

戦略的創造研究推進事業
チーム型研究(CREST)
研究領域事後評価用資料

研究領域「二酸化炭素排出抑制に資する
革新的技術の創出」

研究総括：安井 至

2016 年 2 月

目 次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	2
(3) 研究総括	3
(4) 採択課題・研究費.....	4
2. 研究領域および研究総括の選定について.....	5
3. 研究総括のねらい.....	6
4. 研究課題の選考について.....	7
5. 領域アドバイザーについて.....	10
6. 研究領域の運営について.....	10
7. 研究を実施した結果と所見.....	14
8. 総合所見	36

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「持続可能な社会に向けた温暖化抑制に関する革新技術の創出」

① 戦略目標の具体的な内容

2050 年までに世界全体の温室効果ガスの排出量を半減させるという目標のためには、先進国である日本はそれ以上の約 80%の削減が求められる。従って、現状の対策技術及びその延長線の技術を超える発想が必要である。そのため、文部科学省として大学をはじめとする革新的な基礎研究の知見・技術を結集した研究開発を推進する必要がある。

本戦略目標では、地球温暖化の原因物質である二酸化炭素の排出抑制・削減に向けて制約となる課題を解決する全く新しい概念及び技術の基礎研究を推進し、10 年 20 年後に新たな二酸化炭素排出抑制・削減技術が社会に組み込まれるような技術的な革新シーズを生み出す。具体的には、以下のような新概念又は性能の抜本的向上により二酸化炭素排出抑制・削減を実現可能とする技術を対象とする。

- ・ 高効率なエネルギー変換、長寿命、天候に依存しない性能等、飛躍的な機能を有し、かつ製造時にも二酸化炭素排出が極めて少ない未来型太陽電池等の実現を目指した技術開発や、塗布型、チップ型等、どこにでも簡便に設置ができるエネルギー生産・貯蔵技術の開発
- ・ 革新的な潮力発電、波力発電、潮流発電などの海洋エネルギー等の利用を目指した技術開発
- ・ 飛躍的に光合成能力が高い微生物等バイオエネルギーの利用を目指した技術開発
- ・ 二酸化炭素の回収技術の高度化と革新的な二酸化炭素の有効利用技術の開発

② 戦略目標設定の背景及び社会上の要請

第 3 期科学技術基本計画(2006 年度～2010 年度)に掲げる 3 つの理念の 1 つは、「国際競争力があり持続的発展ができる国の実現に向け、国力の源泉を創る」こととされている。このため、大政策目標として「環境と経済の両立～環境と経済を両立し持続可能な発展を実現」することとされ、さらに中政策目標として「地球温暖化・エネルギー問題の克服」が示されている。また、「地球温暖化対策技術研究開発の推進について」(2003 年 4 月総合科学技術会議)においても、更なる革新的技術の創出による飛躍的な温室効果ガスの削減に向け、温暖化対策技術の研究開発における基礎研究の重要性が指摘されている。加えて、2007 年のハイリゲンダムサミットにおける首脳宣言において、気候変動問題への取組が特に強調され、具体的に気候変動を抑える鍵となる技術の広範な採用を目指して、研究・技術革新活動の拡大や、気候変動に取り組むための戦略的計画の実施が求められている。さらに、IPCC 第 4 次評価報告書とりまとめ、気候変動に関する国際連合枠組条約第 13 回締約国会議(COP13)の議論など、国際的に地球温暖化対策は喫緊の課題となっている。

③目標設定の科学的な裏付け

我が国では、温暖化抑制に関わる研究水準、技術開発水準、産業技術力は、質、量ともに、いずれの面でも優れている。しかし、温暖化抑制を実現する技術は多様であることが望ましく、今後も既存技術の高度化を推進しつつも、これまでの概念には捕われることなく新しい概念に基づく技術を創出することも重要な観点である。

太陽光を電気エネルギーに変換する太陽電池は、その利用形態として大規模発電設備及び分散型オンサイト発電システムが想定されている。しかしながら、それぞれを実現するためには解決すべき課題も少なくなく、例えば、蓄電技術、送電技術、蓄電・送電システムの最適化・各部材の性能を飛躍的に向上させる材料の創製などに今後の発展が期待されている。

生物資源由来のバイオマス・エネルギーは、石油や石炭に代わるエネルギー源として期待され、欧米を中心に食料系バイオマス資源からバイオエタノールやバイオディーゼルが生産されているが、新たな問題として食糧の価格高騰、栽培農園の拡大による森林破壊が顕在化している。これらの問題を解決する方法の一つとして、非食料系資源利用への転換が挙げられている。非食料系バイオマスの資源化を実現するため、育種や栽培技術、遺伝子組み換え技術、収集・運搬・前処理方法、高活性な新酵素などセルロースやリグニンのバイオマス資源化などの研究開発の推進が必要である。

バイオマス資源賦存量の多い、水域利用の新たな研究開発として水生(微)生物のエネルギー資源化技術開発が始まっている。具体的には光合成機能アップによる増殖能力や燃料となる物質生産力の増大、水素ガスを発生する細菌、さらには藻類やプランクトンの発酵やガス化によるエネルギーの獲得などがあるが、現在は科学的知見を蓄積している段階であり、将来的に革新的な技術として実用化の可能性を探るためにはさらなる研究開発の推進が必要である。

その他、波力発電、潮流発電、海洋温度差発電など様々な海洋エネルギーの利用に向けた研究が進められているものの、実用化までには至っていない。二酸化炭素の固定・利用技術においては、分離・回収プロセスでのエネルギー消費やコストの問題及び貯留プロセスでの周辺環境への影響評価といった課題が残されており、未だ実現に向けての課題が多い。今後のブレークスルーを目指したさらなる研究開発の推進が必要である。

(2) 研究領域

「二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出」(2008 年度発足)

本研究領域は、我が国がハイリゲンダムサミットにおいて提案した 2050 年までに世界の温室効果ガスの排出を半減させるという目標に向け、主に二酸化炭素の排出削減について、既存の抑制技術の 2 倍程度の効率を有する革新的技術の開発を目標とする。例えば、再生可能エネルギーにおける画期的な性能向上を実現しうる技術、さらには、大気中の二酸化炭素の革新的な処理を可能とする技術、等の直接的、間接的二酸化炭素排出抑制技術を、新概念・新原理に立脚して創出することで低炭素社会の実現を目指す研究を対象とするものである。

具体的には、原子力を除く非化石資源の新エネルギー技術全般を対象とし、既存製品の効率を抜本的に向上できるエネルギー生産・貯蔵技術や革新的低コスト・低エネルギー化を実現しうる技術、例えば、新概念の太陽電池、二酸化炭素処理技術、海洋エネルギーやバイオエネルギー等を利用した技術などを研究対象とする。また、これらの技術に加え、化石資源エネルギーの利用を前提としつつも、二酸化炭素放出量を激減しうる対策技術も含まれる。このように、主にエネルギー供給側の技術全般を研究対象とするが、省エネルギーを意図した需要側技術も、ある種のエネルギー創生技術であるという立場から、革新的であり、かつ社会へのインパクトの高いものであれば研究対象とする。

本研究領域は、現在の産業構造やエネルギーインフラ構造の枠組みにイノベーションをもたらす課題解決型基礎研究を推進し、ここで開発される技術が2020～30年程度までに実用化された際、どの程度の排出抑制が期待できるか、何億トンの削減が可能といった定量的なシナリオが描けることを目指す。

(3) 研究総括

安井 至(一般財団法人持続性推進機構 理事長、東京大学 名誉教授)

(4) 採択課題・研究費

表1 採択課題の研究代表者名、研究費等（研究費は直接経費、単位：百万円）

採択年度	研究代表者	研究終了時の所属・役職	研究課題	研究費
2008年度	内本 喜晴	京都大学 教授	低炭素社会のための s-ブロック金属電池	453
	河本 邦仁	名古屋大学 教授	高効率熱電変換材料・システムの 開発	193
	小島 克己	東京大学 教授	熱帯泥炭の保全と造林による 木質バイオマス生産	187
	富重 圭一 ^{*1}	東北大学 教授	触媒技術を活用する木質系 バイオマス間接液化	135
	吉川 暹	京都大学 特任教授	有機薄膜太陽電池の高効率化 に関する研究	253
	渡邊 信 ^{*2}	筑波大学 教授	オイル産生緑藻類 ^ホ オリコッカス 高アルカリ株の高度利用技術	261
2009年度	小川 健一	岡山県農林水産総合センター グループ長	CO ₂ 固定の新規促進機構を活用 した ^ハ バイオマテリアルの増産技術開発	524
	近藤 昭彦	神戸大学 教授	海洋性藻類からのバイオエタノール 生産技術の開発	462
	田中 剛	東京農工大学 教授	海洋微細藻類の高層化培養による バイオディーゼル生産	294
	橋詰 保	北海道大学 教授	異種接合 GaN 横型トランジスタの インバータ展開	311
	宮山 勝	東京大学 教授	プロトン型大容量電気化学 キャパシタの研究	257
2010年度	辰巳砂 昌弘 ^{*3}	大阪府立大学 教授	固体界面を制御した 全固体二次電池の創製	173
	山内 美穂	九州大学 准教授	高選択的触媒反応によるカーボンニュートラルなエネルギー変換サイクルの開発	276
	山口 猛央	東京工業大学 教授	革新的全固体型アルカリ燃料電池開発 のための高性能 OH-イオン伝導膜の創 生と燃料電池システム設計基盤の構築	230
	山崎 聡	産業技術総合研究所 招聘研究員	超低損失パワーデバイス実現 のための基盤構築	466
			総研究費	4,475

*1：2010年度末、*2：2011年度末、*3：2013年9月末に本研究領域を早期終了

2. 研究領域および研究総括の選定について（JST 記載）

本研究領域は、温暖化抑制に関して高いポテンシャルを有する日本の研究水準、技術開発水準、産業技術力を基に、直接的・間接的二酸化炭素排出抑制技術を、新概念・新原理に立脚して創出することで低炭素社会の実現を目指す先端科学的な研究であり、且つ環境研究であるとの視点から、実社会との接点をしっかり認識して推進する研究を対象としている。また、主としてエネルギー供給側の技術全般を対象として想定しているが、省エネルギーを意図した需要側技術であっても、革新的であり、且つ社会へのインパクトの高いものであれば対象とした。

本研究領域では、我が国が提案した 2050 年までに世界の温室効果ガスの排出を半減するという目標に向け、再生可能エネルギーにおける画期的な性能向上を実現しうる技術、さらには、大気中の二酸化炭素の革新的な処理を可能とする技術、等の直接的、間接的に二酸化炭素排出抑制に資する技術を、新概念・新原理に立脚して創出することを目指す研究を推進することとした。ただし、単に技術的に優れた先端科学的研究であるだけではなく、研究代表者のマネジメントの下、基礎研究成果を社会に還元することを強く意識したチーム体制での研究を推進することとした。以上のことと併せ、研究チームに研究の先端性・社会性・俯瞰性を同時に要求することにより、実用化が強く意識され、現在の産業構造やエネルギーインフラ構造の枠組みにイノベーションをもたらすことが可能な二酸化炭素排出抑制に関する技術シーズ創出が期待された。

以上より、戦略目標の達成に向けて本研究領域は適切に選定されたと判断される。

また、二酸化炭素排出抑制に資する技術は多様な研究分野に渡っており、太陽電池、二酸化炭素処理技術、バイオエネルギー等を利用した技術をはじめ、対象となりうる研究分野の研究者数は多いと考えられた。我が国の地球温暖化抑制に対する意識の高まりも相まって、様々な分野からの優れた挑戦的な研究提案が多数見込まれた。

研究総括の安井至は、無機材料科学分野を基礎としながら、総合的な環境研究の分野でも鳥瞰型環境学を提唱するなどして中心的な役割を担ってきた。材料科学研究において複数の協会賞を受賞するとともに、近年では環境省環境保全功労者表彰のように環境に関する活動にも高い功績が認められており、基礎研究において十分な実績、見識があるだけでなく、地球環境問題に対しても高い先見性と洞察力を有している。また、国際連合大学副学長を務めた経歴からも、本研究領域で特に必要とされる国際的視点も兼ね備えていると見られた。

研究においては、文部省科学研究費重点領域研究「人間地球系」総括代表をはじめとしたマネジメントの実績があったと同時に、多数の学会、協会等の要職も歴任しており、研究者コミュニティからの信頼も広く集めていた。さらに、CSTP 基本政策専門調査会分野別推進戦略 PT 環境メンバー、総務庁行政改革本部規制改革委員会参与、科学技術会議「21 世紀の社会と科学・技術を考える懇談会」専門委員、日米科学技術対話「21 世紀の社会と科学技術」コアメンバー、文部科学省科学技術・学術審議会技術・研究基盤部会臨時委員、総合科学技術会議環境イニシアティブ（ごみゼロ、化学物質）専門委員等、日本の環境技術政策の中心的役割を担ってきており、日本が目指すべき環境技術を広い視点から俯瞰してマネジメントできる経験・能力を有していると考えられた。基礎研究の高い見識を持ちなが

ら、日本だけでなく世界が目指すべき環境政策への広い見識を持つことは、幅広い対象を持つ環境技術研究のマネジメントには必須であり、同氏の強みと言えた。

こうした実績を総合すると、当該研究領域について先見性及び洞察力を有しており、適切な研究マネジメントを行う経験、能力を有していると共に、関連分野の研究者から信頼され、公平な評価を行いうると判断された。(http://www.jst.go.jp/pr/evaluation/problem/problem2/kisoken/h20/index.html をもとに作成)

