	→	
まとめ	→			→	
開発費用(百万円)	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
九州大学	20.0	20.0	20.0	20.0	80.0

(4) 研究開発の実施体制

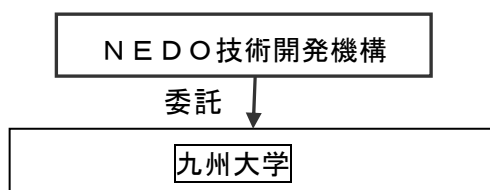


図 .2.4.14-1 研究開発の実施体制

(5) 研究開発目標と根拠

中間目標

(想定根拠・条件)

充放電容量：1000mAh/g-cat.の達成

酸化剤：純酸素の使用

繰り返し：50回以上(容量維持率50%)

重量容量：500Wh/kg-batteryの達成(電池容器を含む)

負極：Li金属の使用

Brouceらにより報告されているLi金属—酸素電池の繰り返し容量は約600mAh/gであり、本研究ではセルとしての充放電容量を1.5倍向上した数値に相当する1000mAh/g-cat.を設定した。一方、従来の報告では繰り返し特性は悪く、せいぜい10回の繰り返ししか達成していない。そこで、50回の繰り返し充放電の実現を目標とした。

最終目標

(想定根拠・条件)

充放電容量：4000mAh/g-cat.の達成

酸化剤：空気の使用

繰り返し：100回以上

負極：Li系合金の使用(容量：1000mAh/g-cat., 繰り返し：100回以上(容量意地率50%)、



Li金属-空気電池の理論容量は5000Wh/kgであるが、繰り返し容量として、その1/5程度を想定して、プロジェクト終了時の目標を設定した。この目標は、正極にLi-Si系の安全性の高い合金を応用した際のほぼ理論容量である。一方、繰り返し特性は2次電池であることを考慮して100回以上の充放電を可能とし、酸化剤を空気とした。後半では主に電池構成材料の最適化を行う。

## (6) 研究開発成果

表 .2.4.14-2 研究成果 (一覽)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
充放電容量	4000mAh/g-cat.	4574mAh/g-cat. 1915mAh/g-cat		CO <sub>2</sub> 添加 気相 O <sub>2</sub> 容量 500mAh/g
酸化剤	空気	空気		
繰り返し	100 回以上	100 回		
負極	合金系	炭素系		Li 利用率 100%

### <成果 1 >

(内容) 電池構造の最適化

(達成度) ◎

(成果の意義) 現在までに Li-空気電池では再現よく充放電特性を測定可能なセル構造についての報告が無かったことから、正しく特性を評価するセルの開発が求められる。本事業では、実施初年度に良好な性能を発現できる構造のセルの開発を行った意義は高い。

(課題と取り組み)

空気電池では燃料電池的な考え方から、空気を循環するなど、比較的、安定に充放電特性を測定できるセル構造が確立されていないのが課題であった。そこで、本研究では Li イオン電池の構造と燃料電池セルを融合したセルを試作し、良好に作動し、再現よく充放電特性が測定できることを明確にした (目標①)。

### <成果 2 >

(内容) 充放電容量 4500mAh/g-cat の達成

(達成度) ○

(成果の意義) 現在、空気極触媒としては酸化物と炭素を混合した触媒が広く用いられるが、本研究で炭素は酸化し易く、放電中に酸化して Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> を生成するので、繰り返し特性が低下するので、メソポーラス MnO<sub>2</sub> に Pd を修飾した空気極触媒系を開発した。この触媒では Li<sub>2</sub>O まで Li が酸化されるので、大きな容量の達成が可能である。一方で気相中に CO<sub>2</sub> を導入すると大きな放電容量を達成でき、ある程度の繰り返しも達成できることを明らかにした。これは Li-空気電池としての大きな容量向上を達成できたことになり、大きな意義がある。開発した空気極触媒は優位性があると考えられる。

(課題と取り組み)

1 放電当たりの空気極容量を大きくすることは、高表面積な炭素を用いるとある程度、可能であるが、通常、検討されている炭素系の空気極触媒では、次項の課題である繰り返し充放電

特性が悪く、繰り返しの観点からは、放電容量は 1000mAh/g-cat 程度が適当であった。本研究では繰り返し特性が低い理由として空気極の炭素が酸化して  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  を生成すること、充電電位が高すぎるので、空気極触媒の性能を向上して、充電電位を低減することから検討（目標②）を行い、メソポーラス構造の  $\text{MnO}_2$  が良好な触媒となり、さらに Pd で修飾すると、より大きな容量と低い充電電位を達成できることを示した。しかし、炭素を用いない電極のみでは、放電容量が 1500mAh/g-cat 程度と目標値より、低い値であった。一方で、気相に  $\text{CO}_2$  を添加すると、同じ電極を用いながら、非常に大きな容量に達成が可能であることを見出した。

### <成果 3>

（内容）酸化剤に空気の使用

（達成度）○

（成果の意義）現在の Li-空気電池の研究では、酸化剤に酸素を用いるのが一般的ではあるが、酸素を用いると、酸素は電池内部に保持する必要がある。本研究では乾燥状態ではあるが、空気を用いても Li-空気電池が 2 次電池として作動することを達成した。これはより実現的な電池においては重要な課題で、本研究の成果は今後の実用化を考える上で、高い意義があると考えられる。

（課題と取り組み）

空気を酸化剤に用いる際の課題は酸素分圧が低下することである。酸素分圧が低下すると放電、充電電位がそれぞれ、低下、増加し、効率が低下するだけでなく、繰り返し特性の低下が課題である。今回の検討では、良好な活性の空気極触媒を開発することで、酸素分圧の低い空気中でも安定な電極反応を維持できることが課題である。本研究では種々のメソポーラス酸化物を探索し、空気極触媒としてメソポーラス  $\text{MnO}_2$  が高活性であることを見出し、空気中でも十分な活性を維持できることを示した。

### <成果 4>

（内容）100 回の充放電繰り返し特性の達成

（達成度）○

（成果の意義）Li-空気電池では繰り返し特性の向上が現在の最も大きな課題であり、繰り返し特性の低い理由として、電解液の分解による  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  の生成が考えられているが、本研究で、空気極触媒の性能が良くなれば、低い電位での充電を達成でき、カーボネート系電解液を用いても、十分、繰り返し充放電が行えることを示した。これは繰り返し特性の向上には、安定な電解液を開発しないといけないと考えている現状とは異なり、空気極触媒の重要性を示唆し、高性能空気極触媒により、繰り返し充放電の達成が可能であることを明らかにした成果であり、今後の Li-空気電池の開発方向を決める重要な成果と考えている。

（課題と取り組み）

現在の Li-空気電池では繰り返し充放電を行うと、容量が大きく低下することが課題であった。そこで、本研究では充電電位を低下させることがもっとも重要と考え、空気極触媒の高活性化を行った。本研究では繰り返し特性の評価のために、比較的高いレートでの充放電を行ったが、実用的な Li-空気電池では、利用が想定されるレートでの充放電の繰り返し特性の評価が必要になる。その場合に測定時間が長期になり、揮発しない電解質またはセパレータの開発

が必要になる。本研究ではLiイオン伝導性酸化物やゲル電解質（目標③）の応用を検討し、ある程度の成果を得た。

#### <成果5>

（内容）合金系負極の使用

（達成度）△

（成果の意義）本研究を含め、従来のLi-空気電池の開発では、負極には金属Liが用いられており、負極Liの変化や利用率については全く不明であった。本研究で負極Liの利用率は100%近くまで達成できることを明確にし、2サイクル目以降の劣化が、負極上でのLiの放出抑制にあることを明確にできた意義は、今後のLi-空気電池の2次電池化を行う腕、極めて大きい意義がある。また、今回は時間の関係でLiC<sub>6</sub>しか検討できなかったが、インターカレート型の負極の適応の重要性を明確にできた点は、大きな意義のある成果と考えている。

（課題と取り組み）

負極の課題はLiの利用率の向上とデンドライトの生成抑制にある。本研究ではLi-空気電池の安全性と繰り返し特性、空気との反応などを考えると、負極へのインターカレート型化合物の応用が重要と考えている。本研究ではLi量を低下させ、Liの利用率について測定し、Li利用率および繰り返し特性への影響を検討した。Li利用率が向上すると、デンドライトが生成し、デンドライトが生成すると放電容量が、金属Liがあるにもかかわらず、低下することが分かった。そこで、デンドライトを抑制し、繰り返し特性を確保するために、LiをプレドープしたLiC<sub>6</sub>を用いたところ、デンドライトの生成は抑制され、容量は低下することなく繰り返し充放電が可能であった。

#### （7）知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.14-3 に示す。

表 .2.4.14-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願		0	0	0	0	0
うち、外国出願		0	0	0	0	0
国内登録		0	0	0	0	0
海外登録		0	0	0	0	0
論文		0	0	2	4	6
うち、査読付き論文		0	0	2	4	6
研究発表・講演		1	7	7	4	19
受賞実績		0	1	1	0	2
新聞・雑誌等への掲載		0	1	2	5	8
展示会への出展		0	0	0	0	0
合計		1	9	12	13	35

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

今後の課題としては、充電電位のさらに低減とレート特性の向上、実際の空気の使用にあると考えている。今回は種々の空気極触媒について検討したが、CO<sub>2</sub>を添加しない系では、容量は目標値に比べ2/3程度であった。これは空気極触媒の表面積がまだ、不十分なためであると考えているが、負極容量を制御する因子とCO<sub>2</sub>添加時になぜ、緻密な析出が生成するかを明確にして、空気の系へも展開したい。この観点で、種々の添加物の影響を検討する予定です。

一方、繰り返し特性を向上させるには充電電位を低下して、空気極触媒および電解液の分解の抑制が必要である。充電電位の低減として、今後は引き続きメソポーラス酸化物の合成と応用を検討するが、細孔径の最適化が重要と考えており、種々のテンプレートを用いて細孔サイズをなるべく大きくしたメソポーラスMnO<sub>2</sub>の合成を検討する予定である。ある程度の容量が達成できると、負極へのSi等の応用を行うことで、十分な容量と安全性、繰り返し充放電特性を達成できるLi-空気2次電池が開発できると考えている。

金属極へのインターカレート型化合物の応用はLi金属量の影響に思ったより時間がかかったため、Siなどの合金の応用はできなかった。しかく2サイクル目以降の容量低下はむしろ、負極でのLiデンドライトの影響が大きいことがわかった。そこで、今後、高容量インターカレート金属の応用で、ある程度、良好な性能が得られると期待している。

## (9) 成果の実用化／活用

空気電池は自動車用の電池開発ロードマップにおいて2030年までに必要とされる700Wh/kgを達成できる十分な容量を発現可能な電池として、実用化が期待される。そこで、自動車用電池としての2030年頃の実用化を行うためには、2020年程度までに基本形となる小型電池が完成する必要があり、今後数年以内に材料的な課題を解決する必要があると考えている。

本研究で開発したメソポーラスβ-MnO<sub>2</sub>/Pd系空気極触媒は、優れた空気極活性と可逆性を有してはいるが、容量がまだ十分ではなく、今後、3年程度を目途に、さらに大きな容量を示す空気極触媒の開発を行う必要があり、構造の制御と反応機構の面から検討し、緻密で、可逆的にLi<sub>2</sub>Oの分解が可能な空気極触媒の開発が求められる。しかし、可逆的で、大きな容量の空気極触媒が開発できると、Li-空気電池の実現性が急速に高まると期待される。

自動車用にLi-空気電池を開発するには電解質の固体化やフィルターなどの開発が必要不可欠であり、今後これらの技術開発も求められる。空気電池の開発は、電気自動車のみでなく、携帯電話などの移動機器の使用時間の飛躍的な長時間化を実現できるので、経済的に大きな効果があると考えられる。

## (10) その他

Li-空気電池は世界的には非常に精力的な研究が行われ、実用化への期待が高まっている。金属-空気電池は繰り返し充放電特性の向上が重要で、本研究で負極の特性向上が有効であるという成果が世界に先駆けて得られたことで、実用化に向けた展開が期待できると考えている。

## 2. 4. 15 イオン液体電解液を用いたリチウム二次電池の研究開発 (慶應義塾大学、東京理科大学)

### (1) 事業目的

揮発性・可燃性の有機溶媒を電解液に用いたリチウム二次電池（炭素負極を用いたリチウムイオン電池を含む）は内部短絡などの事故時に爆発や発火の危険性があり、これまでも携帯電話やノート型パーソナルコンピュータなどで発火事故が発生している。電気自動車やハイブリッド自動車などでは多くの単セルを組み合わせた大型の組電池が用いられるが、有機電解液を用いたリチウム二次電池を使用した場合、一つの単セルに何らかの問題が発生して発火すると、その火は他の単セルにも引火し、大規模な事故につながる可能性がある。従って、次世代自動車用蓄電システムの安全性を確保する上で、それに用いるリチウム二次電池電解液の難燃化が極めて重要であるといえる。可燃性の溶媒を含まずイオンのみからなるイオン液体は難燃性のリチウム二次電池電解液の有望な候補として従来から様々な研究が行われてきた。これまでに、イオン伝導率が高く、金属リチウムのように化学的に活性な負極活物質と反応しないイオン液体の探索に関する研究は数多く行われてきたが、これまでのところそれら両方の特性を兼ね備えたイオン液体の開発には至っていないのが現状である。また、イオン液体中における負極または正極界面では、イオン液体を構成するイオンの分解などの副反応が起こったり、反応抵抗が一般的な有機電解液における値の数十倍と高いことなどがわかっており、高性能な電池を開発するためにはイオン液体中における電池活物質の反応、特に電極とイオン液体との界面に着目した研究を進める必要がある。さらに、 $500 \text{ Wh kg}^{-1}$ 以上の高いエネルギー密度を達成するためには従来から用いられている炭素負極（理論容量  $372 \text{ Ah kg}^{-1}$ ）にかわって、高い比容量が期待されるスズ（同  $993 \text{ Ah kg}^{-1}$ ）やケイ素（同  $4197 \text{ Ah kg}^{-1}$ ）を負極活物質として用いる必要があるが、イオン液体中においてこれらの負極活物質に対するリチウムのドーピング・脱ドーピング反応について検討した例は極めて少ない。また、これらの活物質はリチウムのドーピング・脱ドーピングに伴う体積変化が大きいためサイクル特性が悪いことが知られている。そこで本研究開発テーマでは、新たなイオン液体の開発を目指すのではなく、疎水性を示すビス（トリフルオロメチルスルフォニル）イミド（TFSA<sup>-</sup>）をアニオンとする典型的なイオン液体を用い、各種添加剤による電極反応の制御および高分子を用いた電極表面の化学修飾による電極とイオン液体界面の制御によって、高いエネルギー密度を持ち、サイクル特性およびレート特性に優れた電池系を見いだすことを目的とする。本研究開発で検討する方策は他のイオン液体を用いた場合も同様に有効であることが期待され、将来、より低融点、低粘度のイオン液体が開発されれば、さらなる性能の向上が見込まれる。また、高分子による電極表面の被覆によって体積変化の大きな金属電極のサイクル特性の改善にも効果が期待される。

### (2) 事業概要

イオン液体を電解液として用いた安全性に優れ、高エネルギー密度、高性能のリチウム二次電池を開発するために、グライムやクラウンエーテルなどの新規添加剤およびポリアクリル酸などの高分子による化学修飾によって負極および正極の界面における反応抵抗の低減および負極のサイクル特性向上を目指す。負極としては炭素のほか、高い比容量が期待されるスズまたはケイ素を主体とした薄膜状の合金負極の利用を検討する。正極としては主にマンガン酸リチ

ウムおよびオリビン型リン酸鉄リチウムを用いる。さらに、実用的な観点から、粉末状の活物質を用いて負極および正極を作製することを想定し、機能性バインダーとしてリチウムイオンに対する配位能を有する高分子材料を用いることによって、正極および負極の性能改善を試みる。

スズ負極を用いたこれまでの検討から、初期容量は有機電解液、イオン液体電解液ともに約  $900 \text{ Ah kg}^{-1}$  と差はないものの、サイクル特性に関しては有機電解液中では容量が半減するまでに数十サイクルを要するのに対し、イオン液体電解液中では 10 サイクル程度であることがわかっている。また、電極・電解液界面の反応抵抗については、スズ負極、オリビン型リン酸鉄リチウム正極共にイオン液体電解液中では有機電解液中に比べ 10 倍程度高い値となり、高出力の電池を開発するためには反応抵抗の低減が必須であるといえる。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.15-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
イオン液体に対する添加剤の検討		→			→	
電極表面の化学修飾		→			→	
機能性バインダーを用いた負極評価と反応機構の解析		→	→			
各種炭素負極のイオン液体中での評価			→			
酸素含有各種バインダーの最適化			→			
機能性バインダーを用いた負極評価と反応機構の解析					→	
高容量 Mn 系正極のバルク・界面機構調査					→	
電極・イオン液体系の熱安定性の評価					→	
開発費用 (百万円)	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
学校法人慶應義塾	0.0	10.0	13.2	10.0	10.0	43.2
学校法人東京理科大学	0.0	10.0	5.2	10.0	10.0	35.2

#### (4) 研究開発の実施体制

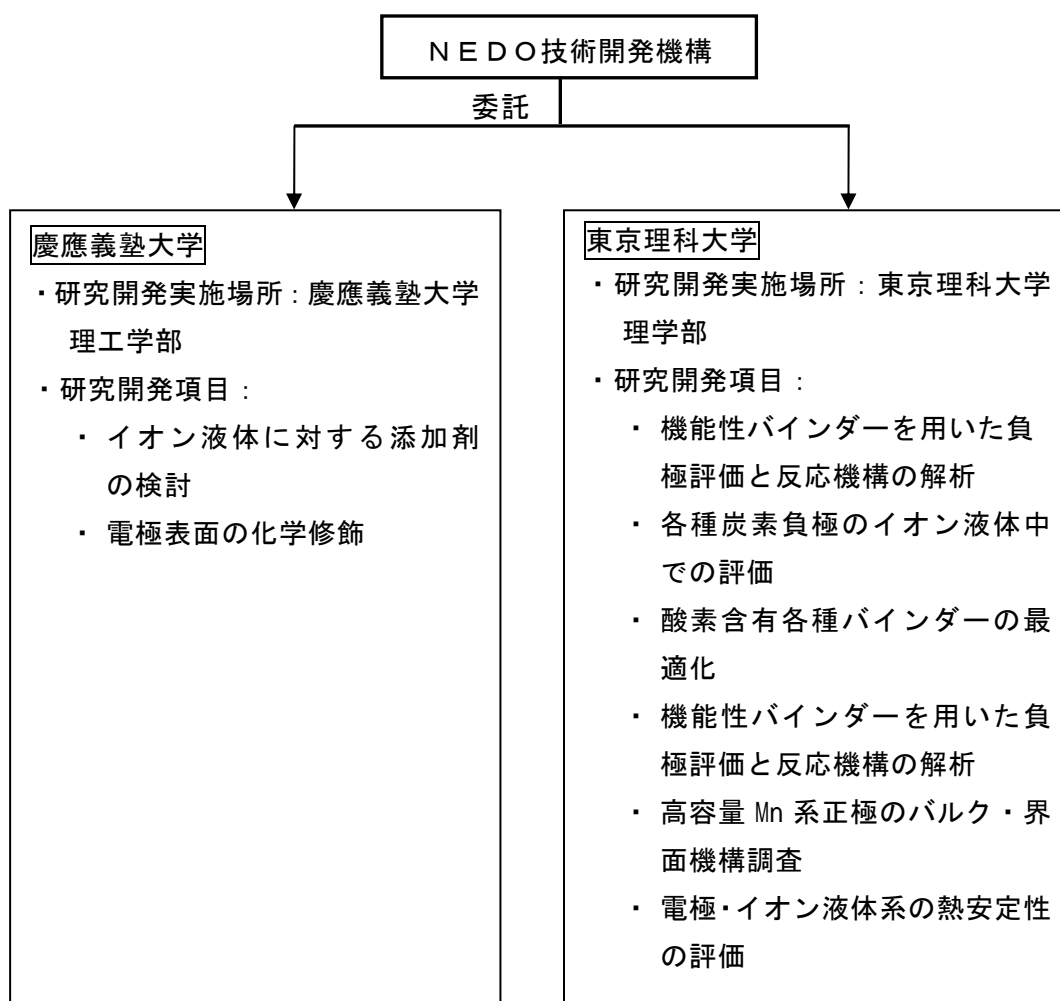


図 .2.4.15-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

活物質のみで  $600 \text{ Wh kg}^{-1}$  の高エネルギー密度をもつリチウム二次電池を開発するために、各研究開発項目ごとに以下のような目標を設定した。

##### 中間目標

##### 研究開発項目：イオン液体に対する添加剤の検討

イオン液体中におけるスズ負極の充放電反応に対する界面抵抗は有機電解液中に比べ数十倍程度の値となるが、高出力密度の電池に利用するためには、界面抵抗の低減が必須である。イオン液体に各種グライムを添加することによって、界面抵抗を10分の1程度まで減少させ、有機電解液中の値に近づける。また、ケイ素負極についても同様の検討を行う。

##### 研究開発項目：電極表面の化学修飾

スズ負極の表面をポリ酸化エチレンからなる高分子で被覆することによって、負極・電解液界面における界面抵抗の低減を目指す。また、被覆がサイクル特性に与える影響を検討する。具体的な目標としては、スズ負極活物質のみで、 $500 \text{ Ah kg}^{-1}$  以上の比容量、50 サイクル以上の充放電の実現を目標とする。また、ケイ素電極についても同様に、活物質のみで、

500 Ah kg<sup>-1</sup>以上の比容量、100 サイクル以上の充放電の実現を目標とする。

#### 研究開発項目：ポリアクリル酸黒鉛電極のイオン液体中での評価

添加剤を含まない TFSA<sup>-</sup>系イオン液体電解液中では対カチオンの挿入が不可避であり黒鉛に対する可逆的なリチウム挿入脱離は困難である。黒鉛負極は当面の間主要な負極活物質として利用される可能性が高いため、イオン液体電解液中においても黒鉛負極を利用可能にする技術開発が必要である。そこで、機能性バインダーとしてポリアクリル酸系高分子を用いることで、有機系添加剤を含まないイオン液体電解液中における黒鉛負極で 300 Ah kg<sup>-1</sup>以上の比容量で、100 サイクルの充放電を実現することを目標とする。

#### 最終目標

#### 研究開発項目：イオン液体に対する添加剤の検討

スズに加えてケイ素を負極活物質として用い、添加剤による界面抵抗の低減効果の検討および低減メカニズムの解明を試みる。なお、ケイ素負極は添加剤を含まないイオン液体電解液中では作動しないことが判明したため、様々な添加剤を加えたイオン液体電解液中において検討を行うこととした。さらに、同様の検討を正極についても実施する。イオン液体電解液中における正極および負極における電極・電解液界面のインピーダンスを、添加剤を加えることによって添加する前の 10 分の 1 程度 (有機電解液中の値と同等) まで減少させることを目標とする。

#### 研究開発項目：電極表面の化学修飾

スズおよびケイ素負極の表面を化学修飾することによって、界面抵抗の低減とサイクル特性の改善が期待される。イオン液体電解液に加えた各種添加剤の分解によって生成する固体電解質界面被膜によってこれらの負極表面を化学修飾し、ケイ素負極を用いて、活物質のみで、1500 Ah kg<sup>-1</sup>以上の比容量、200 サイクル以上の充放電を実現することを目標とする。また、正極についても同様の検討を行い、イオン液体電解液を用いた電池を作成し、200 サイクル以上の充放電の実現を目標とする。

#### 研究開発項目：機能性バインダーを用いた負極評価と反応機構の解析

ケイ素は炭素に比べて高い比容量をもつ。負極活物質として炭素とケイ素の複合材料を用い、ポリアクリル酸系バインダーを用い、1000 Ah kg<sup>-1</sup>以上の比容量で、100 サイクル以上の充放電の実現を目標とする。また、ポリアクリル酸系バインダーと活物質を含めた電極構造の最適化による高い実用性能の向上、イオン液体の構造やリチウムインターカレーション機構の解明といった学術的理解、さらにそれらの実使用を想定する安全性を満たすリチウムイオン電池の総合的な技術確立を目標とする。

#### 研究開発項目：高容量 Mn 系正極のバルク・界面機構調査

高エネルギー密度のリチウム二次電池を開発するためには、負極のみならず正極の比容量の向上が不可欠である。そこで、高容量が期待される Li<sub>2</sub>MnO<sub>3</sub> 系の正極活物質をイオン液体電解液中で動作させるための材料化学的検討を行う。これによって、Li<sub>2</sub>MnO<sub>3</sub> 系の正極活物質で 230 Ah kg<sup>-1</sup>以上の可逆容量を実現することを目標とする。さらに、高容量が発現する際のバルク構造変化のメカニズムを解明する。



(6) 研究開発成果

表 .2.4.15-2 研究成果 (一覧)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
イオン液体 に対する添 加剤の検討	スズ負極について 10 分の 1 ケイ素負極について 10 分の 1	20 分の 1 程度 添加剤未添加では動 作せず	—	
電極表面の 化学修飾	LiCoO <sub>2</sub> 正極について 10 分の 1 スズ負極のポリ酸化エチレ ン被覆で、500 Ah kg <sup>-1</sup> 以上の 比容量、100 サイクル以上の 充放電 ケイ素負極について 1500 Ah kg <sup>-1</sup> 以上の比容量、200 サイク ル以上の充放電 化学修飾薄膜正極と組み合 わせ、200 サイクル以上の充 放電	大幅な改善なし 500 Ah kg <sup>-1</sup> 以上の比 容量、60 サイクルの 充放電 2000 Ah kg <sup>-1</sup> 以上の比 容量、100 サイクルの 充放電 未実施	×  ×	添加剤共存下
ポリアクリ ル酸被覆黒 鉛電極のイ オン液体中 での評価	300 Ah kg <sup>-1</sup> 以上での 100 サイ クル	360 Ah kg <sup>-1</sup> の比容量、 30 サイクル		
機能性バイ ンダーを用 いる負極評 価	ケイ素系負極で 1000 Ah kg <sup>-1</sup> 以 上の比容量、100 サイクル以上 の充放電	1000 Ah kg <sup>-1</sup> 以上の 比容量、50 サイクル		メカニズムの 解明に成功
高容量 Mn 系 正極のイオ ン液体中で のバルク・界 面機構調査	Li <sub>2</sub> MnO <sub>3</sub> ベースの材料で 230 Ah kg <sup>-1</sup> 以上の可逆容量を実現	250 Ah kg <sup>-1</sup> の可逆容 量を達成		

<成果 1> イオン液体に対する添加剤の検討

リチウムイオンを含むイオン液体電解液に各種グライム、炭酸エチレン、炭酸ビニレンを添加することによってリチウムイオンの溶存状態が変化し、イオン伝導率などの物性も影響を受けることを明らかにした。イオン液体中におけるスズ負極の充放電反応に関する界面抵抗は有機電解液中に比べて非常に大きい、イオン液体中にグライムを添加することによってリチウムイオンの溶存状態が変化すると同時に、生成したグライム-リチウム錯体が電極界面に存在することで、界面抵抗が大幅に低下する可能性を見出した。また、イオン液体に炭酸エチレンや炭酸ビニレンを添加することによってスズ負極表面に固体電解質界面被膜が形成し、界面抵抗

が大幅に低下することを見出した。

#### ＜成果 2＞電極表面の化学修飾

スズ負極の表面をリチウムイオンを含むポリ酸化エチレンで完全に被覆しても、イオン液体電解液中で充放電が可能であったことから、固体電解質界面被膜はリチウムイオン伝導性を有する高分子被膜で代用できる可能性が示唆された。一方、炭酸エチレンや炭酸ビニレンを加えたイオン液体電解液を用いることで、ケイ素負極の表面に固体電解質界面被膜が形成され、可逆的な充放電が可能になることを見出した。固体電解質界面被膜が一度形成すると、添加剤を含まないイオン液体電解液中でも充放電は可能であるが、固体電解質界面被膜が再生されないためサイクル劣化が著しいことが明らかになった。また、界面抵抗は固体電解質界面被膜だけではなく、リチウムイオンの溶存状態の影響も受けることが示唆された。

#### ＜成果 3＞ポリアクリル酸黒鉛電極のイオン液体中での評価

TFSA<sup>-</sup>系イオン液体電解液中において黒鉛負極の可逆的な充放電は不可能であるが、バインダーにポリアクリル酸ナトリウムを用いることによって理論容量に近い  $360 \text{ Ah kg}^{-1}$  の比容量で充放電することに成功した。

#### ＜成果 4＞機能性バインダーを用いる負極評価

黒鉛にケイ素粉末を複合化し、ポリアクリル酸ナトリウムをバインダーに用いることによって複合電極として約  $800 \text{ Ah kg}^{-1}$ 、活物質であるケイ素当たりでは  $1400 \text{ Ah kg}^{-1}$  以上の比容量で 50 サイクルにわたって充放電することに成功した。さらに、放射光施設における硬 X 線光電子分光法を用いた解析によって、ポリアクリル酸ナトリウムが負極活物質表面を覆い、ポリアクリル酸ナトリウムケイ素との化学的相互作用によってケイ素の黒鉛上での分散性が向上していることが明らかになり、ポリアクリル酸ナトリウムが結着剤としてだけではなく、固体電解質界面被膜のような働きをしていることが示唆された。

#### ＜成果 5＞高容量 Mn 系正極のイオン液体中でのバルク・界面機構調査

$\text{Li}_2\text{MnO}_3$  系正極活物質の一次粒子サイズを 100 nm 以下にすることで、イオン液体電解液中における酸素の脱離を進行させることに成功し、 $250 \text{ Ah kg}^{-1}$  の比容量で 20 サイクル以上にわたって充放電することに成功した。また、放電時にカーボネート系の有機溶媒電解液を用いた場合は酸素還元生成物として電極表面に炭酸リチウムの析出が確認されたが、イオン液体電解液中ではそのような反応は抑制されることがわかった。

### (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 2.4.15-3 に示す。

表 .2.4.15-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願				2		2
うち、外国出願					1†	(1)
国内登録						
海外登録						
論文			3	10	8‡	21
うち、査読付き論文			3	9	8‡	20
研究発表・講演		21	36	40	41	138
受賞実績				2	1	3
新聞・雑誌等への掲載			7	3		10
展示会への出展						
合計		21	46	57	50	174

†現在 PCT 出願審査中、‡平成 24 年度 2 報含む

#### (8) 成果の実用化／活用

イオン液体電解液を実用的なリチウム二次電池に適用するためには低いイオン伝導率、高い界面抵抗、副反応、高いコストなどの課題を解決しなければならない。本研究開発では、これらの問題のうち特に界面抵抗の低減と黒鉛やケイ素負極における副反応の抑制に重点をおいて検討を進めた。界面抵抗の低減については、リチウムイオンの溶存状態の制御が重要であることを見出しており、イオン液体のアニオンやリチウムイオンと選択的に相互作用する物質を添加することによって、界面抵抗の低減やリチウムイオン輸率の向上が図れる可能性を示すことができた。また、イオン液体電解液においても、有機電解液と同様に固体電解質界面被膜の形成が、界面抵抗の低減や副反応の抑制に有効であることを示すことができた。これらの成果はイオン液体を用いた実用的な電解液設計に一定の指針を与えることができたといえる。

多くの有機電解液中では複数の有機化合物が分解して固体電解質界面被膜を形成するが、本研究開発ではイオン液体電解液に添加した個々の有機化合物の分解によって固体電解質界面被膜が生成する。固体電解質界面被膜の組成は用いた有機化合物の種類に依存することが示唆されており、本研究開発で用いた手法は、固体電解質界面被膜の解析に用いることが可能である。有機電解液中においても固体電解質界面被膜の生成機構や機能の解明が電池性能の向上に重要であるので、今後もこの手法を用いて有機化合物の分解機構や生成する固体電解質界面被膜の解析を進めていきたい。

炭素やシリコンの粉末をポリアクリル酸塩をバインダーに用いて電極作製を行うという簡便な手法を用いることで TFSA 系イオン液体電解液中における電極特性の大幅な改善に成功している。ポリアクリル酸塩は一般的なポリマーであることから広く利用されている PVDF と比較してスラリーの粘性などの調整は必要になると思われるが、その実用化への壁は比較的低いと考えられる。ただし、実際の電池としての応用を考える場合には必要となるバインダーとしての長期の安定性、熱安定性、温度依存性など多くの評価は現状では実施できていない。

## 2. 4. 16 カーボンフェルト電極マイクロ波放電を利用したマグネシウム二次電池正極活物質の研究開発（埼玉県産業技術総合センター）

### （1）事業目的

本事業は、カーボンフェルト電極を用いたマイクロ波放電および加熱（CF-AMDH）によって特徴的に合成される格子欠陥により歪んだ結晶構造（ディスオーダー構造）の硫黄ドープ金属複合酸化物を正極活物質に用いることにより、最終的には、エネルギー密度 500 Wh/kg の非戦略物質から構成されるマグネシウム二次電池を開発することを目的とする。

### （2）事業概要

マグネシウム（Mg）は2価であることからリチウムに匹敵する理論容量（2200 mAh/g）を有しており、リチウムと比較して安全性も高く、戦略物質でもないことから、種々の電池への応用が期待されている。しかし、Mgイオンは固体中での拡散が遅い。このため、結合が強固な酸化物では固体中にトラップやすく、結晶構造が不安定な硫化物では結晶構造の崩壊が起りやすい。したがって、電池容量が上がらず、サイクル性能も維持しにくい欠点がある。そのため、Mgイオンを安定的に吸蔵・放出することができる正極材料の開発が課題となる。

そこで、結晶構造の安定な金属酸化物に硫黄をドープすることにより課題解決を図った。我々が開発したCF-AMDH法は、格子欠陥に起因するディスオーダー構造を有する金属酸化物が合成され、かつ、硫化物が合成されやすい特徴がある。このCF-AMDHを利用することによりディスオーダー構造の硫黄ドープ金属複合酸化物を合成した。種々の金属酸化物と硫黄と混合し、CF-AMDHにより格子欠陥に硫黄をドープして正極活物質を合成し、この活物質を含む正極等からハーフセルを構成し、電気化学的評価を行った。また、合成したディスオーダー構造の硫黄ドープ金属複合酸化物の構造分析、およびMgの挿入脱離挙動を分析して、反応挙動を明らかにした。さらに、電解液およびセパレーターを選定し、合成した正極活物質、Mg合金負極を組み合わせて、単セルを構成し、電池性能の評価を行った。電池性能の向上を図るため、金属酸化物の種類、ディスオーダー構造、硫黄ドープ量およびその結合状態の制御、すなわち、マイクロ波出力、照射時間、添加硫黄量、添加物質の種類と量等の合成条件の調整を行い、放電容量の増大およびサイクル特性の向上を図った。

(3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.14-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
硫黄ドープ金属複合酸化物の合成 ・ ディスオーダー構造の調整・アモルファス化 ・ 硫黄ドープ量の調整 ・ 粒子の調整		→		→	→	
結晶構造分析			→	→		
反応挙動の解明					→	
単セルの作製および性能評価				→	→	
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
埼玉県産業技術総合センター		19.7	12.6	6.8	8.6	47.8

(4) 研究開発の実施体制

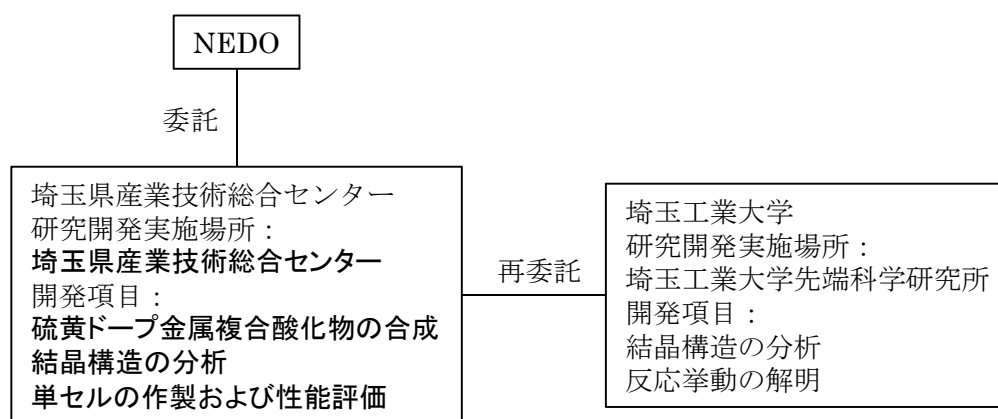


図 .2.4.14-1 研究開発の実施体制

(5) 研究開発目標と根拠

中間目標

- 1) ディスオーダー構造と放電容量との関係を明らかにする。
- 2) ドープ硫黄量と放電容量の関係を明らかにする。
- 3) 正極活物質あたりの放電容量 250 mAh/gを達成する。
- 4) 50サイクル後の正極活物質あたりの放電容量 150 mAh/gを達成する。

5) 合成した硫黄ドーブ金属複合酸化物の結晶組成、結合状態を明らかにする。

(想定根拠・条件)

予備試験の結果、 $\text{MgMn}_2\text{O}_4$ では、CF-AMDHおよび硫黄ドーブにより、放電容量が20 mAh/gから131 mAh/gに増大した。この結果から、各物質についてディスオーダー構造と放電容量との関係を明らかにし、最適化することにより、200 mAh/gを達成することができると考えた。ここで、各物質の理論容量は、 $\text{MgV}_2\text{O}_5$  : 280 mAh/g、 $\text{MgMn}_2\text{O}_4$  : 270 mAh/g等であり、硫黄の理論容量は950 mAh/gである。このため、硫黄を電気化学的に有効な状態となるようにドーブできればさらなる容量増大が期待される。これまでの報告では、 $\text{Mg}_{0.5}\text{Hf}_{0.5}\text{Sc}(\text{MoO}_4)_3$ を用いた場合の初期容量185 mAh/gがおよそ50サイクル後、121 mAh/gが最高である（特開2007-280627）。また、硫黄ドーブ金属複合酸化物は金属-酸素間の結合が拡がり、結合エネルギーが減少すると推測される。したがって、XPS、FTIR、TEM電子線回折等により結晶組成および結合状態等の知見が得られると推察した。

最終目標

- 1) 正極活物質あたりの放電容量 400mAh/g
- 2) 端子間電圧の向上（初期 1.4V 1.65V）
- 3) 50 サイクル後の維持率 50%
- 4) 反応挙動の解明
- 5) 単セル放電容量 : 300 mAh/g、エネルギー密度 : 500 Wh/kg（想定電圧 1.65 V）

(想定根拠・条件)

添加硫黄量を増大すると、硫黄が凝集して活物質として作用しないことが判明した。また、高容量・サイクル安定な硫黄ドーブ金属複合酸化物は、金属と酸素の結合距離が拡がりアモルファス化する知見が得られた。このことから、このアモルファス部分に硫黄がドーブされ一体化すれば、硫黄が電気化学的に有効に作用し、硫黄の溶解脱離が抑制されると推察した。このアモルファスの安定化には共晶物質の添加が有効であると想定された。また、高電圧化には粒子調整することによる抵抗の減少および部分ハロゲン化およびリン酸化が有効であると推察された。また、反応挙動の解明すなわち Mg イオンの挿入脱離機構は、XPS により充放電に伴う結合状態を分析することによりアプローチできると考えた。さらに、単セルを構成するには、正極以外に適切な負極、電解液、セパレーターが必要となる。負極は海水電池用等のマグネシウム合金、電解液は、文献（特開 2004-265676、特開 2010-15979）等を参考に選定した。セパレーターは、アラミド系、微多孔性ポリエチレン系等を想定した。

## (6) 研究開発成果

表 .2.4.16-2 研究成果 (一覽)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
放電容量	400mAh/g	420 mAh/g	○	
サイクル維持率	50 %-50 サイクル	70 %		
高電圧化	1.65 V	1.4 V	×	
反応挙動	解明	解明	○	
エネルギー密度	500 Wh/kg	300 Wh/kg	×	

### <成果1> 放電容量 420mAh/g

(内容)

合成した正極活物質 ( $S-V_2O_5/MnO_2$ ) の初期放電容量は目標値である  $400mAhg^{-1}$  を超える容量  $420mAhg^{-1}$  が得られた。電気化学的に有効な硫黄のドーピング量を増大することにより容量が増大することが判明した。このためには硫黄の酸化反応を抑制する低温の CF-AMDH が有効で、特に水プラズマ (反応温度: 水の沸点) を利用したもの (CF-MWP) が有効であった。硫黄と  $V_2O_5$  混合し、この混合物に CF-MWP を照射すると、 $V_2O_5$  表面は硫黄が分散し、アモルファス化した。そして、このアモルファス化により硫黄の脱離が抑制され、両者が一体化した ( $S-V_2O_5$ )。このアモルファス化は  $V_2O_5$  で特異的に生じた。有効なドーピング硫黄量の増大には共晶物質が効果的であり、自身がレドックス反応する  $MnO_2$  等を用いると  $S-V_2O_5$  以上に容量が増大した。

(達成度) ○

(成果の意義)

これまでの報告では、50 サイクル程度では容量 200 mAh/g 以下であり、本成果 ( $S-V_2O_5/MnO_2$ ) はこれを超える Mg 二次電池正極世界最高の結果 (50 サイクル後 300mAh/g 以上) が得られた。

(課題と取り組み)

$S-V_2O_5/MnO_2$  はサイクル劣化が課題となる。この原因は  $V_2O_5$  と  $MnO_2$  が完全には共晶化せず、 $MnO_2$  サイトで Mg の脱離が困難となるためと考えられる。共沈法等により共晶化してから CF-MWP により硫黄をドーピングする合成法等を検討する。

### <成果2> サイクル維持率 70%-50 サイクル

(内容)

サイクル維持率は目標値の 50% を超える容量 70% が得られた。 $V_2O_5$  (酸化物結晶) では挿入した Mg イオンが脱離せず、サイクル劣化した。それに対して  $S-V_2O_5$  では、サイクル性能が向上した。しかし、 $S-V_2O_5$  は溶媒親和性が高いため、粒子脱離が生じた。共晶物質 ( $B_2O_3$ 、 $MnO_2$ ) を添加して二次粒子化することにより粒子の脱離が抑制された。これによりサイクル維持率が向上した。

(達成度)

(成果の意義)

酸化物正極は電圧が高いが、Mg イオンがトラップされやすくサイクル性能が低い。50 サイクル後 300mAh/g 以上の容量を発揮している報告はない。

(課題と取り組み)

V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> と共晶物質 (MnO<sub>2</sub> 等) が完全に共晶化する粒子の作り込みが課題となる。

### <成果 3> 反応挙動の解明

(内容)

S-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> の構造は、バルクは V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 結晶であり (XRD、TEM 電子線回折)、表面は層間が拡がり (DRS-FTIR)、アモルファス構造であった (TEM 電子線回折)。V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> に挿入した Mg は MgO の結合エネルギーを有しており、脱離困難であった。S-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> に挿入した Mg の結合エネルギーは MgO よりも低く、脱離可能であった (XPS)。S-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> のサイクル安定は、アモルファス化により強固な Mg-O 結合が形成されないためであることが示唆された。また、硫黄は表面に分散しており V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> アモルファス体に取り込まれた。これにより硫黄の溶解脱離が抑制されたと推察される。また、作製した正極は硫黄が分散することにより高い撥水性を示した (接触角 80°)。これにより配位子である水が排除され、Mg イオンがシングルイオン伝導しやすくサイクルが安定したと推察される。

(達成度) ○

(成果の意義)

Mg イオンの酸化物への挿入脱離はアモルファス化することにより可能となることを初めて明らかにした。硫黄と V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> の組み合わせは Li イオン電池において報告があるが、酸化バナジウムのアモルファス構造中に硫黄が分散することにより、電気化学的に有効な硫黄量の増大および硫黄の脱離抑制を可能とした報告はない。

### (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.16-2 に示す。

表 .2.4.16-2 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願		1	1	2	0	4
うち、外国出願						
国内登録						
海外登録						
論文					2	2
うち、査読付き論文					2	2
研究発表・講演			2	1	1	4
受賞実績						
新聞・雑誌等への掲載			7	2		9
展示会への出展				1	1	2
合計		1	10	6	6	23



## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

### <達成できなかった課題1>高電圧化

合成した  $S-V_2O_5$  は  $MgO$  よりも結合エネルギーが低いサイト(層間が広がったアモルファス構造)で挿入脱離した。高電位化は、この結合エネルギーの増大を意味しており、結合エネルギーの高い活物質では  $Mg$  イオンの脱離が困難となることが明らかとなった。このため、正極活物質による高電位化は容易ではないことが推察された。

### <達成できなかった課題2>セル構成

これまでに報告があった電解液を用いたが、正負極共にサイクルが安定するものを見出すことができなかった。例えば、水分を含んでいると(数百 ppm 以上)正極での拡散速度は増大したが、負極が不動態化した。

### <新たに解決すべき課題>電解液の開発

水を除去すると、電流密度・レートが低下する(350mAh/g-0.01C)。水に変わる拡散を促進する配位子を見出すことが課題とされる。

### <実用化に向けた取組み>

CF-MWP 法は既存の設備がなく、量産化が容易ではない。実用化に向けて、量産可能な合成法の適用を検討する。

## (9) 成果の実用化/活用

$Mg$  二次電池は出力密度ではなく高容量型の電池であり、走行距離重視タイプの自動車(二輪等含む)が実用化イメージとして期待される。このためには、実験レベルである正極の応用開発が必要となる。

原料は石油精製時に回収される  $NH_4VO_3$  を利用できるため、本正極は安価で実用性が高いと期待される。実用的な電解液と組み合わせてプロトタイプの  $Mg$  二次電池を構成できれば、安全性、資源性を売りとする  $Mg$  電池が認識され、より高性能な部材の開発が加速されると期待される。また、 $Mg$  および回収バナジウムは、現在使用用途が少なく、本  $Mg$  二次電池は関連産業からも実用化が期待されている。

## (10) その他

なし

## 2. 4. 17 液相マイクロ波プロセスによる次世代高容量活物質の研究開発 (産業技術総合研究所)

### (1) 事業目的

現行のリチウムイオン電池で利用されているインターカレーション反応では、リチウム吸蔵量が結晶構造で限定されるため飛躍的な高容量化は期待できない。2000年に、Tarasconらによって、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CoO}$ 等の遷移金属酸化物もナノ粒子化することにより充放電が可能になり、負極として機能することが報告された。これらのナノ粒子活物質は、インターカレーション反応を利用した従来型の酸化物系負極材料( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 等)に比べ高容量であり、金属までの還元反応を利用することにより高容量化が達成されている。この反応はコンバージョン反応と呼ばれ、近年、国内外の研究グループにおいて活発に研究が行われている。

金属酸化物の金属までの還元反応を充放電反応に応用し、その電池特性を改善するには、従来技術では到達できないレベルまで微細化が可能な合成技術確立が必要がある。液相マイクロ波プロセスは、均一で急速な加熱を特徴とするため、均一な核生成ならびに結晶成長が可能であり、従来技術に比べ、より微細で粒度分布の少ないナノ粒子を合成することが可能な手法である。

本研究開発の目的は、液相マイクロ波プロセスをもちいて粒径分布が極めて小さいナノ粒子を合成することにより、高容量で可逆的に充放電可能な酸化物系負極材料を創成し、リチウムイオン電池の高容量化を実現することである。

### (2) 事業概要

液相マイクロ波プロセスによる粒子サイズ制御技術、ナノ複合化技術等を検討しながら、酸化鉄ナノ粒子活物質のサイクル特性の改善を行う。さらには、酸化鉄系材料に留まらず、1000 mAh/g以上の初期容量を有する新規ナノ粒子活物質を探索すると共に、各種分析手法を用いて充放電前後の電極を評価し、電極反応機構の解明を行う。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.17-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
新規高容量ナノ粒子活物質の研究開発 ・粒子サイズ制御 ・ナノ複合化 ・電極反応機構解明						
開発費用 (百万円)	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
産業技術総合研究所		20	10	20	20	70

#### (4) 研究開発の実施体制



図 .2.4.17-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

基本計画で掲げられている目標（本事業終了時点でパック電池レベルでの重量エネルギー密度 500 Wh/kg を見通せる高容量の活物質を開発する）を達成するためには、正極、負極ともに現行の約3倍以上の高容量化が必要である。すなわち、負極では黒鉛の理論容量の約3倍の 1000 mAh/g 以上が必要である。現在、研究開発が行われている合金系負極材料も 1000 mAh/g を超える初期容量を示すが顕著な容量低下を示す。容量低下が少なく、合金系を超える高容量負極材料を開発する必要がある。

本研究開発の目標は、プロジェクト終了時までには 1000 mAh/g 以上の初期リチウム挿入容量を有し、2 サイクルから 50 サイクルまでの容量維持率が 80%以上の酸化物系負極活物質を開発することである。

##### 中間目標

1000 mAh/g 以上の初期容量を有し、2 サイクルから 50 サイクルまでの容量維持率が 60%以上の容量を維持する酸化物系負極活物質を開発する。

##### 最終目標

1000 mAh/g 以上の初期容量を有し、2 サイクルから 50 サイクルまでの容量維持率が 80%以上の容量を維持する酸化物系負極活物質を開発する。

#### (6) 研究開発成果

表 .2.4.17-2 研究成果（一覧）

項目	目標値（最終）	達成値	達成度	備考
初期挿入容量 （初期脱離容量）	1000 mAh/g	1510 mAh/g 1170 mAh/g	達成	参考
容量維持率(50 サイクル)	80%	86%	達成	

<成果1> 粒子サイズ制御による酸化鉄ナノ粒子のリチウム電池特性の向上

(内容) 液相マイクロ波プロセスを用いて約 10 nm から 500 nm の範囲で粒径制御された  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  ナノ粒子を合成することに成功した。いずれの粒子サイズにおいても、初期リチウム挿入過程において、約 0.85 V 付近にコンバージョン反応に由来する電位平坦部がみられ、初期リチウム挿入容量は 1000 mAh/g を超えた。粒子サイズが小さくなるほど、初期リチウム挿入容量は増加し、新たに約 1.6 V 付近に電位平坦部が観測された。

粒径 500 nm の  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  活物質の初期リチウム挿入容量は 1270 mAh/g であり、50 サイクル後の容量は 890 mAh/g であった。2 サイクルから 50 サイクルまでの容量維持率は 101% であり、高い容量維持率を示した。一方、粒径 10 nm の活物質では、初期リチウム挿入容量は 1510 mAh/g であり、50 サイクル後においても 1030 mAh/g の高容量を維持していた。2 サイクルから 50 サイクルまでの容量維持率は 86% であった。

(達成度)

(成果の意義) 液相マイクロ波プロセスにより粒度分布が少ない活物質が合成でき、電極作製方法を改善したことが、サイクル特性の向上に繋がった。特に、ナノ粒子活物質を電極中に高分散させる技術が重要であった。

(課題と取り組み) コンバージョン負極材料の問題点は、サイクル特性、大きな初回不可逆容量、充放電ヒステリシスと考えられてきた。 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  負極が良好なサイクル特性を示したことから、残された課題は、初回不可逆容量の低減と電圧の制御と考えられる。

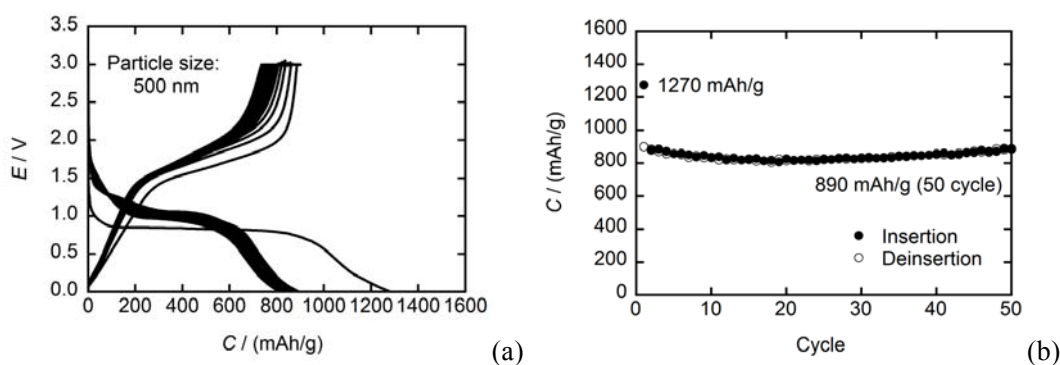


図 2.4.17-2  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  活物質 (粒子サイズ: 約 500 nm) の充放電曲線とサイクル特性

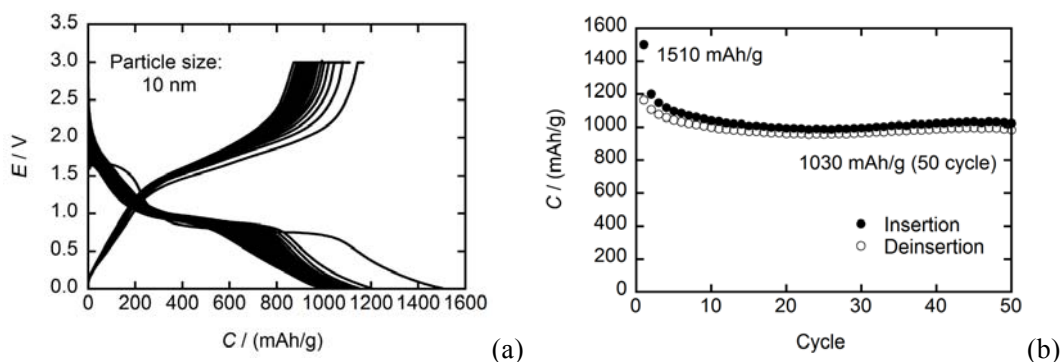


図 2.4.17-3  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  活物質 (粒子サイズ: 約 10 nm) の充放電曲線とサイクル特性

### <成果2> 充放電反応機構の解明

(内容) 安定したサイクル特性を示す  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  活物質の充放電反応機構を明らかにするために、分析電子顕微鏡法、回折法、分光学的手法を用いて充放電前後の電極を評価した。電子顕微鏡観察によると、初回リチウム挿入時に活物質粒子表面に SEI 層が形成され、充放電を繰り返しても活物質の粒子形状が保持されていることが明らかになった。良好なサイクル特性を示す電極では、電極の内部構造の劣化は観察されなかったが、X線回折によると、初回の充放電時において活物質粒子内で結晶の微細化が進行することが明らかになった。メスbauer分光法、X線吸収分光法によると、鉄の酸化還元により充放電反応が進行することが明らかになったが、充放電後に鉄の価数は完全には元の状態まで酸化されていないことが明らかになった。

(達成度) ○

(成果の意義) 充放電後の電極中に金属鉄微粒子相が観測されるなど、これまでのコンバージョン反応系の電池研究では知られていなかった新しい知見が得られた。

(課題と取り組み) リチウム挿入された電極の評価が困難であったため、充放電反応機構の全体像を明らかにするには至らなかった。今後は、*in-situ* 評価技術等を活用しながら、活物質のリチウム挿入状態を明らかにする必要がある。

### <成果3> ナノ複合化による高容量化

(内容) リチウムと合金を作らない鉄等の金属で構成される酸化物に比べ、酸化スズ等の合金化反応を伴う酸化物は、より高い初期リチウム挿入容量を示す。良好なサイクル特性を示す酸化鉄と合金化反応を示す金属酸化物とを複合化させることにより、酸化鉄活物質の高容量化を試みた。 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$  複合体、 $\text{SnO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$  ナノ複合体を合成し、充放電特性を評価したところ、いずれも 1500 mAh/g を超える初期容量が得られた。しかしながら、良好なサイクル特性は得られず、目標とする容量維持率は得られなかった。

(達成度) △

(成果の意義) リチウムと合金を作る金属の酸化物と酸化鉄を複合化させることで、初期リチウム挿入容量の増加が可能であるが明らかになった。合金化反応を伴わずコンバージョン反応のみで充放電反応が進行する方が良好なサイクル特性が得られるなど、今後の材料設計に繋がる知見が得られた。

(課題と取り組み) 充放電前後の電極の構造変化を評価し、サイクル劣化機構を明らかにする必要がある。得られた知見をもとに、高容量化と同時に高い容量維持率が得られる材料設計を行う必要がある。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.17-3 に示す。

表 .2.4.17-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	—	0	0	0	0	0
うち、外国出願	—	0	0	0	0	0
国内登録	—	0	0	0	0	0
海外登録	—	0	0	0	0	0
論文	—	0	0	0	3	3
うち、査読付き論文	—	0	0	0	3	3
研究発表・講演	—	2	4	7	8	21
受賞実績	—	0	0	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載	—	0	0	0	0	0
展示会への出展	—	0	0	1	0	1
合計	—	2	4	8	11	25

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

これまで、コンバージョン負極材料の問題点は、サイクル特性、大きな初回不可逆容量、充放電ヒステリシスと考えられてきた。 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  負極が良好なサイクル特性を示したことから、残された次の課題は、初回不可逆容量の低減と電圧の制御と考えられる。

初回不可逆容量の低減については、リチウムのプレ・ドーピング法について検討することが有効と考えられる。電圧の制御は、活物質の異種元素置換等による材料探索的な研究を通して、コンバージョン反応における電圧制御の材料設計指針を探る必要がある。

## (9) 成果の実用化／活用

液相マイクロ波プロセスにより、粒子サイズが制御されたナノ酸化鉄を合成できたことで、高容量を維持ししつつ良好なサイクル特性を示すコンバージョン系負極材料を開発することができた。今後は、大きな初回不可逆容量と充放電ヒステリシスを低減することを目標に研究を継続する予定である。

