

研究成果展開事業
ー研究成果最適展開支援プログラムー
(A-STEP)

戦略テーマ重点タイプ

研究開発テーマ
「エネルギーの有効利用を支える次世代定置用
蓄電技術の創出」

テーマ事後評価用資料

令和4年10月

目次

1. 研究開発テーマ	1
(1) 研究開発テーマの概要	1
(2) プログラムオフィサー（PO）による公募・選考・研究開発テーマ運営にあたっての方針	1
2. プログラムオフィサー（PO）	2
3. 採択課題	3
4. 研究開発テーマのねらい（目標）	4
5. 研究課題の選考について【参考】	6
6. アドバイザーの構成について	8
7. 研究開発テーマのマネジメントについて	9
(1) PO の運営方針	9
(2) 研究開発テーマの進捗状況の把握	9
(3) 研究開発テーマの研究開発計画の見直し	12
(4) 中間評価基準と研究開発を継続させた／継続させなかった根拠	12
(5) 課題内・課題間の連携の推進	13
(6) 研究開発課題の評価と評価結果に基づく指導	13
(7) 研究費の配分	14
(8) テーマ中間評価結果を踏まえた対応	14
8. 研究開発テーマとしての産業創出の核となる技術の確立状況	16
8. 1 カリウムイオン電池およびカリウムイオンキャパシタの基本技術開発	16
(1) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果	16
(2) 最終目標の達成度	16
8. 2 太陽光発電の高効率化を可能とする新型キャパシタの開発	17
(1) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果	17
(2) 最終目標の達成度	18
8. 3 超高エネルギー密度、本質安全および長寿命な鉄-空気二次電池 Shuttle Battery の開発	19
(1) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果	20
(2) 最終目標の達成度	20
9. 総合所見	22

1. 研究開発テーマ

「エネルギーの有効利用を支える次世代定置用蓄電技術の創出」(平成 28 年度発足)

(1) 研究開発テーマの概要

温室効果ガスの 1 つである二酸化炭素の削減は喫緊の重要課題である。エネルギーの安定供給と環境配慮の両立を目指しながら二酸化炭素を削減するには、自然エネルギーやバイオマスなどの新しい再生可能エネルギーの社会実装が必要である。自然エネルギーを現実社会に大量に導入するには発電設備の問題もあるが、電力の安定化も重要な課題となっている。そのために、蓄電池、キャパシタ、燃料電池・電解複合システムなどが、今後の自然エネルギー導入の鍵を握っている。これらのデバイスは電気エネルギーを化学物質のエネルギーに変換する、あるいはその逆のエネルギー変換を高いエネルギー変換効率で行う機能を持ち、発電システムと送電グリッドの中間に位置することで自然エネルギーを安定化させるとともに有効利用する役目を担っている。すでに、リチウムイオン電池や鉛蓄電池が定置用エネルギー変換デバイスとして使用されている。しかし、普及のために解決しなければならない問題が残っている。それは、リチウムイオン電池の場合には安全性と寿命であり、鉛蓄電池ではエネルギー密度と寿命である。本テーマでは、これら具体的な問題点を解決するための新規エネルギー変換デバイスやそれらを実現するための新規材料の開発を推進し、定置用電気化学エネルギー変換デバイス構築のための材料技術と電池技術を確立する。あわせて、電気化学エネルギー変換デバイスに関する基盤学術の進展も目指す。

(2) プログラムオフィサー(PO)による公募・選考・研究開発テーマ運営にあたっての方針

電気化学エネルギー変換デバイスとして、蓄電池、キャパシタ、燃料電池・電解複合システムなどを中心に、次世代定置用エネルギー変換・貯蔵システムに資する電池技術や材料技術の創成を目指す。電気自動車用電池システムや太陽光発電用電池システムは既に存在するが、これらの応用で使用されているリチウムイオン電池を含め新しい電池系に関する研究を推進する。定置用のエネルギー変換システムにおいては、例えば夜間と昼間の電力料金の差を利用して電力事業に参入できることが重要な課題である。また、各家庭においても同様のことが言える。さらに、これらの効果は、電力システムの夜間と昼間の電力の需給バランスを調整し、電力のピークシフトやピークカットなどにより、化石燃料を利用する火力発電の負荷を下げ、トータルエネルギーの利用効率を高めることにつながる。このような事業が実際に社会で行われるためには、エネルギー変換システムのコストが重要である。蓄電池やキャパシタの場合には単位電力当たりのデバイスコストが大きな問題となっている。また、燃料電池・電解複合システムを利用する場合には、単位重量当たりの水素のコストが重要となる。したがって、高効率な充放電や電解が必要であり、少なくともエネルギー変換効率が 90 ~ 95 %程度必要となる。さらには、デバイスの寿命が最大の問題となる。これまでにリチウムイオン電池や鉛蓄電池の寿命改善がなされているが、電池コストを低下させるためには、充放電サイクル 3,000 回以上、好ましくは 5,000 回以上のサイクルが必要である。将来的にはさらに、10,000 回のサイクルができるエネルギー変換デバイスが登場することが望まれる。また、エネルギーデバイスにおいては安全性も非常に重要な課題である。本テーマではこれらの特性を満足するための技術を取り上げる。可能な限り、実用的な電池での試験結果を出すことが望まれるが、本テーマ終了時点で電池メーカーなどとの共同研究により、提案される材料やデバイスの事業化に向けた検討が始まることが望まれる。したがって、提案書には材料研究のみならず、試験電池への展開方針と事業化技術の見通しも記述されることが求めら

れる。すなわち、材料研究に基づく今後の展開方針を合理的に説明し、実用化研究および事業化につなげる戦略を明確にしておくことが重要である。

二酸化炭素の削減に真の意味で貢献する電気化学エネルギー変換デバイスを創成することが本テーマの責務であり、材料研究から最終のデバイス研究までを常に考えながら研究を進めなければならない。

課題間での協力体制を構築し、お互いの研究状況を把握しながら、どのようにして実用電池へ技術を展開していくかを意見交換しつつ研究を推進する。また、適切な時期に適切なタイミングで研究の方向性に関する議論を行い、材料研究であっても電池研究あるいはエネルギー変換システム研究につなげる戦略を確認する。これにより、各課題で実施する研究のテーマへの貢献をより明確化する。

本テーマにおける目標は、以下のとおり。

(1) 電気化学エネルギー変換デバイスの提案の場合：

定置用に適合する新奇エネルギー変換システムに関する提案が求められる。原理・原則の実証だけでなく、実電池への展開を視野に入れた提案を期待する。

(2) 電気化学エネルギー変換デバイスに使用する材料に関する提案の場合：

特にデバイスの安全性と寿命改善に資する材料提案が望まれる。目標サイクル数は上述のとおりであるが、少しでも既存電池あるいは現在開発が進んでいる革新的な電池の安全性と寿命に対して改善ができる材料の提案を期待する。

