

戦略的創造研究推進事業
CREST(チーム型研究)
追跡評価用資料

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」
(2008 年度～2015 年度)

研究総括：安井 至

2022 年 3 月

目次

要旨	1
第 1 章 研究領域概要.....	2
1.1 戦略目標	2
1.2 研究領域の目的.....	3
1.3 研究総括	4
1.4 領域アドバイザー.....	4
1.5 研究課題および研究代表者.....	5
第 2 章 追跡調査	10
2.1 追跡調査について.....	10
2.1.1 調査の目的.....	10
2.1.2 調査の対象.....	10
2.1.3 調査方法	11
2.2 追跡調査概要.....	12
2.2.1 研究助成金.....	12
2.2.2 論文	17
2.2.3 特許	21
2.2.4 受賞	23
2.2.5 招待講演	24
2.2.6 報道	24
2.2.7 共同研究や企業との連携.....	24
2.2.8 実用化・製品化.....	26
2.2.9 ベンチャー.....	26
2.3 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果.....	35
2.3.1 研究領域の展開状況(展開図).....	35
2.3.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献.....	37
2.3.3 研究成果の社会・経済への貢献.....	41
2.3.4 その他の特記すべき事項(新たな展開や分野間融合).....	42
第 3 章 各研究課題の主な研究成果.....	43
3.1 2008 年度採択研究課題	43
3.1.1 低炭素社会のための s-ブロック金属電池 (内本 喜晴)	44
3.1.2 高効率熱電変換材料・システムの開発 (河本 邦仁).....	45
3.1.3 熱帯泥炭の保全と造林による木質バイオマス生産 (小島 克己).....	46
3.1.4 触媒技術を活用する木質系バイオマス間接液化 (富重 圭一).....	47
3.1.5 有機薄膜太陽電池の高効率化に関する研究 (吉川 暹).....	48

3.1.6	オイル産生緑藻類 Botryococcus (ボトリオコッカス) 高アルカリ株の高度利用技術 (渡邊 信)	49
3.2	2009 年度採択研究課題	50
3.2.1	CO ₂ 固定の新規促進機構を活用したバイオマテリアルの増産技術開発 (小川 健一)	51
3.2.2	海洋性藻類からのバイオエタノール生産技術の開発 (近藤 昭彦)	52
3.2.3	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 (田中 剛)	53
3.2.4	異種接合 GaN 横型トランジスタのインバータ展開 (橋詰 保)	54
3.2.5	プロトン型大容量電気化学キャパシタの研究 (宮山 勝)	55
3.3	2010 年度採択研究課題	56
3.3.1	固体界面を制御した全固体二次電池の創製 (辰巳砂 昌弘)	57
3.3.2	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 (山内 美穂)	58
3.3.3	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 (山口 猛央)	59
3.3.4	超低損失パワーデバイス実現のための基盤構築 (山崎 聡)	60

要旨

本資料は、戦略的創造研究推進事業のチーム型研究(CREST)の研究領域「二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出」(2008年度～2015年度)において、研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)事業及び事業運営の改善等に資するため、追跡調査を実施した内容をまとめたものである。

第1章では、本研究領域の概要を記述する。本研究領域は、未来型太陽電池等の実現を目指した技術開発や、エネルギー生産・貯蔵技術の開発(太陽電池、燃料電池)、エネルギー・電力貯蔵技術(二次電池、キャパシタ)、省エネ・高効率利用技術(半導体インバーター、高効率熱電変換技術)、バイオエネルギーの利用を目指した技術開発などにより、二酸化炭素排出抑制に繋がる有望な技術の展開を目指すものである。

第2章では、本研究領域全体の動向について、追跡調査方法とその結果について記述する。調査対象は、研究助成金、発表論文の件数、国内外への特許出願および登録状況を研究期間中、研究終了後に分けて調査した。また、上記の調査結果の他に、受賞、研究機関WEBサイト上の情報、新聞等の記事より成果を抽出し、それぞれの研究課題に対して主な科学技術への波及効果、社会・経済への波及効果の調査結果をまとめた。

第3章では、15件の採択研究課題に対して、研究期間中の成果、研究終了後の発展について記した。

第 1 章 研究領域概要

JST ホームページの領域情報等を用いて、下記項目を記載する。

1.1 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的技術の創出」

(1) 具体的な達成目標

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) 目標設定の背景および社会経済上の要請

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 年のハイリゲンドラ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とら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。

1.2 研究領域の目的

「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、我が国がハイリグendum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年～2030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。

1.3 研究総括

安井至（領域発足時：独立行政法人製品評価技術基盤機構 理事長、終了時：一般財団法人持続性推進機構 理事長、東京大学 名誉教授
現：株式会社バックキャストテクノロジー総合研究所 特別顧問）

1.4 領域アドバイザー

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出した。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1-1に領域アドバイザーを示す。

表 1-1 領域アドバイザー一覧

氏名	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～ 2016年3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～ 2016年3月
小久見 善八	京都大学・産官学連携本部	特任教授	2008年6月～ 2016年3月
桑野 幸徳	太陽光発電技術研究組合	理事長	2008年6月～ 2016年3月
小長井 誠	東京都市大学総合研究所	教授	2008年6月～ 2016年3月

氏名	所属	役職	任期
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～ 2016年3月
辰巳 敬	独立行政法人製品評価技術基盤機構	理事長	2008年6月～ 2016年3月
藤岡 祐一	福岡女子大学国際文理学部	教授	2008年6月～ 2016年3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～ 2016年3月
松村 幸彦	広島大学大学院工学研究科	教授	2008年6月～ 2016年3月
山地 憲治	公益財団法人地球環境産業技術研究機構	理事・研究所長	2008年6月～ 2016年3月
湯原 哲夫	一般財団法人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

(注)所属と役職は CREST 終了時点を記載

1.5 研究課題および研究代表者

採択年度別の各研究課題と研究代表者を表 1-2 にまとめた。

表 1-2 研究課題と研究者(第 1 期、第 2 期、第 3 期)

期(研究 期間)	研究課題	研究代表 者	採択時の所属・役職	終了時の所 属・役職	追跡調査時の所 属・役職
第 1 期 2008 年 4 月～2011 年 3 月	低炭素社会のための s-ブロック金属電池	内本 喜晴	京都大学大学院人間・ 環境学研究科 教授	同左	京都大学総合人間 学部自然科学系 教授
	高効率熱電変換材料・システムの開発	河本 邦仁	名古屋大学大学院工 学研究科 教授	同左	公益財団法人名古 屋産業科学研究所 上席研究員
	熱帯泥炭の保全と 造林による木質バ イオマス生産	小島 克己	東京大学アジア生物 資源環境研究センタ ー 教授	同左	同左
	触媒技術を活用す る木質系バイオマ ス間接液化	富重 圭一	東北大学大学院工学 研究科 准教授	東北大学大 学院工学研 究科 教授	同左
	有機薄膜太陽電池 の高効率化に関す る研究	吉川 暹	京都大学エネルギー 理工学研究所 特任 教授	同左	京都大学 名誉教 授
	オイル産生緑藻類 Botryococcus(ボ トリオコッカス) 高アルカリ株の高 度利用技術	渡邊 信	筑波大学大学院生命 環境科学研究科 教 授	同左	筑波大学藻類バイ オマス・エネルギ ーシステム開発研 究センター 特命 教授
第 2 期 2009 年 4 月～2012 年 3 月	CO ₂ 固定の新規促 進機構を活用した バイオマテリアル の増産技術開発	小川 健一	岡山県農林水産総合 センター生物科学研 究所植物レドックス 制御研究グループ グループ長	同左	岡山県農林水産総 合センター生物科 学研究所細胞工学 研究部門植物レド ックス制御研究グ ループ 部門長兼 グループ長

期(研究 期間)	研究課題	研究代表 者	採択時の所属・役職	終了時の所 属・役職	追跡調査時の所 属・役職
	海洋性藻類からの バイオエタノール 生産技術の開発	近藤 昭彦	神戸大学大学院工学 研究科 教授	同左	神戸大学大学院科 学技術イノベーション研究科 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	田中 剛	東京農工大学大学院 工学研究院 准教授	東京農工大 学工学部 教授	同左
	異種接合 GaN 横型 トランジスタのイン パータ展開	橋詰 保	北海道大学量子集積 エレクトロニクス研 究センター 教授	同左	北海道大学量子集 積エレクトロニク ス研究センター 特任教授
	プロトン型大容量 電気化学キャパシ タの研究	宮山 勝	東京大学大学院工学 系研究科 教授	同左	東京大学先端科学 技術研究センター /大学院工学系研 究科 教授
第3期 2010年4 月～2013 年3月	固体界面を制御し た全固体二次電池 の創製	辰巳砂 昌 弘	大阪府立大学大学院 工学研究科物質・化学 系専攻 教授	同左	大阪府立大学学 長・大学院工学研 究科物質・化学系 専攻応用化学分野 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	山内 美穂	北海道大学触媒科学 研究センター 准教 授	九州大学カー ボンニュ ートラル・エ ネルギー国際研究 所 准教授	九州大学カーボン ニュートラル・エ ネルギー国際研究 所 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	山口 猛央	東京工業大学資源化 学研究所 教授	同左	東京工業大学科学 技術創成研究院化 学生命科学研究所 教授
	超低損失パワーデ バイス実現のため の基盤構築	山崎 聡	産業技術総合研究所 エネルギー技術研究 部門 研究員	産業技術総 合研究所先 進パワーエ レクトロニ クス研究セ ンター 招 聘研究員	金沢大学ナノマテ リアル研究所 特 任教授

(2020年12月31日調査
2021年3月22日確認)

なお、富重は、2011年2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。渡邊は、2012年度から開始された「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年度末で早期終了した。また、辰巳砂は、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。

各研究チームの主たる共同研究者を、表1-3にまとめた。

表 1-3 各研究チームの主たる共同研究者リスト

研究代表者	主たる共同研究者
内本 喜晴	安部 武志(京都大学大学院工学研究科 教授) 邑瀬 邦明(京都大学 大学院工学研究科 教授) 陰山 洋(京都大学大学院工学研究科 教授) 福塚 友和(名古屋大学大学院工学研究科 教授)○ 栄部 比夏里(国立研究開発法人産業総合研究所(以下、産総研)電池技術研究部門 上級主任研究員) 松本 一(産総研電池技術研究部門 上級主任研究員) 竹内 友成(産総研電池技術研究部門 上級主任研究員) 小池 伸二(産総研電池技術研究部門 主任研究員) 入山 恭寿(名古屋大学工学研究科 教授)
河本 邦仁	楠 美智子(名古屋大学未来材料・システム研究所 教授) 2018 年退任 片桐 清文(広島大学大学院工学研究科 教授) 舟橋 良次(産総研ナノ材料研究部門 首席研究員) 阿武 宏明(山口東京理科大学基礎工学部 講師) 鈴木 亮輔(北海道大学工学研究院 特任教授(名誉教授)) 秋山 友宏(北海道大学工学研究院 教授)
小島 克己	井上 雅文(東京大学アジア生物資源環境研究センター 教授) 則定 真利子(東京大学アジア生物資源環境研究センター 准教授) 山ノ下 卓(東京大学アジア生物資源環境研究センター 特任講師) 足立 幸司(秋田県立大学木材高度加工研究所 准教授) 石田 朋靖(宇都宮大学 学長) 長野 敏英(宇都宮大学農学部 特任教授) 羽生 直人(宇都宮大学農学部 教授) 大澤 和敏(宇都宮大学農学部 准教授) 吉野 邦彦(筑波大学システム情報系 教授) 酒井 一人(琉球大学農学部 教授) 吉田 誠(東京農工大学農学部 教授)
富重 圭一	中川 善直(東北大学大学院工学研究科 准教授) 関根 泰(早稲田大学理工学術院先進理工学部 教授)○ 椿 範立(富山大学工学部 教授) 米山 嘉治(富山大学工学部 准教授)
吉川 暹	坂口 浩司(京都大学エネルギー理工学研究所 教授) 佐川 尚(京都大学大学院エネルギー科学研究科 教授)○ 若宮 淳志(京都大学化学研究所 教授) ○ 平本 昌宏(大学共同利用機関法人自然科学研究機構分子科学研究所 教授) 高橋 孝志(横浜薬科大学 客員教授) 梶原 康宏(横浜薬科大学 教授) 布施 新一郎(名古屋大学大学院創薬科学研究科 教授)
渡邊 信	白岩 善博(筑波大学光合成代謝制御学研究室 名誉教授) 井上 勲(筑波大学藻類バイオマス・エネルギーシステム開発研究センター 特命教授) 鈴木 石根(筑波大学光合成代謝制御学研究室 教授) 石田 健一郎(筑波大学生命環境科学研究科 教授) 中嶋 信美(国立研究開発法人国立環境研究所生物・生態系環境研究センター 室長) 末永 智一(東北大学イノベーション戦略推進センター 特任教授) 細矢 憲(京都府立大学生命環境科学研究科 教授) 藤岡 知夫(公益財団法人応用光学研究所 代表者)

研究代表者	主たる共同研究者
	堀岡 一彦(東京工業大学科学技術創成研究院 名誉教授)
小川 健一	後藤 弘爾(岡山県農林水産総合センター生物科学研究所 専門研究員) 小田 賢司(岡山県農林水産総合センター生物科学研究所 専門研究員) 西川 正信(岡山県農林水産総合センター生物科学研究所 専門研究員) 逸見 健司(岡山県農林水産総合センター生物科学研究所 専門研究員) 中西 友子(星薬科大学 学長) 田野井 慶太郎(東京大学大学院農学生命科学研究科 教授) 丸山 伸之(京都大学大学院農学研究科 教授) 二瓶 直登(福島大学食農学類 准教授) 白岩 立彦(京都大学大学院農学研究科 教授) 関 原明(理化学研究所環境資源科学研究センター チームリーダー) 中村 進一(東京農業大学生命科学部 教授) 吉松 嘉代(国立研究開発法人医薬基盤・健康・栄養研究所有種生理研究室 室長) 藤巻 秀(国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構本部 上席研究員) 河地 有木(国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所 上席研究員) 鈴井 伸郎(国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所 主幹研究員) 七夕(伊藤) 小百合(茨城大学農学部 准教授) 西村 いくこ(甲南大学学長直属 特別客員教授) 田村 謙太郎(静岡県立大学食品栄養科学部 准教授) 上田 晴子(甲南大学理工学部 准教授) 西村 幹夫(基礎生物学研究所 名誉教授) 林 誠(長浜バイオ大学バイオサイエンス学科 教授) 真野 昌二(基礎生物学研究所 准教授) 高部 圭司(京都大学大学院農学研究科 教授)2020 年退任 吉永 新(京都大学大学院農学研究科 准教授)
近藤 昭彦	蓮沼 誠久(神戸大学先端バイオ工学研究センター センター長)○ 松田 史生(大阪大学大学院情報科学研究科 教授)○ 清水 浩(大阪大学大学院情報科学研究科 教授) 古澤 力(大阪大学大学院情報科学研究科 准教授) 平沢 敬(東京工業大学生命理工学院 准教授) 川井 浩史(神戸大学内海域環境教育研究センター センター長) 三宅 親弘(神戸大学大学院農学研究科 教授) 秋本 誠志(神戸大学大学院理科学研究科 准教授)
田中 剛	松永 是(東京農工大学 名誉教授(元学長)) 吉野 知子(東京農工大学大学院工学府 教授) 吉田 幸司(日本大学理工学部 教授) 油谷 幸代(国立研究開発法人産業技術総合研究所(産総研)生命工学領域 副ラボ長)
橋詰 保	佐藤 威友(北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター 准教授) 赤澤 正道(北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター 准教授) 田中 俊彦(山口大学大学院創成科学研究科 教授) 平木 英治(岡山大学自然科学研究科 教授) 岡本 昌幸(宇部工業高等専門学校 教授)
宮山 勝	本間 格(東北大学多元物質科学研究所 教授) 苫居 高明(東北大学多元物質科学研究所 准教授) 永村 直佳(国立研究開発法人物質・材料研究機構先端材料解析研究拠点 主任研究員)
辰巳 砂 昌弘	井上 博史(大阪府立大学大学院工学研究科 教授) 林 晃敏(大阪府立大学大学院工学研究科 教授)○ 牧浦 理恵(大阪府立大学大学院工学研究科 准教授)