電極反応機構の解明については、これまでのコンバージョン反応系の電池研究では知られていなかった新しい知見が高分解能電子顕微鏡観察から得られたものの、リチウム挿入された電極の評価が困難であったため、充放電反応機構の全体像を明らかにするには至らなかった。今後は、in-situ 評価技術等を活用しながら活物質のリチウム挿入状態を明らかにする必要がある。

液相マイクロ波合成技術については、バッチ式合成のスケールアップを試みた。本研究において、周波数 2.45 GHz、出力 1.5 kW の工業用マイクロ波発振器を搭載した合成装置を製作し、一回の合成で 1000 mL の液相合成が可能になった。装置メーカーとの共同開発を進めれば、工業的な湿式合成方法として発展するものと期待される。

#### (10) その他

プロジェクト実施期間終了後に、本研究開発でいられた成果が、6月末時点で、1件の特許出願、3件の論文発表（アクセプト）に繋がっている。

## 2. 4. 18 高容量化を目指した多価反応可能な自己組織生成リチウム電池正極材料の研究開発（名古屋工業大学）

### （1）事業目的

研究課題1： クラスタライオン系新規正極材料の探索

既存材料の延長線上にない正極材料としてヘテロおよびイソPOMを中心としたクラスタライオン群より、高いエネルギー密度を有する正極材料を探索した。当研究グループではこれまでにKeggin型構造を有する $K_3[PMo_{12}O_{40}]$ （KPM）を正極材料に用いて、3.5-1.5 Vの電圧範囲で充放電試験を行ったところ200 mAh/gと比較的大きい容量でリチウムイオンが可逆に脱挿入することを見出した。この試料から得られた特性は、平均放電電圧が2Vと低く、またサイクル特性の面で十分なものではないが、高い熱的安定性を有するこのKeggin型構造をフレームワークとして材料の探索を行うことにより、これらの問題点を解消し、高容量、高サイクル安定性を有する正極材料の開発を行った。また、POMの構造についても、Keggin型以外にもクラスタライオン内に空孔の少ないイソPOM等を含めたより広い探索を行った。

電圧特性に関しては、クラスタライオンを構成する遷移金属をモリブデンから段階的にバナジウムへ置き換えることにより改善を試みた。バナジウムは酸化電位がモリブデンに比べ0.3V程高く、高電圧化が期待できる上、モリブデンの価数が六価であるのに対して五価であるためクラスタライオンのイオン性が上昇し、全体の酸化還元電位が上昇する可能性がある。さらにコスト面においてもバナジウムはモリブデンよりも安価なため、コストダウンすることが可能となる。

電圧の改善は異種イオンの導入により行う。これまでの研究によりKeggin型POMの放電電位は異種イオン導入により上昇する傾向がある事が判っている。この電圧上昇の詳細な機構は不明であるが、POMイオンユニットのイオン性が上昇するためと思われる。そこで、KPV、KPMにニオブ等電子局在性の高いイオンを導入する事によりPOMの放電電圧の上昇を試みた。合成した試料はNMR、XRD等で同定し、特性評価は充放電試験や交流インピーダンス測定により行った。

容量に関しては、元来POMは深放電により多くの容量を示す材料であるため、電圧改善により、容量も改善されると思われる。

開発目標：

平均放電電圧3 V以上、容量280 mAh/g以上の高放電電位を有する新規POM系正極材料の開発

研究課題2： サイクル特性改善を目的としたクラスタライオン系正極材料へのリチウムインターカレーション機構の研究

リチウム電池正極材料の実質的な容量は、その材料の構造が維持できるリチウムイオン脱挿入量により決定される。POM正極は、20個ほどの金属イオンがクラスタライオンを形成し、そのクラスタライオンが集合して結晶を形成する。そのため一般のセラミック系正極材料と異なり、一つ一つのクラスタがリチウムイオンの脱挿入に応答して変形すると思われる。このリチウムイオンの脱挿入に伴うクラスタライオンの構造変化は現在までのところ明らかではなく、この機構の解明・制御は、大きな実用可能容量および優れたサイクル特性を得るための極



めて重要なファクターとなる。そのため、POMクラスターイオンへのリチウムインターカレーション機構の解明とその知見に基づいたクラスターイオン系正極材料の設計を目標として研究を行った。

本研究で正極活物質として用いている $K_3PMo_{12}O_{40}$  (KPM) に代表されるKeggin型POMは正極材料としての特性の報告はほとんどなく、従って前述した様に充放電機構も未知である。サイクル特性の根本的改善には充放電機構の知見が不可欠であるため、主にex-situ XRD測定により充放電機構の推定を行った。本研究ではKeggin型POMを構成する12個のモリブデンイオンの一部を抜き取り、欠損部に他の遷移金属イオンを導入した金属置換型POMを合成し、サイクル特性の改善を試みた。試料にはKPMより電位は低い安定性の高い $K_4SiMo_{12}O_{40}$  (KSM) を選んだ。

また上記のKSMから得られた知見即ちPOM中の酸化還元活性を有するモリブデンを酸化還元不活性な金属に置換することによりサイクル特性が大幅に改善出来ることを参考にKeggin型より共有結合性が高いAnderson型POMに注目し、サイクル特性と反応機構の研究を行った。

Anderson型POMはKeggin型に比べ、共有結合性が高いため、構造安定性が高く好なサイクル特性を示すことが期待される。本研究ではヘテロイオンにアルミニウムあるいはガリウムを含むAnderson型POMを合成し、特性評価・反応機構の研究を行った。

開発目標：

100 サイクル後、初期容量の 50%を維持することが可能な正極材料を開発する。

## (2) 事業概要

### 1-1 クラスターイオン系新規正極材料の探索

#### (1) $K_9[PV_{14}O_{42}]$ (KPV) の電気化学特性

ケギン型ポリオキソメタレート (POM) 内にVを導入し、電圧の改善を試みた。KPVは最大で約 230 mAh/g の容量を示した。平均放電電圧は約 2.7 V となり、50 サイクル後の容量は初期容量の 72%を維持した。

充放電過程のXRD測定を行ったところ、放電直後に試料は非晶質化した。ex-situ XAFSの解析からは、KPV分子の構造変化は小さいと考えられる。また、交流インピーダンス測定より得た電荷移動抵抗値は充放電に伴い可逆に変化した。以上より結晶は充放電により結晶構造が崩壊するが、クラスター分子は安定に反応し、電気化学特性を維持出来たものと考えられる。

#### (2) イソPOM類縁体の電気化学特性

イソPOM $K_8[Nb_6O_{19}]$ は絶縁体であり、充放電特性を示さない。そこで中心にNiを含み構成イオンにVを含有するPOMのナノ粒子を合成し、特性評価した。初期容量は 230 mAh/g で、50 サイクル後は 180 mAh/g まで減少し容量維持率は 78%となった。

##### 1-2 サイクル特性改善を目的としたPOMへのリチウム脱挿入機構の研究

ケギン型POM  $K_3[PMo_{12}O_{40}]$  (KPM) を用いて、充放電前後の構造を調べ、さらに $K_4[SiMo_{12}O_{40}]$  (KSM) の化学修飾を行って、サイクル特性の改善を試みた。また、化学的安定性に優れる Anderson 型POMの電気化学特性と反応機構の調査も行った。

#### (1) KPMへのリチウム脱挿入時における構造変化測定と化学修飾

放電後及びサイクル後のKPMのex-situ X線回折測定を行った。放電後は、回折パターンを維持しながら反射が低角側シフトした。これよりKPMは基本構造を維持しながら、結晶中にリチウムが脱挿入しているものと思われる。サイクルによりX線回折強度が急速に低下し、非晶質となった。

ケギン型POMの一部のMoをCoへ置換した試料は400℃で熱処理後、大幅な特性の改善が見られ、3.8-2.0 Vの電圧領域での充放電試験では、初期容量は125 mAh/g程度であったが、50サイクル後も容量の80%以上を維持した。これは構造中に不活性部位を導入したことによりクラスターイオンの構造安定性が向上したためと思われる。

(2)アンダーソン型POMの電気化学特性

ケギン型に比べ構造安定性が高いアンダーソン型POMに注目した。試料とABのボールミル粉碎混合により正極合材を作成し、充放電試験を行った。初期放電容量は300 mAh/gの容量を示し、平均放電電圧は2.1 Vであった。1.5-4.2 Vの電圧範囲でサイクルさせた場合、50サイクル後には初期容量の半分程度まで低下した。ボールミリングによりクラスターイオンの構造が破壊され容量劣化が生じたと思われる。

Anderson型POMとケチェンブラックを重量比1:2の割合で手混ぜし、正極合材を作成したところ初期放電容量は約390 mAh/gであった。初回数サイクルで300 mAh/g程度まで容量劣化を起こすが、それ以降は良好なサイクル特性を示し、100サイクル後の容量は270 mAh/g程度で、初期容量比で容量維持率は71%となったが、2サイクル目を基準とすると容量維持率は87%であった。アンダーソン型POMは他のPOM同様に充放電により非晶質化したが、ラマン分光測定よりPOMクラスターイオン分子は安定に存在することが確認され、アンダーソン型POMは分子としてリチウムと反応していると思われる。

(3) 研究開発の実実施スケジュールと予算

表 .2.4.18-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
1 クラスターイオン系新規正極材料の探索						
2 サイクル特性改善を目的としたクラスターイオン系正極材料へのリチウムインターカレーション機構の研究						
開発費用 (百万円)	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
名古屋工業大学	0.0	0.0	16	16	20	52

#### (4) 研究開発の実施体制

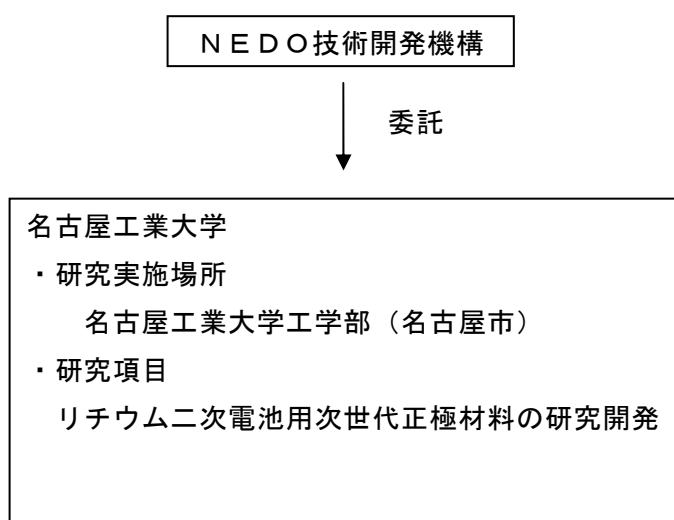


図 .2.4.18-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

##### 中間目標

課題1：クラスターイオン系新規正極材料の探索

平均放電電圧3 V以上、容量250 mA/g以上の高放電電位を有する新規ポリ酸系正極材料の開発

課題2：サイクル特性改善を目的としたクラスターイオン系正極材料へのリチウムインターカレーション機構の研究

30サイクル後、初期容量の50%を維持することが可能な正極材料を開発する。

想定根拠：

研究開発開始時には、我々はKeggin型POM  $K_3PMo_{12}O_{40}$ の電気化学特性を調査しており、200 mAh/gの比較的高い容量を示すものの、平均放電電圧は2.0 Vと低く、サイクル特性も10サイクルで初期容量の50%まで減衰したため、上記の様な目標値の設定を行った。

##### 最終目標

課題1：クラスターイオン系新規正極材料の探索

平均放電電圧3 V以上、容量280 mA/g以上の高放電電位を有するPOMの開発

課題2：サイクル特性改善を目的としたクラスターイオン系正極材料へのリチウムインターカレーション機構の研究

100サイクル後の容量維持率50%以上の新規ポリ酸系正極材料の開発および充放電機構の解明

想定根拠：

22年度までに初期容量230 mAh/g、平均放電電圧2.7 VのPOMを開発した。この材料のサイクル特性は50サイクル後に、初期容量の約70%を維持していた。最終年度では、POMの特性を更に改善すると同時に、材料設計の基礎として反応機構の解明を試みた。

## (6) 研究開発成果

表 .2.4.18-2 研究成果 (一覽)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
容量	280 mAh/g	300 mAh/g	×	
平均放電電圧	3.0 V	2.7 V		
100 サイクル後の 容量維持率	50 %	71%		

### <研究課題 1 クラスタースイオン系新規正極材料の探索>

(内容) 酸化還元電位の低いモリブデンをより高いバナジウムへ置き換えた  $(\text{KH})_9\text{PV}_{14}\text{O}_{42}$  (KPV) による容量と放電電圧の改善を試みた。バナジウムを含む KPV の電気化学特性は、最大放電容量が 240 mAh/g と KPM を超える値を示しながら、平均放電電圧は 2.7 V と KPM よりも改善された。また、サイクル特性も 50 サイクル後に容量維持率 70%程度と KPM に比べ向上が見られた。KPV の結晶構造は最初の放電時にアモルファス化し、その後結晶構造の回復は見られない。しかし、*ex-situ* の XAFS 測定より、 $[\text{PV}_{14}\text{O}_{42}]^{9-}$  クラスタースイオン構造は維持されていることが確認できることより、POM の充放電においては、結晶構造は大きな影響を与えず、分子がリチウムイオンと反応して充放電が維持できることが明らかになった。

(達成度) △

(成果の意義) 研究開始当初に見出した  $\text{K}_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}$  (KPM) より容量、電圧ともに大きく改善された。容量については、後に述べる Anderson 型 POM が 300 mAh/g を越える容量を示したため、達成された。しかし、放電電圧に関しては目標値へ達成出来なかった。

(課題と取り組み) 電池全体のエネルギー密度を上げるためには、放電電圧の改善が不可欠である。今後、量子化学計算を基に高電圧材料を探索予定。

### <サイクル特性改善を目的としたクラスタースイオン系正極材料へのリチウムインターカレーション機構の研究>

(内容) サイクル特性改善のために、Keggin 型 POM 金属イオンを一部の置換した材料と安定性の高い Anderson 型 POM と類縁体に着目した。特に Anderson 型 POM は優れた特性を示し、初期放電容量は 290 mAh/g 程度と極めて高い容量を有するが過電圧が大きいことによる大きな不可逆容量を示した。ボールミルによるアセチレンブラックと粉砕混合、導電助剤としてケッチェンブラックを用いると手混ぜにより合剤形成を行ったところ、300 mAh/g を超える容量が得られ、容量維持率も 100 サイクル後でも実容量の 90%程度の 270 mAh/g を維持した。また、XRD、XAFS 測定から、POM は分子として充放電していることが明らかになった。

(達成度) ○

(成果の意義) POM が分子として、充放電を行っており、また分子性安定性を改善する事でサイクル安定性が明らかになった。このことは、新たな反応機構を有する電池材料を開発する上で大きな意義を有する。

(課題と取り組み) 新たな充放電機構を有する分子性電池を有用に活用するための固体電解質等の探索と開発を行う。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.18-3 に示す。

表 .2.4.18-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願			0	0	1	1
うち、外国出願			0	0	0	0
国内登録			0	0	0	0
海外登録			0	0	0	0
論文			0	1	1	2
うち、査読付き論文			0	1	1	2
研究発表・講演			1	6	5	12
受賞実績			0	0	1	1
新聞・雑誌等への掲載			0	0	0	0
展示会への出展			0	0	0	0
合計			1	7	8	16

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

前述した様に、容量、サイクル特性に関しては、材料探索・特性改善により目標を達成できたが、平均放電電圧の目標値を達成することが出来なかった。これは主に、充放電機構の研究から得られる情報からは電圧に関して有用な改善方法が得られなかったことによる。

そこで新たな解決課題は

- ・ POM の構造が放電電圧に与える影響の理論的解明
- ・ 化学的修飾による電圧特性の改善

が挙げられる。

第一原理計算等により、POM の構成元素等を変化させた際の酸化還元電位の変化を調べ、理論的に高電位材料を解明する。さらに、これらの結果を基に POM に化学修飾を施して、高エネルギー密度を有する材料を開発する必要がある。

## (9) 成果の実用化／活用

本研究により、分子性クラスター材料である POM は、高容量で良好なサイクル特性を有することが明らかになった。POM の電池特性は、従来の連続性酸化物正極材料の様に結晶構造の再現性に依存しない。欠点としては、構造内にリチウムイオンを含まないため、負極にリチウムを含有させる必要がある。この特性生かしと欠点を克服するためには、全固体電池化するのが理想的と思われる。全固体電池の正極／固体電解質間の固固界面は、両材料間のマッチングに大きく依存する。そこで以下の技術開発を行う必要がある。

### 1. 新たな固体電解質の開発

優れた蓄電デバイス開発の為に次の目標は正極材用とマッチングが取れる最適な固体電解質の開発が挙げられる。

### 2. 負極／電解質固固界面最適化

固体電解質開発の次段階は、負極との固固界面形成である。負極としてはリチウム金属またはリチウム合金を用いる。負極は反応活性が高いため、分子性固体電解質と接した際に固体電解質が還元分解される恐れがある。そこで固体電解質と反応しない負極の開発または負極のコーティング技術開発を行う。

### 3. 全固体電池格納パッケージの開発

新たに開発した全固体電池の特長を最大限に活用出来る電池パッケージの開発を行う必要がある。

開発により良好な固固界面が得られれば、全固体電池開発する上での最大の課題を克服するブレークスルーとなり得るので、エネルギー貯蔵分野はもちろんのこと、社会的な波及効果は極めて大きい。

#### (10) その他

特になし

## 2. 4. 19 シリサイド・ナノ・ハイブリッド負極材料の研究開発 (古河電気工業、古河電池)

### (1) 事業目的

リチウムイオン二次電池の負極材料として、現状の黒鉛系材料よりも大幅な高容量化が期待される Si 系材料が検討されている。しかし、Si 系材料は充放電時に最大 4 倍もの体積変化が生じて微粉化や集電体からの脱離が発生し、導電ネットワークが壊れ、充放電を繰り返すと容量が著しく低下するため、寿命特性の改善が最大の課題である。

本事業では、古河電気工業と古河電池とが開発した結晶性の高いシリサイドと Si 系活物質との複合ナノ粒子「SNH (シリサイド・ナノ・ハイブリッド)」を負極活物質として用いてこの寿命性能の課題を解決し、高容量と長寿命の両立を図る。これらの技術開発により、将来の高エネルギー密度電池の開発へ資することを目的とする。

### (2) 事業概要

リチウムイオン二次電池の負極活物質に「SNH (シリサイド・ナノ・ハイブリッド) 粒子」を適用し、(1) 活物質のナノ粒子化により微粉化を回避し、(2) 気相法により SNH 粒子を合成して活物質自体のミクロな体積変化を抑制し、(3) SNH 粒子と各種のカーボンとを精密混合した SNH (シリサイド・ナノ・ハイブリッド) 負極材料の開発により、集電性能を維持向上させる。また、負極材料のスラリー・電極設計技術の開発により、実用電極としての可能性を評価する。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.19-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	21 年度	22 年度	23 年度	
SNH 負極活物質の開発	—		→	
SNH 負極活物質を用いた電極化技術開発	—		→	
SNH 負極電極の耐久性向上	—		→	
開発費用 (百万円)	21 年度	22 年度	23 年度	総額
古河電気工業株式会社	9.2	13.8	15.0	38.0
古河電池株式会社	9.2	4.6	4.7	18.5

#### (4) 研究開発の実施体制

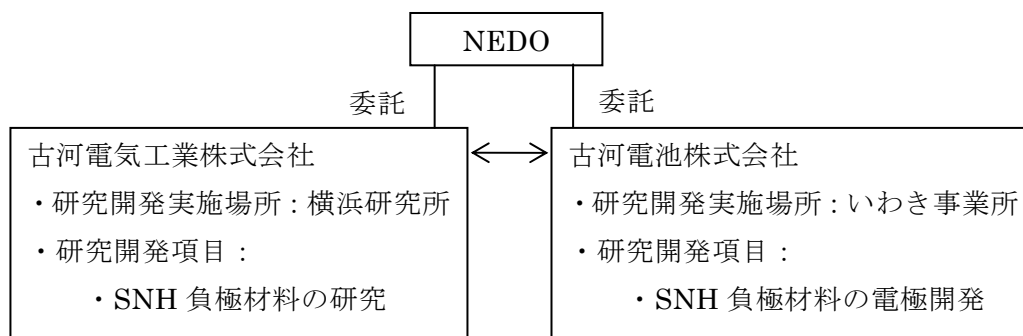


図 .2.4.19-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

中間目標：単極試験で 300 サイクル、1000mAh/g の特性を目標とする。根拠は、現状黒鉛の約 3 倍の容量で 500 サイクル実現のための課題を明確にするため。

最終目標：平成23年度末に、単極試験で、500サイクル1000mAh/gの特性を最終目標とする。根拠は、現行の負極特性の3倍を想定した。また、500サイクルという寿命は、モバイルなど民生用電子機器に要求されるレベルとした。

##### 中間目標

研究開発項目①：SNH 負極活物質の開発

目標：SNH 合金の基本物性

2 元合金の設計指針

3 元合金の設計指針

ナノ粒子集電性メカニズム提案

50 サイクル維持率 70%

造粒体の開発

想定根拠：Si 系材料の技術課題である寿命特性を改良するため、シリサイドをナノレベルで複合化することにより、Li 吸蔵脱離時の体積変化を緩和できる材料設計とした。また、新規のコンセプトで設計した SNH 負極活物質の基礎的な電気化学的物性を把握する。さらに、ナノ粒子の飛散防止やかさ密度など、実用的な取扱いを目指した。

研究開発項目②：SNH 負極活物質を用いた電極化技術開発

目標：スラリー塗布電極の基本設計と製法の確立

初期容量 1500mAh/g の達成

スラリー電極作製法の選定

初回充放電効率 70%以上

想定根拠：Si 系負極は Li 吸蔵脱離時の体積変化が大きく、寿命が短いという欠点がある。活物質層を薄膜化することで寿命が改善するという報告はあるが、製造設備が高価であり単位面積当りのエネルギー密度が低く、実用性に欠ける。本目標は従来リチ



ウムイオン二次電池用電極の一般的な製法である活物質スラリーを集電体に塗布する方法（スラリー塗布法）で SNH 負極を作製し、3 極式セルにて評価を行う。この製法で作製する SNH 負極が、Si 系負極の特徴である高容量を示し、さらに、Si 系負極のもう一つの欠点である不可逆容量を抑制できる電極の開発を目指した。

研究開発項目③：SNH 負極電極の耐久性向上

目標：3 極式セルによる評価方法の確立

有望な SNH 合金系の選定

簡易ラミネートセルによる標準評価法の確立

300 サイクル 1000mAh/g の達成

想定根拠：3 極式セルから簡易ラミネートセルの評価に移行するにあたり、容量、サイクル特性、充放電効率に優れた SNH を選定する。そして、簡易ラミネートセルでの評価により、フルセルでの動作・挙動を確認する。また、3 極式セルによる単極試験で SNH 負極のサイクル特性改善を目指した。

最終目標

研究開発項目①：SNH 負極活物質の開発

目標：初期容量 1500mAh/g 以上、かつ、500 サイクルで 1000mAh/g の活物質開発

各充放電特性に寄与するカーボンとのハイブリッド手法の開発

想定根拠：初期容量は現状黒鉛の4倍以上の特性とした。現状黒鉛の約3倍の容量で500サイクルを実現するため、また、Si系材料は電子伝導性が低いため、活物質レベルでの集電機能の充実を目指した。

研究開発項目②：SNH 負極活物質を用いた電極化技術開発

目標：単極試験で 500 サイクル 1000mAh/g の達成

初回充放電効率 90%以上のスラリー塗布型電極の開発（容量とサイクル特性に関する中間目標が達成出来たため、最終年度の目標に追加した。）

想定根拠：3 極式セルにより電極構成材料や電解液を検討し、SNH 電極のサイクル特性と初回充放電効率の改善を目指す。その上で、簡易ラミネートセルの特性改善を狙う。

研究開発項目③：SNH 負極電極の耐久性向上

目標：簡易ラミネートセル 300 サイクル寿命評価による問題点の明確化

想定根拠：簡易ラミネートセルによる長期サイクル試験を実施し、フルセルの寿命特性の把握を行う。また、単極評価では見えなかった問題点を明確化する。

(6) 研究開発成果

表 .2.4.19-2 研究成果 (一覧)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
SNH 負極活物質の開発	初期容量 1500mAh/g 以上 500 サイクルで 1000mAh/g の活物質開発	Si 体積歪の緩和と電子伝導性を付与した SNH 粒子を合成。 初期容量 1800mAh/g、500 サイクルで 1200mAh/g		ナノ粒子一粒毎に Si 体積歪の緩和と電子伝導性を付与した SNH 粒子を 2 元合金系および 3 元合金系で合成した。
SNH 負極活物質を用いた電極化技術開発	単極試験で 500 サイクル 1000mAh/g	単極試験で 500 サイクル 1200mAh/g		(1)有機溶剤系バインダーの使用により、サイクル特性達成。 (2)初回効率 90% の追加目標に対して 83%。
SNH 負極電極の耐久性向上	簡易ラミネートセル 300 サイクル寿命評価による問題点の明確化	300 サイクル寿命評価を実施し、フルセルでの問題点を把握した		単極試験に比べフルセル試験のサイクル特性は低下した。その、原因を把握した。

<成果 1 >

(内容) SNH 負極活物質を用い、単極評価で 500 サイクル 1200mAh/g のサイクル寿命 (達成度) ◎

(成果の意義) 図Ⅲ.2.4-19-2 のモデル図に示すように、Si 体積歪の緩和機能をシリサイド (Si-M) 相が担う SNH 粒子を合成した。また、シリサイドは電子伝導性が高いため、ナノ粒子一粒毎に電子伝導性を付与した SNH 粒子は高レート特性が期待される。

図Ⅲ.2.4-19-3 に示すように、SNH 負極活物質は、単極評価で 500 サイクル 1200mAh/g の特性を示した。この値は、現状黒鉛の 3 倍以上の高容量で、かつ、モバイルなど民生用電子機器に要求されるサイクル寿命のレベルを達成したことになる。薄膜型電極とは違って、スラリー塗布型電極で 500 サイクル 1000mAh/g を達成したことに意義がある。負極活物質として SNH 粒子を提案し、2 元合金系で最終目標到達を確認した。

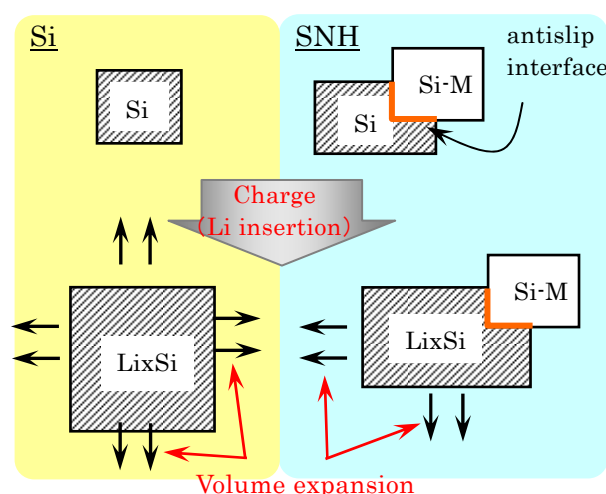
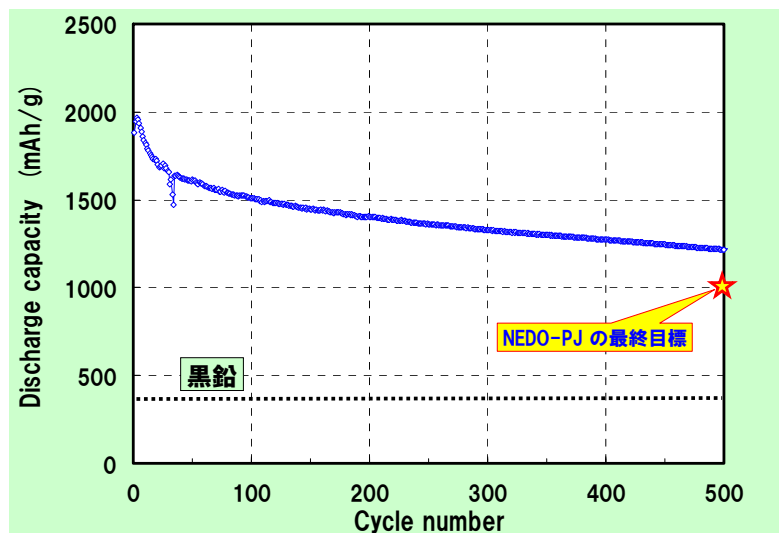


図 .2.4.19-2 Si、SNH のモデル図

このことにより、従来のリチウムイオン電池の電極製造に使用している設備で、高エネルギー密度 Si 系電極の製造が可能となる。

(課題と取り組み) より安定なサイクル特性を得るための、活物質、および、電極構成材料の検討が今後も必要である。



図Ⅲ.2.4-19-3 SNH 負極活物質のサイクル特性 (点線は黒鉛の理論容量)

#### <成果2>

(内容) 簡易ラミネートセル 300 サイクル寿命評価による問題点の明確化

(達成度) ◎

(成果の意義) 新規に開発した SNH 負極活物質を用い、正極に既存の  $\text{LiFePO}_4$  を用いて簡易ラミネートセルを構成し、300 サイクルのフルセル試験を実施した。レート特性は (2C/0.2C) が約 88% となり、モバイルなど民生用電子機器に要求されるレート特性を満足すること確認した。ただし、単極試験に比べフルセル試験のサイクル特性は低下する傾向が観察され、その原因を詳細に把握した。

(課題と取り組み) 単極試験に比べフルセル試験のサイクル特性が低下する原因は、負極の充放電効率が低く、実用レベルに至らないことが判明した。負極の充放電効率を改善するためには、引き続き、活物質、電極構成材料の検討が必要である。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.19-3 に示す。

表 .2.4.19-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願				4	2	6
うち、外国出願					2	2
国内登録						
海外登録						
論文					2	2
うち、査読付き論文					2	2
研究発表・講演				2	1	3
受賞実績						
新聞・雑誌等への掲載						
展示会への出展						
合計				6	5	11

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

簡易ラミネートセルによるフルセル試験の結果、充放電効率の更なる改善が必要であることが判明した。充放電効率の改善にあたっては、活物質、バインダー、導電助剤、電解液等の電極・電池を構成する様々な部材を最適化することが必要であり、総合的に特性改善を進めていく。

## (9) 成果の実用化／活用

2020年のEV、電動二輪、モバイル等のエネルギー密度指向型分野への実用化に向けて250Wh/kg以上、1500W/kgのリチウムイオン電池を実現する際の負極活物質として、Li-EADプロジェクトでの開発成果をもとに、Si合金系活物質の実用化を進めていく。

今後も引き続き、古河電気工業と古河電池が共同で実施する。前者は主に活物質の材料技術に関する研究開発を担当し、後者は主に電極化技術と電池化技術の開発を担当する。両者は密接に連携を取りながら、目標達成に向けて共同で研究開発と実用化にあたる。

## (10) その他

なし

## 2. 4. 20 実験融合マルチレベルコンビナトリアル計算化学にもとづく次世代電池技術開発支援シミュレータの開発と応用 (東北大学未来科学共同研究センター)

### (1) 事業目的

実験融合計算化学という、測定技術とコンピュータ化学を融合させた、革新的な電池系開発研究をトータルに支援できる新規手法の開発を行う。これまでの蓄電池研究の長い歴史でもみられない新しいアプローチであり、コンピュータの圧倒的な計算能力を借りて理論に基づく見通しのよい研究開発を実現するものである。また、実験研究者も容易に利用できるような実験支援ツールとしての整備を行い、さらには実験研究者と協力してプロジェクト全体の開発目標である 500 Wh/kg の目標を達成する可能性のある電池を開発する指針を得ることを目的とする。

### (2) 事業概要

従来のコンピュータ化学をさらに発展させた実験融合計算化学という新しいコンセプトに基づくシミュレータを開発し、実際の開発現場で役立ち、高効率な未来型研究開発を実現する新規な研究支援アプローチ手法を確立する。具体的には、以下の新規計算手法を開発する。

#### 電池材料の高速理論スクリーニング手法の開発

コンビナトリアル計算化学（複数材料の性能スクリーニングをコンピュータ上で行う手法）を利用して、数百種の電池材料の性能を高速に理論スクリーニングできるシミュレータを作成する。具体的に電池正極多孔質構造の最適化を実施することで、高速理論スクリーニングに必要なシミュレータの開発と、実験研究者が利用できる研究支援ツールとしての整備を行う。

#### 測定機器シミュレーションソフトウェアの開発

電池材料開発では、材料と電池性能の相関の解明様々な機器分析が利用されるが、計測データをより深く理解するための理論に裏付けられたシミュレーションが必要である。限られた実験からより多くの情報を得ることが可能になり、効率よく開発実験を進めることが可能となる（実験融合計算化学と呼んでいる）。そこで、X線回折（XRD）、ラマン分光、広域X線吸収微細構造（EXAFS）、走査型トンネル顕微鏡（STM）、中性子線回折（ND）シミュレータを開発する。

#### 新しい電池系の性能評価シミュレータを開発

マルチレベルシミュレーション（マイクロ情報からマクロ物性を予測するシミュレーション技術）に基づく新規な電池系のマクロ性能評価シミュレータを開発する。上記①②で評価した材料レベルの物性値から、電気化学的なマクロ解析モデルにより実際の電池材料開発の主なアウトプット（I-V 特性など）を求めることで、蓄電池の性能を評価することが可能となる。本項目では、リチウム空気電池を対象として開発を行う。実際に実験研究者と連携して新規電池材料の理論設計を行い、開発されたアプローチを実験研究者も使えるように整備も併せて行う。

(3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.20-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
電池材料の高速理論スクリーニング手法の開発 ・プロトタイプ開発 ・実際の材料スクリーニングの実施、ノウハウの蓄積 ・Si系負極および全固体型の、Liイオン電池スクリーニング			→	→	→	
測定機器シミュレーションソフトウェアの開発 ・XRD、EXAFS シミュレータのプロトタイプ開発 ・ラマン分光、STM、NDシミュレータのプロトタイプ開発 ・Si系負極およびLiイオン電池および全固体型Liイオン電池の材料スクリーニングの支援			→	→	→	
新しい電池系の性能評価シミュレータの開発 ・プロトタイプ開発、方法論の基盤を構築 ・動作検証、解析モデルの改良 ・リチウム空気電池のサイクル特性が可能なWindowsプログラムの開発と応用			→	→	→	
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
東北大学	0.0	0.0	16.0	16.0	20.0	52.0

#### (4) 研究開発の実施体制



図 .2.4.20-2 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

##### 中間目標

##### (a) 電池材料の高速理論スクリーニング手法の開発

クラスターコンピュータを用いて12時間以内で100種類の材料をスクリーニングできる性能を有するプログラムのプロトタイプを開発する。実際の材料スクリーニングに適用し、有効性を検証する。また、利用方法についてのノウハウを蓄積する。

##### (b) 測定機器シミュレーションソフトウェアの開発

XRD、EXAFS、ラマン分光、STM、ND の各測定法について、原子の3次元配置モデルから測定データを予測できる機能をもつプログラムのプロトタイプを開発する。Li イオン電池とリチウム空気電池に応用し、実験データとの比較による妥当性の検証、電池材料の微細構造把握への応用方法についてのノウハウを蓄積する。

##### (c) 新しい電池系の性能評価シミュレータの開発

リチウム空気電池を想定した、マルチレベルシミュレーションに基づく新規な電池系のマクロ性能評価シミュレータのプロトタイプを開発する。具体的アルゴリズムを決定し、電流-電圧曲線解析プログラムの基盤部分を確立する。実験データとの比較による妥当性の検証を行い、電池材料理論設計に応用する際の利用方法についてのノウハウを蓄積する。

##### 最終目標

##### (a) 電池材料の高速理論スクリーニング手法の開発

- ・ 開発したプログラムにより、Si 系負極の微粉化を Si 負極と比較して抑制する新しい Si 系負極材を見出す。
- ・ 全固体型 Li イオン電池の少なくとも一つ以上の電解質系について超高速化量子分子動力学法を実施し、Li イオン伝導度の実測値の再現性が可能かどうかを明らかにする。

##### (b) 測定機器シミュレーションソフトウェアの開発

- ・ 開発したソフトウェアにより種々の電池系の構造解析シミュレーションを実施し、①および③の研究を支援する。
- ・ 使用方法マニュアル等を作成し、実験研究者が利用できるようにプログラムを整備する。

##### (c) 新しい電池系の性能評価シミュレータの開発

- ・ Windows 用に完成させたプログラムをベースに、劣化に伴う電極構造変化を考慮したリチ

ウム空気電池サイクル特性（電流－電圧曲線の経時変化）評価シミュレータを開発する。

- ・ 開発したシミュレータの精度を実験研究者と連携して検証し、リチウム空気電池のサイクル特性を改善するための開発指針を提示する。

## （6）研究開発成果

表 .2.4. 20-3 研究成果（一覧）

項目	目標値（最終）	達成値	達成度	備考
電池材料の高速理論スクリーニング手法の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Si 系負極の微粉化を抑制する新しい材料を見出す</li> <li>・ 全固体 Li イオン電池の電解質系について、実測値の再現性を見る</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <math>TiSi_2</math> 含有 Si を見出した</li> <li>・ <math>LiLaTiO_3</math> について、Li イオン伝導度の実測値の再現性を確認した</li> </ul>		
測定機器シミュレーションソフトウェアの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ XRD、ラマン分光、EXAFS、STM、ND シミュレータを開発し、解析を実施する</li> <li>・ 使用方法マニュアル等を作成し、プログラムを整備する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 目標とした 5 つ全てのシミュレータを開発し、構造解析シミュレーションを実施した</li> <li>・ 実験研究者が利用できるように整備した</li> </ul>		
③新しい電池系の性能評価シミュレータの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Windows 版リチウム空気電池サイクル特性評価シミュレータを開発する</li> <li>・ 実験研究者と連携して精度を検証し、リチウム空気電池特性改善のための開発指針を得る</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ リチウム空気電池の I-V 特性経時変化を考慮可能な、Windows 用シミュレータ開発した</li> <li>・ リチウム空気電池空気極のメソ構造最適化に関して、開発指針を得た</li> </ul>		

### <成果 1 >

（内容）電池材料の高速理論スクリーニング手法の開発

（達成度）○

（成果の意義）他の第一原理分子動力学法と比較して 5000 倍～1000 万倍以上の計算速度を達成する自動化超高速化量子分子動力学法プログラムの開発に成功し、これに基づいて 12 時間で 100 種類の材料スクリーニングができるようになった。

（課題と取り組み）実際に Si 系負極材と全固体 Li イオン電池電解質系のスクリーニングに適用して、その有効性を検証できた。



## <成果2>

(内容) 測定機器シミュレーションソフトウェアの開発

(達成度) ○

(成果の意義) 上述の自動化超高速化量子分子動力学法に最適化した、5つの測定機器シミュレーションソフトウェアを開発した。同様形式のデータを比較することで実験と計算化学を橋渡しし、計算モデルの妥当性評価ができる。

(課題と取り組み) 開発ソフトウェアにより、電池材料に対する利用方法についてのノウハウを蓄積できた。他の次世代材料開発の支援についても、すぐ利用できるような準備が整った。

## <成果3>

(内容) 新しい電池系の性能評価シミュレータの開発

(達成度) ○

(成果の意義) 新しい電池系として期待されているリチウム空気電池について、マクロ性能評価シミュレータを開発した。特に、空気極材料のメソ構造について事前評価が可能な、他に例を見ない独自のものである。実用化に向けた開発研究の加速が期待される。

(課題と取り組み) メソスケールの三次元電極構造モデリングに基づいてマクロ性能を評価し、最適構造を提案できた。他の新規電池系も、同様に性能評価シミュレータ開発が可能である。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.20-3 に示す。

表 .2.4.20-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願						
うち、外国出願						
国内登録						
海外登録						
論文			7	15	7	29
うち、査読付き論文			7	15	7	29
研究発表・講演			14	22	7	43
受賞実績			3	2	4	9
新聞・雑誌等への掲載			0	0	5*	5
展示会への出展			1	2	2	5
合計			25	41	25	92

\* 平成24年4月30日の日経新聞への掲載1件も含めた。

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

当初設定した研究開発目標は、すべて達成することができた。今後、さらに幅広い実験研究者との連携が今後の課題といえるが、本研究においてSi系負極やリチウム空気電池の系で本手法の有効性が示された通り、他の次世代技術に対しても課題解決の見通しは明るいといえる。

### (9) 成果の実用化／活用

連携する実験研究者がもの造りの成果としての特許を獲得し、東北大はそれを支援するソフトウェアを獲得するという成果の切り分けのため、特許としての成果は少ない。開発した多くの独自ソフトウェアを民間に技術移転するという形で、成果を実用化している。

産業界における具体的利用の実用化イメージは、本研究の Si 系負極やリチウム空気電池における実験研究者との連携が典型例であり、そのまま他にも適用できる。今後も、連携研究を通して継続的にバージョンアップしたソフトウェア群を提供していく。次世代電池研究開発の促進効果のみならず、技術的にはあらゆる電池系に対して本シミュレーション手法が適用可能であり、開発期間を短縮する経済効果も期待できるなど、大きな波及効果が期待できる。

### (10) その他

開発したプログラム情報は、Web で公開している：<http://www.aki.che.tohoku.ac.jp>。

## 2. 4. 2 1 リチウムイオン2次電池の過剰な負荷条件下における電極界面の原子・分子レベル解析技術開発 (東北大学学際科学国際高等研究センター)

### (1) 事業目的

近年のリチウム2次電池の研究開発は、高性能化と低コスト化の2つの課題を同時に達成しなければならない。この2つの課題において、高性能化は、高エネルギー密度化、サイクル特性向上と高容量化等を指しており、低コスト化は、安価な新規材料探索にある。付随する要求として、急速充放電等が求められているが、これらの要求は、互いにリンクするところが多く、抜本的なブレイクスルーが未だ見つかっていない。近年、度々発生するリチウム2次電池の事故は、電池内部におけるガス発生による電池セルの膨れや熱発生等が原因であるとされているが、未だ本質的な原因究明がなされていない。

このような、高性能化、低コスト化の流れの中で、電池とは元来「酸化剤」と「還元剤」を搭載しており、電池の充放電時は、電気化学的な「酸化反応」と「還元反応」を同時に進める化学的なエネルギーを電気的なエネルギーに変換するデバイスである。この化学的な反応の進行に伴い、当然なこととして熱力学的な熱も発生する。さらにリチウム2次電池は、他の一次電池、二次電池に比べてエネルギー密度が高いために、本来、危険性の高い2次電池である。この危険なエネルギーデバイスである電池を我々は巧みな技術で利用し、エネルギー密度の高さから軽量化が図れるので、携帯機器電源や電気自動車用電源に利用されているが、小型化や利便性の為に充放電条件や電池保護機構などが定格ぎりぎりでも運用されている。さらなる高性能化に伴い、電池に過剰な負荷をかけることとなり、事故を誘発する可能性が示唆されている。

本研究開発課題では、電池が過剰な負荷状態に置かれた状態をラボレベルで再現し、その状態についてその場分光法を用い、電極界面を原子・分子レベルにて解析する。過剰な負荷条件下におけるガス発生、電極表面界面生成物、電極界面近傍の電解液状態を原子・分子レベルにて追跡する。その解析を基に、リチウム2次電池の重量エネルギー密度 500Wh/kg の実現に向けた高電位領域や高温条件下における電池構成要素である電解液、リチウム塩、電極材料に関する高エネルギー密度化と安全性向上の指針を得ることを最終的な目標とする。

### (2) 事業概要

研究代表者のグループでは、電池活物質電極界面のその場分光学的計測を長年行っている。実電池に即した動的条件下、すなわち「その場」における電池の充放電時のその場ラマン分光解析を精力的に行ってきた。このその場ラマン分光法を行い電池動作時における電極界面の構造相転移観測、電極反応解析等を遂行した結果、電池活物質の電子伝導性などの電気化学物性を解明し、新規材料の提案へとつなげる一助とすることができている。近年、実用電池の高電位化(4~5V)は、電池の高性能化に繋がる可能性を有する $\text{LiNi}_x\text{Mn}_{2-x}\text{O}_4$ や $\text{LiCo}_x\text{Mn}_{2-x}\text{O}_4$ 等スピネル型化合物を中心に研究が精力的に行われてきている。しかしながら、この高電位領域における電極劣化や電解液の酸化分解等が問題となっており、電池の高電位化に向けてこれらの問題を解決する必要がある。これまで研究代表者らの研究グループは、この高電位領域における正極材料の詳細なその場分光解析にいち早く取り組み、電極構造の変化や電極界面における表面生成物の生成等を示唆する情報を得ることができている(T. Itoh et al., *Electrochem. Comm* 2 (2000) 743)。

当該研究課題では、

- ①電極電位規制下における表面生成物や電極構造変化をその場分光法にて追跡し、過剰負荷条件下（高電位）領域における電極界面の構造変化をその場ラマン分光法やその場赤外分光法、その場FTラマン分光法、その場FTIR分光法にて原子・分子レベルの解析をその場観察にて行う。原子・分子レベルでの界面解析を基に、高電位領域や高温条件下における電池構成要素である電解液、リチウム塩、電極材料に関する高エネルギー密度化と安全性向上の指針を得ることを最終的な目標とする。
- ②負極材料の過剰負荷条件下における原子・分子レベルの解析にチャレンジし、表面増強ラマン散乱や表面増強赤外吸収を用いた超高感度振動分光を用いたSEI解析技術の開発を行う。
- ③電極材料の薄膜化に関連した研究開発を遂行する。この薄膜化した電池活物質は、タスク(1)におけるその場観察用電極に供し、過剰負荷条件下における電池活物質そのものの状態を的確に再現するためのタスクである。これまで研究者らの研究グループでは、静電噴霧(Electrostatic Spray Deposition: ESD)法を用いた電極材料の薄膜化に関する技術開発を行っているが、高電圧を用いる必要があるなど実験条件に制約が多い。本研究開発課題ではこのESD法の発展形としてICPのネブライザーを応用した精密噴霧法を用いることにより、より簡便な電極薄膜作製に関する技術開発を行う。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.21-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
分光学的手法による正極材料の高電位領域(4~5V)におけるその場分光解析			—————▶			
過剰な負荷条件下負極材料の電極界面のその場分光			—————▶			
正極材料の高品位精密薄膜化技術の開発			—————▶			
開発費用(百万円)	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
東北大学学際科学国際高等研究センター	0.0	0.0	17.4	19.4	20.0	56.8

#### (4) 研究開発の実施体制

研究体制スキーム

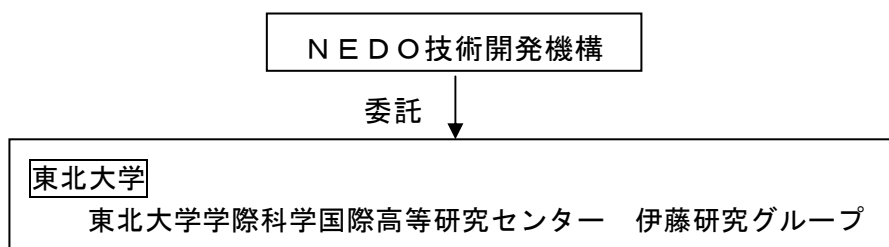


図 .2.4.21-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

中間目標

(1) 高電位領域(過剰な負荷条件下)における電池劣化過程を解明するために、 $\text{LiNi}_x\text{Mn}_{2-x}\text{O}_4$  や  $\text{LiCo}_x\text{Mn}_{2-x}\text{O}_4$  等のその場ラマン分光解析、赤外吸収分光法の解析、その場FTラマン分光解析を行う。この結果より、電極界面における電極構造の相変化、表面生成物の同定を行うことを目標とする。

(2) 黒鉛系炭素材料負極最表面における FT ラマン散乱測定を行い、炭素電極界面における炭素材料最表層と界面における生成物の原子・分子レベルにて構造解析を行い、SEI の構造、電気化学的な電子物性等を解明することを目標とする。

(3) 正極材料の高品位精密薄膜化技術の確立を目標とし、本中間目標(1)にて用いる電極として測定に供することができることを目標とする。

最終目標

$\text{LiCoO}_2$ 、 $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  などの合剤電極の高電位領域(過剰な負荷条件下)におけるその場分光スペクトルに対し詳細な解析を行うことで、電極界面構造のディテールを明らかにし、過剰な負荷条件に耐えうる電池構成要素を明確化することを目標とする。

#### (6) 研究開発成果

本プロジェクトの研究成果(一覧)を表 .2.4.21-2 に示す。

表 .2.4.21-2 研究成果（一覧）

項目	目標値(最終)	達成値	達成度	備考
正極材料界面のその場ラマン解析	LiCoO <sub>2</sub> 、LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> などの合剤電極の高電位領域(過剰な負荷条件下)におけるその場分光スペクトルに対し詳細な解析を行うことで、電極界面構造のディテールを明らかにし、過剰な負荷条件に耐えうる電池構成要素を明確化する。	LiCoO <sub>2</sub> 、LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> などの合剤電極の高電位領域(過剰な負荷条件下)におけるその場分光スペクトルに対し詳細な解析を行うことができ、最終的に、LiCoO <sub>2</sub> と LiNi <sub>1/3</sub> Mn <sub>1/3</sub> Co <sub>1/3</sub> O <sub>2</sub> 合剤電極のその場 FT ラマンスペクトルを得ることができた	◎	
負極材料界面のその場ラマン解析	黒鉛系炭素材料負極最表面におけるラマン散乱測定を行い、炭素電極界面における炭素材料最表層と界面における生成物の原子・分子レベルにて構造解析を行い、SEI の構造、電気化学的な電子物性等を解明すること	黒鉛系炭素材料合剤電極のその場ラマン分光測定に成功している。	○	
研究開発用薄膜電極の作製	正極材料の高品位精密薄膜化技術の確立を目標とし、本研究開発にて用いる電極として測定に供することができること	可視光領域におけるその場ラマン分光測定に供することができており、概ね達成できている。	○	

<成果1>

(内容) 正極材料界面のその場ラマン解析

(達成度) ◎

(成果の意義)

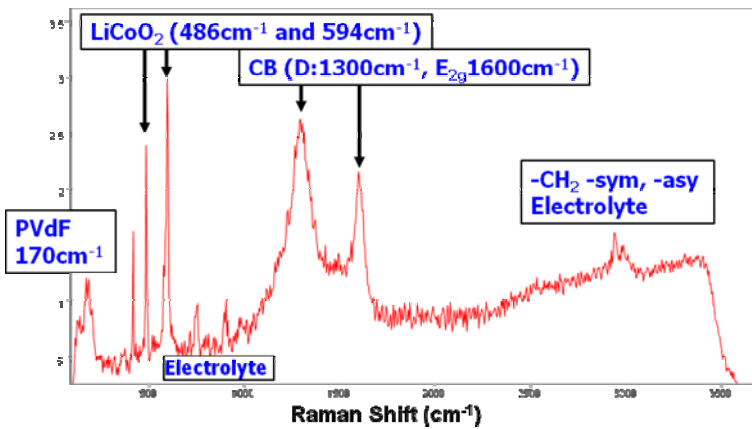


図 .2.4.21.-2 3.5V (開回路電位) における LiCoO<sub>2</sub> 合剤電極の近赤外励起その場 FT ラマンスペクトル

図III.2.4.21-2 に 3.5V (開回路電位) における LiCoO<sub>2</sub> 合剤電極の近赤外励起その場 FT ラマンスペクトルを示す。可視光領域のその場ラマンスペクトルの測定法では、LiPF<sub>6</sub> 系電解液や PVdF バインダー等による蛍光の影響受け合剤電極のラマンスペクトルの測定は難しく、バインダー量の調整等の電極の調整が必要であった。電極界面からの蛍光等に阻害されることなく良好なラマンスペクトルが観測されている。486cm<sup>-1</sup>と594 cm<sup>-1</sup>に LiCoO<sub>2</sub> の2つのモードに起因するラマン線、1300 cm<sup>-1</sup>と1600 cm<sup>-1</sup> 付近にカーボンブラックに起因する D バンド、E<sub>2g</sub> モードが明瞭に観測されている。さらに、170cm<sup>-1</sup> 付近には PVdF に起因する重い振動モードと考えられるラマン線が観測され、電解液に起因するラマン線が 600 cm<sup>-1</sup>~1000cm<sup>-1</sup>と 2700~3200 cm<sup>-1</sup> に観測することができている。合剤電極・LiPF<sub>6</sub> 系電解液の2つの分光学的に厳しい悪条件下において、電極電位規制下であるその場にて全電池構成要素を1スペクトル上に明瞭に観測できうる手法は他に見受けられず、本研究開発の一翼を担う大きな成果であり、電池研究開発におけるその場観察の手法として特筆すべき成果である。(課題と取り組み)

本研究開発の大きな目標である「電池が過剰な負荷状態に置かれた状態をラボレベルで再現し、その状態についてその場分光法を用い、電極界面を原子・分子レベルにて解析する」についてFT近赤外その場分光法を確立でき、LiCoO<sub>2</sub> 系、LiNi<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub> 系合剤電極の解析ができているので、当初の目標は概ね達成できていると考えている。その場 FT ラマンスペクトルの解析より、2次電池電極界面の構造解析が明らかになりつつあり、電解液と電極の組み合わせを探ることにより、2次電池電極界面と電池特性を明らかにできれば、現在可能である高性能な2次電池に繋がると考えている。

(7) 知的財産権等

本プロジェクトにおける知的財産権等の件数のまとめを表 .2.4.21-3 に示す。

表 .2.4.21-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願			0	0	0	0
うち、外国出願			0	0	0	0
国内登録			0	0	0	0
海外登録			0	0	0	0
論文			3	1	0	4
うち、査読付き論文			3	1	0	4
研究発表・講演			7	9	7	23
受賞実績			0	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載			0	1	0	1
展示会への出展			0	0	0	0
合計			10	11	7	28

#### (8) 今後の課題と課題解決の見通し

本研究開発課題では、電池が過剰な負荷状態に置かれた状態をラボレベルで再現し、その状態についてその場分光法を用い、電極界面を原子・分子レベルにて解析する。過剰な負荷条件下におけるガス発生、電極表面界面生成物、電極界面近傍の電解液状態を原子・分子レベルにて追跡した。その解析を基に、リチウム2次電池の重量エネルギー密度 500Wh/kg の実現に向けた過剰な負荷条件下における電池構成要素である電解液、リチウム塩、電極材料に関する高エネルギー密度化と安全性向上の指針に繋げることを最終的な目標とし本研究開発課題を遂行した。具体的には、その場近赤外 FT ラマン分光法を手法とし、これまで電池反応としてブラックボックスであった反応解析をその場で行う手法を開発に成功した点は大きな成果である。また、この開発したその場近赤外 FT ラマン分光法を、実電池の合剤電極・電解液に適応し、それらの全構成要素をその場での解析に成功した意義は非常に大きい。本報告書では、炭素系材料、LiCoO<sub>2</sub> 系、LiNi<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub> 系について述べたが、本研究開発課題では、LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 系、LiNi<sub>x</sub>Mn<sub>2-x</sub>O<sub>4</sub> 系や LiCo<sub>x</sub>Mn<sub>2-x</sub>O<sub>4</sub> 系についても検討を行っている。これらについては、外的要因の影響により、良好なスペクトルを全て得るには至っていないが、実験系の改善により、スペクトル解析に耐えうる良好なスペクトルを得ることができると考えている。今後の展開として、これらの反応が電極界面のどの部位で進行し、その反応が電池のどのような特性に影響しているかを明らかにしていく必要があると考えている。FT ラマン分光法等の振動分光法のみではこれらを見破ることはできるかどうか判断することはできないが、各種その場測定法の持つポテンシャルを最大限生かしながら、電池の高性能化に繋げる必要がある。

#### (9) 成果の実用化／活用

これまで、学術的な先端的手法の研究開発を行う場合、比較的測定・解析を行い易い試料を研究対象とする場合が多い。本研究開発では、先端的手法をこれまで解析が難しいとされてきた研究対象に応用することにより、電池研究開発の一助として本研究課題を遂行した。この手法は、芽吹き始めてから日が浅く、本研究開発の数例の検討のみである。本研究開発の大きな目標である「電池が過剰な負荷状態に置かれた状態をラボレベルで再現し、その状態についてその場分光法を用い、電極界面を原子・分子レベルにて解析する」について FT 近赤外その場分光法を確立でき、LiCoO<sub>2</sub> 系、



LiNi<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub>系合剤電極の解析ができていますので、当初の目標は概ね達成できていると考えています。その場 FT ラマンスペクトルの解析より、2次電池電極界面の構造解析が明らかになりつつあり、電解液と電極の組み合わせを探ることにより、2次電池電極界面と電池特性を明らかにできれば、現在可能である高性能な2次電池に繋がると考えています。

#### (10) その他

特になし

## 2. 4. 2 2 高压合成法による次世代高容量正極材料酸化物の材料設計 (東京理科大学、産業技術総合研究所)

### (1) 事業目的

自動車用蓄電池の飛躍的な性能向上に資するため、高压合成技術を利用することにより、次世代高容量正極材料酸化物の材料設計を行う。

### (2) 事業概要

本事業終了時点で、パック電池レベルでの重量エネルギー密度500 Wh/kgを見通せる高容量正極材料酸化物の探索を行う。具体的には、リチウム負極との組み合わせで酸化物活物質あたり1,200 Wh/kg以上の重量エネルギー密度を有し、20サイクル後に初期放電容量の70%以上の容量を維持可能な高容量正極材料酸化物を見出す。