(3) 新型電池の実用化に向けた問題解決に関する提案の場合：

既に電池系として研究開発が行われている電池、例えば Li-S 電池の寿命改善方法や安全性に関する研究提案が望まれる。

なお、本テーマで目指すのは、自然エネルギーの導入や昼夜の電力平準化のためのエネルギー変換デバイスであるため、電気自動車で求められるほどのエネルギー密度と出力密度を有する必要はない。

本テーマでは次世代定置用エネルギー変換デバイスに集中して革新電池、革新材料、革新システムの基礎を築くことが目的である。数値目標も重要だが学術的基盤の構築も大切である。提案書では、学術基盤から事業展開への可能性を示してほしい。

2. プログラムオフィサー (PO)

金村 聖志 (東京都立大学 大学院都市環境科学研究科 教授)

3. 採択課題

※「企業責任者」および「研究責任者」の氏名、所属機関（括弧内記載）は令和4年3月31日時点。

※下線はプロジェクトリーダー（課題の取りまとめ役）を指す。

課題名	課題概要	企業責任者
		研究責任者
カリウムイオン電池およびカリウムイオンキャパシタの基本技術開発	これまで蓄積してきたリチウムイオン電池およびナトリウムイオン電池の研究成果と技術を礎として、自然エネルギー発電やスマートグリッドに適用する電力貯蔵用定置型蓄電デバイスを目指して、カリウムイオン電池およびカリウムイオンキャパシタを開発する。これらのデバイスは、従来のリチウム系デバイスよりも低コストかつ長寿命になることが期待される。	深井 孝行 (昭和電工 (株))
		<u>駒場 慎一</u> (東京理科大学)
太陽光発電の高効率化を可能とする新型キャパシタの開発	太陽光パネルから生成される発電量の最大活用を目指し、従来の太陽光発電システムに新規キャパシタを組み合わせた新システムの社会実装に向けた基礎研究と実用化に必要な要素技術の検討を行う。新規キャパシタは材料レベルから開発し、太陽光発電の受入性能を持ちながらも大容量高電圧の特性を示すなど、無駄なく蓄電する太陽電池システムへの適用性が高く、太陽電池システムの更なる高効率化に寄与する。	玉光 賢次 (日本ケミコン (株))
		<u>直井 勝彦</u> (東京農工大学)
超高エネルギー密度、本質安全および長寿命な鉄-空気二次電池 Shuttle Battery の開発	Shuttle Battery は鉄と空気で電気エネルギーを発蓄電する高エネルギー、安価な蓄電池であり、主要材料は全て耐火物で本質的に安全である。ラボ試験において 200 サイクル (DOD※100%) 経過後容量低下無しという優れた寿命性能を示した。本申請では Shuttle Battery 事業化のための重要課題として、長寿命化、高出力化技術の開発に取り組み、50kWh 実証モジュールを試作する。 ※DOD (Depth of Discharge : 放電深度) : 二次電池の放電容量に対する放電量。全て放電する場合を 100%とする。	<u>塚本 壽</u> (CONNEX SYSTEMS (株))
		岩井 裕 (京都大学)

4. 研究開発テーマのねらい（目標）

実際に二酸化炭素排出削減に資する技術の創出に本研究開発課題の最大の目標がある。同時に産業の活性化に資する技術の創出も重要な課題である。現実的な二酸化炭素排出削減に向けて本課題では電気化学的なエネルギー変換技術を用いた二酸化炭素排出削減に貢献する3つの課題を選定し、プログラムを推進してきた。太陽光発電、風力発電などの自然エネルギー導入のための支援エネルギーデバイスとしてカリウムイオン電池、スーパーキャパシタ、に関する研究と触媒反応を用いた燃料電池タイプの蓄電池に関するデバイス開発を実施してきた。現在、蓄電池の世界では革新電池に関する多くの研究が進められている。リチウム硫黄電池、リチウム空気電池、全固体電池、リチウム金属電池などが革新電池分野では研究が進められている。これらの電池では、現時点ではコストなどの観点は無視してエネルギー密度をとことん追求する形で研究が進められている。A-STEPの研究においては、自然エネルギーの導入に資する蓄電池の開発をテーマとして選定している。加えて、エネルギー変換システムとしての研究も含有し、もちろんコスト面も考慮した研究を推進している。また、昨今の電池の発火事例を見るに、蓄電池の安全性も重要な課題となっている。本テーマで取り扱う電池系に関しても、その安全性にも留意した選定を実施することにした。また、研究開発の進捗状況に応じて安全性に関する議論を含めるようにした。これら研究が終了する時点で、実用化・事業化に向けた取り組みに入ることができるように、P0 およびアドバイザーにより適切な意見交換・指示を行いながら研究を進めてきた。

3つの研究開発課題は、それぞれに特徴のある研究課題である。東京農工大学と日本ケミコンの課題では太陽光発電のシステム研究を背景にしながらそれに適したスーパーキャパシタの研究開発を行っている。これまで、インバータ一部において捨てられてきた低い出力範囲のエネルギーを、提案のシステムはスーパーキャパシタを用いて回収し、システム全体としてのエネルギー変換効率の向上を目指している。材料研究からの開始であったが、材料選定を英断し既にスーパーキャパシタの開発に着手しており、大学と企業間での連携により実用的なシステム開発に進んでいる点はP0が想定した通りの開発の進捗となっている。

東京理科大学と昭和電工の課題では、このまま自然エネルギー用の電池の利用拡大が進むとリチウムイオン電池では間に合わなくなる。また、コストの問題も解決されないままとなる。そこで、本課題では資源的な問題のないカリウムイオンを用いた電池の開発を実施している。ナトリウムイオンやマグネシウムイオンを用いた電池も資源的に問題のない電池であるが、カリウムイオンを用いることで、より高い電解質の電気伝導度を実現することができるため、本課題ではカリウムイオンをエネルギー変換媒体と利用している。加えて、資源・コスト面で有利であると考えられる。カリウムイオン電池の開発において、材料研究が中心に実施されていたが、アドバイザーおよびP0のアドバイスにより、材料を絞り込みつつある。昭和電工サイドではすでにラミネート型のセル

の作製に着手している。現時点で、充放電が可能なラミネートセルの作製が進んでおり、今後残存するいくつかの問題を解決できれば、電池メーカーも興味を示しうる蓄電池の開発ができると思われる。材料研究だけでは判断しかねる研究開発の進捗状況が見えやすくなる。今後も、材料研究と電池作製および試験を結合させて研究を推進することで社会に貢献できるデバイスの開発が可能となると思われる。

京都大学と CONNEXX との研究では、鉄と酸化鉄の酸化還元反応を利用して H_2O から水素を発生させて負極を構成し、正極には燃料電池と同じ酸素還元反応を用いて電池を構成する提案である。空気電池の一種であり、大きなエネルギー密度を具現化することが可能である。定置用の蓄電池においても実用上重要な点となる。大学と企業間で連携を取りながら研究を進めており、実現すればインパクトのある新規な電気エネルギー変換デバイスとなりうるため、期待される研究である。