研究代表者	主たる共同研究者
	知久 昌信(大阪府立大学大学院工学研究科 准教授) 森 茂生(大阪府立大学大学院工学研究科 教授) 戸川 欣彦(大阪府立大学大学院工学研究科 教授) 石井 悠衣(大阪府立大学大学院工学研究科 准教授) 忠永 清治(北海道大学大学院工学研究院 教授)
山内 美穂	竹口 竜弥(岩手大学理工学部 教授)○ 阿部 竜(大阪大学大学院工学研究科 教授)○ 向井 紳(北海道大学大学院工学研究院 教授) 加藤 健一(理化学研究所放射光科学総合研究センター 専任研究員)
山口 猛央	福島 孝典(東京工業大学科学技術創成研究院 教授) 田巻 孝敬(東京工業大学科学技術創成研究院 准教授) 大橋 秀伯(東京農工大学工学府 特任准教授)
山崎 聡	西澤 伸一(九州大学応用力学研究所 教授)○ 大橋 弘道(産総研パワーエレクトロニクス研究センター 副センター長)退職 竹内 大輔(産総研先進パワーエレクトロニクス研究センター 副センター長)○ 水落 憲和(京都大学化学研究所 教授)○ 徳田 規夫(金沢大学理工学域 准教授) 小泉 聡(国立研究開発法人物質・材料研究機構機能性材料研究拠点 グループリーダー) 波多野 睦子(東京工業大学工学院 教授) 岩崎 孝之(東京工業大学工学院 准教授) 齊藤 丈靖(大阪府立大学大学院工学研究科 教授) 猪熊 孝夫(金沢大学理工学域 教授)

※主たる共同研究者の所属および役職は調査時点。ただし、不明の場合は採択時の所属・役職。

○は採択時点からの教授、教授相当への昇任者

第 2 章 追跡調査

2.1 追跡調査について

2.1.1 調査の目的

追跡調査は研究領域終了後、一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、JST(科学技術振興機構)の事業および事業運営の改善に資するために行うもので、研究終了後の研究者の研究課題の発展状況等を調査した。

2.1.2 調査の対象

本追跡調査は、CREST 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～2015 年度)を対象とする。表 2-1 に調査対象と調査対象期間を示す。

表 2-1 調査対象と調査対象期間

採択年	研究代表者	CREST 研究期間	CREST 終了後の調査対象期間
第 1 期 (2008 年)	内本 喜晴	2008 年 10 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～2021 年 1 月
	河本 邦仁		
	小島 克己		
	富重 圭一	2008 年 10 月～2011 年 3 月	2011 年 4 月～2021 年 1 月
	吉川 暹	2008 年 10 月～2014 年 3 月	2014 年 4 月～2021 年 1 月
	渡邊 信	2008 年 10 月～2012 年 3 月	2012 年 4 月～2021 年 1 月
第 2 期 (2009 年)	小川 健一	2009 年 10 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～2021 年 1 月
	近藤 昭彦		
	田中 剛		
	橋詰 保		
	宮山 勝		
第 3 期 (2010 年)	辰巳砂 昌弘	2010 年 10 月～2013 年 9 月	2013 年 10 月～2021 年 1 月
	山内 美穂	2010 年 10 月～2016 年 3 月	2016 年 4 月～2021 年 1 月
	山口 猛央		
	山崎 聡		

2.1.3 調査方法

(1) 研究助成金

調査対象期間は、本研究領域の期間中を含めて調査対象月とし、本研究領域の研究代表者が研究の代表を務める研究助成金を調査した。その中から、原則、研究助成金の総額が1千万円/件以上のものを抽出した。

ただし、各研究課題の開始後に研究助成を受け、当該研究課題が終了する前に、その助成期間が終了してしまう事案および当該研究課題終了と同年度に助成期間が終了する事案に関しては対象外とする。

研究助成資金の獲得状況の調査については、主に以下のWEBサイトを利用した。

- ・調査対象研究代表者所属大学の研究者データベース
- ・調査対象研究代表者の所属する研究室、本人のWEBサイト
- ・競争的研究資金の機関データベース
(科学研究費助成事業データベース、厚生労働科学研究成果データベース)
- ・民間女性研究成果概要データベース(学術研究データベース・リポジトリ 国立情報学研究所[https://dbr.nii.ac.jp/infolib/meta_pub/CsvSearch.cgi])
- ・公益財団法人助成財団センター(http://www.jfc.or.jp/grant-search/ap_search.php5)
- ・日本の研究.com(<https://research-er.jp/>)

(2) 論文

論文の抽出は、文献データベースとしてScopusを用い、文献タイプはArticle、Review、Conference Paperを対象とする。研究期間中は研究代表者及び主たる共同研究者(あるいは研究終了報告書の成果論文で責任著者となっている研究者)が著者になっている論文、研究終了後は研究代表者が著者になっている論文を著者名検索により出力した。著者名から論文リストを作成し、①CRESTの成果と認められるもの、②CRESTの発展と認められるもの、③CRESTと無関係と考えられるものに分類し、論文数を求めた。また、CRESTの成果および発展に関する論文について、研究代表者が責任著者となっている論文数も調べた。著者名からは絞り込みの出来ない研究代表者については、CREST研究のキーワードで絞り込み検索を行った。

各論文については評価指標FWCI¹およびFWCI TopX%²、およびJornalの指標となるCiteScoreについても収集した。

(3) 特許

PatentSQUARE及び、補完的にEspacenetを利用し、検索を行った。

¹ FWCI(Field-Weighted Citation Impact) : 1文献あたりの被引用数を世界平均(年別・分野別・文献タイプ別に算出)で割った数値。

² FWCIが全論文の中で上位X%以内に含まれる論文。

研究 代表 者	研究 期間 (年 度)	研究種目	研究課題	2 0 0 8	2 0 0 9	2 0 1 0	2 0 1 1	2 0 1 2	2 0 1 3	2 0 1 4	2 0 1 5	2 0 1 6	2 0 1 7	2 0 1 8	2 0 1 9	2 0 2 0	2 0 2 1	2 0 2 2	2 0 2 3	2 0 2 4	2 0 2 5	金額 (1千 万円)
	2018 ～ 2022	JST (未来社会 創造)	超高エネルギー密度・ 高安全性全固体電池の 開発																			13.0
河 本 邦 仁	2008 ～ 2013	JST (CREST)	高効率熱電変換材料・ システムの開発																			19.3
	2013 ～ 2016	科研費 (基盤研究 (B))	バルク超格子熱電変換 材料の化学創製																			1.9
小 島 克 己	2008 ～ 2013	JST (CREST)	熱帯泥炭の保全と造林 による木質バイオマス 生産																			18.7
	2015 ～ 2017	科研費 (基盤研究 (B))	熱帯低湿地環境造林の ための樹木の根圏低酸 素ストレス耐性の解明																			1.6
	2017 ～ 2018	受託事業費 (農林水産 省林野庁事 業)	熱帯荒廃湿地の湛水造 林の技術開発																			1.5
富 重 圭 一	2008 ～ 2010	JST (CREST)	触媒技術を活用する木 質系バイオマス間接液 化																			13.5
	2008 ～ 2011	NEDO (先導的産 業技術創出 事業)	グリセリンの化学品・ 燃料への変換プロセス 用触媒の開発																			5.0 (最 大)
	2010 ～ 2013	JSPS (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																			16.3
	2014 ～ 2016	科研費 (基盤研究 (A))	分子内水素移行型水素 化分解反応を活用した バイオマス化成品合成																			4.2
	2017 ～ 2019	JSPS (二国間交 流事業)	バイオマス変換のため の自然をリスペクトす る触媒・プロセスの開 発																			0.40 ～1.2
	2018 ～ 2022	科研費 (基盤研究 (S))	分子-固体表面の直接 相互作用による新しい 固体触媒活性点の設 計・構築																			19.1
吉 川 暉	2008 ～ 2013	JST (CREST)	有機薄膜太陽電池の高 効率化に関する研究																			25.3
渡 邊 信	2008 ～ 2011	JST (CREST)	オイル産生緑藻類 Botryococcus(ボトリオ コッカス)高アルカリ株 の高度利用技術																			26.1

研究 代表 者	研究 期間 (年 度)	研究種目	研究課題	2 0 0 8	2 0 0 9	2 0 1 0	2 0 1 1	2 0 1 2	2 0 1 3	2 0 1 4	2 0 1 5	2 0 1 6	2 0 1 7	2 0 1 8	2 0 1 9	2 0 2 0	2 0 2 1	2 0 2 2	2 0 2 3	2 0 2 4	2 0 2 5	金額 (1千 万円)
	2013 ～ 2014	農林水産省 (農林水産 業・食品産 業科学技術 研究推進事 業)	耕作放棄地を活用した 大規模スケールでの藻 類バイオマス有効利用 技術の確立																			5.5
	2017 ～ 2019	環境省 (CO ₂ 排出削 減対策強化 誘導型技術 開発・実証 事業)	藻類バイオマスの効率 生産と高機能性プラス チック素材化による協 働低炭素化技術開発																			51.1
小 川 健 一	2009 ～ 2014	JST (CREST)	CO ₂ 固定の新規促進機構 を活用したバイオマテ リアルの増産技術開発																			52.4
	2014 ～ 2015	農林水産省	新規資材活用によるサ トウキビの収益性倍増 計画																			3.0
近 藤 昭 彦	2009 ～ 2014	JST (CREST)	海洋性藻類からのバイ オエタノール生産技術 の開発																			46.2
	2014 ～ 2017	AMED (次世代治 療・診断実 現のための 創薬基盤技 術開発)	国際基準に適合した次 世代抗体医薬等の製造 技術のうち高生産宿主 構築の効率化基盤技術 の開発に係るもの																			約 4365. 5
	2008 ～ 2018	文科省 (先端融合 領域イノー ベーション創 出拠点形成 プログラ ム)	バイオプロダクション 次世代農工連携拠点																			496.7
	2016 ～ 2018	科研費 (基盤研究 (B))	ネガティブレギュレー ションを全て解除した 基幹化合物生産細胞工 場の創製																			1.8
	2018 ～ 2020	AMED (次世代治 療・診断実 現のための 創薬基盤技 術開発)	高性能な国産細胞株の 構築																			60.1
	2020 ～ 2022	科研費 (基盤研究 (A))	増殖にとらわれずに 様々な前駆体を十分量 供給できるプラットフ ォーム微生物群の構築																			4.6

研究 代 表 者	研究 期 間 (年 度)	研究種目	研究課題	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	金額 (1千 万円)
田 中 剛	2009 ～ 2014	JST (CREST)	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																			29.4
	2014 ～ 2016	科研費 (基盤研究 (B))	バイオシリカ工学に基 づく有用珪藻の革新的 な物質生産プロセスの 創成																			1.6
	2017 ～ 2019	科研費 (基盤研究 (B))	微細藻類のオイルボデ ィ工学による医薬品生 産プロセスの開発																			1.8
橋 詰 保	2009 ～ 2014	JST (CREST)	異種接合 GaN 横型トラ ンジスタのインバータ 展開																			31.1
	2015 ～ 2017	JST (SICORP)	高い安定性を有する GaN-MOS トランジスタ スイッチ																			1.8 (最 大)
	2016 ～ 2020	科研費 (新学術領 域研究(研 究領域提案 型))	特異構造を含む異種接 合の界面制御と電子デ バイス展開																			6.0
宮 山 勝	2009 ～ 2014	JST (CREST)	プロトン型大容量電気 化学キャパシタの研究																			25.7
	2016 ～ 2018	科研費 (基盤研究 (A))	フレキシブルデバイス 用導電性酸化物薄膜の 設計と応用																			4.3
辰 巳 砂 昌 弘	2010 ～ 2013	JST (CREST)	固体界面を制御した全 固体二次電池の創製																			17.3
	2014 ～ 2017	科研費 (基盤研究 (A))	高容量アモルファス硫 化物電極活物質の創製 と全固体電池への応用																			4.2
	2013 ～ 2018	JSPS (博士課程 教育リー ディング プログラム)	システム発想型物質科 学リーダー養成学位プ ログラム																			150.0 (最 大)
	2018 ～ 2021	科研費 (基盤研究 (A))	新奇アモルファス遷移 金属酸化物正極材料の 創製と反応メカニズム 解析																			4.4
	2013 ～ 2022	JST (ALCA)	全固体電池チーム																			200.0 ～ 500.0
	2018 ～ 2022	科研費 (基盤研究 (S))	全固体イオニクスデバ イスにおける電極複合 体ダイナミクスの研究 基盤確立																			18.6