3. 研究総括のねらい

現在、二酸化炭素排出抑制に資する対策技術を開発するため、環境省や経済産業省、新エネルギー・産業技術総合開発機構等の関係各省・政府系機関において、研究開発のプロジェクトが推進されている。これらプロジェクトは、早期に対策効果が現れる技術を中心とした研究開発を対象とするため、開発担当者は、比較的短期間で確実な成果が見込まれる研究課題にフォーカスする傾向がある。また、これらのプロジェクトでは、太陽電池・バイオマス・燃料電池・蓄電池・熱電素子など既成の技術分野ごとに研究開発が推進されるのが一般的である。しかし、比較的短期間で成果が見込める既存技術の改良や、いかに革新的といえども個別の対策技術では、2050 年までに二酸化炭素の排出量を半減するという長期目標の達成は期待できない。本研究領域は、2020 年から 2030 年頃に普及を開始し最終的には 2050 年の長期目標に貢献する革新技術を開発するため、以下の a)、b) を本研究領域の骨子として、(1)研究課題の選考、(2)研究課題の推進、(3)研究成果のまとめ・評価の各ステップを推進した。

a) 将来社会で実用化され広く利用される芽となる革新的技術を開発する。

b) 関連する幅広い分野からなる革新的技術群をポートフォリオとして揃える。

(1) 採択対象となる研究課題

a) 各研究課題は、先端的・革新的であり、新概念・新原理に立脚する技術であると同時に、2020 年～2030 年頃までに普及を始め、最終的にどのような形で社会に受容されるか具体的にイメージできる技術を対象とする。

b) 採択された研究課題は、2050 年に達成されるべき社会像をゴールとして定め、そのために必要となるあらゆる技術からなるポートフォリオを構成する。

(2) 研究課題の推進

a) 研究実施者は、先端的・先鋭的な研究を推進し、極限的な性能を追求すると同時に、社会側からのニーズと、自らの研究の社会的な役割とを強く認識し、技術の現実可能性を見極めるよう努める。

b) 研究実施者は、研究領域内で自身がバーチャルラボの一員であると認識し、他のチームの研究者との連携・融合を意識する。一方で評価者(研究総括と領域アドバイザー)は、幅広い視野とバランスを持ち、異分野の研究者と位相・ベクトルを合わせることで新しい技術の種を生み出す環境を醸成する。

(3) 研究成果のまとめ・評価

- a) 研究実施者は、開発した技術が 2020 年から 2030 年頃までに実用化の普及を始められるか、二酸化炭素排出抑制にどの程度貢献できるか、具体的数値を含めたシナリオを提示する。2030 年頃までの普及開始が困難ならば、いつ頃から普及が可能かを見極める。
- b) 研究実施者と評価者は、2020 年から 2030 年頃までに普及が可能な技術群を見極め、それら組み合わせを最適化し、2050 年の長期目標達成に向けた社会的方向性を提示する。

(1)については「4. 研究課題の選考について」で、(2)は「6. 研究領域の運営について」で、(3)-a)は「7. 研究を実施した結果と所見」で後述する。

4. 研究課題の選考について

(1) 募集・選考の方針

「3. 研究総括のねらいー(1)採択対象となる研究課題」を募集・選考の基本方針とした。特に、2050 年の目標達成のために必要となる、ありとあらゆる革新的で有望な技術群を、エネルギー技術の上流から下流(エネルギー供給技術、エネルギー・電力貯蔵技術、省エネ・高効率利用技術)にわたってバランスのとれたポートフォリオとして揃えることを目指した。その上で、各年度毎に採択方針を策定し、研究提案募集のホームページや要項冊子を通じて研究提案者に告知した。

①2008 年度(初回)の採択方針

- ・開発により多くの期間を要すること、現状の供給側の社会システムの変更に超えるべきハードルが高いことを考慮し、エネルギー供給側の立場からの提案を優先した。ただし、あくまでも消費側との協調が必要であるというスタンスを保持し、エネルギー消費側からの提案も十分に配慮した。

②2009 年度(2 回目)の採択方針

- ・太陽光から直接、電力と水素を得る技術に特化した CREST の研究領域が 2009 年度から新たに設定されたため、2009 年度、2010 年度のエネルギー供給に係る提案では、太陽光エネルギーの直接変換の分野を本研究領域の募集の対象外とした。
- ・エネルギー供給側の提案が重要であることに変わりないが、さらに、エネルギー消費側からの提案、すなわち、省エネルギー的な研究への間口を広めに構えるように配慮した。

③2010 年度(3 回目)の採択方針

- ・過去 2 回の募集・選考の結果、「エネルギー・電力貯蔵技術」「省エネ・高効率利用技術」の分野での研究課題数がやや不足気味であり、また、風力、地熱、CCS(二酸化炭素の回収・貯蔵)、海洋利用のようなマクロエンジニアリング的な研究課題が採択できていなかったため、これらに関連する研究分野からの応募を期待する旨、告知した。

- ・環境エネルギー技術が相当な規模で地球全体に普及する際に、どのぐらい実装が可能でかつ有効性が充分であること等に関する定量的な分析評価を行う優れた提案を期待する旨、告知した。

(2) 募集・選考のプロセス

研究総括と領域アドバイザーが研究領域の方針を共有し研究課題の選考にあたった。また選考においては、提案者と利害関係を有する評価者が応募提案の審査へ関与すること、提案者が他の大型研究助成と重複することを避けることとし、そのための調査、調整を JST 事務局が行った。

2008 年度から 2010 年度にわたり合計 3 回の採択活動を行った。審査は書類審査(一次選考)、面接審査(二次選考)の 2 段階で実施した。まず書類審査では、提案された書類を評価者が事前に査読した上で書類審査会を開催し十数件の面接審査対象に絞り込んだ。次に、面接審査ではこれら十数件の研究提案について研究提案者による口頭発表と質疑応答からなる面接評価会を実施した。書類審査、面接審査では領域アドバイザーが評価コメントと共に評価点数を付与し、評価点の上位から研究課題を採択することを原則とした。ただし、評価点が僅差の研究提案については、領域アドバイザーによる評価コメントを参考にして十分な議論を経た上で、研究課題を決定した。

(3) 選考過程と結果

本研究領域への募集に対して 2008 年度は 53 件、2009 年度は 36 件、2010 年度は 42 件の応募があった。太陽電池・バイオ燃料・風力発電・海洋エネルギーなどエネルギー供給技術に関する研究提案、また、蓄電池・キャパシタなどエネルギー・電力貯蔵技術に関する提案、インバータ・熱電変換素子などエネルギー高効率利用技術に関する提案、さらにはその他バラエティーに富んだ大変意欲的な提案が、第一線で活躍されている優秀な研究者から多数寄せられた。これらの提案を領域アドバイザーと共に書類審査を行い、2008 年度は 15 件、2009 年度は 13 件、2010 年度は 9 件の面接対象者を選出した。最終的に 2008 年度は 6 件、2009 年度は 5 件、2010 年度は 4 件の研究課題を採択した。合計 3 回の募集にわたる応募総数は 131 件、採択課題数 15 件であり、平均採択率は 11%であった。

以上 3 回の募集によって本研究領域で採択された研究課題を分類すると、図 1、表 2 の通りとなった。採択された研究課題はチャレンジングで先端的・先鋭的な研究課題であり、同時に 2020～2030 年頃に普及を始めることが具体的にイメージできる提案であった。また「エネルギー供給技術」「エネルギー・電力貯蔵技術」「省エネ・高効率利用技術」にわたる幅広い分野の研究課題を採択できており、有望なポートフォリオを作るためのテーマの分散度という観点から見るとほぼ当初の狙い通りであると言える。ただし、風力発電、地熱発電、CCS、海洋利用のようなマクロエンジニアリング的な研究課題が採択できなかった。これらの研究分野は研究費の規模や実用化に至るまでのフェーズにおいて、CREST の枠組みと上手く整合しなかったためである。また 2010 年度の採択方針に掲げた環境エネルギー技術の有効性を定量的に分析評価する研究課題も採択できなかった。これについては、研究領域後半から終了にかけて研究総括と領域アドバイザーの見識で補って進めることとした。

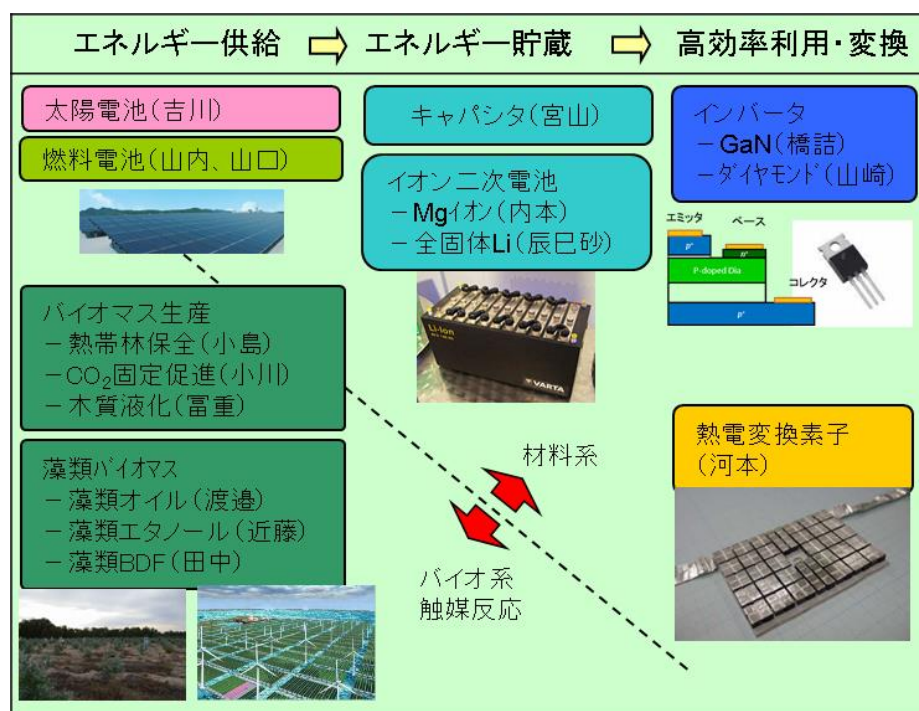


図1 採択課題のマッピング

表2 各研究課題の分野別分類

技術分野			研究課題(研究代表者名)
①エネルギー供給技術	バイオマス生産	陸上植物	小島(東京大学)、小川(岡山県)
		藻類	渡邊*1(筑波大学)、近藤(神戸大学)、田中(東京農工大学)
	バイオマス液体燃料生産		富重*2(東北大学)
	太陽電池		吉川(京都大学)
	燃料電池		山内(九州大学)、山口(東京工業大学)
②エネルギー・電力貯蔵技術	2次イオン電池		内本(京都大学)、辰巳砂*3(大阪府立大学)
	電気化学キャパシタ		宮山(東京大学)
③省エネ・高効率利用技術	次世代半導体インバータ		橋詰(北海道大学)、山崎(産業技術総合研究所)
	熱電変換素子		河本(名古屋大学)

*1: 2011年度末、*2: 2010年度末、*3: 2013年9月末に本研究領域を早期終了

5. 領域アドバイザーについて

表3 領域アドバイザーの氏名、所属等

領域アドバイザー名	終了時の所属	役職	任期
五十嵐 泰夫	西南大学生物・エネルギー・生物修復研究センター	センター長・教授	2008年6月～
岡島 博司	トヨタ自動車株式会社技術統括部	主査	2008年6月～
小久見 善八	京都大学 名誉教授・産官学連携本部	特任教授	2008年6月～
桑野 幸徳	太陽光発電技術研究組合	理事長	2008年6月～
小長井 誠	東京都市大学総合研究所	教授	2008年6月～
竹山 春子	早稲田大学理工学術院先進理工学部	教授	2008年6月～
辰巳 敬	(独)製品評価技術基盤機構	理事長	2008年6月～
藤岡 祐一	福岡女子大学国際文理学部	教授	2008年6月～
藤野 純一	国立研究開発法人国立環境研究所 社会環境システム研究センター	主任研究員	2008年6月～
松村 幸彦	広島大学大学院工学研究科	教授	2008年6月～
山地 憲治	地球環境産業技術研究機構	理事・研究所長	2008年6月～
湯原 哲夫	キャノングローバル戦略研究所	理事・研究主幹	2008年6月～ 2015年11月

本研究領域はバイオマス、太陽電池、蓄電池、燃料電池、触媒技術など多岐にわたる研究分野と密接に関連する。それぞれの分野において高い先見性と優れた研究実績を有し、各学会において先導的な立場で活躍されている研究者の中から、産官学・年齢構成・所属地域を留意し、領域アドバイザーを選任した。同時に、各研究分野における研究課題を分野横断的に、かつ、より広い視点から俯瞰し評価できる有識者を領域アドバイザーとして選定した。また、本研究領域では、各研究課題が社会との接点を有すること、特に産業界からの期待に十分に答える研究結果を創出することが重要であると考え、研究開発・事業化において豊富な経験と指導力を有する民間企業出身者を領域アドバイザーとして積極的に登用した(表3)。

6. 研究領域の運営について

「3. 研究総括のねらいー(2)研究課題の推進」で述べた運営方針に従い、各研究課題を推進した。採択された個々の研究代表者は当該分野の第一線で活躍する研究者であり、同時に、本研究領域が趣旨とする先端的研究の社会的役割についても十分な理解を示した。しかし、互いに異なる分野の研究代表者が、研究領域という1つの場に集められて、すぐさま一丸となり、戦略目標の達成にむけて自律的に動き出すことは望めない。そこで、領域会議・サイトビジット・公開シンポジウムなどの機会を利用して、各研究チームがそれぞれの特質を互いに十分に理解し合い、工夫を重ねることによって新しい技術の種を生み出すべく競争し合う環境をつくる必要があった。そのための領域運営上の工夫を行った。

(1) 研究課題のマネジメント

① 研究代表者との意見交換

研究開始前、あるいは、研究開始後に、研究総括が研究代表者と面談を行い、研究の具体的な進め方や方向性について指導した。例えば、顕著な研究進捗や研究成果が得られたと判断された研究課題については適宜、研究代表者と面談を行い、研究をさらに加速させるために必要な支援方法について議論した。また、今後の研究の方向性について軌道修正が必要である、または、研究進捗が思わしくないと判断された研究課題については、研究体制の立直しを図るための方策について研究代表者と評価者とで議論した。

② 研究総括と領域アドバイザーとの意識合わせ

評価者と研究代表者の意見交換もさることながら、評価者同士の意見交換、認識合わせも重要である。評価者が一堂に会するサイトビジット、領域会議、公開シンポジウムなどの機会を利用して、研究総括と領域アドバイザーが研究領域の運営・指導のありかたについて議論した。

③ サイトビジット

研究進捗・研究施設・研究体制の状況を確認するため、研究開始おおむね 1 年後と、課題中間評価と課題事後評価の実施前に研究実施場所を訪問視察するサイトビジットを実施した。サイトビジットには対象課題の研究分野に専門領域に近い領域アドバイザーが必ず同行し、同時に、より多角的な視点からの助言を与えるために異なる専門分野の領域アドバイザーも積極的に参加した。また、必ず JST 領域担当者がサイトビジットに同行し、予算執行や研究員雇用など研究推進にまつわる各種事務手続きについて研究代表者からの質問に対応した(研究領域発足以来、15 研究チームを対象に 29 回のサイトビジットを実施済)。1 回のサイトビジットにつき、研究進捗についての議論に約 3 時間、研究施設の見学に 1 時間、と十分な時間を確保し、研究内容の詳細のみならず、今後の研究の方向性、研究終了に向けた成果のとりまとめ方法についても研究代表者と評価者との間で議論した。