3つの研究開発課題は、それぞれに特徴のある電気化学的なエネルギーデバイスであり、進捗状況にもばらつきがある。社会・経済に貢献し二酸化炭素排出削減するための研究としては意味ある研究であり、その研究存続には一定以上の価値が認められる。P0の最も懸念していた点は、材料研究やコインセル程度の結果を基にして評価するのではなく、経済・社会に貢献する可能性を示すためのセルレベルでの検証を実施できるかであった。3つのグループの研究において、材料研究の中断などを含めて、実用化に近づく次の開発がすでに開始しているグループがあり、P0の狙いに従った各プロジェクト研究が進展していると判断している。また、定置用の蓄電池として十分な性能・特徴を各蓄電デバイスが示しており、最終的に開発が成功すれば、産業に大きな影響を与えられる。ただし、今後どのような枠組みで開発を進めるのかを考える必要もある。電池メーカー、材料メーカーなど、開発の加速のためにも検討することが求められる。

5. 研究開発課題の選考について【参考】

＜研究開発課題の選考方針＞

本技術テーマは、二酸化炭素の排出削減を目指して、そのツールとして重要となる定置用蓄電に関するものである。蓄電デバイスとして、リチウムイオン電池タイプ、レドクスフロータイプ、燃料電池と電解の組み合わせタイプ、キャパシタなどの蓄電デバイスの中で定置用エネルギーデバイス、特に自然エネルギー利用に資する蓄電デバイスに関する選考を行った。公募の結果、下記の3課題が採択された。

- (1) カリウムイオン電池およびカリウムイオンキャパシタの基本技術開発
- (2) 太陽光発電の高効率化を可能とする新型キャパシタの開発
- (3) 超高エネルギー密度、本質安全および長寿命な鉄-空気二次電池 Shuttle Battery の開発

P0 及びアドバイザーにより各応募課題の査読を実施し評価した。その意見に基づいて採択会議を開催し本テーマに適合する課題を選定した。また、基本方針として既に、他省庁あるいはJST 自身で実施している研究内容とは異なる課題を選択することと、可能な限り異なる種類のデバイスを選定する方針で選考を行った。どのようなタイプの蓄電デバイスが定置用蓄電池に適合するのを見るためにも、偏りのないように課題を選定することとした。いろいろな分野からの応募があったが、本テーマに適合しない、特にスマートグリッドなどの応用とはあまり関連しない研究内容や実現がかなり困難と感じられるものについては採択を見送った。

＜採択課題の構成＞

採択会議の結果として、上記の3件の課題を採択するに至った。

リチウムイオン電池タイプとして、カリウムイオン電池に関する研究を採択した。リチウム、ナトリウム、マグネシウムに関しては既に多くの研究が実施されているがカリウムイオン電池に関する研究に関してはあまりない。しかし、炭素材料へのカリウムイオンのインターカレーションに関しては既に知られており、正極の選定などを適切に行えば、比較的短期間で実現可能と判断し採択に至った。また、 Li^+ イオンよりも溶媒との相互作用が小さく、結果として高いイオン伝導性を有する電解液を使用できる点も大きなメリットになることもカリウムイオン電池の採択理由である。

キャパシタに関しては、リチウムイオン電池用材料をキャパシタ材料に変性させ通常の電気化学キャパシタよりも大きなエネルギー密度を有し、出力・入力特性はキャパシタとして機能できるデバイスに関する課題を選択した。また、この課題では太陽光発電の低出力時のインバーターによるロスを開発するキャパシタにより回収する提案を含んでおり、20 %近くの効率向上が可能であることを期待できる課題である。また、太陽発電システムに適したキャパシタに関する提案も十分な可能性を有していた。

燃料電池と水電解の組み合わせに関する直接的な応募はなかったが、 $\text{Fe} \cdot \text{FeO}_x$ を組み

合わせた応募があり、この課題を採用することとした。Fe-空気電池である。Fe は H_2O と反応して水素と FeO_x を生成する。逆に充電反応を進行させると FeO_x が水素で還元され、 H_2O と Fe が生成する。このような反応を高温で行うことで、可逆的に Fe/ FeO_x の酸化還元反応を進行させて一種の空気電池が作製可能である。高温作動や Fe/ FeO_x のサイクル寿命などの問題点が残るものの新規な電池系として採用されるに至った。

以上、公募時に予定した異なるタイプの3種類の蓄電システムを採択した。定置用電池として、それぞれに特徴を有する課題の選択を行えた。キャパシタに関してはグリーンハウスへの応用を、カリウムイオン電池に関しては比較的大きな太陽光発電への応用、発電所などへは Fe-空気電池の応用を想定しながら、各課題に対して研究を進めることを決定した。

6. アドバイザーの構成について

氏 名	所属・役職※	任期
阿部 英俊	株式会社 ABRI 代表取締役社長	平成 27 年 10 月～ 令和 4 年 3 月
池谷 知彦	一般財団法人電力中央研究所 特任役員／企画グループ 兼務：エネルギーイノベーション創発センター、材料科学研究所	
石川 正司	関西大学 化学生命工学部 教授	
今西 誠之	三重大学 大学院工学研究科 教授	
栄部 比夏里	産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 電池技術研究部門 次世代蓄電池研究グループ 上級主任研究員	
道畑 日出夫	東京電力ホールディングス株式会社 経営技術戦略研究所 技術開発部 需要家エリアスペシャリスト	
湯浅 浩次	パナソニック株式会社 エナジー社 技術・モノづくり戦略室 室長	

※所属・役職は任期終了時点

産業界、アカデミックからそれぞれ人選を行った。定置用蓄電池の電力系統網への応用、蓄電池に関する技術アドバイス、基礎的な反応解析手法の利用、などを念頭に人選を行った。AIST、大学、企業、電力中央研究所からアドバイザーを選定することができた。阿部氏は電池メーカーの研究開発のプロであり、実用化への助言ができる。池谷氏は電力系統網と蓄電池に精通している。石川氏はキャパシタ研究者で、キャパシタ技術に精通している。今西氏はリチウムイオン電池や革新電池で活躍している研究者である。栄部氏は AIST の研究者、学術基礎と応用技術の両方に多くの経験を有する。道畑氏は電力会社で実際に定置用電池を使用した電力系統網に多くの経験を有する。湯浅氏は電池メーカーの研究者で、実用面からの多くのアドバイスができる。これらのアドバイザーを選択し、技術面のみでなく、事業性なども含めて議論できる体制とした。何回もの会議において常に活発な意見交換が多面的に実施できており、適切な人選であったと判断している。プログラム立ち上がりから、アドバイザーのメンバーに変更はない。