研究 代表 者	研究 期間 (年 度)	研究種目	研究課題	2 0 0 8	2 0 0 9	2 0 1 0	2 0 1 1	2 0 1 2	2 0 1 3	2 0 1 4	2 0 1 5	2 0 1 6	2 0 1 7	2 0 1 8	2 0 1 9	2 0 2 0	2 0 2 1	2 0 2 2	2 0 2 3	2 0 2 4	2 0 2 5	金額 (1千 万円)
山 内 美 穂	2010 ～ 2015	JST (CREST)	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																			27.6
	2015 ～ 2020	JST (CREST)	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																			27.6
	2018 ～ 2022	科研費 (新学術領域研究(研究領域提案型))	高活性水素の精密制御による新規反応プロセスの創出																			20.3
山 口 猛 央	2010 ～ 2015	JST (CREST)	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																			23.0
	2015 ～ 2018	科研費 (基盤研究(A))	ペプチドアダプターを用いた分子認識診断膜およびシステムの設計・開発																			4.4
	2015 ～ 2020	JST (CREST)	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																			14.0
	2018 ～ 2022	NEDO	水素利用等先導研究開発事業/水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発/高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発																			28.5
	2020 ～ 2024	NEDO	燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業/水素利用等高度化先端技術開発/カーボンフリー白金合金ナノ粒子連結触媒とポリフェニレン系細孔フィリング電解質膜の開発および高電圧・高出力 MEA への展開																			23.2

研究 代表 者	研究 期間 (年 度)	研究種目	研究課題	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	金額 (1千 万円)
山 崎 聡	2010 ～ 2015	JST (CREST)	超低損失パワーデバイス実現のための基盤構築																			46.6
	2018 ～ 2020	科研費 (基盤研究 (A))	ダイヤモンド表面核スピン格子を用いた室温量子シミュレータの基盤構築																			4.4

2020年5月1日調査
2020年11月16日更新
2021年3月23日確認

2.2.2 論文

論文発表件数は、研究者の研究活動を示す指標としてしばしば用いられている。一方、科学技術の国際競争力の比較を行うためには、質の高い論文(Top%論文)を対象とすることも重要である。

研究代表者の論文を、①CRESTの成果と認められるもの、②CRESTの発展と認められるものに分け、それぞれについての論文数および責任著者論文数、平均FWCI値、Top10%、Top1%、Top0.1%、Top0.01%以内論文数を表2-3にまとめた。また、図2-1には①CRESTの成果と認められるもの、②CRESTの発展と認められる論文の論文数およびTop10%以内論文数を、図2-2には各研究代表者の論文数分布、また図2-3には各研究代表者の①CRESTの成果、②CRESTの発展に関する論文数およびTop10%以内論文数を示す。

領域全体では、研究期間中708報(このうちTop10%以内は122報)であり、研究終了後は802報(このうちTop10%以内は139報)と論文数は増加し、またTop10%以内の論文数の増加も確認できる。

各研究代表者の論文数分布はばらつきがあり、研究期間中に対し研究終了後の論文数が増加したという明確な傾向はみとめられない。また論文数50報以上の研究代表者数は、研究期間中は6名で、研究終了後で4名である。研究終了後の論文の増加がそれほど顕著ではなかった理由として、研究終了後に定年となった研究代表者が数名いたことが考えられる。

表2-3 CRESTの成果および発展の論文(原著論文)数

期 (採択年度)	研究代表者	①CREST の成果							②CREST の発展						
		論文数	責任著者 論文数	平均 FWCI 値	Top%論文数				論文数	責任著者 論文数	平均 FWCI 値	Top%論文数			
					10%	1%	0.1%	0.01%				10%	1%	0.1%	0.01%
第 1 期 (2008 年度)	内本 喜晴	24	0	1.42	1	0	0	0	76	9	1.28	10	0	0	0
	河本 邦仁	110	1	1.33	16	1	0	0	31	3	2.37	7	1	0	0
	小島 克己	13	0	0.72	0	0	0	0	3	0	0.38	0	0	0	0
	富重 圭一	59	14	1.54	9	1	0	0	142	50	2.16	45	1	0	0

期 (採択年度)	研究代表者	①CREST の成果							②CREST の発展						
		論文数	責任著者 論文数	平均 FWCI 値	Top%論文数				論文数	責任著者 論文数	平均 FWCI 値	Top%論文数			
					10%	1%	0.1%	0.01%				10%	1%	0.1%	0.01%
	吉川 暹	67	6	1.60	10	2	0	0	4	0	3.00	1	0	0	0
	渡邊 信	25	3	1.47	2	0	0	0	46	2	11.33	6	0	0	0
第2期 (2009年度)	小川 健一	27	1	3.69	8	2	1	0	24	1	0.70	1	0	0	0
	近藤 昭彦	72	10	1.53	16	1	0	0	204	78	1.42	24	3	1	0
	田中 剛	54	22	1.05	5	0	0	0	23	17	0.93	3	0	0	0
	橋詰 保	49	2	1.88	9	2	0	0	30	2	1.15	6	0	0	0
	宮山 勝	33	2	1.49	5	1	0	0	4	0	0.06	0	0	0	0
第3期 (2010年度)	辰巳砂 昌弘	48	19	2.28	12	2	0	0	136	33	1.72	31	2	0	0
	山内 美穂	30	10	2.24	7	2	0	0	26	5	1.80	4	1	0	0
	山口 猛央	26	17	0.82	1	0	0	0	33	22	0.81	1	0	0	0
	山崎 聡	71	2	1.90	21	1	0	0	29	0	1.28	2	0	0	0
	領域全体	708	109	1.63	122	15	1	0	802	222	1.54	139	8	1	0
	(重複)	(0)	(0)		(0)	(0)	(0)	(0)	(9)	(0)		(2)	(0)	(0)	(0)

- 1 各研究代表者の論文数は重複論文を含むため、領域全体の論文数の合計数は一致しない。()中の数値は重複論文数。領域全体の論文数には重複論文数は含めない。重複論文は富重と渡邊が3報、内本と辰巳砂が6報の計9報であった。
- 2 責任著者とは Corresponding Author と同義。
- 3 平均 FWCI 値は、調査最終年マイナス1年まで(今回の調査では2019年末まで)の論文を対象とし、FWCI 値が得られる論文(FWCI 値=0 含む)で平均した数値とする。
- 4 Top%値は FWCI 値ベースとする。また Top%論文は「論文数」でリストアップした論文を対象とする。
- 5 各 Top%論文数は“以内”を意味し、例えば Top10%の欄には1%以下も含む件数がカウントされる。

2020年5月18日検索

2020年10月18日更新

2021年3月23日確認

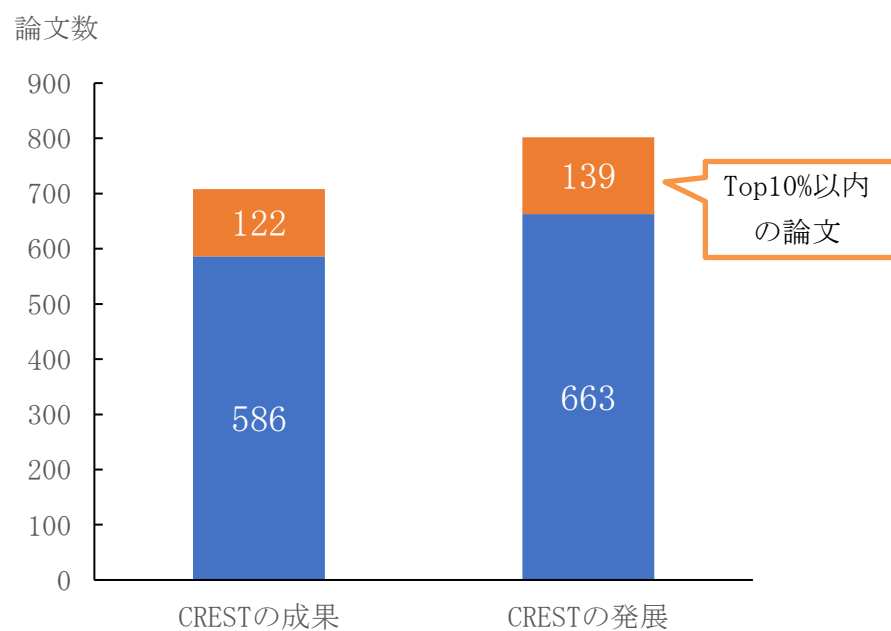


図 2-1 CREST の成果および発展に関する論文数

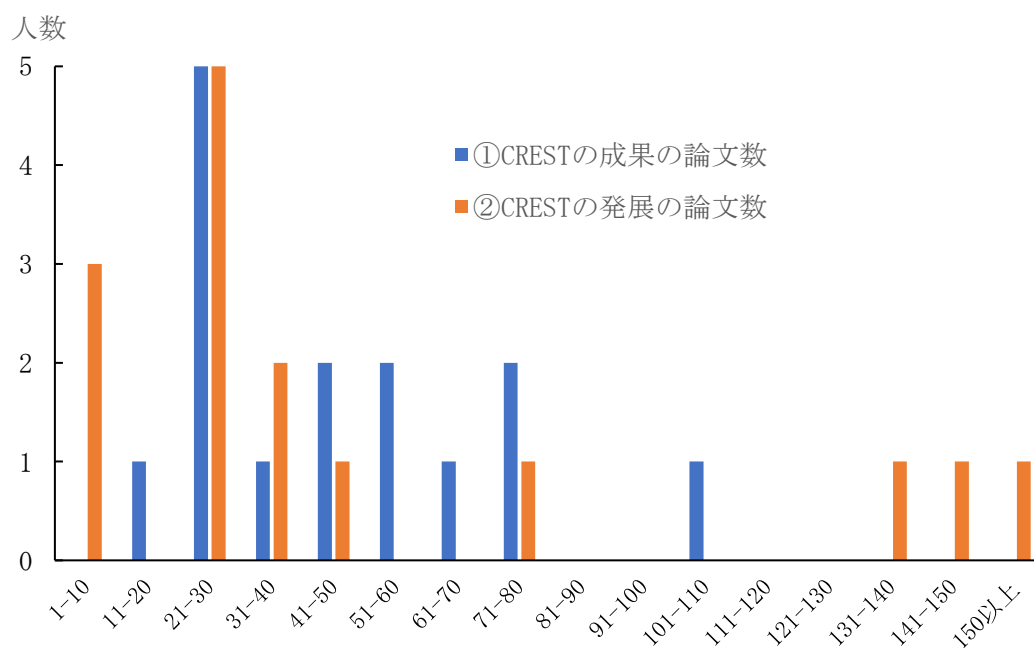


図 2-2 各研究代表者の論文数分布

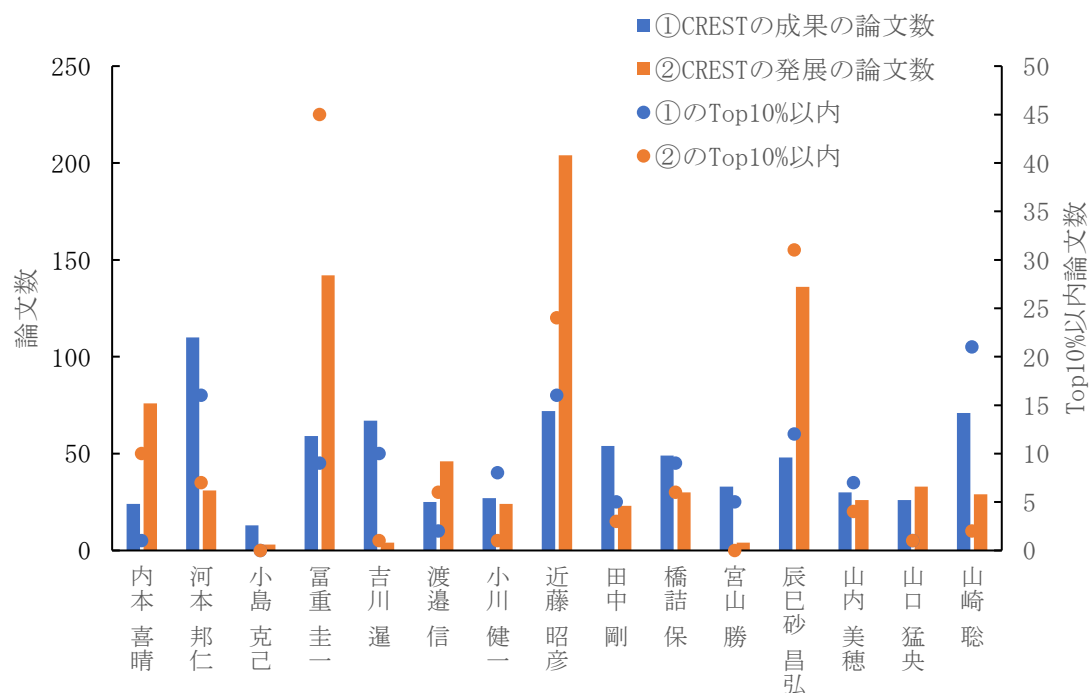


図 2-3 各研究代表者の研究期間中・終了後の論文数

研究代表者別では、各研究代表者間でばらつきはあるが、CREST の研究成果の論文を最も多く発表したのは、第 1 期の河本で 110 件、次いで第 2 期の近藤が 72 件、第 3 期の山崎が 71 件、さらに第 1 期の吉川が 67 件であった。また、CREST の研究成果の継続と発展に関しては、第 2 期の近藤が 204 件で最も多く、次いで第 1 期の富重が 142 件、第 3 期の辰巳砂が 136 件であった。

一方、CREST の研究成果における Top10%以内の論文数は、山崎が 21 件、河本および近藤がそれぞれ 16 件、さらに辰巳砂が 12 件であり、続いて吉川が 10 件、富重が 9 件と多い。また、吉川、小川、橋詰、辰巳砂、山内は 2 件、河本、富重、近藤、宮山、山崎には 1 件の Top1%以内の論文があった。さらに、小川には Top0.1%以内の論文が 1 件あったことは特筆に値する。CREST の研究成果の継続と発展における Top10%以内の論文数は、富重が 45 件、次いで辰巳砂が 31 件、近藤が 24 件であった。近藤は 3 件、辰巳砂は 2 件、河本、富重、山内には 1 件の Top1%以内論文があった。さらに、近藤には 1 件の Top0.1%の論文が 1 件あったことは特筆に値する。

本研究領域内での共著論文数は、研究期間中には無いが、研究終了後の CREST 研究成果の発展に関しては 9 件あった。その内容は、富重と渡邊が 3 件で *Botryococcus* の触媒反応に関する 2014 年～2017 年の研究、内本と辰巳砂が 6 件でいずれも全固体電池に関する 2016 年～2020 年の研究であり、まさにそれぞれの異なる専門を生かした共同研究となっている。CREST 研究を通じて、研究者間のネットワークが広がり、共同研究が進んだものと考えられる。

2.2.3 特許

特許は基礎研究から実用化・事業化の見通しを図る指標となることから、表 2-4 に研究代表者毎に特許の出願や登録数を一覧表にまとめた。また図 2-4 に研究期間中・終了後の特許の出願と成立状況をまとめた。