この目標をクリアーするためには、これまでに検討されてきた層状岩塩型やスピネル型をはじめとする既知の結晶構造の利用では達成が難しく、従来の延長線上にない新しい結晶相を検討する必要がある。

そこで、カルシウムフェライト型の結晶構造を有するリチウムマンガン酸化物をはじめとする新結晶相について、構成する遷移金属元素とその化学組成を最適化することにより、上記目標を達成する。この材料設計を行う上で、高温高压条件下での材料合成技術が必要不可欠である。

高压合成技術は、常圧合成では合成困難な結晶相を合成可能であり、新規電極材料設計の手法として有用であることに着目し、本手法を用い、さらに、イオン交換合成法をはじめとするソフト化学的な手法と併用することによって、次世代高容量正極材料酸化物の材料設計を行う。

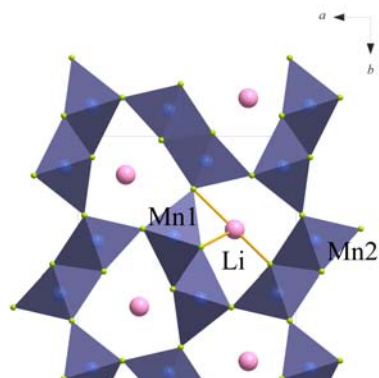


図 .2.4.22-1 カルシウムフェライト型

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.22-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度
(3) - 1 新規高容量正極材料酸化物の高压合成					
a) カルシウムフェライト型正極材料酸化物の高エネルギー密度化 (東京理科大学)			→		
b) カルシウムフェライト型構造のリチウム挿入・脱離反応のメカニズム解明 (産業技術総合研究所)			→		

(3) - 2 新規高容量結晶相の設計と探索 a) 新規高容量酸化物の高圧合成 (東京理科大学) b) 新規高容量酸化物の構造・物性解明 (産業技術総合研究所)						
開発費用 (百万円)	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
東京理科大学	0.0	0.0	987.7	866.3	826.6	2677.6
産業技術総合研究所	0.0	0.0	851.9	975.9	1169.8	2997.7

#### (4) 研究開発の実施体制

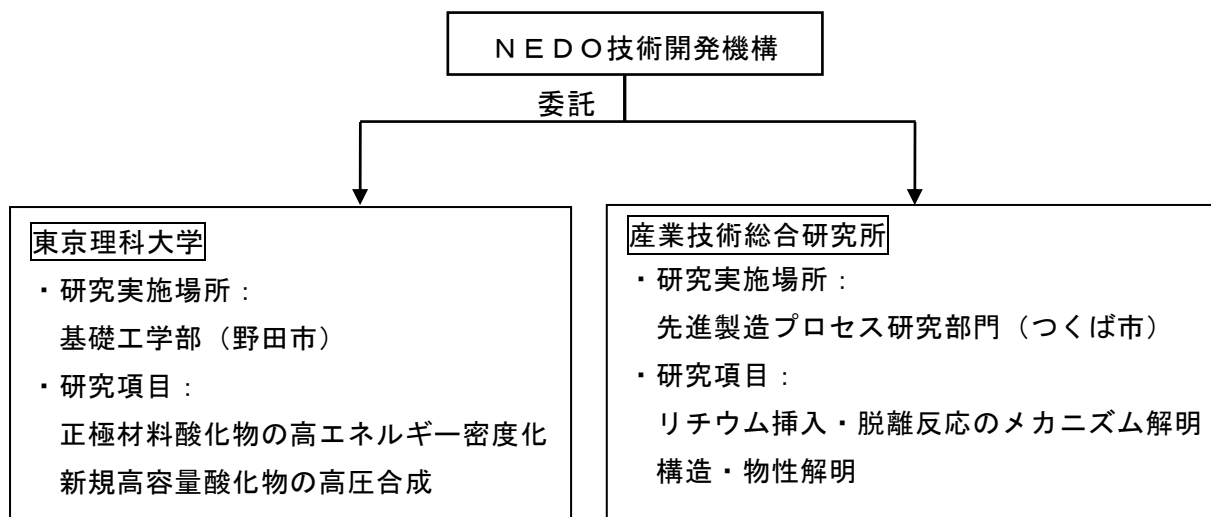


図 .2.4.22-2 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

##### 中間目標

(想定根拠・条件) カルシウムフェライト型  $\text{NaMn}_2\text{O}_4$  を出発原料として、 $\text{Na/Li}$  イオン交換合成によって合成されたカルシウムフェライト型  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  は、初期放電容量が  $471 \text{ mAh/g}$  に達する傑出した容量を有し、その重量エネルギー密度は、負極を  $\text{Li}$  金属とした場合、 $1,064 \text{ Wh/kg}$  に達していた。しかしながら、既存材料と比較した場合、平均放電電位が  $3 \text{ V}$  に満たず、正極材料として検討するには高電位化することが必要不可欠であった。そこで、さらなる高容量化、高電位化を目指し以下のように中間目標を設定した。

#### 新規高容量正極材料酸化物の高圧合成

リチウム負極との組み合わせで、酸化物重量当たり1,000 Wh/kg以上の初期放電エネルギー密度であり、かつ3 V以上の平均放電電位を有し、50サイクル後に初期放電容量の50%以上の容量を維持可能な新規高容量正極材料酸化物を見出す。

#### 新規高容量結晶相の設計と探索

高圧合成技術を活用し、高リチウム含有組成を有する新規正極材料設計の指針を得ると共に、酸化物重量当たり500 mAh/g以上の高容量実現の見通しを立てる。

#### 最終目標

(想定根拠・条件) 次世代自動車への応用に向けて、パック電池レベルでの重量エネルギー密度500 Wh/kgを見通せる高容量正極材料酸化物の探索を行うためには、現状の正極材料では達することのできていない、リチウム負極との組み合わせで酸化物活物質あたり1,200 Wh/kg以上の重量エネルギー密度を有し、20サイクル後に初期放電容量の70%以上の容量を維持可能な新規の高容量正極材料酸化物を見出す必要がある。そこで、最終目標を以下のように設定した。

#### 新規高容量正極材料酸化物の高圧合成

リチウム負極との組み合わせで、酸化物重量当たり1,200 Wh/kg以上の初期放電エネルギー密度であり、かつ3 V以上の平均放電電位を有し、100サイクル後に初期放電容量の50%以上の容量を維持可能な新規高容量正極材料酸化物を見出す。

#### 新規高容量結晶相の設計と探索

高圧合成技術を活用し、高リチウム含有組成を有する新規正極材料設計の指針を得ると共に、酸化物重量当たり500 mAh/g以上の初期放電容量を有する新結晶相を見出す。

### (6) 研究開発成果

表 .2.4.22-2 研究成果 (一覧)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
新規高容量正極材料酸化物の高圧合成	・初期放電エネルギー密度 1,200 Wh/kg 以上	910 Wh/kg(Ti 置換体) 884 Wh/kg(Ni 置換体)	76% 74%	
	・平均放電電位 3V 以上	2.93V(Ti 置換体) 3.27 V(Ni 置換体)	98% 109%	
	・サイクル特性 100 サイクル後に初期放電容量の 50%以上	20.3%	41%	
新規高容量結晶相の設計と探索	500mAh/g 以上の初期放電容量を有する新結晶相の開発	279mAh/g	59%	

### <成果1>

(内容) 新規高容量正極材料酸化物の高圧合成

(達成度) △

(成果の意義) 現在の次世代自動車に要求される性能を満たすため、既存の枠組みにとらわれない新たな結晶構造を持った材料系の開発が求められている。本事業では、新たな正極材料であるカルシウムフェライト型  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  を高圧合成法とソフト化学を利用して合成し、その電池材料としての特性を向上させることを目的として行った。マンガンサイトへTi およびNi の元素置換によって 3V 程度の平均放電電位で、900Wh/kg ほどの高い初期放電エネルギー密度を有する正極材料を開発することが可能となった。

(課題と取り組み)

カルシウムフェライト型  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  は、1000Wh/kg 以上の高い初期放電エネルギー密度を有するが、平均放電電位が 2.26V と低いという問題点があった。この問題を解決するために、マンガンサイト置換および酸素サイト置換を試みた。元素置換の検討の中で、Ti およびNi の置換量が Mn に対して 10%の時に特性改善が改善されることを明らかにした。

### <成果2>

(内容) 新規高容量結晶相の設計と探索

(達成度) △

(成果の意義) 目標とする酸化物重量当たり 500mAh/g 以上の初期放電容量を有する材料の開発には至らなかったが、理論容量が 500mAh/g を超える  $\text{Li}_2\text{CuO}_2$  相の新規高圧相や、カルシウムフェライト型とラムズテライト型の部分構造が 1 : 1 で交互に積層する新規物質の開発など一定の成果は出すことができた。

(課題と取り組み) 現状では、安全性の面からリチウム金属を負極として用いることが困難な状態にある。そこで、酸化物重量当たり 500mAh/g 以上の初期放電容量を有する新規結晶相の開発を目標に掲げた。我々は高圧合成法を中心とした材料開発技術を利用して、高リチウム含有組成のバナジウム酸化物および、マンガン酸化物や、すでに高 Li 含有相として知られている  $\text{Li}_2\text{CuO}_2$  相の試料作製方法や置換元素の検討、マンガン以外の遷移金属元素を含むカルシウムフェライト型、あるいはその類似構造物質の開発を進めた。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.22-3 に示す。

表 .2.4.22-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願				2		2
うち、外国出願						
国内登録				2		2
海外登録						
論文					1	1
うち、査読付き論文					1	1
研究発表・講演			1	7	7	15
受賞実績						
新聞・雑誌等への掲載						
展示会への出展				1		1
合計			1	12	9	22

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

### 新規高容量正極材料酸化物の高压合成

カルシウムフェライト型  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  が正極材料として既存の実用材料と比較しても十分高い性能を有する材料ではあるということは示すことができたと考えているが、現状では、既存材料の性能を大きく凌駕するほどの優れたものであるということとはできない。 $\text{Na/Li}$  イオン交換および結晶粒径の制御などのプロセスを改善し、初期放電容量とサイクル特性を改善することにより、当初の目的を達成しさらなる発展が可能となると予想される。

### 新規高容量結晶相の設計と探索

本事業の探索的な研究から、いくつかの興味深い新規結晶相を見出す事は出来たが、結果的に当初の課題をクリアするには至らなかった。有望な高容量新規材料を作製するためには、継続して多価の価数状態を取る元素をキーマトムとした物質合成を継続していく必要があると考えている。また、さらに研究対象をナトリウム酸化物材料にまで積極的に広げ、材料のバリエーションを増やす取り組みを行っていくことが必要であると考えている。

## (9) 成果の実用化／活用

本事業は、次世代電気自動車等に要求される高いエネルギー密度と出力密度を実現する高容量正極材料酸化物の材料設計を行うものであった。カルシウムフェライト型  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  の電気化学特性は当初の目標には達していないが、新たな結晶構造を持つ材料で優れた特性を有する材料の設計が可能であることを示すことができたと考えられる。今後は、従来材料に対する電池特性の優位性を確実なものとし、実用材料としての性能を高めていく必要がある。その上で、産業界へ技術を移転し実用化していくためには、常圧に近い条件のもとで材料合成をする技術を確認し、作製コストを下げる必要がある。期待される性能を達成し、材料製造技術を確認し

できれば産業界へのインパクトも大きいものと考えられるため、企業との連携を図ることによって次世代自動車用蓄電池としての産業利用へ波及効果は大きくなることが期待される。

(10) その他

## 2. 4. 23 4d 遷移金属コンバージョン系による高容量正極材料の研究開発 (東京大学)

### (1) 事業目的

リチウム電池系で本プロジェクト目標である 500 Wh/kg 以上を実現するためには、リチウムメタルあるいはリチウムがあらかじめ挿入されたシリコン負極の使用を前提に、正極サイドでは発生電圧 4 V 前後で 350 mAh/g 以上、2 V 前後で 700mAh/g 以上の容量がそれぞれ必要とされる。現在提案されている固体正極の中でこれを満たすのは硫黄のみである。本研究開発では、硫黄を大幅に上回る可能性を有する 4d 遷移金属コンバージョン反応を用いた高容量正極材料を開発する。

### (2) 事業概要

RuO<sub>2</sub>やMoO<sub>2</sub>の対リチウム金属2V程度の発生電圧と4電子還元理論容量をベースに導出される理論体積エネルギー密度は7800-10800 Wh/lとなり、硫黄の6900 Wh/lを上回る。一方重量エネルギー密度は1600-1700Wh/kgと硫黄の3300Wh/kgの半分程度である。しかし、金属伝導性を有し、既存の電解液を適用可能なため、電極特性の抽出がはるかに容易であることから、実効的に取り出せる電極としてのエネルギー密度の可能性は総合的に上回ると考えられる。材料本来の特性の抽出とさらなる高機能化を行うために、(i)理論容量特性の実現、(ii)微粒子化やアモルファス化によるギブス生成エネルギーの増大や化学修飾による高電圧化、(iii)導電性鑄型との効率的ナノ複合化による、凝集反応の抑制と反応可逆性、負荷特性の向上、(iv)豊富で安価なMo等の有効利用、の4項目を集中的に検討する。これにより、パック電池レベルで500 Wh/kg以上を見通すことのできる正極材料の現実解を提示する。

### (3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.4.23-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
理論容量の実現				→		
高電圧化					→	
反応可逆性向上					→	
新規材料開発					→	
開発費用(百万円)	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
東京大学	0.0	0.0	18.375	18.375	20.0	56.75



#### (4) 研究開発の実施体制

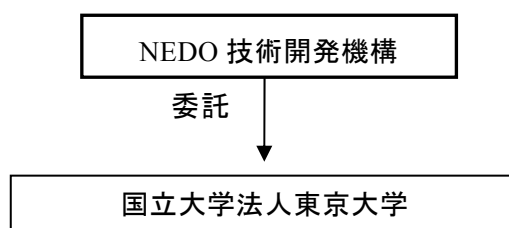


図 .2.4.23-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

##### 中間目標

- ・プロジェクト目標を見通せる特性である、1-4.5V の電圧範囲内で 750mAh/g 以上の初期可逆容量を達成する。
- ・硫黄正極を上回る体積エネルギー密度を実現可能（活物質基準）な、平均電位約 2.1V 以上で 450mAh/g を実現する。
- ・20 サイクルでの容量維持率 50%を達成する。
- ・熱処理条件を最適化し、Mo/Ru>0.8 の組成比にて、1V-4.5V の電位範囲での可逆充放電容量 500mAh/g を達成する。

##### 最終目標

- ・高電圧化、サイクル特性向上を定量化する上で RuO<sub>2</sub> の充放電特性に関する標準比較データを確立する。
- ・硫黄正極を大幅に上回る体積エネルギー密度を実現可能（活物質基準）な、平均電位約 2.5V を 400mAh/g 動作時に実現する。
- ・100 サイクルでの容量維持率 50%を達成する。
- ・Mo/Ru>1.0 の組成比にて、1V-4.5V の電位範囲での可逆充放電容量 600mAh/g を達成する。

#### (6) 研究開発成果

表 .2.4.24-2 研究成果（一覧）

項目	目標値（最終）	達成値	達成度	備考
最高特性標準化	800mAh/g	1200mAh/g		
平均電位	2.5V	2.5V		
サイクル特性	50%/100cycle	60%/10cycle		
新材料開発	Mo/Ru>1,600mAh/g	Mo/Ru=1,800mAh/g		

### <成果1>

(内容)  $\text{RuO}_2$  の正極材料としての初期特性としての限界性能を引き出し、標準データとして確立することは十分に行え、23年度最終目標を達成した。達成した  $1200\text{mAh/g}$  という可逆容量は、4電子酸化還元理論容量を大幅に超えるものである。

(達成度)

(成果の意義) 単純な還元分解反応以外の可逆反応の存在と、これが大幅な高容量化に寄与する可能性を提示した。

(課題と取り組み) 初期特性を引き出すための、カーボンとの複合時の、カーボンの種類、量、熱処理条件等の最適化を行った。最適化した試料を用いて、詳細な反応メカニズムの解明と、これをもとにした材料設計への展開を試みた。理論容量相当分の充放電メカニズムについてはX線吸収分光法を駆使し、 $\text{RuO}_2$  系について、充放電中の価数変化と局所構造追跡を行い、放電中の長距離秩序の消失と共にナノ Ru 金属が析出する過程、及び充電時の逆過程を明確に捉えた。さらに、Ru-Mo 複合酸化物系について、Ru は全電位範囲で Mo は 2V 以下でのみ反応に寄与すること、コンバージョン反応後の析出金属は、EXAFS 同径分布に第1近接のみが見られる、超微細クラスタであること、その後再生成する酸化物も同様であり、ナノ以下の微細領域で進行する可逆反応であること等を明らかにした。

### <成果2>

(内容) 初期構造をアモルファス相とすること、およびバナジウムやマンガンとの複合化を行う、という二つの手法によりコンバージョン電位が向上することが解った。これらの総合的施策により、 $400\text{mAh/g}$  動作時の平均電位を  $2.5\text{V}$  という 23年度最終目標を達成した。

(達成度) ○

(成果の意義) コンバージョン反応電位は熱力学的に一義的に決定されるというこれまでの考え方に対して、発生電位を制御する手法を複数提示した。

(課題と取り組み) 熱処理条件により結晶性を連続的に低下させた試料や、<成果4>で新たに合成法を確立した複合酸化物が、高電位コンバージョン反応を実際に起こすことを平衡電位測定により注意深く確認した。

### <成果3>

(内容) 酸化ルテニウム粉末粒子の微細化やカーボン粒子等の他の電極構成材料との均一分散化、添加する樹脂の適正化による、活物質粉末粒子や導電助剤として添加されるカーボン粉末粒子の相互の結着性の改善や、電解液分解にともなう不動態皮膜形成の抑制、さらには長尺柔軟3層 CNT 添加は、長距離電子導電経路確立と活物質粉末粒子の脱落防止により充放電サイクル特性を大きく向上させ、サイクル特性改善にむけた明確な方向性を提示した。これらの総合的施策により、10サイクルでの容量維持率 60%を実現し、22年度目標をクリアしたが、23年度最終目標である100サイクルでの維持率 50%の確認には至らなかった。

(達成度)

(成果の意義) 他のコンバージョン反応系のサイクル特性向上に有効な手法が、必ずしも有効ではないこと、すなわち材料系に特有の問題に対処していく必要性を提示した。

(課題と取り組み) 体積膨張収縮緩和、副反応抑制、ナノクラスタの凝集防止、の3つの観点から、種々のカーボンとの複合化、種々のバインダの適用、種々の添加剤の適用検討を行った。特に有効であったのが長尺3層ナノチューブとの柔軟な複合化自立厚膜であるが、この3層ナノチューブは、工業展開を意識して、流動層を用いた大量合成が可能なプロセスで作製されたものである。

#### <成果4>

(内容) 酸化ルテニウムと酸化モリブデンとの複合酸化物の作製方法を検討・確立し、Moを半分程度置換しても800mAh/g以上の高容量コンバージョン反応正極特性が得られることを確認した。これは最終目標値 Mo/Ru 比1以上という合成面での最終目標を達成すると同時に、可逆容量の最終目標値 600mAh/gを大幅に上回る値である。さらに、高電圧化が可能な、MnやVとの同様な複合化手法も確立した。

(達成度)

(成果の意義) 通常の固相法では得られない固溶体が、溶液沈殿法により得られることを見いだした。通常コンバージョン電極活性を示さない遷移金属であっても、このような複合化により活性を急激に出現する可能性があることが解り、材料設計の幅が大幅に広がることになる。

(課題と取り組み) 可能な限り安価で豊富な遷移金属でかつ高電位発生が熱力学的に予測されたMnやVをRuO<sub>2</sub>に複合化するための水溶液中での酸化還元反応を利用した合成プロセスを独自に開発し、固溶体が形成していることを確認した。

#### (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.23 -3 に示す。

表 .2.4.23 -3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	N.A	N.A	0	0	0	0
うち、外国出願	N.A	N.A	0	0	0	0
国内登録	N.A	N.A	0	0	0	0
海外登録	N.A	N.A	0	0	0	0
論文	N.A	N.A	0	0	0	0
うち、査読付き論文	N.A	N.A	0	0	0	0
研究発表・講演	N.A	N.A	0	1	4	5
受賞実績	N.A	N.A	0	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載	N.A	N.A	0	0	0	0
展示会への出展	N.A	N.A	0	0	0	0
合計			0	1	4	5

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

初期充放電過程においてはコンバージョン理論容量の 1.5 倍にも達する 1200mAh/g の大容量が得られており、これを利用できれば大容量電極設計の新たな方向性が見いだせる可能性がある。この過剰可逆容量発現の機構の理解と、これを利用するための施策の検討が必要である。

充放電時の電位ヒステリシスによるエネルギー効率低下の抑制、高電位領域での可逆容量の増大が、今後の大きな課題であり、これはコンバージョン反応を利用する電極材料に共通する問題である。充電時と放電時で、速度論的に反応経路が異なってしまうことが原因であると考えられ、制御されたナノ構造体の積極利用が解決の糸口になり得る。高電位コンバージョン反応については、初期価数の高い遷移金属化合物が材料探索の対象となり得る。

十分なサイクル特性が確保できなかったのは、 $\text{RuO}_2$  の触媒活性による副反応の進行が原因の一つと考えている。今後、副反応抑制とコンバージョン電極活性向上の両立に向けた検討が必要と考える。具体的には、より表面被覆効率が高く、安定な被膜を形成するためのバインダーや電解液添加剤に関する、スクリーニング検討が必要と考える。

本研究では、技術の可能性を示す意味で、あえて貴金属である Ru を基本元素に据えた材料設計を行った。今後、より安価で豊富な遷移金属で高電位コンバージョン反応を起こすための中心元素の選択と材料設計が必要である。

## (9) 成果の実用化／活用

これまで専ら大容量負極材料において対象となってきたコンバージョン反応であるが、1000mAh/g にせまる大容量正極材料における反応としても利用可能な可能性が提示された。

正極にリチウムを含有しないため、実用化に当たってはプレドープされた大容量負極 (Si 等) を適用することが、高エネルギー密度を実現するためには必要となる。これはリチウムイオンキャパシタ等で既に一部実用化されている技術であり、この点の障壁は大きな問題とはならないと考える。リチウムを初期に含有した状態で正極を大幅に高容量化することは、原理的に極めて困難であり、どのような大容量正極に対しても共通して重要となる大容量負極へのプレドープ技術は合わせて検討していくべき技術である。

コンバージョン反応におけるサイクル特性の問題は、本研究では十分に解決できなかったものの、他の材料系では数百サイクルを確保している場合もある。むしろ、実用化に向けた最大の課題は 1V 以上にも達する充放電ヒステリシスであり、この点を解決しない限り、エネルギー効率の点で実用化は不可能である。今後、ブレイクスルーが必須な課題である。

## 2. 4. 2 4 含フッ素溶媒による高電圧駆動電解液の研究開発 (関西大学、ダイキン工業)

### (1) 事業目的

本研究開発事業は、次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発/次世代技術開発/含フッ素溶媒による高電圧駆動電解液の研究開発に基づいて、プラグインハイブリッド車、電気自動車等の早期実用化へ貢献するために高エネルギー密度のリチウムイオン二次電池の開発を目的とする。この目的を達成するために高電圧駆動を可能にする含フッ素溶媒を主体とする新規電解液溶媒材料の開発とリチウムイオン二次電池への適用における研究開発を推進する。同材料を適用することで従来のリチウム電池と比較して正極利用率の飛躍的な向上、それに伴う容量/エネルギー密度の増大を目的とした研究開発を実施する。

### (2) 事業概要

本委託研究ではこれまでの研究成果を更に拡張し、①各種正極材料に対しての組成の適正化、②高電圧駆動用電解液組成の最適設計などの課題を解決することにより、500Wh/kgを実現させる電解液組成の提案を行う。

そのためには、①適切なフッ素溶媒の設計、②当該溶媒を用いた適切な組成設計、③適切な正極との組み合わせ、④高電圧動作に適した電解液組成の最適設計を段階的に行う必要があり、各フェーズに応じて各々の課題をダイキン/関西大学で分担して解決していく。

### (3) 研究開発の実実施スケジュールと予算

表 .2.4.21-1 主な実施項目と開発費用 (単位 万円)

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
フッ素化合物の合成			→			
電解液調整			→			
電解液基礎評価			→			
ハーフセル評価				→	→	
電池挙動解析				→	→	
正極材料検討				→		
正極電極作成				→		
フルセル評価					→	
電解液組成検討					→	
電極スケールアップ					→	
ラミネートセル評価					→	
開発費用 (百万円)	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
ダイキン工業 (株)	0.0	0.0	1019	1019	1099	3139
(学校法人) 関西大学	0.0	0.0	819	819	900	2539

#### (4) 研究開発の実施体制

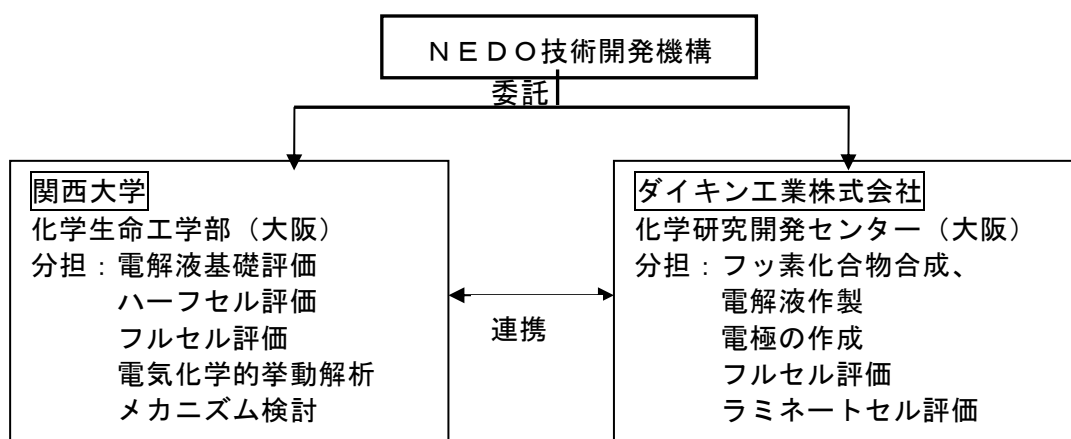


図 .2.4.24-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

H21年度は候補となるフッ素化合物の合成とその基本特性評価から高電圧動作可能性のある電解液系を見出す。

H21年度に見出した高電圧動作可能な基本フッ素電解液を特定の正極(Li金属以外の負極材料で500Wh/kgを達成する可能性がある正極材料)に適用して、高電圧駆動可能で良好な電池特性を発現する電解液組成を見出すことを目標とする。

H22年度に選択した正極材料を用い、その容量利用率90%で安定動作が可能であり、かつ良好な電池特性が得られることのハーフセルおよびフルセルでの確認を目標とした。

各年度の具体的目標および想定根拠、条件を下記に記載する。

##### 中間目標

中間目標は下記項目に設定した。

(a)下記特性をもつ電解液組成を見出し、高電圧駆動電解液としての原理的可能性確認を行う。

LSV (Li参照極、Pt作用極)を用いた耐電圧測定で6V以上の耐電圧 (反応電流 $0.5\text{mA}/\text{cm}^2$ 以下) (設定理由: 既存電解液系では耐電圧が5.6V程度であるため、既存電解液より+0.4Vの高電圧=4.5V以上での駆動が原理的に可能となる。)

イオン伝導度 25°Cで $1\text{mS}/\text{cm}$ 以上 (設定理由:  $\text{mS}/\text{cm}$ オーダーのイオン伝導度が高出力に必要。一般的有機電解液系同等のイオン伝導度を維持する。)

(b)上記(a)で見出した電解液の高電圧駆動電池への原理的可能性確認を行う。

既存正極を用いたハーフセルにて充電終止電圧4.5V以上の充放電で50サイクル後の容量保持率が5サイクル後の容量に比べ90%以上であること。

(設定理由: 電池として動作するかの確認を初期特性にて行う。)

中間目標での目標は原理的に高電圧動作可能な電解液を創成することであった。高電圧動作可能な電解液として成立するには、1)で設定した、まず基礎評価レベルで耐電圧が十分にあるかどうか、とイオン電導度が十分あるかどうか、であった。1)の条件を満たせば原理的には可能性がでてくる。これを2)のハーフセルレベルで実際に電池を組んで他要因で電解液として成立しないことがあるかどうか、の検証をおこなった。

##### 最終目標

最終目標は下記のとおり設定した。

(a)特定の正極材料を用いた70mAh~100mAhの容量をもつセルで内部抵抗が実用レベルとして十分な30mΩ以下。

(b)Li金属以外の負極材料で500Wh/kgを達成する可能性がある正極材料を用いたハーフセルにて充電終止電圧4.5V以上、容量利用率90%以上、充放電100サイクル後の容量保持率が5

サイクル後の容量に比べ90%以上であること。

(c) Li 金属以外の負極材料で 500Wh/kg を達成する可能性がある正極材料を用い、Li 金属以外の負極材料を用いて充電終止電圧 4.5V 以上、容量利用率 90%以上、充放電 100 サイクル後の容量保持率が 5 サイクル後の容量に比べ 90%以上であること。

上記 1) ~3) に設定した根拠は、電池として成立するかどうかの原理的な検証としてはサイクル特性および内部抵抗値が重要であるためである。内部抵抗、サイクルの目標値は既存の標準系 (4.2V NMC/グラファイト系、1M LiPF<sub>6</sub> EC/EMC(3/7)) 使用時における内部抵抗、ハーフセル、フルセルでの実績値と同等レベルである数値に設定した。

## (6) 研究開発成果

表 .2.4.24-2 研究成果 (一覧)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
電解液の耐電圧	6 V 以上	6.6V を達成	110%	
イオン電導度	1 mS/cm 以上	9mS/cm を達成	200%	
フルセルでの内部抵抗	30m 以下	16m	200%	
ハーフセルでの容量維持率	90%以上 (100 サイクル目)	99%を達成	110%	
フルセルでの容量維持率	90%以上 (100 サイクル目)	94%を達成	104%	
高電圧動作のメカニズム解析	— (当初目標になし)	正極界面の抵抗上昇を防ぐことがわかった。		
フッ素系電解液での発熱量低減	— (当初目標になし)	フッ素系電解液では発熱低減ができることがわかった。		

### <成果 1 >

(内容) 「耐電圧が高くかつイオン電導度の高い電解液の創成」

既存電解液はイオンを乖離させる高誘電溶媒、粘度を低減する低誘電溶媒の組み合わせからなる。よって、我々もこの 2 種の溶媒について各種候補化合物の分子軌道計算による絞り込み、実際の合成を行い、その LSV を確認した。

以上の検討をもとに、創製したフッ素化合物を含む電解液について、LSV 測定を行った結果である。いずれの含フッ素溶媒を適用した場合、6.5 V vs. Li/Li<sup>+</sup>から分解に伴う酸化電流が観測され、これは一般的な有機溶媒系電解液よりも 1 V ほど高い。つまり含フッ素溶媒を用い得ることで、電解液の耐電圧が高くなったといえる。さらに実用電池を想定し、NMC 正極上での耐電圧特性を、4.6 V vs. Li/Li<sup>+</sup>でのフロートテストにより評価を行ったところ、酸化分解に起因するリーク電流が非常に小さく、非常に安定であることも確認できた。一方で、1 mS/cm 以上の目標に対し、フッ素化合物 D2 を含む電解液で、そのイオン伝導度が 9 mS/cm を達成し、既存の電解液と遜色ない高い性能を示すことを見いだした。

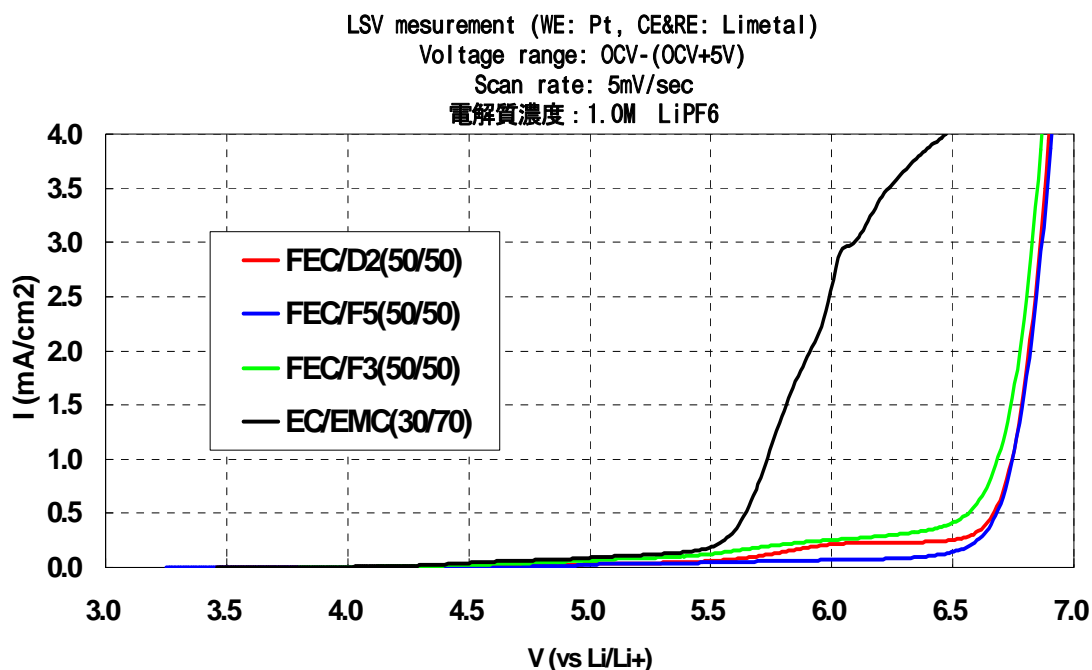


図 .2.4.24-1 リチウム塩を含む創製した電解液についての LSV 測定結果

(達成度) ◎

(成果の意義) 耐電圧が高くかつイオン電導度が高い電解液組成はこれまでない。それを創成できた。

(課題と取り組み) 分子計算から適切と思われるフッ素化合物を設計しそれを合成した。その基礎特性を調べさらには電解液にあうよう混合することにより上記目標値を達成できる電解液の創成に成功した。

<成果2>

(内容) 「高電圧動作下のサイクルで 90%以上の容量維持率の発現」

実電池を想定し、種々の正極材料に対し、含フッ素溶媒を適用した際のサイクル安定性の評価を行った。充放電試験の結果より、一般的な有機電解液の場合では、電解液の分解やガス、分解生成物の影響により、サイクルに対して容量が減少するが、一方で含フッ素溶媒系では内部抵抗はほとんど増加していなかった。これは<成果1>の耐酸化性の向上に因るところが大きいと言える。図2は代表的な層状3元系正極  $\text{Li}(\text{NiCoAl})_{1/3}\text{O}_2$  (NCA)上での充放電サイクル中における容量の推移を示したものである。含フッ素溶媒系では、100サイクルでの容量保持率(初回サイクルを基準)はおおよそ92%であり、従来の電解液系に比べて、安定な充放電作動が実現できると言える。

NCAと同様に、さらに高電圧作動を目指し、 $\text{LiMn}_{1.5}\text{Ni}_{10.5}\text{O}_4$  (LMNO)正極について、含フッ素溶媒系電解液適用の効果を確かめた。LMNOを用いた5Vでのハーフセルサイクルでは高い電圧下にも関わらず、標準電解液、フッ素系電解液ともに充電時の内部抵抗上昇はみられず、100サイクルでも容量を維持していることがわかった。フッ素系電解液を用いた場合の100サ

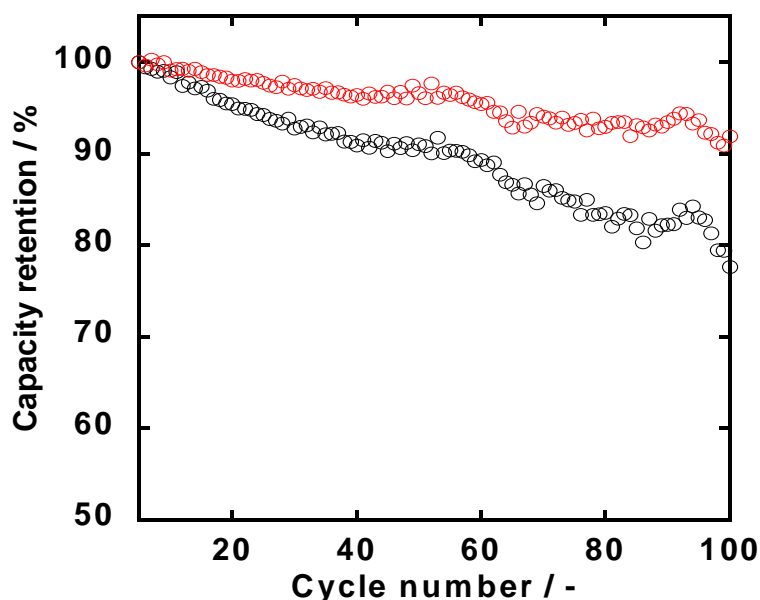


イクル後の容量維持率は 99% と極めて優れた容量維持率を示した。

以上のとおり、含フッ素溶媒系の優れたサイクル安定性について、交流インピーダンス試験により、正極表面での低い界面抵抗であることが特徴であった。

含フッ素溶媒系電解液の高耐電圧特性について、そのメカニズムの検証も行い、特に交流インピーダンス法などから、正極での界面抵抗上昇が高電圧動作時におこることによりリチウムの挿入／脱離が阻害されていることが分かった。一方、フッ素系電解液では正極／電解液の界面抵抗の上昇がみられないためリチウムの挿入／脱離反応を維持できることが明らかとなった。つまり、フッ素系電解液では正極の界面抵抗の上昇を防ぐ働きをもつ、つまりは正極表面に保護膜ないしはそれに似た作用をもつものを形成するため高電圧動作でも安定な動作ができることがわかった。

## 容量保持率



図Ⅲ.2.4.25-2 NCA を用いた 4.5V-3.0V ハーフセルサイクルの容量維持率  
(赤丸：フッ素系電解液、黒丸：標準電解液)

(達成度) ○

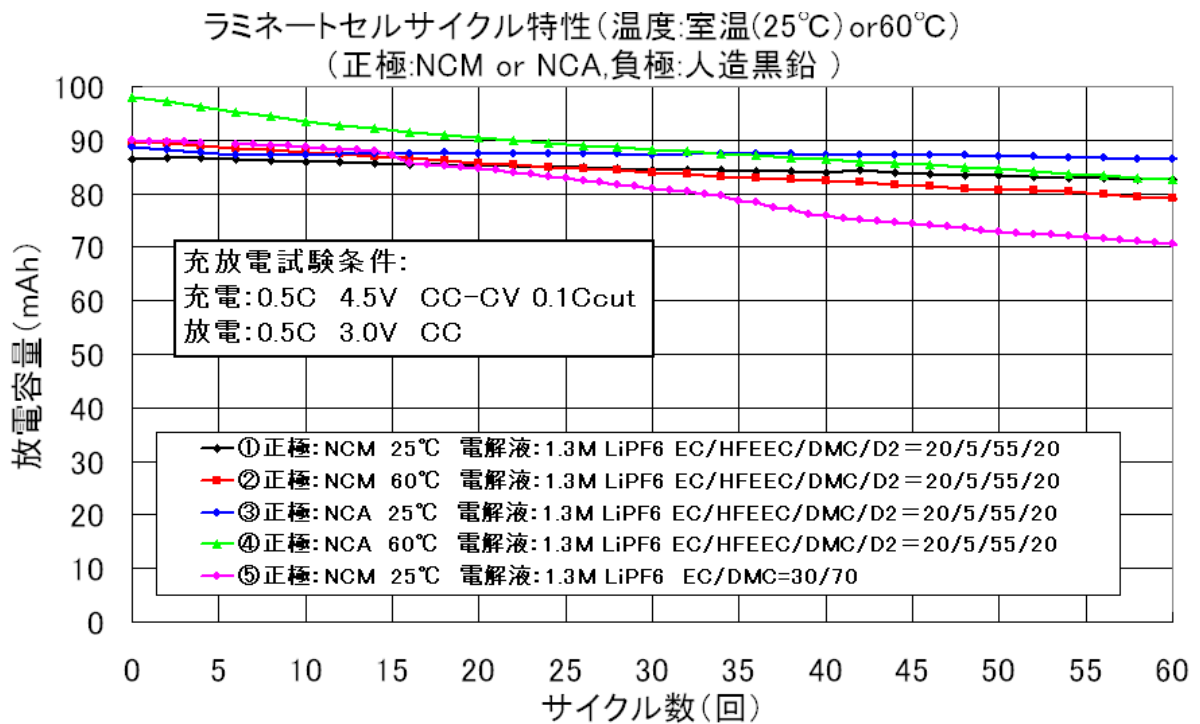
(成果の意義) これまで 4.5V 以上の高電圧サイクルでは電解液の分解により既存電圧系 (4.2V) 同等のサイクル特性を得ることができなかつた。電解液の耐電圧をあげ高電圧下での分解を抑制することにより、4.5V 以上の動作でも既存系同等のサイクル特性を得ることができた。

(課題と取り組み) 成果 1 で創成した電解液を各種の正極に適用しその特性をみた。ハーフセルでは耐電圧が高くイオン電導度が高ければ十分な容量維持率を示した。フルセルでは正極の種類によって挙動が異なる。ハーフセル同様に耐電圧が高くイオン電導度が高ければ十分な容量維持率を示すものもあれば、まったくハーフセルと異なる挙動を示す系もあった。その場合は成果 1 で開発した化合物を用いその組成比を諸種変更することでフルセルでも十分な容量維持率を得られるように改良することができた。

<成果3> 「フルセルでのサイクルで90%以上の容量維持率の発現」

次にハーフセルテストのデータを反映し、層状NCA、NMC(Li(NiMnCo)<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub>)あるいはLMNOを正極に、人造黒鉛を負極に用い、フッ素系電解液を適用したモデルセルを構築し、4.5Vあるいは5Vでの充放電試験を行った。

NCA正極100サイクルでの容量維持率は58%であった。一方、フッ素系電解液の場合、充電時の内部抵抗は変わっていないが特に初期に容量の低下がみられ、かつ100サイクルでの容量維持率は90%であった。室温だけではなく、60度環境下においても含フッ素溶媒系は高いサイクル安定性を示した。(図3)NMC正極においても同様の効果が見られ、含フッ素溶媒系電解液の有効性が確認できた。



図III.2.4.24-3 NCA、NMCを正極に用い人造黒鉛を負極に用いての4.5Vフルセルサイクル

①～④はフッ素系電解液、⑤は標準電解液

NCAおよびNMC正極に加えて、LMNO正極に対しても同様の評価を行ったところ、負極側での劣化を抑制する添加剤の工夫により100サイクルで94%の容量保持率を達成し、含フッ素溶媒系電解液利用による5V級リチウムイオン電池への可能性が大いに見いだすことが出来た。

## (7) 知的財産権等

本プロジェクトの知的財産権等の件数を表 .2.4.24-3 に示す。

表 .2.4.24-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願						
うち、外国出願						
国内登録						
海外登録						
論文				1	1	2
うち、査読付き論文				1	1	2
研究発表・講演			4	5	6	15
受賞実績						
新聞・雑誌等への掲載				2		2
展示会への出展				1	1	2
合計			4	10	9	23

## (8) 今後の課題と課題解決の見通し

今後の課題であるが、本委託研究で設定した目標値はすべてクリアできたため本委託研究で設定した範囲内での残課題はない。

成果の実用化に向けては大きく2つの点が重要となると考える。

電池評価の深化による実用上重要な他項目での課題だし

実用化のためには本PJで設定した目標であるサイクルのみならず、高温保存、ガス、低温特性、レート特性、安全性試験といった様々な項目について評価し課題があるのであれば解決していく必要がある。これらの課題の洗い出しのためにはまずラミネートセルレベルの評価でさまざまな項目/条件での試験を行い、既存系に比べての課題を明確にしていく。

高電圧動作のメカニズム解析の深化

高電圧動作の場合正極界面での正極と電解液の反応をいかに抑制することができるか、がポイントとなると考えられる。ただ、負極界面での電解液/負極の作用メカニズムはこれまで京都大学など様々な研究機関で検討され論文/発表など研究蓄積が多い。一方正極界面、特に高電圧での正極界面での電解液/正極の作用メカニズムはまだ明確ではない。本PJではその一部を明らかにしたが、今後さらに深化させることにより不具合が出た場合の改良、より優れた高電圧系電解液の創成につなげることができる。

## (9) 成果の実用化/活用

本研究の成果を高電圧系電解液の販売につなげていきたい。具体的には小型化要求が高い大型電池への適用を目指す。高電圧正極はさまざまに開発されているが、それに見合う高電圧電解液の開発は遅れている。本委託研究で示したとおり、高電圧電解液としてはフッ素系電解液が現時点では最も可能性があると思われる。一方、上記課題に記したように高電圧電池自身にはまだまだ不明点、課題も多いと思われる。その課題の洗い出しをまず行い、メカニズム解析

と合わせ改良していくことが必要となると思われる。本委託研究では電解液のみからのアプローチとなったが、メカニズム解析を進めていけば正極の改良ポイント、セパレータの改良ポイントなども明確になっていき、高電圧電池の実現を早めることができると考える。高電圧電池は正極の利用率を向上させるためコストダウンメリットも大きく競争力のある電池系となる。今後さらに技術を深化させることで高電圧電池の早期の実現に寄与したい。

#### (10) その他

リチウムイオン電池の課題は大きく、エネルギー密度向上/コストダウンであるが、高電圧動作はその2つを解決できる技術である。上記課題に対しては正極の開発、高容量負極の開発が広く行われているが高電圧に必要な電解液の開発はあまりなされていない。今後高電圧電池の実現にむけては高電圧電解液の開発がキーとなると考える。

## 2. 5 基盤技術開発

### 2. 5. 1 次世代自動車用高性能蓄電池基盤技術の研究開発

(電力中央研究所、産業技術総合研究所、日本自動車研究所、東北大学)

#### (1) 事業目的

「次世代自動車」の普及促進においては、蓄電池の高性能化が不可欠である。特に、出力性能・エネルギー密度・耐久性など格段の向上が求められる。また、自動車分野などでの高性能蓄電池の実用化・普及促進にあたっては、走行時ならびに長期保管時の安全性を確保するとともに研究開発の効率化を図りながら、標準化・規格化を進めて、市場を形成することが重要である。そこで、基盤技術開発では、蓄電池における寿命予測、耐久性、安全性試験方法の確立や標準化、技術開発の効率化につながる電池性能を向上させる因子の解明や反応メカニズムの解析手法の確立等、基盤的な技術開発を行う。さらに、それらの標準化・規格化に資することを目的とする。

#### (2) 事業概要

NEDOプロジェクト「燃料電池自動車等リチウム電池技術開発(H14-H18年度)」において、ハイブリッド自動車用リチウムイオン二次電池に関する基盤技術開発に経験のある電力中央研究所(電中研)、産業技術総合研究所(産総研 or, AIST)が参画した。すなわち、蓄電池における寿命予測、耐久性や技術開発の効率化につながる電池性能を向上させる因子の解明や反応メカニズムの解析手法の確立等についての必要な一定の技術を有している。加えて、自動車についての安全性試験や標準化・規格化についての必要な一定の技術を有する日本自動車研究所(JARI)が参画した。さらに電池材料に対して高度な解析技術を有する東北大学が参画した。また、東北大学の再委託先として北海道大学が、日本自動車研究所の再委託先として早稲田大学が参画した。

研究テーマとしては、電中研は「次世代自動車用高性能蓄電池基盤技術の研究開発(電池性能評価手法の開発)」、産総研は「次世代自動車用高性能蓄電池基盤技術の研究開発(劣化解析・抑制手法の開発)」、JARIは「次世代自動車用高性能蓄電池基盤技術の研究開発(試験方法の標準化・規格化の検討)」、東北大学は「次世代自動車用高性能蓄電池基盤技術の研究開発(リチウム電池劣化機構解明のためのin situ 分光法の開発)」のテーマで研究開発を実施した。基盤技術開発における研究開発項目と四法人の分担を図 2.5.1-0に示す。

平成21年度(中間評価時点)までには、リチウムイオン電池の加速寿命試験方法に資する運転パターンの検討、電池モジュール開発を担当している要素技術開発の3グループ(「要素技術開発(電池開発)」)から提供を受けた試作電池の劣化要因の解明と抑制方法の検討、電池評価試験方法、電池安全性試験方法の開発、車載用リチウムイオン電池の国際標準化のためのIEC(国際標準電気会議)・ISO(国際標準化機構)等への提案、リチウムイオン電池の輸送に関する国際規制の緩和、電池充電標準化に関する検討を実施した。平成23年度(最終目標)までには、リチウムイオン電池の加速寿命試験方法に資する運転パターンの策定、要素技術開発(電池開発)から提供された試作電池の劣化機構の解明と抑制方法の提案、電池評価試験方法、電池安全性試験方法の策定、車載用リチウムイオン電池の国際標準化のためのIEC等への提案反映、リチウムイオン電池の輸送に関する国際規制の緩和の実現、電池充電標準化に関するIEC等への提案を実施することで、開発目標(最終目標)を達成する。

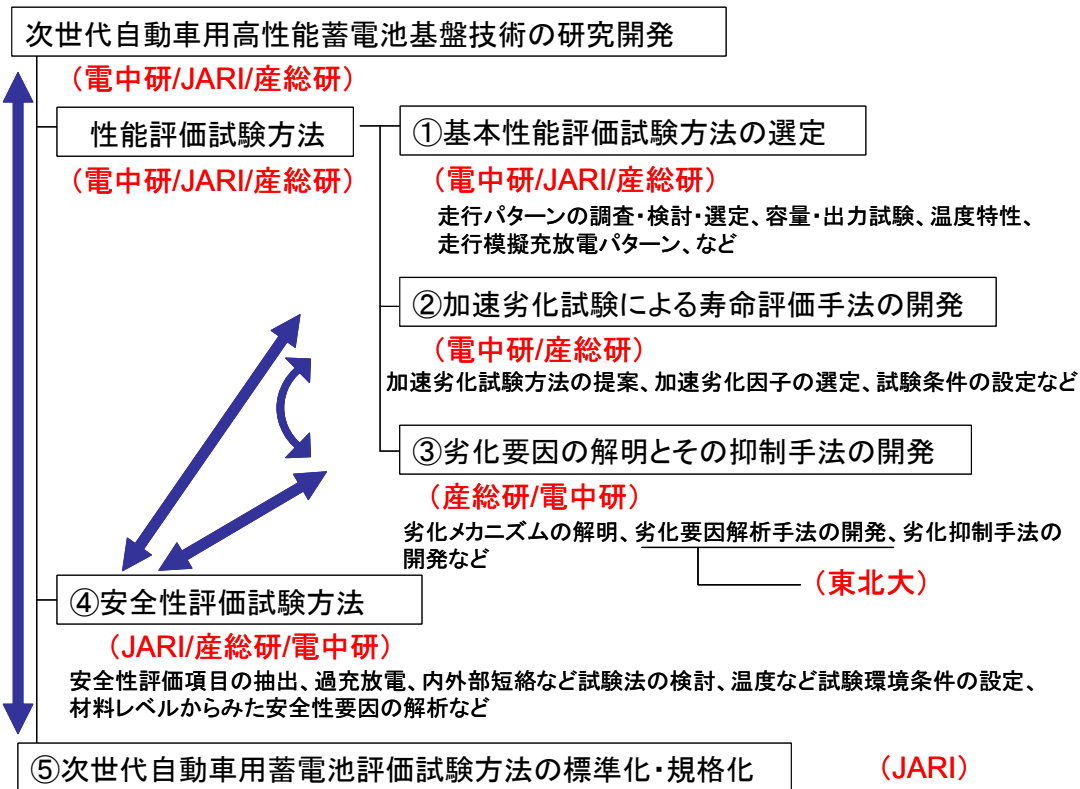


図 .2.5.1-0 研究開発テーマと実施概要

(3) 研究開発の実施スケジュールと予算

表 .2.5.1-1 主な実施項目と開発費用

主な実施項目	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	
性能評価試験方法	→	→	→	→	→	
寿命評価手法	→	→	→	→	→	
劣化要因解明・抑制	→	→	→	→	→	
安全性評価試験方法	→	→	→	→	→	
標準化・規格化	→	→	→	→	→	→
開発費用（百万円）	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	総額
電力中央研究所	175.2	205.4	147.4	174.0	65.0	767.0
産業技術総合研究所	98.2	237.6	149.7	147.0	94.5	726.9
日本自動車研究所	92.2	206.9	214.1	175.5	178.5	867.1
東北大学	21.0	44.1	26.7	25.0	25.0	141.8

#### (4) 研究開発の実施体制

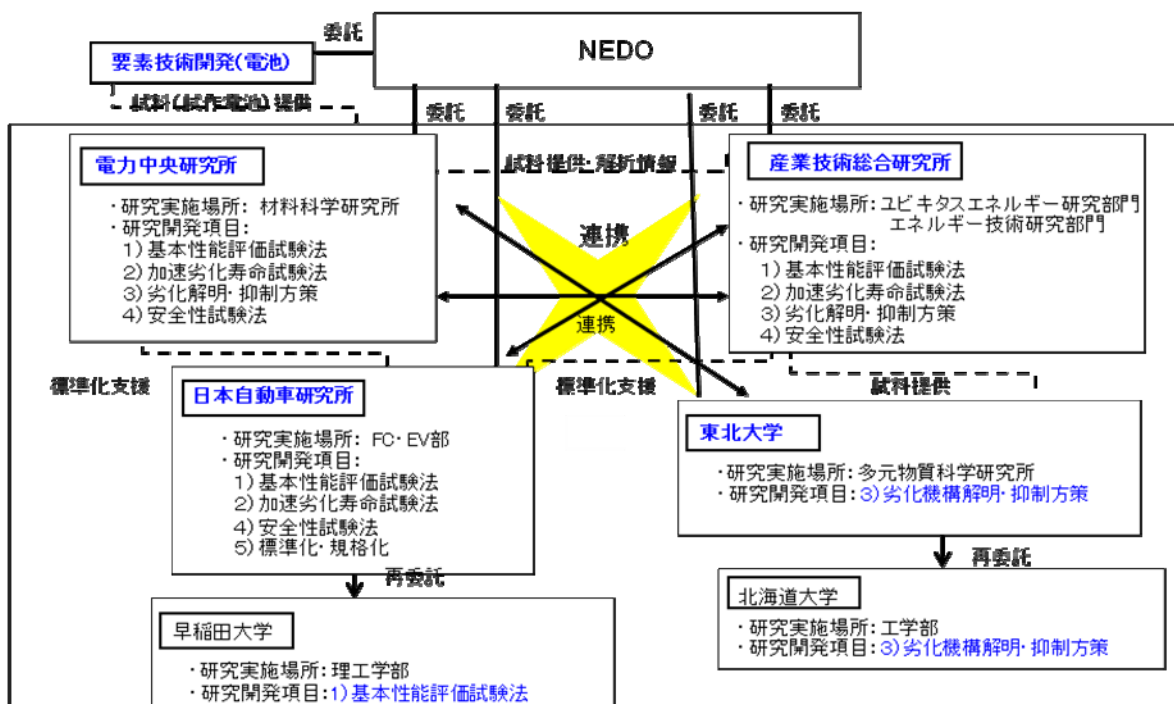


図 .2.5.1-1 研究開発の実施体制

#### (5) 研究開発目標と根拠

##### (5. 1) 電池性能評価手法の開発 (電力中央研究所)

###### (a) 中間目標

- ・「要素技術開発」電池開発目標の評価項目・試験条件の選定と検証。試作実規模セルデータの収集・提示する。
- ・試験期間 (2 倍以上) 短縮で寿命予測する加速劣化試験条件の選定・試験
- ・産総研の小容量セル劣化解析に基づく加速試験条件の見直し
- ・実規模セルを想定した単電池の安全性評価試験法の作成

###### (想定根拠・条件)

- ・基本計画に定められた開発目標の測定条件を提示することで、本事業の円滑な要素技術開発 (電池) の推進が図られる。さらに、開発途上の試作実規模セルの社外データを提供することよりの開発・改良指針の蓄積が図られる。また、適正な温度範囲の常温 (25 ) に対する加速劣化の温度効果と保存時の充電状態 (SOC) の条件を把握し、さらなる加速条件検討の基礎データとする。民生用小型電池に比べて、保有エネルギー量の大きい実規模セルに適した試験項目・条件を提案し、電池安全対策の一助とする。

###### (b) 最終目標

- ・基本性能評価試験方法の提案
- ・5 倍以上の期間短縮で寿命予測が可能な加速劣化試験方法の提案
- ・「劣化要因の解明」成果の寿命評価手法への反映  
正極粒子表面での Li 欠乏層形成が要因ならば、劣化曲線はルート則近似が可能