7. 研究開発テーマのマネジメントについて

(1) P0 の運営方針

本プログラムの最大の目的は新型の蓄電デバイスを開発し、自然エネルギーの導入を加速させ、二酸化炭素の排出削減に貢献し、社会・経済に貢献することである。そのためには、十分なエネルギー変換効率があること、ある程度のエネルギー密度が達成できる可能性を有すること、寿命が長いこと、低コストであることなどを満たせるように、サイトビジット、テーマ推進会議（進捗報告とともにポスター発表なども実施）などにおいて議論するように努めた。特に、材料に関する研究で終わりがちな電池研究に対して、最終的なセル作製までを実施してもらうように常に方向性を示した。多くの材料を研究することやセル設計のみで止まらず、実際に電池の作製を実施していただくことを強く指導した。特に大学と企業の連携で進める課題であるので、大学側に対し材料研究から実電池に向かった展開を意識して取り組んでもらうために企業の役割を明確にした。このために大学と企業の間での連携を強く促し、セル作製に結びつくように指導した。最終的には1次試作の電池の性能を持って、各チームの評価を行うことを述べ、理解してもらえるようにした。また、出口として何を考えているのか、それに適合する蓄電デバイスの研究開発になっているのかを常にチェックしながら課題を推進することを促した。

(2) 研究開発テーマの進捗状況の把握

テーマ推進会議、サイトビジット、P0 面談の実施を通して研究の進捗状況の把握に努めた。会議のたびに、議論の結果、処置すべき内容、タイムラインの設定をしっかりと行い、研究を進捗した。場合によっては、目標設定の変更や研究計画の変更などを指示しながら、セルベースでの評価試験での課題抽出に達するように指示を行った。アドバイザーの先生からのアドバイスに関して、P0 面談を行い課題解決に向けた進捗の状況を詳細に把握するように努めた。

また、ポスター発表を行い、リーダーのみでなく実際に実験を担当している研究者からの意見聴取も行った。

研究期間内、研究開発テーマの進捗の把握は充分であったと思う。

研究期間の途中から終了前までの約2年間はコロナ禍となり対面での会議の開催ができなくなり、オンラインでの会議となった。サイトビジットなど本来対面で実施すべき打ち合わせができなかった点は残念である。一方で、オンラインの利便性を利用して、十分な時間をとって議論をすることができた。資料に関しても、より一層分かりやすいものを作成頂いたと感じている。質疑応答においても混乱なくしっかりとした議論がなされていた。各研究者の進捗を感じ取ることはできなかったが、プロジェクトの進

捗に関しては十分に把握できたと思う。実際のセルや材料を見ることなく終了に至った。コロナ禍が終了し、もし機会があれば、個人的に見学したいと思う。事後評価の一環でそのような機会が設けられるといいのではないかなと思う。

<テーマ推進会議の開催実績>

	開催日、開催場所	概要	参加者数
1 回目	平成 29 年 2 月 17 日（金） JST 東京本部別館	P0 から蓄電テーマの趣旨説明、各課題から研究開発計画などを報告、質疑応答	P0、アドバイザー：7 名 理科大チーム：12 名 農工大チーム：11 名 CONNEXX チーム：3 名 文科省：2 名、JST：3 名 計 38 名
2 回目	平成 29 年 11 月 24 日（金） JST 東京本部別館	P0 から定置用電池の最新動向の紹介、各課題から研究開発進捗報告など、質疑応答	P0、アドバイザー：7 名 理科大チーム：13 名 農工大チーム：10 名 CONNEXX チーム：3 名 JST：2 名 計 35 名
3 回目	平成 29 年 10 月 30 日（火） JST 東京本部	アドバイザーから二次電池技術の活用などに関する話題提供、各課題から研究開発進捗報告など、ポスターセッションによる質疑応答	P0、アドバイザー：6 名 理科大チーム：9 名 農工大チーム：12 名 CONNEXX チーム：7 名 テーマ評価委員長：1 名 文科省：1 名、JST：4 名 計 35 名
4 回目	令和元年 10 月 24 日（木） JST 東京本部別館	アドバイザーから技術動向に関する話題提供、各課題から研究開発進捗報告など、ポスターセッションによる質疑応答	P0、アドバイザー：8 名 理科大チーム：16 名 農工大チーム：14 名 CONNEXX チーム：7 名 JST：3 名 計 48 名
5 回目	令和 2 年 10 月 28 日（水） Zoom オンライン会議	各課題から研究開発進捗報告、P0・アドバイザーによる質疑応答、議論	P0、アドバイザー：8 名 理科大チーム：15 名 農工大チーム：13 名 CONNEXX チーム：10 名 文科省：2 名、JST：3 名

			計 51 名
6 回目	令和 3 年 9 月 10 日（金） Zoom オンライン会議	各課題から研究開発進捗 報告、P0・アドバイザーに よる質疑応答、議論	P0、アドバイザー：8 名 理科大チーム：9 名 農工大チーム：12 名 CONNEXX チーム：8 名 JST：4 名 計 40 名

<サイトビジットの開催実績>

P0、アドバイザー、JST の出席のもと、各課題個別にその課題の各研究参画機関からの進捗状況の報告、研究開発施設・設備視察を実施した。

	対象課題	開催日、開催場所	参加アドバイザー
1 回目	鉄-空気電池	平成 29 年 9 月 19 日（火） けいはんなオープンイノベーション センター(KICK)	阿部、池谷、石川、 今西、栄部、道畑
2 回目	カリウムイオン電池	平成 29 年 9 月 20 日（水） 東京理科大学 神楽坂キャンパス	阿部、池谷、石川、 道畑、湯浅
3 回目	太陽電池向けキャパ シタ	平成 29 年 27 日（水） 東京農工大学 次世代キャパシタ 研究センター	阿部、池谷、石川、 栄部、道畑、湯浅
4 回目	太陽電池向けキャパ シタ	平成 30 年 8 月 1 日（水） 東京農工大学 次世代キャパシタ 研究センター	阿部、池谷、石川
5 回目	カリウムイオン電池	平成 30 年 8 月 1 日（水） 東京理科大学 神楽坂キャンパス	阿部、池谷、石川、 道畑
6 回目	鉄-空気電池	平成 30 年 8 月 2 日（木） けいはんなオープンイノベーション センター(KICK)	池谷、石川、今西、 栄部
7 回目	カリウムイオン電池	令和元年 5 月 15 日（水） 昭和電工株式会社 プロセスソリ ューションセンター	阿部、池谷、道畑
8 回目	太陽電池向けキャパ シタ	令和元年 5 月 30 日（木） 日本ケミコン株式会社高萩事業所	阿部、池谷、道畑
9 回目	鉄-空気電池	令和元年 6 月 28 日（金） 京都大学 桂キャンパス	池谷、石川、今西、 湯浅
10 回目	鉄-空気電池	令和 2 年 5 月 29 日（金）	阿部、池谷、石川、