表 2-4 研究期間中・終了後の特許の出願と成立状況

		研究期間中				研究終了後			
		出願件数		登録件数		出願件数		登録件数	
採択年度	研究代表者	国内	海外	国内	海外	国内	海外	国内	海外
2008年度	内本 喜晴	10	3	2	1	6	2	4	2
	河本 邦仁	5	2	2	1	1	0	0	0
	小島 克己	1	0	0	0	0	0	0	0
	富重 圭一	10	1	7	0	29	6	18	4
	吉川 暹	11	2	6	2	3	3	1	0
	渡邊 信	9	3	3	3	28	4	7	1
2009年度	小川 健一	9	9	9	9	8	1	2	0
	近藤 昭彦	45	18	21	8	19	13	5	1
	田中 剛	11	5	4	1	1	0	0	0
	橋詰 保	4	1	1	1	2	0	0	0
	宮山 勝	6	3	5	3	1	0	0	0
2010年度	辰巳砂 昌弘	16	4	11	2	15	5	8	1
	山内 美穂	9	4	4	1	2	3	0	0
	山口 猛央	12	2	6	2	9	1	1	0
	山崎 聡	17	11	15	8	5	2	1	0
領域全体		175	68	96	42	129	40	47	9

- 1) PCT 出願、海外国への個別特許申請のいずれかがあれば、海外としてカウント。
- 2) 国内特許出願し PCT 出願あるいは直接 PCT 出願された場合は国内出願件数に含めてカウント。

2020 年 5 月 19 日調査

2020 年 11 月 18 日更新

2021 年 3 月 23 日確認

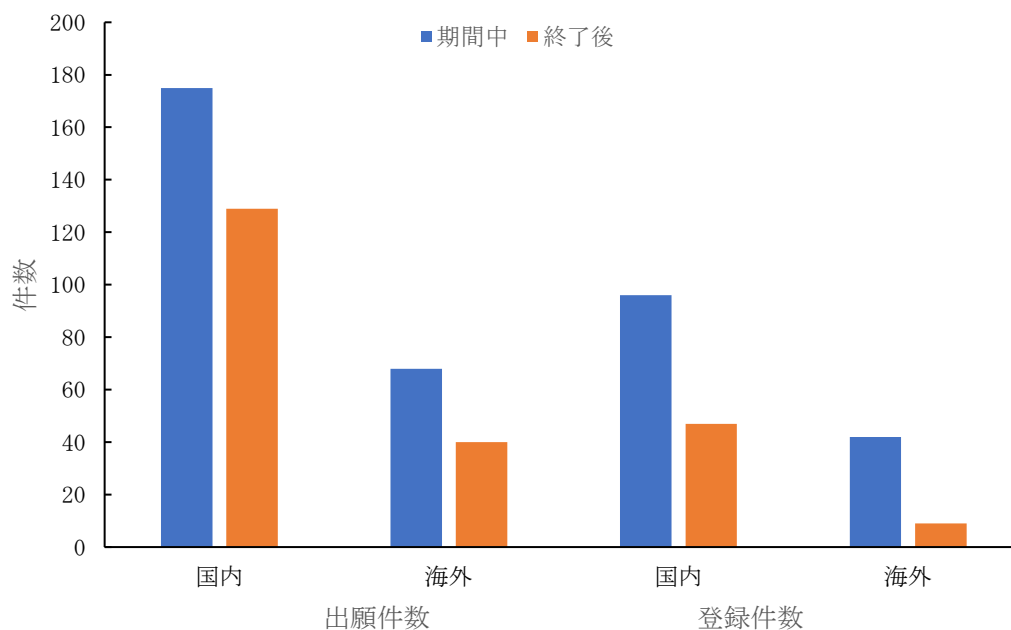


図 2-4 研究期間中・終了後の特許の出願と成立状況

領域全体では、研究期間中と研究終了後を比較すると、出願件数、登録研数のいずれも研究終了後の方が少なくなっている。特に、海外特許については終了後の登録件数が非常に少ない。これらは、論文の場合と同様、研究終了後に定年となるなど、研究終了後の研究活動が縮小した研究代表者が数名いたことが理由であると考えられる。

各研究代表者別では、期間中に最も多く出願かつ登録されているのは、第2期の近藤で、国内に45件、海外に18件出願し、それぞれ21件、8件が登録されている。次いで多く出願・登録されているのは、第3期の山崎(出願が国内に17件、海外に11件、登録が国内15件、海外8件)となっている。また、小川は出願した国内、海外いずれも各9件の全てが登録されている。

一方、終了後については、最も多く出願かつ登録されているのは、第1期の富重で、国内に29件、海外に6件出願し、それぞれ18件、4件が登録されている。次いで多く出願しているのは、第1期の渡邊(国内に28件、海外に5件)、第2期の近藤(国内に19件、海外に13件)、第3期の辰巳砂(国内に15件、海外に5件)である。富重に次いで多く登録しているのは、第3期の辰巳砂(国内に8件、海外に1件)、第1期の渡邊(国内に7件、海外に1件)であった。

特許をベンチャー創業に活用したものとしては、渡邊のボトリオコッカス・ブラウニー属の新規株⁴およびパームオイル工場排出液(POME)⁵に関する特許、近藤の切らないゲノム編集技術⁶および二本鎖 DNA 合成方法⁷に関する特許があげられる。

2.2.4 受賞

受賞リストを表 2-5 に示す。

代表的な受賞として、吉川は大学における多数の留学生の教育とエネルギー科学研究への貢献に対し、瑞宝小綬章⁸を受賞した。また、河本は、ナノ構造熱電変換材料の創製とエネルギーハーベスティングへの応用に対し、加藤記念賞⁹を、辰巳砂は全固体電池を目指したガラス系イオニクス材料の研究に対し、科学技術分野文部科学大臣表彰^{10, 11}を受賞した。

表 2-5 研究終了後の受賞リスト

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
1	内本 喜晴	第 42 回講演会優秀ポスター賞	化学電池材料研究会 第 42 回講演会	2018
2		関西電気化学奨励賞受賞	関西電気化学研究会	2018
3		優秀ポスター賞	関西電気化学研究会	2019
4		優秀ポスター賞	関西電気化学研究会	2019
5		優秀ポスター賞	The 65th Annual Meeting of PS	2019
1	河本 邦仁	加藤記念賞	公益財団法人 加藤科学振興会	2017
2		Outstanding Achievement Award	The International Thermoelectric Society	2018
3		CICC Friendship Award	The Chinese Ceramic Society	2019
4		NIMS Award (NIMS Award for Recent Breakthrough in Materials Science and Technology)	物質・材料研究機構	2020
1	富重 圭一	第 18 回(2018 年度)GSC 賞奨励賞	新化学技術推進協会	2018
1	吉川 暹	NRCT Supervisor Distinguished	NRCT(Thailand)	2014
2		Executive Visiting Professor of Univ.	Univ. Brunei Darussalam (Brunei)	2014-2016
3		瑞宝小授章受賞	内閣府	2018

⁴ 2.2.9(1)①藻バイオテクノロジー株式会社設立の状況等について 参照

⁵ 2.2.9(1)②株式会社 MoBioI 藻類研究所設立の状況等について 参照

⁶ 2.2.9(2)①株式会社バイオパレット(Bio Palette Co., Ltd.) 設立の状況等について 参照

⁷ 2.2.9(2)②株式会社シンプロジェン設立の状況等について 参照

⁸ 経産省 HP <https://www.meti.go.jp/press/2018/11/20181103001/20181103001-1.pdf>

⁹ 加藤記念財団 HP <http://www.katof.or.jp/award.html#receivers;>

<http://www.katof.or.jp/documents/h29-1.pdf>

¹⁰ 文科省 HP

https://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/30/04/_icsFiles/afieldfile/2018/04/10/1403097_1.pdf

¹¹ 大阪府大 HP <https://www.osakafu-u.ac.jp/press-release/pr20180410/>

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
1	渡邊 信	平成 31 年度日本藻類学会山田賞	日本藻類学会	2018
1	小川 健一	第 7 回フード・アクション・ニッポン アワード 2015 優秀賞(研究開発・新技術部門)	農林水産省	2015
2		高梁市津々地区 3 協定・中国四国農政局長表彰 優秀賞	中国四国農政局	2015
1	橋詰 保	2016 Paper Award, The Japan Society of Applied Physics	応用物理学会	2016
2		フェロー表彰	応用物理学会	2018
1	宮山 勝	日本セラミックス協会 フェロー表彰	日本セラミックス協会	2016
1	辰巳砂 昌弘	2019 年度電気化学会論文賞	電気化学会	2020
2		平成 30 年度日本化学会賞	日本化学会	2019
3		平成 30 年度科学技術分野文部科学大臣表彰	文部科学省	2018
1	栗原 雄大*	化学工学会第 51 回秋季大会 ポスター賞	化学工学会	2020
2	松多 楓*	膜シンポジウム 2020 学生賞	日本膜学会	2020
1	山崎 聡	応用物理学会論文賞	応用物理学会	2016
2		筑波大学名誉連携教授称号	筑波大学	2018

※山口研究代表者からの申請による。

2.2.5 招待講演

研究代表者の研究成果を、国際学会における招待講演として発表した件数が、研究終了後、合計 128 件に上った。特に、山口が 28 件、山内が 27 件と燃料電池関連が多い。山口は、学会やシンポジウムにおけるナノマテリアルやナノ触媒に関する講演が主である。山内も、学会やシンポジウムにおけるナノ粒子触媒による物質・エネルギー変換についての講演を多く実施している。また、橋詰は主として GaN 系トランジスタの界面制御に関する講演を 16 件行っている。

2.2.6 報道

研究終了後に報道機関から報じられた件数は、総数が 454 件に上った。研究代表者別では、渡邊が 121 件で最も多く、バイオマス実証事業の研究成果が社会的にも注目されていることを示している。次いで、辰巳砂が 95 件である。このうち 26 件は学長就任等に関するものではあるが、世の中における全固体電池に対する期待の大きさが感じられる。次いで、近藤が 58 件、富重が 54 件、内本が 51 件となっている。

2.2.7 共同研究や企業との連携

内本は、トヨタ自動車株式会社(トヨタ自動車)と共同で、リチウムイオンのかわりに 1 価のアニオンであるフッ化物イオンを用いた全固体フッ化物イオン電池を開発し、エネルギー密度でリチウムイオン電池を大きく上回る性能を確認した。

河本は、中国の3大学(清華大学、南京工業大学、桂林電子科技大学)をはじめ、サウジアラビア(アブドゥルアジズ国王大学)、韓国(慶熙大学)、豪州(ニューサウスウェールズ大学およびウーロンゴン大学)の計7大学と熱電変換材料及びデバイス応用に関する共同研究を行い、5年間で34報の共著論文を発表した。また、英・仏に拠点を持つ日系企業研究所がフレキシブル熱電素子の合成プロセス(LESA法)を検討し、特許申請した。

小島は、インドネシア共和国ボゴール農科大学と「熱帯泥炭地域の森林火災発生メカニズム解明と生態系リスク・マネジメントの共創」で共同研究を行った。また、タイ国王室チャイパッターナ基金とタイ国ナコンシタマラート県の湿地試験地において共同実証試験を行った。

富重は、NEDO 環境調和型製鉄プロセス技術開発において新日鐵住金株式会社(現：日本製鉄株式会社)(日本製鉄)とメタン酸化改質用触媒開発を受託。燃料改質用触媒の開発として2社と共同研究を行った。また、本研究領域内の筑波大学・渡邊信を含む共同研究で藻類バイオマスの変換触媒を開発。JSPS-NSFC 日中二国間交流事業として Chinese Academy of Sciences とバイオマス変換触媒について共同研究を行った。

渡邊は、バイオプラスチックについて三菱マテリアル株式会社(三菱マテリアル)、日本電気株式会社(NEC)および藻バイオテクノロジー株式会社(藻バイオテクノロジーズ)と共同研究を実施した。また、藻類バイオ原油について、藻類版業創成コンソーシアムに加盟する9企業と6年間の共同研究を実施した。Botryococcus の国際的研究開発は、フランスのCNRS のサポートをうけ、ナント大学、米国のUCSD、オーストラリアのマードック大学と共同研究、情報交換、人材交流を実施しており、さらに継続することとなった。

小川は、農林水産省研究ネットワーク「グルタチオン農業の実現を目指す技術開発ネットワーク」に参画する大学、公立機関・団体、民間企業等への技術指導を実施した。

橋詰は、MOS 型 GaN HEMT に関する共同研究を、三菱電機株式会社(三菱電機)、住友電気工業株式会社(住友電気工業)、株式会社富士通研究所(富士通研究所)と、また GaN 基板販売のトップ企業である株式会社サイオクス(サイオクス)と、GaN 基板上 HEMT の共同研究を継続している。名古屋大学、国立研究開発法人物質・材料研究機構(NIMS)、福井大学、熊本大学と GaN MOS 構造に関する共同研究も継続している。また、スロバキア科学院、ハンガリー科学院およびシレジアン工科大(ポーランド)との共同研究を行った。

宮山は、電池関連企業へ全固体素子のサンプル提供(成果有体物提供)を行い、実用素子としての特性評価を行った。

辰巳砂は、トヨタ自動車株式会社(トヨタ自動車)、パナソニック株式会社(パナソニック)、日産自動車株式会社(日産自動車)をはじめ数社と全固体電池の共同研究を進めている。また、米国アイオワ州立大学との共同研究やスペイン国立研究協議会と共同研究を行った。

山口は、固体アルカリ燃料電池、固体アルカリ水電解について、国内外の大学および、NEDO プロジェクトを含めた企業との共同研究を実施した。

山崎は、信越化学工業株式会社(信越化学)とシリコン上ダイヤモンド基板作製に関する共同研究を行い、量子デバイスとして有用な(111)面における成長に成功した。また、パワーデバイス開発について産総研、金沢大学と共同研究を進めている。さらに、フランス・グ

ルノーブルのニール研究所と学生交換を中心に、また、ドイツのフラウンホーファー研究所（フライブルグ）と国際共同研究を行っている。

2.2.8 実用化・製品化

渡邊は株式会社デンソー(デンソー)と *Botryococcus* の炭化水素含有のハンドクリーム “Moina” を開発し、1.5 億円を越える累積販売額を達成した。

小川は株式会社カネカ(カネカ)と実施権許諾包括契約を締結し、酸化型グルタチオンを「カネカ ペプチド」として 2015 年に販売を開始した。カネカペプチドは日本・米国・中国・東南アジアなど、グローバルに事業を展開している。