- ・実規模セル（劣化）の安全性確認方法の作成

（想定根拠・条件）

- ・基本性能評価試験方法を明示することにより、公正な開発電池の尺度設定が可能となり、電池開発等の開発目標達成度を明確にできる。10年寿命の試作電池を2カ年間の試験期間で、寿命見極めが早期に可能となり、円滑な電池開発の指針となる。電池劣化要因の解明により、電池劣化モデルの作成・性能劣化推定の仮説から客観的なデータ解析が導出可能になる。また、定量的な判断の難しい電池熱暴走を劣化電池と新品と比較することにより、使用期間における電池システム安全対策の精度が高められる。

#### （5. 2）劣化解析・抑制手法の開発（産業技術総合研究所）

##### （a）中間目標

- ・小容量セルを用いた加速劣化試験のサイクルパターンを作成する。
- ・小容量セルでの各試験条件での各電池構成材料の電池劣化に関わる因子の中から、プラグインハイブリッド自動車（PHEV）を模擬した試験条件下で電池劣化の主要過程を引き起こす劣化因子（劣化要因）を選定する。また、保存時の劣化反応の反応速度式を求める。
- ・3種類程度の電池系について電池構成材料の濫用時における安全性を評価するとともに、電池レベルで実施すべき安全性試験項目の試験を3種類程度の電池系の小容量セルにて実施し、JARI、電中研と共同で電池レベルおよびモジュールレベルでの次世代自動車用蓄電池安全性評価試験方法を提案する。

（想定根拠・条件）

- ・先行的に小容量セルでの加速劣化試験を行うことで実規模セル試験に資する。また、小容量セルにて加速パターンを作成できれば、実規模セルに適用可能な加速条件を見出すことが期待できる
- ・保存時の劣化反応の反応速度式のような定量的知見や小容量セルと実規模セルとの相関が、劣化機構に見いだせれば試験業務の徹底的な省力化・低コスト化が可能となり、本事業推進にも貢献できる。
- ・電池材料レベルでの安全面での知見は部材メーカー・電池メーカー以外には乏しく、電池使用者の立場からも重要な情報であり、また、その入手には手間・実験など際限なく費用や時間を要することがありうる情報である。本事業で最低限として実施すべき安全性試験項目の選定に寄与できる。

##### （b）最終目標

- ・電極材料の表面修飾等によりプラグインハイブリッド自動車を模擬した試験条件下での10年の寿命を見通せる電池特性の劣化を抑制する手法を開発する。また、その効果を劣化要因の視点から定量的なモデルで示す。
- ・次世代自動車用蓄電池として想定される5種類以上の電池系について材料レベルから濫用時の安全性を評価するとともに、代表的な電池系における安全性要因を解明する。また、JARI、電中研と共同で次世代自動車用蓄電池安全性評価試験方法を検証する。

（想定根拠・条件）

- ・プラグインハイブリッド自動車用電池の劣化メカニズムを材料の観点から示し、新規な用



途の材料について生じる劣化のモデルを提供する。これにより、電池特性の劣化を抑制する手法についての知見を提供し電池事業における材料開発を促進する

- ・電池材料レベルでの安全面での知見は部材メーカ・電池メーカ以外には乏しく、電池使用者の立場からの MSDS（物質安全データシート）等の情報充実に繋がりうる。

#### （5. 3） 試験方法の標準化・規格化の検討（日本自動研究所）

##### （a） 中間目標

- ・電池の基本性能評価に必要な用語を定義する。
- ・PHEV、ハイブリッド自動車（HEV）および電気自動車（BEV）（以下、各電動車両）について、種々の走行条件における蓄電池運用条件を調査する。
- ・各電動車両について、蓄電池試験条件二次案を作成する
- ・蓄電池および蓄電池の車両搭載時の安全性評価試験内容を整理する
- ・過充電、過放電、外部短絡、貫通、圧壊、振動、類焼、熱衝撃、衝撃試験等の検証を行う
- ・過充電、過放電、貫通、圧壊、熱衝撃、衝撃試験等の試験方法の作成
- ・「ISO12405-1 DIS」等の IS 成立

##### （想定根拠・条件）

電池用語の統一を図り円滑な試験実施に資する。車両搭載するための電池運用条件は性能把握に必須の調査項目となり、簡易な充放電プロファイルを作成することは電池試験設備や試験経費節約にも肝要である。安全性評価は多角的な検討と条件の具体化が必要である。

##### （b） 最終目標

- ・各電動車両について、車両走行時の代表的な蓄電池運用条件を抽出する
- ・定義した用語と、作成した蓄電池試験条件を IEC/ISO へ反映させる
- ・作成した安全性評価試験方法を IEC/ISO へ反映させる
- ・「ISO12405-1 DIS , IEC61982-4,-5 CDV」等の IS 成立
- ・国連輸送規程の適正化

##### （想定根拠・条件）

代表的な国際標準・規格である IEC（国際電気会議）ISO（国際標準機構）に反映は、世界市場の形成・進出を目指すためには、必須の条件である。国連危険物輸送小委員会では規程の2年ごとの見直しがあるため、2008年勧告にて適正化を進めた。

#### （5. 4） リチウム電池劣化機構解析のための in situ 分光法の開発（東北大学）

##### （a） 中間目標

- ・顕微分光法と NMR による電極・電解質および界面の劣化挙動解明：実電池材料を対象に、充放電による劣化過程での活物質、電解液、界面でのマイクロ構造変化を検出し、劣化機構解明と劣化検出技術を確立する。
- ・アコースティックエミッション（AE）法による電極破壊機構の解明：AE ライブラリの完成とそれを用いた劣化予測手法の提案。
- ・和周波（SFG）分光法による電極・電解質界面の構造変化測定：実電池系に近い材料につ

いて表面構造変化と劣化挙動との相関を明らかにする。

(想定根拠・条件)

本事業開始時点では、「in situ 分光法の開発」における手法のほとんどが電池材料に適用することが困難、あるいは全く前例がないレベルからの新規分光法（機器分析）による挑戦であり、ユニークな情報を取り出せる可能性が高いと期待できる。

(b) 最終目標

- 複数の in situ 顕微分光手法による実電池材料における劣化挙動を検出する新しい計測技術確立

- AE 信号を用いた劣化予測手法を実際の自動車用ハイパワー電池へ適用

- In situ SFG 測定システムの顕微化を進め、1 μm 程度の空間分解能を持って活物質・電解液界面での生成物や構造変化を検出し、劣化挙動との関係をよりマイクロに解明

(想定根拠・条件)

- 電池構成材料・電池に対する分析ツールとして多様性を増すことにより、ユニークな情報を取り出せる可能性が高いと期待できる

## (6) 研究開発成果

表 .2.5.1-2 基盤技術開発 研究成果 (一覧)

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
基本性能試験法の選定	開発電池 (要素技術開発) 目標達成度の把握	3 種類の 2011 年度供試セル・モジュールのエネルギー密度・出力密度等の中立的把握		参考試験項目を提案・測定
加速劣化試験による寿命評価手法	加速寿命診断法の確立 (5 倍加速)	充放電プロファイル提案とサイクル・保存試験からの外挿法寿命推定		2009 年供試セル寿命判定
劣化要因の解明とその抑制手法	劣化要因の解明とその抑制手法の提案	高 SOC 保存時、高温保存時、高出力時、長期サイクル時等の各種劣化要因推定 (劣化モデル提案) と新奇 in situ 分光法の進展と、電池性能を向上させる一因子 (粒子表面修飾) の解明		電池系の劣化を解析する新奇ツールとして、放射光施設を用いた分光法や in situ の分析手法を確立した。多様な分析手法は電池の劣化解析技術の発展寄与
安全性評価試験方法	車載用電池安全性試験法の策定	開発電池 (要素技術開発) の試験条件を統一化。試験条件を詳細に比較検討しデータ蓄積		未制定の試験項目・条件を詳細に検討し知見蓄積

次世代自動車用蓄電池評価試験方法の標準化・規格化	IEC/ISO 制定、国連輸送規格の適正化	IEC62660-1,2 など日本新規提案で制定。その他 IEC や ISO 制定の国際活動に対応。日本の知見を国連各国 2008 年適正化に反映。	本事業期間に、数多くの試験方法・製品規格等に適切に対応。今後も実用化進展に伴う本活動の強化必須
--------------------------	-----------------------	--	---

#### <成果 1> 基本性能評価試験方法の選定

(内容) プラグインハイブリッド自動車に搭載するリチウムイオン電池を想定した電池要求性能から、「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発／要素技術開発（電池）」の開発目標項目に対応する試験項目・条件・手順を定め、試験方法の選定提案を行った。特に、自動車走行パターン（JC08 など）の解析に基づき、一日の車両行程を反映した充放電プロファイル（P-CLT）を用いた耐久性（寿命）評価方法を提案した。

(達成度) ◎

(成果の意義)

IEC62660-1「Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles –Part 1: Performance testing」に準じた試験項目と条件となった。用語(案)も和文/英文を含めて提案できた。これにより、Li-EAD プロジェクトにおける要素技術開発（電池開発）で試作された開発電池・モジュールを、社内試験データとあるいは基盤技術開発での試験データとして報告を共通化できる。さらに、試験法の改訂や新規提案に対しても、台上試験やシミュレーション計算をもとに電池充放電プロファイルを合理的に創製するノウハウの蓄積を行っており、次世代自動車関連の継続的な標準化・規格化を支援する基盤的知見の蓄積ができたと見なせる。

(課題と取り組み)

簡潔に試験できるように、一部の試験条件など修正を加える必要があるかとも見なせるデータが一部の試作セルに適用した場合に、認識されており製造メーカーへの浸透が必要であろう。

#### <成果 2> 加速劣化試験による寿命評価手法の開発

(内容) 電池の SOC と電池周囲温度の条件を異なえた保存試験を各種試験セルに適用し加速因子としての効果をそれぞれの試験セルについて考察した。一方、自動車走行パターンの想定に基づく P-CLT 連続充放電試験を行った。

この結果をもとに、P-HEV モデル車両を想定して規定した単電池（セル）レベルでの寿命到達判定基準に対して、2009 年度時点での「要素技術開発（電池開発）」試作セルでは、開発目標が期待できる電池系は 1 種類と判定した。ただし、適正な SOC 管理や電池温度制御などにより、寿命延伸が期待できる。なお、本 P-CLT を用いた加速寿命試験は要素技術開発（電池開発）各社の 2011 年度開発セルの寿命推定のため自社試験にも採用された。

(達成度) ○

(成果の意義) 2年間で10年寿命を推定する確約は取れないものの、寿命範囲では“突然死”にいたるセルデータは皆無であり、継続的試験の傾向を外挿法で推定することにより誤差をある幅で推定できる見込みを得た。また、要素技術開発(電池開発)各社へ定期的なデータ報告を行うことで、開発電池の改良方針の策定に貢献した。

(課題と取り組み) 精度を高めつつ、如何なる電池系に適用することが可能であるか。また、電池加速寿命試験としては、10年寿命の電池を5倍加速して2年間の試験期間で正確に寿命推定を行うには、電池バラつきなども考慮して、ある程度の規格生産品について再度検討を行う必要があると判断した。

### <成果3>劣化要因の解明とその抑制手法の開発

(内容) 電池系の劣化を解析する新奇ツールとして、放射光施設を用いた分光法や *in situ* の分析手法を確立した。電池を非破壊で評価する交流インピーダンス法に加えて、モデル系に適用した基礎的な手法を含め本事業で開発した多様な分析手法は電池の劣化解析技術を大きく発展させた。多くの条件下での電池材料の分析によって、電極の劣化モデルを正極・負極に対して提案した(図 .2.5.1-2-2)。一方、*in situ* 観察法を電池材料に適用させる試みでは、モデルセルについて、基礎的な知見を得ることができた。これにより既存の機器分析法から得られる知見と合わせ、さらなる多角的な材料構造・変質の解析が可能になった。

また、電池劣化に対する抑制手法は、電池開発メーカーにて種々の技術開発・材料開発が続けられている。本事業においては活物質粒子の表面被覆相をメカノケミカル法により形成することで劣化抑制の見通しを得た。

(達成度) ○

(成果の意義) 多様な分析手法は電池の劣化解析技術の発展に寄与する。目立たない技術開発といえるが、電極材料の機器分析で測定するまえの準備作業、すなわち、前処理段階で試料に対して不活性な雰囲気を保持したままで保管・輸送・装置へ導入・分析が可能になったことは、大きな進歩と考えられる。これらは、*in situ* 観測法と併せて多様なリチウムイオン電池材料の構造解析・劣化機構解明にとって強力な武器となると期待できる。

(課題と取り組み)

新奇な手法として基礎は確立したが、定量的な知見は不足しており、さらに、多くの改良・データ蓄積が必要である。

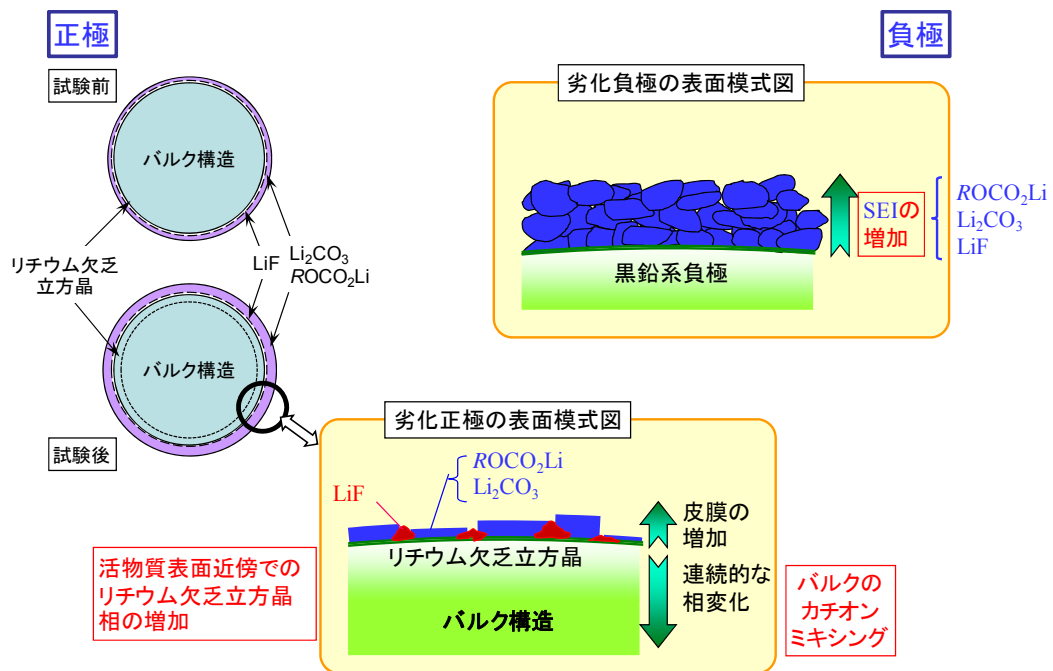


図 .2.5.1-2-1 電池内部で生じている劣化の模式図

#### < 成果 4 > 安全性評価試験方法

(内容) 次世代自動車用蓄電池に対して、基本的に必要な安全性評価試験方法の提案を行った。すなわち、車両搭載時を想定した安全評価項目について、規格化、標準化されている民生用および電動車両用蓄電池の安全性評価試験方法を調査、整理して次世代自動車用蓄電池で実施すべき項目を抽出し、安全性評価試験の実施および試験方法の提案につなげた。また、自動車の使用状態を想定し、各種試験の試験条件に適用しながら種々の実規模セルやモジュールを使用して計18項目の安全性評価試験を実施し、標準試験法に対する試験条件の見直し案や新たな試験法の必要性を検討するとともに、要素技術開発（電池開発）の開発したリチウムイオン電池の安全性評価方法を提案した。さらに、車両火災試験で得られたデータをもとに、車両火災時の安全性確保の必要性を検討した。

一方、劣化後の実規模セルの安全性評価として実規模セル「強制破壊試験」を実施した。供試セルとして、初期状態のセルと、サイクル試験等により容量80-90%に低下した劣化セルとを用いて、両者の半定量的な潜在エネルギー量の比較を行った。結果として、初期状態セルと比較して、劣化セルでは破壊時における反応容器内圧力上昇速度や温度上昇が穏やかになる傾向が認められた。

材料レベルからの安全性要因の解明のため、AIST試作小容量セルについて、加熱試験過程での交流インピーダンス測定を実施した。等価回路各成分およびインピーダンスの位相成分と温度との相関について解析を進めた。さらに、AIST小容量セルにて熱衝撃試験を実施した。並行して、濫用時における発生ガスの採取・分析を試みるとともに、ガス成分と試験条件との関係を整理した。

なお、各種の検討の結果、車載用電池としての開発目標の達成指標として要素技術開発（電池開発）試作電池・モジュールに対する試験方法として提案した。本方法は共通する条件での、要素技術開発（電池開発）各社の自社試験として実施された。

(達成度) ○

(成果の意義) IEC62660-2「電動車両用リチウムイオン電池セルの信頼性・誤用試験方法」と ISO12405-1+2「電動車両用リチウムイオン電池パックおよびシステムの試験方法」に対応した試験条件を検討した。さらに未規定試験の知見・データを蓄積し将来の改訂に備えた。

(課題と取り組み) リチウムイオン電池の安全性は、その耐久性(寿命を含む)とコストと合わせて、自動車搭載電池の3大障壁と考えられる。電池内部には、燃焼の3要素、可燃物質、支燃物質および温度(上昇のもととなるエネルギー)が含まれている。本事業での強制破壊試験によっても明らかなように電池の状態、熱暴走のトリガー等を的確に行えば、急激なエネルギー放出が起こり、燃焼状態に至る。さらに、車両火災の延焼による搭載電池高温曝露の可能性もある。本事業では開発電池の試験項目とならなかったものの、将来の国際標準化・規格化に備えて実施した車両火災試験を行い多くの知見を得た。

表 2.5.1-2-3 要素技術開発(電池) 試作電池セル・モジュールに提案した安全性試験

電池モジュール				
項目	SOC	温度	ISO 12405-1 準拠	判定
結露試験 (信頼性)	50%	-	温度: 25℃⇔80℃ 湿度: 55~98%RH サイクル数: 5h×5 サイクル	外観上の顕著な変化が無く、以下 1, 2 を満たすこと
熱衝撃試験 (信頼性)	50%	-	温度: -40⇔85℃ サイクル数: -40℃1h, 85℃1h×5 サイクル	1. 試験後の絶縁抵抗が設計の範囲内であること
振動試験 (信頼性)	50%	RT	周波数: 5~200Hz ランダム波 試験時間: 21h×3 方向	2. 試験後の容量が定格容量の 50%以上であること
衝撃試験 (信頼性)	50%	RT	衝撃波形: 最大加速度 500m/s <sup>2</sup> , 持続時間 6ms 回数: 10 回×6 方向	

単セル				
項目	SOC	温度	IEC 62660-2 ed1.0 準拠	判定
圧壊試験 (濫用)	100%	RT	Φ150mm 半円筒治具使用 電圧 1/3 or 変形 15% or セル質量 1,000 倍まで	破裂, 発火なきこと
加熱試験 (濫用)	100%	-	オープン使用 昇温速度 5K/min で 130℃まで昇温, 130℃ 30min 保持	
外部短絡試験 (濫用)	100%	RT	短絡抵抗 5mΩ 以下 10 分維持	
過充電試験 (濫用)	100%	RT	1 I <sub>A</sub> で充電終止電圧 2 倍または SOC200%まで充電	
過放電試験 (濫用)	0%	RT	1 I <sub>A</sub> で 90 分放電	

#### <成果5> 次世代自動車用蓄電池評価試験方法の標準化・規格化

(内容) 本事業の開始時期と相俟って俄かに活発化した車両搭載リチウムイオン電池の国際標準化・基準化に対応するため、JARI事務局のもと、電池標準化WG、電池充電標準化WGおよび電池輸送WGを、自動車メーカー・電池メーカーおよび有識者等で組織した。その主要な成果は以下のとおりである。

日本から7件の国際新規提案を行い、全て新規プロジェクトとして承認された。内3件(IEC62660-1、IEC 62660-2、IEC 62196-2)はISとして発行され、その他(IEC 61851-23、IEC61851-24、IEC 62196-3 IEC/ISO PAS 16898)については概ね計画通りの進捗により順次発行予定である。

(達成度) ◎

(成果の意義) 上記の日本新規提案を含む計 20 件の国際規格審議に参加し、国際規格に日本案を反映させることで、自動車用電池及び充電関連分野における日本の国際競争力の強化に役立てた。この経験を生かし、IEC における国際議長職 2 件 ( IEC/TC21/JWG69 Li, IEC/TC21/JWG69 Pb-Ni) を含む計 7 件のプロジェクトにおいて議長国として活動し、自動車用電池・充電関連の国際規格審議における主導的立場を確保した。

(課題と取り組み) 例えば、時期尚早な寸法標準化による電池開発の阻害、各国規制への影響、日本の既存電池寸法の排除などを懸念させる ISO「自動車用リチウムイオン電池の寸法・用途・形状などの表記方法を統一」にも適切な対応が国際的には重要となってきた。

国際標準化・規格化の動きと次世代自動車開発・次世代自動車用電池開発の進捗とは必ずしも連動しないため、試験方法等に関する技術的な知見・知識の深層化を図ると共に、国際標準化活動のための日本としての組織的対応の確認や戦略ロードマップの作成など世界市場を牽引できるような活動を目指すべきである。同時に国際的な連携・協調も図りつつ進捗させる。

表 .2.5.1-2-4 ⑤次世代自動車用蓄電池評価試験方法の標準化・規格化の詳細

項目	目標値 (最終)	達成値	達成度	備考
IEC 62660-1	IS	IS		日本新規提案
IEC 62660-2	IS	IS		日本新規提案
ISO 12405-1	IS	IS		
ISO 12405-2	IS	IS(発行準備中)		
ISO 12405-3	CD	CD		
IEC 61982	FDIS	FDIS		改訂
IEC 62196-1	IS	IS		改訂
IEC 62196-2	IS	IS		日本新規提案
IEC 62196-3	CD	CD		日本新規提案
IEC 61851-1	IS	IS		改訂
IEC 61851-21	CD	CD		改訂
IEC 61851-22	CD	CD		改訂
IEC 61851-23	CD	CD		日本新規提案
IEC 61851-24	CD	CD		日本新規提案
ISO/IEC 15118-1	DIS/CDV	DIS/CDV		
ISO/IEC 15118-2	CD	CD		
ISO/IEC 15118-3	CD	CD		
IEC 61980-1	CD	WD		
ISO/IEC 16898	CD	CD		日・独新規提案
ISO 17409	WD	WD		
国連輸送規制の適正化	2008 年勧告に適正化反映	2008 年勧告に適正化反映		

WD (Working Draft 作業原案)

CD (Committee Draft 委員会原案)

DIS (Draft International Standard: ISO 国際規格案)/CVD(Committee Draft for Vote: IEC 投票用委員会原案)

FDIS (Final Draft International Standard 最終国際規格案)

IS (International Standard 国際規格)

(7) 知的財産権等

表 .2.5.1-3 知的財産権等 件数

知的財産権	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	計
特許出願	0	0	1	0	1	2
うち、外国出願	0	0	0	0	0	0
国内登録	0	0	0	0	0	0
海外登録	0	0	0	0	0	0
論文	0	2	17	12	14	45
うち、査読付き論文	0	0	9	5	8	22
研究発表・講演	3	33	52	45	43	176
受賞実績*	0	0	0	1	1	2
新聞・雑誌等への掲載	0	0	4	0	0	4
展示会への出展	0	0	0	0	1	1
規格・標準	0	0	0	3	3	6 <sup>a)</sup>
うち、日本提案	0	0	0	2	1	3 <sup>b)</sup>
合計	3	35	74	61	63	236

第15回 リチウム電池国際会議ポスター賞、第15回超イオン導電体物性研究会若手優秀発表賞

a)上記に加え、2012年度発行 2件、継続審議中 13件、b)上記に加え、継続審議中 4件

(8) 今後の課題と課題解決の見通し

経済産業省から公開されている各種審議会・研究会からの様々な報告書に今後の電池開発に関する分析・現状の問題点・提言などの記載がある。その中で本事業（Li-EAD）の位置づけとしては、2015年実用化に向けて次世代自動車（とくにプラグインハイブリッド自動車を想定した）高性能蓄電システム用を開発することを要素技術開発（電池開発）の主目的として、要素技術開発（材料開発）、要素技術開発（周辺機器）、次世代技術開発、および基盤技術開発のプロジェクトとして推進された。このなかでも基盤技術開発は要素技術開発(電池)と連携し試作電池の提供を受け、平成21年度および平成23年度には10Ah級電池(モジュール)としての客観的な立場から開発状況を把握した。基盤技術開発にて提案した性能試験方法・安全性試験方法はIEC/ISO標準の規格と矛盾のない試験方法であり、標準的な電池・電池材料評価に適用可能な方法であり開発目標を満足する水準に達している。基盤技術開発の最終的な「実用化」としては国際標準・規格の成立に本事業成果が反映されることにある。よって、日本自動車工業会や電池工業会などの協働作業としてJARIのワーキンググループにより、新たに規格化されたIEC/ISO成立に貢献したといえる。

今後の課題としては、本事業においても技術的に着手した未規定の標準化、例えば車両搭載電池システム試験法としての標準化・簡略化さらには改訂作業の技術的な基盤的実証的知見・情報を獲得整理していく必要があると展望できる。

実用化に対しては、野心的な目標を掲げて開始された本事業であり、並行して電気自動車の市場導入の開始（2009年～）、プラグインハイブリッド車の販売開始（2011年）など活発な電



動化の動きが出てきている。そのなかで一方、基礎的研究を重視する NEDO : RISING プロジェクト（2009 年度—2015 年度）や材料面での開発促進を目指す LIBTEC プロジェクトが進行中である。本基盤技術開発において確立された方法論・解析技術は使われることが将来的な展望として見通すことができると思われる。

寿命耐久性に関する知見は本事業成果では実用面で十分なレベルに到達したとは言い難い。実際に車両搭載される電池劣化と試験方法の相関類似性と相違性などデータ蓄積が必要である。自動車メーカ等の活動と連携し、場合によっては支援することで展望が開けると期待できる。

自動車用電池の分野では、特にドイツの国際提案への動きが早く、また、標準化への考え方が日本とは異なる場合が多い。各国の標準化動向を分析し、日本として特に重点を置くべきテーマについては後手に回ることのないよう、標準化ロードマップの作成と、それに基づく戦略的な国際提案を進めていく。

JARI 等における関連研究の成果と技術データを有効に活用し、国内での合意形成と国際規格への反映に向けて取り組みを強化する。

日本では、JARI の団体規格である JEVS（日本電動車両規格）を中心に EV 関連規格が整備され、前述の日本からの国際提案のベースとして活用された。今後、国際基準・規格との調和・整合性を前提に、関連国内規格の整備についても検討を進める。また、国際規格の国内への適用推進に取り組む。

## （9）成果の実用化／活用

電池材料または電池セル、モジュールに対して、標準的に適用可能な各種評価・解析方法を確立すること、さらには、確立された評価法を国際標準・規格に反映することが実用化イメージとなる。

基盤技術開発として、「実用化」の最終目的のひとつは、国際標準・規格化への成果の反映である。そのため、試験方法・手順を公開し、実データに基づくパラメータ設定の影響を明らかにしていく必要があり、NEDO蓄電技術開発平成21年度成果報告会の講演要旨集においては「次世代自動車用高性能蓄電池性能評価方法」を公開した。なお、NEDO蓄電技術開発平成20年度成果報告会にはリチウムイオン二次電池に関わる用語の定義を掲載した。最近、電動車両用のリチウムイオン二次電池に係わる国際標準・規格化の動きが活発化してきた。当基盤技術開発における活動により国際標準化電気会議（IEC）では日本主導での国際標準化を実現した

（IEC62660-1/2010-12 Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles –Part 1: Performance testing、IEC62660-2/2010-12 Part 2: Reliability and abuse testing）。また、国際標準化機構（ISO）においては、車両用のリチウムイオン二次電池の電池パック・電池システムに係わるISO12405-1/2011成立やISO12405-2、ISO12405-3の審議に深く関与してきた。一方では、国連危険物輸送規定の適正化に参画することでリチウムイオン二次電池搭載車両や電池輸送に関して貢献した。現在、世界的に先行している日本の電気自動車技術に加えて、リチウムイオン二次電池技術を世界市場に優位に展開する上で非常に有効な手段となることが期待できる。

#### (10) その他

- ・要素技術開発（電池開発）や次世代技術開発の進捗を把握するため、Li-EAD プロジェクトとして電池性能評価方法が用いられた。
- ・波及効果として要素技術開発（電池開発）にとって、基盤技術開発担当に提供を行った試作セルの試験経過に関して定期的な情報を入手できることにより、利用者（自動車メーカー）などに準じた試験項目（参考試験項目）実施など、自社データの継続的な取得の難しい条件でのデータが得られたため、電池開発の一助となった。
- ・要素技術開発（電池開発）との協働・連携の一環として、自社仕様の材料選択に基づく、小容量セル提供に加えて負極炭素材料を異なえた小容量セルの提供を受けて、AC インピーダンス解析法の検討を行うための実験的データを取得した。その成果は *Electrochemistry*,78(5),416-419 (2010) にて発表を行った。

以上

## ． 実用化・事業化の見通しについて

### 1. 実用化・事業化の見通しについて

#### 1. 1 要素技術開発（電池開発）

実用化・事業化の定義は、【開発した電池モジュールを製品化して自動車に搭載すること】とする

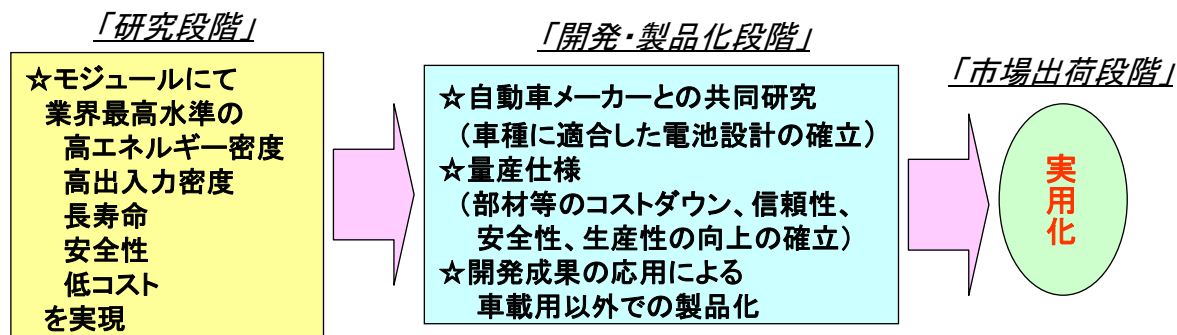
##### （1）成果の実用化可能性

単電池セルレベルおよびモジュールレベルにおいて、最終目標を達成した。本事業で得られた成果を基に、今後開発段階、製品化段階を経ることで、プラグインハイブリッド自動車用高性能リチウムイオン電池の実用化が見通せる。具体的には、開発した電池を実車に搭載した際の課題の抽出と対策、搭載車種に最適化したパック構成の検討、ならびに生産性や品質向上に向けた製造プロセス改善などが必要となる。また、今回実施した加速寿命評価試験に加えて、実動作条件における寿命データの蓄積も必要である。本開発の委託先は、ハイブリッド自動車または電気自動車用のリチウムイオン電池の供給において、自動車メーカーと関係を有していることから、事業化の見通しも期待できる。

##### （2）事業化までのシナリオ

自動車メーカーと共に開発車種の設計仕様に適合した電池を試作し実用的な条件での評価試験を積み重ねながら、電池構成材料や製造プロセスの検討を通じてコストダウンを実現し、且つ耐久性並びに安全性の確保を行うことが事業化への課題となる。表 -1 に事業化への年度展開例を示す。ステップ的には、本プロジェクト終了後研究段階から開発段階へシフトし、その後順次、製品化段階、市場出荷段階を経て実用化される。委託先では、小ロットでの電池の製品化時期として、平成 27～29 年頃を想定している。なお、開発段階以降では、他の企業との連携（共同研究・合弁事業等）が想定される。

図 -1 に実用化へのイメージ図を示す。



図IV-1 実用化・事業化へのイメージ図 要素技術開発（電池開発）

表 -1 実用化・事業化への年度計画例 要素技術開発（電池開発）

項目	～H21年度 (～FY2009)	～H23年度 (～FY2011)	～H25年度 (～FY2013)	～H27年度 (～FY2015)	～H30年度 (～FY2018)
研究段階					
開発段階					
製品化段階					
市場出荷段階					
他の企業との関係等 ライセンス・合弁等					

(注1) 研究段階：材料等要素技術研究（ラボスケール研究）段階、特許出願

(注2) 開発段階：製品化に向けた研究、量産化技術研究、無料サンプル提供

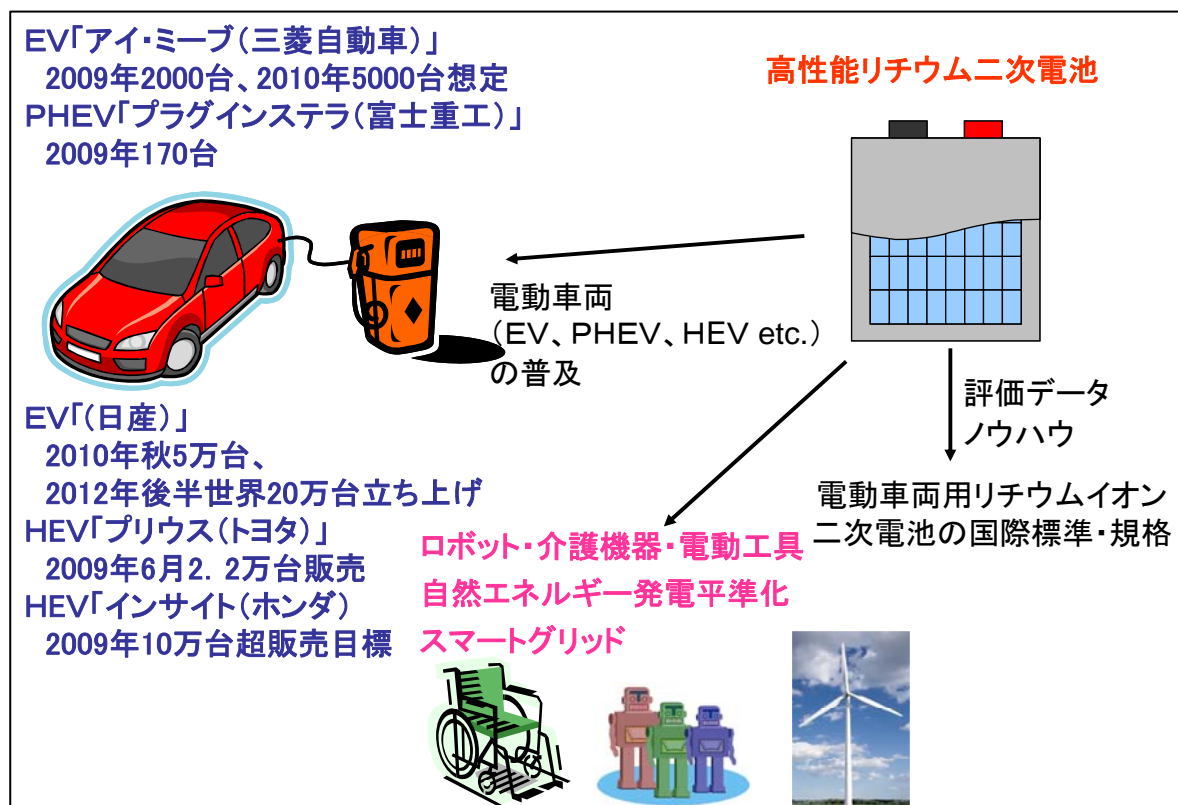
(注3) 製品化段階：量産化技術確立、量産設備投資検討段階、サンプル出荷

(注4) 市場出荷段階：製品の販売、損益分岐点を越える段階

(注5) 他の企業との関係（共同研究・合弁事業、ライセンス供与、アライアンス、販売提携等等）の計画

(3) 波及効果

本事業の対象製品（車載用電池）の事業化の他に、開発技術を構成する個別の要素技術（例えば、スタック化構造、制御用回路など）など、他用途向け電池に適用可能な技術は適宜採用される可能性がある。また、プラグインハイブリッド自動車等の本格的普及にともない、風力・



図IV-2 波及効果のイメージ

太陽光発電といったエネルギー源の多様化に資することができるだけでなく、本電池技術を応用し有効活用が進めば、軽量・コンパクトが要求される介護用機器・電動工具・ロボットなどの移動型電源やバックアップ電源用途など、結果的にマーケットが拡大し、さらなるコスト低減につながるという相乗効果も期待される。図IV-2に波及効果のイメージを示す。

## 1. 2 要素技術開発（電池構成材料）

実用化・事業化の定義は、【開発した電池材料をラミネートセルレベルの電池に適用し電池として製品化すること】とする。

### （1）成果の実用化可能性

正極材料、負極材料の実用化に際しては、開発材料のポテンシャルを十分に引き出し高い電池性能を達成する上で、電極材料に適した組成、粒径、前処理、電極層厚み等の情報を提供できる必要がある。また、これまでにない高容量の電池であるが故に、安全性に関する視点も求められる。更には、電池の基本設計や動作上の重要因子である負極／正極容量バランス比等の設計面の課題や、レート特性、寿命特性、信頼性等の電池基本性能についても、電池メーカー等のユーザが実用化を主導的に進める中で、材料メーカーも連携して開発を行う必要がある。一方で製造的な視点では、中・大型の電池試作などをユーザ側が効率的に進めるため新規材料の量産化や、ユーザ側の電池製造プロセスに適合するための例えば粉末物性面等の改良が求められる。

電解液については実用化のための課題として、低コスト化を視野に入れた合成ルート of 探索や精製技術の確立、実用レベルの電池異常に対応可能な安全性の確保、セルの大型化に伴い発生する熱や強度面の課題への適合性、開発したイオン液体等の電解液にマッチする電極やセパレータの選定、等が上げられる。

要素技術開発（電池構成材料）の7テーマは最終目標をおおむね達成している。電池メーカー／自動車メーカーである委託先においては今後、委託先内での上記実用化開発・製品化の段階を経ることで、或いは材料メーカーである委託先においては電池メーカーなどのユーザに材料提案を行い連携を含むような開発段階に移行することで、材料として実用化が見通せる。

### （2）事業化までのシナリオ

顧客となる電池メーカー等の電池の仕様、製造条件、動作条件に合わせた実用的な条件での電池の作成及び評価、それに呼応する開発材料の調整、耐久性や安全性の更なる向上、粉体物性の改良等を積み重ねながら、更には自ら製造プロセスの検討によるコストダウンや品質向上等を行うことが、事業化への課題となる。表-2に事業化への年度展開例を示す。本プロジェクトにおける小形電池による材料の評価段階から、電池メーカー等との何らかの連携を含むような上記開発段階にシフトし、開発、製品化の2つの段階（サンプル出荷評価をふくむ）を経て、市場出荷段階で実用化に至る。開発段階から製品化段階では他の企業との連携（共同研究等）も想定される。図-3に実用化へのイメージ図を示す。

なおNEDOでは、高性能を実現する新材料を搭載した次世代のリチウムイオン電池を開発する助成事業、「高性能リチウムイオン電池応用・実用化先端技術開発事業」を、2012年より5カ年の計画で

立ち上げる。その事業では2020年～2025年頃を目処に開発電池の実用化を目指す。PHEV用途の電池のエネルギー密度の目標値が200Wh/kgであり、本要素技術開発（電池構成材料）の目標とマッチするものである。既に公募・採択が終了した段階であるが、NEDO/HPにも掲載の通り、本事業の開発テーマのうち2件が上記実用化を目指した事業に採択されている（日産自動車、田中化学研究所）。NEDOとしても本事業の開発成果の実用化を支援するところである。

### （3）波及効果

主たる目標である自動車用途以外には、出力特性が同様に重要視される電動工具、電動二輪車などの製品への展開が期待される。また、イオン液体電解液などは民生用蓄電池においても安全性の更なる向上のために利用される余地がある。イオン液体などは電池用電解液としての用途に限らず工業用溶剤としての用途が存在するため、それらの市場の立ち上がりによっては相乗効果により低コスト化が促進し、電池用電解液としての用途拡大も期待される。

表 -2 実用化・事業化への年度計画例 要素技術開発（電池構成材料）

項目	～H21年度 (～FY2009)	～H23年度 (～FY2011)	～H25年度 (～FY2013)	～H27年度 (～FY2015)	～H30年度 (～FY2018)	～H32年度 (～FY2020)
研究段階						
開発段階						
製品化段階						
市場出荷段階						
他の企業との関係 等々化/ス・合弁等						

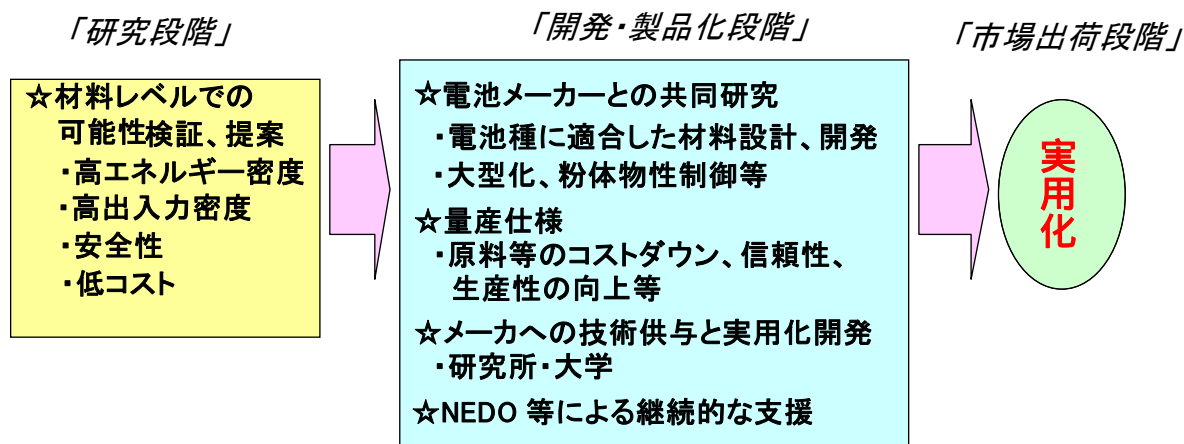


図 -3 実用化・事業化へのイメージ図 要素技術開発（電池構成材料）

### 1. 3 要素技術開発（周辺機器）

実用化の定義は、【開発したモータを製品化して自動車に搭載すること】とする。

#### （1）成果の実用化可能性

本プロジェクトでは、車駆動モータにおけるレアアースの使用量の大幅削減の可能性の追及を、多方式のモータの技術開発、検証機の試作・評価等を行い実施した。全体 5 テーマのうち、委託先が大学であるテーマが 3 テーマ、残りの 2 テーマはメーカー単独が 1 テーマ、メーカーと大学の共同体が 1 テーマという構成である。性能目標については多くのテーマが目標を達成し、脱／省レアアースモータの実現性が検証された。今後については、量産／製造技術、信頼性等に係る課題が上げられている。本開発は脱／省レアアースという厳しい目標の中で従来機並みのモータ性能を得ることに注力したものであり、コストや信頼性等の実用性については今後検証を進める必要がある。一層の性能向上も含めて、基礎から応用まで幅広く開発を継続することで、最終製品につながると考える。

これまで経済産業省及び文部科学省主導の磁性材料等の技術開発と、経済産業省／NEDO 主導の既存材料をベースとする本モータ開発を並行して進めてきたが、一連の事業の平成 23 年度終了に伴い図 1-4 に示す通り、政府においても平成 24 年度より両者を統合して強化する計画である。これにより一層の性能向上と実用化開発の両立が実現されると考えられる。上述した「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発（H24～）」は、2021 年（H33）を目処にレアアース元素を使わない新磁石、低損失な新軟磁性材料およびそれらの材料を用いる高効率なモータを、産官学が広く連携して開発するものである。本事業の複数の委託先は上記新事業への参加を計画している。

本事業のメーカーの委託先において、うち 1 社は車用小型モータの販売実績がある。本事業終了後も車載用モータの開発を継続する計画であり、自動車駆動用モータの事業化が期待できる。残る 1 社においても建機用ハイブリッド式駆動システムへの適用を計画しており、実用化が期待できる。両社は上記経済産業省の新事業に参加し、磁性材料等開発による材料性能の向上効果も組み入れて開発を継続する計画である。

大学単独で進めてきた 3 テーマについては、1 テーマで既にメーカーとの共同開発を進めつつあり、実用化に向けた進展が期待できる。また残るテーマについても、上記経済産業省の新事業への参加やメーカーへの提案を進めており、開発を継続する。

#### （2）事業化までのシナリオ

経済産業省による「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発（H24～）」の支援を受けつつ産官学が連携し、材料開発を含む広い視野で車載用モータの開発を粘り強く進める。一方で波及効果ではあるが、産業用や空調分野で省レアアースモータの導入を図り、市場実績を増やしていく。以上により、事業化の見通しが得られるものと考えられる。表 1-3 に実用化への年度展開例を示す。

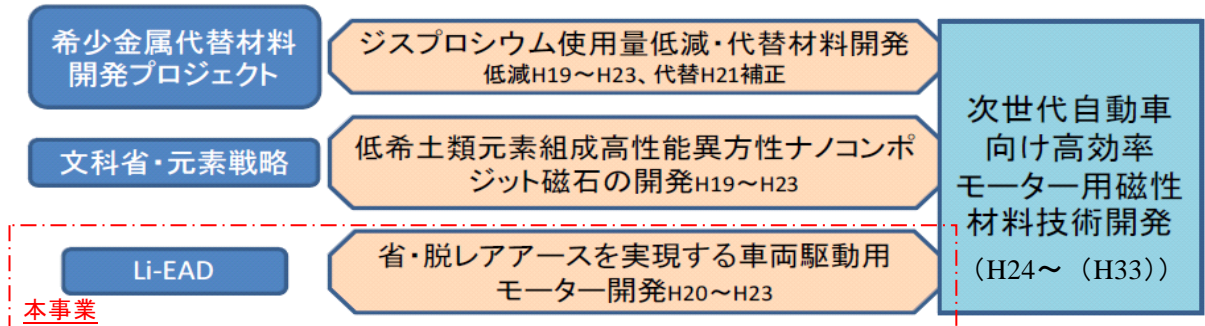


図 -4 脱/省レアアースモータに関わる開発プロジェクト

(次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発事前評価報告書

(産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会))

表 -3 実用化への年度計画例 要素技術開発 (周辺機器開発)

項目	～H21年度 (～FY2009)	～H23年度 (～FY2011)	～H25年度 (～FY2013)	～H27年度 (～FY2015)	～H30年度 (～FY2018)
研究段階					
開発段階 (産官学連携)					
製品化段階					

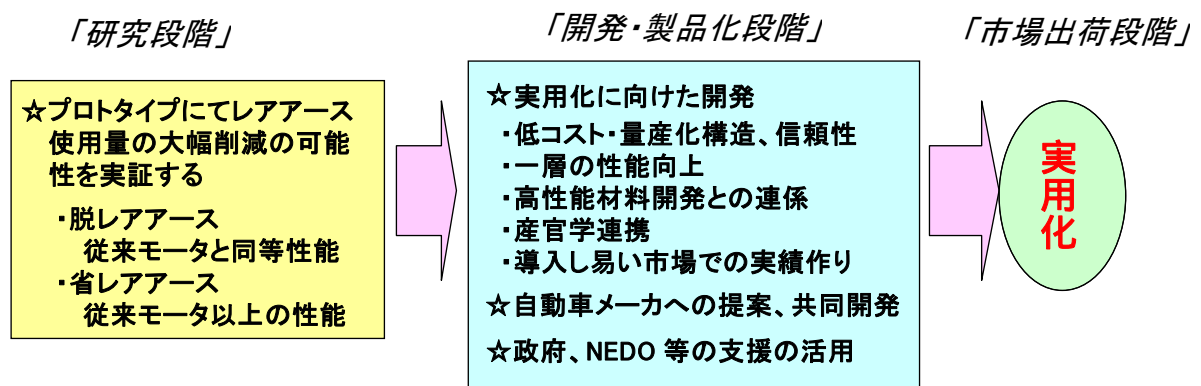


図 -5 実用化へのイメージ図 要素技術開発 (周辺機器開発)

(3) 波及効果

本技術によりモータにおいて、レアアース使用量の低減による将来的なレアアース供給不足リスクからの解放、コストダウンの実現という利点がある。そのため技術の適用先として、現在既にネオジウム磁石モータを多量に採用している分野、及び駆動部分に今後電動モータを採用する分野が上げられる。前者では、ネオジウム磁石により省エネルギーを実現している空調機等の家電製品、産業用モータがある。後者では、建機や鉄道のように、省エネの視点から今後ハ



イブリッドエンジン化、電動化が検討されている分野がある。

委託先の2つのメーカーにおいても、空調機用モータ、産業用モータ、建機用ハイブリッドエンジン用モータへの適用開発に既に取り組んでいる。具体的には、空調機用モータについて一社が、経済産業省事業「レアアース・レアメタル使用量削減・利用部品代替支援事業」に参画し、開発を進めている。もう一社は産業用モータに関し、平成23年度NEDO補正事業「希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業／産業用レアアースモータの省・脱レアアース化技術実用化開発」に参画し、開発を進めている。本事業での開発技術を基に種々の分野で省レアアースモータを市場導入し、実績を作ることも重要である。モータは多くの製品に共通の汎用部品であり、その他分野においても適用の可能性はある。

#### 1. 4 次世代技術開発

実用化の定義は、【開発した電池材料をコインセルレベルの電池に適用すること】とする。

##### (1) 成果の実用化可能性

###### 金属-空気電池系

Li-空気系電池（有機電解液）においては、現在までにある程度、最適な空気極触媒の開発に成功している。今後、ナノロッドなどの構造を制御した高表面積な触媒系の合成と応用、固体電解質による充電時に発生するデンドライドの影響の除去、合金系負極の応用による安全性の確保により、コインセルレベルでの電池への展開が可能である。また、大容量の達成には生成するLi<sub>2</sub>Oで覆われて失活しない空気極触媒の開発が必要である。Li-空気電池（水溶液）ではラミネート封入式の薄型セルを試作および試験を行っており、実用化の具体的なセル構成の一例が示された。

さらに実用性を高めるためには、より大きな面積にポリマー電解質を塗布する技術の確立、固体電解質または同等品を大面積化する材料技術の開発、リザーバーが蒸発し失われることへの対処策、放電時の放電生成物の収容の問題、水の発生による体積増の問題等の確立が必要である。基礎研究でセルの材料構成がある程度固定されれば、それに続く段階としてメーカーとの共同研究へと移行し、セルの大型化、システムとしてのセルのあり方などの事業化に向けた課題が検討されることにより事業化見通しが得られる。

Zn-空気電池に関しては、デンドライト抑制技術等で一定の実用化の見通しが得られた。一方で、クーロン効率の改善等、新規材料の開発を必要とする課題も見出された。

金属-空気電池系の事業化イメージのひとつとして車載用が考えられる。その場合、空気ブローアを併用した空気電池システムの設計を行う必要があり、燃料電池スタックセルの技術の活用も期待される。

###### リチウム硫黄電池系

高エネルギー密度化を実現するため、硫黄の高い理論容量を利用する研究開発を実施し、特に全固体電池を目指した研究開発を遂行してきた。新規な高イオン伝導体の探索、新規な高容量負極の探索、新規電極構造の創出を目指すことで、高出力と高エネルギー密度を兼ね備えた全固体電池を実現する。また、硫化物の低い電子伝導性に起因する出力特性の問題、それを改善するための電子伝導性付与の処理の影響による低エネルギー密度化など

も本質的な課題として依然として存在しており、実用化を目指すためには、さらなる、基礎研究が必要と思われる。

#### 多価カチオン電池系

多価カチオン電池系における Mg イオン電池は、短絡しても MgO 被膜ができやすいため安全性が高く、戦略物質を使用しないことから実用性に向いていると考えられる。硫黄をドーピングしたアモルファス V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> の利用により、当初目標を越える、初期容量 420mAh/kg、サイクル維持率 70% (50cycle) の特性を達成した。一方で、平均電圧と実用セル構造に新たに解決すべき課題が見出された。

#### 新形態リチウムイオン二次電池系

酸化物系正/負極、カーボンナノチューブ系負極、リチウム金属負極、C/Si 負極、ガスデポジション負極カーボンナノ正極、ホウ素化合物系電解液、イオン液体に関しては、いずれも開発した電極材料に対して他の構成材料を選択することにより、コインセルレベルまたはラミネートセルレベルの電池を作製可能である。この点で、一部部材については、ほぼ実用化段階にあるといえる。量産化技術、電極製造プロセスの開発、低コスト化、また他の構成材料との組み合わせ、セル試作による安全性・信頼性についての検討を行うことでこれら開発された素材の実用性を見通すことが可能となる。

#### 解析技術

その場近赤外 FT ラマン分光法を用いて、これまで電池反応としてブラックボックスであった反応解析をその場で行う手法開発に成功した。また、今回開発したその場近赤外 FT ラマン分光法を、実電池の合剤電極・電解液に適応し、それらの全構成要素をその場で解析することにも成功した。今後の展開として、これらの反応が電極界面のどの部位で進行し、その反応が電池のどのような特性に影響しているかを明らかにし、高エネルギー密度を達成する電池の実現に寄与する。

また、新規の計算手法を開発し、測定技術とコンピュータ科学とを組み合わせることで、電池材料の高速理論スクリーニング手法、測定機器シミュレーション、新しい電池系の性能評価シミュレータを開発した。おおむね最終目標を達成したが、実用セルでの検証と新しい電池系への拡大が課題と考えられる。

## (2) 事業化までのシナリオ

プロジェクト終了後に、開発段階に移行するテーマも存在するが、多くは、今後とも長期にわたる基礎研究を継続する必要があるため、事業化については長期的な視点で見守る必要がある。本次世代技術開発の一部テーマについては、NEDO「革新型蓄電池先端科学基礎研究事業」で引き続き研究開発を継続する。表 4 に事業化への年度展開例を示す。製品化段階への移行は平成 30 年度頃、市場出荷段階はさらに先となることが予想される。製品化段階以降では、他の企業との連携（共同研究等）や大学、研究機関によるベンチャーも想定される。

一方、新形態リチウムイオン電池用の一部部材については、既にコインセル等の小型セルに適用可能な実用化段階にあり、現行リチウムイオン電池部材との組み合わせによる高性能化が検討されている。高性能リチウムイオン電池として、電池メーカーとの連携による製品化段階への早期移行（平成 27 年度頃）が見込まれる。図 6 に実用化へのイメージ図を示す。



価においても、本評価法を適用した。更には学会においても広く報告し、普及を図った（講演数 176 件、論文数 42 件）。

もう一つの実用化である国際標準・規格への反映については、開発した上記電池の基本性能試験法、安全性評価試験方法等を、日本自動車工業会や電池工業会などの協働作業として JARI のワーキンググループにより、IEC/ISO の規格に以下例のごとく反映した（反映した規格全数 21 件）。

事例：

- ・ IEC62660-1（日本提案）  
電動車両用リチウムイオン電池セルの性能試験方法
- ・ IEC62660-2（日本提案）  
電動車両用リチウムイオン電池セルの信頼性・誤用試験方法
- ・ IEC/ISO PAS 16898（日本+独提案）  
電動車両用リチウムイオン電池寸法と表記方法

今後の課題については、まず電池評価／解析技術においては、特に寿命耐久性に関する加速寿命試験法に課題が残ると考えられる。リチウムイオン電池はそもそも材料系が多岐にわたる上に材料に関わる情報を得にくく、且つ電池そのものが現在改良途上であるなど、評価が難しい。更には、実際に車両搭載された電池を評価する機会を得にくい難しさもある。今後は、評価手法の開発を継続すると共に、実際に車両搭載された電池の劣化と加速試験劣化との相関性調べるなど、加速（予測）精度の検証も必要であろう。自動車メーカー等の活動と連携し、場合によっては支援することで展望が開けると期待できる。

一方国際標準・規格化の面では、これまで注力してきたセル／パック単体に加え、今後は車両搭載電池システムとしての領域も重要になってくる。既に標準化された部分における簡略化や改訂の作業と共に、活動を継続していく必要がある。以上述べた各種試験方法の提案から標準化に至る基盤技術の国際標準化・規格化の実用化イメージを下図に示す。

なお、電池の寿命や標準化・規格化の今後については、上記課題への対処も含め、政府の方で継続的に支援を行う方向である。

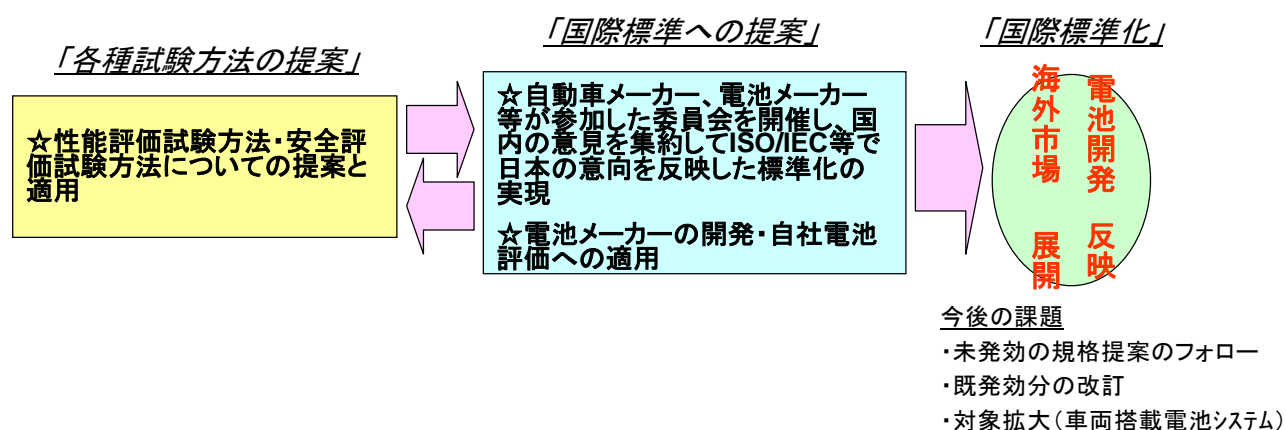


図 -7 実用化へのイメージ図 基盤技術開発

(添付資料)