		Skype オンライン会議	今西、栄部、湯浅
11 回目	太陽電池向けキャパシタ	令和 2 年 6 月 4 日（木） Skype オンライン会議	阿部、池谷、石川、 栄部
12 回目	カリウムイオン電池	令和 2 年 6 月 4 日（木） Skype オンライン会議	阿部、池谷、石川、 湯浅
13 回目	鉄-空気電池	令和 3 年 5 月 21 日（金） Zoom オンライン会議	阿部、池谷、石川、 栄部、道畑、湯浅
14 回目	太陽電池向けキャパシタ	令和 3 年 5 月 28 日（金） Zoom オンライン会議	阿部、池谷、今西、 栄部、道畑、湯浅
15 回目	カリウムイオン電池	令和 3 年 5 月 28 日（金） Zoom オンライン会議	阿部、池谷、石川、 今西、道畑、湯浅

（３）研究開発テーマの研究開発計画の見直し

3 課題について研究開発計画の見直しを指示している。

カリウムイオン電池と太陽電池向けキャパシタに関しては、材料研究へのリソースの割り当てが多く、セルの作製の実施に至らない可能性を指摘し、少なくともセル作製に向けて現時点で最適な材料に多くのリソースを割くことを指示し、それに基づいて研究計画の変更を依頼した。太陽電池向けキャパシタに関しては、太陽光発電との組み合わせでインバーターが回収できない領域のエネルギーを回収できることのメリットをより明確にするように指示した。鉄-空気電池に関しては、要素技術において問題が発生したため、その解決策を優先し、研究計画の変更を指示した。接続するセル数、目標の電力量や電圧を低くしてセル作製を実施することでセル作製と試験に向けた研究開発を実施するように助言した。

各研究開発課題に対して、最終的な出口を考えた場合に必要となる材料メーカーやエンドユーザーについても検討を開始することを指示した。

（４）中間評価基準と研究開発を継続させた／継続させなかった根拠

各研究開発課題の中間評価基準

【カリウムイオン電池およびカリウムイオンキャパシタの基本技術開発】

研究開発当初は材料に関する研究が中心であったが、材料に関する絞り込みを早期に実施し、その結果、セルの一次試作、二次試作まで進展しており、継続とした。セル自体はまだ問題を抱えていたが、材料サイドの研究とセル研究からの課題抽出を進めることで目標を達成できるものとする。

【太陽光発電の高効率化を可能とする新型キャパシタの開発】

本研究の最終目標は太陽光発電用の電気二重層キャパシタ（EDLC）のエネルギー密度を大幅に向上にすることであるが、中間評価までに材料選定とその特性を評価し具体的なセルデザインを見通せる結果を得ることである。また、太陽光発電システムにおいて提案されるキャパシタとの組み合わせの有効性について定量的に明らかにすることにある。

早期に材料選定、大量合成へと進捗し、本システムに必要となるキャパシタの具現化に向けて進捗していた。予定通りあるいはそれ以上の進捗を各研究項目において示しており、継続で全く問題ない。

【超高エネルギー密度、本質安全および長寿命な鉄—空気二次電池 Shuttle Battery の開発】

京都大学との共同研究において技術移転にスケジュールからの遅れがあったものの、開発自体は進んでおり、また、技術移転も加速的に行われていた。水素に対する気密構造が最大の課題となっていたが、解決に向けた研究開発の進捗がみられた。心配されていた電池特性や鉄の凝集などについては比較的問題が少ないことも判明した。これらの状況を踏まえて継続とした。

（５）課題内・課題間の連携の推進

テーマ推進会議では、お互いの研究成果を発表し全員で議論を行うことで課題内の連携を図った。カリウムイオン電池、太陽電池向けキャパシタ、鉄-空気電池の異なる課題ではあるが、個々の要素技術においてはお互いに関連する部分が多く、テーマ推進会議においてお互いに意見交換を行い情報共有することで連携を図ることができた。他の課題との連携を模索することも本課題の研究者にとっても良いことであり、本課題の研究者もそれを希望していた。課題間の連携についても考慮しながら本テーマを進捗させた。

（６）研究開発課題の評価と評価結果に基づく指導

【超高エネルギー密度、本質安全および長寿命な鉄—空気二次電池 Shuttle Battery の開発】

本研究開発課題の最初の技術課題は鉄・酸化鉄のサイクル寿命であった。また、蓄電デバイスのメンテナンスに関する課題も顕著になってきている。この点についても、早急に解決策を提出するように指導した。

【カリウムイオン電池およびカリウムイオンキャパシタの基本技術開発】

当初、本研究開発課題は、イオン電池とキャパシタの提案であったが、イオン電池に重きを置いて研究を進めることを指導した。その後、正極材料、負極材料、電解質に関

する研究が実施されたが、候補材料の選定に多くの時間を要するとの意見があり、早期に材料を一次選定することを求めた。その結果、第一候補材料が選択され、研究も第一候補材料に多くのリソースが割かれるようになった。これに伴って、セルの一次試作が開始され、セルベースの問題点の抽出も始まった。これらの対応により、材料研究の比重を減らし、電池開発にリソースを割くことになった。研究計画もそれに従って変更された。

【太陽光発電の高効率化を可能とする新型キャパシタの開発】

研究開発課題の当初は候補材料が複数あり、どの材料を選定するかを決める作業を早急に実施するように指導した。その結果、かなり具体的な材料へと選定が進み、さらにその改良も順調に進展した。大量生産に関しても検討を実施し、ラミネートセルでの試験が行われた。また、システムとしては太陽光発電においてパワコンでは回収できない電力分を、本キャパシタを用いたシステムにより回収することを想定したフィールド試験を実施し、電力効率の改善が可能であることが判明した。パワコンに関する企業と十分なコミュニケーションをとることを指導した。

（７）研究費の配分

各チームからの研究費の申請に基づいて配分を行っており特段の問題はなかったと考えている。追加予算もあったが、結果的に３チームの希望分を配分することができた。進捗状況に応じた研究費配分の点では問題なかったと思う。

（８）テーマ中間評価結果を踏まえた対応

３つの研究開発課題に関し、以下のようにテーマ中間評価結果に十分に配慮し、研究期間後半の研究を P0、アドバイザーの助言、指導の下で実施した。その結果、社会実装までの研究開発のステージは異なるが、各研究開発課題において必要とされる改善がなされた。

電気二重層キャパシタに関する研究では、いくつかの材料系に関する研究を実施していたが、材料系を絞り込むことで、セルレベルの実証試験に集中して検討を行うことができた。その結果セルレベルでの議論が可能となった。また、テーマ中間評価で課題として指摘をいただいた材料の大量合成について、より大量生産に適合する手法に変更する検討を行いこの課題を達成した。これらの開発が進行し、社会実装可能なセル特性を達成することができたと言える。

カリウムイオン電池およびカリウムイオンスーパーキャパシタにおいては、数多くの正極材料の研究が実施されていたが、特定の材料に集中して研究を実施した。また、電解液の適合性に関する研究を集中的に実施した。その結果、実用化が見通せるセルの作製に成功した。大学と企業の連携を強化したことがセルレベルでの評価試験を実施でき