2.2.9 ベンチャー

渡邊、近藤の2名がベンチャー起業した。

(1) 渡邊

①藻バイオテクノロジー株式会社設立の状況等について

「藻類が拓く健康で心豊かな未来の実現を目指して」を企業理念とした藻バイオテクノロジー株式会社(藻バイオテクノロジー)の設立に関与し、現在、代表取締役を務めている。

(i) 起業の理由・動機・狙い等

筑波大学・研究所の成果を社会に生かす事業を実施するために、新産業を創造するTL0会社(株式会社新産業創造研究所)が設立され、2013年まで、主として筑波大学渡邊研究室の藻類を利用したエネルギー開発や、新しい温室効果ガス排出量計測による排出削減支援システム開発などを実施してきた。2013年に新産業育成(TL0)の期間を終え、生産販売を行うビジネス会社への移行準備(代表取締役 井上元)を経て、2015年に社名を藻バイオテクノロジー株式会社に変更、増資、定款変更により新体制に移行し、渡邊自身が社長を務めている。

「人類をエネルギーの制約から解放し、健康で心豊かな未来を創造する」ことを企業理念とし、筑波大学をはじめとする国内外の大学・研究機関や関連企業と連携することにより、藻類を活用した藻類産業の創造とグローバルな展開を目指している。

(ii) 起業の原資となった技術(登録特許、論文等)

(a) 渡邊信、彼谷邦光、田野井孝子、河地正伸、志甫諒、「ボトリオコッカス・ブラウニー (*Botryococcus braunii*) 属の新規株」、特許第5534267号

(b) 渡邊信、彼谷邦光、白岩善博、河地正伸、志甫諒、村松正善、「ボトリオコッカス・ブラウニー属の新規株」、特許第6222643号

(iii) 会社の概要

(a) 基本データ

表2-6 藻バイオテクノロジーズの基本データ

会社名	藻バイオテクノロジーズ株式会社
本社	〒305-0047 茨城県つくば市千現2-1-6 B-5
代表者名	代表取締役 渡邊 信
設立年月日	2015年4月1日
事業内容	藻類の生産および加工 藻類加工物の販売および輸出入 藻類の培養・加工方法・利用分野の開発 その他関連事業
資本金	80,949,500円
会社が発行する株式の総数	600万株
発行済株式の総数	215,266株
株主数	12名
売上(2016年12月)	50百万円
拠点	
筑波大学内研究開発室	〒305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1 筑波大学 藻類バイオマス・エネルギーシステム開発研究センター 内
南相馬研究所	〒975-0023 福島県南相馬市原町区泉字前向540 (一社)藻類産業創成コンソーシアム 藻類バイオマス生産開発拠点内
URL	-

2018年3月現在

(b) 事業の概要

- (ア) アグロサイエンス製品：SOBIO-360など。
- (イ) 機能性食品：DHA & EPAを錠剤ではなく食品の中に。
- (ウ) 美容品などの原料(デンソー「moina」)。

(c) 研究開発戦略・事業運営について

- (ア) 機能性食品等の高付加価値製品の製造販売により事業基盤を確立。
- (イ) 民間企業・政府と連携した案件獲得。
- (ウ) 産学連携によって大学の研究データを最大限に活用。

(d) その他

- (ア) 渡邊研究室との関係：渡邊が代表取締役を務めている。藻類バイオマス研究において世界トップクラスの地位を持つ筑波大学と連携しながら研究開発・製造を行っている。
- (イ) 筑波大学、三菱マテリアル、NECと共同で、2017年度～2019年度(3年間)、環境省事業「CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業(藻類バイオマスの効率生産と高機能性プラスチック化による協働低炭素化技術開発)」(委託業務)を実施した¹²。

¹² 環境省 HP (https://www.env.go.jp/earth/ondanka/cpttv_funds/ongoing.html)

②株式会社MoBiol藻類研究所設立の状況等について

渡邊信は「藻類が世界を変え、新しい世界が生まれる」を企業理念とした株式会社 MoBiol 藻類研究所の創設メンバーのひとりであり、現在、代表取締役社長を務めている。

(i) 起業の理由・動機・狙い等

世界第一位、第二位のパームオイル生産国であるインドネシアとマレーシアでは、パームオイル生産工場廃液(POME; Palm Oil Mill Effluents)が引き起こす水質汚染やメタンガスの発生が重大な環境・経済問題となっているが、これらの問題を藻類を用いて解決する技術開発を行なうことを目的として、2018年4月にMoBiol株式会社を設立した。2020年6月に株式会社MoBiol藻類研究所(MoBiol藻類研究所)へ社名を変更した。

MoBiolは微細藻類の専門的な知識と生産技術が強みに、様々な微細藻類に適した培養技術の開発、および微細藻類から生産される油脂の効率的な生産技術の開発を行っている。

MoBiolグループのグローバルビジネスを展開するMoBiol Holdings Pte Ltd (本社：シンガポール)を中心に、PT MoBiol Algae Indonesia(本社：ジャカルタ)と共にそれぞれの強みを活かし、事業を進めている。

(ii) 起業の原資となった技術(登録特許、論文等)

(a) 多田清志、渡邊信、吉田昌樹、伊藤順子、中島敏秀、マイケル・ゴータマ、「パームオイル工場排出液(POME)をつかった従属栄養性微細藻類の培養方法及びDHA製造方法」、W02020/036216

(b) 多田清志、渡邊信、吉田昌樹、伊藤順子、中島敏秀、マイケル・ゴータマ、「パームオイル工場排出液(POME)をつかった従属栄養性微細藻類の培養方法及びDHA製造方法」、特開2020-54391、W02020/026794

(iii) 会社の概要

(a) 基本データ

表2-7 株式会社MoBiol藻類研究所の基本データ

会社名	株式会社MoBiol藻類研究所
本社	〒305-0047 茨城県つくば市千現2-1-6 B-5
代表者名	代表取締役会長 中島 敏秀 代表取締役社長 渡邊 信
設立年月日	2018年4月20日
事業内容	微細藻類の専門的な知識と生産技術が強みに、様々な微細藻類に適した培養技術の開発、および微細藻類から生産される油脂の効率的な生産技術の開発を行う。
URL	https://www.mobiol.tech/about/

2021年3月現在

(b) 事業の概要

(ア) パームオイル生産工場から排出される大量の廃液POME(Palm Oil Mill Effluents)を微細藻類の栄養源として活用し、BOD値の低減、水質の改善を図る。

(イ) パームオイルの副産物であるByLP0を活用して、藻類由来の高品質DHA含有オイル、PC-DHA(リン脂質DHA)、さらに、魚介類のDHA含量を引き上げる水産飼料や、PC-DHAを含量する鶏卵を生み出す畜産飼料の生産技術を開発する。

(c) 市場開拓戦略・製品戦略について

(ア) インドネシア最大産業パームオイル産業において、パームオイルで得られる収益を上回る収益が藻類から得られるというパラダイムシフトを起こすことを目指す。

(イ) DHA消費量は年々増加しており、2020年に世界のDHA消費量が年間255,000MT(m³)に達すると試算している。DHA供給を魚だけに頼ることは、今後困難であり、将来性の高い市場と考えている。

(d) その他

(ア) 渡邊研究室との関係：渡邊が代表取締役会長を務めている。

(イ) 事業推進体制：MoBiolグループのグローバルビジネスを展開するMoBiol Holdings Pte Ltd(本社：シンガポール)を中心に、PT MoBiol Algae Indonesia(本社：ジャカルタ)と共にそれぞれの強みを活かし、事業を進める。

(2) 近藤

近藤が科長を務める神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科では、神戸地域において、急成長グローバル・イノベーションベンチャー企業を創出し、それを起爆剤として、自然発生型のイノベーション・クラスターを実現することを目指している。しなしながら、神戸大学は、国の大学出資事業「官民イノベーションプログラム」を持たないため、図2-5に示すような「神戸大学スキーム」と呼ばれる独自のスキームを考案した。

すなわち、シード・アクセラレーターである株式会社科学技術アントレプレナーシップ(STE社)¹³と共同で神戸大学科学技術アントレプレナーシップ基金(神戸大学STE基金)を設立することにより、大学の資金を使うことなく、ベンチャー企業の創業支援と投資育成を行うことを可能とした。そして、将来的にベンチャー企業が成功した際には、創出された価値を神戸大学に還元し、新たな研究開発や人材育成のために再投資してゆくという構図である。

¹³ 創業支援・投資育成を専門とする神戸大学発のベンチャー企業(<http://www.ste-kobe.co.jp/>)

神戸大学スキーム（最新状況）

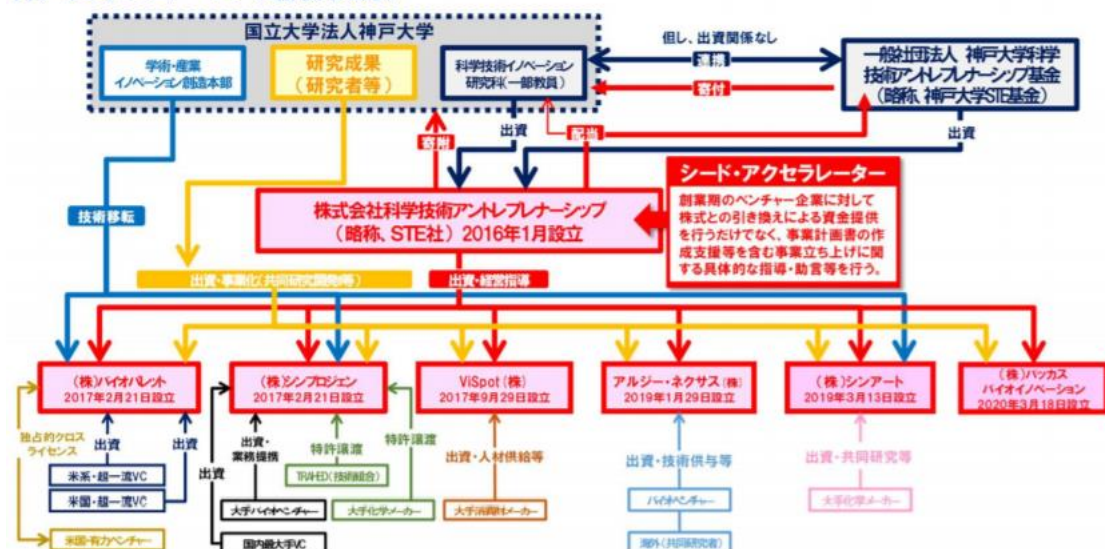


図2-5 神戸大学スキームについて¹⁴

このような神戸大学スキームにより、現在までに表2-8に示す6社の設立を支援し、近藤自らは株式会社バイオパレットと株式会社シンプロジェンの取締役を務めている。

表2-8 神戸大学発バイオベンチャーの概要

社名	資本金等	事業内容等
(株)バイオパレット 設立：2017年2月	776 百万円	ゲノム編集(米系大手 VC より資金調達)
(株)シンプロジェン 設立：2017年2月	1, 118 百万円	DNA 合成(大手バイオベンチャーと提携)
ViSpot(株) 設立：2017年9月	40 百万円	ウイルス安全性評価(サンスターとの JV)
アルジー・ネクサス(株) 設立：2019年1月	4 百万円	微細藻類関連
(株)シンアート 設立：2019年3月	10 百万円	合成バイオ・合成化学関連
(株)バックス・バイオイノベーション 設立：2020年3月	—	統合型バイオファウンドリー

以下、主要な3社、株式会社バイオパレット、株式会社シンプロジェンとViSpot株式会社について、活動状況を述べる。

¹⁴ 文部科学省「官民協働による新たな地域科学技術施策に関する調査」2020.3 P.118.
https://www.mext.go.jp/content/20200902-mxt_sanchi01-000009723_4.pdf

①株式会社バイオパレット(Bio Palette Co., Ltd.)設立の状況等について

(i) 起業の理由・動機・狙い等

神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科の西田敬二・近藤昭彦らの研究成果であるDNAの2本鎖を切断することなく、1塩基のみを置換する塩基編集技術(切らないゲノム編集技術)の事業化を目指して設立された。医療、創薬、農業、微生物などの分野でグローバルな展開を目指している。

(ii) 起業の原資となった技術(登録特許、論文等)

- (a) 西田敬二、近藤昭彦、坂野聡美、「標的化したDNA配列の核酸塩基を特異的に変換するゲノム配列の改変方法及びそれに用いる分子複合体」、PCT/JP2015/056436、WO 2015/133554
- (b) Nishida K, Arazoe T, Yachie N, Banno S, Kakimoto M, Tabata M, Mochizuki M, Miyabe A, Araki M, Hara KY, Shimatani Z, Kondo A, “Targeted nucleotide editing using hybrid prokaryotic and vertebrate adaptive immune systems”, Science, 2016, 353 (6305), aaf8729.
- (c) Shimatani Z, Kashojiya S, Takayama M, Terada R, Arazoe T, Ishii H, Teramura H, Yamamoto T, Komatsu H, Miura K, Ezura H, Nishida K, Ariizumi T, Kondo A, “Targeted base editing in rice and tomato using a CRISPR-Cas9 cytidine deaminase fusion”, Nature Biotechnology, 2017, 35, 441-443.
- (d) Banno S, Nishida K, Arazoe T, Mitsunobu H, Kondo A, “Deaminase-mediated multiplex genome editing in Escherichia coli”, Nature Microbiology, 2018, 3, 423-429.