訪問視察地としては、研究代表者が所属する研究機関だけでなく、研究チーム体制の適切性を把握するため、必要性に応じ、主たる共同研究者が所属する研究機関も対象とした。さらに、視察対象は国内研究機関のみならず、研究課題において重要な役割を担っていると判断された海外試験地も視察対象とした。このように各研究チームのチーム体制の事情に応じて視察対象となる研究機関を選定し、適切な研究進捗の把握、管理に努めた。

④ 本研究領域終了後の(元)研究代表者へのインタビュー

本研究領域の領域中間評価報告書で、本研究領域は、個々の研究課題の成果を領域全体として価値のある形に取りまとめ、これらの成果が今後社会にどのように貢献できるかを、分かりやすく発信するように求められている。その評価結果を受けて、本研究領域で得られた研究成果が 2020 年～2030 年程度までに二酸化炭素排出抑制に資する科学技術イノベーションの創出にどの程度寄与できるのか、本研究領域を終了した研究代表者と研究総括・

領域アドバイザーとが忌憚なく議論する場を設ける必要があると考えた。そこで、本研究領域を終了した研究代表者の研究機関を研究総括と領域アドバイザーが訪問し、インタビューと意見交換会を実施した。2008 年度・2009 年度採択課題の 5 名の研究代表者の研究機関を訪問した。(河本チーム：2014 年 7 月 29 日@名古屋大学、内本チーム：2015 年 4 月 16 日@京都大学、辰巳砂チーム：2015 年 4 月 17 日@大阪府立大学、小川チーム：2015 年 7 月 6 日@岡山県農林水産総合センター、近藤チーム：2015 年 7 月 7 日@神戸大学に訪問した。)

(2) 研究課題間での情報共有

①非公開の領域会議

研究課題採択後およそ 1~2 ヶ月後に非公開のキックオフミーティングを実施した。ここで各新規研究課題の研究代表者は、研究総括・領域アドバイザー・他研究チームの研究代表者に、今後 5.5 年間の研究計画を報告した。各研究チームあたり発表と質疑応答と合わせて約 1 時間と十分な時間を確保し、研究代表者が研究総括・領域アドバイザーと研究計画、マイルストーン、目標を共有した。

②研究課題間での連携

研究課題間の連携の実績を 2 件紹介する。まず、小川チームは、グルタチオンが陸上植物だけでなくクラミドモナスなどの緑藻においてもバイオマス生産性向上の効果を発揮することを明らかにした。そこで、藻類バイオマス研究を推進する近藤チームは、小川チームと協力してスピルリナ藻類へグルタチオンを施用し、藻類バイオマスの生産性を向上させることを検討した。「第 13 回 RIBS バイオサイエンスシンポジウム&日本光合成学会公開講座ー光と水、空気、土からはじまるエネルギー生産ー」(2013 年 11 月 15 日(金)、主催：岡山県農林水産総合センター生物科学研究所、共催：日本光合成学会、協賛：科学技術振興機構(JST)CREST、後援：おかもやまバイオアクティブ研究会)を開催し、グルタチオンによるバイオマス増産技術と藻類バイオマスエネルギー生産の最新動向に関する情報交換・発信を行った。

また、藻類バイオマスの 3 つの研究チーム(渡邊チーム、近藤チーム、田中チーム)は、第 34 回日本藻類学会公開シンポジウム「未来を拓く藻類エネルギー」(筑波大学、2010 年 3 月 21 日)を合同で開催し、各研究課題の進捗状況、藻類バイオエネルギー生産の最新動向に関する情報交換・発信を行った。

(3) 研究費の追加配分について

サイトビジット、課題中間評価、領域会議などで、研究が大きく進展し顕著な研究成果が上がっている、あるいは今後上がりつつあると認められた研究課題に対して、当該年度の研究費を充当し、積極的に研究加速を支援した。研究加速支援のための配賦額は 360 百万となった。研究進捗の状況や必要性、有効性などを踏まえて、適正・公正に配分した。また、研究加速以外の目的でも、女性研究者等多様な研究人材が JST 男女共同参画支援制度を利用するのを推奨し、彼らの能力を発揮できる環境作りを支援している(2009 年度：吉

川チーム、2010 年度：小島チーム、2013 年度～2014 年度：小川チーム)。その他にも表 4 に示すとおり各種目的に応じて研究費を追加配賦している。追加配賦額の総額は 409 百万円となった(表 4)。

表 4 研究費の追加配分内訳(百万円)

内訳	追加配賦額
研究加速支援	360
男女共同参画支援策	12
国際強化支援策	15
JST-RA 制度	19
震災復旧復興支援	3
合計	409

(4) 課題中間評価、課題事後評価(2008 年度・2009 年度・2010 年度採択課題)

2008 年度採択課題について 2011 年 10 月に、2009 年度採択課題については 2012 年 10 月に、2010 年採択課題については 2013 年 10 月に課題中間評価を実施した。中間評価報告会では、研究総括・領域アドバイザーに対して研究代表者が研究進捗を報告(プレゼン 25 分＋質疑応答 25 分)した。その評価会に先立ち、研究代表者が事前に作成する中間報告書を研究総括と領域アドバイザーが査読した。

中間評価報告会後は、全ての研究代表者に対して書面によって中間評価結果をフィードバックした。優れた研究進捗を示した研究課題については、進捗をさらに加速するため研究費増額の措置や計画の前倒し、主たる共同研究グループの追加などの研究体制の変更を指示した。一方、研究進捗が芳しくない研究課題については、研究体制の見直しや研究資源配分の変更を指示し、次年度以降の研究計画に変更内容を反映させた。

たとえば、田中チームに対しては、海洋性藻類の BDF(バイオディーゼル燃料)生産の基盤技術をより強固なものとするために、当初計画していた 4.5 年間の研究期間を 1 年延長して 5.5 年間とした。内本チームに対しては、マグネシウムイオン二次電池用正極、電解質の個々の構成要素の性能評価にとどまっていたため、全ての要素技術を組み合わせた全電池系の構築を行って、早急に性能評価を行うべきであるとの助言を与えた。それを受けて内本チームは、有望な正極である有機系キノン誘導体正極および MgFeSiO_4 正極材料を用いて全電池系構築の計画を前倒しして性能評価を行った。橋詰チームに対しては、MMC(Multi-Mesa-Channel)構造の GaN -HEMT に関する基盤技術をより強固なものとするために、当初計画していた 4.5 年間の研究期間を 1 年延長して 5.5 年間とした。山崎チームに対しては、ダイヤモンド半導体の分野がより大きなコミュニティとなるように当該分野のみならず関連分野からも多くの研究者を本研究分野に誘引するよう助言した。それを受けて山崎チームは翌年度から株式会社デンソーを研究チーム内に主たる共同研究グループとして参加させた。さらに、企業から本研究分野への参入を促すためにはダイヤモンド基板のコスト低減が不可欠であると認識し、低コストシリコン基板について民間企業と共同研究を

推進した。渡邊チームは、2011 年度末で本研究領域を早期終了することとした。

2008 年度採択課題については 2013 年 12 月に、2009 年度採択課題については 2014 年 12 月に、2010 年度採択課題については 2015 年 11 月に課題事後評価を実施した。事後評価会では研究成果と今後の波及効果を明らかにした。その所見については「7. 研究を実施した結果と所見」で述べる。

(5) 研究成果の発信

①公開シンポジウム

研究成果を社会還元する活動の一環として、2009 年度から毎年領域公開シンポジウムを開催し、大学・国研の研究者や民間企業の開発者など幅広い層を対象にして各研究課題の研究成果をプレゼンまたはポスター形式で発信した。研究成果の発信に加え、研究総括が司会を務め、主に領域アドバイザーらがパネラーを務めるパネルディスカッションを毎回実施し、「二酸化炭素排出抑制・削減技術の将来ビジョン」と題して二酸化炭素排出抑制・削減技術の将来ビジョンを議論した。第 3 回領域公開シンポジウムでは、パネラーとして行政担当者(文部科学省研究開発局環境エネルギー課長、経済産業省産業技術環境局研究開発課長)にも参加いただくことで、研究領域外からの忌憚ない意見を積極的に取り入れ、その後の領域運営に活用するよう努めた。また、第七回領域公開シンポジウムでは、研究総括が本研究領域の 8 年間にわたる研究成果、領域運営を総括する発表を行った。

第 1 回：2009 年 11 月 13 日、アルカディア市ヶ谷

第 2 回：2010 年 12 月 3 日、日本科学未来館

第 3 回：2011 年 12 月 9 日、日本科学未来館

第 4 回：2013 年 1 月 25 日、東京品川コクヨホール

第 5 回：2014 年 1 月 31 日、東京品川コクヨホール

第 6 回：2015 年 1 月 16 日、東京品川コクヨホール

第 7 回：2016 年 1 月 15 日、東京品川コクヨホール

②本研究領域の最終的な研究成果を長期ビジョンとして提示

個々の研究課題の成果を領域全体として価値のある形に取りまとめ、これらの成果が今後社会にどのように貢献できるかを発信するために、終了研究者へのインタビューを通じて得られた研究の進展状況と本研究領域の研究成果とを取りまとめた内容を、第 7 回公開シンポジウムで研究総括が発表した。

7. 研究を実施した結果と所見

(1) 各研究チームの研究成果

表 2 各研究課題で示した分野別分類「①エネルギー供給技術」「②エネルギー・電力貯蔵技術」「③省エネ・高効率利用技術」の順に各研究課題の研究成果を述べる。その後、研究領域全体として見たときに特筆すべき研究成果を取り上げ、「3. 研究総括のねらいー(3)研

究成果のまとめ・評価 a)」で述べた観点からレビューする。

①エネルギー供給技術

- －陸上植物バイオマス生産(小島チーム、小川チーム)
- －バイオマス液体燃料生産(富重チーム)
- －藻類バイオマス生産(渡邊チーム、近藤チーム、田中チーム)
- －太陽電池(吉川チーム)
- －燃料電池(山内チーム、山口チーム)

②エネルギー・電力貯蔵技術

- －内本チーム、辰巳砂チーム、宮山チーム

③省エネ・高効率利用技術

- －次世代半導体インバータ(橋詰チーム、山崎チーム)
- －熱電変換素子(河本チーム)

①エネルギー供給技術－陸上植物バイオマス生産－

小島チーム(研究期間：2008年10月～2014年3月)

東南アジアを中心に分布する、厚い木質泥炭が堆積した熱帯泥炭湿地は、近年、オイルパーム等のプランテーション開発により排水されて好氣的な条件になり、堆積していた泥炭が微生物の活動により分解されて大きなCO₂放出源に転換している。本研究チームは、不適切な開発によってCO₂放出源となっている熱帯泥炭湿地を、湛水化による泥炭保全と湛水耐性種の造林によって再び吸収源に戻す現地実証試験を行った。さらに、生産された木質バイオマスの資源利用技術を開発して、排出削減からバイオマス利用までのトータルシステムを提示し、排出削減ポテンシャルを明らかにした。本研究課題の実施によって、極めて大きなCO₂排出削減効果が得られるとの見通しが得られた。具体的な研究成果は以下の通りである。

(i) 再湛水化した熱帯泥炭土壌での造林技術の開発

湛水耐性樹木のメラルーカの苗の生産技術と植栽技術を確立した。他の有用樹種への技術の適用の拡大を目指し、種特性や環境耐性機構の解明といった基礎研究を行いつつ、タイ国のフィールドでの適用試験を行った。メラルーカによるCO₂のバイオマスへの固定量は大きく、バイオマス生産林として十分に利用可能な生産性があることを示した。

(ii) 泥炭保全技術の開発と二酸化炭素放出量の評価

変動水位環境下における長期観測システムを構築してフィールドでのCO₂放出のモニタリングデータを蓄積し、放出速度の環境応答解析を行った。CO₂放出速度と泥炭土壌の化学性との関係、熱帯泥炭土壌のガス拡散特性などを解析し、放出予測モデル構築のための基礎データを得た。これらの知見をもとに水位と温度を変数とする予測モデルを構築した。

(iii) 生産された木質バイオマスの利用技術の開発

メラルーカを材料とした木質バイオマスの利用技術を開発し、CO₂排出と収益性の面から最適な資源配分を考案した。他の湿地生樹木についても利用可能性を提示した。

(iv) 木質バイオマス生産プロジェクトのライフサイクルインベントリ

泥炭保全・造林からバイオマス利用までのシステムの提示を目指し、実際規模(10,000 ha)での温室効果ガス収支、経済性についての評価を行った。泥炭保全と森林造成によるCO₂排出削減量は極めて大きく、また、農家レベルでの収益は、泥炭湿地でのオイルパーム園の実際の収益と遜色がないと予想され、経済的に適用可能なシステムであることが分かった。

以上の研究成果が今後、真の価値を生むには、本研究成果を本格的に実社会へ展開することが不可欠である。現在、タイ国において王室チャイパッター基金との共同研究、実証プロジェクトが開始されるなど、実用化に向けた研究開発が推進されている。その結果によっては、極めて大きなCO₂排出削減効果が得られると予想される。今後は、本研究成果をタイ国以外の地域へも展開できるよう、フィールド試験で得られた実験データや知見を基礎科学的にさらに深掘りすることで、普遍的なCO₂放出予測モデルを構築することが求められる。研究成果の社会的意義をアピールしながら、タイ国の関連機関や国内研究者との連携により本研究成果をいち早く実用化に展開することが必要である。

①エネルギー供給技術－陸上植物バイオマス生産－

小川チーム(研究期間：2009年10月～2015年3月)

耕地面積の飛躍的な拡大が期待できない現状、化石燃料の代替としてのバイオマス利用を促進するためにはバイオマス増産の技術開発によって土地の単位面積あたりの生産性を向上させることが必要である。本研究チームは、生物界に遍在するトリペプチドのグルタチオンを活用し、植物のCO₂固定量、種子収量、バイオマス生産量を増加させる基盤技術の確立を目指した。本研究課題の実施によって、グルタチオン施用によりバイオマス生産性が10%から40%増大することを国内外のフィールド実験で実証し、さらに、分子生物学的な視点に立ったグルタチオンの作用機構の解明について手がかりを得た。具体的な研究成果は以下の通りである。