た大きな要因になっており、テーマ中間評価の結果に対する意見を取り入れたことが効果を発揮した。

鉄-空気電池の研究においては、セル試作を中心に研究展開をしていたが、テーマ中間評価の結果を踏まえ、本蓄電池の実用化にとり大きな障壁となる要素課題の解決に集中することにした。その結果、問題となっていた技術課題の解決と京都大学からの技術移転を実施することができた。要素課題の解決に集中したことでセル試作が見えてきた。評価結果を踏まえて研究方針を修正したことで、材料技術と電極技術において大きく研究が進展した。

どのチームも各課題の中間評価結果及びテーマ中間評価の指摘を真摯に受け止め、研究の方向性を修正し、優れた成果を出している。本課題において、P0 およびアドバイザーそして研究者の意思疎通が図れた結果であり、評価結果を各研究者が十分に理解し研究を推進した成果である。

8. 研究開発テーマとしての産業創出の核となる技術の確立状況

8. 1 カリウムイオン電池およびカリウムイオンキャパシタの基本技術開発

(1) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果

本研究開発課題においては、正極、負極、電解液の三大要素材料の開発からスタートした。研究初期には、多くの材料に関する材料科学的な研究が主となっていたが、材料の絞りこみを行うことで研究は進捗しセル設計あるいは初期試験の段階まで進むことができた。正極材料、負極材料、電解質材料のすべてが、リチウムイオン電池で用いられてきた材料と類似のものであるが、カリウムイオン用にチューニングが必要であった。本研究開発課題では、カリウムイオン電池用の三大要素材料の開発（チューニング）に成功している。この点は電池材料技術における大きなブレークスルーになっている。この間、各材料の組み合わせによる問題点も明確になり、それを解決することで実セル試験が実施できた。具体的には、電気化学反応を利用する蓄電池においては電解質と活物質の界面制御が重要であるが、本課題においては材料間の組み合わせを詳細に分析・解析することで界面の問題を解決しており評価される成果と思う。この点も電池技術のブレークスルーになっている。

材料合成に関しては、外注となっているが、材料メーカーとの協業が今後必要である。また今後は、量産のためのセル設計と本蓄電デバイスの安全性や寿命の評価が必要である。特に、カリウム金属はリチウム金属よりも安全性の面で問題が多いことが予想され、安全性担保のための工夫や安全性そのものの評価などを今後は迅速にすすめることが求められる。これらの点を解決できれば、産業創出の核となる技術となると考えられる。

なお、知的財産については、正極材料、負極材料などについて国内6件、海外1件を特許出願し、国内特許1件が特許登録されている。

(2) 最終目標の達成度

(2-1) 競合優位性

蓄電池としてはリチウムイオン電池が主流である。定置用電池においても多くのリチウムイオン電池が使用されている。このリチウムイオン電池を凌駕してカリウムイオン電池が使用されることが期待される。リチウムイオン電池とカリウムイオン電池を比較した場合のカリウムイオン電池の優位性として以下のことが挙げられる。

(1) 元素戦略の面における優位性

(2) コスト面における優位性

これらの優位性を利用して、リチウムイオン電池と同等の電池性能が達成されれば、蓄電池の中での競合優位性を有することができる。

カリウムイオン電池の研究においては、世界的に見て本課題の研究が最先端であり、このまま、順調に蓄電池あるいはキャパシタ開発が進展すれば、十分な競合優位性を有すると思われる。

（２－２）市場性

二酸化炭素の削減のために多くの蓄電池が必要となっている。特に、直接的に二酸化炭素の削減に貢献する定置用の蓄電池やキャパシタが重要である。今後、電気化学的なエネルギー変換デバイスである蓄電池とキャパシタの市場はどんどん拡大していくと思われる。本研究課題のカリウムイオン電池あるいはカリウムイオンキャパシタも、それらの性能特性が、定置用蓄電池が要求する特性を満足するのであれば市場に受け入れられるものと期待できる。将来、リチウムイオン電池のみで多くの蓄電池需要を満たすことは元素戦略面から見て不可能である。したがって、ナトリウム、マグネシウム、カリウムなどのイオンを使用する新しい電気化学的エネルギー変換デバイスが必要である。これらの中で、ナトリウムイオン電池に関しては実セルに近いレベルまで開発が進展しているが他の電池はまだ開発段階である。カリウムイオン電池に関しては今回の A-STEP の研究開発課題による研究によってナトリウムイオン電池のレベルに近いところまで開発が進展したと言える。今後、開発が進展すれば、市場性が顕在化するものと期待される。他の蓄電池やキャパシタとの競争になることは間違いないが、カリウムイオン電池が有する特徴であるカリウムイオンの高いイオン伝導性などを生かした特徴ある蓄電池開発を目指すことが市場性を確保する上で必然となる。

（２－３）企業戦略適合性

SDGs の観点からカリウムイオンのような豊富に地球上に存在する元素を使用した蓄電池が必要である。コスト、性能面のみを重視してきた蓄電池開発においてもこのような元素戦略的観点が重要になっていく。この点で企業戦略から考えてもナトリウムイオン電池やカリウムイオン電池（キャパシタを含む）は重要な未来の電池であると言える。したがって、本研究課題により具現化される蓄電デバイスは企業戦略に適合する課題である。今後、研究開発を進め、コスト面、二酸化炭素の排出面（LCA）、性能面を明確化して行くことで企業で実施すべき製品開発課題になりうる。社会実装を進めるうえでも、今回の研究開発で得られた成果を基にして最終的なデバイス開発を実施することが必要である。

8. 2 太陽光発電の高効率化を可能とする新型キャパシタの開発

（１）産業創出の核となる技術の確立に資する成果

リチウムイオン電池とリチウムイオンキャパシタの中間に位置するような蓄電特性

を有するエネルギー変換デバイスの開発に成功している。具体的には活物質のナノ構造制御と炭素複合化を実施することで高速に充放電可能なリチウムイオン電池類似の電気二重層キャパシタの作製に成功している。本蓄電池の技術は太陽光の微弱電流やフォークリフトなどの回生システム用電池として利用可能である。今回の提案では太陽光発電に焦点を絞って研究開発を進めてきたが、この新蓄電デバイスの特徴を活かした応用展開が期待される。新たな産業創出に貢献できる成果である。電極材料の開発から始まったが、早めに候補材料を選定し、セル試験に移行したことによって生み出された成果である。より大きな蓄電デバイスを作製するなどして、今回開発したデバイスのコンセプトが有効であることが実証されれば、水平展開が可能となる。なお、今回の研究プロジェクトでは、比較的小さめのセルにより試験を行っているので、次の段階で大容量セルでの実証が必要である。そのためには、材料の大量合成に関する検討もステージを1段階挙げて取り組む必要がある。