(iii) 会社の概要

(a) 基本データ

表2-9 株式会社バイオパレットの基本データ

会社名	株式会社バイオパレット
本社	〒657-0013 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1
役員	代表取締役 村瀬 祥子 取締役 近藤 昭彦(神戸大学大学院 教授) 取締役 西田 敬二(神戸大学大学院 教授) 取締役 山本 一彦(神戸大学大学院 教授) 取締役 デービッド・ミルスタイン(Eight Roads Ventures Japan 代表) 取締役 スティーヴン・ナイト(F-Prime Capital Partners, President & Managing Partner) 監査役 高畑 豪太郎(弁護士法人御堂筋法律事務所 パートナー)
事業内容	ゲノム編集によって育種した細菌を活用したマイクロバイオーム・セラピューティクス

	ゲノム編集の対象となる細胞の種類により分類した3つの分野(微生物、医療、農業)で事業を展開
資本金(資本準備金)	776,784,124円(773,984,124円)
設立年月日	2017年2月21日
売上高(2019年12月31日)	—
純利益(2019年12月31日)	▲1億1780万9000円
URL	https://www.biopalette.co.jp/index.php

2021年3月現在

(b) 事業の概要

神戸大学との密な連携のもと、神戸大学が特許出願済みの Target-AID®、Target-G®およびその他の関連技術について、各国での権利化を進めている。また、米国を中心とする有力機関との戦略的アライアンスによって、事業展開を見据えた上で知財ポートフォリオを拡充・構築している。

(c) 市場開拓戦略・製品戦略について

神戸大学と連携し、各応用分野における新たな技術を開発している。

(d) その他

近藤研究室との関係：近藤の開発した技術の事業化を目的として設立され、近藤は取締役を務めている。

②株式会社シンプロジェン設立の状況等について

(i) 起業の理由・動機・狙い等

神戸大学等が10年近く開発を続けてきた独自のDNA合成技術を活用し、ユーザーが望む通りの正確なDNA、長鎖のDNAを高品質かつ低コストに合成し、バイオプロダクションや医療創薬関連の産業に貢献することを目指している。

(ii) 起業の原資となった技術(登録特許、論文等)

高橋俊介、柘植謙爾、近藤昭彦、「二本鎖DNA合成方法」、特開2019-198236

(iii) 会社の概要

(a) 基本データ

表2-10 株式会社シンプロジェンの基本データ

会社名	株式会社シンプロジェン	
本社	〒657-0013 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1	
事業所	〒997-0052 山形県鶴岡市覚岸寺字水上234-1	
役員	代表取締役	菅原 潤一 (PhD)
	取締役	近藤 昭彦 (PhD)
	取締役	柘植 謙爾 (PhD)
	取締役	山本 一彦
	取締役	大島 圭裕
	取締役	マイヤー・ダニエル

事業内容	ゲノム合成技術に係る研究および開発等
資本金	11億1,800万円(資本準備金含む)
設立年月日	2017年2月21日
売上高(2019年12月31日)	617万2000円
純利益(2019年12月31日)	▲1億5604万円
URL	https://www.synplogen.com/

2021年2月現在

(b) 事業の概要

(ア)長鎖 DNA 受託合成サービス：OGAB を用いて最大 100kb の長鎖 DNA を受託合成
 コンビナトリアル DNA ライブラリー受託合成サービス：Combi-OGAB を用いて組合せ
 論的にパターン創出した DNA ライブラリーを受託合成

(イ)有用物質生産微生物の開発支援サービス：OGAB や Combi-OGAB を用いて遺伝子回
 路を設計・合成し、有用物質生産微生物の開発を支援

(c) 競合する会社と競合他社に対する強み

競合 米国 ベンチャー企業(数百億円規模の資金調達、ノウハウの集約による生産
 技術の成熟)

強み 有力知財の集約(例えば、枯草菌の遺伝子集積法を利用した長鎖 DNA 合成のコ
 ア特許を高機能遺伝子デザイン研究組合より譲渡)

(d) 市場開拓戦略・製品戦略について

バイオプロダクション：医薬品、化粧品、バイオ素材、汎用化学品などの有用物質の
 微生物生産においては、長鎖 DNA の遺伝子回路の合成が必要であり、その構築を支援
 し、有用物質生産株の高速育種を実現する。

医療・創薬分野：人間を対象とした遺伝子治療の一般化の時代を見据え、遺伝子治療
 及びその研究開発を目的とし、時に数万塩基対からなるヒト遺伝子をコードした長鎖
 DNA の構築、又は疾患モデル動物作成のための DNA 構築を実現する。

(e) その他

(ア)近藤研究室との関係：近藤の開発した技術の事業化を目的として設立され、近藤
 は取締役を務めている。

③ViSpot株式会社設立の状況等について

(i) 起業の理由・動機・狙い等

利便性・スピード・経済性・安心を提供するウイルス安全性評価受託試験サービスによっ
 て、日本のバイオ医薬品の開発に貢献することを目的として設立された。

(ii) 起業の原資となった技術(登録特許、論文等)

(a)Takao, H., Maenaka, K., Higuchi, K., Nizhnik, O., Vinluan, O., Maksudi, U.
 Bartley, T. "ASIC for Monitoring of Human Motion (I)", The 35th Annual

International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'13), Short Papers, 2013, 0525.

(iii) 会社の概要

(a) 基本データ

表2-11 ViSpot株式会社の基本データ

会社名	ViSpot株式会社
本社	〒650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町6丁目3番5号 神戸医療イノベーションセンター KCMI 2F
事業所	〒997-0052 山形県鶴岡市覚岸寺字水上234-1
設立年月日	2017年9月29日
事業内容	ウイルス安全性評価試験等の受託
資本金	40百万円
出資比率	神戸大学教員及び株式会社科学技術アントレプレナーシップ他(50%)、サンスター株式会社(50%)
売上高	—
純利益(2019年12月31日)	▲8522万円
役員	代表取締役 森定 栄人(取締役会議長) サンスター株式会社 執行役員 代表取締役社長 小谷 知子 取締役 山本 一彦 神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科 教授 取締役 内田 和久 神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科 特命教授 取締役 李 仁義 神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科 特命教授 取締役 桂木 康弘 一般財団法人サンスター財団 専務理事 取締役 山本 和司 サンスター株式会社 研究開発本部 部長 取締役 岩隈 良道 サンスター株式会社 事業計画部
URL	https://www.vispot.co.jp/company-profile/

2021年2月現在

(b) 事業の概要

(イ) 各種製品の概要

ウイルスクリアランス試験：対象とする製造工程がウイルスを除去・不活化する能力を有するかどうかを、製造工程のスケールダウンモデルにウイルスをスパイクするチャレンジ試験で検証する。

ウイルス否定試験：対象となる細胞や培養液(被験試料)におけるウイルス存在の有無をいくつかの異なる手法で検出する。

(c) 市場開拓戦略・製品戦略について

(イ) 市場開拓、顧客開拓について

GLP 準拠試験を受注できる信頼性保証体制を整備した。

(イ) 新製品開発の概要

アピ株式会社、株式会社花市電子顕微鏡技術研究所と業務提携し、国内バイオ医薬品ウイルス安全性評価事業を強化している。バイオ医薬品のウイルス安全性評価をすべて国内で実施できるようにすることを目指している。

2.3 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

2.3.1 研究領域の展開状況(展開図)

本研究領域では、2008年から2010年にかけて合計15件の研究課題を採択し、研究途中で3課題が他のプロジェクトへの移行のために終了したが、12件の研究課題は「二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出」という戦略目標の下で研究を遂行した。展開と発展の展開図として図2-6に示した。

戦略目標、達成目標	インプット	アクティビティ/アウトプット	アウトカム(short/mid-term)		アウトカム(long-term)/インパクト													
			～追跡調査時点	今後予想される展開	今後想定される波及効果													
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的技術の創出 達成目標： ・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。	研究総括： 安井 至 研究課題ポートフォリオ： ・エネルギー供給技術 バイオマス、太陽電池、燃料電池 ・エネルギー・電力貯蔵技術 二次電池とキャパシタ ・省エネ・高効率利用技術 半導体インバーターと高効率熱電変換技術 研究代表者 内本 喜晴 河本 邦仁 小島 克己 富重 圭一 吉川 暉 渡邊 信 小川 健一 近藤昭彦 田中 剛 橋詰 保 宮山 勝 辰巳砂 昌弘 山内 美穂 山口 猛央 山崎 聡 15名	研究成果 論文 <table><tr><th>①CREST研究成果の論文数</th><th>②CREST研究成果の継続発展の論文数</th></tr><tr><td>708 (122)</td><td>802(139)</td></tr></table> ()の値はTop10%以内論文数 特許申請・登録 <table><tr><th></th><th>期間中</th><th>終了後</th></tr><tr><td>出願</td><td>国内 175 国際 68</td><td>129 40</td></tr><tr><td>登録</td><td>国内 96 国際 42</td><td>47 9</td></tr></table> ベンチャーの創設 渡邊 ・藻バイオテクノロジー株式会社(代表取締役) ・株式会社MoBiol藻類研究所(代表取締役会長) 近藤 ・株式会社バイオパレット(取締役) ・株式会社シンプロジェン(取締役) ・ViSpot株式会社 ・他3社の設立にも関与 実用化 渡邊 ・ハンドクリーム“Moina”(デンソー(株)と共同開発し、累積販売額1.5億円以上) 小川 酸化型グルタチオンを「カネカペプチド」(株)カネカと共同)	①CREST研究成果の論文数	②CREST研究成果の継続発展の論文数	708 (122)	802(139)		期間中	終了後	出願	国内 175 国際 68	129 40	登録	国内 96 国際 42	47 9	科学技術的および社会・経済的な波及効果 ・東南アジアにおいて重要なCO₂放出源となっている低湿地帯や荒廃地の湛水造林の技術として「湛水馴化処理」を開発(小島) ・バイオマス由来化合物を液体燃料や化学工業原料に変換する各種合金触媒の開発(富重) ・藻類培養プラントなどにおいて、バイオ原油の大幅な生産性向上を達成(渡邊) ・グルタチオン施用による、実利的なバイオマス増産技術や機能性成分を高めたブランド農産物の安定増産法の確立(小川) ・遺伝子組み換え技術、ゲノム編集、メタボローム解析などの先端バイオ技術を活用して、各種微生物を利用する有用物質生産、および微細藻類・シアノバクテリアを利用するCO₂からの直接物質生産など、高効率かつ低環境負荷の有用物生産技術を開発(近藤) ・海洋珪藻 <i>Fistulifera solaris</i> の全ゲノム解読をオイル蓄積珪藻としては世界で初めて完了(田中) ・ペロブスカイト太陽電池の開発による有機薄膜太陽電池の変換効率増大(吉川) ・固体高分子型グリコール酸電解合成装置を作製し、不純物を添加せずにシュウ酸からグリコール酸を連続的に製造することに世界で初めて成功(山内) ・アルカリ燃料電池用の高耐久性電解質膜と触媒の開発(山口) ・多価金属イオン電池、全固体フッ化物イオン電池を開発し高い性能を確認。オペランド解析による反応状態可視化や反応メカニズム解明(内本) ・界面の形成など全固体電池の課題を明確化し、全固体リチウム電池の実用化を推進(辰巳砂) ・リチウムイオン電池に匹敵するエネルギー貯蔵特性を有しつつも、発火性・爆発性の心配が無く車載用や家庭用に適したプロトン型電気化学キャパシタの開発(宮山) ・フレキシブル熱電材料を用いた微小熱発電素子の開発(河本) ・GaN MOS-HEMTの動作安定性の大幅向上(橋詰) ・ダイヤモンド半導体を用いたノーマリーオフ特性を有する反転層チャネルMOSFETの作成に成功(山崎) 展開 山内、山口、CREST「再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出(研究総括：江口浩一)」 波多野睦子(山崎)、CREST「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成(研究総括：桜井 貴康)」 受賞/人材育成等 吉川 瑞宝小綬章(2018) 辰巳砂 大阪府立大学学長、大阪公立大新学長(2022年4月開学) 橋詰 センター長、山内 教授に昇任	・グルタチオン農業のグローバルな展開(小川) ・バイオマスを基盤とするエネルギー循環社会に必須な合金触媒技術の確立(富重) ・藻類のエネルギー、農業、環境産業、化学製品産業、医療・健康産業などへの応用展開(渡邊) ・低分子医薬で達成困難な治療効果を持つバイオ医薬品の開発・製造 ・品質管理等に関する研究(近藤) ・食糧と競合しない海洋光合成微生物の遺伝子組換えによるバイオディーゼル燃料の生産高効率化、有用物質生産との組み合わせによる経済性の向上(田中) ・シリコン太陽電池を超える発電性能を持ち、軽量フレキシブル・低コストなペロブスカイト型太陽電池(吉川) ・バイオマス由来の燃料による高効率燃料電池発電(山内) ・高性能・高耐久な電解質膜と触媒からなる液体燃料利用固体アルカリ燃料電池の実用化(山口) ・リチウムイオン二次電池を超える次世代型二次電池技術の確立(内本) ・全固体Li-S系電池の実用化(辰巳砂) ・高パワー密度/高エネルギー貯蔵密度・高安全性・レアメタルフリーのプロトン型電気化学キャパシタの実用化(宮山) ・GaN MOS-HEMTによる次世代インバータの開発(橋詰) ・結晶成長技術とプロセス技術のさらなる進展によるダイヤモンド電子デバイスの信頼性を確立(山崎) ・フレキシブル微小熱発電素子の健康・医療分野や太陽光熱発電分野などへの応用(河本)	食料問題解決への貢献 藻類を基盤とする多方面における新産業創出 バイオ医薬品による治療効果の増大および適用対象疾病の拡大 バイオディーゼル燃料の実用化 高性能・低価格の太陽光発電の普及 燃料電池の実用化による環境負荷の少ないエネルギー循環システムの構築 革新的な蓄電デバイスの実用化により、スマートグリッド社会の構築に貢献 全固体電池の実用化 EVの本格的普及 次世代パワーデバイスによる省エネルギー社会の構築 エネルギーハーベスティングによるIoT社会の推進 省エネルギー 次世代エネルギー供給 地球環境保護 低炭素化社会の構築
①CREST研究成果の論文数	②CREST研究成果の継続発展の論文数																	
708 (122)	802(139)																	
	期間中	終了後																
出願	国内 175 国際 68	129 40																
登録	国内 96 国際 42	47 9																

図 2-6 CREST 安井領域の展開図

2.3.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献

本研究領域においては、研究終了後もそれぞれ異なるアプローチにより、CO₂抑制手法の開発に向けて取り組んだ。以下に、研究成果の科学技術の進歩への貢献について、各分野について示す。

(1) エネルギー供給技術

①バイオマス

小島は、東南アジアにおいて重要なCO₂放出源となっている低湿地帯や荒廃地における湛水造林の技術として「湛水馴化処理」を開発した。この方法は植栽直前に苗木を湛水状態に置いて通気組織の形成を誘導し植栽地に適合した苗木を育成する方法である。タイ国南部の湿地において、同処理による湿地生熱帯樹木の育成試験を実施し、植栽後の光合成における要因解析を行った。そして活着率の再現性が良い樹種候補を選定した。

富重は、バイオマス由来化合物を液体燃料や化学工業原料に変換する各種合金触媒の開発に取り組んだ。その中でバイオマスタール水蒸気改質に有効なNi-Fe系触媒は、コーク析出量の極めて小さい触媒として貴金属触媒の代替が可能となった。例えば、天然ガス改質反応、再生可能資源バイオマスの合成ガス化、二酸化炭素を原料とした有用有機化合物の合成、多様な再生可能資源からの水素製造などへの応用の可能性があり、共同研究を行っている。

渡邊は、福島県南相馬市の水深0.8mの藻類培養プラントや茨城県小貝川の下水处理場の高深度藻類培養装置において、バイオ原油の大幅な生産性向上を達成した。藻類がもつ限りないポテンシャルを実用化し、新産業創出に発展させるために、筑波大学に藻類バイオマス・エネルギーシステム開発研究センターを創設し、エネルギー、農業、環境産業、化学製品産業、医療・健康産業など多方面への、藻類バイオマスの応用展開を行っている。具体的な展開事例については次節で示す。