(i) グルタチオン施用によるバイオマス増産のメカニズムの解明

シロイヌナズナでのモデル実験系では、気孔密度と開口度の制御によるCO₂供給促進、光化学系の増強と光利用効率の大幅な向上、CO₂固定回路の活性化と量的増強によるCO₂同化の促進がグルタチオン施用によるバイオマス生産性向上の要因であることを見出した。

(ii) 陸上植物へのグルタチオン投与によるバイオマス増産効果

グルタチオン施用によってバイオマス生産性が10%～40%増大することを、ユーカリ・ダイズ・キャッサバなどの陸上植物を用いて国内外のフィールド実験で検証し、グルタチオン施用の有効性を実証した。

(iii) 微細藻類へのグルタチオン投与によるバイオマス増産効果

微細藻類においてもグルタチオン施用による効果が認められた。微細藻類を用いてデンプンや油脂の高生産を実現するためには、窒素栄養欠乏等の培地条件の変更や回収・精製の工程が必要である。藻類に対するグルタチオン施用、グルタチオン代謝改変によって、デンプンや油脂の高生産が可能で生産物の回収・精製を簡便化できる技術を開発した(出願番号：PCT/JP2011/069501)。

(iv) 非破壊測定による植物の収量予測・管理技術

植物の収量と関係する因子を非破壊で測定することによって早期に収量性を予測できる技術を開発した。しかも、測定対象がグルタチオン投与による増収効果を決定する因子でもあることから、開発した技術はグルタチオン投与の時期最適化や投与効果の判断など、非破壊で生産性を管理できる技術につながる(出願番号：PCT/JP2012/078073)。たとえば、衛星からのリモートセンシング技術への応用も可能であり、農林業生産のスマート化への貢献が期待される。

岡山県農林水産総合センターと共同開発を実施している株式会社カネカは2015年春までを目標に酸化型グルタチオンを「カネカ ペプチド」として業務用に生産・販売を開始すると発表した(<http://www.kaneka.co.jp/service/news/150218>)。酸化型グルタチオンには、光合成を促進し光合成でできた糖類を効率よく蓄積する効果があり、農作物の増収や糖度の向上をもたらすと期待される。本研究成果は「第2の緑の革命」との評価を受けている。

今後は、異なる土壌、気候条件下において長期間のフィールド実験を行い、グルタチオンの効果を幅広く検証し、世界規模での実用化を目指すとともに、分子生物学的視点に立ったグルタチオンの作用機構の未解明部分の解明を進めていく必要がある。本研究成果が将来、広く普及し実用化された場合、CO₂削減効果は極めて大きくなると期待される。

① エネルギー供給技術ーバイオマス液体燃料生産ー

富重チーム(研究期間：2008年10月～2011年3月)

バイオマスガス化を経由する発電及び液体燃料製造する従来のプロセスは1000℃～1200℃以上の高温部分を必要としているためプロセスが複雑、大規模であり、エネルギー効率の向上も容易ではない。本研究チームは、バイオマスを液体燃料などへ変換する高効率で小規模なプロセスの確立を目指し、タール水蒸気改質触媒、バイオチャーガス化、水性ガスシフト触媒、バイオシingas変換触媒の開発を行った。さらに、開発した触媒の工業的触媒調製法の検討、プロセス設計、CO₂排出削減効果の試算を行った。2011年度3月早期に研究を終了したため、開発触媒の工業的調製法の開発、長寿命化など実用性を高める研究をほぼ未着手のまま残したものの、本研究課題の実施によって、開発触媒の高機能化・機能解析等の基盤となる技術の開発目標をおおむね達成した。具体的な研究成果は以下の通りである。

(i) バイオマスタールの水蒸気改質触媒

Ni 触媒への Fe 添加による水蒸気改質活性および炭素析出耐性の向上を見出した。また、触媒構造解析から合金表面の形成を明らかにし、それに伴う Fe から Ni への酸素原子の供与による促進機構のモデルを提案した。さらに、ハイドロタルサイト化合物を前駆体とした触媒調製を検討し、組成がより均一で高性能な Ni-Fe 触媒の開発にも成功した。

(ii) チャーガス化触媒プロセス

Ni 担持 CeO_2 触媒を用いて、熱反応とプラズマによって誘起した反応により 673 K 程度の低温でも固体炭素のガス化が可能であることを示した。

(iii) 水性ガスシフト触媒

安価な酸化鉄をベースとした触媒探索を行い、Pd と K を添加することで高活性・高安定性を有する触媒の開発に成功した。特に、Pd と K の機能解析を行い、酸化鉄の活性構造の安定化やその酸化物イオン反応性向上についての考察を行った。

(iv) バイオシンガス変換

装置のコンパクト化を目的とし、複数の反応を一段で進行させるカプセル型触媒の開発を行った。Fischer-Tropsch 合成触媒をコアとし、Pd 金属微粒子をスパッタ法で導入したゼオライト膜のシェルを組み合わせて、合成ガスから一段でガソリンを製造するカプセル型触媒や、メタノール合成触媒をコアとし、ゼオライト膜のシェルを組み合わせることで、ジメチルエーテルを与えるカプセル型触媒の開発に成功した。(JACS, vol. 132, pp. 8129-8136 (2010))

(v) 開発触媒の工業的調整の可能性

開発した触媒の工業的調製の可能性について検討した。さらに、実験データを基礎として、プロセスのモデル化を行い、開発触媒を用いたプロセスの優位性を検討した。

本研究チームの研究代表者は、2011 年 4 月から内閣府の最先端・次世代研究開発支援プログラム(NEXT)「石油を代替するバイオマス化学品製造のための触媒開発」に専任するため、本研究課題を 2011 年 3 月に早期終了した。そのため、触媒の長寿命化、開発触媒の工業的調製法の開発、木質系バイオマスから液体燃料生産までのトータルフローの構築など実用性を高める研究がほぼ未着手のまま残されたものの、開発触媒の高機能化・機能解析・高性能化等の基盤となる技術の開発目標をおおむね達成したと評価している。

①エネルギー供給技術－藻類バイオマス生産－

渡邊チーム(研究期間：2008 年 10 月～2012 年 3 月)

藻類のエネルギー利用は、陸上植物を凌ぐ生産性を持ち、かつ、食糧分野と競合しないバイオマスエネルギーとして注目されている。しかし、オイル産生藻類の屋外大規模化における経済性低下、高濃度培養条件下における細胞同士での自己遮蔽による増殖量の減少、

産生オイルの精製にかかるエネルギーとコストなど実用化するまでに解決すべき課題がある。本研究チームは、これらの課題を解決するために、利用価値の高い軽質油とほぼ同じオイル成分を純度高く、大量に産生する緑藻ボトリオコッカスの高アルカリ性環境下生育株を研究対象とし、最適増殖・オイル生産に導く培養基盤技術と高度品種改良技術、試験・デモプラントによる工業化技術の開発を行った。本研究チームは、本研究領域で得られた研究成果を活用して、2012年度から開始される「つくば国際戦略総合特区ー藻類バイオマスエネルギーの実用化」の研究に注力するため、本研究課題を2011年度末で早期終了することとなった。3年半の研究期間で得られた主要な研究成果は以下の通りである。

(i)最適増殖・オイル生産に導く培養基盤技術と高度品種改良技術の開発

ボトリオコッカスの遺伝子組み換え技術の開発などオイル産生能力を向上させる研究の進捗に遅れが見られた。一方で、ボトリオコッカスと比べて10倍以上の炭化水素生産効率を有するオーランチオキトリウムの培養株が発見され、また、これを有機廃水処理プロセスへと組み込むなどの応用展開が検討された。高いオイル生産能力を有する新規株の発見は大きなインパクトがあった。しかしながら、オーランチオキトリウムは従属栄養藻類であるため、光合成によりCO₂ガスを固定、削減する能力がなく、しかも、有機廃水処理プロセスへ新規株を組み込みことによるCO₂削減効果が定量的に示されなかった。

(ii)試験プラント・デモプラントによる工業化技術開発

数リットルから数百トンに及ぶ各種サイズの培養装置の導入により培養実験の研究環境を整備した。また、ボトリオコッカスの培養からオイル抽出・精製までにいたる生産システムを工程毎に分解し、エネルギー・コスト獲得量に対するエネルギー・コスト投入の比(ECR)を試算した。しかしながら、生産システムの中で最もエネルギー消費が大きいと考えられる廃液処理の工程が考慮されていないなど、システムバウンダリーの設定についての検討が不十分であった。

本研究チームが主対象とするボトリオコッカスは、高いオイル産生能力を有する世界的に有名な有望株として認知されているものの、実用化展開までに解決すべき多くの課題が残された。研究代表者は、2012年度から開始される「つくば国際戦略総合特区ー藻類バイオマスエネルギーの実用化」の研究に注力するため、本研究課題を2012年3月に早期終了とした。

①エネルギー供給技術ー藻類バイオマス生産ー

近藤チーム(研究期間：2009年10月～2015年3月)

豊富な海洋資源を有効に利用することができ、しかも、通年の収穫が可能な海洋性微細藻類からのバイオエネルギーは安定的なエネルギー供給を可能にすると期待される。本研究チームは、塩水環境で生育でき、増殖性の高い微細藻類スピルリナなどの光合成機能と代謝能力を強化するとともに、海水環境における高増殖・高密度の培養技術、微細藻類が産生するデンプンから高効率でエタノールを生産するプロセスの開発を行った。本研究課

題の実施によって、高い耐塩性・増殖能・デンプン生産能力を持つスピルリナ藻類を用いたバイオマス生産技術の基盤技術を構築した。具体的な研究成果は以下の通りである。

(i) システムバイオロジー技術の開発

微細藻類の中核代謝経路の代謝フラックスを実験的に解析する代謝フラックス解析手法を開発した。さらに、この代謝フラックス解析による結果とメタボローム解析やトランスクリプトーム解析の情報とを統合したシステムバイオロジー解析法を開発した(BIOSCI BIOTECHNOL BIOCHEM, 78, 384-393(2014)、PLANT CELL PHYSIOL, 55, 333-340(2014))。このシステムバイオロジー解析技術によって、代謝フラックス分布の予測や、目的物質の生産性を向上させるための候補遺伝子を抽出するなどの代謝設計が期待できる。

(ii) 代謝予測システムと代謝フラックス解析技術の開発

開発したラン藻のゲノムスケール代謝モデルによる代謝モデリング技術により、代謝フラックス分布の予測や目的物質の生産性を向上させるための候補遺伝子の抽出などの代謝設計が可能となった。また、¹³C 代謝フラックス解析により細胞の代謝フラックスを定量する技術を構築した。

(iii) 微細藻類遺伝子変異の操作条件の確立

常温常圧プラズマ(ARTP)を施した微細藻類の変異導入効率は従来の変異方法に比べ著しく高いことが分かった。この ARTP 変異導入法を用いて変異体バンクを作成し、野生株よりもデンプン生産能、耐塩性が強化された変異体を得ることに成功した。

(iv) 海水環境における高増殖・高密度培養の技術開発

海面を利用した低コストの培養設備を用いて、陸側からの送気だけで、スピルリナ藻を低コストに高密度育成・回収する培養システムを開発した。

(v) エタノール生産プロセスの開発

従来のエタノール生産プロセスとは異なる抽出・糖化・発酵を統合した新規のエタノール生産プロセスを提案した。グリコーゲンを資化できるアミラーゼ発現酵母を作出し、さらに細胞からのグリコーゲン抽出を促進する酵素を発酵上清に加える事により、前処理を加える事なく理論収率の 98%で藻類から 48 g/L のエタノールを生産できる技術を開発した。

研究代表者のグループは、NEDO 戦略的次世代バイオエネルギー利用技術開発事業「海洋性緑藻による油脂生産技術の研究開発(2012 年度～2015 年度)」に民間企業と共に採択され、その後、本研究成果を基に、実用化に向け、大規模培養実験や実海洋上での検証実験を実施している。一方で、高生産性藻類の創製に必要な遺伝子導入技術の開発は、当初の研究計画通り進捗しなかった。遺伝子導入技術の開発が今後の残された課題である。

①エネルギー供給技術－藻類バイオマス生産－

田中チーム(研究期間：2009年10月～2015年3月)

微細藻類を培養するための水源に乏しい我が国においては、豊富な海洋資源を有効利用できる海洋性藻類を用いたバイオマス生産技術が望まれている。しかし、微細藻類の多くは淡水産であり、海洋微細藻類や好塩性微細藻類については知見が少ない。本研究チームは、オイルを生産する海洋珪藻 *Fistulifera solaris*(ソラリス株)を用いた、トリグリセリド(TAG)の生産性向上やバイオディーゼル燃料(BDF)の高品質化に向けた基盤技術として、全ゲノム情報を解読、遺伝子組み換え系を確立し、世界の標準株となる海洋微細藻類のBDF生産株を発信することを目的とした。本研究課題の実施によって、遺伝子組み換え技術を活用してオイル生産性やオイル蓄積速度を向上させた変異株の作出に成功した。作出した変異体を用いた、太陽光環境下の屋外培養実験でのエネルギー収支比(EPR)は1を上回る見通しである。具体的な研究成果は以下の通りである。

(i) 微細藻類分子育種及び計算機解析

次世代シーケンサを用いた全ゲノム解析、トランスクリプトーム解析を実施し、TAGの代謝マップの構築を行った。さらにTAG合成に至る代謝経路を統合的に理解することで、TAGを蓄積するオイルボディーのサイズ制御に関わる生物学的因子を特定した。さらに、遺伝子組み換え技術を活用し、オイル生産性やオイル蓄積速度を向上させた変異体の作出に成功した。

(ii) 高層化培養技術

屋内閉鎖型のフラットパネル型リアクタを用いたソラリス株の高密度培養技術を開発し、BDF生産性の理論限界値として従来の50倍以上となる34 t/ha/年を示した(J. BIOSCI. BIOENG, vol. 117, pp. 720-724(2014))。また、藻体由来BDFは、日本工業規格に規定されるBDF要求品質を十分に満足し、自動車用軽油に混合するための脂肪酸メチルエステルとして実用的に使用できる品質にあることを確認した。