- ・ イノベーションプログラム基本計画
- ・ プロジェクト基本計画
- ・ 事前評価関連資料
- ・ 特許論文リスト

## エネルギーイノベーションプログラム基本計画

### 1. 目的

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するためには、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことが不可欠である。他方、エネルギー技術開発は、長期間を要するとともに大規模投資を伴う一方で将来の不確実性が大きいことから、民間企業が持続的な取組を行うことは必ずしも容易ではない。このため、政府が長期を見据えた将来の技術進展の方向性を示し、官民双方がこの方向性を共有することで、長期にわたり軸のぶれない取組の実施が可能となる。

エネルギー安全保障の確立や、世界全体の温室効果ガスを 2050 年までに半減するという長期目標を達成するため、以下に政策の柱毎に目的を示す。

#### 1-1. 総合エネルギー効率の向上

1970 年代以来、官民をあげて省エネルギーに取り組み、産業構造の転換や新たな製造技術の導入、民生機器の効率改善等により世界最高水準の省エネルギーを達成している。今後、「新・国家エネルギー戦略」に掲げる、2030 年までに GDP あたりのエネルギー利用効率を約 30% 向上を実現していくためには、産業部門はもとより、全部門において、総合エネルギー効率の向上に資する技術開発とその成果の導入を促進する。

#### 1-2. 運輸部門の燃料多様化

ほぼ 100% を石油に依存する運輸部門は、我が国エネルギー需給構造上、最も脆弱性が高く、その需給構造の次世代化は、将来に向けた早急な対策が不可欠な課題となっている。

「新・国家エネルギー戦略」に掲げる目標（2030 年に向け、運輸部門の石油依存度が 80% 程度となることを目指す）の実現のためにも、官民が中長期的な展望・方向性を共有しつつ、技術開発と関連施策を推進する。

#### 1-3. 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーは、エネルギー源の多様化や地球温暖化対策の観点から重要である。しかし、現時点では経済性や出力安定性といった普及へ向けての課題が存在する。

そのため、これらの課題解決に向けた技術開発の推進及び新エネルギーの導入促進のための関連施策の実施により、更なる新エネルギーの普及を推進する。

#### 1-4. 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

原子力発電は供給安定性に優れ、運用時に CO<sub>2</sub> を排出しないクリーンなエネルギー源である。安全確保を大前提に核燃料サイクルを含む原子力発電を着実に推進する。

#### 1-5. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

化石燃料資源の大宗を輸入に依存する我が国にとって、その安定供給の確保は国家安全保障に直結する課題である。このため、石油・天然ガス等の安定供給確保を目指し、我が国企業による資源国における資源開発等に対する支援等の施策を進めるとともに、その有効かつクリーンな利用を図る。

## 2. 政策的位置付け

低炭素社会づくり行動計画（2008年7月閣議決定）

2008年6月の福田総理（当時）のスピーチ「福田ビジョン」等を受け、我が国が低炭素社会へ移行していくための具体的な道筋を示すため、国全体を低炭素化へ動かす仕組みや革新的な技術開発、国民一人ひとりの行動を促すための取組について策定。

「環境エネルギー技術革新計画」や「Cool Earth - エネルギー革新技術計画」等に示された革新的技術の開発に5年間で300億ドル程度を投入するという具体的な目標が示された。

環境エネルギー技術革新計画（2008年5月）

温室効果ガスの大幅な削減を目指すだけでなく、エネルギー安全保障、環境と経済の両立、開発途上国への貢献等を考慮し、以下の戦略等を策定。

1. 低炭素社会実現に向けた我が国の技術戦略
2. 国際的な温室効果ガス削減策への貢献策
3. 革新的環境エネルギー技術開発の推進方策

Cool Earth - エネルギー革新技術計画（2008年3月）

2007年5月の総理イニシアティブ「クールアース50」を受け、世界全体の温室効果ガスの排出量を現状に比して2050年までに半減するという長期目標を達成するため、エネルギー分野における革新的な技術開発について検討をおこない、21の技術を選定。

エネルギー基本計画（2007年3月閣議決定）

重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及びその施策として、

1. 総合エネルギー効率の向上に資する技術
2. 原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保に資する技術
3. 運輸部門のエネルギー多様化に資する技術
4. 新エネルギーに関する技術
5. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用に資する技術

以上が位置づけられている。

新・国家エネルギー戦略（2006年5月）

世界最先端のエネルギー需給構造の実現を図るため

1. 省エネルギーフロントランナー計画
2. 運輸エネルギーの次世代化計画
3. 新エネルギーイノベーション計画
4. 原子力立国計画

以上の計画が位置づけられている。また、資源外交、エネルギー環境協力の総合的な強化を図るため、「総合資源確保戦略」が位置づけられている。

第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

国の存立にとって基盤的であり国として取り組むことが不可欠な研究開発課題を重視して研究開発を推進する「推進4分野」であるエネルギー分野、分野別推進戦略（2006年3月総合科学技術会議）における「推進4分野」であるエネルギー分野に位置付けられている。

経済成長戦略大綱（２００６年７月財政・経済一体改革会議）

資源・エネルギー政策の戦略的展開として

- １．省エネルギーフロントランナー計画
- ２．次世代自動車・燃料イニシアティブ等による運輸エネルギー次世代化
- ３．新エネルギーイノベーション計画
- ４．原子力立国計画
- ５．資源外交、環境・エネルギー協力等の総合的な強化

以上が位置づけられている。

京都議定書目標達成計画（２００５年４月閣議決定）

「京都議定書の約束を達成するとともに、更に「脱温暖化社会」に向けて長期的・継続的な排出削減を進めるには、究極的には化石燃料への依存を減らすことが必要である。環境と経済の両立を図りつつ、これらの目標を達成するため、省エネルギー、未利用エネルギーの利用等の技術革新を加速し、効率的な機器や先進的なシステムの普及を図り、世界をリードする環境立国を目指す。」とされている。

### ３．達成目標

#### ３ - 総合エネルギー効率の向上

転換部門における「エネルギー転換効率向上」、産業部門における「製造プロセス効率向上」、民生・運輸部門における「省エネルギー」などにより、GDP当たりのエネルギー消費指数を２０３０年度までに少なくとも３０％改善することを目指す。

#### ３ - 運輸部門の燃料多様化

バイオマス由来燃料、GTL、BTL、CTLなどの新燃料、電気自動車や燃料電池自動車などの導入により、現在ほぼ１００％の運輸部門の石油依存度を２０３０年までに８０％程度とすることを目指す。

#### ３ - 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーの技術開発や燃料電池など革新的なエネルギー高度利用を促進することにより、新エネルギー等の自立的な普及を目指すことで、エネルギー源の多様化及び地球温暖化対策に貢献する。

#### ３ - 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

２０３０年以降においても、発電電力量に占める比率を３０～４０％程度以上とすることを目指すため、高速増殖炉サイクルの早期実用化、既設軽水炉代替へ対応する次世代軽水炉の開発、軽水炉技術を前提とした核燃料サイクルの確立、放射性廃棄物対策などの技術開発を推進する。

#### ３ - 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

石油・天然ガスの化石燃料の安定供給確保を目指し、資源獲得能力の強化に資する先端的な技術開発を推進するとともに、環境負荷低減のために化石燃料の効率的かつクリーンな利用を促進するための技術開発・導入を目指す。



#### 4. 研究開発内容

##### 4 - . 総合エネルギー効率の向上

##### 4 - - . 共通

###### (1) 省エネルギー革新技术開発事業 (運営費交付金)

###### 概要

テーマ公募型事業として、「Cool Earth-エネルギー革新技术計画」に基づき、「先導研究」、「実用化開発」及び「実証研究」の3つの技術開発フェーズに加え、「挑戦研究」フェーズを追加し、革新的な省エネルギー技術の開発を行う。

###### 技術目標及び達成時期

世界全体の温室効果ガス排出量を現状に比べて2050年までに半減するという長期目標を実現するための「Cool Earth-エネルギー革新技术計画」の主旨に基づき、大幅な省エネルギー効果を発揮する革新的なエネルギー使用合理化技術について研究開発・実用化を推進する。

###### 研究開発時期

2003年度～2013年度

###### (2) エネルギー使用合理化産業技術研究助成事業 (運営費交付金)

###### 概要

産業界や社会のニーズに応える省エネルギー技術のシーズの発掘とその育成、並びに、省エネルギー技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。この目的のため、産業界からの期待が高い技術領域・課題を提示した上で、大学や独立行政法人の研究者等から研究開発テーマを募集する。厳正な外部評価によって省エネルギー効果があり且つ独創的・革新的なテーマを選定し、研究者代表者個人を特定して助成金を交付する。

###### 技術的目標及び達成時期

独創性のある研究者等を助成すると共に、中間評価ゲート方式が醸成する競争的環境の下で企業との連携を強化させることにより、10～15年後の実用化が有望な革新的省エネルギー技術の研究開発を促進する。本事業では革新的省エネルギー技術の実用化への第1歩となる特許について、助成期間終了後の出願比率を100%とすることを目標とするとともに、省エネルギー技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。

###### 研究開発期間

2000年度～

###### (3) 新エネルギー技術実用化補助事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)

###### (4) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)

#### 4 - - . 超燃焼システム技術

##### (1) 環境調和型製鉄プロセス技術開発 (運営費交付金) (再掲)

###### 概要

高炉ガスからの効率的な二酸化炭素分離と中低温排熱の有効活用及び水素を炭素(コークス)の一部代替として鉄鉱石を還元する革新的製鉄プロセスの開発を行う。

###### 技術的目標及び達成時期

最終的な技術開発目標として製鉄プロセスにおけるCO<sub>2</sub>排出量を30%削減することを目指し、2050年までに実用化する。

###### 研究開発期間

2008年度～2017年度

##### (2) 資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発 (運営費交付金)

###### 概要

高品位な製鉄材料(鉄鉱石・石炭等)の入手が困難になってきていることから、原料使用量の低減及び、比較的入手が容易な低品位原料の使用拡大を図ることが喫緊の課題となっている。本技術開発では、還元剤として低品位な石炭と鉄鉱石の塊成物を開発し、炉内反応の高速化・低温化を実現することにより、省エネルギーで高効率な革新的製鉄プロセスを開発する。

###### 技術的目標及び達成時期

2011年度までに、革新的塊成物の組成・構造条件の探索、革新的塊成物の製造プロセス、革新的塊成物による高炉操業プロセスを開発する。これらによる効果は、年産400万トン規模の中型高炉に適用した場合の炭材使用量のうち高品位炭使用量が約80%から50%程度に削減可能となるとともに、革新的塊成物を高炉に使用する操業技術の改良による還元材比の低減により、新開発のプロセスを含めた製鉄プロセスでの投入エネルギーは約10%削減される。

###### 研究開発期間

2009年度～2011年度

##### (3) 革新的ガラス溶融プロセス技術開発 (運営費交付金)

###### 概要

プラズマ等による高温を利用し瞬時にガラス原料をガラス化することにより、極めて効率的にガラスを気中で溶融(インフライトメルティング法)し省エネに資する革新的ガラス溶融プロセス技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

###### 技術的目標及び達成時期

2012年度までに、インフライトメルティング法により原料を溶解する技術、カレットをガラス原料として利用するため高効率で加熱する技術、カレット融液とインフライトメルティング法による原料融液とを高速で混合する技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(4) 革新的マイクロ反応場利用部材技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、マイクロリアクター、ナノ空孔などの精密反応場を利用し、反応分子の自由な運動を活性種レベルで制御した革新的な化学反応プロセスと新機能材料創成技術の確立を目指す。さらに、マイクロリアクターとナノ空孔反応場の組み合わせ、各反応場とマイクロ波等のエネルギー供給手段との組み合わせにより協奏的反応場を構成し、さらなる高効率生産等を可能にする基盤技術を開発する。これらの技術の確立により、反応システムの小型化、多段プロセスの簡略化等を通じた化学産業の製造工程等の省エネルギー化を図る。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術を軸とし、これらに更にマイクロ波、超臨界流体等のエネルギー供給手段を組み合わせた協奏的反応場を構成することにより、これまでにない革新的な化学反応プロセスを確立し、新機能材料創成技術を実現する。さらに、これらの技術を用いて高性能・高機能電子材料、医薬中間体などの部材を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(5) 鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発(運営費交付金)

概要

プラント、構造物や自動車等の革新的な高効率化、省エネルギー化、長寿命化、安全・安心化を図るため、最新の科学的知見を導入し、鉄鋼材料及び鋼構造体を超高機能化する基盤的研究開発を行う。具体的には、高強度鋼、高機能鋼の実用化拡大の基盤となる(1)高級鋼厚板(高強度鋼、極低温用鋼、耐熱鋼)溶接部の信頼性・寿命を大幅に向上する溶接施工技術(高密度・清浄熱源溶接技術)及びクリープ破壊、金属組織制御技術を基本とする溶接材料技術(クリープ破壊及び水素破壊の機構解明等を踏まえた)の開発、(2)部材の軽量化を図るために強度、加工性等の最適機能傾斜を付与する機械部品鍛造技術(駆動部材の信頼性確保のための耐疲労破壊特性の向上を踏まえた)の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、高級鋼厚板(高強度鋼・極低温用鋼・耐熱鋼)の溶接を予熱・後熱なしに可能とする溶接技術と材料技術を開発するとともに、傾斜機能部材の鍛造技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

## (6) 希少金属等高効率回収システム開発

### 概要

小型電子・電気機器にはベースメタルや、金、銀等の貴金属の他、インジウム、ニッケル等の希少金属等を含有している。現状では、これらの機器が廃棄された後は、非常に高温で処理する乾式製錬技術を用いてリサイクル・処理されているため、多大なエネルギーを消費するばかりか、回収可能な金属が銅、金、銀等に限定されており、その他の希少金属等は回収できずに廃棄処分されている。このため、湿式製錬技術を活用した高効率な最適技術の開発等を通じて、回収工程の省エネルギー及び希少金属等の回収率向上を図る。

### 技術目標及び達成時期

- ・ 従来方法(乾式製錬)で処理する場合に比べて、大幅な省エネルギーの実現(省エネルギー効果:原油換算で約78万kL/年削減)
- ・ 廃小型電子・電気機器、廃超硬工具等中に含まれる希少金属等の回収率の向上(インジウム0%→90%、ニッケル50%→95%、コバルト0%→95%、タンタル0%→80%、タングステン90%→95%、レアアース0%→80%)

### 研究開発期間

2007年度～2010年度

## (7) 低品位鉱石・難処理鉱石に対応した革新的製錬プロセス技術の研究開発

### 概要

世界的な鉱石品位の低下、不要元素等の不純物の増加に対応するため、我が国非鉄金属業においては、低品位鉱石の利用拡大による我が国の鉱物資源の安定供給確保の強化が喫緊の課題となっているため、低品位・難処理鉱石の革新的な省エネルギー型の製錬プロセスを開発する。

### 技術目標及び達成時期

低品位鉱石及び難処理鉱石から効率的に銅等有用な非鉄金属を回収するため、低品位鉱石・難処理鉱石に対応した省エネルギー型プロセスによる新たな選鉱技術、製錬技術及び不純物対策技術の研究開発を行う。

#### (1) 高品位精鉱回収技術

低品位鉱石・難処理鉱石から高品位の精鉱を得る選鉱技術の開発。

ハンドリングが難しい極微細鉱等難処理鉱を処理する製錬技術の開発。

#### (2) 有用金属の抽出等回収技術

低品位精鉱から含有金属を高効率に回収する製錬技術の開発。

#### (3) 高濃度不純物の除去等対策技術

不要な元素(ヒ素、ビスマス、アンチモン等)等を多く含む精鉱からの不純物除去、分離、安定化等技術の開発。

上記要素技術を開発し、将来的にエネルギー消費原単位の悪化が予測される非鉄金属製錬について、省エネルギー見込み量、原油換算約2.6万KLを達成。

### 研究開発期間

2009年度～2012年度

## ( 8 ) 環境調和型水循環技術開発

### 概要

我が国が強みを持つ、膜技術を始めとする水処理技術を強化し、省水型・環境調和型の水循環システムの開発に資する省エネ・省水型の要素技術を開発する。

### 技術目標及び達成時期

2013年度までに、以下の技術を開発する。

- 革新的膜分離技術の開発：

従来法に比べ膜透過加圧エネルギー等を50%以上削減。

- 省エネ型膜分離活性汚泥法（MBR）技術の開発：

従来法に比べ膜洗浄の曝気（空気気泡）エネルギー等を30%以上削減。

- 有用金属・有害物質の分離・回収技術の開発：

従来法に比べ汚泥の削減により汚泥処理・処分エネルギーを80%以上削減。

- 高効率難分解性物質分解技術の開発：

従来法に比べ窒素処理に係るエネルギーを50%以上削減。

オゾン酸化法等のエネルギーを50%以上削減。

### 研究開発期間

2009年度～2013年度

## ( 9 ) 微生物機能を活用した環境調和型製造基盤技術開発

### i) 微生物機能を活用した高度製造基盤技術開発（運営費交付金）

#### 概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーかつ環境負荷が少ないといった特徴を有する微生物機能を活用した有用物質の革新的な生産プロセス（モノ作り）の技術を構築するため、産業用途に必要な機能既知遺伝子で構成されたゲノムを持ち、物質生産性向上につながる性能を備えた高性能宿主細胞の創製や、微生物反応の多様化・高機能化技術を開発するとともに、バイオマスを原料として有用物質を体系的かつ効率的に生産する（バイオリファイナリー）ための基盤技術を開発する。

### 技術目標及び達成時期

2010年度までに、物質生産性向上につながる性能を備えた高性能宿主細胞を創製するとともに、バイオプロセスの実用化適用範囲の拡大のための微生物反応の多様化・高機能化技術の開発を行う。バイオリファイナリー技術については、バイオマスを高効率で糖化し、糖から高効率で各種化成品の基幹物質を生産するバイオプロセス体系を構築する。

### 研究開発期間

2006年度～2010年度

ii) 微生物群のデザイン化による高効率型環境バイオ処理技術開発（運営費交付金）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、従来エネルギー多消費・廃棄物多排出型であった廃水・廃棄物処理において、微生物群の構成及び配置等を人為的に制御（デザイン化）することで、その処理効率を大幅に向上させ、省エネルギーで廃棄物も少ない高効率型廃水、廃棄物処理の基盤技術を確立する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、特定有用微生物群を人為的に安定導入・維持もしくは人為的に空間配置・優先化させる等のデザイン化技術を開発し、従来の廃水、廃棄物処理に比べより高効率で省エネルギーな処理技術を開発するとともに、実用化に資するための実証可能なテストプラント規模にて評価する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(10) 省エネルギー型化学技術創成研究開発補助事業

概要

化学企業が有する技術シーズの中で、省エネルギーのポテンシャルが大きいにもかかわらず民間だけで事業を進めるには開発リスクが大きいこと等がネックになって十分な研究開発費が投じられていない技術に対して、戦略的な研究開発支援を実施することにより、化学産業のみならず、各種最終製品や他産業において抜本的なエネルギー効率の改善を促進するものである。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、将来の発展が有望な技術に関する研究開発の実施とその実用化と普及を通し、化学産業のみならず他分野も含めた我が国省エネルギー対策への一層の寄与を目標とする。

研究開発期間

2004年度～2010年度

(11) エネルギー使用合理化繊維関連次世代技術開発

概要

製造エネルギーの低減を図ることができる革新的な繊維製品製造技術の開発や、使用することでエネルギー消費の低減が可能となる新たな繊維製品を開発。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、以下の開発を行う。

次世代資材用繊維の開発

ポリエチレンテレフタレート製造エネルギー低減技術の開発

研究開発期間

2005年度～2009年度

## (12) 高効率ガスタービン実用化技術開発

### 概要

省エネルギー及びCO<sub>2</sub>削減の観点から電力産業用高効率ガスタービンの実用化を目指し、大容量機(25万kW程度(コンバインド出力40万kW))の高効率化(52%~56%)のために1700級ガスタービンの実用化に必要な先端要素技術を適用した各要素モジュールの検証等を実施する。また、小中容量機(10万kW程度)の高効率化(45%~51%)のために有望とされている高湿分空気利用ガスタービンの実用化に必要な多段軸流圧縮機、多缶燃焼器等の開発を行うとともにシステムの信頼性等の検証を行う。

### 技術的目標及び達成時期

1700級ガスタービン実用化技術開発：先端要素技術を活用した燃焼器、タービン、圧縮機等各モジュールの検証等を行い、送電端熱効率56%以上の達成が可能なことを確認する。

高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発：2011年までに軸流圧縮機の3.5%(空気重量比)吸気噴霧冷却技術、低NO<sub>x</sub>燃焼技術(運用負荷帯で10ppm以下)等を開発すると共に、実機に近い条件での要素機器の信頼性・耐久性を確認する。

### 研究開発期間

2008年度~2011年度

## (13) エネルギー使用合理化高効率パルプ工程技术開発(運営費交付金)

### 概要

紙パルプ産業では、環境に関する自主行動計画に基づき、2010年度までに製品当たり化石エネルギー原単位を1990年度比13%削減し、CO<sub>2</sub>排出原単位を10%削減することを目指し、紙パルプ工程における省エネルギー対策を着実に進めているものの、より一層の省エネルギー対策を進めるためには、技術開発によるブレークスルーが必要となっている。紙パルプ産業は、エネルギー多消費型産業のひとつであり、紙パルプ工程での省エネルギー対策は波及効果が大きいことから、紙パルプ工程におけるエネルギー使用合理化に資する技術開発を提案公募により実施する。

### 技術的目標及び達成時期

京都議定書の第1約束期間中、又は、第2約束期間中を目途として実用化に至るような技術開発を行うことで、京都議定書の第1約束期間の目標を着実に達成するとともに、現在、検討が行われている第2約束期間に向けた省エネルギー対策の更なる深化を進めていく。

### 研究開発期間

2005年度~2010年度

## (14) 革新的省エネセラミックス製造技術開発(運営費交付金)

### 概要

小型炉設備で生産可能な小型セラミック中空ユニットを複数組みあわせること

で、これまでその製造が難しかった複雑な形状を持つ大型セラミックス部材を省エネで製作することができる革新的なセラミック部材製造技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。  
技術目標及び達成時期

2013年度までに、高機能化された小さな精密ブロックを立体的に組み上げ、高効率で接合、一体化をし、複雑な形状の部材や大型の部材を製造可能とする革新的なプロセス技術の基盤を確立し、高耐性部材、高温断熱部材及び高比剛性部材の試作を行う。

研究開発期間

2009年度～2013年度

- (15) 発電プラント用超高純度金属材料開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (16) 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発(4 - - 参照)
- (17) 噴流床石炭ガス化発電プラント開発(4 - - 参照)
- (18) 石油精製高度機能融合技術開発(4 - - 参照)

#### 4 - - . 時空を超えたエネルギー利用技術

- (1) カーボンナノチューブキャパシタ開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

高純度、高密度に配向した長尺の単層カーボンナノチューブの大量合成技術を開発するとともに、これを用いた従来よりも格段にパワー(電力)と蓄電量が大きなキャパシタを開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。  
技術目標及び達成時期

2010年度までに、単層カーボンナノチューブの高度配向技術及び大量生産技術を確立するとともに、キャパシタ製造技術を確立することで、20Wh/Kgの高エネルギー密度と耐久性を有する電気二重層キャパシタを開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

- (2) イットリウム系超電導電力機器技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 高温超電導電力ケーブル実証プロジェクト(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) 燃料電池先端科学研究(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (6) 固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (7) 水素貯蔵材料先端基礎研究事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (8) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (9) 固体酸化物形燃料電池実証研究(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (10) 大規模電力供給用太陽光発電システム安定化等実証事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (11) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (12) 革新型蓄電池先端科学基礎研究(運営費交付金)(4 - - 参照)



#### 4 - - . 省エネ型情報生活空間創生技術

##### (1) グリーンITプロジェクト(運営費交付金)

###### 概要

情報化社会の進展に伴うIT機器の消費電力の大幅な増大に対応し、抜本的な省エネを実現するため、サーバ、ネットワーク機器等の各装置の省エネに加え、省エネ型の巨大コンピューティング技術(グリーン・クラウドコンピューティング技術)、パワーエレクトロニクス技術を開発する。

###### 技術目標及び達成時期

2012年度までに、IT機器・システムのエネルギー消費効率を2倍に向上させる基盤技術を開発する。

###### 研究開発期間

2008年度～2012年度

##### (2) 次世代高効率ネットワークデバイス技術開発(運営費交付金)

###### 概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、ネットワークで伝送されるデータ量の爆発的増加に伴い、関連機器の消費エネルギーが増大している中で、ネットワーク全体の消費電力量を抑制することが喫緊の課題であり、消費エネルギーの低減に大きく貢献するルータ・スイッチの高速化のための研究開発を実施するとともに、機器そのものの消費エネルギーを低減するための研究開発を実施する。

###### 技術的目標及び達成時期

2011年度までに、1チャンネルあたり40Gbps超の通信速度に対応するトラフィック計測・分析・管理技術や40Gbpsのインターフェース、さらなる通信速度向上(100Gbps超)を実現するハードウェア技術、SFQ(単一磁束量子)スイッチに関する実現を可能とするための基盤技術を開発する。

###### 研究開発期間

2007年度～2011年度

##### (3) 次世代大型低消費電力ディスプレイ基盤技術開発(運営費交付金)

###### 概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、次世代の大型液晶及び大型プラズマディスプレイに関する低消費電力ディスプレイを実現するための研究開発を行う。

###### 技術的目標及び達成時期

2011年度までに、液晶に関しては、高効率バックライト、革新的なTFTアレイプロセス技術・製造装置及び低消費電力型の画像処理エンジン等に係る技術を確立する。また、プラズマディスプレイに関しては、超低電圧駆動等に係る技術を確立する。

###### 研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 有機発光機構を用いた高効率照明の開発 (運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、蛍光灯に代わる高効率照明として有機EL発光機構を用いるための技術開発課題(発光効率、演色性、面均一性、生産コスト)等を明らかにし、それをブレイクスルーしうる技術シーズを抽出する。

技術目標及び達成時期

2009年までに現在一般に普及している蛍光灯照明に代わる高効率照明としての必要スペックを達成するとともに、次世代照明として同じく期待されているLEDとの差別化要素を技術的に達成し、大面積/高スループット/低コストで量産するプロセス技術を開発する。また、現在蛍光灯の間接・拡散照明が用いられている照明機器を代替する有機EL照明を実用的なコストで製造できる技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2009年度

(5) マルチセラミックス膜新断熱材料の開発 (運営費交付金)

概要

住宅やビルなどの冷暖房における大幅な省エネを実現する画期的な断熱性能を持つ壁および窓材料を、セラミックスのナノ多孔体構造やポリマー複合化構造などからなるマルチセラミックス膜アセンブリ技術によって開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、熱貫流率(熱の伝わりやすさ)が $0.3\text{ W/m}^2\text{K}$ 以下、壁厚さ10mm程度の超断熱壁材料および熱貫流率が $0.4\text{ W/m}^2\text{K}$ 以下、光(可視光)透過率が65%以上(Low-Eガラス使用)、ヘイズ率が1%以下の超断熱窓材料を実現する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) 超フレキシブルディスプレイ部材技術開発 (運営費交付金)

概要

製造工程等の省エネルギー化を実現するために行う。従来、表示デバイスの製造には、真空蒸着と高温下での焼成と、それに伴う排ガス排水処理が必須であった。これを、ロールtoロール方式に代替することで常圧、常温下での製造を実現し、フレキシブルな薄型ディスプレイを製造する。そのために、有機TFT材料およびコンタクトプリント技術等を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

#### 技術的目標及び達成時期

2009年度までに、実用化に向けた実証のための巻き取り方式ディスプレイのプロトタイプを試作する。またフレキシブルデバイス材料開発に貢献する部材ならびに薄膜複合化技術を開発し、これらをパネル化するための実用化技術を確立する。

#### 研究開発期間

2006年度～2009年度

### (7) 低損失オプティカル新機能部材技術開発（運営費交付金）

#### 概要

近接場光の原理・効果を応用した低損失オプティカル新機能部材技術を開発し、実用化の目処を得ることを目的とする。動作原理に近接場光を用いるオプティカル新機能部材は、従来の材料特性のみに依存した光学部品では不可能な機能・性能を発揮し、液晶プロジェクター・液晶ディスプレイなど情報家電の省エネルギー、高性能・高信頼化を図る上でのキーデバイスとなることが期待できる。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

#### 技術目標及び達成時期

2010年度までに、共通基盤技術として、ナノ構造部材の設計・作製・評価技術を開発するとともに、ナノ構造部材に発現する近接場光の機能を動作原理とする低損失オプティカル新機能部材を検討し機能を確認する。

#### 研究開発期間

2006年度～2010年度

### (8) 次世代光波制御材料・素子化技術（運営費交付金）

#### 概要

ガラス材料に関する精密モールド技術を確立し、機能性の高い光波制御素子を低コストで生産できるプロセス技術を開発することで部材の小型化・高機能化を図りつつ、省エネを実現する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

#### 技術目標及び達成時期

2010年度までにサブ波長レベルの微細構造をガラス表面にモールド成形する技術を実現し、実装可能な具体的なデバイスを作製する。

#### 研究開発期間

2006年度～2010年度

### (9) 次世代高効率エネルギー利用型住宅システム技術開発・実証事業

（運営費交付金）

#### 概要

ゼロ・エミッションハウスによる生活の大幅な省エネの実現に向け、家屋内直流配電システムや、電力需給の状態に応じた太陽電池等の分散型電源の制御、電力ネットワークを活用した家電の制御等、住宅全体としてエネルギーの最適制御

を行うシステムの開発・実証を行う。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、直流給電・配電に関する規格の標準化、直流配電の電流・電圧の規格化、蓄電池設置に係る安全規制の改正に対する提案が可能となる技術を確立する。

研究開発期間

2009年度～2011年度

#### 4 - - . 先進交通社会確立技術

##### (1) エネルギー I T S ( 運営費交付金 )

概要

平成19年5月の「次世代自動車・燃料イニシアティブ」に基づき、運輸部門のエネルギー消費効率改善のため、自動運転・隊列走行技術、高度交通流制御技術等の省エネルギーに資する I T S 技術の開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2012年度までにCO2削減効果評価方法の確立を図るとともに、2020年代に実用化が見通せる運転制御、隊列走行の基盤技術の確立を目指す。

研究開発期間

2008年度～2012年度

##### (2) サステナブルハイパーコンポジット技術の開発 ( 運営費交付金 )

概要

炭素繊維複合材料は、軽量、高強度等の優れた特性を有している。従来の熱硬化性樹脂を用いた炭素繊維複合材料では成形性・加工性に乏しくリサイクルが困難であったため、熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維複合材料 ( C F R T P ) の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、炭素繊維と熱可塑性樹脂との中間基材を開発し、高速成形技術、接合技術及びリサイクル技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

##### (3) 次世代構造部材創製・加工技術開発 ( 次世代航空機用 )

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、航空機、高速車両等の輸送機器への先進材料の本格導入を加速させるため、先進複合材料及び先進金属材料について部材開発、設計試作及び評価を実施することで、軽量化によりエネルギー使用効率を大幅に向上させる革新的な構造部材の創製・加工技術の開発を行う。

#### 技術目標及び達成時期

2012年度までに、複合材の構造健全性診断技術、チタン合金の創製・加工技術を確立するとともに、航空機用エンジンへの適用を目指し、耐熱・耐衝撃性に優れた複合材料を開発する。

#### 研究開発期間

2003年度～2012年度

#### (4) 環境適応型小型航空機用エンジン研究開発(運営費交付金)

##### 概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、エネルギー使用効率を大幅に向上し、環境対策にも優れた次世代の小型航空機用エンジンの開発にとって重要な要素技術の研究開発を行う。

#### 技術目標及び達成時期

2010年度までに、エネルギー使用効率を大幅に向上する構造設計技術、騒音、NOx等の環境負荷対応に優れた環境対策技術、インテグレーション技術、高バイパス比化等の高性能化技術といった要素技術の研究開発・実証を行う。

#### 研究開発期間

2003年度～2010年度

#### (5) 省エネ用炭素繊維複合材技術開発

##### 概要

航空機、自動車、鉄道、船舶等の輸送機械等における炭素繊維複合材の適用範囲を拡大し、省エネルギーの促進を図るため、先進的な炭素繊維複合材成形技術や、耐雷対策の容易化技術等の研究開発・実証を行う。

#### 技術目標及び達成時期

2013年度までに、従来の方法に比べ、曲率の大きな部位の成形も行うことができるVaRTM(バータム)法等の炭素繊維複合材成形技術や、炭素繊維複合材を用いた製品の耐雷性能を容易に確保する技術の研究開発・実証を行う。

#### 研究開発期間

2008年度～2013年度

#### (6) 燃料電池システム等実証研究(運営費交付金)(4 - - 参照)

#### (7) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

### 4 - - . 次世代省エネデバイス技術

#### (1) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発(運営費交付金)

##### 概要

窒化物系化合物半導体は、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、重要なデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減への貢献を期待されている。このため、従来の半導体材料では実現出来ない領域で動作可能なハイパワー・超

高効率の電子素子、超高速電子素子等の作成に必要な窒化物系化合物半導体先進技術の国際競争力を強化すべく、高品質かつ大口径単結晶基板、高品質かつ大口径エピタキシャル成長技術等の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。  
技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

1) 基板技術 (GaN、AlNバルク結晶作製技術)

- ・口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。

2) エピ技術 (エピタキシャル成膜及び計測評価技術)

- ・低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。
- ・高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現
- ・高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

研究開発期間

2007年度～2011年度

## (2) 次世代低消費電力半導体基盤技術開発 (MIRAI) (運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード(微細化レベル)45nm以細の次世代低消費電力半導体を実現するため、微細加工の基盤技術やマスク(半導体素子製造過程で用いる原板)の低コスト化・製造時間短縮に必要な基盤技術の開発等を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、マスク設計・描画・検査の各工程に共通的なマスクデータ処理技術、繰り返しパターンやパターン重要度を利用した描画・検査高速化技術等の基本的な開発及びEUVLマスク基盤技術として、許容欠陥の指標明確化、ブランクス位相欠陥検査技術の確立等を完了する。

研究開発期間

2001年度～2010年度

## (3) 半導体アプリケーションチッププロジェクト (運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、情報通信機器、特に、情報家電(車載を含む)の低消費電力化を実現できる半導体アプリケーションチップ技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに情報家電の低消費電力化を実現できるアプリケーションチ

ップ技術を開発する。

研究開発期間

2003年度～2009年度

(4) 次世代プロセスフレンドリー設計技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード45nm以細の半導体に対応するSoC(System on Chip)設計技術を開発する。具体的には、テクノロジーノード45nm以細の半導体の共通設計基盤技術開発として、DFM(Design For Manufacturing)基盤技術を中核とした設計及び製造の全体最適を確保する全く新しいSoC製造フローを開発する。

技術目標及び達成時期

テクノロジーノード45nm以細のSoC開発において製造性を考慮した共通設計基盤技術を確立し、システムLSIデバイスの省エネルギーを実現するとともに、設計生産性を従来予想に比べ2倍にすることを目標とする。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(5) 半導体機能性材料の高度評価基盤開発(運営費交付金)

概要

情報通信機器の高機能化や低消費電力化等の要求を満たす半導体集積回路を実現するため、新たな機能性材料開発に貢献する評価基盤技術を開発し、さらに開発した機能性材料の半導体及び半導体集積回路への適用を可能とする統合的なソリューション技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、半導体デバイス性能に直結する接合素子の性能性及び信頼性等、半導体製造プロセス全体を俯瞰しつつ、機能性材料開発が可能となる評価基盤技術を開発し、開発した機能性材料を用いた統合的なソリューションが提案できる材料評価基盤を構築する。

研究開発期間

2009年度～2011年度

4 - - . その他

(1) 次世代構造部材創製・加工技術開発(次世代衛星基盤)

概要

国際商業市場における我が国衛星メーカーの競争力を強化するべく、準天頂衛星システム(利用者に対し、米国が運用するGPSとの補完による高精度な位置情報等の提供を可能にするシステム)の構築に不可欠な基盤技術(産業競争力強

化にも直結する衛星の軽量化、長寿命化に関する技術等)の開発を行う。本プロジェクトの一部については、他部門と比較して需要増加の割合が高い運輸部門のエネルギー消費を抑制すべく、自動車、高速車両等の輸送機器の軽量化・効率化にも資する複合材料製造設計等の基盤技術を確立するためのものであり、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

静止軌道と一定の角度をなす傾斜軌道に複数の衛星を配置し、見かけ上、常に天頂付近に最低1つの衛星を位置させるシステム。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、準天頂衛星システムの構築に不可欠な基盤技術(産業競争力強化にも直結する衛星の軽量化、長寿命化に関する技術等)の開発を実施し、宇宙空間での技術実証を行う。

研究開発期間

2003年度～2010年度

#### 4 - . 運輸部門の燃料多様化

##### 4 - - . 共通

- (1) 新エネルギー技術実用化補助事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

##### 4 - - . バイオマス由来燃料

- (1) 新エネルギー技術研究開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) E3地域流通スタンダードモデル(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) バイオマス等未活用エネルギー実証事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) バイオマスエネルギー地域システム化実験事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) セルロース系エタノール革新的生産システム開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

##### 4 - - . G T L 等の合成液体燃料

- (1) 天然ガスの液体燃料化(G T L)技術実証研究(運営費交付金)(4 - - 参照)

##### 4 - - . 燃料電池自動車および水素関連技術

- (1) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 燃料電池先端科学研究(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) 水素貯蔵材料先端基盤研究事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) 水素社会構築共通基盤整備事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (6) 燃料電池システム等実証研究(運営費交付金)(4 - - 参照)

##### 4 - - . 電気自動車

- (1) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 革新型蓄電池先端科学基礎研究(運営費交付金)(4 - - 参照)



#### 4 - . 新エネルギー等の開発・導入促進

##### 4 - - . 共通

###### (1) 新エネルギー技術研究開発(運営費交付金)

###### 概要

新エネルギーの自立的普及に向けて、太陽光、風力、バイオマスなど新エネルギー分野でのイノベーションを促進すべく、高効率かつ低コストを目指した先進的技術開発を実施する。具体的には以下の研究開発を実施する。

- A. 革新的な太陽電池の開発を実施する研究拠点を形成し、海外との研究協力等を行いながら、超長期の視野に立って、飛躍的な性能向上を目指した太陽光発電技術の開発を推進する。(革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)
- B. 中長期的に、より一層の高効率化と低コスト化を目指して、革新的な材料、構造等を採用した太陽光発電技術の開発を推進する。(太陽光発電システム未来技術研究開発)
- C. 2020年の目標発電コスト14円/kWhおよび太陽光発電システムの大幅な効率向上を実現すべく、未来技術研究開発などで得られた要素技術開発の成果の内、実用化が期待できる太陽電池作製に係る技術について課題を設定し早期実用化を助成する。(太陽光発電システム実用化促進技術開発)
- D. 電力供給源としての太陽光発電の信頼性を確立し、今後の太陽光発電システムの円滑な普及促進を図るため、太陽光発電システムの大量普及時に不可欠な性能評価技術やリサイクル・リユース技術等システムの共通基盤技術に係る研究等を実施する。(太陽光発電システム共通基盤技術研究開発)
- E. PVシステムの普及拡大のため、「集中連系型太陽光発電システム実証研究」の設備を有効利用しながら、認証制度にも資する複数台連系に係わる試験方法を確立する。(単独運転検出装置の複数台連系試験技術開発研究)
- F. 風力発電技術の国際的な動向を把握しつつ、我が国の複雑地形における風力発電利用上の各種課題を克服するための基礎から応用までの技術について研究開発を行う。具体的には我が国の厳しい風特性を反映した風特性モデルの確立及び高々度風況観測を簡便に行うためのリモートセンシング技術の精度検証・評価を行う。

また、全国規模での落雷電流計測、落雷様相観測による雷特性の把握、落雷特性・落雷保護対策と被害実態との相関把握、上記を踏まえた効果的な落雷保護対策の検討及び実機規模での実雷による保護対策検証等を実施し、高精度落雷リスクマップを作成するとともに、風力発電設備へのより効果的な落雷等に対する対策を策定する。(次世代風力発電技術研究開発事業)
- G. 我が国特有の海上特性や気象・海象条件を把握し、これらの自然条件に適した洋上風況観測法や風力発電システムに関する技術開発とその実証を行なうと共に、環境影響評価システム手法を確立する。(洋上風力発電技術研究開発)
- H. バイオマスのエネルギー利用の促進を図るためには、発生地域が分散し、形状・性状が多種多様にわたるバイオマス資源を利用しやすい形態の有用エネルギーへ効率的に転換できる技術を開発する。(バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発)

I . 世界的にもベンチャー企業による太陽光発電、新型風力発電、燃料電池、バイオ燃料分野におけるイノベーション活動が活発化していることを踏まえ、詳細目標設定・多段階選抜形の米国S B I R制度を参考に特定のキーテクノロジーに対するベンチャーのチャレンジを強力に支援する。(新エネルギーベンチャー技術革新事業)

#### 技術目標及び達成時期

- A . 2050年までに「変換効率が40%超」かつ「発電コストが汎用電力料金並み(7円/kWh)」の太陽電池を実用化することを目指した研究開発の中で、変換効率40%超の実現に向けた技術の基礎・探索研究段階と位置づけて研究開発を実施する。
- B . 2020年頃に業務用電力料金並の発電コスト(14円/kWh、モジュール製造原価として75円/W程度)、2030年頃に火力発電の発電コスト(7円/kWh、モジュール製造原価として50円/W程度)の実現に向けた中・長期的な技術開発を行う。
- C . 2015年に向けて市場競争力を備えた本格生産・商用化を目指す。
- D . 2020年度の技術開発目標である発電コスト14円/kWhを目指し、中期的な視点での太陽光発電の普及拡大に資する。
- E . 2009年度末までに、電力系統側が受け入れ可能な、導入台数の制限のない能動型単独運転検出装置の試験方法を確立する。
- F . 2012年度までに、風力発電の基礎から応用までの技術について、国際的な動向を把握しつつ、我が国特有の気象・地形に起因する各種問題(風車耐久性等)を克服するための研究開発を行って、我が国の風車産業の振興に資するとともに、IEA RD&D WINDなどの最先端の国際的風力発電共同研究に研究成果を反映させる。

また、2012年度までに、高精度落雷リスクマップを作成するとともに、風力発電設備へのより効果的な落雷等に対する対策を策定する。

- G . 2013年度までに、我が国の海象・気象条件に適した、洋上風況観測システム、洋上風力発電システム及び環境影響評価の手法等の技術を確立する。
- H . 2004年度より、バイオマスエネルギー転換プロセスにおける各工程のボトルネックを抽出し、2008年度までに開発が完了するよう、それぞれのボトルネックをブレイクスルーする要素技術開発を提案公募方式により実施する。更に、2005年度より2009年度まで、バイオマスのエネルギー転換・利用技術等の分野において2030年の普及を目指した新規な革新的技術を発掘するための先導技術研究開発を提案公募方式により実施する。
- I . 潜在的なオプションの顕在化や関連産業分野の技術開発による技術革新により、新エネルギー導入促進技術オプションの多様化と経済性の向上に寄与する。

#### 研究開発期間

2007年度～2011年度

## (2) 新エネルギー技術フィールドテスト事業(運営費交付金)

### 概要

2010年度の新エネルギー導入目標達成に向け、新技術を活用した太陽光発電及び太陽熱利用システムの有効性の検証、バイオマス熱利用システムの性能・経済性等の検証、風車立地に必要な高所の風況データの収集・解析など総合的な新エネルギーフィールドテストを実施する。具体的には以下のフィールドテストを実施する。

- A. 新技術を活用した太陽光発電システム等を設置し、出力特性等の情報収集及び分析を行うことで、その有効性を確認するとともに、ガイドラインの策定等により広く情報発信を行う。(太陽光発電新技術等フィールドテスト事業)
- B. 新利用形態の太陽熱利用システムや未利用分野においてシステムを設置し、出力特性等の情報収集及び分析を行うことで、その有効性を確認するとともに、ガイドラインの策定等により広く情報発信を行う。(太陽熱高度利用システムフィールドテスト事業)
- C. 広く薄く賦存するバイオマスを、民間企業や研究機関等において研究開発が終了段階をむかえた高効率に熱利用できるシステムを設置し、設置場所の熱需要に合わせたフィールドテストを実施することにより、実運転におけるバイオマス熱利用転換システムとしての課題抽出、解決を行い、早期実用化を図り、バイオマスエネルギーの導入促進を行う。(地域バイオマス熱利用フィールドテスト事業)
- D. 風力発電の導入目標(2010年度300万kW)を達成するため、共同研究事業者と大型風車の導入普及に必要な高所の風況データの収集・解析・評価を行い、公開する。(風力発電フィールドテスト事業)

### 技術目標及び達成時期

- A. 設置システムについて、2007年度に策定したガイドラインを2009年度、2012年度及び2015年度に見直し改訂する。
- B. 設置システムについて、2007年度に策定したガイドラインを2009年度に改訂する。また、2012年度及び2015年度に見直し改訂する。
- C. 一定レベルまで確立されたバイオマス熱利用技術について、性能や経済性等の状況・データを収集・分析し、熱利用システムの有効性を実証するとともに、これらの結果を公表することで汎用性の高い熱利用システムの確立し、2010年度のバイオマス熱利用の導入目標(308万KL)達成を目指す
- D. 2010年度までに、高所の風況データの解析・評価を行い、導入普及に有用な資料の取りまとめを行い、これらの結果を風力発電事業者、研究機関や風力発電事業を計画している各種団体等に公開することにより、風力発電導入の素地を形成し、風力発電の導入を拡大する。

### 研究開発期間

2007年度～2011年度

### (3) 新エネルギー技術実用化補助金(運営費交付金)

#### 概要

科学技術基本計画における戦略的技術領域・課題にかかる技術課題等で石油代替エネルギーの製造・生成・利用に資する実用化開発を行う民間企業に対し助成支援する。

#### 技術目標及び達成時期

助成事業終了後3年以上を経過した時点で25%の実用化達成率。加えて、知的資産経営の方針に対する審査時の評価を通じて、「技術等の知的資産を活かす経営の下で収益拡大を図る(技術を経営、収益につなげる)」意識を普及させる。

#### 研究開発期間

2000年度～

### (4) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業(運営費交付金)

#### 概要

産業界や社会のニーズに応える石油代替技術のシーズの発掘とその育成、並びに、石油代替技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。この目的のため、産業界からの期待が高い技術領域・課題を提示した上で、大学や独立行政法人の若手研究者等から研究開発テーマを募集する。厳正な外部評価によって石油代替効果があり且つ独創的・革新的なテーマを選定し、研究者代表者個人を特定して助成金を交付する。

#### 技術目標及び達成時期

独創性のある若手研究者等を助成すると共に、中間評価ゲート方式が醸成する競争的環境の下で企業との連携を強化させることにより、10～15年後の実用化が有望な革新的石油代替技術の研究開発を促進する。本事業では革新的石油代替技術の実用化への第1歩となる特許について、助成期間終了後の出願比率を100%とすることを目標とするとともに、石油代替技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。

#### 研究開発期間

2000年度～

## 4 - - . 太陽・風力

### (1) 太陽光発電無線送受電技術の研究開発

#### 概要

将来の新エネルギーシステムとして期待される宇宙太陽光発電システム(SSPS)の中核的技術として応用可能なマイクロ波による太陽光発電無線送受電技術の確立に向け、安全性や効率性等の確保に不可欠な精密ビーム制御技術の研究開発を行う。

#### 技術目標及び達成時期

2012年度までに複数のフェーズドアレイパネル間の位相同期を行い、パイロット信号の方向にマイクロ波を電送するレトロディレクティブ技術を活用した精密ビーム制御技術の確立を目指す。

研究開発期間

2008年度～2012年度

#### 4 - - . 電力系統制御・電力貯蔵

##### (1) 革新型蓄電池先端科学基礎研究(運営費交付金)

概要

電池の基礎的な反応原理・反応メカニズムを解明することで、既存の蓄電池の性能向上及び革新型蓄電との実現に向けた基礎技術の確立を目指す。

技術目標及び達成時期

世界最高レベルの放射光施設を用いた評価装置により、蓄電池の反応メカニズムを解明するとともに、2030年に電気自動車の航続距離500km、コスト1/40を実現すべく、新材料の開発を行う。

研究開発期間

2009年度～2015年度

##### (2) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

##### (3) 大規模電力供給用太陽光発電システム安定化等実証事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

#### 4 - - . バイオマス・廃棄物・地熱等

##### (1) E3地域流通スタンダードモデル創成事業(運営費交付金)

概要

離島(全域)におけるエタノール3%混合ガソリン(E3)の製造から給油までの大規模なフィールドテストを通じ、E3利用に関する社会システムモデルの構築と一般社会へ適用する際の技術課題の抽出を行う。

技術目標及び達成時期

2010年の「京都議定書目標達成計画」の導入目標(50万kl)に資するため、2009年度にE3利用の社会モデルを構築し、2011年度までにその検証を行う。

研究開発期間

2007年度～2011年度

##### (2) バイオマス等未活用エネルギー実証事業(運営費交付金)

概要

地域に賦存する未活用な資源であるバイオマスをエネルギーとして有効活用するため、溶融ガス化等熱化学的変換技術による燃料化システムやメタンガス等生物化学的変換技術による燃料化システム等の実証試験事業、事業可能性調査等を実施し、利用ノウハウ等を蓄積、本格的なバイオマス等エネルギーの導入を推進する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、バイオマス等の種別やエネルギー変換手法、更には地域

特性を加味した一連のエネルギー転換システム毎のフィージビリティスタディや試験設備の設置により、バイオマス等の運搬・収集、エネルギー転換及びエネルギー利用に係るデータの収集、分析、評価を実施し、その結果をフィードバックすることによって本格的なバイオマス等エネルギーの導入を目指す。

研究開発期間

2001年度～2009年度

### (3) バイオマスエネルギー地域システム化実験事業（運営費交付金）

概要

バイオマスエネルギーの資源収集・運搬、転換、残渣処理、利用までの一連の利活用システムについての、各要素の連携の最適化を図るための実証を実施することによって、地域特性に適合した地域主導によるバイオマスの地産地消・地域循環型の先導的モデルシステムを構築することによりバイオマスエネルギーの導入を促進する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、国内バイオマス資源の安定的かつ経済的な供給システム、最適なエネルギー転換技術、エネルギー転換後に発生する残渣の処理等の一連の地産地消型エネルギー転換システムについて、ノウハウ蓄積、課題抽出及びその対策方法の策定、技術確立を行う。また、ここで確立されたバイオマスエネルギーシステムは他地域への波及を先導する事例となることを目標とする。

研究開発期間

2005年度～2009年度

### (4) セルロース系エタノール革新的生産システム開発（運営費交付金）

概要

大規模安定供給が可能で、かつ食料と競合しない、草本系、木質系のセルロース系バイオマス原料の栽培からバイオエタノール製造までの一貫生産システムを構築し、環境負荷、経済性等を評価する。加えて、大規模生産に当たり危惧されている、生態系破壊、森林破壊、ライフサイクルでの環境負荷増大等の負の影響についての適切な評価、認証等、持続可能なバイオ燃料の生産拡大を担保する社会システム整備のあり方についても調査研究を行う。

技術目標及び達成時期

2015年までに、製造コスト40円/L以下、エネルギー回収率35%以上を達成するための技術開発を行う。

研究開発期間

2009年度～2013年度

#### 4 - - . 燃料電池

##### (1) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)

###### 概要

自動車用、家庭・業務用等に利用される固体高分子形燃料電池(PEFC)の実用化・普及に向け、要素技術、システム化技術及び次世代技術等の開発を行うとともに、共通的な課題解決に向けた研究開発の体制の構築を図る。

###### 技術目標及び達成時期

2009年度までに、固体高分子形燃料電池の経済性・耐久性の向上や高性能化のための技術開発を行い、燃料電池の普及段階へ向けて必要な基本的技術を確立する。

###### 研究開発期間

2005年度～2009年度

##### (2) 燃料電池先端科学研究(運営費交付金)

###### 概要

燃料電池の基本的反応メカニズムについての根本的な理解を深めるために、高度な科学的知見を要する現象解析及びそのための研究体制の整備を行い、現状の技術開発における壁を打破するための知見を蓄積する。

###### 技術目標及び達成時期

2009年度までに、燃料電池内における反応機構を電気化学(電極触媒反応、イオン移動、分子移動等)及び材料化学(溶解・腐食反応、錯形成反応、ラジカル反応、固相内拡散等)の観点から解明する。また、燃料電池新技術の性能を適切に評価・実証するための基本システムを構築する。

###### 研究開発期間

2005年度～2009年度

##### (3) 固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発(運営費交付金)

###### 概要

固体酸化物形燃料電池(SOFC)は発電効率が高く、分散型電源として期待されるが、実用化・普及のためには耐久性・信頼性向上、低コスト化等の課題を解決することが必要であり、材料開発や劣化要因解明など基盤的な要素技術の研究を行う。

###### 技術目標及び達成時期

2012年度までに、耐久性・信頼性の向上のための劣化要因解明等の基礎研究、低コスト化のための材料等や高出力セルスタックの開発、起動停止対応等の実用性向上のための技術開発を実施する。

###### 研究開発期間

2008年度～2012年度

#### (4) セラミックリアクター開発 (運営費交付金)

##### 概要

低温域かつ高効率なエネルギー変換を可能とする次世代型セラミックリアクターの実現のため、世界最高効率の燃料電池マイクロセルの集積構造技術等の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

##### 技術目標及び達成時期

2009年度までに、新電解質材料の適用や電極反応の高効率化等による、低温作動時 (650 以下)での出力性能を向上させる材料技術と共に、マイクロセルの集積構造化や精緻なインターフェース構築のための製造プロセス技術を開発。そして、これらの技術を統合することにより、次世代型セラミックリアクターとしてのプロトタイプモジュール実証 (出力性能2 kW/L等)を行う。

##### 研究開発期間

2005年度～2009年度

#### (5) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発 (運営費交付金)

##### 概要

水素の製造・輸送・貯蔵等に係る機器やシステムについて、性能・信頼性・耐久性の向上や低コスト化を目指す水素利用技術の研究開発を行い、水素社会の実現に必要な基盤技術の確立を図る。

##### 技術目標及び達成時期

2012年度までに、水素製造・貯蔵・輸送・充填に関する機器やシステムの信頼性・耐久性向上、低コスト化、性能向上等実用化検証や要素技術開発、及び当該技術を飛躍的に進展させることができる革新的技術開発や調査研究などを行い、その成果を産業界に提供することにより、水素エネルギー初期導入間近の関連機器製造・普及技術として完成させ、水素社会の真の実現に必要な基盤技術の確立を図る。

##### 研究開発期間

2008年度～2012年度

#### (6) 水素貯蔵材料先端基盤研究事業 (運営費交付金)

##### 概要

世界トップ水準の優れた研究者を中核に、国内外の研究機関・企業のバーチャルな連携の下、高圧水素貯蔵に比べよりコンパクトかつ効率的な水素貯蔵を可能とする水素貯蔵材料の性能向上に必要な条件等を明らかにすることにより、燃料電池自動車の航続距離の飛躍的向上を図る。

##### 技術目標及び達成時期

2011年度までに、水素貯蔵材料の基本原則、さらには水素貯蔵能力の革新的向上に必要な条件を明らかにすることにより、水素をより安全・簡便・効率的かつ低コストに輸送・貯蔵するための技術基盤を確立する。



研究開発期間

2007年度～2011年度

(7) 水素先端科学基礎研究事業(運営費交付金)

概要

水素の輸送や貯蔵に必須な材料に関し、水素脆化等の基本原理の解明及び対策の検討を中心とした高度な科学的知見を要する先端的研究を、国内外の研究者を結集し行うことにより、水素をより安全・簡便に利用するための技術基盤を確立する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、水素脆化、水素トライボロジーの基本原理の解明及び対策の検討等を行い、水素をより安全・簡便に利用するための技術指針を産業界に提供する。

研究開発期間

2006年度～2012年度

(8) 水素社会構築共通基盤整備事業(運営費交付金)

概要

燃料電池の導入・普及に資する基盤整備のため、製品性能の試験・評価手法及び国内外の基準・標準の確立を図る。

技術目標及び達成時期

2009年度を目途に、安全性等に係るデータを取得し、そのデータを基に試験・評価手法の確立、国際標準の確立、規制の再点検を三位一体で進める。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(9) 固体酸化物形燃料電池実証研究(運営費交付金)