小川は引き続き、図2-7¹⁵に示すようなグルタチオン農業の展開に取り組んでおり、岡山県のみならず世界に貢献するグルタチオン農業の確立を目指して研究を行っている。その研究成果は、「第2の緑の革命」¹⁶などの評価を受けている。グルタチオン施用による、実利的なバイオマス増産技術の確立や機能性成分を高めたブランド農産物の安定増産法の確立(トマト、デントコーン、シュンギク、少花粉ヒノキなど)や、農

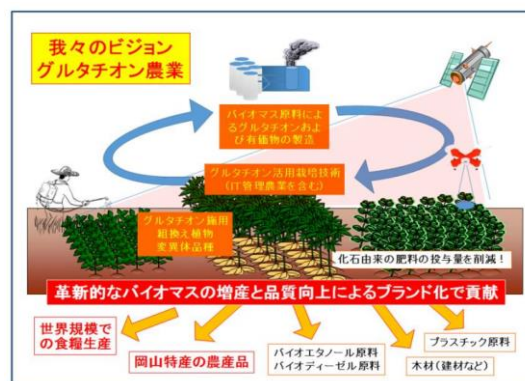


図 2-7 岡山県下をはじめ世界の人々に貢献
するグルタチオン農業の確立を目指した基礎
基盤研究の概念図

¹⁵ 生物科学研究所年報平成 29 年度年報(P60 図 1)

16 緑の革命は、1940年代から1960年代にかけて、高収量品種の導入や化学肥料の大量投入などにより穀物の生産性が向上し、穀物の大量増産を達成した。しかし、さらなる世界人口の増加に伴い、第2の緑の革命が必要と考えられている。

耕地の隣地で農業廃棄物などによるグルタチオンの発酵生産を行う循環を確立してグルタチオン農業を地域に根ざしたものにすることなどに取り組んでいる。具体的な応用事例については次節で示す。

近藤は、微生物(酵母、大腸菌、放線菌、糸状菌など)を利用した有用物質生産、微細藻類・シアノバクテリアを利用したCO₂からの直接物質生産などについて研究を行っている。遺伝子組換え技術、ゲノム編集などの高度なバイオ技術に加え、メタボローム解析をはじめとする先端計測技術を用いることで、有用物質を経済的に、環境に負荷をかけない手法で効率的に生産する技術の開発に取り組んでいる。また、近年、低分子医薬では達成できない治療効果をあげ注目されているバイオ医薬品の開発・製造・品質管理等に関する研究も行っている。

田中は、食糧と競合せず、生産効率がよく、海水で培養可能な海洋光合成微生物を用いたバイオ燃料生産と光合成の二酸化炭素取り込みによる地球温暖化防止を組み合わせた。バイオディーゼル燃料生産の候補株として期待されている海洋珪藻 *Fistulifera solaris* の全ゲノム解読をオイル蓄積珪藻としては世界で初めて完了した。この全ゲノム情報に基づくプロテオーム解析によって油滴上で特異的に発現するタンパク質の存在を明らかにし、脂質代謝機構の解明を目指している。遺伝子組換え技術を用いることで高機能な株を作出することができる。さらに、バイオディーゼル燃料生産だけでは製造コストが下げられないので、冬季でも培養が可能な海洋珪藻を用いて年間を通じた安定的な生産や医薬品原料等の有用物質生産と組み合わせ、バイオディーゼル燃料生産を実現しようとしている。

②太陽電池・燃料電池

吉川は引き続き、ペロブスカイト太陽電池をはじめとする有機薄膜太陽電池の研究に取り組んだ。新構造ペロブスカイト太陽電池においては、変換効率が15%を超えるものができ、実用化に向けて大きな展開を見せた。

山内と山口は、いずれも本研究の成果を後継のCREST研究領域「再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出(研究総括：江口浩一)」(キャリア)¹⁷における2015年度の課題に採択され、研究をさらに発展させている。

山内¹⁸は、上記CREST「キャリア」で「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」(2015年度～2020年度)の研究課題を進めており、再生可能電力を用いて貯蔵性および輸送性に優れた液体キャリアであるアルコールを、バイオ由来のカルボン酸から製造することにより、環境負荷の少ないエネルギー循環システムの実現を目指している。TiO₂触媒がシュウ酸からの電気化学的なグリコール酸合成に有効であることを発見した。基質透過性を持つ膜-電極接合体とそれを用いた固体高分子型グリコール酸電解合成装置を作製し、不純物を添加せずにシュウ酸からグリコール酸を連続的に製造することに世界で初めて成功した。

¹⁷ CREST 研究総括江口浩一 再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出 https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah25-1.html

¹⁸ CREST HP (<https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/project/40/15656567.html>)

山口¹⁹は、ギ酸塩を燃料とするアルカリ燃料電池 (DF-SAFC) のメンブレン電極アセンブリ (MEA) に用いるポリフェニレン系アニオン交換膜の開発に成功し、高いアニオン伝導性能と高耐久性とを実現した。アルカリ環境の燃料電池では触媒金属を白金以外から広く選択できるメリットがある反面、触媒を担持するカーボンの腐食が耐久性の観点から重大な課題となる。上記CREST「キャリア」の研究課題「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」(2015年度～2020年度)において、カーボンを用いない金属のみの触媒、及びカーボン表面が腐食しても内部に高密度の活性点を残す触媒を開発し、高性能・高耐久な電解質膜とあわせて、実用的な液体燃料利用固体アルカリ燃料電池の設計基盤構築を目指している。

(2) エネルギー・電力貯蔵技術

内本は、持続可能な社会の実現に重要な役割を果たす革新的な蓄電デバイスの開発を進めている。マグネシウムイオン二次電池の研究を継続し、マグネシウムイオンは電極反応が遅いという課題の克服や負極・電解質界面の反応機構解明に取り組んだ。リチウムイオン二次電池ではデンドライト生成のため、負極にリチウム金属を使用することが困難であったが、マグネシウムイオン二次電池においては、アニオンの制御によってマグネシウム金属負極を用いることが可能なことを示した。さらに、固体内の拡散係数の大きい1価のアニオンであるフッ化物イオンをキャリアとすることにより、高エネルギー密度化に有利な多価カチオンの酸化還元が利用出来ると考え、フッ化物イオンを利用した全固体フッ化物イオン電池をトヨタ自動車と共同で開発した。これは、1回の充電で1000キロメートルを走る電気自動車として注目されている²⁰。また、リチウムイオンオペランド解析は異なる専門性を有する多くの研究者の共同が必要になるが、内本は研究室内にこれらの専門家を集め、電気化学的評価を中心に据えて、活発な議論を行いながら現象の解明に取り組む体制を構築した。このようなオペランド解析は、リチウムイオン電池の高容量化と安全化に向けた実用的な設計に貢献している。電池を充放電しながら放射光を用いた測定・解析を行うオペランド解析を活用し、正極材料の相転移機構の解明や電池内部の反応不均一性を可視化することに取り組んだ。

宮山は、リチウムイオン電池に匹敵するエネルギー貯蔵特性を有しつつも、発火性・爆発性の心配が無く車載用や家庭用に適したプロトン型電気化学キャパシタを開発した。単原子層シート電極を用い、水溶液を電解液とすることにより、プロトン可動イオンとした。単原子層シート電極においては、プロトンのシート内インタカーションではなく、シート表面の酸素とのプロトンの可逆的反応によって電荷貯蔵が可能となることに加えて、プロトンとの表面反応に2電子反応を用いることにより大容量化出来る。実用的なキャパシタとしての設計指針の確立を図った。

¹⁹ CREST HP (<https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/project/40/15655647.html>)

²⁰ 2020年8月7日 日経電子版

(https://www.nikkei.com/article/DGXMZ062404420X00C20A8TJM000/?n_cid=NMAIL007_20200807_H)

辰巳砂は、早くから固体イオニクスにおけるガラス系材料の優位性に着目し、液系電解質のリチウムイオン電池と同等のイオン伝導性を有し、界面抵抗の小さい固-固界面を形成できるガラス系無機固体電解質材料を数多く創出してきた。また、これらの材料を用いた全固体電池を試作し、その界面の構造を解析・評価することで、全固体電池の課題を明らかにした。さらに、それらの課題の解決手法を提示し、実用化への道筋を明らかにしたことは、全固体リチウム電池の実用化に向けた大きな推進力となった。

(3) 省エネ・高効率利用技術

橋詰は、金属酸化膜半導体(MOS)型GaN高電子移動度トランジスタ(HEMT)におけるMOSゲート構造の界面電子準位をデバイス構造形成後のアニール処理によって制御可能であることを発見し、窒化ガリウムMOS型高電子移動度トランジスタ(GaN MOSHEMT)の動作安定性を飛躍的に向上させた。界面電子準位の解析・制御技術とデバイス作製技術を融合させて、高い動作安定性を有するGaN MOS-HEMTの実現とその次世代インバータ応用を目指している。

河本は、大面積フィルムを低コストで作製できるLESA(液相剥離-自己組織化)プロセスを用いてTiS₂基複合超格子フレキシブル熱電材料を作製した。この材料は100℃以下の低温で高n型熱電性能、力学的柔軟性を示す。p型高分子材料と組み合わせた薄膜モジュールは、温度差70Kで最高出力密度2.5Wm⁻²の世界記録を達成した。このフレキシブル熱電材料は、人の体熱を利用する微小熱発電素子として、健康・医療分野や太陽光熱発電分野などへの応用が期待される。

山崎は、ダイヤモンド半導体を用いたノーマリーオフ特性を有する反転層チャネルMOSFETの作成に取り組んだ。世界で初めて反転層チャネルダイヤモンドMOSFETの動作を実証したことで、ダイヤモンドパワーエレクトロニクスの時代へ展開できると期待される。また、信越化学と共同で、ヘテロ薄膜ダイヤモンド基板を開発した²¹。良好な整流特性、絶縁耐圧を示し、大面積化、低コスト化が期待される。

山崎の共同研究者であった東工大の波多野達はCRESTでの研究ネットワークを生かしてダイヤモンド量子素子の研究を行っている²²。ダイヤモンド結晶中の窒素置換原子と隣接する原子空孔から成る空孔複合体(NVセンター)はスピン三重項状態を持ち、磁場、電場、温度や歪みのセンサとして利用することができる。CRESTでの研究ネットワークが、高品質結晶成長技術に強みがあることが、その後の研究の基盤となった。特に、高密度かつ完全に1方向に配向したNVセンター薄膜の形成に成功し、超高感度磁気センサへの適用が可能となり、このセンサを用いた微小領域における生体現象解析を目指している。

²¹ JST 新技術説明会資料(https://shingi.jst.go.jp/past_abst/abst/p/15/kisoken1/kisoken107.pdf)

²² CREST 研究総括 桜井貴康 素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成研究課題[炭素系ナノエレクトロニクスに基づく革新的な生体磁気計測システムの創出]
https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/project/41/41_03.html

2.3.3 研究成果の社会・経済への貢献

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术の創出」が具体的な目標を与えていることから、本研究領域には社会実装への進展が強く求められている。各研究代表者の研究がそれぞれ進む中で、特に実装の段階に踏み込もうとしているもの、あるいは社会・経済的に貢献している事例、4件を選んで下記に取り上げる。

渡邊は本研究課題を早期終了後、「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」などに注力し、藻類バイオマスエネルギーの実用化に関する数々のプロジェクトに取り組んでいる²³。その一例として、図2-8に福島県南相馬市における微細藻類燃料生産実証事業の概要を示す。筑波大学、東北大学、仙台市の連携により、津波により被災した仙台市の下水処理場において、藻類培養を下水処理と組み合わせ、藻類により生産したオイルを汚泥焼却などに利用する新たな循環システムの構築を目指している。また、デンソーと Botryococcus の炭化水素含有のハンドクリーム”Moina”を開発し、1.5億円を越える累積販売額を達成した²⁴。

小川は、カネカと実施権許諾包括契約を締結し²⁵、酸化型グルタチオンを「カネカペプチド」として、2015年に販売を開始した²⁶。カネカペプチドは日本・米国・中国・東南アジアなど、グローバルに事業を展開しており、カネカの新中期経営計画に食料生産支援の代表として記載されている²⁷。

近藤は神戸大学イノベーション研究科長として研究科の成果を活用したベンチャー企業の立上げに注力し、6社の立上げを支援するとともに、内2社の取締役を務めている。

辰巳砂は本研究課題を早期終了後、JST-ALCAの次世代蓄電池開発(ALCA-SPRING)の「全固体電池チーム」のリーダーとしてプロジェクトを推進している。全固体電池は従来の電解液

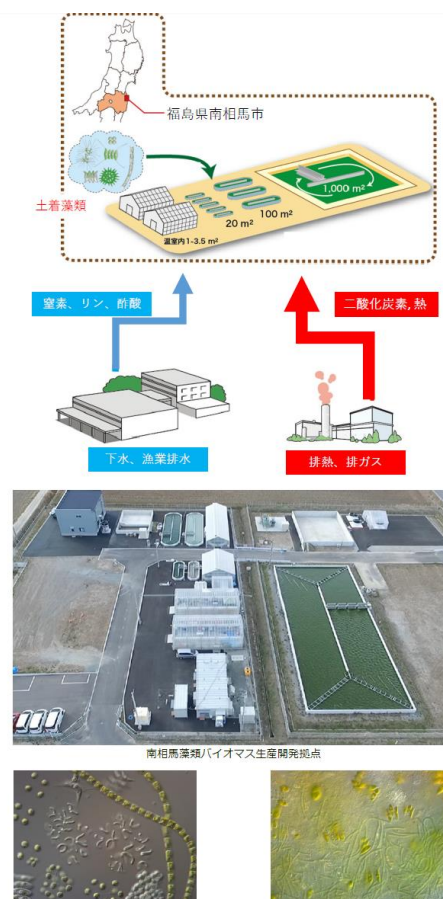


図2-8 福島県南相馬市における微細藻類燃料生産実証事業の概要

²³ 藻類バイオマス・エネルギーシステム開発研究センターHP (<http://www.abes.tsukuba.ac.jp/>)

²⁴ モイナ HP (<https://www.moina.net/>)

²⁵ カネカ プレスリリース (<https://www.kaneka.co.jp/service/news/n20150218/>)

²⁶ 株式会社カネカ北海道 (<https://kaneka-hokkaido.co.jp/business/peptide/>)、カネカ株式会社 R&B 事業本部新規事業開発部 (<https://www.kaneka-gssg.com/index.html>)