(iii) LCA・プロセスの開発

屋外培養においては、最終的なBDF生産性が12.5 t/ha/年と算出され、現状のパーム油を用いたBDF生産性6 t/ha/年の約2倍に達することを明らかにした。さらに、作出した変異株を利用することで、BDF生産性20 t/ha/年、EPR 1を超える見通しを得た。

本研究チームは研究開始当初、4.5年間の研究実施を予定していたが、主に「オイル生産性向上に向けた変異株の作出」「メタボローム解析によるトリグリセリド合成律速因子の特定」などの研究項目に注力することによってBDF生産の基盤技術をより強固なものにするために、課題中間評価での評価結果を受けて、研究期間を5.5年に変更する措置をとった。

上記(iii)の実験結果から冬季に生産性が低下することが明らかになった。今後は、寒冷環境においても安定した燃料生産を実現するために、研究代表者は、2013年9月からNEDO「バイオマスエネルギー技術研究開発／戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発

事業(次世代技術研究開発)」において、民間企業と共同でプロジェクトを推進し、藻類由来燃料の課題である安定的なエネルギー供給技術の確立を目指している。

①エネルギー供給技術－太陽電池－

吉川チーム(研究期間：2008年10月～2014年3月)

軽量で安価で資源制約がない有機薄膜太陽電池は、環境にやさしい次世代太陽電池の候補として、有望な技術と位置づけられている。本研究チームは、CO₂削減に資する軽量・安価な有機薄膜太陽電池でエネルギー変換効率 10%以上を達成することを目的とし、高分子ハイブリッドセルの開発、低分子ハイブリッドセルの開発、有機半導体の創製を行った。研究開始当時のエネルギー変換効率約 5%に対して、本研究課題の実施によって、低分子ハイブリッドセルで 11.7%、高分子ハイブリッドセルで 9.6%を達成した(変換効率はいずれも平面構造)。また、光電変換の学理においても学術的な基礎的知見を積み上げた。具体的な研究成果は以下の通りである。

(i)有機半導体の創製

n型フラーレン誘導体の最大の化合物ライブラリーを設計・調製し、開放端電圧を増大させるためのLUMOエネルギーの調整やドナー材料との適合性を高めるため分子極性の調整といった新たな設計指針の開発により、代表的なn型半導体材料であるPCBMより優れた性能を示すフラーレン誘導体の開発に成功した。また、付加体の選択的合成が可能な新反応を開発し、アクセプター材料創製の高度化に成功した。

(ii)高分子ハイブリッドセル

上記「(i)有機半導体の創製」で得られた指針をもとに、新規DA(ドナー・アクセプター)分子(吸収端900nm)を調製し、順逆両素子構造においてセル効率9.6%の高効率化に成功した。さらなる効率向上のため、自由に伸縮展開できる有機薄膜太陽電池の特性を活かして3Dセル構造を新たに考案し、平面セル構造の1.8倍の効率10.3%を達成した。さらに、バルクヘテロ接合の理論限界を超える効率を目指して超階層ナノ構造素子の可能性を検討した。酸化亜鉛1D ナノロッドアレイにおいて、P3HT(ポリ(3-ヘキシルチオフェン)(レジオレギュラー))のみを用いた系で1.4%の効率を得た。

(iii)低分子ハイブリッドセル

低分子HTL(Hole Transfer Layer)であるSpiro-OMeTADとペロブスカイト色素とを積層させたハイブリッド系において、低分子材料を6N以上まで高純度化し、素子構造を工夫することによって、我が国の最高効率 11.7%を実現した。(ii)(iii)で実証された変換効率はいずれも単接合構造で得られた値である。タンデム構造ではなく単接合構造として得られた値としては世界トップレベルである。

研究代表者は、有機薄膜太陽電池の実用化に向けた「有機太陽電池研究コンソーシアム」

をスタートさせた。産学連携による光透過型有機薄膜太陽電池によるソーラーシェアリング、電子センサー・カード用コードレス電源開発などへの実用展開を図りつつある。今後は、達成した目標(10%)をベースに世界最高のエネルギー変換効率(15%)を狙い、窓材・車載など、結晶 Si にはない特徴を活かした分野への実用展開を図ることを期待している。

ところが、最近になって、軽量・安価を特徴とするペロブスカイト系太陽電池が他研究機関から提案されたため、同じく軽量・安価・加工性といった有機薄膜太陽電池の特徴をどのように活かし競争力を維持し利用拡大を図るべきか、さらなる検討が迫られている。ペロブスカイト系太陽電池に対する競争力を失わないよう、もう一段上へのブレークスルーが必要である。

①エネルギー供給技術－燃料電池－

山内チーム(研究期間：2010 年 10 月～2016 年 3 月)

地球温暖化問題が深刻になる中、CO₂ 排出削減に関する明快な戦略が求められている。本研究チームは、新しいエネルギー循環システムとして、液体燃料をエネルギー媒体とし、CO₂ を排出することなく再生可能エネルギー由来の電力を循環させるカーボン・ニュートラル(CN)サイクルを提案した。エネルギー発生(発電/酸化)プロセスとして高選択的酸化燃料電池システムの開発、エネルギー貯蔵(蓄電/還元)プロセスとして高効率燃料再生システムの開発、両プロセスに共通する基盤技術として高選択的ナノ触媒の開発を行った。本研究課題の実施によって、再生可能エネルギー由来の電気エネルギーを使用することを想定して、電気化学的に水とカルボン酸からアルコール液体燃料を製造し、アルコールから CO₂ を全く排出することなく発電することが可能な CN サイクルを実証した。具体的な研究成果は以下の通りである。

(i) 高選択ナノ合金触媒の開発、高選択酸化燃料電池の開発

液相化学還元と水素還元を組合せた 2 ステップ法により作製した鉄族ナノ合金触媒 FeCoNi/C が、エチレングリコール(EG)からシュウ酸への高い選択性(～60%)を示した。また、量子力学的計算により、C-C 結合を切断しないで EG をシュウ酸まで酸化する高選択性は構成元素の協同効果によるものであることを明らかにした。さらに、鉄族ナノ合金をアノード触媒とするアルカリ形燃料電池を試作し、EG からシュウ酸への高選択的酸化による、CO₂ 排出のない発電に成功した。(Sci. Rep., 4, 5620(2014))

(ii) 高効率燃料再生システムの開発

カルボン酸であるシュウ酸を電気化学的に還元して一価アルコールであるグリコール酸に変換する TiO₂ 触媒の開発に世界で初めて成功した。また、反応条件の最適化によって、98%の高いファラデー効率でシュウ酸からグリコール酸を製造することに成功した。(Energy Environ. Sci., 8, 1456(2015))。

(iii) CN エネルギー変換サイクルの検証

シュウ酸の電気化学的還元によって得られたグリコール酸を燃料として、アルカリ型直接グリコール燃料電池による発電を試みた。電解質として $\text{LaSr}_3\text{Fe}_3\text{O}_{10}$ を用いて、2M グリコール酸と 6M KOH との混合溶液を燃料とすることで最大電力密度 37.4 mW/cm^2 を達成した。さらに、Pt 電極上では CO_2 を排出することなく 99% のファラデー効率および選択率でシュウ酸が生成した。(Energy Environ. Sci., 8, 1456 (2015))。Pd や CuPd などの非白金触媒を使った発電も可能であることがわかった。

以上の研究成果は、電気エネルギーと水とカルボン酸からアルコールを作製し、アルコールを用いた CO_2 の排出のない CN サイクルの初めての実証例である。このサイクルは、エネルギーキャリアとして輸送が容易な液体を使用し、アルカリ形燃料電池を使用しているためサイクル中の貴金属使用量が低減可能であるという実用化する上で重要な条件を満たしている。研究代表者は、CREST「再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けた革新的エネルギーキャリア利用基盤技術の創出」の研究代表者として 2015 年 10 月に採択され、本研究領域の研究成果を、研究課題「ナノハイブリッド材料創製に基づくクリーンアルコール合成システムのデザインと構築」においてさらに発展させていくと期待している。

①エネルギー供給技術－燃料電池－

山口チーム(研究期間：2010 年 10 月～2016 年 3 月)

白金以外の多様な金属触媒が使用可能な全固体型アルカリ燃料電池では、エネルギー高効率化、多様な燃料の直接変換、低コスト化が可能である。しかし、耐熱性・耐久性に優れた OH^- イオン伝導膜の開発が課題となっている。本研究チームは、革新的全固体型アルカリ燃料電池の実現を目指し、高速 OH^- イオン伝導性と高耐久性とを兼ね備えた新規 OH^- イオン伝導膜を開発し、全固体型アルカリ燃料電池の設計基盤を構築することを目指した。本研究課題の実施によって、高速 OH^- イオン伝導材料の設計基盤と高耐久性アニオン伝導材料の設計基盤を構築した。また、アルカリ燃料電池に特有な水移動特性を考慮したモデルをもとに燃料電池システムの設計基盤を構築し、高性能な全固体型アルカリ燃料電池を開発するための指針を明らかにした。具体的な研究成果は以下の通りである。

(i) 高速 OH^- イオン伝導材料の設計基盤

全固体型アルカリ燃料電池用の電解質膜として、芳香族アニオン伝導性ポリマーを充填した細孔フィリング膜(芳香族 PF 膜)を開発した。従来、 OH^- イオンの伝導機構としては自由水の並進運動に伴うビークル機構が知られていたが、本研究で開発した芳香族 PF 膜では、膜中に自由水が存在せず構造水のみとなり、水よりも OH^- が速く伝導していることを初めて見出した。

(ii) 高耐久性アニオン伝導材料の設計基盤の構築

高耐久性アニオン伝導材料の設計指針を得るために、モデル低分子化合物を用いてアルカリ環境下でのアニオン伝導材料の分解機構を解明した。従来提唱されてきた官能基の分

解ではなく、主鎖の開裂が初めに起こり、それに伴いイオン官能基が即座に同時分解するという新規な分解機構を見出し、ポリマー主鎖を含めた包括的な設計が必要であることを明らかにした。また、得られた知見をもとに量子化学計算を行い、アルカリ耐性に優れる構造を提案した。これら実験および計算による検討結果を合わせて、高耐久性電解質材料の設計指針を得た。以上の両基盤(i)(ii)に基づいた材料設計により実際の電池への応用に適した高性能・高耐久性アニオン伝導材料の開発に成功した。

(iii) 全固体型アルカリ燃料電池システムの設計基盤構築

全固体型アルカリ燃料電池システムの設計基盤として、計算と実験の両面からのアプローチによりアルカリ燃料電池特有の水移動特性を考慮した計算モデルを構築した。モデルに基づき、電解質膜薄膜化により水移動特性を改善することで、性能低下の要因であったアノードにおけるフラッドイングを抑制し、高いセル性能を得た。

研究代表者は、CREST「再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けた革新的エネルギーキャリア利用基盤技術の創出」の研究代表者として採択され、2015年10月から、研究課題「液体燃料直接型固体アルカリ燃料電池用触媒層およびMEA基盤技術の構築」を開始した。本研究領域で開発した電解質膜と全固体型アルカリ燃料電池システムの設計基盤とに関する研究成果をさらに発展させることを期待している。

②エネルギー・電力貯蔵技術

内本チーム(研究期間：2008年10月～2014年3月)

風力発電・太陽電池など自然エネルギーの安定供給をはかるためには、ポストリチウムイオン電池を指向した安全性が高くエネルギー密度の高い新しい蓄電池の創出が必要である。本研究チームは、負極金属としてマグネシウム、アルミニウム、カルシウムなどの多価金属を負極とした高容量・低コスト・高安全の蓄電池の開発を行った。本研究課題の実施によって、マグネシウムイオン二次電池の実現可能性を世界に先駆けて示し、近い将来、社会的に大きなインパクトを与える見通しを得た。具体的な研究成果は以下の通りである。

(i) 高容量マグネシウムイオン二次電池用正極の開発

マグネシウムイオン二次電池を実用化するためには、負極で可逆的に溶解・析出することに加えて、高容量かつ安定に作動する正極材料の開発が必須である。従来の正極材料であるシュブレル化合物 Mo_6S_8 (90mAh/g) に代わり、より高い容量を持つ二酸化マンガナノシート (300mAh/g)、有機系キノン誘導体 (200mAh/g)、オリビン型構造の MgFeSiO_4 (330 mAh/g) を開発した。特に、 MgFeSiO_4 は高い容量を持つと同時に、Si-O 結合によって結晶構造が安定化されたポリアニオン骨格を有しているためマグネシウムイオンの高い拡散係数と高いサイクル特性を示した。

(ii) 高容量マグネシウムイオン二次電池用の電解質の開発

化学的に活性の高い有機マグネシウム化合物を使用することなく、負極上でマグネシウ

ム金属を室温で析出溶解させることが可能な臭化マグネシウム/エーテル、 $\text{Mg}(\text{TFSI})_2$ /トリグリム(Triglyme)などの種々の電解質を見出した。高沸点のトリグリムを用いることにより、既存のテトラヒドロフラン系電解液よりも熱的安定性、耐酸化性が向上した。

(iii) 高エネルギー密度マグネシウムイオン二次電池の開発

上記の正極材料と電解質を用いてマグネシウムイオン二次電池を試作し、リチウムイオン二次電池の限界値 200Wh/kg を超えるエネルギー密度 300Wh/kg を達成した。

(Sci. Rep., 4, Article number:5622(2014)、プレス発表 <http://www.jst.go.jp/pr/announcement/20140711/>)。

試作したマグネシウムイオン二次電池は、既存のものとは比べて理論エネルギー密度が約7倍である。さらに、地殻埋蔵量の多い構成元素のみ使用している、化学的に不安定なグリニャール試薬や腐食性のハロゲンイオンを用いていない、など低コスト化と高安全化が容易であるという実用化する上で重要な利点を持っている。

今後、反応機構解析、構造制御などの基礎的な学理に基づきマグネシウムイオン二次電池の各構成材料の最適化をはかることで、次世代二次電池の開発が加速し、実用化への道筋が開けると期待される。現在、本研究課題は、NEDO 革新型蓄電池先端科学基礎研究事業(RISING 事業)において電極材料、電解質材料の更なる高性能化がはかられており、実用化に向けた研究開発が推進されている。本研究成果は、経済産業省のロードマップが示すエネルギー密度の目標値 500Wh/g (2030 年)の実現に向けて大きく道を開いた。

②エネルギー・電力貯蔵技術

辰巳砂チーム(研究期間：2010 年 10 月～2013 年 9 月)