今後、材料メーカーとの協業に向けて、開発体制を検討することが重要である。それにより産業創出の核となる真の技術になりえると判断する。日本ケミコンと東京農工大学の連携により進められてきたが、太陽光発電への投入を開始するとともに、新規市場への展開を考えたプロジェクト体制を構築し次のステップに進むことが求められる。

なお、知的財産については、電極材料などについて国内10件、海外3件の特許出願している。

(2) 最終目標の達成度

(2-1) 競合優位性

今回開発された蓄電デバイスは電気二重層キャパシタであるものの、より大きな容量と高い充放電入出力特性を有するデバイスとなっており、この点で特徴的な特性を有するデバイスである。一方で、このようなデバイスに関する研究は多くはないが他でも実施されている。しかし、現時点では今回開発した蓄電デバイスが示す特性を実現できる他のデバイスは無い。この点でオンリーワンの蓄電デバイスとなっており競合優位性を十分に有していると言える。但し、今回の実証セルは容量が小さく実際に使用する電池のスペックを満たしていない。コンセプト証明は今回の研究開発課題の研究で達成できたので、実セルレベルの試作と性能試験を開始することが求められる。この場合には、材料の大量合成が必要となるので、材料メーカーとの協業が必要となっている。材料の大量合成に成功して大型の蓄電デバイスの実証ができれば、市場における競合優位性を担保できると思われる。オンリーワンの蓄電デバイスの特徴を活かした本デバイスの出口を検討し、その出口に特化したセル設計をすることで、より高い競合性を獲得できるものと思われる。

（２－２）市場性

現時点では、今回開発した蓄電デバイスと同じ特性を有する蓄電デバイスは開発されていないし、実用化もされていない。しかし、このような特性を有するデバイスに対するニーズがある。例えば、いろいろな電子機器や移動体あるいは建設関連重機の電化が進められようとしている。これに伴い蓄電池の新しい用途が生み出されつつあり、今回開発した電気二重層キャパシタの市場投入のチャンスは十分にあると考えられる。入出力の面ではリチウムイオン電池より有利であり、一方でエネルギー密度の観点からは電気二重層キャパシタより有利である。この特徴を活かした応用を探索して、具体的な展開ができれば、市場において優位性のある蓄電デバイスの社会実装が可能になると思われる。

市場性に影響を及ぼす因子として単位電力あたりのデバイスコストが挙げられる。今回開発したデバイスの電極材料を大量合成した場合のコストをベースに本電気二重層キャパシタのコストの試算が必要である。リチウムイオン電池に関しては既にコストが算出されている。このコストよりも高くなることは間違いないが、あまりにも高コストになるようでは市場性を喪失することになる。したがって、今回のプロジェクトで得られた成果を市場に展開するために、早めにセルコスト試算を実施することが必要である。最終的には、このコスト情報を見て市場性が判断されるものと思われる。そのためにも、次のステップに進んで実セルを作製するとともに材料の大量生産に向けた取り組みが必要である。

（２－３）企業戦略適合性

新しい蓄電デバイスであり、興味深い技術になっている。今後の市場展開からもこのような新規デバイスが必要であることには間違いない。しかし、リチウムイオン電池やキャパシタとの競合や複数の蓄電デバイスを組み合わせた実デバイスなどとの比較検討が必要である。本デバイスの有効性を見出せる応用を考えている企業にとっては戦略的に見ても適合していると思われる。デバイス実証はほぼ終了しているので、事業化を目指して、大量生産を見通せるレベルにまでデバイスを仕上げることで、エンドユーザーからの興味を得ることができる。そのためにも、企業戦略に本デバイスを取り込んで頂けるような成果を出すことが必要である。太陽光発電用の蓄電デバイスとして使用することが今回の開発課題である。この点に関しては本デバイスを利用することで太陽光発電システムの簡素化や高効率となされることは既に示されているので、早めに社会実装の例を示してほしい。それによって、戦略的にこのデバイスを利用しようとする新しい用途も生まれてくると考えられる。

8. 3 超高エネルギー密度、本質安全および長寿命な鉄－空気二次電池 Shuttle

Battery の開発

（１）産業創出の核となる技術の確立に資する成果

特徴的なデバイスである。負極には鉄によって水を還元することでセル内に発生させた水素を使用し、正極は SOFC の燃料電池と同じで酸素の還元である。コンパクトな構造内に鉄のみを含む電池であり高いエネルギー密度が期待される。このような電解と燃料電池を組み合わせたデバイスはユニークであり、実用レベルのセルができれば新しい産業創出に寄与できる技術になる。基本的な作動原理証明は本プロジェクトによってなされたが、多くの問題点も顕在化した。これらの問題点が解決されれば、産業創出の核となる技術になるものと期待される。本デバイスは固体電池デバイスであり、いくつかの技術課題がある。本プロジェクトの期間内でこれらの問題は解決したが、まだセルでの実証までには至っていない。したがって、本提案の技術が産業創出の核として位置づけられるためには、セルでの実証が必要となっている。これまで問題となっていた課題に関しては解決策が見いだせているので、実証試験に移行することは可能である。次のステップで早急に実証をして、実デバイスの社会実装に進むことが求められる。それにより、最終的に産業創出の核となる技術を確立できると考える。セルの特性として出力やエネルギー密度については問題ないと判断される。早急に複数のセルを繋いだ小モジュールセルの動作の確認と寿命の検証が必要である。現時点では、産業創出の核になると言えるレベルではないが、期待される要素技術の開発という点において大きな成果を出しており、研究開発を継続して本蓄電システムを完成させることは十分に可能である。

なお、知的財産については、燃料電池システムなどについて国内 6 件、海外 1 件を特許出願し、国内特許 1 件が特許登録されている。

（２）最終目標の達成度

（２－１）競合優位性

他の蓄電デバイスと比較すると短所と長所があるが、定置用蓄電池への応用としては技術的に適合しており、競合優位性を有していると思われる。燃料電池との比較も重要であるが、本蓄電システムでは水素をある意味鉄として電池内部に包含しているコンパクトな蓄電システムであり、燃料電池よりも優れた面がある。このデバイスの開発は世界的にいろいろな研究グループがこれまでに実施してきたが、多くの要素課題を解決できないままである。このタイプの蓄電デバイスの研究としては世界的に見て本研究が先頭を走っていることは間違いなく、研究開発の点から競合優位性を有していると判断できる。定置用蓄電デバイスの中で競合優位性を担保するには、本システムの寿命が重要である。本来、基本反応を考えるとリチウムイオン電池よりもはるかに長い寿命を有する蓄電池になるべきものである。現時点では、実セルレベルの実証試験ができなかった

が、今後の研究開発で実セルの試験を実施し、長寿命を実証できれば高い競合性を有する蓄電システムになる可能性が高い。次のステップでぜひ開発を進めて定置用の蓄電デバイスに展開してもらいたい。