概要

発電効率が高く、分散型電源として期待される固体酸化物形燃料電池(SOFC)の研究開発・実用化の促進のため、耐久性を始めとしたデータの取得・課題抽出等のための実証を実施する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、SOFCシステムの実証試験を数十～数百台規模で実施し、蓄積が不足している耐久性を始めとした実証データの取得・課題抽出等を行い、SOFC技術開発等へのフィードバックを行う。

研究開発期間

2007年度～2010年度

( 1 0 ) 燃料電池システム等実証研究 ( 運営費交付金 )

概要

実条件に近い中での燃料電池自動車等の実証走行や、高圧水素貯蔵システム、多角的な燃料供給システムの検証を進め、水素エネルギー社会における水素利用の課題等を抽出するとともに、燃料電池・水素に対する国民的理解の醸成を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実使用条件下における技術的課題を抽出するとともに、環境特性、エネルギー総合効率、安全性、耐久性等に関する基準・標準に資するデータを取得し、燃料電池自動車、水素ステーションの研究開発等へのフィードバックを行う。

研究開発期間

2006年度～2010年度

( 1 1 ) 将来型燃料高度利用技術開発 ( 4 - - 参照 )

4 - . 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

4 - - . 軽水炉・軽水炉核燃料サイクル

< 新型軽水炉 >

( 1 ) 次世代軽水炉等技術開発

概要

2030年前後に見込まれる大規模な代替炉建設需要に対応するため、安全性・経済性、信頼性等に優れ、世界標準を獲得し得る次世代軽水炉の技術開発を行う

技術目標及び達成時期

2010年度までに、次世代軽水炉の実現に必要な要素技術開発等及びプラント概念の成立性について見通しを得るための概念設計検討を行う。

研究開発期間

2008年度～2010年度 ( 見直し )

< 軽水炉使用済燃料再処理技術の高度化 >

( 2 ) 使用済燃料再処理事業高度化

概要

再処理施設で用いられるガラス固化技術について、より多くの白金族元素等を含む高レベル廃液を溶融可能な新しい性状のガラスを開発するとともに、これに対応しうる新型の溶融炉を開発することにより、我が国の使用済燃料再処理技術の高度化を図る。新型ガラス溶融炉の開発に際しては、六ヶ所再処理工場の運転経験を反映する研究もあわせ行う。

技術目標及び達成時期

より多くの白金族元素等を含む高レベル廃液を溶融可能なガラス及び溶融炉の開発等によって、より高品質のガラス固化体を製造可能なガラス固化技術を開発する。

また、本事業によって開発されたガラス固化技術を、5年程度で更新が計画されている日本原燃株式会社六ヶ所再処理工場のガラス溶融炉及び同工場のガラス固化施設の運転に反映させる。

研究開発期間

2009年度～2011年度

#### < プルサーマルの推進 >

##### (3) 全炉心混合酸化物燃料原子炉施設技術開発

概要

プルサーマルが当面のプルトニウム利用策として期待されていることを踏まえ、既存の軽水炉に比べ約3倍のプルトニウムを装荷することができる全炉心混合酸化物燃料原子炉に必要な技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、原子炉の開発に必要な設計、解析、試験等を行い、全炉心混合酸化物燃料原子炉技術を確立する。

研究開発期間

1996年度～2011年度

#### < 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの円滑な移行のための技術開発 >

##### (4) 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発

概要

FBR実証炉及び関連サイクル施設の早期実現を図るため、文部科学省と連携し、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」を推進する。そのなかで、次世代再処理工場から発生する高線量回収ウラン等を既存軽水炉燃料製造施設で取扱可能とする、次世代再処理工場と調和可能な回収ウラン等の除染技術について、調査・基礎試験等を行い、商業的に利用可能な除染技術候補の検討等を実施する。選定された技術については、プロセス試験等を実施する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、回収ウラン等の除染プロセスの候補技術の洗い出し及び候補プロセス技術の基礎試験を終了し、次世代再処理技術との適合性の検証を行い、プロセス試験を実施すべき除染プロセス技術を選定する。

また、2015年までに、選定した除染プロセス技術について工学化規模でのプロセス試験を行い、商業的に利用可能な転換前高除染技術としての実効性を検証する。

研究開発期間

2007年度～2015年度

#### < ウラン濃縮技術の高度化 >

##### (5) 遠心法ウラン濃縮技術開発

概要

我が国におけるウラン濃縮技術や生産能力の維持・向上のため、世界最高水準

の性能を有するなど国際的に比肩し得る経済性と性能を有する新型遠心分離機を開発する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、国際役務価格\$100/kg SWU相当を目指して、現在実用化している金属胨遠心分離機の約5倍という高い分離性能や同遠心分離器を上回る寿命など国際的に比肩し得る技術レベルを有する新型遠心分離機の開発を目指すとともに、最終仕様の新型遠心分離機を多数台用いたカスケード試験の実施により商用プラントとしての信頼性を確立し、運転要領の策定を行う。

研究開発期間

2002年度～2009年度

#### < 回収ウラン >

##### (6) 回収ウラン利用技術開発

概要

六ヶ所再処理工場で回収される回収ウランを再濃縮し、再び軽水炉で利用するため、濃縮施設等既存施設への影響等を把握し、転換プロセスを中心とした回収ウラン利用技術を開発する。併せて劣化ウラン酸化固形化についても検討を行う。

技術目標及び達成時期

2012年頃までに、劣化ウランの取扱・管理の容易さや貯蔵効率を向上させるための劣化ウラン酸化固形化（再転換を含む）技術の研究開発を行い、同技術に係る基礎プロセスを確立する。2015年度頃までに、再処理により回収される回収ウランの濃縮が可能な商用遠心分離機的设计を確定する。

研究開発期間

2008年度～2015年度

#### < 共通基盤技術開発 >

##### (7) 革新的実用原子力技術開発

概要

第4世代原子力システムに関する国際フォーラム（GIF）や国際原子力エネルギー・パートナーシップ（GNEP）等の国際協力枠組みにおいて国際連携による研究開発が提案されている技術分野や、近年希薄化が懸念される原子力を支える基盤技術分野について、産業界の参画やニーズ提示のもと、大学等が実施する研究活動への支援や将来の原子力人材の育成を実施しており、各分野の目的に沿った革新的な技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度まで、基盤技術分野、国際協力技術分野において個別テーマ毎に研究開発を実施する。

研究開発期間

2000年度～2011年度（見直し）

#### 4 - - . 高速増殖炉（FBR）サイクル

##### （1）発電用新型炉等技術開発

###### 概要

FBR実証炉及び関連サイクル施設の早期実現を図るため、文部科学省と連携し、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」を推進する。具体的には、実証炉に必要な要素技術のうち、設計・建設段階において必要となる実プラント技術として、格納容器設計技術、耐震性評価技術、高温材料設計技術、保守・補修技術、大型構造物製作技術の試験等を実施する。

###### 技術目標及び達成時期

2010年度までに、実証炉の概念設計へ反映しうる設計基準データ等の技術的根拠を得る。

###### 研究開発期間

2007年度～2010年度

##### （2）高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発（4 - - 参照）

#### 4 - - . 放射性廃棄物処理処分

##### （1）地層処分技術調査等

###### 概要

###### ）地層処分共通技術開発

高レベル放射性廃棄物等の地層処分における共通的技術として、今後段階的に進められる処分地選定の際に重要となる地質等調査技術の高度化開発を行う。

###### ）高レベル放射性廃棄物関連処分技術開発

高レベル放射性廃棄物処分に係る基盤技術として、人工バリア等の長期性能評価技術、処分場操業の際のオーバーパック溶接や搬送・定置等の遠隔操作技術の開発を行う。

###### ）TRU廃棄物処分関連技術開発

TRU廃棄物の地層処分に係る基盤技術として、高レベル放射性廃棄物との併置処分の可能性も念頭に、TRU廃棄物に固有に含まれる核種の閉じ込め技術や人工バリア等の長期性能評価技術の開発を行う。

###### 技術目標及び達成時期

###### ）地層処分共通技術開発

2011年度までに、処分地選定の初期段階で必要となる地上からの調査技術のうち、特に沿岸域の環境や高精度での地下水評価等に係る調査評価技術の高度化・確証を行う。

###### ）高レベル放射性廃棄物関連処分技術開発

2011年度までに、人工バリア等の長期性能評価技術や遠隔操作等の工学技術について高度化を図り、幅広い地質環境に対応可能な技術選択肢と成立性を提示する。

###### ）TRU廃棄物処分関連技術開発

2011年度までに、TRU廃棄物に固有に含まれるヨウ素129や炭素1

4の閉じ込め、高アルカリ環境下での人工バリアの性能評価等に関し、幅広い地質環境に対応可能なデータ・モデルの整備と技術選択肢の提示を行う。

研究開発期間

1998年度～2011年度

(2) 管理型処分技術調査等

) 地下空洞型処分施設性能確認試験

概要

T R U廃棄物や発電所廃棄物等の余裕深度処分において検討されている「地下空洞型処分施設」の成立性確認のため、実規模大の空洞を利用した総合的な確認試験を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、実規模大の空洞内にコンクリートピット等からなる地下空洞型処分施設を構築し、施工性や初期性能の総合的な確認を行う。

研究開発期間

2006年度～2011年

(3) 放射性廃棄物共通技術調査等

概要

) 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査

放射性廃棄物処分に係る国内外の最新知見の収集・分析、重要かつ基礎的な課題の抽出並びに研究を実施し、長期に及ぶ処分事業等を支える技術基盤の拡充を図る。

) 放射性核種生物圏移行評価高度化調査

放射性廃棄物処分の安全評価に共通的な基盤情報として、生物圏における核種移行プロセスを評価するため、日本の風土を反映した核種移行パラメータ・モデルを整備する。

技術目標及び達成時期

) 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査

2011年度までに、放射性廃棄物処分に共通的な重要基礎技術として、地質環境の長期安定性評価、人工バリアや岩盤の長期挙動評価等に係る知見を整備する。

) 放射性核種生物圏移行評価高度化調査

2011年度までに、沿岸域の環境も含めたわが国表層環境への適用とT R U廃棄物に固有の核種等を考慮した、生物圏核種移行のモデルとデータベースを構築する。

研究開発期間

2001年度～2011年度

#### 4 - - . 原子力利用推進に資する電力系統技術

##### (1) イットリウム系超電導電力機器技術開発(運営費交付金)

###### 概要

世界的にも我が国が最先端の技術力を有する次世代高温超電導線材を活用し、経済社会の基盤となる電力の安定的かつ効率的な供給システムを実現するため、系統を適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な送電技術の確立を目指す。

###### 技術目標及び達成時期

2012年度までに、イットリウム系超電導線材を用いたSME S、電力ケーブル、変圧器実現のための重要な技術開発を行い、各機器の成立性を実証する。

###### 研究開発期間

2008年度～2012年度

##### (2) 高温超電導ケーブル実証プロジェクト(運営費交付金)

###### 概要

革新的な高効率送電技術を確立して高温超電導ケーブルの実用化を促進するため、工業生産プロセスで実用化レベルに達している高温超電導線材(DI-BSCCO等)を活用し、首都圏の系統に接続する実証試験及び評価を行う。

なお、本事業は、発電用施設による電気の供給の円滑化を図る観点から行うものである。

###### 技術目標及び達成時期

2011年度までに、200MVA級の中間接続部を有した三心一括型高温超電導ケーブルを、冷却装置や保護装置などの付帯設備とともに66KV実系統に接続して、12ヶ月以上の長期連系試験を行うことによって総合的な安全性や信頼性を実証する。

###### 研究開発期間

2007年度～2012年度

#### 4 - - . その他電力供給安定化技術

##### (1) 大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証事業(運営費交付金)

###### 概要

大規模太陽光発電を電力系統に連系した場合に課題となる系統安定化対策やピーク対策のための技術等を開発するとともに、その有効性を実証する。

また、国内外の先進的な次世代技術の価格性能を比較することを通じて技術開発を加速する。

###### 技術目標及び達成時期

2010年度までに、下記の実証研究を行い、その有効性を確認する。

- (イ) 蓄電池等を組み合わせた出力変動抑制システムの有効性。
- (ロ) 発電出力のピーク制御(午後のピーク帯へのシフト)の有効性。
- (ハ) 大型インバータによる高調波抑制システムの有効性。
- (ニ) 国内外メーカーの太陽電池モジュールの特性比較を行い、性能、経済性等

を比較・検証。

研究開発期間

2006年度～2010年度

## (2) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)

概要

蓄電池技術は、新エネルギーの出力安定化や燃料電池自動車(FCEV)・ハイブリッド自動車(HEV)・電気自動車(EV)等の高効率次世代自動車に共通する重要なコア技術である。そこで、高性能蓄電システムに係る要素技術開発、新材料開発及び基盤技術の開発を行う。

A．系統連系円滑化蓄電システム技術開発

B．次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発

技術目標及び達成時期

A．2010年度末において、寿命10年、コスト4万円/kWh、1MW規模のシステムおよび要素技術の確立と2030年において寿命20年、コスト1.5万円/kWh、20～30MW規模の蓄電システムを見通せる技術開発。また、新エネルギー対応の充放電パターン等、基礎データの整備、大型化に伴う安全性や寿命等の評価手法の確立。

B．2011年度末において、電池開発では、0.3kWhモジュールを作製し、重量エネルギー密度100Wh/kg、出力密度2000W/kg、寿命10年、コスト4万円/kWhを達成すること(条件:3kWhの組電池、100万台生産ベース)。電池構成材料及び電池反応制御技術の開発では重量エネルギー密度200Wh/kg、出力密度2500W/kg、コスト3万円/kWhを小型単電池で達成すること(上記と同条件)。たま、電池周辺機器開発では、格段の高性能化、コンパクト化、低コスト化を達成すること。さらに、重量エネルギー密度500Wh/kgを見通せる新規概念・構造の蓄電池基礎開発の他、劣化・寿命診断法、安全性評価などの各種試験法等の開発およびそれら共通基盤技術の基準・標準化。

研究開発期間

2007年度～2011年度

## (3) 発電プラント用超高純度金属材料の開発(運営費交付金)

概要

超高純度金属材料を発電設備の蒸気配管等に実用化することを目指し、高純度金属材料の高度化に向けた低コスト・量産化製造技術を開発し、実使用環境における超高純度金属材料の耐久性試験等を行う。

なお、本事業は、発電用施設における電気の供給の円滑化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2009年までに、不純物総量100ppm未満、溶解量数100kg以上の低コスト・量産化技術製造技術を開発するとともに、製造された超高純度材料が発電プ



ラントの各種機器に適用でき、本材料の持つ優れた特性を長期に亘って発揮できることを確認する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

#### 4 - . 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

##### 4 - - . 石油・天然ガス・石炭の探鉱・開発・生産技術

###### (1) 石油・天然ガス開発・利用促進型大型/特別研究(運営費交付金)

概要

石油及び可燃性天然ガス資源の開発に係る技術の振興を図る観点から、大水深、複雑な地層といった悪条件化が進む石油・天然ガスの探鉱・開発技術、利用拡大が見込まれる天然ガス田の開発促進に資する天然ガス有効利用技術等について、短期間で実用化が期待され、民間ニーズに直結した研究開発を提案公募により実施する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、我が国の石油・天然ガスの探鉱・開発技術力の向上、及び天然ガスの利用の促進に向けた天然ガスの有効利用技術の開発を行う。

研究開発期間

2001年度～2012年度

###### (2) 石炭生産技術開発

概要

石油代替エネルギーである石炭の安定供給を図るため、発熱量が低いものの低灰分、低硫黄といった特徴を有する低品位炭の有効利用を目的として、低品位炭の発熱量を高め、自然発火性を抑制する低品位炭改質技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、3500～5000kcal/kgの発熱量の低品位炭を瀝青炭並みの6000kcal/kg以上に改質する低品位炭改質技術を開発し、600t/d大型実証プラントでの製造技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

###### (3) 石油精製物質等簡易有害性評価手法開発(運営費交付金)

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から、石油製品等に含まれる化学物質によるリスクを把握し、必要な対策を適切に行うことを可能とするため、*in vitro*培養系技術等の活用により遺伝子組換え細胞等を用いた*in vitro*系簡易有害性予測手法、また、トキシコゲノミクスを活用した短期動物試験結果と相関する遺伝子発現データセットを開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、遺伝子導入技術、幹細胞分化誘導技術、生物発光技術等

を適用した培養細胞を用いて、試験期間1ヶ月程度、発がん性、催奇形性及び免疫毒性を予測評価できる試験手法を開発し、また、遺伝子発現解析技術を短期動物試験に適用し、28日間反復投与試験結果と相関する遺伝子発現データセットを完成させる。また、標準的な試験プロトコルを策定する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

#### (4) 石油資源遠隔探知技術の研究開発

概要

我が国が開発・運用する多様な地球観測センサ(ASTER、PALSAR等)の地球観測データを用いて、石油・天然ガス等の安定供給確保のため、資源開発・探査、環境観測等に有効なデータの処理解析手法の研究開発を行う。また、地球観測データのような大容量のデータを容易に扱えるシステムの研究開発を実施することで資源開発・探査、環境観測を含む多様な分野でのリモートセンシングの利用拡大を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、資源開発・探査、環境観測等の分野における地球観測データ処理・解析技術の向上及び地球観測データの利用の拡大を図る。

研究開発期間

1981年度～2010年度

#### (5) ハイパースペクトルセンサ等の研究開発(運営費交付金)

概要

資源開発に有効な岩石・鉱物や地質構造解析の高次元解析を可能とするハイパースペクトルセンサの開発を行うとともに、軌道上におけるデータ取得の実証を行い、センサ技術の確立を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までにスペクトル分解能200バンド前後のハイパースペクトルセンサを開発し、地表面のスペクトル情報を取得して資源開発に有効なセンサ技術の実証を行う。

研究開発期間

2007年度～2011年度

#### (6) 次世代合成開口レーダ等の研究開発

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から行うものであり、石油及び可燃性天然ガス資源等の開発に資するため、資源探査能力を格段に向上した合成開口レーダである次世代合成開口レーダ(PALSAR)の健全性評価やセンサを維持することにより、取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

#### 技術目標及び達成時期

PALSAARの開発、健全性の評価・維持を実施することにより、2010年度までに、レーダ技術の高度化（アンテナ指向の電子制御化、分解能の向上、多偏波観測等）を図る。

#### 研究開発期間

1993年度～2010年度

### (7) 極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発

#### 概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から行うものであり、石油及び可燃性天然ガス資源等の開発に資するため、資源探査能力を格段に向上した光学センサである資源探査用将来型センサ（ASTER）の健全性評価やセンサを維持することにより、取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

#### 技術目標及び達成時期

ASTERの開発、健全性の評価・維持を実施することにより、2010年度までに、センサ技術の高度化（ポインティング機能の追加、分解能の向上、熱センサの搭載等）を図る。

#### 研究開発期間

1987年度～2010年度

## 4 - - . 石油・天然ガスの有効利用技術

### (1) 石油燃料次世代環境対策技術開発

#### 概要

バイオマス燃料から製造した石油製品が自動車排出ガスに及ぼす影響、新たな自動車燃焼技術（自着火燃焼（着火までに燃料と空気を十分に混合し、その混合気体を点火プラグの使用なしで圧縮することにより着火させる燃焼法でNOx排出低減、熱効率が高い等の利点がある））に適応した燃料に関する技術開発を実施する。

また、建設機械、発電機等のオフロードエンジンの排ガスによる環境負荷低減や石油燃焼機器の効率的な利用を進めるための技術開発を実施する。

#### 技術目標及び達成時期

バイオマス燃料の利用時における、燃料と自動車エンジン技術の両面の影響評価を進め、技術的課題を解決し、運輸部門における燃料多様化を目指す。

また、オフロードエンジンの規制は欧米が先行していることから、2012年頃、欧米において規制強化が予定されている排ガス規制に対応した技術を確立し、我が国における規制強化に対応可能な燃焼技術を実現することを目指す。

#### 研究開発期間

2002年度～2011年度

## (2) 石油精製高度機能融合技術開発

### 概要

石油精製業を中心とする石油コンビナート全体の横断的かつ高度な運営機能の融合を図り、単独企業のみでは達成困難なコンビナート域内の省資源、省エネルギーの向上を進めるため、異業種異企業間における限りある貴重なエネルギー資源の利用効率の高い生産技術に関し技術の開発・実証を行う。

### 技術目標及び達成時期

2009年度までに、我が国における他のコンビナートへの波及効果を含め、CO<sub>2</sub>排出量を63万トン/年削減可能とする技術を確立する。

### 研究開発期間

2006年度～2009年度

## (3) 将来型燃料高度利用技術開発

### 概要

省エネ、二酸化炭素削減効果が見込まれる燃料電池自動車の燃料である高純度(99.99%以上)水素を安定的かつ経済的に供給することは重要である。石油は、その長所として豊富な水素供給余力と安価な水素製造技術及び全国に展開した災害に強いガソリンスタンドを保有している。これら石油の長所を活かした水素供給システムの確立により、水素社会の早期実現に貢献するものである。本事業では、製油所からの高純度水素供給技術開発とガソリンスタンドを拠点とする高純度水素製造技術開発を行う。

### 技術目標及び達成時期

コスト低減のため製油所におけるナフサから高効率(80%以上)な高純度水素製造を可能とする新たな技術を開発する。また、供給地のガソリンスタンドにおいて有機ハイドライドから高純度の水素を高効率(80%)に取り出すための水素発生装置を開発する。また、脱硫後の灯油硫黄分を検出限界以下の10ppb以下とする脱硫剤の開発を行うとともに、貴金属使用量を2-3wt%から0.5wt%以下まで低減しても、従来と同等の高い性能が維持できる改質触媒を開発する。さらに、膜分離型反応器を用いた99.99%高純度水素の製造効率を80%、4万時間の耐久性が期待できる水素製造システムを開発する。

### 研究開発期間

2008年度～2010年度

## (4) 革新的次世代石油精製等技術開発

### 概要

原油価格の高騰・高止まりや原油の重質化と製品需要構造変化等の石油を巡る大きな環境変化のなか、連産品である石油製品を今後とも長期的に安定化かつ効率的に供給するためには、製油所の更なる高度化に向けた技術の開発実用化が必要である。このため、非在来型原油を含めた重質油を原料として、製油所におけるボトムレス化、余剰となる分解留分の高付加価値等のためのプロセスや触媒技術等の開発を行う。また、次世代の技術シーズ創出のため、これまでの技術とは

異なる発想により我が国唯一の革新的な新規触媒研究、新規膜分技術研究、新規製造プロセス研究等を産官学の連携等により実施する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに重質油対応型高過酷度接触流動分解技術(HS-FCC)については、3千BD規模(商業レベルの1/10規模)の実証研究を通じ、プロピレン収率20%以上(既存技術4%程度)、将来不足が予想される高オクタン価ガソリン基材(RON98(既存技術92程度))の製造を可能とする技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

#### (5) 次世代高信頼性ガスセンサー技術開発

概要

一酸化炭素中毒やガス漏れなどのガス事故を限りなくゼロに近づけるため、センサー素子のナノレベルでのメカニズム解析及び開発設計を行い、コードレスで高信頼性を有する次世代高信頼性ガスセンサ(COセンサ・メタンセンサ)を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、最先端のナノテクノロジー及びMEMS技術を導入し、電池駆動で5年以上の長寿命、高信頼性(数百ppm以下の故障率)、低コストなCOとメタンのセンサを開発する。

研究開発期間

2008年度～2011年度

#### (6) 天然ガスの液体燃料化(GTL)技術実証研究(運営費交付金)

概要

硫黄等を含まず排出ガスがクリーン、着火性が高いという特徴を有することから石油系燃料代替として期待されるGTLについて、天然ガス中に含まれるCO<sub>2</sub>を除去せず、原料として積極的に活用することから、従来利用が困難であったCO<sub>2</sub>を多く含むガス田からの天然ガスが利用可能、CO<sub>2</sub>除去装置が不要であることによる生産設備コストの低減が可能、といった強みを有する我が国独自のGTL製造技術の確立を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実証プラントによる運転研究(500バレル/日)を行い、商業規模でのGTL製造技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

#### (7) 石油・天然ガス開発・利用促進型大型/特別研究(運営費交付金)(4 - - 参照)

#### (8) 高効率ガスタービン実用化技術開発(4 - - 参照)

#### 4 - - .メタンハイドレート等非在来化石資源の利用技術

##### (1)メタンハイドレート開発促進委託費

###### 概要

日本周辺海域に相当量の賦存が見込まれ、国産のクリーンなエネルギー資源として有望なメタンハイドレートを利用可能とするため、資源量評価手法、生産手法及び環境影響評価手法等の確立のための技術開発を行う。

###### 技術目標及び達成時期

2016年度までに、商業的産出のための技術を整備することを目指し、日本周辺海域におけるメタンハイドレートの賦存状況と特性の明確化、有望賦存海域からのメタンハイドレート資源フィールドの選択及び現場産出試験等による生産手法の確立等を推進する。

###### 研究開発期間

2001年度～2016年度

##### (2)革新的次世代石油精製等技術開発(4 - - 参照)

#### 4 - - .石炭クリーン利用技術

##### (1)革新的ゼロエミッション石炭火力発電プロジェクト

###### 概要

石炭の高効率な利用を図るために、

- ・ 酸素吹きによる石炭ガス化発電の開発実証及び化学吸収法によるCO<sub>2</sub>の分離・回収技術の実証
- ・ 石炭ガス化発電からCCSまで一貫したトータルシステムの設計等
- ・ 次世代IGCC(石炭ガス化複合発電)など革新的な石炭ガス化技術にかかる先進基盤研究

を行う。

###### 技術目標及び達成時期

2009年度までに、パイロットプラントにおいて、高圧の石炭ガスからCO<sub>2</sub>の分離・回収技術の確立及びガス化炉の信頼性向上へ向けて、3炭種以上の適応炭種拡大試験を実施する。

###### 研究開発期間

2007年度～2012年度

##### (2)国際革新的ゼロエミッション石炭火力発電プロジェクト補助金

###### 概要

石炭火力発電から排出されるCO<sub>2</sub>の削減技術について諸外国との実証事業等を実施し、当該技術の普及基盤を整備することにより、エネルギー供給に対する環境上の制約を取り除き、もって我が国エネルギー需給構造の安定化を図る。

###### 技術目標及び達成時期

石炭ガス化技術等実証普及事業では、海外において取り組みが進められているゼロエミッション型石炭火力発電の石炭ガス化・発電技術、CO<sub>2</sub>分離回収技術、

CO<sub>2</sub>輸送貯留技術等に関する情報収集や関連する技術調査の実施等により、我が国におけるゼロエミッション型石炭火力発電の実用化開発に資する技術・知見を得る。

酸素燃焼国際共同実証事業では、既存の微粉炭火力発電の改造による酸素燃焼方式のゼロエミッション型石炭火力発電プラントの実用化を目標とするものであり、既存のプラントの改造により対応可能であること、酸素燃焼を行うことにより、燃焼ガスからCO<sub>2</sub>を分離する装置が不要であることから、比較的低コストで極めて大きなCO<sub>2</sub>削減効果が期待できる。

石炭火力発電原油増進回収国際共同事業では、2008年5月の日中首脳会談で合意された「日中間でのCCS-EOR（二酸化炭素の回収・貯留、石油増進回収法）協力」に係る日中共同事業として、中国における石炭火力発電CCS-EOR事業の事前調査としてCCS-EORの有効性確認、CCS-EORの経済性・事業実現性等を検討する。これらにより、多量のCO<sub>2</sub>排出削減を実現するモデルの構築、世界のCO<sub>2</sub>排出削減への貢献が期待出来る。

研究開発期間

2007年度～2016年度

### (3) 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発費補助金

概要

従来の超々臨界圧火力発電（USC）は、蒸気温度の最高温度は630程度が限界で、送電端熱効率も42～43%が原理的限界といわれてきた。しかしながら、近年の材料技術の進歩により、700以上の蒸気温度を達成できる可能性が見えてきたことから、これらの材料を活用した先進超々臨界圧火力発電技術（A-USC）の開発を行うものである。A-USCは、蒸気温度700級で46%、750級で48%の高い送電端熱効率の達成が可能な技術であり、2020年以降増大する経年石炭火力発電のリプレース需要に対応するため、早急に技術開発を進める必要がある。そのため、ボイラーメーカー、タービンメーカー及び材料メーカーが共同でA-USCの技術開発に取り組む。

技術目標及び達成時期

平成22年度までにシステム基本設計を完了し、シミュレーションにより送電端熱効率46%～48%の達成が可能なことを確認する。平成24年度までにボイラー、タービン部材等が700以上の蒸気温度に耐えられるかどうかを試作、評価し、経済性を含めたシステム成立性への見通しを得る。平成27年～平成28年度に実缶試験、回転試験を実施し、蒸気温度700以上の条件下でボイラー、タービンの信頼性を確認する。また、ボイラー、タービン部材について3万～7万時間の長期信頼性試験を実施し材料特性を検証する。

研究開発期間

2008年度～2016年度

(4) 石炭利用技術開発(一部、運営費交付金)

概要

環境適合的な石炭利用の拡大を図るため、石炭利用プロセスにおける環境影響を低減させる手法の開発等、クリーン・コール・テクノロジーの開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、

- ・ 化学原料等に利用可能な合成用ガスを石炭乾留ガスから無触媒で製造する技術をパイロットプラントで確立する(無触媒石炭乾留ガス改質技術開発)。

2011年度までに、

- ・ 石炭利用プロセスにおいて、環境分析技術の高精度化、環境影響成分の挙動解析のためのモデルの構築等により、環境への影響低減手法を開発する(戦略的炭化ガス化・燃焼技術開発)。

研究開発期間

1995年度～2011年度

- ・ 戦略的炭化ガス化・燃焼技術開発 2007年度～2011年度
- ・ 無触媒石炭乾留ガス改質技術開発 2006年度～2009年度

(5) 噴流床石炭ガス化発電プラント開発費補助金

概要

供給安定性に優れた石炭の高効率かつ低環境負荷での利用を図るため、石炭をガス化して燃料とし、コンバインドサイクル(ガスタービンと蒸気タービンの組合せ)を駆動する高効率発電技術(石炭ガス化複合発電技術(IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle)の実証試験を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、25万kWの実証機を用いた実証試験により、熱効率40.5%(送電端、高位発熱量ベース)を目指す。この目標は50万kWの商用機における熱効率46～48%に相当する。本技術は実証試験終了後の2010年度より商用化が可能である。

研究開発期間

1999年度～2009年度

(6) 資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発(運営費交付金)(4 - 参照)



4 - - . その他・共通

- ( 1 ) 新エネルギー技術実用化補助事業 ( 運営費交付金 )( 4 - - 参照 )
- ( 2 ) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業 ( 運営費交付金 )( 4 - - 参照 )
- ( 3 ) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発 ( 運営費交付金 )( 4 - - 参照 )
- ( 4 ) 燃料電池先端科学研究 ( 運営費交付金 )( 4 - - 参照 )
- ( 5 ) 固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発 ( 運営費交付金 )( 4 - - 参照 )
- ( 6 ) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発 ( 運営費交付金 )( 4 - - 参照 )
- ( 7 ) 水素貯蔵材料先端基盤研究 ( 運営費交付金 )( 4 - - 参照 )
- ( 8 ) 水素社会構築共通基盤整備事業 ( 運営費交付金 )( 4 - - 参照 )
- ( 9 ) 水素先端科学基礎研究事業 ( 運営費交付金 )( 4 - - 参照 )
- ( 10 ) 固体酸化物形燃料電池実証研究 ( 運営費交付金 )( 4 - - 参照 )
- ( 11 ) 燃料電池システム等実証研究 ( 運営費交付金 )( 4 - - 参照 )

## 5．政策目標の実現に向けた環境整備（成果の実用化、導入普及に向けた取組）

### 5 - ．総合エネルギー効率の向上

- 事業者単位の規制体系の導入
- 住宅・建築物に係る省エネルギー対策の強化
- セクター別ベンチマークの導入と初期需要創出（高効率機器の導入補助等）
- トップランナー基準の対象機器の拡充等
- アジアにおける省エネルギー対策の推進を通じた我が国の国際競争力の向上
- 国民の省エネルギー意識の高まりに向けた取組

### 5 - ．運輸部門の燃料多様化

- 公共的車両への積極的導入
- 燃費基準の策定・改定
- アジアにおける新エネルギー協力
- 国際標準化による国際競争力向上

### 5 - ．新エネルギー等の開発・導入促進

- 補助金等による導入支援
- 新エネルギーベンチャービジネスに対する支援の拡大
- 新エネルギー産業構造の形成
- 電気事業制度・ガス事業制度の在り方の検討

### 5 - ．原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保

- 電力自由化環境下での原子力発電の新・増設の実現
- 資源確保戦略の展開
- 次世代を支える人材育成
- 中小型炉の海外市場への展開、我が国原子力産業の国際展開支援
- 原子力発電拡大と核不拡散の両立に向けた国際的枠組み作りへの積極的関与
- 国と地域の信頼強化

### 5 - ．化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

- 資源国等との総合的な関係強化（研究開発の推進・協力、人材育成・技術移転、経済関係強化など）
- 化石燃料のクリーンな利用の開拓

## 6．研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金による実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

また、事業名に（採択テーマ）と記載された事業は、提案公募事業により採択されたテーマを記載したものであり、その採択や評価等は、提案公募事業の実施機関の責任の下、実施されるものである。

## 7. 改訂履歴

- (1) 平成16年7月7日付け、省エネルギー技術開発プログラム基本計画、新エネルギー技術開発プログラム基本計画、燃料技術開発プログラム基本計画、電力技術開発プログラム基本計画、原子力技術開発プログラム基本計画制定。固体高分子形燃料電池/水素エネルギー利用プログラム基本計画(平成16・02・03産局第6号)は、新エネルギー技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (2) 平成17年3月31日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第8号) 新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第10号) 燃料技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第12号) 電力技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第11号) 原子力技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第13号)は、廃止。
- (3) 平成18年3月31日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第14号) 新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第9号) 燃料技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第17号) 電力技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第12号) 原子力技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第13号)は、廃止。また、次世代低公害車技術開発プログラム基本計画(平成17・03・29産局第2号)は、省エネルギー技術開発プログラム基本計画及び燃料技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (4) 平成19年4月2日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成17・03・31産局第19号) 新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第15号) 燃料技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第18号) 電力技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第17号) 原子力技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第16号)は、廃止。
- (5) 平成20年4月1日付け、エネルギーイノベーションプログラム基本計画制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成19・03・26産局第1号) 新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成19・03・20産局第4号) 燃料技術開発プログラム基本計画(平成19・03・19産局第7号) 電力技術開発プログラム基本計画(平成19・03・16産局第3号) 原子力技術開発プログラム基本計画(平成19・03・23産局第2号)は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (6) 平成21年4月1日付け制定。エネルギーイノベーションプログラム基本計画(平成20・03・25産局第5号)は廃止。



(新エネルギー技術開発プログラム／次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発)

「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発」基本計画(案)

燃料電池・水素技術開発部

## 1. 研究開発の目的・目標・内容

### (1) 研究開発の目的

我が国におけるエネルギー供給の安定化・効率化、地球温暖化問題(CO<sub>2</sub>)・地域環境問題(NO<sub>x</sub>、PM等)の解決のためには、国全体として省エネルギーを推進するとともに、新エネルギー技術の開発、コスト削減及び利便性や性能の向上に積極的に取り組むことが極めて重要である。

特にエネルギー消費量の増加が著しい運輸部門における石油依存度は、ほぼ100%の状況であり、今後、エネルギーの効率的な利用、石油代替エネルギーへの移行により、石油依存度を低減していく必要性が指摘されている。それゆえ、石油依存度を低減し、多様なエネルギーでかつ低環境負荷で走行することができる燃料電池自動車、電気自動車、プラグインハイブリッド自動車等の次世代クリーンエネルギー自動車の開発、普及が期待されている。

政府の第3期科学技術基本計画(2006年3月閣議決定)においては、「先進燃料電池システムと安全な革新的水素貯蔵・輸送技術」や「電源や利用形態の制約を克服する高性能電力貯蔵技術」が戦略重点科学技術として選定されている。また、経済成長戦略大綱(2006年7月財政・経済一体改革会議決定)においても、次世代自動車向け電池や運輸エネルギーの次世代技術開発が重点分野として位置付けられている。

本研究開発は、このような背景のもと、新エネルギー技術の開発等によってエネルギー供給の安定化・効率化、地球温暖化問題(CO<sub>2</sub>)等を含む地球環境問題の解決、新規産業・雇用の創出、水素エネルギー社会の実現等を図ることを目的とする「新エネルギー技術開発プログラム」の一環として実施する。

本研究開発は、ハイブリッド車、電気自動車、燃料電池自動車等の早期実用化に資するために、高性能かつ低コストな二次電池及びその周辺機器の開発を行うことを目的とする。

本研究開発により、高性能リチウムイオン電池とその構成材料並びに周辺機器(モーター、電池制御装置等)の開発、新規の概念に基づく革新的な電池の構成とそのための材料開発、および電池反応制御技術の開発、更に加速寿命試験法の開発、劣化要因の解明、電池性能向上因子の抽出、並びに、安全性基準および電池試験法基準の策定等が実現され、燃料電池自動車等の早期実用化へ貢献することが期待される。

### (2) 研究開発の目標

[最終目標] (平成23年度末)

本研究開発においては、高性能な蓄電システムの要素技術開発、現状のリチウムイオン電池等の技術レベルをブレークスルーするための新材料等の次世代技術開発、耐久性評価・安全性試験方法の確立等の基盤技術開発を実施することにより、2015年において現状の蓄電池性能(注)の概ね1.5倍以上、コスト1/7を可能とする次世代クリーンエネルギー自動車の

実用化を促進すること。及び2030年を目処に、現状の蓄電池性能（注）の概ね7倍を見通す革新的蓄電池技術への基礎確立を目標とする。

なお、研究開発項目毎の具体的な目標は、別紙の研究開発計画に示す。

（注）現状の蓄電池性能（下記の数値は、容量3kWh程度の電池パックを想定した値）

- ・電池システム重量エネルギー密度：70Wh/kg
- ・電池システムコスト：20万円/kWh

〔中間目標〕（平成21年度末）

中間目標は、採択決定後に独立行政法人新エネルギー・産業技術総合研究機構（以下「NEDO技術開発機構」という）と委託先との間で最終目標を踏まえ、協議して決定する。

### （3）研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき、研究開発を委託により実施する。

- ①要素技術開発：高性能リチウムイオン電池とその構成材料並びに周辺機器（モーター、電池制御装置等）の開発。
  - 1）電池開発：2015年を目途に、別紙の目標特性を有するリチウムイオン電池の実用化を目指すための電池開発を行う。
  - 2）電池構成材料開発および電池反応制御技術の開発：2015年以降での実用化を目途に、高性能なリチウムイオン電池の構成材料の開発、基本原理の解明などを行う。
  - 3）周辺機器開発：格段の高性能化（高効率化・軽量化・コンパクト化）に資する電池制御やモーター等の周辺機器の技術開発を行う。
- ②次世代技術開発：革新的な二次電池の構成とそのための材料開発、及び電池反応制御技術の開発。

2030年以降を念頭に、革新的な二次電池を開発する。電池の反応制御技術、新規の概念に基づく電池の構成材料等の研究開発を実施する。
- ③基盤技術開発：加速寿命試験法の開発、劣化要因の解明、電池性能向上因子の抽出、並びに、安全性基準および電池試験法基準の策定等。

現状のリチウムイオン電池における寿命診断、電池性能評価・安全性試験方法などの基準策定や規格化に資する提案とデータ取得を行う。さらに、技術開発の効率化につながる反応メカニズムの解析手法の確立等、共通・基盤的な技術開発を行う。

## 2. 研究開発の実施方式

### （1）研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDO技術開発機構が、単独又は複数の企業、研究組合、公益法人、大学、国研等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点から国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない。）から公募によって研究開発実施者を選定後、業務委託契約等を締結

する研究体制を構築し、委託により実施する。

## (2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDO技術開発機構は、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標並びに本研究開発の目的及び目標に照らし適切な運営管理を実施する。具体的には、「系統連系円滑化蓄電システム技術開発」事業と連携し「次世代蓄電池システム実用化戦略的技術開発」全般を効果的・効率的に推進するためのアドバイザリーボードを設置した上で、研究開発推進のため、必要に応じて外部有識者の意見・助言を求める。また必要に応じて、NEDO技術開発機構に委員会や技術検討会等を設置し、四半期に一回程度、プロジェクトの進捗について報告を受けるなどを行う。さらに、年に一回程度、事業の効率的な推進、情報や認識の共有等を目的に、本事業の実施者による報告会を開催する。

## 3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成19年度から平成23年度までの5年間とする。

## 4. 評価に関する事項

NEDO技術開発機構は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果などについて、外部有識者による研究開発の中間評価を平成21年度に、事後評価を平成24年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じてプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係わる技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて前倒しする等、適宜見直すものとする。

## 5. その他の重要事項

### (1) 研究開発成果の取り扱い

#### ①成果の普及

得られた研究開発の成果（特に下記共通基盤技術に係る研究開発成果）については、NEDO技術開発機構、実施者とも普及に努めるものとする。

- a) 加速寿命試験法
- b) 安全性基準および電池試験法基準

#### ②知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備または標準化等との連携を図るため、データベースへのデータの提供、標準情報（TR）制度への提案等を積極的に行う。

#### ③知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第 26 条の規定等に基づき、原則として、すべて受託者に帰属させることとする。

## (2) 基本計画の変更

NEDO 技術開発機構は、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、産業技術政策動向、プログラム基本計画の変更、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

## (3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第 15 条第 1 項第 1 号ハに基づき実施する。

## 6. 基本計画の改訂履歴

(1) 平成 19 年 3 月、制定。



## (別紙) 研究開発計画

### 研究開発項目①「要素技術開発」

#### 1. 研究開発の必要性

蓄電池技術は、燃料電池自動車、電気自動車、プラグインハイブリッド自動車等の次世代クリーンエネルギー自動車に共通するコア技術であり、多様な自動車エネルギー技術の中でも基盤的な性格を持つ。

そこで、これらの次世代クリーンエネルギー自動車の早期実用化を促進するために、リチウムイオン電池等の高性能化・低コスト化のための要素技術開発、および電池制御装置やモーター等の格段の高性能化に資する周辺機器の技術開発を行う。

#### 2. 研究開発の具体的内容

要素技術開発では、下記の3つの領域での開発を行う。

- 1) 電池開発：0.3kWh 級モジュールを作製し、2015年を目途に、目標値の特性を有するリチウムイオン電池の実用化を目指すための電池開発を行う。
- 2) 電池構成材料及び電池反応制御技術の開発：小型実用単電池を作製し、2015年以降での実用化を目途に、高性能なりチウムイオン電池の構成材料の開発、電池反応制御技術の開発、および基本原理の解明などを行う。
- 3) 周辺機器開発：格段の高性能化（高効率化・軽量化・コンパクト化）に資する電池制御やモーター等の周辺機器の技術開発を行う。

具体的には、以下のような技術開発課題に関する研究開発テーマを公募し、NEDO技術開発機構からの委託研究として実施する。

#### <技術開発課題の例示>

##### 1) 電池開発

###### a.各種電池材料の高性能化

- ・正極・負極材料：電極組成（活物質等の選択及び組成）、並びに、電極構造（充填性や粉体特性）の最適化等。
- ・電解質材料：化学的安定性の向上等。
- ・セパレータ材料：熱的安定性の向上、薄膜化及び機械的強度の向上等。

###### b.モジュール化のための技術開発

- ・寿命判定技術の検討、熱制御技術及び充放電制御技術の開発等。

###### c.低コスト化

- ・正極材料の化学組成の検討及びセパレータの低コスト化等。

## 2) 電池構成材料及び電池反応制御技術の開発

### a. 各種リチウムイオン電池材料等の高性能化

- ・ 正極・負極材料：充放電容量の向上、高出力化手法開発（導電材との複合化等）及び高安全性非酸化物電極の開発等。
- ・ 電解質材料：広い電位窓を有する無機固体電解質・複合電解質の検討及びイオン性液体の可能性の検討等。
- ・ 電池反応：高速化・高深度化等。

### b. 低コスト化

- ・ 正極材料のコバルトフリー化等。

## 3) 周辺機器開発

格段の高性能化、コンパクト化および低コスト化を実現するモーター・制御装置および急速充電システム等の技術開発。

### <運営方法>

- ・ 初年度に公募により実施者を選定するが、2年目以降も必要に応じて公募を行う。
- ・ “2) 電池構成材料開発及び電池反応制御技術の開発”については、研究開発の進捗に応じて、“1) 電池開発”の実施者等との連携を求める場合がある。
- ・ 安全性の技術開発目標については、研究開発項目③「基盤技術開発」の安全性試験法や安全性評価基準策定の進捗に応じて、内容の高度化や具体化を求める場合がある。

## 3. 達成目標

下記目標値を基本とするが、各委託研究の目標（中間目標及び最終目標）は、提案者が公募時に研究開発テーマとともに提案し、採択決定後にNEDO技術開発機構と協議のうえ個別に実施計画に定める。

### <開発目標>

#### 1) 電池開発

0.3kWh級モジュールを作製し、以下の目標（性能目標は3kWh級パック電池の換算値）を満足すること。

- ・ 重量エネルギー密度：100Wh/kg
- ・ 重量出力密度：2000W/kg
- ・ 体積エネルギー密度：120Wh/L
- ・ 体積出力密度：2400W/L
- ・ 寿命：10年以上
- ・ 充放電効率：95%以上
- ・ コスト：4万円/kWhの見通しを示すこと（100万パック/年生産時）
- ・ 安全性：車載時の濫用に耐えること

## 2) 電池構成材料及び電池反応制御技術の開発

小型単電池を作製し、以下の目標（性能目標は 3kWh 級パック電池の換算値）を満足すること。但し、エネルギー密度と出力密度は、少なくともどちらか一方を満足し、他方については見通しを示すこと。

なお、下記エネルギー密度及び出力密度のパック値から単電池への換算は、2006年 8 月経済産業省報告書「次世代自動車用電池の将来に向けた提言」  
<<http://www.meti.go.jp/report/data/g60824bj.html>>を参照のこと。

- ・ 重量エネルギー密度：200Wh/kg 以上
- ・ 重量出力密度：2500W/kg 以上
- ・ コスト：3 万円/kWh 以下の見通しを示すこと（100 万パック/年生産時）
- ・ 安全性：車載時の濫用に耐えること

## 3) 周辺機器開発

格段の高性能化、コンパクト化、低コスト化を目標とする。ただし、数値目標は各周辺機器や開発内容によって異なるため、提案内容を踏まえて、採択決定後に N E D O 技術開発機構と協議のうえ個別に実施計画に定める。

## 研究開発項目②「次世代技術開発」

### 1. 研究開発の必要性

次世代の蓄電池に要求される、コスト、寿命、安全性、エネルギー密度、出力密度等での圧倒的な性能向上のためには、現状の技術レベルの延長線上にある技術開発だけでなく、新たな電池系の提案や構成材料レベルでのブレークスルーが期待できる新しい原理・構造の技術開発が不可欠である。そこで、現状レベルでのコストや性能向上の見通しを打破するような新規の正極、負極材料や電解質等、材料レベルの革新的な技術開発等を実施する。

### 2. 研究開発の具体的内容

2030年頃において、パック電池レベルで重量エネルギー密度 700Wh/kg 以上という革新的な性能を実現することを目指して、現状の技術レベルの延長線上にない、経済性、性能面でのブレークスルーが期待できる新しい材料（正極、負極、電解質等）や新しい電池系（合金系、金属系等）の基礎研究開発を実施する。

具体的には、以下のような技術開発課題に関する研究開発テーマを公募し、NEDO 技術開発機構からの委託研究として実施する。

#### <技術開発課題の例示>

下記の研究とその動作検証等。

- ・ 金属-硫化物系電池及び金属-空気系電池
- ・ 電池反応速度の制御及び電極界面制御技術
- ・ 新規概念に基づいた革新的な電池の構成材料

#### <運営方法>

- ・ 原則として毎年度、研究テーマを公募する。
- ・ 各研究テーマについては2年目に技術評価を実施し、3年目以降の研究継続の可否を判断する。

### 3. 達成目標

下記目標値を基本とするが、各委託研究の目標（中間目標及び最終目標）は、提案者が公募時に研究開発テーマとともに提案し、採択決定後にNEDO技術開発機構と協議のうえ個別に実施計画に定める。

#### <開発目標>

2030年頃において、パック電池レベルで重量エネルギー密度 700Wh/kg 以上という革新的な性能を実現することを目指し、本事業の終了時点で、重量エネルギー密度

500Wh/kg を見通せる電池構成材料及び電池反応制御技術の開発。

## 研究開発項目③「基盤技術開発」

### 1. 研究開発の必要性

高性能蓄電池の実用化にあたっては、安全性を確保するとともに標準化を進め、研究開発の効率化を図ることが重要である。

よって、蓄電池における寿命予測、耐久性、安全性試験方法の確立や標準化、技術開発の効率化につながる電池性能を向上させる因子の解明や反応メカニズムの解析手法の確立等、基盤的な技術開発を行う。

### 2. 研究開発の具体的内容

蓄電池における寿命予測、耐久性、安全性試験方法の確立や標準化、技術開発の効率化につながる電池性能を向上させる因子の解明や反応メカニズムの解析手法の確立等、基盤的な技術開発を行う。

具体的には、以下のような技術開発課題に関する基盤技術開発テーマを公募し、NEDO技術開発機構からの委託研究として実施する。

#### <技術開発課題の例示>

- ・寿命診断：加速寿命診断法の確立（5倍以上）及び高SOC(State Of Charge)時(例：80%)の電池劣化機構の解明と抑制手法の開発等。
- ・充放電評価試験法：車載走行パターンを想定した負荷試験法の確立等。
- ・安全性試験法：数kWh級電池システムの安全性評価基準の策定等。

### 3. 達成目標

下記目標値を基本とするが、各委託研究の目標（中間目標及び最終目標）は、提案者が公募時に研究開発テーマとともに提案し、採択決定後にNEDO技術開発機構と協議のうえ個別に実施計画に定める。

#### <開発目標>

- ・加速寿命診断法の確立。
- ・高SOC保存時、高温保存時、高出力時、長期サイクル時等の劣化要因の解明とその抑制手法の提案。
- ・車載用電池安全性試験法の策定。
- ・電池性能を向上させる因子の解明。

#### <運営方法>

- ・初年度に公募により実施者を選定するが、必要に応じて2年目以降も公募を行う。

- ・ 安全性試験法や安全性評価基準の策定については、研究開発項目①「要素技術開発」における安全性技術開発の進捗に応じて、内容の変更や修正を求める場合がある。

以上

## 事前評価書

作成日		平成19年2月15日
1. 事業名称 (コード番号)	「次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発／ 次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発」	
2. 推進部署名	燃料電池・水素技術開発部	
3. 事業概要	<p>(1)概要:</p> <p>現在、運輸部門の石油依存度は、ほぼ 100%の状況であり、今後、エネルギーの効率的な利用、石油代替エネルギーへの移行により、石油依存度を低減していく必要性が指摘されている。それゆえ、石油依存度を低減し、多様なエネルギーでかつ低環境負荷で走行する燃料電池自動車、電気自動車、ハイブリッド自動車等の普及が期待されているが、ハイブリッド自動車の高性能化、および、燃料電池自動車、電気自動車の早期実用化には、高性能蓄電池技術開発が重要となる。</p> <p>こうした状況を一体的に改善する技術として、蓄電池を中心とする電力貯蔵技術の飛躍的な性能向上と低コスト化が不可欠であり、本事業では、次世代自動車用高性能蓄電システムに係る要素技術開発、新材料等の次世代技術開発及び基盤技術開発を行う。</p> <p>①「要素技術開発」(100%委託)</p> <p>1)電池開発:2015年を目処に、高性能リチウムイオン電池の実用化を目指す。</p> <p>2)電池構成材料開発及び電池反応制御技術の開発:2015年以降での実用化を目処に、高性能なリチウムイオン電池の構成材料の開発、基本原理の解明などを行う。</p> <p>3)周辺機器開発:格段の高性能化(高効率化・軽量化・コンパクト化)に資する電池制御やモーター等の周辺機器の技術開発を行う。</p> <p>②「次世代技術開発」(100%委託)</p> <p>2030年以降を念頭に、革新的な二次電池を開発する。電池の反応制御技術、新規の概念に基づく電池の構成材料等の研究開発を実施する。</p> <p>③「基盤技術開発」(100%委託)</p> <p>現状のリチウムイオン電池における寿命診断、電池性能評価・安全性試験方法などの基準策定や規格化に資する提案とデータ取得を行う。さらに、技術開発の効率化につながる反応メカニズムの解析手法の確立等、共通・基盤的な技術開発を行う。</p> <p>(2)事業規模:平成19年度 17億円(委託研究)</p> <p>(3)事業期間:平成19年度～23年度(5年間)</p>	
4. 評価の検討状況		



#### (1)事業の位置付け・必要性

経済産業省が、2006年5月にとりまとめた新・国家エネルギー戦略において、運輸部門などにおけるエネルギー戦略上の数値目標を定めている。そこでは、運輸部門の石油依存度を、現状のほぼ100%から2030年までに80%程度まで引き下げるとの目標を掲げている。また、部門横断的な目標として、省エネ目標を掲げており、我が国のエネルギー効率(GDPあたりのエネルギー消費原単位)を2030年までに現状から30%向上させることとしている。

このようにエネルギー制約が高まる中で自動車エネルギー技術は多様化し、今後は、電気を駆動力源(一部の場合を含む)とする、燃料電池自動車・ハイブリッド自動車・電気自動車や、クリーンディーゼル自動車等の既存技術の更なるクリーン化、化石燃料から代替燃料への移行、といった様々な技術体系の間での競争が進み、技術革新が加速されると見込まれている。

こうした中で、電池技術は、燃料電池自動車・ハイブリッド自動車・電気自動車等に共通するコア技術であり、多様な自動車エネルギー技術の中でも基盤的な性格を持つ。

本事業では、蓄電池を中心とする電力貯蔵技術の飛躍的な性能向上と低コスト化を目的とした技術開発を実施する。

なお、本技術開発は、新エネルギー技術開発プログラムに則って推進する予定である。

## (2) 研究開発目標の妥当性

車載用として必要な高エネルギー密度化、高出力密度化、長寿命化、低コスト化、高安全性を目指して以下のような目標値を設定する。いずれも車載レベル(3kWh 級パック電池を想定)で設定するが、次世代自動車用高性能蓄電システムとして難易度の高い目標であり、妥当である。

### ①「要素技術開発」に関して

#### 1) 電池開発(0.3kWh 級モジュールを作製)

- ・重量エネルギー密度:100Wh/kg
- ・重量出力密度:2000W/kg
- ・寿命:10年以上
- ・充放電効率:95%以上
- ・コスト:4万円/kWhの見通しを示すこと(100万パック/年生産時)
- ・安全性:車載時の濫用に耐えること

#### 2) 電池構成材料及び電池反応制御技術の開発(小型単電池を作製)

- ・重量エネルギー密度:200Wh/kg以上
- ・重量出力密度:2500W/kg以上
- ・コスト:3万円/kWh以下の見通しを示すこと(100万パック/年生産時)
- ・安全性:車載時の濫用に耐えること

#### 3) 周辺機器開発

- ・格段の高性能化、コンパクト化、低コスト化

### ②「次世代技術開発」に関して

2030年頃において、パック電池レベルで重量エネルギー密度700Wh/kg以上という革新的な性能を実現することを目指し、本事業の終了時点で、重量エネルギー密度500Wh/kgを見通せる電池構成材料及び電池反応制御技術を開発する。

### ③「基盤技術開発」に関して

- ・加速寿命診断法の確立。
- ・高SOC保存時、高温保存時、高出力時、長期サイクル時等の劣化要因の解明とその抑制手法の提案。
- ・車載用電池安全性試験法の策定。
- ・電池性能を向上させる因子の解明。

## (3) 研究開発マネジメント

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDO技術開発機構は、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標並びに本研究開発の目的及び目標に照らし適切な運営管理を実施する。具体的には、「系統連係円滑化蓄電システム技術開発」事業と連携し「次世代蓄電池システム実用化戦略的技術開発」全般を効果的・効率的に推進するためのアドバイザーボードを設置した上で、研究開発推進のため、必要に応じて外部有識者の意見・助言を求める。また必要に応じて、NEDO技術開発機構に委員会や技術検討会等を設置し、四半期に一回程度、プロジェクトの進捗について報告を受けるなどを行う。さらに、年に一回程度、事業の効率的な推進、情報や認識の共有等を目的に、本事業の実施者による報告会を開催する等を行う予定であり、マネジメント体制として妥当である。

#### (4) 研究開発成果

我が国における蓄電池産業は、これまでの国における先進的な技術開発および民間企業における自主開発の結果、世界市場において優位な状況であるが、昨今の韓国、中国等における市場シェアの伸びも予断を許さない状況であり、現在の競争力を維持、発展させるためにも長期的な視点で技術開発を進める必要がある。

本事業により、自動車用蓄電システム技術の格段の進展が達成された場合、次世代自動車の早期実用化に資することとなり、その波及効果は大きい。

#### (5) 実用化・事業化の見通し

ハイブリッド自動車の急速な市場拡大、燃料電池自動車の実証事業の伸展、さらにはコンピュータ型の電気自動車の市場投入が検討されている状況を鑑みると、蓄電技術の中でも、次世代自動車用の高性能電池システム技術が進展する事は、日本の電池産業の発展だけでなく、環境戦略やエネルギー戦略上も有益であり、新・国家エネルギー戦略の達成に大きく寄与すると考えられる。