全固体リチウム電池は、大型の電池を構築する上で重要となる電池の安全性、信頼性を飛躍的に向上させることができ、画期的な高性能化を図ることが期待できる。さらに電池パック内で電極/電解質を積層するだけで容易に電池電圧を高めることが可能であり、より一層の高エネルギー密度化と大幅なコストダウンの可能性がある。本研究チームは、固体電解質として現在最も有望なガラス系硫化物材料を用いて、高出力と高エネルギー密度を兼ね備えた全固体リチウム二次電池の実現を目指し、電極/電解質界面の構造と反応の解明、良好な電極/電解質固体界面を創るプロセスの開発を行い、さらに、全固体リチウム二次電池のプロトタイプの作製を目指した。本研究課題の実施によって、充放電に伴うリチウムデンドライト生成の抑制、充放電に伴う容量の低下といった技術課題を克服し、全固体リチウム-硫黄固体電池の研究開発上の重要な知見を蓄積した。具体的な研究成果は以下の通りである。

(i) リチウム金属負極/固体電解質界面の評価

金属リチウムと固体電解質との界面にリチウム薄膜を真空蒸着したところ、リチウムの析出・溶解反応が繰り返し起こることを見出した。リチウム薄膜が電解質表面の空隙等を埋めることによって、金属リチウムと固体電解質との密着性が向上したためである。金属薄

膜層を備えた固体電解質の先行例がなかったため特許出願を行った(特願 2012-067715)。充放電に伴うリチウムデンドライト生成を抑制するための有用な技術として、全固体リチウム金属電池の実現に寄与すると考えている。

(ii) 硫黄系アモルファス電極活物質の開発と全固体電池の高容量化

硫黄活物質を固体電解質およびアセチレンブラックとボールミルを用いて複合化した。得られた硫黄電極複合体を用いて全固体リチウム-硫黄電池を作製したところ、室温下で 200 回の充放電を繰り返しても 1000 mAh /g 以上の高容量を保持できることがわかった。従来の有機電解液を用いたリチウム-硫黄電池では、充放電に伴う容量の低下が大きなデメリットであったが、全固体電池では本質的に優れたサイクル特性が得られることを実証した(ELECTR ACT, vol. 56, pp. 6055-5059 (2011))。

(iii) TEM(透過型電子顕微鏡)を用いた電極/固体電解質界面の構造解析

電極活物質として、正極活物質である硫黄や Li_2S と硫化物電解質との界面の構造を高分解能 TEM、EDX(エネルギー分散型 X 線分光法)、電子線回折を駆使して評価した。硫化物電解質などの嫌気性サンプルを大気暴露せずに TEM 観察するための環境を整えた。充放電後の電極層の高分解 TEM 観察が電極層の構造および充放電反応メカニズムを評価するための有用な手法になりうることを明らかにした。

本研究課題は、2013 年 9 月末に本研究領域を早期終了し、JST 先端的低炭素化技術開発(ALCA)特別重点技術領域「次世代蓄電池」プロジェクトに移行した。JST-ALCA で研究代表者は本研究領域の研究成果をもとに、応用寄りの研究に軸足を移しながら、実用化に向けて技術課題を克服すると同時に、さらに有望な活物質・電解質の探索や、活物質/電解質界面の電荷移動メカニズム解明などの基礎基盤研究を継続している。

②エネルギー・電力貯蔵技術

宮山チーム(研究期間：2009 年 10 月～2015 年 3 月)

車載用大型二次電池、家屋内用の蓄電池として使用されているリチウムイオン電池は、リチウムイオンを含む高活性電極や有機電解液を構成素材としているため、発火や爆発などの危険が伴っている。このため、安全性に配慮した蓄電デバイスの開発が不可欠である。本研究チームは、プロトンの表面吸着・反応を有効に利用できる電極活物質を開発し、発火・爆発性のない安全性と、水溶液電解液を用いる低環境負荷性とを有する新たな機構のプロトン型電気化学キャパシタの実現を目指した。本研究課題の実施によって、世界トップレベルの容量を有する電極を開発した。さらに、候補となる電極材料の中から最適な組み合わせを選定したうえでキャパシタを試作した結果、重量エネルギー密度は従来のキャパシタ特性を大きく上回ることを確認した。具体的な研究成果は以下の通りである。

(i) 酸化物系電極の開発

MnO_2 や $\text{H}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ などの層状構造酸化物について、層剥離による単原子層シート

の合成法、およびシート自己再積層粒子や電気泳動薄膜の形成など 3 次元構造化技術を確立した。シート積層体は大きな比表面積と空隙堆積を持つ多孔体であり、高速なプロトン反応が生じた。電極特性では、 MnO_2 電気泳動極薄膜で 370 mAh/g 、 $\text{H}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ シート再積層体で約 200 mAh/g の容量を確認した。新たに開発された高分解能 X 線検出システム (TES) により、三元系酸化物ではすべての金属イオンが酸化還元に関わり、Mn イオンは +2 ~ +4 価の間で反応することを見出した。

(ii) カーボン系電極の開発

グラフェン、多孔カーボンなどの高比表面積カーボン材料の量産化プロセス、単原子層シートの再積層化プロセス、大容量電極の開発に成功した。まず、大きな電気二重層 (EDLC) 容量が期待されるグラフェンのナノ構造制御法および高効率剥離が可能な量産化プロセスを開発した。次に、グラフェン表面にプロトン活性を有するポリアニリンを担持して 3 次元交互再積層体を作製し、 641 F/g (142 mAh/g) の世界最高の容量を得た。

(iii) キャパシタの設計と試作

三元系酸化物正極、ポリアントラキノ系負極、塩基性電解液を用いて試作したキャパシタは、蓄電エネルギー密度 (両電極重量基準) 41 Wh/kg を示した。この特性は従来のキャパシタ特性を大きく上回るものである。(プレス発表 <http://www.tohoku.ac.jp/japanese/2014/01/press20140108-01.html>)。

グラフェンの量産化技術については、本研究領域の研究期間中に JST の A-STEP 事業「革新的炭素材料グラフェンの量産化プロセス開発」に発展し、2012 年事業終了後、共同研究企業との実用化研究開発に進展した。本研究領域終了後も、酸化物シート電極での優れた耐屈曲特性の発見や無機シート電解質を用いた全固体型素子の作製の成功など、実用化に向けた研究開発が推進されている。キャパシタはエネルギー密度においてリチウムイオン電池には及ばないものの、本研究課題で開発された安全・安価でメタルフリーのプロトン型大容量キャパシタは、大容量と高出力の両立が必要となる産業用バックアップ電源システムや、シート形状を活かした薄膜型キャパシタなどへ実用化展開されると期待される。

③省エネ・高効率利用技術一次世代半導体インバーター

橋詰チーム (研究期間 : 2009 年 10 月 ~ 2015 年 3 月)

電気エネルギーの変換・制御を担う Si パワートランジスタを、エネルギー変換効率のより高い窒化ガリウム (GaN) パワートランジスタに置き換えることができれば、 CO_2 排出量を大幅に削減できると期待されている。本研究チームは、GaN パワートランジスタの高性能化・高信頼化を目指し、接合物性評価・プロセス開発・デバイス構造の提案と試作・インバータ回路試作といった基礎と応用の一体的な研究開発を行った。本研究課題の実施によって、異種接合界面の評価、MMC (Multi-Mesa-Channel) 構造の GaN-HEMT (High Electron Mobility Transistor) の開発、GaN-HEMT を実装した DC/AC インバータ回路開発を実施し、GaN トランジスタの高性能化・高信頼化とインバータ展開に関して重要な成果を生み出した。具体

的な研究成果は以下の通りである。

(i) 異種接合の界面制御

厳密数値計算法と光支援容量-電圧(C-V)法とを併用して、AlGaIn/GaN 構造に形成した絶縁膜界面の電子準位密度分布を初めて同定することができた。この研究成果の論文「Jpn. J. Appl. Phys. 50, 021001 (2011)」は同雑誌の 2012 年度の被引用数 Top10 に入るほどの注目を集め、さらに Web of Science において高被引用論文に指定された。また、これら絶縁膜界面の評価・制御に関する研究成果は、応用物理学会誌に解説論文として公表している(応用物理、81 巻、6 号、479-484 (2012))。さらに、転位密度の低い GaN 自立基板上に試作したデバイスでは、理想値に近いショットキー接合電流-電圧特性、AlGaIn/GaN 界面の 2 次元電子層移動度の向上が認められた。

(ii) MMC 構造の GaN-HEMT の優れた電流安定性

プレーナ型 HEMT では、ドレイン・アクセス領域の抵抗などに起因して電流が低下するのに対して、試作した MMC 構造の HEMT は優れた電流安定性を示した。さらに、ナノチャネルの高インピーダンス性がアクセス領域の影響を低減する効果を引き出し、電流安定性に寄与していることを明らかにした。この研究成果は「IEEE Trans. Electron Devices, 60, 2997-3004 (2013)」で招待論文として公表され、その後、MIT・コロンビア大学・中国科学院・韓国慶北大学などから相次いで類似の発表があるなど、世界から注目を集めている。

(iii) GaN-HEMT の作製とインバータへの実装

GaN-HEMT を実装した 13.56MHz 駆動のインバータ回路を設計・製作し、GaN 素子の特長である高周波駆動を実現した(Conference Record of IECON 2014, Dallas (2014))。さらに、アンペア級の電流駆動可能なプレーナ HEMT とショットキー型ダイオードを同一基板に作製し、良好な電流-電圧特性を得た。この素子をパッケージングしてインバータ回路への実装を可能にした。

本研究チームは、研究開始当初、4.5 年間の研究実施を予定していたが、主に「GaN 基板上への HEMT 構造成長」「電流コラプスを制御した MMC-HEMT の実現」の研究に注力するために、課題中間評価の結果を受けて研究期間を 5.5 年に変更した。研究代表者は、本研究領域の最終年度に、内閣府の戦略的イノベーション推進事業(SIP)「次世代パワーエレクトロニクス」事業に採択された。本研究成果をいち早く実用化するために、省エネルギーに貢献する GaN パワートランジスタに関する技術をさらに高度化することが望まれる。

③省エネ・高効率利用技術一次世代半導体インバーター

山崎チーム(研究期間：2010 年 10 月～2016 年 3 月)

本研究チームは、SiC・GaN に続く新材料であるダイヤモンド半導体を用いた次世代超低損失パワーデバイスの基盤構築を目的とし、ダイヤモンド半導体に固有の性質を活かした

新しい構造の高性能パワーデバイスの研究開発を行った。本研究課題の実施によって、特異な性質を持つダイヤモンド薄膜を利用した各種デバイス構造を提案し、世界初となるダイヤモンド半導体のトランジスタ動作を実証した。具体的な研究成果は以下の通りである。

(i) ダイヤモンド半導体の物性の明確化

ダイヤモンド半導体は、小さな誘電率、強い原子間結合力、高い絶縁耐圧と熱伝導率、負性電子親和力などの物性に起因した、既存の半導体にはない特異な性質を示すことを明確化した。まず、ダイヤモンド半導体では、再結合中心を介して電子・正孔再結合が生じるのではなく、小さな誘電率 5.7 に起因して励起子を介して再結合が生じるメカニズムを提案した。また、炭素原子間の結合力が強いために 10^{22}cm^{-3} 程度までの不純物ドーピングが可能であることを示し、デバイス開発で必要とされる低抵抗化を実現した。約 10^{19}cm^{-3} 以上の不純物濃度になると通常のバンド伝導からホッピング伝導と呼ばれるダイヤモンド半導体に特有な伝導メカニズムに変化する。このホッピング伝導の温度・不純物濃度依存性を調べた結果、バリアブルレンジホッピングと最近接ホッピングの 2 種類が存在することを示した(応用物理第 83 巻第 11 号 pp912-916、2014、総説)。さらに、以上の特異な性質を利用して、磁気センサー、深紫外線レーザダイオード、熱電子発電素子などパワーデバイス以外の新しい用途にダイヤモンド半導体を利用できる可能性を提案した。以上の研究成果は、研究成果最適展開支援プログラム A-STEP のダイヤモンド成膜装置や熱電子発電素子の開発に展開され、基盤技術として活用されている。

(ii) ダイヤモンド半導体を利用した各種デバイスの開発

ダイヤモンド半導体の持つ高い絶縁耐圧と高い熱伝導率という優位性を活かすことを目的に、各種ダイヤモンド半導体デバイスを試作した。世界に先駆け、接合型トランジスタ、バイポーラトランジスタの動作実証を行った。(プレス発表 <http://www.jst.go.jp/pr/announce/20120823/>、[jst.go.jp/pr/ announce/20110902-2/](http://www.jst.go.jp/pr/announce/20110902-2/))。

(iii) シリコン上ダイヤモンド基板の開発

ダイヤモンド半導体の実用化のためには、デバイス機能の実証とともに基板開発も重要である。本研究領域の研究と平行して、大面積化と低コスト化を目指し、高価な単結晶ダイヤモンドを必要としないシリコン上ダイヤモンド基板の開発を民間企業と共同で開始し成果が出つつある(JSAP, APEX Vol 8, Number 10)。

ダイヤモンドは、絶縁耐圧・熱伝導率などを考慮した電力性能指数としては既存の半導体を上回る値を持っており、高パワー密度・小型化・軽量化において大きなポテンシャルを持っている。この大きなポテンシャルを活かすべく、本研究分野は、内閣府 SIP「次世代パワーエレクトロニクス」(FS)でダイヤモンド基板の開発が開始されるなど、より大きなコミュニティへと発展しつつある。実用化に向けた今後の課題は、ソースとドレインをそれぞれ基板表面と基板裏面に配置した縦型デバイスの実現、大電流動作の検証、基板サイズ大型化と低コスト化である。今後、多くの企業へ本研究成果を発信して研究開発を加速させ上記課題を解決することで、実用化に向けた道筋を明確にすることを期待している。

③省エネ・高効率利用技術－熱電変換素子－

河本チーム(研究期間：2008年10月～2014年3月)

未利用エネルギーである廃熱を直接電気に変換することによりエネルギー利用効率を飛躍的に高め、化石燃料への依存度の低減、CO₂の排出削減に貢献することが求められている。本研究チームは、廃熱エネルギーを有効に利用することができ、資源豊富で安価・無害・無毒な新しい高効率熱電変換材料の開発、熱電モジュール・システムの設計・開発を行った。本研究課題の実施によって、鉛・ビスマス・テルルなどの希少金属ではなく無害で資源豊富で安価な材料のみから構成され、同時に、より高い熱電変換効率を有する新規の熱電変換材料を開発した。具体的な研究成果は以下の通りである。