（２－２）市場性

本蓄電システムが完成すれば定置用の用途に展開可能であり市場性も見えてくる。蓄電池としてはリチウムイオン電池やレドックスフロー電池などと競合するが、貯蔵電力規模によっては、本技術が選択されることになると考えられ、ある一定規模の市場シェアを取ることは可能と思われる。当然のことであるが、電力量当たりの電池コストと既に述べた寿命の確認ができれば、市場性が十分に見込める。一方、固体電解質部分に懸念があったが、材料そのものについては SOFC の研究で開発されたもので信頼性がある。酸素極に関しても SOFC で研究されたものであり、材料面での問題は少ないと判断される。もちろん、負極の鉄に関しても問題ないので、セル設計の進展により実条件での動作の確認さえできれば一気に市場性を持つことができる蓄電デバイスである。本課題の提案では 50 kW h の電池の作製が最終的な目標になっているが、このサイズに拘らず、いろいろなサイズの電池を検討し、この電池の適合分野に関する議論をすることが重要であり、それにより市場性もより高まるものと思われる。

（２－３）企業戦略適合性

電力関係の企業にとっては、今回開発を進めた蓄電池の利用は、企業の戦略に適合するものと思われる。例えば、ナトリウム硫黄電池が電力貯蔵用の蓄電池として使用されているが、エネルギー密度がナトリウム硫黄電池よりも高ければ、この蓄電池システムの利点（高い安全性とエネルギー密度）を考えると期待される蓄電デバイスであり、企業戦略適合性を有していると思われる。また、太陽光発電や風力発電など自然エネルギー利用分野にも応用が可能であり、この点においても企業戦略適合性を有しているものと思われる。電力会社や自然エネルギー利用の新規参入会社との協議が必要である。協議を通してどのような応用に本蓄電システムが適合するのかを調査していくことも重要であろう。

9. 総合所見

・研究開発テーマとしての産業創出の核となる技術の確立状況

二酸化炭素の排出削減に向けた多くの取り組みの中で蓄電池開発に対する期待は大きい。現状ではリチウムイオン電池を中心に自然エネルギー導入のための定置用蓄電システムの導入が考えられている。一方で、革新電池として多くの電池系の研究が世界中で実施されている。本研究開発テーマでは、新型の定置用蓄電池として異なる3種類のエネルギー変換デバイスを探採し研究開発を行ってきた。カリウムイオン電池（キャパシタ）、電気二重層キャパシタ、鉄—空気電池の3種類である。カリウムイオン電池はリチウムイオン電池代替の電池であり元素戦略的観点から重要である。小型セルの試験を通してカリウムイオン電池の基本特性が評価できており、次の段階で大型セルの実証さえできれば、新しい電池産業の創出が見通せる。産業創出の核になると思われる。電気二重層キャパシタでは、リチウムイオン電池と従来の電気二重層キャパシタの中間的な位置づけになるエネルギー変換デバイスの開発に成功している。実用に近いデバイスを完成することできた。今後、出口展開を考えることで産業創出の核になる。鉄—空気電池では要素技術の開発と初期特性の実証まで実施した。この電池は燃料電池をコンパクトにしたデバイスと見ることができ、ユニークなデバイスになっており、今後の開発により新しいデバイス産業領域の開拓につながる可能性がある。選定した3つの異なるデバイスそれぞれに適用される分野が異なると推測される。それぞれの分野で競合する蓄電デバイスが既に使用されている。また、新規蓄電デバイスの開発も行われている。本課題の中で開発できた蓄電デバイスが産業創出の核になるには、さらなるレベルアップが必要であるが、他の蓄電デバイスにはない特徴を各蓄電デバイスが有しており、電池産業の新たな展開（出口）に貢献できると期待される。

・研究開発テーマのマネジメントについて（課題選考、研究開発テーマ運営、研究の拡大・中止止、情報共有等）

課題の選考に際しては、P0 およびアドバイザーの間で十分な議論を行った。公募時点で既にレドックスフロー電池やリチウムイオン電池などの既存電池のテーマがプロジェクトとして研究されていた。そこで、本課題では特徴的なデバイスを選択する方向で検討した結果、3種類の蓄電デバイスが選定された。また、可能な限り異なるメカニズムで充放電反応が進行する電池系を選択することにした。研究開発テーマの運営については、基本的な考え方として材料ベースの研究に留まることなく、少なくとも小型の実セルで評価した結果を重視した。サイトビジットや研究進捗会議において常に材料研究から実セル試験への移行を促した結果、産業創出の核となると判断できるデータを出すことができていた。材料研究と実セル研究のバランスの重要性を常に指導した。3種類のエネルギーデバイスは類似している点もあり、進捗会議などの際に十分な情報交換ができた。エネルギー密度や出力密度の考え方や実材料への要求特性などは共通する部分も多く情報交換が重要であった。研究の拡大や中止に関しては、材料研究と電池研究のバランスの中で適時行った。

・本研究開発テーマを設定したことの意義（研究開発開始以前と現時点との比較を念頭に）

3種類のエネルギーデバイスの進捗状況は異なるが、より一層二酸化炭素の削減が要望される社会状況になり、本課題の重要性がますます高くなっていると考えられ

る。カリウムイオン電池ではリチウムイオン電池代替の電池として開発を実施したが、元素戦略面でより一層重要になってきている。今回の開発でカリウムイオン電池の具現化が明確になったことは大きな変化である。また、電気二重層キャパシタに関しては用途が限られていたが、エネルギー密度と出力密度の点でリチウムイオン電池と従来の電気二重層キャパシタの中間的なデバイスが現実のものとなり、電池産業および電池を利用する産業にインパクトを与えることができる可能性が示せたことは意義は大きい。鉄-空気電池ではまだ実セル実証までには至っていないが、燃料電池の水素を電池内に包含している電池と言え、空気電池の考え方を大きく変えることができるデバイスになっており、新反応の利用の点でインパクトのある研究開発になった。3種類の蓄電デバイスそれぞれに特徴があり、今後ますます研究開発の継続が重要になると思われる。

・今後への期待や展望

今回の課題に関しては興味深い結果を得ることができているが、今後新しい反応系などが提案されれば新型電池への期待が高まる。もちろん、電池特性として意味がある反応系でなければならない。この点については今後も注視し、拾い上げていくことが求められる。電気自動車や自然エネルギー発電用の蓄電設備がますます重要となっていることは周知のことである。その中でより良い性能を有する蓄電池の開発が期待されている。どのような電池が適合するのかについては個々の応用によって変わるが、電池反応の基礎を理解して適合する電池を選択し開発を進めることが今後も必要である。今回の課題において研究開発を行った蓄電デバイスが事業化されることを期待したい。もちろん、今後の研究の展開により十分可能であると考える。

・感想、その他

短い研究期間であったがアドバイザーの先生方のご協力と研究者の皆様の理解があり、POとして目指した形のプロジェクト運営ができたと感じる。個々のテーマの進捗にはばらつきがあるが、テーマごとの難しさが異なるので当然のことと思う。少なくとも、次のステップにつながる成果は出ていると思う。

以 上