#### (6) その他特記事項

「次世代自動車用電池の将来に向けた提言(2006年8月発行)」(経済産業省主催:新世代自動車の基礎となる次世代電池技術に関する研究会)を踏まえている。

#### 5. 総合評価

本事業は、次世代自動車の実現に不可欠な電池技術及び関連技術を開発するものであり、日本の電池産業や自動車産業の更なる発展だけでなく、環境戦略やエネルギー戦略に対しても大きく寄与すると考えられることから、実施する意義は大きい。

添付資料：特許論文リスト

(1) 特許リスト

【要素技術開発（電池モジュール）】

番号	出願人	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	(株)GS ユアサ	特願 2008-136535	国内	2008/5/26	取下	電気化学的活性材料用製造装置、電気化学的活性材料の製造方法及び非水電解質二次電池	江川崇 安永好伸 稲益徳雄
2		特願 2008-258312	国内	2008/10/3	出願	正極材料、正極材料の製造方法、及び該製造方法で製造された正極材料が備えられている非水電解質二次電池	河本真理子 田淵徹 稲益徳雄 村田利雄
3		特願 2008-283588	国内	2008/11/4	取下	電極材料製造装置、電極材料の製造方法及びリチウム二次電池の製造方法	安永好伸 江川崇 田淵徹 稲益徳雄
4		意願 2009-006539	国内	2009/3/24	登録	蓄電池	江川崇 稲益徳雄
5		意願 2009-006540	国内	2009/3/24	登録	蓄電池	江川崇 稲益徳雄
6		意願 2009-006541	国内	2009/3/24	登録	蓄電池	江川崇 稲益徳雄
7		特願 2009-155096	国内	2009/6/30	出願	電池	江川崇 稲益徳雄
8		12/504,165 (US)	米国	2009/7/17	出願	Cathode Material Manufacturing Method of Cathode Material, and Nonaqueous Electrolyte Secondary Batteries Provided with the Cathode Material	河本真理子 田淵徹 稲益徳雄 村田利雄
9		特願 2009-270790	国内	2009/11/27	出願	非水電解質二次電池	柴田洋平 鋤納功治 田淵徹 稲益徳雄
10		特願 2009-294986	国内	2009/12/25	擬制 取下	単電池およびこの単電池を用いた組電池	鋤納功治 中島修弘 渡辺勉 稲益徳雄

							富士松将克
11	意願 2009-030277	国内	2009/12/25	登録	電池用電槽ケ ース	鋤納功治 中島修弘 渡辺勉 稲益徳雄	
12	意願 2009-030278	国内	2009/12/25	登録	電池用電槽ケ ース	鋤納功治 中島修弘 渡辺勉 稲益徳雄	
13	意願 2009-030279	国内	2009/12/25	登録	電池用電槽ケ ース	鋤納功治 中島修弘 渡辺勉 稲益徳雄	
14	意願 2009-030288	国内	2009/12/25	登録	電池用電槽ケ ース	鋤納功治 中島修弘 渡辺勉 稲益徳雄	
15	特願 2010-082735	国内	2010/3/31	擬制 取下	非水電解質二 次電池	鋤納功治 田淵徹 稲益徳雄	
16	特願 2010-195195	国内	2010/8/31	出願	二次電池用活 物質及び二次 電池用活物質 の製造方法、並 びに、それを用 いた二次電池	藤野有希子 安永好伸 田淵徹 稲益徳雄	
17	特願 2010-222637	国内	2010/9/30	擬制 取下	単電池、電池モ ジュール及び 組電池	中島修弘 渡辺勉 稲益徳雄	
18	特願 2010-222639	国内	2010/9/30	出願	電池モジュー ル及び組電池	中島修弘 渡辺勉 稲益徳雄	
19	特願 2010-288372	国内	2010/12/24	出願	非水電解質二 次電池	鋤納功治 中島修弘 渡辺勉 稲益徳雄 富士松 将克	
20	特願 2011-076661	国内	2011/3/30	出願	非水電解質二 次電池	鋤納功治 田淵徹 稲益徳雄	
21	意願 2011-012450	国内	2011/6/11	登録	電池用電槽ケ ース	中島修弘	
22	特願 2011-138959	国内	2011/6/22	出願	電槽ケース、単 電池及び組電 池	中島修弘	
23	特願 2011-138960	国内	2011/6/22	出願	電槽ケース、単 電池及び組電 池	中島修弘	
24	特願 2011-213196	国内	2011/9/28	出願	電槽ケース、単 電池及び組電 池	中島修弘 渡辺勉 稲益徳雄	
25	特願 2011-216600	国内	2011/9/30	出願	単電池、電池モ ジュール及び 組電池	中島修弘 渡辺勉 稲益徳雄 松井裕樹	
26	特願 2011-275126	国内	2011/12/15	出願	非水電解質電 池用正極、それ	河本真理子 鋤納功治	

						を用いた非水電解質電池、及び、その電池を搭載したプラグインハイブリッド自動車	
1	日立製作所	特願 2008-041333	国内	2008/02/22	登録	リチウム二次電池	吉川他
2	日立ビークル エネルギー	特願 2008-105303	国内	2008/04/15	公開	非水電解液二次電池	小島他
3		特願 2008-118686	国内	2008/04/30	公開	電池モジュール	小熊他
4		特願 2008-149050	国内	2008/06/06	公開	巻回式二次電池及びその製法	小熊
5		特願 2008-175263	国内	2008/07/04	公開	非水電解液二次電池	月森他
6		特願 2008-175277	国内	2008/07/04	公開	二次電池	瀧本他
7		特願 2008-175598	国内	2008/07/04	公開	密閉式二次電池	小熊他
8		特願 2008-181554	国内	2008/07/11	公開	巻回式二次電池	小島
9		特願 2008-184597	国内	2008/07/16	公開	電池モジュール	小熊他
10		特願 2008-323412	国内	2008/12/19	公開	扁平形二次電池	小熊
11		特願 2009-046480	国内	2009/02/27	公開	非水電解液二次電池および非水電解液二次電池用電極	月森他
12		特願 2009-046481	国内	2009/02/27	公開	リチウム二次電池用正極およびリチウム二次電池	瀧本他
13		特願 2009-117038	国内	2009/05/13	公開	巻回式二次電池	小島
14		特願 2009-201435	国内	2009/09/01	公開	非水電解液二次電池	月森他
15		特願 2009-226215	国内	2009/09/30	公開	扁平巻回式二次電池	瀧本他
16		特願 2009-227582	国内	2009/09/30	公開	非水電解液二次電池による組電池	小島他
17		特願 2009-243242	国内	2009/10/22	公開	扁平形二次電池モジュール	小熊
18	日立製作所	特願 2009-268198	国内	2008/11/26	公開	リチウム二次電池	吉川他
19	日立製作所	特願 2009-269403	国内	2008/11/27	公開	リチウム二次電池用正極材およびそれを用いた電池	小西他
20	日立ビークル エネルギー	特願 2009-276233	国内	2009/10/22	公開	リチウム二次電池	月森
21	日立ビークル エネルギー	特願 2009-294005	国内	2009/12/25	公開	巻回式角形電池	小島
22	日立製作所	特願	国内	2009/02/27	公開	リチウム二次電池	小西他

		2009-45045				用正極材およびそれを用いたリチウムイオン二次電池	
23	日立ビークル エナジー	特願 2009-81657	国内	2009/3/30	公開	扁平形二次電池	小熊
24		特願 2010-144396	国内	2010/06/25	公開	非水電解液二次電池	小熊
25		特願 2010-144402	国内	2010/06/25	公開	非水電解液二次電池	小島
26	日立製作所	特願 2010-148424	国内	2010/06/30	公開	リチウムイオン二次電池	小西他
27	日立ビークル エナジー	特願 2010-162401	国内	2010/07/20	公開	二次電池	月森他
28		PCT/JP2010/0 05249	国内	2010/08/26	出願	非水電解液二次電池	月森他
29	日立製作所	特願 2010-225392	国内	2010/10/05	公開	リチウムイオン二次電池	小西他
30	日立ビークル エナジー	特願 2011-5494	国内	2011/01/14	出願	密閉型二次電池	小島
31		特願 2011-5495	国内	2011/01/14	出願	電池モジュール	月森
32		特願 2011-29327	国内	2011/02/15	出願	非水電解液二次電池	廣岡
33		特願 2011-30914	国内	2011/02/16	出願	非水電解液電池	廣岡他
34	日立製作所	特願 2011-37732	国内	2011/02/24	出願	リチウム二次電池	小西他
35		特願 2011-41218	国内	2011/02/28	出願	リチウム二次電池	小西他
36		特願 2011-41457	国内	2011/02/28	出願	リチウム二次電池	小西他
37		特願 2011-95567	国内	2011/04/22	出願	リチウムイオン二次電池および組電池	本棒他
38	日立ビークル エナジー	特願 2011-99142	国内	2011/4/27	出願	非水電解液電池	月森他
39		特願 2011-110072	国内	2011/05/17	出願	非水電解質電池	佐々木他
40		特願 2011-113114	国内	2011/05/20	出願	組電池及び角形電池	小島他
41	日立製作所	特願 2011-149033	国内	2011/07/07	出願	リチウム二次電池	小西他
42	日立ビークル エナジー	特願 2011-212533	国内	2011/09/28	出願	リチウム二次電池及びその製造方法	月森
43		特願 2011-224134	国内	2011/10/11	出願	角形非水電解液二次電池	小島
44	日立製作所	特願 2011-282722	国内	2011/12/26	出願	正極材およびリチウム二次電池	小西他
45	日立ビークル エナジー	特願 2012-020527	国内	2012/02/02	出願	扁平形二次電池	月森他
46		特願 2012-020531	国内	2012/02/02	出願	扁平巻回形二次電池及びその製造方法	小島他
47		特願 2012-031252	国内	2012/02/16	出願	非水電解液二次電池	廣岡他

1	パナソニック	特願 2007-286970	国内	2007/11/05	審査 請求	二次電池及びそ の製造方法	和田直之、他
2		特願 2008-069959	国内	2008/03/18	未請 求 取下	粉体物性測定方 法および粉体物 性測定装置	武野光弘、他
3		特願 2008-071474	国内	2008/03/19	擬制 取下	非水電解質二次 電池	岡田行広、他
4		特願 2009-010336	国内	2009/01/20	審査 請求	非水電解質二次 電池用正極活物 質の製造方法	藤田秀明、他
5		特願 2009-053357	国内	2009/03/06	審査 請求	非水電解質二次 電池用正極活物 質、その製造方 法、および非水 電解質二次電池	細川尚士、他
6		US12/403702	外国	2009/03/13	登録	粉体物性測定方 法および粉体物 性測定装置	武野光弘、他
7		特願 2009-064842	国内	2009/03/17	審査 請求	非水電解質二次 電池	岡田行広、他
8		PCT/JP2009/00 1211	PCT	2009/03/18	指定 国へ 移行 済	非水電解質二次 電池	岡田行広、他
9		PCT/JP2010/00 1445	PCT	2010/03/03	指定 国へ 移行 済	非水電解質二次 電池用正極活物 質、その製造方 法および非水電 解質二次電池	細川尚士、他
10		特願 2010-034965	国内	2010/02/19	擬制 取下	電源装置	細川尚士、他
11		PCT/JP2010/00 7295	PCT	2010/12/16	指定 国へ 移行 済	電池モジュール	細川尚士、他
12		特願 2010-034966	国内	2010/02/19	出願	電源装置	森垣健一、他
13		特願 2010-149871	国内	2010/06/30	出願	電池モジュール	湯淺真一、他
14		特願 2010-169070	国内	2010/07/28	出願	二次電池	大竹佑治、他
15		特願 2010-217260	国内	2010/09/28	出願	電源装置	細川尚士
16		特願 2010-289371	国内	2010/12/27	出願	電池モジュール	大竹佑治、他
17		特願 2011-005583	国内	2011/01/14	擬制 取下	リチウムイオン 二次電池の劣化 評価方法、及び 電池パック	森垣健一
18		特願 2011-016584	国内	2011/01/28	出願	二次電池	細川尚士、他
19		特願 2011-017542	国内	2011/01/31	出願	二次電池	大竹佑治、他



【要素技術開発（電池構成材料）】

1	日本合成化学工業(株)	特願 2008-49805	国内	2008/02/29	出願	電解質およびそれを用いたリチウム二次電池	早川誠一郎他
2		特願 2008-67098	国内	2008/03/17	出願	イオン液体、イオン液体の製造方法、電解質およびリチウム二次電池	早川誠一郎他
3		特願 2009-35121	国内	2009/02/18	出願	イオン液体、イオン液体の製造方法、電解質およびリチウム二次電池	早川誠一郎他
4		特願 2009-54672	国内	2009/03/09	出願	イオン液体、イオン液体の製造方法、電解質およびリチウム二次電池	早川誠一郎他
5		特願 2009-58930	国内	2009/03/12	出願	イオン液体、イオン液体の製造方法、電解質およびリチウム二次電池	早川誠一郎他
6		特願 2009-65665	国内	2009/03/18	出願	イオン液体、電解質およびそれを用いたリチウム二次電池	早川誠一郎他
7		特願 2010-288	国内	2010/01/05	出願	イオン液体、電解質およびリチウム二次電池	早川誠一郎他
8		PCT /JP2010/0544 62	PCT	2010/03/16	出願	イオン液体、電解質、それを用いたリチウム二次電池及びイオン液体	早川誠一郎他
9		特願 2010-60527	国内	2010/03/17	出願	イオン液体、電解質、それを用いたリチウム二次電池及びイオン液体	早川誠一郎他
10		特願 2010-141424	国内	2010/06/22	出願	電解質材料、リチウム二次電池用電解質、及び、それを用いたリチウム二次電池	早川誠一郎他
11		特願 2010-141425	国内	2010/06/22	出願	電解質及びそれを用いたリチウム二次電池	早川誠一郎他
12		特願 2011-265881	国内	2011/12/05	出願	イオン液体、電解質及びリチウム二次電池	早川誠一郎他

13	三菱化学㈱	特願 2009-190180	国内	2009/8/19	出願	非水系電解液 および非水系 電解液二次電 池	徳田浩之他
14		特願 2009-223809	国内	2009/9/30	出願	非水電解液お よび非水電解 液二次電池	徳田浩之
1	産業技術総合 研究所	特願 2008-018492	国内	2008/01/30	公開	規則構造を有 する単斜晶系 リチウムマン ガン系複合酸 化物およびそ の製造方法	田淵光春 他
2		特願 2008-073460	国内	2008/03/21	公開	マンガン酸化 物、電池用電極 活物質、及びそ れらの製造方 法、並びに電池 用電極活物質 を用いた二次 電池	秋本順二 他
3		特願 2008-073498	国内	2008/03/21	登録	マンガン酸化 物、二次電池用 電極活物質、及 びそれらの製 造方法、並びに 二次電池用電 極活物質を用 いたリチウム 二次電池	秋本順二 他
4		特願 2008-130293	国内	2008/05/19	公開	陽イオン規則 構造を有する 単斜晶系リチ ウムマンガン 系複合酸化物 およびその製 造方法	田淵光春 他
5	産業技術総合 研究所・田中化 学研究所	特願 2010-163060	国内	2010/07/20	国優 見なし取 下	リチウムマン ガン系複合酸 化物およびそ の製造方法	田淵光春 他
6		特願 2010-242064	国内	2010/10/28	公開	リチウムマン ガン系複合酸 化物およびそ の製造方法	田淵光春 他
7		特願 2010-242121	国内	2010/10/28	公開	立方晶岩塩型 構造を有する リチウムマン ガン系複合酸 化物およびそ の製造方法	田淵光春 他
8	産業技術総合 研究所	特願 2010-248144	国内	2010/11/05	公開	リチウムマン ガン系複合酸 化物-炭素複 合体およびそ の製造方法	竹内友成 他

9	産業技術総合研究所・田中化学研究所	特願 2011-055673	国内	2011/03/14	国優 見なし 取下	ナトリウムマンガンチタンニッケル複合酸化物及びその製造方法、並びにそれを部材として使用したナトリウム二次電池	石田直哉 他
10		特願 2011-055682	国内	2011/03/14	国優 見なし 取下	リチウムマンガンチタンニッケル複合酸化物及びその製造方法、並びにそれを部材として使用したリチウム二次電池	石田直哉 他
11		特願 2011-226352	国内	2011/10/14	出願	ナトリウムマンガンチタンニッケル複合酸化物及びその製造方法、並びにそれを部材として使用したナトリウム二次電池	石田直哉 他
12		特願 2011-226359	国内	2011/10/14	出願	リチウムマンガンチタンニッケル複合酸化物及びその製造方法、並びにそれを部材として使用したリチウム二次電池	石田直哉 他
13		特願 2011-244831	国内	2011/11/08	出願	リチウムマンガン系複合酸化物およびその製造方法	田淵光春 他
14		特願 2012-084456	国内	2012/04/03	出願	リチウムマンガン系複合酸化物およびその製造方法	今泉純一 他
15		特願 2012-129806	国内	2012/06/07	出願	リチウムマンガン複合酸化物、及びその炭素複合体	竹内友成 他
1	産業技術総合研究所	特願 2008-123630	国内	2008/5/9	出願	イオン液体	松本 一、寺澤直弘、都築誠二
2		特願 2008-231764	国内	2008/9/10	出願	イオン液体	松本 一、寺澤直弘、栄部比夏里、都築 誠二
3		PCT/JP2009/058579	PCT	2010/5/1	出願	イオン液体	松本 一、寺澤直弘、栄部比夏里、都築 誠二

4		PCT/JP2009/058581	PCT	2010/5/1	出願	イオン液体	松本 一、寺澤直弘、都築誠二
5		特願 2011-67390	国内	2011/3/25	出願	炭素負極を有する非水電解質リチウムイオン電池	松本 一、栄部比夏里、窪田啓吾
6		US 2011/0070486 A1	外国	2011/3/24	出願	IONIC LIQUIDS	松本 一、寺澤直弘、栄部比夏里、都築誠二
7		US 2011/0091769 A1	外国	2011/4/21	出願	IONIC LIQUIDS	松本 一、寺澤直弘、都築誠二
8		特願 2012-040964	国内	2012/2/28	出願	イオン液体	松本 一、窪田啓吾
9		特願 2012-056160	国内	2012/3/13	出願	リチウム二次電池	窪田啓吾、松本一
10		特願 2012-063183	国内	2012/3/21	出願	リチウムイオン電池用電解質	松本 一、窪田啓吾
1	日産自動車	特願 2007-322484	国内	平成 19 年 12 月 13 日	出願	負極構造体、リチウムイオン二次電池、および負極構造体の製造方法	
2		特願 2008-037515	国内	平成 20 年 2 月 19 日	出願	リチウムイオン電池	
3	日産自動車、神奈川大学	特願 2008-282199	国内	平成 20 年 10 月 31 日	出願	リチウムイオン電池とその使用方法	
4	日産自動車	特願 2009-060130	国内	平成 21 年 3 月 12 日	出願	二次電池用電極	
5	日産自動車	特願 2009-058118	国内	平成 21 年 3 月 11 日	出願	リチウムイオン二次電池	
6	日産自動車、神奈川大学	特願 2009-173538	国内	平成 21 年 7 月 24 日	出願	リチウムイオン電池用正極材料およびこれを用いたリチウムイオン電池	
7	日産自動車	特願 2009-173563	国内	平成 21 年 7 月 24 日	出願	リチウムイオン電池用正極材料の製造方法	
8	日産自動車、神奈川大学	特願 2009-100278	国内	平成 21 年 4 月 16 日	出願	リチウムイオン電池用正極	
9	日産自動車	特願 2009-270344	国内	平成 21 年 11 月 27 日	出願	リチウムイオン二次電池用 Si 合金負極活物質	
10	日産自動車	特願 2010-101103	国内	平成 22 年 4 月 26 日	出願	リチウムイオン二次電池	
11	日産自動車	特願 2009-270345	国内	平成 21 年 11 月 27 日	出願	リチウムイオン二次電池用 Si 合金負極活物質	

12	日産自動車、神奈川大学	特願 2009-276808	国内	平成 21 年 12 月 4 日	出願	リチウムイオン電池用正極材料およびこれを用いたリチウムイオン電池	
13	日産自動車	特願 2010-173886	国内	平成 22 年 8 月 2 日	出願	リチウムイオン二次電池用負極およびその製造方法	
14	日産自動車、神奈川大学	特願 2010-072366	国内	平成 22 年 3 月 26 日	出願	非水二次電池の製造方法	
15	日産自動車	特願 2010-201343	国内	平成 22 年 9 月 8 日	出願	リチウムイオン電池用正極およびこれを用いたリチウムイオン電池	
16	日産自動車	特願 2010-264123	国内	平成 22 年 11 月 26 日	出願	電気デバイス用 S i 合金負極活物質	
17	日産自動車	特願 2010-201347	国内	平成 22 年 9 月 8 日	出願	リチウムイオン電池用正極材料	
18	日産自動車	PCT/JP2010/071168	PCT	平成 22 年 11 月 26 日	出願	リチウムイオン二次電池用 S i 合金負極活物質	
19	日産自動車	特願 2011-543333	国内	平成 22 年 11 月 26 日	出願	電気デバイス用 S i 合金負極活物質	
20	日産自動車、神奈川大学	PCT/JP2010/071610	PCT	平成 22 年 12 月 2 日	出願	リチウムイオン電池用正極材料およびこれを用いたリチウムイオン電池	
21	日産自動車、神奈川大学	特願 2011-544295	国内	平成 22 年 12 月 2 日	出願	電気デバイス用正極材料およびこれを用いた電気デバイス	
22	日産自動車	特願 2011-050314	国内	平成 23 年 3 月 8 日	出願	リチウムイオン二次電池用負極活物質	
23	日産自動車	特願 2011-048813	国内	平成 23 年 3 月 7 日	出願	リチウムイオン二次電池用負極活物質、リチウムイオン二次電池用負極及びリチウムイオン二次電池	
24	日産自動車	特願 2011-046166	国内	平成 23 年 3 月 3 日	出願	リチウムイオン二次電池用複合正極活物質及びこれを	

						用いたリチウムイオン二次電池	
25	日産自動車	特願 2011-048640	国内	平成 23 年 3 月 7 日	出願	リチウムイオン二次電池の前処理方法及び使用方法	
26	日産自動車	特願 2011-046180	国内	平成 23 年 3 月 3 日	出願	リチウムイオン二次電池用正極活物質、リチウムイオン二次電池用正極及びリチウムイオン二次電池	
27	日産自動車	特願 2011-051227	国内	平成 23 年 3 月 9 日	出願	リチウムイオン二次電池用正極活物質	
28	日産自動車	特願 2011-116536	国内	平成 23 年 5 月 25 日	出願	電気デバイス用負極活物質	
29	日産自動車	PCT/JP2010/071169	PCT	平成 22 年 11 月 26 日	出願	リチウムイオン二次電池用 S i 合金負極活物質	
30	日産自動車	特願 2011-543334	国内	平成 22 年 11 月 26 日	出願	電気デバイス用 S i 合金負極活物質	
31	日産自動車	特願 2011-116671	国内	平成 23 年 5 月 25 日	出願	電気デバイス用負極活物質	
32	日産自動車	特願 2011-212627	国内	平成 23 年 9 月 28 日	出願	リチウムイオン二次電池用複合負極活物質	
33	日産自動車	特願 2012-037282	国内	平成 24 年 2 月 23 日	出願	正極活物質	
34	日産自動車	特願 2011-116707	国内	平成 23 年 5 月 25 日	出願	電気デバイス用負極活物質	
35	日産自動車	PCT/JP2011/055460	PCT	平成 23 年 3 月 9 日	出願	リチウムイオン二次電池	
36	日産自動車	特願 2011-116710	国内	平成 23 年 5 月 25 日	出願	電気デバイス用負極活物質	
37	日産自動車、神奈川大学	特願 2011-057446	国内	平成 23 年 3 月 16 日	出願	リチウムイオン二次電池の前処理方法	
38	日産自動車	特願 2011-148094	国内	平成 23 年 7 月 4 日	出願	電気デバイス用電極活物質、電気デバイス用電極及び電気デバイス	
39	日産自動車	特願 2011-259689	国内	平成 23 年 11 月 29 日	出願	リチウムイオン二次電池	
40	日産自動車	特願 2011-246141	国内	平成 23 年 11 月 10 日	出願	二次電池の制御装置および S O C 検出方法	
41	日産自動車	PCT/JP2011/063383	PCT	平成 23 年 6 月 10 日	出願	リチウムイオン二次電池用	

						負極およびその製造方法	
42	日産自動車	特願 2011-117073	国内	平成 23 年 5 月 25 日	出願	電気デバイス用負極活物質	
42	日産自動車	特願 2011-116891	国内	平成 23 年 5 月 25 日	出願	電気デバイス用の負極活物質、電気デバイス用の負極及び電気デバイス	
43	日産自動車	特願 2012-021998	国内	平成 24 年 2 月 3 日	出願	固溶体リチウム含有遷移金属酸化物及びリチウムイオン二次電池	
44	日産自動車	PCT/JP2011/072016	PCT	平成 23 年 9 月 27 日	出願	電気デバイス用 Si 合金負極活物質	
45	日産自動車	特願 2012-019873	国内	平成 24 年 2 月 1 日	出願	固溶体リチウム含有遷移金属酸化物、非水電解質二次電池用正極及び非水電解質二次電池	
46	日産自動車	特願 2012-019849	国内	平成 24 年 2 月 1 日	出願	固溶体リチウム含有遷移金属酸化物、非水電解質二次電池用正極及び非水電解質二次電池	
47	日産自動車	特願 2011-284655	国内	平成 23 年 12 月 27 日	出願	電気デバイス用負極活物質	
48	日産自動車	特願 2012-019876	国内	平成 24 年 2 月 1 日	出願	固溶体リチウム含有遷移金属酸化物組成物、非水電解質二次電池用正極及び非水電解質二次電池	
49	日産自動車	特願 2012-051171	国内	平成 24 年 3 月 8 日	出願	二次電池の制御装置および SOC 検出方法	
50	日産自動車	特願 2011-284660	国内	平成 23 年 12 月 27 日	出願	電気デバイス用負極活物質	
51	日産自動車	特願 2012-083801	国内	平成 24 年 4 月 2 日	出願	非水電解液及び電気化学デバイス	
52	日産自動車	特願 2012-019857	国内	平成 24 年 2 月 1 日	出願	固溶体リチウム含有遷移金属酸化物、非水電解質二次電池用正極及び非水電解質二次電池	

53	日産自動車	特願 2012-051168	国内	平成 24 年 3 月 8 日	出願	二次電池の制 御装置および S O C 検出方 法	
54	日産自動車	PCT/JP2012/0 55667	PCT	平成 24 年 3 月 6 日	出願	リチウムイオ ン二次電池用 負極活物質、リ チウムイオン 二次電池用負 極及びリチウ ムイオン二次 電池	
55	日産自動車	PCT/JP2012/0 55665	PCT	平成 24 年 3 月 6 日	出願	リチウムイオ ン二次電池用 負極活物質	
56	日産自動車、神 奈川大学	PCT/JP2012/0 55975	PCT	平成 24 年 3 月 8 日	出願	リチウムイオ ン二次電池の 前処理方法	
57	日産自動車	特願 2012-022002	国内	平成 24 年 2 月 3 日	出願	固溶体リチウ ム含有遷移金 属酸化物及び リチウムイオ ン二次電池	
58	日産自動車	特願 2011-227860	国内	平成 23 年 10 月 17 日	出願	電気デバイス 用負極活物質	
59	日産自動車	特願 2011-275668	国内	平成 23 年 12 月 16 日	出願	電気デバイス 用負極活物質	
60	日産自動車	PCT/JP2012/0 56128	PCT	平成 24 年 3 月 9 日	出願	電気デバイス 用負極活物質	
60	日産自動車	PCT/JP2012/0 56928	PCT	平成 24 年 3 月 16 日	出願	電気デバイス 用負極活物質	
61	日産自動車	特願 2012-050862	国内	平成 24 年 3 月 7 日	出願	正極活物質、電 気デバイス用 正極及び電気 デバイス	
62	日産自動車	特願 2012-050867	国内	平成 24 年 3 月 7 日	出願	正極活物質、電 気デバイス用 正極及び電気 デバイス	
63	日産自動車	特願 2012-050872	国内	平成 24 年 3 月 7 日	出願	正極活物質、電 気デバイス用 正極及び電気 デバイス	
64	日産自動車	特願 2012-050924	国内	平成 24 年 3 月 7 日	出願	正極活物質、電 気デバイス用 正極及び電気 デバイス	
65	日産自動車	特願 2012-050928	国内	平成 24 年 3 月 7 日	出願	正極活物質、電 気デバイス用 正極及び電気 デバイス	
66	日産自動車	特願 2012-050933	国内	平成 24 年 3 月 7 日	出願	正極活物質、電 気デバイス用 正極及び電気 デバイス	
67	日産自動車、神 奈川大学	特願 2012-073879	国内	平成 24 年 3 月 28 日	出願	リチウムイオ ン二次電池、そ	



						の前処理方法及び使用方法	
1	第一工業製薬株式会社 学校法人関西大学	特願 2010-64172	国内	2010.3.19	出願	イオン液体を用いたリチウム二次電池	杉本敏規 他
2	第一工業製薬株式会社 学校法人関西大学 エレクトセル株式会社	特願 2011-227086	国内	2011.10.14	出願	イオン液体を用いた非水系電解液およびリチウム二次電池	杉本敏規 他
1	九州大学	特願 2008-086113	国内	2008/3/28	出願	フッ化物電極活物質	岡田重人、山木準一 他
2	九州大学	特願 2009-112162	国内	2009/5/1	審査請求中	非水電解質二次電池用正極の製造方法及びそれを用いた非水電解質二次電池	岡田重人、山木準一 他
3	三菱重工業株式会社	特願 2010-212226	国内	2010/9/22	出願	二次電池の製造方法	弦巻 茂、 木藪敏康他
4	三菱重工業株式会社	特願 2011-056704	国内	2011/3/15	出願	電極活物質およびこれを備えた二次電池用正極並びに二次電池	野口良典、弦巻茂
5	三菱重工業株式会社	特願 2011-056705	国内	2011/3/15	出願	二次電池用正極およびこれを備えた二次電池	弦巻茂、 野口良典
6	三菱重工業株式会社	特願 2011-056793	国内	2011/3/15	出願	二次電池用正極およびこれを備えた二次電池	弦巻 茂、 野口良典
7	九州大学	特願 2011-070785	国内	2011/3/28	出願	正極活物質およびその製造方法	岡田重人、山木準一 他
8	三菱重工業株式会社	特願 2012-043420	国内	2012/2/29	出願	リチウムイオン二次電池の製造方法及びリチウムイオン二次電池	弦巻 茂、 野口良典、渡辺郁美
9	三菱重工業株式会社	特願 2012-043421	国内	2012/2/29	出願	リチウム二次電池用正極活物質およびリチウム二次電池	渡辺郁美、弦巻 茂、 野口良典
4	戸田工業(株)	特願 2009-209731	国内	2009/9/10	公開	非水電解質二次電池用 Li-Ni 複合酸化物粒子粉末及びその製造方法、並びに非水電解	菊谷 山時 貞村 他

						質二次電池	
6	戸田工業(株)	20108004331 4.X	外国	2010/9/28	公開	正極活物質粒子粉末及びその製造方法、並びに非水電解質二次電池	石崎 菊谷 山時 貞村 他
7	戸田工業(株)	10820498.3	外国	2010/9/28	公開	正極活物質粒子粉末及びその製造方法、並びに非水電解質二次電池	石崎 菊谷 山時 貞村 他
8	戸田工業(株)	20127007878	外国	2010/9/28	公開	正極活物質粒子粉末及びその製造方法、並びに非水電解質二次電池	石崎 菊谷 山時 貞村 他
12	戸田工業(株)	特願 2010-220377	国内	2010/9/30	公開	正極活物質粒子粉末及びその製造方法、並びに非水電解質二次電池	石崎 菊谷 山時 貞村 他
15	戸田工業(株)	特願 2010-263802	国内	2010/11/26	公開	非水電解質二次電池用正極活物質粒子粉末及びその製造方法、並びに非水電解質二次電池	菊谷 石崎 山時 貞村

【要素技術開発（周辺機器）】

1	徳島大学	特願 2006-177352 PCT/JP2006/3 12833	国内 PCT	2006/6/	登録	電力変換制御装置、電力変換制御方法、および電力変換制御プログラム	大西徳生 山中建二 合田英治
1	三菱電機(株)	特願 2009- 004750	国内	2009/ 01/13	出願	電気二重層キャパシタ用電極の製造方法、電気二重層キャパシタ及び電気二重層キャパシタの電極層形成用水系スラリー	相原茂他
2	三菱電機(株)	特願 2009- 089860	国内	2009/ 04/02	出願	DC/DC コンバータ	原田茂樹他
3	三菱電機(株)	特願 2009- 108207	国内	2009/ 04/27	出願	回転電機及びその製造方法	谷良浩他
4	三菱電機(株)	特願 2009- 139864	国内	2009/ 06/11	出願	蓄電デバイス	白神昭他
5	三菱電機(株)	特願 2009- 203485	国内	2009/ 09/03	出願	扁平巻回形電力貯蔵デバイスセルおよび扁平巻回形電	光田憲朗他

						力貯蔵デバイス スモジュール	
6	三菱電機(株)	特願 2009- 227448	国内	2009/ 09/30	出願	ランデル型回 転機	井上正哉他
7	三菱電機(株)	特願 2009- 250099	国内	2009/ 10/30	出願	扁平巻回形電 力貯蔵デバイ スモジュール	光田憲朗他
8	三菱電機(株)	特願 2009- 277524	国内	2009/ 12/07	出願	回転電機	守田正夫他
9	三菱電機(株)	特願 2010- 010311	国内	2010/ 01/20	出願	蓄電デバイス 用電極の製造 方法および蓄 電デバイス	相原茂他
10	三菱電機(株)	PCT/ JP2010/ 055243	PCT	2010/ 03/25	出願	DC/DC コンバ ーター (優先権 PCT 出願 [特願 2009-089860] )	原田茂樹他
11	三菱電機(株)	特願 2010- 137528	国内	2010/ 03/29	出願	ランデル型回 転機	黒田洋一他
12	三菱電機(株)	特願 2010- 098197	国内	2010/ 04/21	出願	回転電機及び その製造方法 (国内優先 [特願 2009-108207] )	谷良浩他
13	三菱電機(株)	特願 2010- 118094	国内	2010/ 05/24	出願	回転電機	守田正夫他
14	三菱電機(株)	PCT/ JP2010/ 064214	PCT	2010/ 08/24	出願	扁平巻回形電 力貯蔵デバイ スセルおよび 扁平巻回形電 力貯蔵デバイ スモジュール (優先権 PCT 出願 [特願 2009-203485] )	光田憲朗他
15	三菱電機(株)	特願 2010- 197486	国内	2010/ 09/03	出願	ハイブリッド 自動車	守田正夫他
16	三菱電機(株)	PCT/ JP2010/ 066012	PCT	2010/ 09/16	出願	ランデル型回 転機 (優先権 PCT 出願 [特願 2009-227448] )	井上正哉他
17	三菱電機(株)	特願 2010- 219319	国内	2010/ 09/29	出願	ランデル型回 転機	黒田洋一他
18	三菱電機(株)	特願 2010- 275068	国内	2010/ 12/09	出願	電気二重層キ ャパシタ及び 電気二重層キ ャパシタ用電 極の製造方法	相原茂他

19	三菱電機(株)	特願 2011-044806	国内	2011/03/02	出願	蓄電デバイスおよびその製造方法	岡田達典他
20	三菱電機(株)	特願 2011-115468	国内	2011/05/24	出願	DC/DC コンバータ装置	小林亮祐他
21	三菱電機(株)	PCT/JP2011/069429	PCT	2011/08/29	出願	ハイブリッド自動車 (優先権 PCT 出願 [特願 2010-197486])	守田正夫他
22	三菱電機(株)	特願 2012-007176	国内	2012/01/17	出願	電気二重層キャパシタ用電極及び電気二重層キャパシタ	相原茂他
23	三菱電機(株)	特願 2012-012873	国内	2012/01/25	出願	ランデル型回転機	守田正夫他

#### 【次世代技術開発】

1	国立大学法人 横浜国立大学	特願 2009-119004	国内	2009年5月 15日	出願	リチウムイオン電池用電極 およびこれを備えたリチウムイオン電池	窪田好浩, 稲垣怜史, 及川皓司
2	国立大学法人 横浜国立大学	特願 2010-243013	国内	2010年10月 29日	出願	アルカリ金属-硫黄系二次電池	渡邊正義, 獨古薫, 立川直樹, 朴俊佑, 高嶋絵里子, 山内健人
1	(独)物質・材料 研究機構	特願 2009-117114	国内	2009/05/14	出願	負極材料とそれを用いたリチウム二次電池	高田和典、ハンブイシ、大西剛
2	(独)物質・材料 研究機構	PCT/JP2010/058110	PCT	2010/05/13	出願	負極材料とそれを用いたリチウム二次電池	高田和典、ハンブイシ、大西剛
1	三重大学	特願 2009-036772	国内	2009/2/19	公開	リチウム空気電池	今西誠之他
2	(株)デンソー・ 三重大学	特願 2010-099923	国内	2010/4/23	公開	リチウム二次電池用電解質及びそれを用いたリチウム二次電池	安達紀和他
3	三重大学	特願 2010-107470	国内	2010/5/7	公開	リチウム二次電池及びリチウム二次電池用の複合負極	武田保雄他
1	産業技術総合 研究所	特願 2008-035408 2009-554309	国内	2008/02/18 2009/02/17	出願	電池用空気極	藤原直子他
2	産業技術総合	PCT/JP2009/0	PCT	2009/02/17	出願	空気極	藤原直子他

	研究所	52618					
3	産業技術総合研究所	US 12/867376	外国	2009/02/17	出願	空気極	藤原直子他
4	産業技術総合研究所	EPO 09712401.0	外国	2009/02/17	出願	空気極	藤原直子他
1	長崎大学長	特願 2009-151523	国内	2009/6/25	公開	複合ナノ多孔電極材とその製造方法, およびリチウムイオン二次電池	森口 勇他
2	長崎大学長	特願 2009-151524	国内	2009/6/25	公開	マクロ多孔性グラファイト電極材料とその製造方法, およびリチウムイオン二次電池	森口 勇他
3	長崎大学長	特願 PCT/JP2010/0 60782	PCT	2010/6/24	出願	複合ナノ多孔電極材とその製造方法, およびリチウムイオン二次電池	森口 勇他
4	長崎大学長	特願 PCT/JP2010/0 60784	PCT	2010/6/24	出願	マクロ多孔性グラファイト電極材料とその製造方法, およびリチウムイオン二次電池	森口 勇他
5	長崎大学長	特願 PCT/JP2012/0 05074	PCT	2012/3/28	出願	電極材料およびその製造方法, ならびに電極, 二次電池及び車両	森口 勇他
1	国立大学法人 鳥取大学 ほか1社	特願2008 -02583 8号	国内	2008/02/06	出願	リチウムイオン二次電池用金属負極, その製造方法およびそれを用いたリチウムイオン二次電池	坂口裕樹他
2	国立大学法人 鳥取大学 ほか1社	PCT/JP 2010/7 1292	PCT	2010/11/29	出願	二次電池用負極材, 二次電池用負極, 二次電池用負極材の製造方法および二次電池用負極の製造方法	坂口裕樹他
3	国立大学法人 鳥取大学 ほか1社	特願2011 -00362 3	国内	2011/01/12	出願	リチウムイオン電池	坂口裕樹他
1	国立大学法人 東北大学	特願 2009-137608	国内	2009.6.8	出願	電極材料および電極材料の	京谷隆, 西原洋知 他

						製造方法	
2	国立大学法人 東北大学	特願 2011-190110	国内	2011.8.31	出願	Siと炭素の複 合材料及びそ の製造方法	京谷隆, 西原洋知 他
1	公立大学法人 首都大学東京	特開 2011-60539 (特願 2009-208065)	国内	2009/9/9	公開	二次電池用セ パレーターお よびこれを用 いたリチウム 二次電池	金村聖志 笹島慶二 棟方裕一
1	東京工業大学	特開 2010-95390	国内	2008/10/10	公開	メソポーラス 炭素複合材料 およびこれを用 いた二次電池	菅野了次他
2	東京工業大学	特願 2011-167573	国内	2011/07/29	出願	固体電解質お よびリチウム 電池	菅野了次 他
1	神戸大学 岩手大学	特願 2009-223295	国内	2009/09/28	出願	炭素-半金属 酸化物複合材 料及びその製 造方法、なら びに、これを用 いたリチウムイ オン電池用負 極	水畑 穰 宇井幸一
2	岩手大学神戸 大学	特願 2009-223296	国内	2009/09/28	出願	非水電解質二 次電池用負極 および該負極 を備えた非水 電解質二次電 池	宇井幸一 水畑 穰
1	藤波達雄、田中 康隆、入山恭寿	特願 2009-223373	国内	2009/9/28	出願	電解液用溶媒、 電解液、及びゲ ル状電解質	藤波達雄他
2	藤波達雄、田中 康隆、入山恭寿	PCT/JP2010/0 66853	PCT	2010/9/28	出願	上記特許 PTC 移行	藤波達雄他
3	藤波達雄、田中 康隆、入山恭寿	13/498422	米国	2012/3/27	出願	上記特許米国 移行	藤波達雄他
4	藤波達雄、田中 康隆、入山恭寿	10818933.3	欧州	2012/3/29	出願	上記特許欧州 (独・英・仏) 移行	藤波達雄他
5	藤波達雄、田中 康隆、入山恭寿		中国	移行出願手 続き中	出願 手続き中	上記特許中国 移行	藤波達雄他
6	藤波達雄、田中 康隆、入山恭寿		JP	移行出願手 続き中	出願 手続き中	上記特許 JP 移 行	藤波達雄他
7	藤波達雄、田中 康隆、入山恭寿	特願 2011-071248	国内	2011/3/28	出願	リチウム二次 電池用電解液 及びリチウム 二次電池	藤波達雄他
8	藤波達雄、田中 康隆、入山恭寿		PCT	移行出願手 続き中	出願 手続	上記特許 PTC 移行	藤波達雄他

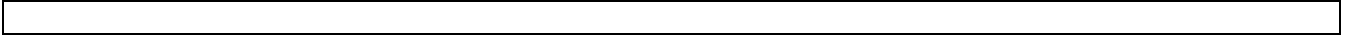
					き中		
1	学校法人東京理科大学	特願 2011-070106	国内	2011/03/28	出願	複合金属酸化物、リチウム二次電池用正極活物質、リチウム二次電池用正極、及びリチウム二次電池	駒場慎一、藪内直明
2	学校法人東京理科大学	特願 2011-067198	国内	2011/03/25	出願	リチウム二次電池用負極及びそれを備えたリチウム二次電池	駒場慎一、藪内直明
1	埼玉県	特願 2009-081371	国内	2009/3/30	出願	二次電池,	栗原英紀他
2	埼玉県	特願 2009-261903	国内	2009/11/17	出願	正極活物質、マグネシウム二次電池および正極活物質の製造方法	栗原英紀他
3	埼玉県	特願 2010-249765	国内	2010/11/8	出願	正極活物質、マグネシウム二次電池および正極活物質の製造方法	栗原英紀他
4	埼玉県	特願 2011-007251	国内	2011/1/17	出願	マグネシウム二次電池用の電解液およびマグネシウム二次電池用の電解液の製造方法	栗原英紀他
1	高橋実	特願 2011-263333	国内	2011/12/01	出願	分子性クラスターイオン系正極材料	園山範之他
1	古河電気工業株式会社 古河電池株式会社	特願 2010-250220	国内	2010/11/08	出願	ナノサイズ粒子、ナノサイズ粒子を含むリチウムイオン二次電池用負極材料、リチウムイオン二次電池用負極、リチウムイオン二次電池、ナノサイズ粒子の製造方法	西村健 谷俊夫 島田道宏 久保田昌明 阿部英俊 江黒高志
2	古河電気工業株式会社 古河電池株式会社	特願 2010-250221	国内	2010/11/08	出願	ナノサイズ粒子、ナノサイズ粒子を含むリチウムイオン二次電池用負極材料、リチウ	西村健 谷俊夫 島田道宏 久保田昌明 阿部英俊 江黒高志

						ムイオン二次電池用負極、リチウムイオン二次電池、ナノサイズ粒子の製造方法	
3	古河電気工業株式会社 古河電池株式会社	特願 2010-250222	国内	2010/11/08	出願	ナノサイズ粒子、ナノサイズ粒子を含むリチウムイオン二次電池用負極材料、リチウムイオン二次電池用負極、リチウムイオン二次電池、ナノサイズ粒子の製造方法	西村健 谷俊夫 島田道宏 久保田昌明 阿部英俊 江黒高志
4	古河電気工業株式会社 古河電池株式会社	特願 2010-250223	国内	2010/11/08	出願	非水電解質二次電池	西久保英郎 西村健 谷俊夫 幡谷耕二 島田道宏 久保田昌明 阿部英俊 江黒高志
1	産総研、東理大	特願 2010-061816	国内	2010/03/15	公開	リチウムマンガングン複合酸化物及びその製造方法、並びにリチウム電池	間宮幹人、秋本順二、常盤和靖
2	産総研	特願 2010-193638	国内	2010/08/31	公開	チタン酸化物及びその製造方法、並びにそれを部材として使用した電気化学デバイス	間宮幹人、秋本順二、片岡邦光、新部祐佳子、常盤和靖

【基盤技術開発】

1	独立行政法人産業技術総合研究所	特願 2009-065370	国内	2009/03/18	出願	二次電池の温度に関する状態を判定する方法、判定装置および判定プログラム	小池伸二他
2	独立行政法人産業技術総合研究所	特願 2010-052528	国内	2010/03/10	出願	二次電池の温度に関する状態を判定する方法、判定装置および判定プログラム	小池伸二他
3	独立行政法人産業技術総合研究所	特願 2012-26025	国内	2012/02/09	出願	鉄含有複合リン酸フッ化物	鹿野昌弘他





(2) 論文リスト

【論文】

【要素技術開発 (電池モジュール)】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年
1	藤井明博 柏 雄太 藤野有希子 河本真理子 田渕 徹 稲益徳雄 村田利雄	(株)GS ユアサ	リチウムイオン電池用マンガン置換 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{(1-x)}\text{PO}_4$ ポリアニオン正極活物質の合成とその電気化学特性	GS Yuasa Technical Report 第5巻 第2号 27-31	—	2008
2	中川裕江 柴田洋平 田渕 徹 稲益徳雄 村田利雄	(株)GS ユアサ	Application of Nonflammable Electrolyte to High Performance Lithium-ion Cells	Electrochemistry (電気化学および工業物理化学), Vol. 78, No.5, 2010 406-408	有	2010
3	中川裕江 柴田洋平 稲益徳雄 村田利雄	(株)GS ユアサ	フッ化アルキル基含有リン酸エステル添加難燃性電解液を用いた高性能リチウムイオン二次電池の開発	GS Yuasa Technical Report 第6巻 第2号 7-13	—	2009
4	柴田洋平 鋤納功治 田渕 徹 稲益徳雄 奥山良一	(株)GS ユアサ	フッ素化リン酸エステルを含む難燃性電解液を用いた高安全かつ高性能な 12 Ah 級リチウムイオン電池の開発	GS Yuasa Technical Report 第7巻 第1号 8-13	—	2010
5	鋤納功治 柴田洋平 田渕 徹 稲益徳雄 奥山良一	(株)GS ユアサ	混合正極活物質 $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ ( $x + y + z = 1$ )/ $\text{LiFePO}_4$ を採用した PHEV 用高性能 12 Ah 級リチウムイオン電池	GS Yuasa Technical Report 第7巻 第2号 7-11	—	2010
6	藤野有希子 渡辺 勉 稲益徳雄 奥山良一	(株)GS ユアサ	液相法により合成したリン酸バナジウムリチウムを用いたリチウムイオン電池の開発	GS Yuasa Technical Report 第8巻 第1号 16-21	—	2011
7	鋤納功治 松井裕樹 稲益徳雄 奥山良一	(株)GS ユアサ	混合正極活物質 $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ ( $x + y + z = 1$ )/ $\text{LiFePO}_4$ を採用した PHEV 用高性能 13 Ah 級リチウムイオン電池の開発	GS Yuasa Technical Report 第8巻 第2号 16-21	—	2011
8	河本真理子 稲益徳雄 奥山良一	(株)GS ユアサ	導電性ネットワークを形成したリチウムイオン電池用リン酸マンガンリチウム正極活物質の電気化学的特性	GS Yuasa Technical Report 第8巻 第2号 8-15	—	2011
1	小島他	日立ビークルエナジー	AC Impedance Analysis for 10Ah-class Lithium-ion Batteries	Electrochemistry, Vol.178, No.5, 416	有	2010
2	小西他	日立製作所	Thermal stability of $\text{Li}_{1-y}\text{Ni}_x\text{Mn}_{(1-x)/2}\text{Co}_{(1-x)/2}\text{O}_2$ layer-structured cathode materials used in Li-ion batteries	Journal of Power Sources, 196, 6884	有	2010
1	渡邊庄一郎	パナソニック	Prevention of the Micro cracks	ECS Transactions, 41	有	2010

		ニック	Generation in LiNiCoAlO <sub>2</sub> Cathode by the Restriction of ΔDOD	(41) 65-74 (2012)		12
--	--	-----	---	-------------------	--	----

【要素技術開発（電池構成材料）】

1	宇恵誠	三菱化学(株)	Thermal Behavior of Ionic Liquid Electrolytes in Lithium-ion Cells	ECS Transaction vol.16(35), 173-181	有	20 09
2	堀真理子	日本合成化学工業(株)	THERMAL STABILITY OF IONIC LIQUIDS AS AN ELECTROLYTE FOR LITHIUM-ION BATTERIES	ECS Transaction vol.16 (36),147-153	有	20 09
3	川井友博	三菱化学(株)	電池の安全性能解析におけるシ ミュレーション技術の応用	電気化学および工業物理 化学 第78巻 第12号 994-999	無	20 10
1	竹内友成、辰 巳国昭、田 光春、阿度 和明	産業技 術総合 研究所	Improvement of rate capability in rechargeable lithium-ion batteries using oxide-based active materials-carbon composite cathodes	Journal of Power Sources, Vol.174-2, pp.1063-1068	有	20 07
2	吉川純、秋田 知樹、田 光春、鹿野 昌弘、辰 巳国昭、香 山正憲	産業技 術総合 研究所	Initial stage of the delithiation of Li <sub>1.2-x</sub> Mn <sub>0.4</sub> Fe <sub>0.4</sub> O <sub>2</sub> positive electrode material for lithium-ion batteries studied by electron energy-loss spectroscopy	ECS Transactions, Vol.11, pp.15-20	有	20 08
3	吉川純、秋田 知樹、田 光春、鹿野 昌弘、辰 巳国昭、香 山正憲	産業技 術総合 研究所	Coexistence of layered and cubic rocksalt structures with a common oxygen sublattice in Li <sub>1.2</sub> Mn <sub>0.4</sub> Fe <sub>0.4</sub> O <sub>2</sub> particles: A transmission electron microscopy study	Journal of Applied Physics, Vol.103, pp.104911-1-104911-10	有	20 08
4	吉川純、秋田 知樹、田 光春、鹿野 昌弘、辰 巳国昭、香 山正憲	産業技 術総合 研究所	Real-Space Observation of Li Extraction/Insertion in Li <sub>1.2</sub> Mn <sub>0.4</sub> Fe <sub>0.4</sub> O <sub>2</sub> Positive Electrode Material for Li-Ion Batteries	Electrochemical and Solid-State Letters, Vol.11(11), pp.A183-186	有	20 08
5	田光春、辰 巳国昭、森 本正太郎、 那須三郎、 斎藤直、 池田泰大	産業技 術総合 研究所	Stabilization of tetra- and pentavalent Fe ions in Fe-substituted Li <sub>2</sub> MnO <sub>3</sub> with layered rock-salt structure	Journal of Applied Physics, Vol.104, pp.043909-1-043909-10	有	20 08
6	深堀明博、阿 波加淳司、高 橋靖彦、木 嶋倫人、早 川博、秋本 順二	産業技 術総合 研究所	Single crystal growth of CaMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> and CaMn <sub>3</sub> O <sub>6</sub> in molten CaCl <sub>2</sub>	Chemistry Letters, Vol.37(9), pp.978-979	有	20 08
7	吉川純、秋田 知樹、田 光春、鹿野 昌弘、辰 巳国昭、香 山正憲	産業技 術総合 研究所	Formation and Disappearance of Spinel Nanograins in Li <sub>1.2-x</sub> Mn <sub>0.4</sub> Fe <sub>0.4</sub> O <sub>2</sub> (0 ≤ x ≤ 0.9) during Extraction and Insertion of Li Ions	Journal of The Electrochemical Society, 156 (11) A839-A845	有	20 09
8	船曳富士、早	産業技	Electrical Conductivities of	Electrochemical &	有	20

	川博、木嶋倫人、秋本順二	術総合研究所	$\text{Na}_{0.44}\text{Mn}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$	Solid-State Letters, Vol.12(11), F35-F38		09
9	田淵光春、鍋島洋子、竹内友成、辰巳国昭、今泉純一、新田芳明	産業技術総合研究所・田中化学研究所	Fe content effects on electrochemical properties of Fe-substituted $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ positive electrode material	Journal of Power Sources, Vol.195, p.834-844	有	2010
10	田淵光春、竹内友成、辰巳国昭、秋本順二、今泉純一、渋谷英香、他2名	産業技術総合研究所・田中化学研究所	Synthesis and electrochemical characterization of Fe and Ni substituted $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ -An effective means to use Fe for constructing "Co-free" $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ based positive electrode material-	Journal of Power Sources, Vol.196, p.3611-3622	有	2011
11	秋本順二、早川博、木嶋倫人、他2名	産業技術総合研究所	Single-Crystal Synthesis and Structure Refinement of $\text{Na}_{0.44}\text{MnO}_2$	Solid State Phenomena, Vol. 170, pp.198-202	有	2011
12	吉川純、秋田知樹、田淵光春、辰巳国昭、香山正憲	産業技術総合研究所	Participation of Oxygen in Charge/Discharge Reactions in $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.4}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_2$ : Evidence of Removal/Reinsertion of Oxide Ions	Journal of The Electrochemical Society, Vol.158(6), pp.A760-A768	有	2011
13	深堀明博、早川博、木嶋倫人、秋本順二	産業技術総合研究所	Synthesis and Electrochemical Properties of Ca-Substituted $\text{Li}_{0.44}\text{MnO}_2$	Electrochemical and Solid-State Letters, Vol. 14 (6), pp. A100-A103	有	2011
1	松本 一 他	産業技術総合研究所	Low Melting and Electrochemically Stable Ionic Liquids Based on Asymmetric Fluorosulfonyl (trifluoromethylsulfonyl)amide	Chem. Lett.,37(10),1020	有	2008
2	梅木辰也他	産業技術総合研究所	Influence of Anion Structure on Transport Properties of Perfluorosulfonylamide Ionic Liquids	ECS Trans.,16(49),39	有	2009
3	梅木辰也他	産業技術総合研究所	Direct Measurements of Ionic Mobility of Ionic Liquids Using the Electric Field Applying Pulsed Gradient Spin-Echo NMR	J. Phys. Chem. B.,113(25) 8466	有	2009
4	寺澤直弘他	産業技術総合研究所	Alkoxy chains in ionic liquid anions; effect of introducing ether oxygen into perfluoroalkylborate on physical and thermal properties	Chem. Commun., 46, 1730	有	2010
5	梅木辰也他	産業技術総合研究所	Ion Mobility of 1-Ethyl-3-methylimidazolium Tetrafluoroborate and 1-Ethyl-3-methylimidazolium Bis (trifluorosulfonyl)amide Ionic Liquids	ECS Trans.,25(39),39	有	2010
6	松本 一 他	産業技術総合	New Ionic Liquids containing	ECS Trans.,33(7),35	有	2010

		研究所	Fluorosulfonyl(trifluoromethylsulfonyl)amide and 5-Phosphoniaspiro[4.4]nonan			
7	都築誠二 他	産業技術総合研究所	Interactions of Perfluoroalkyl-trifluoroborate Anions with Cations: Effects of Perfluoroalkyl Chain Length on Motion of Ions in Ionic Liquids	ECS Trans.,33(7),685	有	2010
8	窪田啓吾他	産業技術総合研究所	Thermal Properties of Alkali (Fluorosulfonyl)(trifluoromethylsulfonyl)amides	Chem. Lett.,39 (12) 1303	有	2010
9	都築誠二 他	産業技術総合研究所	Interactions of Perfluoroalkyltrifluoroborate Anions with Li Ion and Imidazolium Cation: Effects of Perfluoroalkyl Chain on Motion of Ions in Ionic Liquids	J. Phys. Chem. B.,114(26) 11390	有	2010
10	松本 一 他	産業技術総合研究所	Charge and Discharge Property of Li/LiCoO <sub>2</sub> Cell Using Ionic Liquids Composed of <i>N,N</i> -Diethyl- <i>N</i> -methyl- <i>N</i> -(2-methoxyethyl) ammonium and fluorosulfonyl (trifluoromethylsulfonyl) amide	ECS Trans.,33(28),37	有	2011
11	窪田啓吾他	産業技術総合研究所	Melting and Crystallization Behaviors of Alkali Metal (Fluorosulfonyl) (trifluoromethylsulfonyl)amides	Chem. Lett.,40 (10) 1105	有	2011
12	都築誠二 他	産業技術総合研究所	Effects of conformational flexibility of alkyl chains of cations on diffusion of ions in ionic liquids	Phys. Chem. Chem. Phys., 13, 5987	有	2011
13	H.Valencia 他	産業技術総合研究所	First-Principles Study of EMIM-FAFSA Molecule Adsorption on a Li(100) Surface as a Model for Li-Ion Battery Electrodes	J. Phys. Chem. C.,116(15) 8493	有	2012
	Atsushi Ito, Decheng Li, Yuichi Sato, Yasuhiko Ohsawa	神奈川 大学/ 日産自 動車	A new approach to improve the high-voltage cyclic performance of Li-rich layered cathode material by electrochemical pre-treatment	J. Power Sources, 183 (2008) 344.		2008年5月13日
	Atsushi Ito, Decheng Li, Yuichi Sato, Masazumi	日産自 動車/ 神奈川 大学	Cyclic Deterioration and Its Improvement for Li-Rich Layered Cathode Material Li[Ni <sub>0.17</sub> Li <sub>0.2</sub> Co <sub>0.07</sub> Mn <sub>0.56</sub> ]O <sub>2</sub>	J. Power Sources, 195 (2010) 567		2009年8月