(i) 高効率熱電変換材料の開発

低温・中温・高温の温度域に分けて高効率材料の開発を試みた。低温～中温域用としては、ビスマス・テルルを代替することができる新材料からなる TiS₂/有機分子ハイブリッド超格子材料を世界に発信した (ZT=0.21@300K～0.28@373K)。ビスマス・テルル系に比べると無次元性能指数(ZT)は低いものの、無毒で資源豊富で安価な元素からなる材料であり、軽くてフレキシブルであるという利点がある。近年開発が進んでいる p 型有機熱電変換材料と組み合わせれば、新概念のデバイス・モジュールに応用展開できる可能性がある(NAT. MATER. 14, 622-627(2015))。中温域用の材料開発では、600℃・空気中でも耐酸化性に優れ、太陽熱応用の温度域である 200℃～600℃で良好な熱電性能を有する n 型 Mn₃Si₄Al₂ を新規に開発した。また、p 型の MnSi_{1.75} と組み合わせたモジュールを作製し、最高で 3.2kW/m² の出力密度を達成した(J. Appl. Phys., 112, 073713(2012))。さらに、高温域用材料の開発では、資源量豊富で毒性が低い環境低負荷型半導体シリサイドとして位置づけられる Ba₈Al_xSi_{46-x} クラスレートを合成し、その熱電特性の詳細を明らかにした。この系では世界最高値となる熱電性能 ZT=0.4(@900K)を達成し、さらに、空気中での熱的安定性と耐酸化性が極めて優れていることを実証した(J. Mater. Sci., 48(2013)2846-2854)。

(ii) 熱電変換システムの開発

太陽熱利用熱電変換システムの開発を目指して、熱電変換システムに熱流体を流す際の熱伝達の向上、水レンズアレイの提案とそれによる太陽熱の効率的な集熱のためのシステム設計と実証試験等を行い、将来に向けて数多くの知見を得た。さらに、室温から 50℃程度の温度域で作動する太陽光・熱エネルギー同時変換システムを考案し、ハイブリッド太陽電池の有用性と新材料開発の必要性を明らかにした(Energy Enviro.Sci. 4, 3676-3679(2011))。

本研究チームが開発した新規の熱電変換材料は、希少金属を含まず無害・資源豊富・安価な材料のみから構成され、しかも、より高い熱電変換効率を実現できるポテンシャルを有している。本研究領域終了後、本研究課題は、NEDO「未利用熱エネルギー革新的活用技術研究開発」で産業技術総合研究所との共同研究が開始されるなど、実用化に向けた研究開発が推進されている。今後、変換効率を大幅に向上させるブレークスルーが生まれれば、

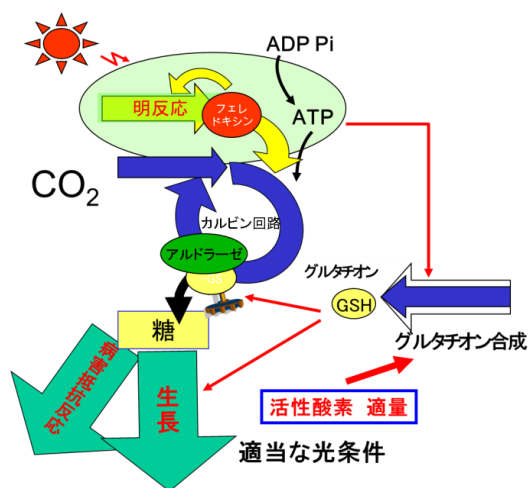
エネルギーハーベストなどの用途で実用化、普及が一挙に広がると期待される。

(2) 研究領域全体として見たときの特筆すべき研究成果

技術バランスのとれたポートフォリオを重視するという観点から「①エネルギー供給技術」「②エネルギー・電力貯蔵技術」「③省エネ・高効率利用技術」の各々において特筆すべき研究成果を取り上げる。いずれの研究成果においても、「どのような分野でどの程度の実用化と普及がなされれば、世界全体としてどのくらいの量のCO₂削減が期待できるのか」、常にシナリオを描きながら研究開発を進めていくことが重要である。現時点ではその可能性を追求するという考え方を持って研究を行い、将来、本当に実用になるかどうかを、そのときどきの社会の状況を含めて、厳密にチェックしながら検証する必要がある。

①エネルギー供給技術(小川チーム、田中チーム)

小川チームは、グルタチオン施用によって各種陸上植物のバイオマス生産性が 10%から 40%増大することを国内外のフィールド実験で実証した(図 2)。この実証試験の結果をもとにした研究成果の実用化展開がすでに始まっている。グルタチオンの農業利用に向けたサトウキビ実証試験について、農林水産省技術会議の実施する「攻めの農業」プロジェクトで、JIRCAS とともに実証試験が開始された。また、株式会社カネカは 2015 年春までを目標に、本研究チームが開発したグルタチオンを「カネカ ペプチド」として業務用に生産・販売を開始すると発表した。今後、本分野に参入する研究者・開発者、実施事業者が拡大し、世界規模で実用化が加速すれば、CO₂削減効果は極めて大きくなる。



(a) 光合成固定促進のメカニズム

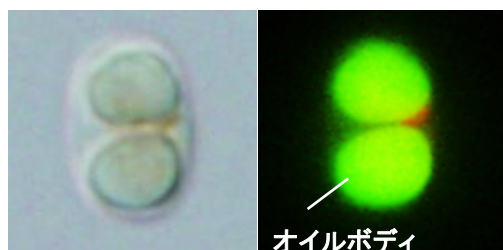


(b) グルタチオン施用によるバイオマス増産効果

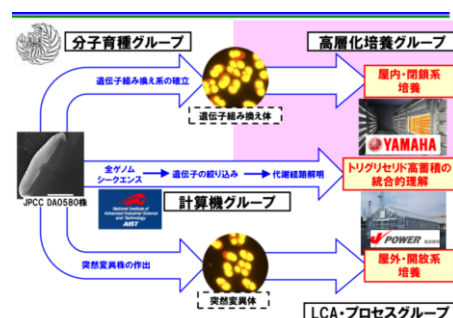
図 2 小川チームの研究成果

田中チームは、遺伝子組み換え技術を活用してオイルの生産性と蓄積速度を向上させたソラリス株の変異株を作出し、変異株を用いた太陽光環境下の屋外培養で BDF 生産性 20 t/ha/年、EPR 1を上回る見通しを得た(図 3)。一方で、他研究機関の試算では、藻類バイオマスの生産性が数百 t/ha/年などとやや過大に評価される傾向が見られる。田中チームが

提示した BDF 生産性は、この数百 t/ha/年と比べて低く、EPR はかろうじて 1.0 上回る程度であるため、液体燃料の生産を目的とする本研究課題としては厳しい値であると思われた。しかし、現状の藻類バイオマスの能力を正確に把握し、本研究分野の立ち位置を明確にした本研究成果は、国内外の藻類バイオマス研究者にとっても、実用化へのシナリオを描く上で過大で曖昧な期待値を含まない有益な情報である。本研究チームは 2030 年頃以降の実用化を目指して必要となる基盤技術を構築した。



(a) 海洋珪藻 *Fistulifera solaris* (ソラリス株)

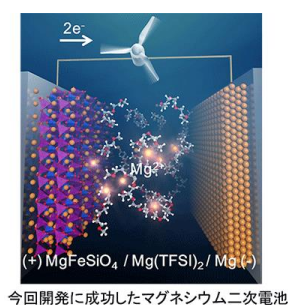


(b) 研究チームのスキーム

図 3 田中チームの研究成果

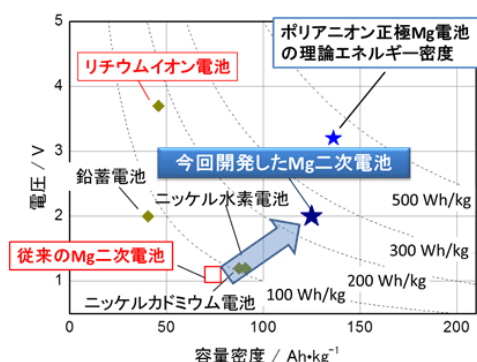
②エネルギー・電力貯蔵技術(内本チーム)

内本チームは、開発した正極材料と電解質を用いてマグネシウムイオン二次電池を試作し、従来のリチウムイオン二次電池の限界値 200Wh/kg を超えるエネルギー密度 300Wh/kg を達成した(図 4)。試作したマグネシウムイオン二次電池は、高いエネルギー密度に加えて、低コスト化と高安全化が容易であるという実用化する上で重要な利点を持っている。本研究成果は、経済産業省のロードマップが示すエネルギー密度の目標値 500Wh/kg (2030 年)の実現に向けて大きく道を開いたと評価している。マグネシウムイオン二次電池は、主に電力貯蔵用、自動車用へ展開されると見ている。



今回開発に成功したマグネシウム二次電池

(a) 試作した二次電池



(b) 二次電池の容量密度と電圧の関係

図 4 内本チームの研究成果

③省エネ・高効率利用技術(橋詰チーム、山崎チーム)

橋詰チームは、新たに提案した MMC 型 GaN トランジスタ(図 5)が、従来構造と比較して、優れた電流安定性、ゲート制御性を持つことを確認した。また、低コスト Si 基板上の GaN トランジスタの性能限界を、結晶の欠陥・転位・ひずみとデバイス特性・製造歩留りとの相関関係を明らかにすることによって詳細に把握した。もし、低コスト Si 基板上で所望のデバイス特性・信頼性・歩留りが得られる目途が立てば、GaN パワーデバイスの実用化が一気に拡大すると予想している。5 年～10 年後に主に低耐圧品の GaN-HEMT が IT 電源・車載用に実用化展開されると見ている。

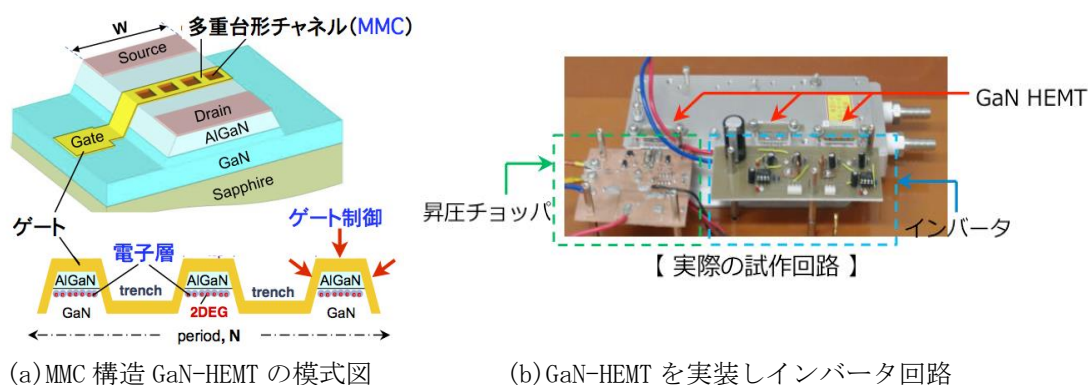


図 5 橋詰チームの研究成果

山崎チームは、ダイヤモンド半導体を持つ特異な物性を明確化した上で、ダイヤモンド半導体としては世界で初めて、電力増幅が可能なバイポーラトランジスタ(電力増幅～利得 10)、オン・オフ動作が可能な接合型電界効果トランジスタ(7 桁の高い電流オン・オフ比)の製作に成功した(図 6)。トランジスタ構造でのデバイス動作が検証されたことで、新たな半導体物理として基礎科学分野を切り開くとともに、ダイヤモンド半導体を用いた省エネルギー・低損失パワートランジスタの開発への道を大きく開いた。今後は、基板低コスト化、縦型デバイス構造による大電流化が課題である。解決の目処が立てば、2030 年頃からの実用化開始に向けた具体的なシナリオを描くことが可能になると期待している。

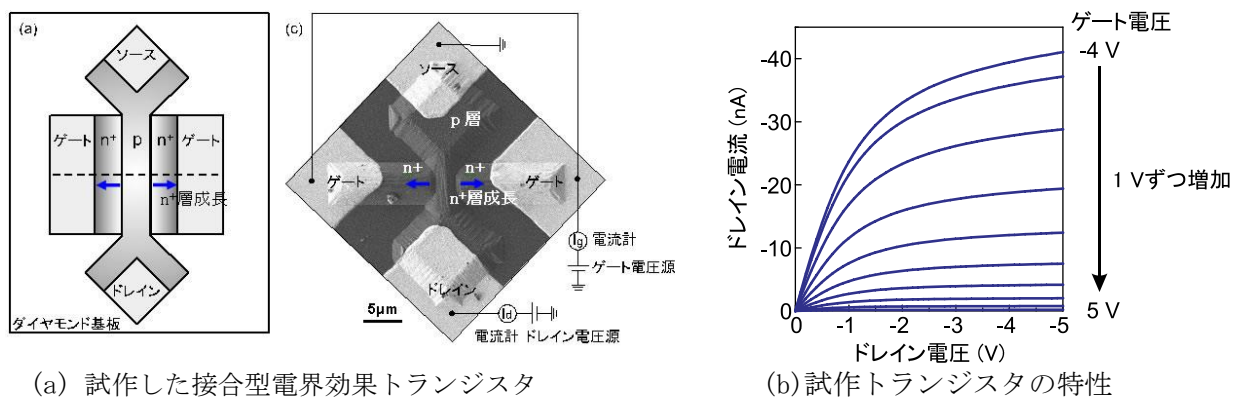


図 6 山崎チームの研究成果

(3) 研究課題早期終了のマネジメント

当初 5.5 年を予定していた富重チームの研究課題は、2011 年度から「内閣府の最先端次世代プログラム」で発展継続させることとなったため、2010 年度末で研究を終了することになった。研究期間後半に予定されていた開発触媒の長寿命化・製造コスト低減等、実用化検証に向けた研究開発が中断されたことは悔やまれる。ここで開発された触媒の高機能化・機能解析・高性能化等の基盤技術はバイオマス利用技術においてキーとなる要素技術であるため、今後の実用化検証において有効に活用していただくよう研究代表者をお願いした。