	Arao, Masaharu Hatano, Hideaki Horie, Yasuhiko Ohsawa				月 9 日
	Atsushi Ito <sup>a</sup> , Yuichi Sato <sup>b</sup> , Takashi Sanada <sup>c</sup> , Tsukuru Ohwaki <sup>a</sup> , Masaharu Hatano <sup>a</sup> , Hideaki Horie <sup>a</sup> , Yasuhiko Ohsawa, <sup>a</sup>	日産自 動車/ 神奈川 大学	Local Structure of Li-rich Layered Cathode Material Li[Ni <sub>0.17</sub> Li <sub>0.2</sub> Co <sub>0.07</sub> Mn <sub>0.56</sub> ] O <sub>2</sub>	Electrochemistry, 78 (2010) 380.	20 10 年 5 月 1 日
	大澤康彦、伊 藤淳史、佐藤 祐一、荒尾正 純、渡邊学、秦 野正治、堀江 英明	日産自 動車/ 神奈川 大学	固溶体系正極材料 (Li <sub>2</sub> MnO <sub>3</sub> -LiMO <sub>2</sub> )の研究開 発	㈱TIC発行の雑誌、「マテ リアル インテグレーシ ョン」の6月号(特集:大 型リチウムイオン二次電 池と材料の展望)	20 10 年 6 月 1 日
	伊藤淳史、佐 藤祐一、渡邊 学、大脇創、 羽賀文浩、秦 野正治、堀江 英明	日産自 動車/ 神奈川 大学	4.1遷移金属酸化物系正極材料、 10.1概論、10.2計算科学に基づ くりチウムイオン二次電池用材 料研究、10.3 コンビナトリア ル手法による材料探索、10.4中 性子を用いた高度構造解析	培風館発行(堀江英明編 著)の本 (ISBN974-4-563-06781 -6)「リチウムイオン電池 (基礎と応用)	20 10 年 8 月 10 日
	日産自動車, UBE <sup>1</sup> . 神奈川 大学 <sup>2</sup> : Atsushi Ito, Kaoru Shoda <sup>1</sup> , Yuichi Sato <sup>2</sup> , Masaharu Hatano, Hideaki Horie, Yasuhiko Ohsawa	日産自 動車/ 神奈川 大学	Direct observation of the partial formation of a framework structure for Li-rich layered cathode material Li[Ni <sub>0.17</sub> Li <sub>0.2</sub> Co <sub>0.07</sub> Mn <sub>0.56</sub> ] O <sub>2</sub> upon the first charge and discharge	Journal of Power Sources, 196 (2011) 4785–4790.	20 11 年 3 月 17 日
	Nissan Motor Co., Ltd., Nissan ARC <sup>1</sup> . Kanagawa University <sup>2</sup> : Atsushi Ito, Takashi Sanada <sup>1</sup> , Yuichi Sato <sup>2</sup> , Masaharu Hatano,	日産自 動車/ 神奈川 大学	In situ X-ray absorption spectroscopic study of Li-rich layered cathode material Li[Ni <sub>0.17</sub> Li <sub>0.2</sub> Co <sub>0.07</sub> Mn <sub>0.56</sub> ] O <sub>2</sub>	Journal of Power Sources, 196 (2011) 6828–6834.	20 11 年 8 月 15 日

	Hideaki Horie, Yasuhiko Ohsawa					
	<sup>1</sup> Kanagawa University, <sup>2</sup> Nissan Research Center: Masaru Abe, <sup>1</sup> Futoshi Matsumoto, <sup>*1</sup> Miwa Saito, <sup>1</sup> Hiroshi Yamamura, <sup>1</sup> Genki Kobayashi, <sup>1</sup> Atsushi Ito, <sup>2</sup> Takashi Sanada, <sup>2</sup> Masaharu Hatano, <sup>2</sup> Yasuhiko Ohsawa, <sup>2</sup> and Yuichi Sato <sup>1</sup>	神奈川県大学／日産自動車	Activation of a Li-rich Solid-Solution Layered Li[Ni <sub>0.18</sub> Li <sub>0.20</sub> Co <sub>0.03</sub> Mn <sub>0.58</sub> ]O <sub>2</sub> Cathode and Retention of High Capacities via an Electrochemical Pretreatment with a Low Discharge Voltage Limit	Chem. Letts., 41 (2012) 418.		2012年4月5日
1	杉本敏規	学校法人関西大学	Ionic liquid electrolytes compatible with graphitized carbon negative without additive and their effects on interfacial properties	Journal of Power Sources 183 (2008) 436–440	有	2008
2	杉本敏規	学校法人関西大学第一工業製薬株式会社	Ionic liquid electrolyte systems based on bis(fluorosulfonyl)imide for lithium-ion batteries	Journal of Power Sources 189 (2009) 802–805	有	2009
3	杉本敏規	学校法人関西大学第一工業製薬株式会社	Effects of Organic Additives on Lithium Insertion/extraction for Graphite Electrode in Ionic Liquid Electrolytes Based on Bis(fluorosulfonyl)imide	Electrochemistry, 77(8), (2009) 696-698	有	2009
4	杉本敏規	学校法人関西大学エレクトセル株式会社	Application of FSI-based Electrolyte to Li-ion Battery with Si-Ni-Carbon Composite Anode	Journal of Power Sources 195 (2010) 6153–6156	有	2010
1	T. Shiratsuchi, S. Okada, J. Yamaki, S. Yamashita	九州大学	Cathode Performance of Olivine-type LiFePO <sub>4</sub> Synthesized by Chemical Lithiation	J. Power Sources, 173(2), 979-984 (2007)	有	2007

	and T. Nishida					
2	T. Shiratsuchi, S. Okada, T. Doi and J. Yamaki,	九州大学	Cathode Performance of $\text{LiMn}_{1-x}\text{M}_x\text{PO}_4/\text{C}$ (M = Ti, Mg, Zr) Annealed in an Inert Stmosphere	Electrochim. Acta, 4(11), 3145-3151 (2009)	有	2008
3	岡田重人	九州大学	次世代正極活物質	CMC 出版, 「次世代自動車用リチウムイオン電池の材料開発」, 第3章3節, p.91-103 (2008)		2008
4	I. Gocheva, M. Nishijima, T. Doi, S. Okada, J. Yamaki and T. Nishida	九州大学	Mechanochemical Synthesis of $\text{NaMF}_3$ (M=Fe, Mn, Ni) and Their Electrochemical Properties as Positive Electrode Materials for Sodium Batteries	J. Power Sources, 187(1), 247-252 (2009)	有	2009
5	M. Nishijima, I. Gocheva, S. Okada, T. Doi, J. Yamaki and T. Nishida	九州大学	Cathode Properties of Metal Trifluorides in Li and Na Secondary Batteries	J. Power Sources, 190(2) 558-562 (2009)	有	2009
6	T. Shiratsuchi, S. Okada, T. Doi and J. Yamaki	九州大学	Cathodic Performance of $\text{LiMn}_{1-x}\text{M}_x\text{PO}_4$ (M = Ti, Mg and Zr) Annealed in an Inert Atmosphere	Electrochim. Acta, 54(11), 3145-3151(2009)	有	2009
7	T. Doi, S. Yatomi, T. Kida, S. Okada, and J. Yamaki	九州大学	Liquid-Phase Synthesis of Uniformly Nanosized $\text{LiMnPO}_4$ Particles and Their Electrochemical Properties for Lithium-Ion Batteries	Crystal Growth & Design, 9(12), 4990-4992 (2009)	有	2009
8	S. Okada	九州大学	Iron-Base Rare-Metal-Free Cathodes	Lithium Ion Rechargeable Batteries: Materials, Technology, and New Applications”, Wiley-VCH, Chapter 4, , p.53-66 (2009).		2009
9	S. Okada	九州大学	Ceramic Materials in Energy Systems for Sustainable Development	World Academy of Ceramics, Techna Group, p.173-192 (2009).		2009
10	S. Okada	九州大学	Polyanionic Cathode Active Materials	Lithium-ion Batteries, Science and Technologies, Springer-Verlag, Chapter 9, p.195-205 (2009).		2009



1 1	M. Zhou, L. Zhao, T. Doi, S. Okada, and J. Yamaki	九州大学	Thermal Stability of FeF <sub>3</sub> Cathode for Li-ion Batteries	J. Power Sources, 195, 4952-4956(2010)	有	20 10
1 2	岡田重人分筆 共著	九州大学	ナシコン正極	「電池ハンドブック」, オーム社, 第8編リチウムイオン電池第3章正極13節, p.491-497 (2010).		20 10
1 3	岡田重人分筆 共著	九州大学	金属フッ化物正極	「電池ハンドブック」, オーム社, 第8編リチウムイオン電池第3章正極14節, p.498-500 (2010).		20 10
1 4	岡田重人, 土井貴之, 山木準一	九州大学	次世代鉄系正極材料の現状と課題	セラミック協会誌, 45(3), 153-157 (2010).		20 10
1 5	岡田重人	九州大学	正極材料	化学, 65(5), 36-40 (2010)		20 10
1 6	岡田重人分筆 共著	九州大学	元素周期律表と電極材料	「高性能蓄電池」, NTS出版, 序論, p.7-15 (2010).		20 10
1 7	M. Nagahama, N. Hasegawa, S. Okada	九州大学	High Voltage Performances of Li <sub>2</sub> NiPO <sub>4</sub> F Cathode with Dinitrile-Based Electrolytes	J. Electrochem. Soc, 157, A748-A752 (2010).	有	20 11
1 8	M. Zhou, L. Zhao, S. Okada, and J. Yamaki	九州大学	Thermal characteristics of a FeF <sub>3</sub> cathode via conversion reaction in comparison with LiFePO <sub>4</sub>	J. Power Sources, 196, 8110-8115(2011)	有	20 11
1 9	Y. Yamada, T. Doi, I. Tanaka, S. Okada, and J. Yamaki	九州大学	Liquid-phase Synthesis of Highly-disperse NaFeF <sub>3</sub> Particles and Their Electrochemical Properties for Sodium-ion Batteries	J. Power Sources, 196(10), 4837-4841 (2011)	有	20 11
2 0	A. Kitajou, H. Komatsu, K. Chihara, I. D. Gocheva, S.	九州大学	Novel Synthesis and Electrochemical Properties of Perovskite-type NaFeF <sub>3</sub> for a Sodium-Ion Battery	J. Power Sources, 198, 389-392(2011)	有	20 11

	Okada, J. Yamaki					
2 1	岡田重人分筆 共著	九州大 学	ポリアニオン系正極材料の研究 開発	「粉体技術と次世代電池 開発」, CMC 出版, 第 8 章正極材料 1 節, p.193-202 (2011)		20 11
2 2	岡田重人分筆 共著	九州大 学	現行正極材料の共通課題と革新 的次世代正極材料に向けたグラ ンドデザイン	「リチウム二次電池の車 載技術、劣化・トラブル 要因とその対策」, 技術情 報協会, 第 1 節[2] 正極 活物質における改善事例 ①, p.235-245 (2011)		20 11

【要素技術開発（周辺機器）】

1	山中建二 大西徳生	徳島大 学	永久磁石同期電動機の位相追従 同期形センサレス制御システム	電気学会論文誌 D Vol.129, No.4, 432～437 頁	有	平成 21年
2	大西徳生	徳島大 学	インバータのセンサレス制御法	電気学会半導体電力変換 研究会、SPC-05-95		平成 17年
3	大西徳生	徳島大 学	永久磁石モータの新しいセンサ レスドライブ技術	第 28 次 第 6 回モータ技 術フォーラム、日本能率 協会、No.1,pp1-20		平成 21年
4	大西徳生	徳島大 学	電気自動車駆動システムの新しい 制御技術とコンバートEVへ の適用	電気自動車の最新制御技 術、(株)エヌ・ディー・エ ス、pp.224-238		平成 21年
5	大西徳生	徳島大 学	電気自動車駆動システムの新しい 制御技術とコンバートEVへ の適用	電気自動車の最新制御技 術、(株)エヌ・ディー・エ ス、pp.224-238		平成 23年
6	大西徳生 山中建二	徳島大 学	誘導同期リランクタンス電動機 のセンサレス制御システム	電気学会半導体電力変換 研究会、SPC-11-196、 VT-11-28		平成 23年
1	谷良浩 他	三菱電 機(株)	弾塑性歪みが無方向性電磁鋼板 の磁気特性に及ぼす影響	電気学会 MAG 研究会 MAG-09-42, pp.17-22	無	20 09
2	山口信一他	三菱電 機(株)	An Accurate Magnetic Field Analysis for Estimating Motor Characteristics Taking Account of Elasto-Plastic Deformation in the Magnetic Core.	IEEE Compumag 2009 pp.205-206	無	20 09
3	黒田洋一 他	三菱電 機(株)	Improvement of a claw pole motor using additional ferrite magnets for hybrid electric vehicles	ICEM 2010, pp.1-3	有	20 10
4	東道年 他	三菱電 機(株)	コイル界磁式クローポールモー タの駆動特性	電気学会 自動車研究会 資料 VT-11-020 pp.37-40	無	20 11
5	井上正哉他	三菱電	Evaluation of novel	8th International	有	20

		機(株)	concentrated and distributed windings in Interior PM and claw pole motors	Conference on Power Electronics-ECCE Asia pp.176-183		11
6	山口信一他	三菱電機(株)	鉄心打ち抜き時の加工劣化を考慮したモータ磁気設計技術	三菱電機技報 (2011年7月号) pp.413-416	無	2011
7	十時詠吾他	三菱電機(株)	Cogging Torque Calculation Considering Anisotropic Vector Hysteresis.	ISEF 2011 pp.1-6	無	2011
8	谷良浩他	三菱電機(株)	弾塑性歪みが無方向性電磁鋼板の磁気特性に及ぼす影響(第二報)	電気学会 MAG 研究会 MAG-11-137 pp.49-54	無	2011
9	大穀晃裕	三菱電機(株)	EV/HEV 駆動用レアアースレスモータ	三菱電機技報 (2012年1月号) p.6	無	2012
10	山口信一他	三菱電機(株)	Motor Design Technologies Considering Deteriorated Magnetic Properties in Magnetic Core Due to Stamping	MITSUBISHI ELECTRIC ADVANCE (2012年3月号) pp.12-14	無	2012
11	東道年他	三菱電機(株)	Fundamental Characteristics of a Claw Pole Motor Using Additional Ferrite Magnets for HEV	IEEE International Electric Vehicle Conference IEVC pp.1-4	有	2012
12	東道年他	三菱電機(株)	コイル界磁式クローポールモータの駆動特性その2	電気学会 自動車研究会資料 VT-12-013 pp.49-54	無	2012
13	光田憲朗他	三菱電機(株)	瞬発キャパシタの開発	エネルギー資源学会誌 (Vol.33 No.3) pp.9-14	有	2012

【次世代技術開発】

1	S. Tabata, Y. Isshiki, M. Watanabe		Inverse Opal Carbons from a Polymer Precursor as Electrode Materials for Electric Double-Layer Capacitors	<i>J. Electrochem. Soc.</i> , <b>155</b> , K42		2008
2	Y. Eguchi, D. Abe, H. Yoshitake		Oxidation State of Ce and Ethanol-Oxygen Reaction of Mesoporous Titania-Supported Cerium Oxide	<i>Micropor. Mesopor. Mater.</i> , <b>116</b> , 44		2008
3	S. Inagaki, K. Oikawa, Y. Kubota		Effect of Carbon Source on the Textural and Electrochemical Properties of Novel Cage-type Mesoporous Carbon as a Replica of KIT-5 Mesoporous Silica	<i>Chem. Lett.</i> , <b>38</b> , 918		2009
4	H. Yoshitake, D. Abe		Raman spectroscopic study of the framework structure of amorphous mesoporous titania	<i>Micropor. Mesopor. Mater.</i> , <b>119</b> , 267		2009
5	T. Tamura, T. Hachida, K. Yoshida, N. Tachikawa, K. Dokko, M. Watanabe		New glyme-cyclic imide lithium salt complexes as thermally stable electrolytes for lithium batteries	<i>J. Power Sources</i> , <b>195</b> , 6095		2010
6	T. Tamura, K.		Physicochemical Properties of	<i>Chem. Lett.</i> , <b>39</b> , 753		20

	Yoshida, T. Hachida, M. Tsuchiya, M. Nakamura, Y. Kazue, N. Tachikawa, K. Dokko, M. Watanabe		Glyme-Li salt Complexes as a New Family of Room-temperature Ionic Liquids		10
7	N. Tachikawa, J.-W. Park, K. Yoshida, T. Tamura, K. Dokko, M. Watanabe		Limiting Current Density in Ionic Liquid Electrolyte for Lithium Batteries	<i>Electrochemistry</i> , <b>78</b> , 349	20 10
8	J.-W. Park, K. Yoshida, N. Tachikawa, K. Dokko, M. Watanabe		Limiting current density in bis(trifluoromethylsulfonyl)am ide-based ionic liquid for lithium batteries	<i>J. Power Sources</i> , <b>196</b> , 2264	20 11
9	Kazuki Yoshida†, Megumi Nakamura†, Yuichi Kazue†, Naoki Tachikawa†, Seiji Tsuzuki‡, Shiro Seki§, Kaoru Dokko†, and Masayoshi Watanabe		Oxidative-Stability Enhancement and Charge Transport Mechanism in Glyme-Lithium Salt Equimolar Complexes	<i>J. Am. Chem. Soc.</i> , <b>133</b> , 13121	20 11
1 0	K. Yoshida, M. Tsuchiya, N. Tachikawa, K. Dokko, M. Watanabe		Change from Glyme Solutions to Quasi-ionic Liquids for Binary Mixtures Consisting of Lithium Bis(trifluoromethanesulfonyl) amide and Glymes	<i>J. Phys. Chem. C</i> , <b>115</b> , 18384	20 11
1 1	H. Yoshitake, D. Abe		A new composite electrode of Li <sub>2</sub> MnSiO <sub>4</sub> nanoparticles combined with mesoporous carbon CMK-3	<i>Chem. Lett.</i> , <b>40</b> , 1201	20 11
1 2	N. Tachikawa, K. Yamauchi, E. Takashima		Reversibility of electrochemical reactions of sulfur supported on inverse opal carbon in glyme-Li salt molten complex electrolytes	<i>Chem. Commun.</i> , <b>47</b> , 8157	20 11
1 3	T. Kawase, H. Yoshitake		Cathodes comprising Li <sub>2</sub> MnSiO <sub>4</sub> nanoparticles dispersed in the mesoporous carbon frameworks, CMK-3	<i>Micropor. Mesopor. Mater.</i> , <b>155</b> , 99	20 12

			and CMK-8			
1 4	K. Yoshida, M. Tsuchiya, N. Tachikawa, K. Dokko, M. Watanabe		Correlation between Battery Performance and Lithium Ion Diffusion in Glyme-Lithium Bis(trifluoromethanesulfonyl) amide Equimolar Complexes	<i>J. Electrochem. Soc.</i> , accepted.		
1	N. Ohta, K. Takada, I. Sakaguchi, L. Zhang, R. Ma, K. Fukuda, M. Osada, T. Sasaki	National Institute for Materials Science	LiNbO <sub>3</sub> -coated LiCoO <sub>2</sub> as cathode material for all solid-state lithium secondary batteries			
2	L. Zhang, K. Takada, N. Ohta, M. Osada, T. Sasaki	National Institute for Materials Science	Synthesis and electrochemistry of novel layered (1-x)LiVO <sub>2</sub> ·xLi <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> (0 ≤ x ≤ 0.6) electrode materials			
3	K. Takada, N. Ohta, L. Zhang, K. Fukuda, I. Sakaguchi, R. Ma, M. Osada, T. Sasaki	National Institute for Materials Science	Interfacial modification for high-power solid-state lithium batteries			
4	B. T. Hang, T. Ohnishi, M. Osada, X. Xu, K. Takada, T. Sasaki	National Institute for Materials Science	Lithium silicon sulfide as an anode material in all-solid-state lithium batteries			
5	T. Ohnishi, B. T. Hang, X. X. Xu, M. Osada, K. Takada	National Institute for Materials Science	Quality control of epitaxial LiCoO <sub>2</sub> thin films grown by pulsed laser deposition			
6	T. Ohnishi, K. Takada	National Institute for Materials Science	Epitaxial Thin-Film Growth of SrRuO <sub>3</sub> , Sr <sub>3</sub> Ru <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , and Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> from a SrRuO <sub>3</sub> Target by Pulsed Laser Deposition			
7	Y. Seino, T. Ota, K. Takada	Idemitsu Kosan Co. Ltd. National	High rate capabilities of all-solid-state lithium secondary batteries using Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub> -coated LiNi <sub>0.8</sub> Co <sub>0.15</sub> Al <sub>0.05</sub> O <sub>2</sub> and a			

		Institute for Materials Science	sulfide-based solid electrolyte			
8	X. X. Xu, K. Takada, K. Fukuda, T. Ohnishi, K. Akatsuka, M. Osada, B. T. Hang, K. Kumagai, T. Sekiguchi, T. Sasaki	National Institute for Materials Science	Tantalum oxide nanomesh as self-standing one nanometre thick electrolyte			
9	X. X. Xu, K. Takada, K. Watanabe, I. Sakaguchi, K. Akatsuka, B. T. Hang, T. Ohnishi, T. Sasaki	National Institute for Materials Science	Self-organized core-shell structure for high-power electrode in solid-state lithium batteries			
1	N. Imanishi	三重大学	Lithium anode for lithium-air secondary batteries	J. Power Sources, 185, 1392-1397	有	2008
2	T. Zhang	三重大学	Li/polymer electrolyte/water stable lithium conducting glass ceramics composite for lithium-air secondary batteries with an aqueous electrolyte	J. Electrochem. Society, 155, A965-A969	有	2008
3	S. Hasegawa	三重大学	Study on lithium/air secondary batteries - Stability of NASICON-type lithium ion conducting glass ceramics with water	J. Power Sources, 189, 371-377	有	2009
4	T. Zhang	三重大学	Water-Stable Lithium Anode with the Three-Layer Construction for Aqueous Lithium-Air Secondary Batteries	Electrochemical and Solid State Letters, 12, A132-A135	有	2009
5	T. Zhang	三重大学	Stability of a Water-Stable Lithium Metal Anode for a Lithium-Air Battery with Acetic Acid-Water Solutions	J. Electrochem. Society, 157, A214-A218	有	2010
6	T. Zhang	三重大学	A novel high energy density rechargeable lithium/air battery	Chemical Communications, 46, 1661-1663	有	2010
7	T. Zhang	三重大学	Water-Stable Lithium Electrode and Its Application in Aqueous Lithium/Air Secondary Batteries	Electrochemistry, 78, 360-362	有	2010
8	今西誠之	三重大学	リチウム-空気二次電池用リチウム-固体電解質複合負極	Electrochemistry, 78, 544-548	無	2010
9	Y. Shimonishi	三重大学	A study on lithium/air secondary batteries - stability	J. Power Sources, 195, 6187-6191	有	2010

			of NASICON-type glass ceramics in acid solutions			
10	S. Liu	三重大学	Effect of nano-silica filler in polymer electrolyte on Li dendrite formation in Li/poly(ethylene oxide)-Li(CF <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> N/Li	J. Power Sources, 195, 6847-6853	有	2010
11	S. Liu	三重大学	Lithium Dendrite Formation in Li/Poly(ethylene oxide)-Lithium Bis(trifluoromethanesulfonyl)imide and N-Methyl-N-propylpiperidinium Bis(trifluoromethanesulfonyl)imide/Li Cells	J. Electrochem. Soc., 157, A1092-A1098	有	2010
12	Y. Shimonishi	三重大学	Synthesis of garnet-type Li <sub>7-x</sub> La <sub>3</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>12-1/2x</sub> and its stability in aqueous solutions	Solid State Ionics, 183, 48-53	有	2011
13	T. Zhang	三重大学	Stability of Li/polymer electrolyte-ionic liquid composite/lithium conducting glass ceramics in an aqueous electrolyte	Electrochem. Solid-State Lett., 14, A45-A48	有	2011
14	Y. Shimonishi	三重大学	A Study on lithium/air secondary batteries -Stability of the NASICON-type lithium ion conducting solid electrolyte in alkaline aqueous solutions	J. Power Sources, 196, 5128-5132	有	2011
15	P. Johnson	Colorado School of Mines	Effect of microstructure on the conductivity of a NASICON-type lithium ion conductor	Solid State Ionics, 192, 326-329	有	2011
16	T. Zhang	三重大学	Aqueous Lithium/Air Rechargeable Batteries	Chemistry Letters, 40, 668-673	有	2011
17	S. Liu	三重大学	Effect of co-doping nano-silica filler and N-methyl-N-propylpiperidinium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide into polymer electrolyte on Li dendrite formation in Li/poly(ethylene oxide)-Li(CF <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> N/Li	J. Power Sources, 196, 7681-7686	有	2011
18	K. Takahashi	三重大学	A water stable high lithium ion conducting Li <sub>1.4</sub> Ti <sub>1.6</sub> Al <sub>0.4</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> -Epoxy Resin Hybrid Sheet	J. Electrochem. Soc.	有	in press
1	藤原直子	産業技術総合研究所	金属-空気二次電池用可逆空気極の開発	Electrochemistry, 78(6), 540-544	無	2010
2	藤原直子,八尾勝,城間 純,妹尾 博,五百蔵勉,安田和明	産業技術総合研究所	Reversible air electrodes integrated with an anion-exchange membrane for secondary air batteries.	J. Power Sources, 196(2), 808-813	有	2011

1	Haimei Liu, Yonggang Wang, Kaixue Wang, Eiji Hosono, Haoshen Zhou	産業技 術総合 研究所	Design and Synthesis of a Novel Nanothorned VO <sub>2</sub> (B) Hollow Microsphere and Their Application in Lithium-Ion Batteries	J. Mater. Chem. Vol.19, 2835-2840	有	20 09
2	Haimei Liu, Yonggang Wang, Kaixue Wang, Yarong Wang, Haoshen Zhou	産業技 術総合 研究所	Synthesis and Electrochemical Properties of Single-Crystal LiV <sub>3</sub> O <sub>8</sub> Nanorods as Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries	Journal of Power Sources, Vol.192, , 668-673	有	20 09
3	Haimei Liu, Yonggang Wang, Liang Li, Kaixue Wang, Eiji Hosono, Haoshen Zhou	産業技 術総合 研究所	Facile synthesis of NaV <sub>6</sub> O <sub>15</sub> nanorods and its electrochemical behavior as cathode material in rechargeable lithium batteries	J. Mater. Chem. Vol.19, 7885-7891	有	20 09
4	Haimei Liu, Yonggang Wang, Huiqiao Li, Wensheng Yang, Haoshen Zhou	産業技 術総合 研究所、 北京化 工大学	Flower-like vanadium trioxide: solvo-thermal preparation, electrochemical properties of insertion/deinsertion of lithium ions and capacitance behaviors	ChemPhysChem, vol.11, 3273-3280	有	20 10
5	Eiji Hosono, Hirofumi Matsuda, Tatsuya Saito, Tetsuichi Kudo, Masaki Ichihara, Itaru Honma, Haoshen Zhou	産業技 術総合 研究所	Synthesis of single crystalline Li <sub>0.44</sub> MnO <sub>2</sub> nanowires with large specific capacity and good high current density property for a positive electrode of Li ion battery	J. Power Sources, Vol.195, 7098-7101	有	20 10
6	Huiqiao Li, Tianyou Zhai, Ping He, Eiji Hosono, Haoshen Zhou	産業技 術総合 研究所	Single-crystal H <sub>2</sub> V <sub>3</sub> O <sub>8</sub> nanowires: a competitive anode with large capacity for aqueous lithium-ion batteries	J. Mater. Chem. Vol.21, 1780-1787	有	20 11
7	Haimei Liu, Yonggang Wang, Wensheng Yang, Haoshen Zhou	産業技 術総合 研究所、 北京化 工大学	A large capacity of LiV <sub>3</sub> O <sub>8</sub> cathode material for rechargeable lithium-based batteries	Electrochimica Acta, 56, 1392-1398	有	20 11
8	Huiqiao Li, Ping He, Yonggang	産業技 術総合 研究所	High-surface vanadium oxides with large capacities for lithium-ion batteries: from	J. Mater. Chem. 21, 10999-11009	有	20 11



	Wang, Eiji Hosono, and Haoshen Zhou		hydrated aerogel to nanocrystalline VO <sub>2</sub> (B), V <sub>6</sub> O <sub>13</sub> and V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			
9	Yu Zhao, Xizheng Liu, Huiqiao Li, Tianyou Zhai, and Haoshen Zhou	産業技 術総合 研究所	Hierarchical Micro/Nano Porous Silicon Li-ion Battery Anode	Chemical Communications, 48, 5079-5081	有	20 12
1	H. Yamada, I. Moriguchi, T. Kudo		Electric Double Layer Capacitance on Hierarchical Porous Carbons in an Organic Electrolyte	J. Power Sources	有	20 08
2	H. Yamada, Y. Watanabe, I. Moriguchi, T. Kudo		Rate capability of lithium intercalation into nano-porous graphitized carbons	Solid State Ionics	有	20 08
3	森口 勇, 山 田博俊		ナノ構造を用いた Li イオン 2 次 電池の開発動向	「2008 最新電池技術大 全」, (株) 電子ジャーナ ル	無	20 08
4	本間 格		ナノテクを用いた高出力型リチ ウム二次電池の産官学連携開発	産総研 TODAY 2009 年 8 月号, (株) N T S	無	20 08
5	M.Okubo, Y.Tanaka, H.S.Zhou, T.Kudo and I.Honma		Determination of the Activation Energy for Li-ion Diffusion in Electrodes	J. Physical Chemistry B	有	20 09
6	Dinesh Rangappa, Masaki Ichihara, Tetsuichi Kudo and Itaru Honma		Surface Modified LiFePO <sub>4</sub> /C Nanocrystals Synthesis by Organic Molecules Assisted Supercritical Water Process	J. Power Sources	有	20 09
7	<u>I. Moriguchi</u>		Self-Assembly-Assisted Fabrication of Inorganic Nanoporous Electrode Materials	In Bottom-up Nanofabrication: Supramolecules, Self-Assemblies, and Organized Films Eds. American Scientific Publishers	無	20 09
8	森口 勇, 山 田博俊		高出力 Li イオン二次電池電極材 料の開発	工業材料	無	20 09
9	森口 勇, 山 田博俊		Li イオン二次電池の高出力・大 容量化に向けた電極材料ナノ構 造制御	電池技術	無	20 09
10	本間 格		ナノ結晶活物質を利用した高容 量・高出力型電極の設計	高性能蓄電池, 設計基礎 研究から開発・評価まで (株) N T S	無	20 09
11	M. Okubo, I. Honma		High rate Li-ion intercalation in nanocrystalline cathode materials for high power Li-ion batteries	Nanomaterials for Lithium Ion Batteries: Fundamentals and Applications, R. Yazami Ed., Pan Stanford	無	20 09

				Publishing Pte Ltd		
1 2	Dinesh Rangappa, Koji Sone, Tetsuichi Kudo and Itaru Honma		Directed Growth of Nanoarchitected LiFePO <sub>4</sub> Electrode by Solvothermal Synthesis and their Cathode Properties	J. Power Sources	有	20 10
1 3	M.Okubo, Y.Mizuno, H.Yamada, J.-D.Kim, E.Hosono, H.S.Zhou, T.Kudo and I.Honma		Fast Li-ion insertion into nanosized LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> without domain boundaries	ACS nano	有	20 10
1 4	Dinesh Rangappa, Koji Sone, Masaki Ichihara, Tetsuichi Kudo and Itaru Honma		Rapid One-pot synthesis of LiMPO <sub>4</sub> (M=Fe, Mn) Colloidal Nanocrystals by Supercritical Ethanol Process	Chemical Communications	有	20 10
1 5	森口 勇, 山田 博俊		キャパシタおよびLiイオン二次電池電極材料の開発	ゾルーゲル法技術の最新動向, 第28章, pp.233-240 (株) シーエムシー出版	無	20 10
1 6	工藤徹一, 日比野光宏, 本間 格		ナノテクノロジーを利用したリチウムイオン電池の高性能化, リチウムイオン電池の科学-ホスト・ゲスト系電極の物理化学からナノテク材料まで	内田老鶴圃	無	20 10
1 7	Dinesh Rangappa, Koji Sone, Ying Zhou, Tetsuichi Kudo and Itaru Honma		Size and Shape Controlled LiMnPO <sub>4</sub> Nanocrystals by Supercritical Ethanol Process and their Electrochemical Properties	J. Materials Chemistry	有	20 11
1 8	森口 勇		キャパシタおよびLiイオン二次電池の材料創製	界面の分子科学-界面のデザインと界面計測, (株) シーエムシー出版	無	20 11
1 9	D.Rangappa, I.Honma		Designing Nanocrystal Electrodes by Supercritical Fluid Process and their Electrochemical Properties	InTech - Open Access Publisher "Nanocrystal"	無	20 11
2 0	本間 格		グラフェンの調整技術とエネルギーデバイスへの応用	月間マテリアルインテグレーション, 特集「地域と世界に貢献する東北大学多元物質科学研究所」(株) T I C	無	20 11
2 1	Shintaro Aono, Koki Urita, Hirotoishi Yamada, and Isamu		Rapid Synthesis and Charge-Discharge Properties of LiMnPO <sub>4</sub> Nanocrystallite-embedded Porous Carbons	Chemistry Letters	有	20 12

	Moriguchi					
2 2	Dinesh Rangappa, Murukanahalli Kempaiah Devaraju, Takaaki Tomai, Atsushi Unemoto and Itaru Honma		Ultra Thin Nanosheets of $\text{Li}_2\text{MSiO}_4$ (M= Fe, Mn) as High Capacity Li Ion Battery Electrodes	Nano Letters	有	20 12
2 3	Murukanahalli Kempaiah Devaraju, Dinesh Rangappa and Itaru Honma		Controlled Synthesis of Nanocrystalline $\text{Li}_2\text{MnSiO}_4$ Particles for High Capacity Cathode Application in Lithium ion Batteries	Chemical Communications	有	20 12
2 4	M.K.Devaraju, M.Sathish, I.Honma		Advanced Energy Devices - Lithium Ion Battery and High Energy Capacitor	Handbook of Sustainable Engineering, Springer	無	20 12
2 5	Murukanahalli Kempaiah Devaraju and Itaru Honma		Hydrothermal and Solvothermal Process Towards Development of $\text{LiMPO}_4$ (M= Fe and Mn) Nanomaterials for Lithium-Ion Batteries	Advanced Energy Materials	有	20 12
1	H. Sakaguchi <i>et al.</i>	Tottori Univ.	Anode properties of Ru-coated Si thick film electrodes prepared by gas-deposition	J. Power Sources, 195 (2010) 3649-3654.	有	20 10
2	H. Sakaguchi <i>et al.</i>	Tottori Univ.	Anode properties of Cu-coated Si thick film electrodes prepared by electroless deposition and gas-deposition	Electrochemistry, 78 (2010) 329-331.	有	20 10
3	H. Sakaguchi <i>et al.</i>	Tottori Univ.	Anode properties of thick-film electrodes prepared by gas deposition of Ni-coated Si particles	J. Power Sources, 196 (2011) 2143-2148.	有	20 11
4	H. Sakaguchi <i>et al.</i>	Tottori Univ.	Application of electrolyte using novel ionic liquid to Si thick film anode of Li-ion battery	J. Power Sources, 196 (2011) 3911-3915.	有	20 11
5	H. Sakaguchi <i>et al.</i>	Tottori Univ.	Anode Properties of Composite Thick-Film Electrodes Consisted of Si and Various Metal Silicides	Int. J. Electrochem. Sci., 6 (2011) 2246-2254.	有	20 11
6	H. Sakaguchi <i>et al.</i>	Tottori Univ.	Influence of order in stepwise electroless deposition on anode properties of thick-film electrodes consisting of Si particles coated with Ni and Cu	J. Power Sources, 196 (2011) 10244-10248.	有	20 11
7	H. Sakaguchi <i>et al.</i>	Tottori Univ.	Li-insertion/extraction properties of Si thick-film anodes in ionic liquid electrolytes based on bis(fluorosulfonyl)amide and	Chem. Lett., (2012) in press.	有	20 12

			bis(trifluoromethanesulfonyl)amide anions			
8	H. Sakaguchi <i>et al.</i>	Tottori Univ.	Novel composite thick-film electrodes consisted of zinc oxide and silicon for lithium-ion battery anode	Int. J. Electrochem. Sci., 7 (2012) in press.	有	2012
1	S. Iwamura, H. Nishihara, T. Kyotani	国立大学法人 東北大学	Effect of Buffer Size around Nanosilicon Anode Particles for Lithium-Ion Batteries	J. Phys. Chem. C, 116, 6004-6011 (2012)	有	2012
2	H. Nishihara, T. Kyotani	国立大学法人 東北大学	Templated Nanocarbons for Energy Storage	Adv. Mater., in press (2012)	有	2012
1	K. Nishikawa, K. Dokko, K. Kinoshita, S.-W. Woo, K. Kanamura	Tokyo Metropolitan University	Three-dimensionally ordered macroporous Ni-Sn anode for lithium batteries	Journal of Power Sources, (189) 726-729	有	2009
2	S.-W. Woo, N. Okada, M. Kotobuki, K. Sasajima, H. Munakata, K. Kajihara, K. Kanamura	Tokyo Metropolitan University	Highly patterned cylindrical Ni-Sn alloys with 3-dimensionally ordered macroporous structure as anodes for lithium batteries	Electrochimica Acta, (55) 8030-8035	有	2010
3	M. Kotobuki, N. Okada, K. Kanamura	Tokyo Metropolitan University	Design of a micro-pattern structure for a three dimensionally macroporous Sn-Ni alloy anode with high areal capacity	Chemical Communications, (47) 6144-6146	有	2011
1	T.Kobayashi, <i>et al.</i>	東京工業大学	All solid-state battery with sulfur electrode and thio-LISICON electrolyte	J. Power Sources 182(2) 621-625	有	2008
2	T.Kobayashi, <i>et al.</i>	東京工業大学	Inter facial reactions at electrode/electrolyte boundary in all solid-state lithium battery using inorganic solid electrolyte, thio-LISICON	Electrochimica Acta 53(15) 5045-5050	有	2008
3	K. Homma <i>et al.</i>	東京工業大学	Crystal structure of High-Temperature phase of Lithium Ionic Conductor, Li <sub>3</sub> PS <sub>4</sub>	J. Phys. Soc. Jpn. 79(2010) Supplement A, 90-93	有	2010
4	K. Homma <i>et al.</i>	東京工業大学	Crystal structure and phase transitions of the lithium ionic conductor, Li <sub>3</sub> PS <sub>4</sub>	Solid State Ionics, 182, 53-58	有	2011
1	水畑 穰他	神戸大学	Room-temperature Synthesis of Monodispersed SnO <sub>2</sub> Nanoparticles by Liquid Phase Deposition	Chemistry Letters 38 (10), 974-975	有	2009
2	宇井幸一	岩手大	Fabrication of binder-free	Electrochimica Acta	有	20

	他	学	SnO <sub>2</sub> nanoparticle electrode for lithium secondary batteries by electrophoretic deposition method	76, 383-388		12
1	入山恭寿ら	静岡大学	High Voltage Stability of Interfacial Reaction at the LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Thin-Film Electrodes/Liquid Electrolytes with Boroxine Compounds	<i>J. Electrochemical Soc.</i> , <b>157</b> (6), A667-A681 (2010) .	有	20 10
2	田中康隆ら	静岡大学	Electrochemical Properties of a Mixed Boric Ester as a Novel Electrolyte Solvent	<i>Electrochemistry</i> , <b>78</b> (5), 397-399 (2010).	有	20 10
1	A. K. Thapa, T. Ishihara	Kyushu University	Mesoporous □□-MnO <sub>2</sub> /Pd catalyst air electrode for rechargeable lithium-air battery	Journal of Power Sources, 196 pp7016–pp7020	有	20 10
2	A. K. Thapa, K. Saimen, T. Ishihara	Kyushu University	Pd/MnO <sub>2</sub> Air Electrode Catalyst for Rechargeable Lithium/Air Battery	Electrochemical and Solid-State Letters 13(11) A165-A167	有	20 10
3	A. K. Thapa, Y. Hidaka, H. Hagiwar, S. Ida, and T. Ishihara	Kyushu University	Mesoporous β-MnO <sub>2</sub> air electrode modified with Pd for rechargeability in lithium-air battery	Journal of the Electrochemical Society 158(12), A1483-A1489.	有	20 11
4	T. Ishihara, A. K. Thapa, Y. Hidaka, and S. Ida	Kyushu University	Rechargeable Lithium-Air Battery Using Mesoporous Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> modified with Pd for Air Electrode	Electrochemistry (Accepted)	有	20 12
1	S. Komaba, T. Ozeki, and K. Okushi	学校法人東京理科大学	Functional Interface of Polymer Modified Graphite Anode	J. Power Sources, 189, 197-203	有	20 09
2	S. Komaba, N. Yabuuchi, and Y. Kawamoto	学校法人東京理科大学	A New Polymorph of Layered LiCoO <sub>2</sub>	Chem. Lett., 38 (No. 10), 954-955	有	20 09
3	S. Komaba, N. Yabuuchi, and S. Ikemoto	学校法人東京理科大学	High-Temperature X-ray Diffraction Study of Crystallization and Phase Segregation on Spinel-Type Lithium Manganese Oxides	J. Solid State Chem., 183, 234-241	有	20 10
4	S. Komaba, T. Mikumo, N. Yabuuchi, A. Ogata, H. Yoshida, and Y. Yamada	学校法人東京理科大学	Electrochemical Insertion of Li and Na Ions into Nanocrystalline Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> and α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> for Rechargeable Batteries	J. Electrochem. Soc., 157 (1), A60-A65	有	20 10
5	Y. Katayama, S. Miyashita, T. Miura	学校法人慶應義塾	Lithium dope and undope reactions for tin in an ionic liquid electrolyte with some glymes	J. Power Sources, 195, 6162-6166	有	20 10
6	S. Komaba, C. Takei, T. Nakayama,	学校法人東京理科大	Electrochemical Intercalation Activity of Layered NaCrO <sub>2</sub> vs. LiCrO <sub>2</sub>	Electrochem. Commun., 12, 355-358	有	20 10

	A. Ogata, and N. Yabuuchi	学				
7	N. Yabuuchi, Y. Yamakawa, K. Yoshii, and S. Komaba	学校法人東京理科大学	Hydrothermal Synthesis and Characterization of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ as Positive Electrode Materials for Lithium-Ion Batteries	Electrochemistry, 78 (No. 5), 363-366	有	20 10
8	S. Miyashita, Y. Katayama, T. Miura, and S. Komaba	学校法人慶應義塾、学校法人東京理科大学	The Influence of Additives on Lithium Dope / Undope Reactions for a Tin Film Electrode in a Room-Temperature Ionic Liquid Electrolyte	ECS Trans., 25 (36), 169-176	有	20 10
9	Y. Kaga, Y. Katayama, T. Miura, and S. Komaba	学校法人慶應義塾、学校法人東京理科大学	Anode Reactions of a Tin Thin Film Electrode Modified with an Ion-Conductive Polymer in a Room-Temperature Ionic Liquid Electrolyte	ECS Trans., 25 (36) 91-98	有	20 10
10	S. Komaba, N. Yabuuchi, T. Ozeki, K. Okushi, H. Yui, K. Konno, Y. Katayama, T. Miura	学校法人東京理科大学、学校法人慶應義塾	Functional Binders for Reversible Lithium Intercalation into Graphite in Propylene Carbonate and Ionic Liquid Media	J. Power Sources, 195, 6069-6074	有	20 10
11	S. Komaba, N. Yabuuchi, Y. Ktayama, and T. Miura	学校法人東京理科大学、学校法人慶應義塾	Higher Energy and Safety of Lithium-Ion Batteries with Ionic Liquid Electrolyte	Proceedings of SPIE, Volume 7683 (Energy Harvesting and Storage: Materials, Devices, and Applications), 76830F (7 pages)	有	20 10
12	S. Komaba, M. Watanabe, and H. Groult	学校法人東京理科大学	Alkali Chloride Coating for Graphite Electrode of Lithium-Ion Batteries	J. Electrochem. Soc., 157 (12), A1375-A1382	有	20 10
13	S. Komaba, T. Ozeki, N. Yabuuchi, and K. Shimomura	学校法人東京理科大学	Polyacrylate as Functional Binder for Silicon and Graphite Composite Electrode in Lithium-ion Batteries	Electrochemistry (Tokyo, Japan), 79 (No. 1), 6-9	有	20 11
14	N. Yabuuchi, Y. Yamakawa, K. Yoshii, and S. Komaba	学校法人東京理科大学	Low-Temperature Phase of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ : Crystal Structure and Preliminary Study of Electrochemical Behavior	Dalton Trans., 40, 1846-1848	有	20 11
15	N. Yabuuchi, K. Yoshii, S.-T. Myung, I. Nakai, and S. Komaba	学校法人東京理科大学	Detailed Studies of a High-Capacity Electrode Material for Rechargeable Batteries, $\text{Li}_2\text{MnO}_3\text{-LiCo}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$	J. Am. Chem. Soc., 133, 4404-4419	有	20 11
16	N. Yabuuchi, M. Sugano, Y. Yamakawa, I. Nakai, K. Sakamoto, H.	学校法人東京理科大学	Effect of heat-treatment process on $\text{FeF}_3$ nanocomposite electrodes for rechargeable Li batteries	J. Mater. Chem., 21, 10035-10441	有	20 11

	Muramatsu, and S. Komaba					
1 7	S. Komaba, K. Shimomura, N. Yabuuchi, T. Ozeki, H. Yui, and K, Konno	学校法人 東京理 科大学	Study on Polymer Binders for High-Capacity SiO Negative Electrode of Li-Ion Batteries	J. Phys. Chem. C, 115, 13487–13495	有	20 11
1 8	N. Yabuuchi, K. Shimomura, Y. Shimbe, T. Ozeki, J.-Y. Son, H. Oji, Y. Katayama, T. Miura, and S. Komaba	学校法人 東京理 科大学、学 校法人 慶應義 塾	Graphite-Silicon-Polyacrylate Negative Electrodes in IonicLiquid Electrolyte for Safer Rechargeable Li-Ion Batteries	Advanced Energy Materials, 1, 759–765	有	20 11
1 9	S. Komaba, N. Yabuuchi, T. Ozeki, Z.-J. Han, K. Shimomura, H. Yui, Y. Katayama, and T. Miura	学校法人 東京理 科大学、学 校法人 慶應義 塾	Comparative Study of Sodium Polyacrylate and Poly-(vinylidene fluoride) as Binders for High Capacity Si Graphite Composite Negative Electrodes in Li-Ion Batteries	J. Phys. Chem. C, 116, 1380–1389	有	20 12
1	稲本将史, 栗 原英紀, 矢嶋 龍彦	埼玉県 産業技 術総合 センター 埼玉工 業大学	マグネシウム二次電池としての 硫黄を添加した五酸化バナジウ ムの電極特性	表面技術, <b>62</b> , 516-520	有	20 11
2	稲本将史, 栗 原英紀, 矢嶋 龍彦	埼玉県 産業技 術総合 センター 埼玉工 業大学	Electrode Performance of Vanadium Pentoxide Xerogel Prepared by Microwave Irradiation as Active Cathode Material for Rechargeable Magnesium batteries	<i>Electrochemistry</i> , <b>80</b> , 421-422	有	20 12
1	木嶋倫人、吉 永昌史、阿波 加淳司、秋本 順二	産業技 術総合 研究所	Microwave synthesis, characterization, and electrochemical properties of $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanoparticles	<i>Solid State Ionics</i> , <b>192</b> , 293	有	20 11
2	吉永昌史、木 嶋倫人、若原 園子、秋本順 二	産業技 術総合 研究所	Microwave Synthesis of Nano-Sized SnO <sub>2</sub> for Lithium-Ion Batteries	<i>Key Eng. Mater.</i> , <b>485</b> , 127	有	20 11
3	吉永昌史、木 嶋倫人、若原 園子、秋本順 二	産業技 術総合 研究所	Microwave synthesis and electrochemical properties of ultrafine SnO <sub>2</sub> nanoparticles	<i>Chem. Lett.</i> , <b>40</b> , 414	有	20 11
1	N. Sonoyama	名古屋	Lithium intercalation reaction	<i>J. Power Sources</i> <b>196</b> ,	有	20

		工業大学	into the Keggin type polyoxomolybdates	6822-27		11
2	S. Uematsu	名古屋工業大学	Reversible lithium charge/discharge property of bi-capped Keggin-type polyoxovanadates	<i>J. Power Sources</i> , 217, 13-20	有	2012
1	久保田昌明 阿部英俊 江黒高志 *西村健 *谷俊夫 *西久保英郎 *幡谷耕二 *島田道宏	古河電池株式会社 *古河電気工業株式会社	高エネルギーリチウムイオン二次電池用シリサイド・ナノ・ハイブリッド(SNH)負極の開発 -1-	古河電池株式会社 FBテクニカルニュース №66 2011.1	有	2011
2	久保田昌明 阿部英俊 *西村健 *西久保英郎 *谷俊夫 *幡谷耕二 *樋上俊哉	古河電池株式会社 *古河電気工業株式会社	高エネルギーリチウムイオン二次電池用シリサイド・ナノ・ハイブリッド(SNH)負極の開発 -2-	古河電池株式会社、 FBテクニカルニュース №67 2011.12	有	2011
1	伊藤 隆	東北大学	電極材料の過剰な負荷条件下におけるその場ラマン分光解析	FC Reports, 28(2) (2010) 44-48	有	2010
2	伊藤 隆	東北大学	再生可能サイクルへ向けた環境電気化学エネルギー変換デバイス	Electrochemistry 78 (2010) 50	有	2010
3	伊藤 隆	東北大学	その場ラマン分光法	電池ハンドブック、 オーム社、(2010) 105-109.	有	2010
4	伊藤 隆	東北大学	スマートハウスの発電・蓄電・給電技術の最前線	シーエムシー出版、(2011) 161-169	有	2011
1	M.MAMIYA <sup>1</sup> , K. KATAOKA <sup>1</sup> , S. KIKUCHI <sup>2</sup> , Y. TERAJIMA <sup>2</sup> , K. TOKIWA <sup>2</sup> J. AKIMOTO <sup>1</sup>	1.産総研 2.東理大	Synthesis and structure analysis of a new titanium oxide having an intergrowth structure between ramsdellite-type and calcium ferrite-type	Journal of Physics and Chemistry of Solids, in press	有	2011
1	T. Kitagawa*, K. Azuma*, M. Koh**, A. Yamauchi**, M. Kagawa**, H. Sakata**, H. Miyawaki**,	*関西大学 **ダイキン工業	Application of Fluorine-containing Solvents to LiCoO <sub>2</sub> Cathode in High Voltage Operation	Electrochemistry, 78(5), pp.345-348	有	2010



	A. Nakazono**, H. Arima**, M. Yamagata*, M. Ishikawa*					
	M. Ishikawa*, M. Yamagata*, T. Sugimoto*, Y. Atsumi*, T. Kitagawa*, K. Azuma*	*関西大 学 **ダイ キン工 業	Li-ion Battery Performance with FSI-based Ionic Liquid Electrolyte and Fluorinated Solvent-based Electrolyte	ECS Transactions, 33(28), pp.29-36	有	20 11

【基盤技術開発】

1	三田裕一, 関志朗, 寺田信之, 紀平庸男, 竹井勝仁, 宮代一	電力中央研究所	Accelerated Test Method for Life Estimation of High-Power Lithium-Ion Batteries	Electrochemistry, 78(5), 384-306,	有	20 10
2	小林剛, 関志朗, 三田裕一, 宮代一, 寺田信之, 小島亮	電力中央研究所他	AC Impedance Analysis for 10Ah-Class Lithium-ion Batteries	Electrochemistry, 78(5), 416-419,	有	20 10
3	関志朗, 紀平庸男, 三田裕一, 小林剛, 竹井勝仁, 池谷知彦, 宮代一, 寺田信之	電力中央研究所	AC Impedance Study of High-Power Lithium-ion Secondary Batteries - Effect of Battery Size -	Journal of the Electrochemical Society 158(2), A163-A166	有	20 11
5	BEN YAHIA Hamdi, 鹿野昌弘, 辰巳国昭	産業技術総合研究所	Reinvestigation of the Synthesis of $\text{LiFeVO}_4$	Materials Chemistry and Physics 128(1-2), 16-18	有	20 11
6	鹿野昌弘, 小林弘典, 小池伸, 栄部比夏里, 齋藤喜康, 堀博伸, 蔭山博之, 辰巳国昭	産業技術総合研究所	X-ray Absorption Near-Edge Structure Study on Positive Electrodes of Degraded Lithium-Ion Battery	Journal of Power Sources, 196(16) 6881-6883	有	20 11
7	齋藤喜康, 鹿野昌弘, 小林弘典	産業技術総合研究所	State of Charge (SOC) Dependence of Lithium Carbonate on $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ Electrode for Lithium-Ion Batteries	Journal of Power Sources, 196(16), 6889-6892	有	20 11
8	広瀬久士	日本自動車研究所	NEDO 次世代自動車用高性能蓄電池基盤技術の研究開発プロジェクトへの FC・EV センターの取り組み	自動車研究, 30(4)	無	20 08
9	押野幸一, 三石洋之	日本自動車研	自動車用リチウムイオン電池の安全性評価規格について	自動車研究, 31(6)	無	20 09

		研究所				
10	森田賢治,赤井泉明,広瀬久士	日本自動車研究所	次世代自動車用電池性能試験方法の開発(第2報)ー簡易サイクル寿命試験プロファイル作成方法の検討ー	自動車研究,31(7)	無	2009
11	森田賢治,赤井泉明,広瀬久士	日本自動車研究所	電動車両用リチウムイオン電池のサイクル寿命試験プロファイルの開発ー試験プロファイル作成手法の検討ー	自動車技術会論文集,41(2)	有	2010
12	前田清隆,高橋昌志,小松和則	日本自動車研究所	自動車用リチウムイオン電池の安全性評価試験ー環境試験法の調査(第2報)ー	自動車研究,33(6)	無	2011
13	小松和則,高橋昌志,前田清隆	日本自動車研究所	自動車用リチウムイオン電池の安全性評価ー電氣的試験法の調査(第3報)ー	自動車研究,33(7)	無	2011
14	Masashi Takahashi, Kazunori Komatsu, Kiyotaka Maeda	日本自動車研究所	Evaluation Test of Lithium-Ion Batteries in Vehicles - Investigation of Overcharge Test Method -	ECS Transactions,41(39),27-41	有	2011
15	R.Baskaran, 桑田直明,神嶋修,河村純一,S. Selvasekarpandian	東北大学	Structural and Electrochemical Studies on Thin Film LiNi0.8Co0.2O2 by PLD for Micro Battery.	Solid State Ionics,180(6-8),636-643	有	2009
16	駒形将吾,桑田直明,R. Baskaran,河村純一,佐藤一永,水崎純一郎	東北大学	Detection of Degradation of Lithium-Ion Batteries with Acoustic Emission Technique	ECS Transactions,25(33),163-167	有	2009
17	Liu, Huijin, Yujin Tong, 桑田直明,大澤正敏,河村純一,叶深	東北大学	Adsorption of Propylene Carbonate (PC) on the LiCoO2 Surface Investigated by Nonlinear Vibrational Spectroscopy	J. Phys. Chem. C,113,20531-20534.	有	2009
18	桑田直明,岩上直也,丹治慶成,松田康孝,河村純一	東北大学	Characterization of Thin-Film Lithium Batteries with Stable Thin-Film Li3PO4 Solid Electrolytes Fabricated by ArF Excimer Laser Deposition	Journal of The Electrochemical Society,157,A521-A527.	有	2010
19	Yoshiki Iwai, Junichi Kawamura	東北大学	Observation of Electrophoretic Nuclear Magnetic Resonance Imaging in Polymer Electrolyte	Journal of the Physical Society of Japan,79(Supplement A),160-162.	有	2010
20	河村純一	東北大学	リチウムイオン電池の NMR マイクロイメージング	Electrochemistry,78(12),999-1003.	有	2010