当初 5.5 年を予定していた渡邊チームの研究課題は、2012 年度から開始される「つくば国際戦略総合特区－藻類バイオマスエネルギーの実用化」の研究で発展継続されることとなったため、2011 年度末で終了することとなった。本研究チームのオリジナル技術であるボトリオコッカス耐アルカリ性株が持つ高いポテンシャルを最大限に引き出すこと、さらに、その際のエネルギーバランスの定量的な解析などにより今後の研究を発展していただくよう研究代表者をお願いした。

当初 5.5 年を予定していた辰巳砂チームの研究課題は、JST-ALCA 次世代蓄電池プログラムに移行するにともない、2013 年 9 月末に早期終了した。JST-ALCA で辰巳砂教授は、本研究課題の研究成果をもとに、応用寄りの研究に軸足を移しながら、実用化に向けて技術課題を克服すると同時に、さらに有望な活物質・電解質の探索や、活物質/電解質界面の電荷移動メカニズム解明などの基盤研究を継続している。

以上のように、3 研究課題が本研究領域を早期終了することとなったため、本研究領域のポートフォリオバランスが乱れるかに思えた。しかし、3 研究課題が抜けた穴を埋めてポートフォリオバランスを維持すべく、他の研究チームが活躍した。富重チームの触媒研究については、領域アドバイザーの協力を得て、研究総括が中心となって周辺状況の情報を獲得し、長期ビジョンを作成する過程で本研究課題の最終的な成果を評価することによって、その抜けた穴の一部を補完したと考えている。

藻類バイオマスを研究対象とする田中チームと近藤チームは、珪藻 (JPCC-DA0580 株) への遺伝子導入技術の確立、培養実験を元にしたバイオマス生産性とライフサイクルアセスメント (LCA) 評価、さらに、システムバイオロジー解析と代謝モデリングにおいて、十分な研究成果を上げた。これら研究成果が、渡邊チームが本研究領域を早期終了したことによる影響を十分に補完したと考えている。

内本チームは、辰巳砂チームが研究対象とする全固体リチウムイオン電池の容量を上回るマグネシウムイオン電池の基盤技術の構築でめざましい成果を上げている。同時に、全固体リチウムイオン電池について主に電極/固体電解質界面の安定化と低抵抗に関する基礎的知見を着実に蓄積し、辰巳砂チームが抜けた穴の一部を補完した。

8. 総合所見

(1) 研究領域としての成果

「3. 研究総括のねらいー(2)研究課題の推進」でも述べた通り、本研究領域は、全く異なった CO₂ 抑制手法を分野横断的に見渡し、それぞれの分野について既存の抑制技術の 2 倍程度の効率を有する革新的技術の開発を目指すことによって、今後注力すべき分野を特定し総合的な CO₂ 削減戦略の立案に対して参照例となることを目指した。すなわち、一言で言えば、将来技術のポートフォリオを造ることを目指した。それぞれの研究課題の目標設定に対する最終到達状況を短く記述する。

①エネルギー供給技術

- ・バイオマス生産では陸上植物と藻類を検討した。

小島チーム：オイルパームを熱帯泥炭湿地に植林すると地下に蓄積された炭素源が酸化されて温室効果ガスが放出されるため、熱帯泥炭湿地の商品的価値を高めることが有効である。しかし、市場の形成など社会システムの変革が不可欠である。

小川チーム：陸上植物にグルタチオンをある時期に付与することで、植物の光合成効率が向上することが確実となった。今後、地球による二酸化炭素の吸収能力を高めることが重要な戦略となるが、その際、この技術は極めて有効性が高い。グルタチオンの商品化も行われた。

富重チーム：バイオマスを液体燃料などへ変換する高効率で小規模なプロセスの確立を目指した。実用性を高める研究については、ほぼ未着手のまま残して、本研究領域の研究を早期終了した。

渡邊チーム：軽質油とほぼ同じオイル成分を大量に産生する緑藻ボトリオコッカスの培養基盤技術、試験・デモプラントによる工業化技術などの開発を行った。本研究領域の領域アドバイザーから、実用化の可能性を主張できる実験データの蓄積が望まれるとの指摘があった。本研究領域の研究を早期終了した。

近藤チーム：海水環境でのスピルリナの高密度培養と高効率エタノール生産を目指した。本研究領域と並行して NEDO プロジェクトにも採択された。しかし、実用化には、遺伝子導入技術による高効率化が必須である。

田中チーム：全ゲノム情報を解読し、遺伝子組み換え技術を活用してオイル生産性の高い変異株を開発した。バイオディーゼルの生産性が 12.5t/ha/年とパームオイルを上回る可能性を示した。エネルギー収支比 (EPR) も 1 を超える見通しを得た。

- ・太陽電池は、軽量・安価で曲面にも設置可能な有機薄膜系を検討した。

吉川チーム：低分子ハイブリッドセルで 11.7%の効率を達成し、本研究領域の目標値を突破した。しかし、同様の特性を有するペロブスカイト型太陽電池が 2009 年に発明され、2015 年には 19%という驚異の高効率の達成が発表された。従来の有機薄膜系太陽電池は根本からの見直しが不可避な情勢となった。

- ・燃料電池関連では、エチレングリコールなどの有機物質を液体燃料として繰り返し利用することを可能にする選択触媒とアルカリ型燃料電池を取り上げた。

山内チーム：新規触媒の開発を手段として、エネルギーの蓄積と放出を、通常の有機物の可逆的な酸化還元で行うシステムの検討を行い、原理的には、可能性があることが明らかになった。今後、実証した CN サイクルのさらなる反応効率改善、あるいは、高効率な新たな CN サイクルの発掘が不可欠である。

山口チーム：触媒に白金を必要としないアルカリ型燃料電池に適した OH⁻イオン伝導膜を開発し、アルカリ型燃料電池の試作、動作検証に成功した。研究開始当初の通常の水素燃料電池では大量の白金触媒を必要としたが、その後かなりの改善とリサイクルが考慮されるようになったため、白金触媒の低減を目指すアルカリ型燃料電池の実用化を目指す際には、既存の水素燃料電池に対する優位性を見極める必要がある。

②エネルギー・電力貯蔵技術

- ・電力貯蔵技術は、電池、キャパシタについて検討した。

内本チーム：全く新規な系のマグネシウムイオン二次電池を開発し、リチウム電池の限界値の 1.5 倍である 300Wh/kg を達成した。二価であるマグネシウムイオンの拡散速度が低いため、最大出力に本質的な限界があると思われる。この二次電池の活用には、特性の異なる複数の電池を最適に組み合わせた電池系を作成し、その総合性能を格段と向上させるという将来イメージが得られた。本研究成果は、NEDO の RISING 事業に引き継がれた。

辰巳砂チーム：全固体化リチウム電池を検討した。最大の開発ターゲットである固体電解質として硫化物ガラスが選択された。全固体電池としては優れたサイクル特性を得ることができ、実用上のより大きな展開を目指し、ALCA の枠組みに発展的に移籍した。

宮山チーム：プロトン型の電気化学キャパシタの開発を目指した。マンガン化合物やグラフェンなどの微細平板構造の物質の高いポテンシャルを検証した。グラフェンの量産技術については、A-STEP 事業に展開された。

③省エネ・高効率利用技術

- ・次世代型半導体インバータのチームと高効率熱電変換のチームからなる。

橋詰チーム：MMC 型 GaN トランジスタの試作・評価によって、オフ電圧ストレス耐性の向上、ノーマリオフ動作を達成し、GaN-HEMT の作製とインバータへの実装までを実現した。SIP「次世代パワーエレクトロニクス事業」に採択された。

山崎チーム：ダイヤモンドのパワー半導体としてのポテンシャルの検証を目的とし、世界初となるダイヤモンド半導体のトランジスタ動作を実証した。パワー半導体以外への展開の可能性を検討し、磁気センサー、深紫外線レーザダイオードなどへの応用の可能性を示した。ダイヤモンド基板の低コスト化を目指しシリコン上ダイヤモンド基板などを開発した。研究成果の一部が A-STEP、SIP に進展している。

河本チーム：資源的に有限、かつ有害である元素を使わない熱電変換素子の実現を目指した。TiS₂/有機分子ハイブリッド超格子材料、n 型 Mn₃Si₄Al₂ と p 型の MnSi_{1.75} との組み

合わせなどを開発した。本研究領域終了後、NEDO での「未利用熱エネルギー革新的活用技術研究開発」に採択された。

このように、①エネルギー供給技術、②エネルギー・電力貯蔵技術、③省エネ・高効率利用技術の各々において、かなり重要な進展がみられた。2030 年までに実用になる成果としては、次のように考えている。

まず、小川チームのグルタチオンの実用化は、ここ 1～2 年でも可能である。応用の範囲はほぼ無限に広い。次に実用化に近い研究成果は、橋詰チームの GaN インバータ素子で、自動車などに実装されると考えられる。Si インバータの置き換えによる効率向上は 10%程度に留まるが、GaN 基板が安価に提供されるようになれば、全く新しい応用例が多く見つかると思われる。

その他の研究成果の実用化は、2030 年頃になるとと思われる。内本チームの電池が大容量専用電池としての商品化が期待できる。藻類生産オイルの生産コストはやはり高いため、ここ 2～3 年の動向を見ると、当面のターゲットはバイオジェット燃料に限定されると考えられる。バイオジェット燃料が本格的に実用化されるのは、2040 年頃になると予測している。小島チームの研究課題は環境政策上で重要であったが、タイ試験地での気象状況などの影響を受けたため完成度がやや低い。パリ協定が終了する 2030 年以前に、もう一度、同様の研究が遂行されることを期待したい。

他の分野では、多くの研究チームが次のステージの研究プロジェクトとして採択されたので、社会情勢の動向を含めて、今後の展開を注視する段階にあるものと考えている。

(2) 研究領域のマネジメント

本研究領域の各研究課題がほぼ計画通り進展したことは、高い見識と能力を有する領域アドバイザーによる適切なアドバイスによるところが大きい。研究課題の採択を始めサイトビジット・領域会議・中間評価会などで領域アドバイザーから研究代表者へ与えられるアドバイス、あるいは、領域アドバイザーから研究総括へ与えられる進言が、各研究課題と研究領域の順調な進展に大きく貢献したと考える。

「3. 研究総括のねらいー(1)(2)(3)a)」で述べた通り、本研究領域は各研究課題が最終的に社会にどのような形で具現化されるか具体的にイメージできることを重視していたが、一方で、性急に実用化を求めるあまり基礎的な学術基盤が疎かにならないよう、サイトビジットなどの機会を利用して研究代表者に指導してきた。実用化され広く利用される革新的技術を開発するためには、確固とした基礎基盤技術を確立することが不可欠と考えたからである。

同時に、本研究領域に参画した研究者が、広い視点から環境エネルギーイノベーションを実現できるように成長することをかなり意識したマネジメントを行った。領域開始当初はお互いの言葉が通じ合わなかった研究者が成長しコミュニケーションをとれるようになった。異分野融合、新しい学問分野の創成にも好影響を与え、お互いに交流することが実現できた。各領域アドバイザー自身もさまざまな専門分野を持つ研究者から影響を受け、それが、研究者へのよいフィードバックを与えたものと思われる。単一の大きな目的を掲

げ、その実現のために多くの研究者がベクトルを揃えて取り組むといった研究チームの有用性が示せたものとする。この研究領域の設立を決定した JST の各位に敬意を表したい。

もう一つ重要なことが、本研究領域に参加した研究代表者の大部分が、多大なプレッシャーを感じつつではあるが、明らかに楽しみつつ研究を遂行していたことである。一方で、本研究領域から離脱していった研究チームがあったことにも、注目していただきたい。離脱した研究課題の中には、発展的に実用化研究へと進んだテーマがある一方で、研究期間中に実用化への道筋が立てられなかったために基礎研究へ戻って科学技術イノベーションへの貢献について再度計画を見直す必要があるテーマもある。いずれにしても、「2020 年から 2030 年頃に普及を開始し最終的には 2050 年の長期目標に貢献する革新技术を開発する」という本研究領域に合致したテーマ群に最終的に絞られたことも、本研究領域の 1 つの成果だったと思われる。

(3) 本研究領域を設定したことの意義

2008 年度に本研究領域が発足後、これと関連する幾つかの CREST・さきがけ研究領域が発足している。2009 年度には、主に太陽光エネルギーの直接変換を研究対象とする「太陽光を利用した独創的クリーンエネルギー生成技術の創出」研究領域が発足し、また、2010 年度には、藻類・水圏微生物を利用し、バイオエネルギー生産のための基盤技術創出を目的とした「藻類・水圏微生物の機能解明と制御によるバイオエネルギー創成のための基盤技術の創出」研究領域が発足した。さらに、2011 年度には、植物の光合成能力の増強と各種バイオマスの利活用を研究対象とする「二酸化炭素資源化を目指した植物の物質生産力強化と生産物活用のための基盤技術の創出」研究領域、エネルギー変換・輸送に関わる相界面現象の解明や高機能相界面の創成を目的とした「エネルギー高効率利用のための相界面科学」研究領域が発足した。本研究領域の発足はグリーンイノベーション研究のさきがけであったと評価され、本研究領域が設定されたことの意義は大きいと評価している。

(4) 今後への期待と展望

2020 年～2030 年頃から普及が可能な技術群を見極め、それら組み合わせを最適化し、2050 年の長期目標に向けた社会的方向性を提示することは、一部の研究について実現できた。今後は、これらを真のイノベーションに結びつけることが重要である。

パリ協定が合意され、各国が同じ方向を向いて環境エネルギーイノベーションを起こすことを目指している。ところが、イノベーションといっても、どうもそう簡単に起こせるものではないことは、周知の事実である。

本研究領域を振り返れば、地球レベルの大目標を掲げ、そこに向けた研究者をラインアップし、その後、意識合わせを行ってから研究を開始する。それと同時に、研究者相互のコミュニケーションを取る役割を果たす領域アドバイザーグループが活動を開始する。これが 8 年間で実行された方式であった。このような方式は、イノベーションの初期段階の進展に相当に有効であったように思える。

本研究領域のお陰で、個人的にも、「イノベーションをかなり高い確率で起こすことができる研究システムとは何か。その推進に資するイノベーション人材とはどのようなものか」、

などへの関心をさらに高めることができ、ある種の社会的実験を試みたいと考えている。
今後共、このような観点から、この研究領域に参加した研究者、領域アドバイザー、研究
課題などの動向に注視していきたい。