²⁷ カネカ新中期経営計画、p32

(<https://www.kaneka.co.jp/topics/uploads/2018/05/%E3%80%90%E3%82%AB%E3%83%8D%E3%82%AB%E3%80%91%E6%96%B0%E4%B8%AD%E6%9C%9F%E7%B5%8C%E5%96%B6%E8%A8%88%E7%94%BB%E3%80%802018.pdf>)

を用いるリチウムイオン電池よりも安全性が高く、大容量かつ長寿命化が期待されていることから、特に、次世代の車載用電池として有望視されている。アメリカ・カリフォルニア州のZEV規制をはじめ、欧州ではパリ協定に基づいて各国でガソリン車・ディーゼル車の販売が禁止されつつあり、中国でも電気自動車(EV)の一定量販売をメーカーに義務付けるなど、EV化を推し進めている。このような状況で、全固体電池にはCO₂削減の観点から大きな期待が集まっている。

2.3.4 その他の特記すべき事項(新たな展開や分野間融合)

辰巳砂は大阪府立大学の学長となったが、研究活動を継続している。さらに、2022年4月に開学する大阪公立大の新学長に就任することが決定している²⁸。橋詰はセンター長、山内は教授に昇任した。

²⁸ 公立大学法人大阪 プレスリリース (https://www.upc-osaka.ac.jp/press/200923_3/)

第 3 章 各研究課題の主な研究成果²⁹

3.1 2008 年度採択研究課題

- ・低炭素社会のための s-ブロック金属電池 (内本 喜晴)
- ・高効率熱電変換材料・システムの開発 (河本 邦仁)
- ・熱帯泥炭の保全と造林による木質バイオマス生産 (小島 克己)
- ・触媒技術を活用する木質系バイオマス間接液化 (富重 圭一)
- ・有機薄膜太陽電池の高効率化に関する研究 (吉川 暹)
- ・オイル産生緑藻類 *Botryococcus* (ボトリオコッカス) 高アルカリ株の高度利用技術 (渡邊 信)

²⁹ 2.2.1 の助成金は、各研究代表者の助成金総額が 1 千万円/件以上のものを示したのに対し、この章の「展開している事業」欄の記載は、この基準によっていない。

低炭素社会のための s-ブロック金属電池

内本 喜晴(京都大学総合人間学部自然科学系・教授)

研究期間 2008 年 10 月～2014 年 3 月

展開している事業:

科研費基盤(A)2 件、JST 未来社会創造、

CREST の成果:

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い、マグネシウムイオン二次電池については実現可能性を世界に先駆けて示した。

発展:

1. マグネシウムイオン二次電池の設計

マグネシウムイオン二次電池の研究を継続し、特に、負極・電解質界面の反応機構解明に取り組んだ。

ビスマス金属負極界面反応を促進するためにマグネシウムイオンとアニオン間の相互作用を弱めることが重要であること、またアニオンの還元分解を抑制することが可逆的なマグネシウムの析出溶解にとって重要な因子であることを見出した(図 1)。

その結果、マグネシウムイオン二次電池はアニオンの制御によってマグネシウム金属負極を用いることが可能であることを示した。マグネシウムはデンドライト成長しないので金属負極が使いやすいという点も大きなメリットである。車載用途では体積エネルギー密度が重要であり、マグネシウム二次電池は有利である。一方、レートが低い点が課題である。

2. 正・負極内のリチウム組成変化の電池動作下における同時測定^{2,3}

リチウムイオン二次電池を充放電させながら、コンプトン散乱 X 線スペクトルを測定し、独自に開発した S パラメータ解析法を組み合わせることにより、動作下におけるリチウムイオン濃度分布を明らかにした。正・負極内のリチウム組成変化の同時解析が可能となり、充電時にセパレータと負極との界面付近にリチウムイオンの偏析がみとめられた(図 2)。

3. 全固体フッ化物イオン電池の開発⁴

トヨタ自動車と共同で、リチウムイオンのかわりに 1 価のアニオンであるフッ化物イオンを用いた次世代電池を提案した(図 3)。フッ化物イオンは最もイオン半径が小さく固体内の拡散係数が大きく、また高エネルギー密度化に有利な多価カチオンの酸化還元を利用することが可能である。さらに、固体電解質の使用も可能で、全固体電池として有利である。正極としてフッ素と銅やコバルトを含む化合物、負極としてランタン系化合物を用い、エネルギー密度でリチウムイオン電池を大きく上回る性能を確認した。

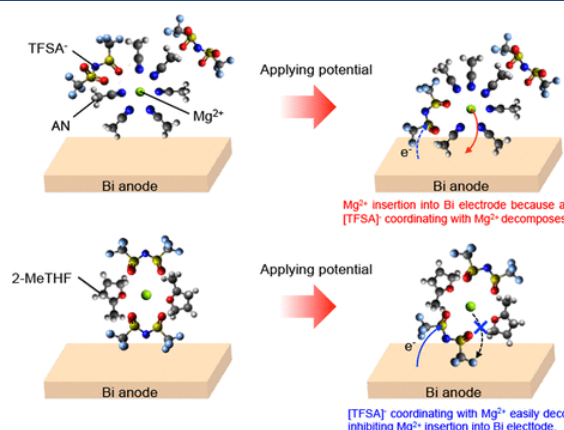


図 1. マグネシウムイオンとアニオン間の相互作用とマグネシウム析出溶解の関係¹

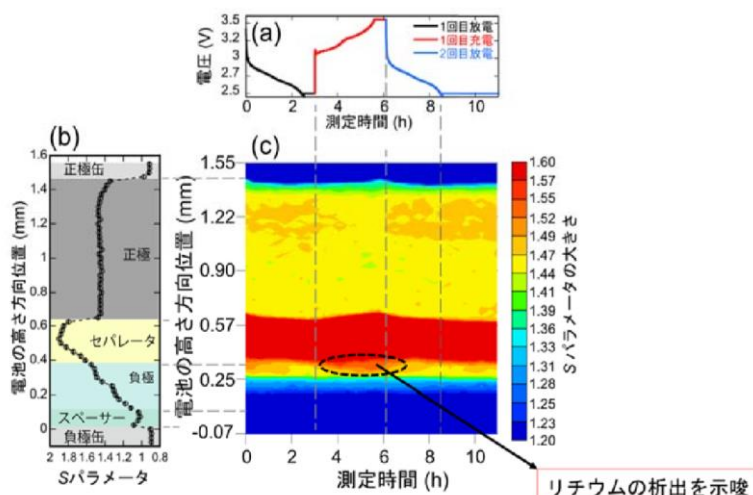


図 2. (a)測定時の充放電曲線 (b)コンプトン散乱 X 線スペクトル (c)リチウムイオン濃度分布^{2,3}

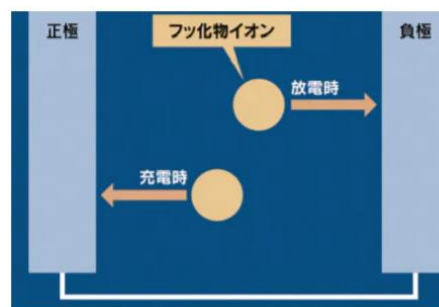


図 3. 全固体フッ化物イオン電池の構成⁴

¹ Hattori M. et al., J. Phys. Chem. C, 2018, 122(44), 25204–25210. ² 京都大学など、プレスリリース, 2017 年 8 月 7 日、³ Suzuki K. et al., J Synchrotron Radiat, 2017, 24 (5), 1006–1011. ⁴ 日本経済新聞電子版 2020 年 8 月 7 日

高効率熱電変換材料・システムの開発

河本 邦仁(公益財団法人名古屋産業科学研究所・上席研究員)

研究期間 2008 年 10 月～2014 年 3 月

展開している事業:

科研費基盤研究(B)

CREST の成果:

1. フレキシブル TiS_2 /有機複合超格子熱電材料を開発。
2. n 型 $\text{Mn}_3\text{Si}_4\text{Al}_2$ を新規開発。p 型 $\text{MnSi}_{1.75}$ と組み合わせたモジュールにより最高出力密度 $3.2\text{kW}/\text{m}^2$ を達成。
3. 室温～ 50°C 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提案し原理検証した。

発展:

1. フレキシブル n 型 TiS_2 /有機超格子熱電材料の低温合成プロセスを開発¹²

液相剥離-自己組織化(Liquid exfoliation - Self-assembly : LESA)プロセスにより TiS_2 /有機超格子フィルムを低温合成することに成功し(図 1)、フレキシブルデバイスの低コスト製造に応用できることを提案した。

LESA 法で作製した n 型フィルムと別に作製した p 型導電性高分子フィルムと組み合わせた薄膜モジュールを試作して、温度差 10K – 70K で高出力密度を達成した(図 1 左下)。

2. フレキシブル熱電素子のエネルギーハーベスティングへの応用³⁴

本研究で開発したフレキシブル熱電デバイスを IoT 端末電源やウェアラブルエレクトロニクス・フォトンクス用電源などへ応用できることを提唱した(図 1 右)。

3. 太陽光・熱ハイブリッドシステムの構築⁵

ペロブスカイト太陽電池(PSC)/熱電モジュール(TE)のタンデムシステムにより、光電変換効率 23%以上を達成した(図 2)。また、室温高性能熱電材料の開発やシステムの最適構造設計により高効率化が可能なことを示唆した。今後、太陽光・熱エネルギーの同時変換によって発電効率を格段に上げて行ければ、 CO_2 排出削減に資することが可能になると期待される。

特記事項: 中国の 3 大学(清華大学、南京工業大学、桂林電子科技大学)をはじめ、サウジアラビア(アブドゥルアジズ国王大学)、韓国(慶熙大学)、豪州(ニューサウスウェールズ大学およびウーロンゴン大学)の計 7 大学と熱電変換材料及びデバイス応用に関する共同研究を行い、5 年間で 34 報の共著論文を発表した。英・仏に拠点を持つ日系企業研究所が、河本らの発表論文を参考にフレキシブル熱電素子の LESA 法を検討し、特許申請した。

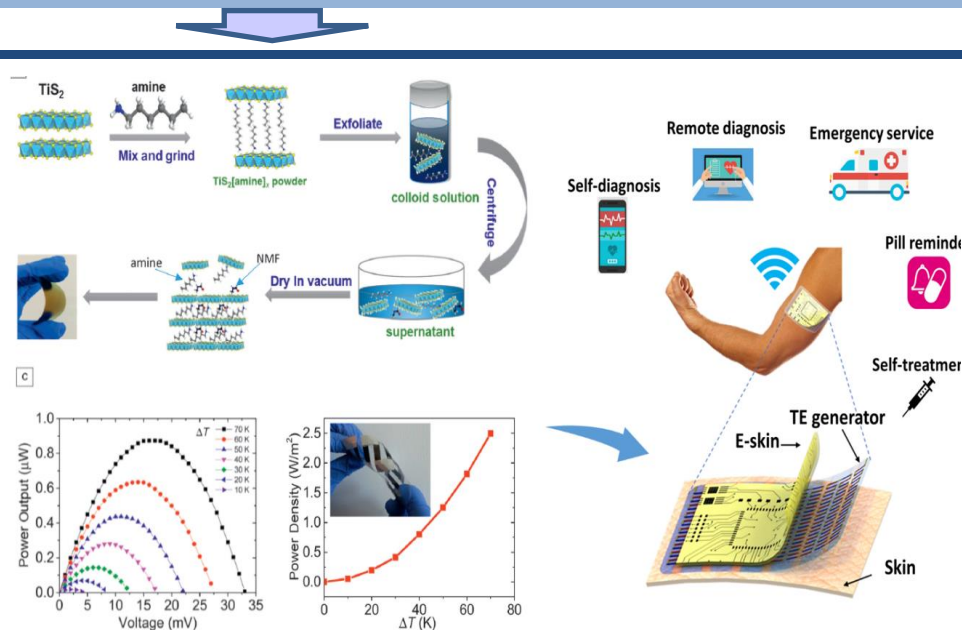


図 1. 薄膜熱電デバイスによる人体熱発電で電子スキンを駆動する^{12,34}

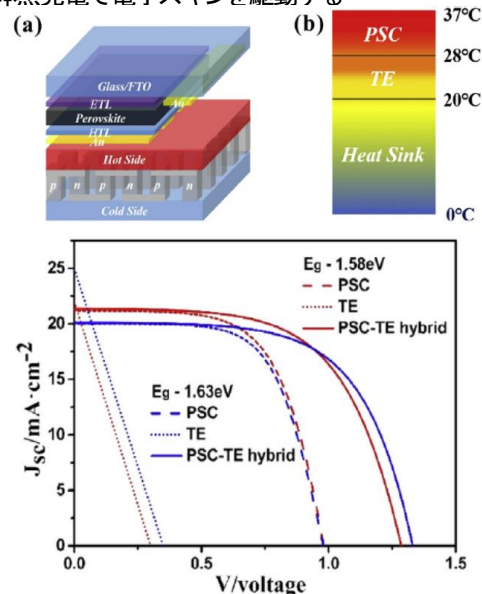


図 2. ペロブスカイト太陽電池 ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(\text{I}_{0.95}\text{Br}_{0.05})_3$)/熱電モジュール直列回路により光電変換効率を向上(B の温度分布下で電流密度-電圧特性を測定した結果が下グラフ)⁵

¹ Wan C, Koumoto K et al., Nature Mat., 2015, 14, 622–627; Wan C. et al., Nano Energy, 2016, 30, 840–845; Tian R. et al., J. Mater. Chem. A, 2017, 5, 564–570; Wan C. et al., Nature Commun., 2017, 8, 1024. ² Tian R. et al., “Organic Thermoelectric Materials”, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 2019, pp.246–273. ³ Tian R. et al., MRS Bull., 2018, 43 (3), 193–198. ⁴ Tian R. et al., Joule, 2019, 3, 1399–1403; Gao J. et al., J. Mater. Chem. A, 2017, 5, 24740–24748; Zong P. et al., Small, 2020, 16, 1901901. ⁵ Zhou Y. et al., Mater. Today Energy, 2019, 12, 363–370.

熱帯泥炭の保全と造林による木質バイオマス生産

小島 克己(東京大学アジア生物資源環境研究センター・教授)

研究期間 2008 年 10 月～2014 年 3 月

展開している事業:

科研費基盤研究(B)

農林水産省受託事業

CREST の成果:

- ・変動水位環境下における熱帯泥炭土壌からの二酸化炭素放出の予測モデルを構築した。
- ・湛水湿地に適した造林技術を開発し、湿地林再生による二酸化炭素排出削減ポテンシャルを推定した。
- ・泥炭湿地林における造林候補樹種の材質特性の把握と用材利用の適性を明らかにした。
- ・メラルーカ樹皮と熱可塑性樹脂の木質複合ボードを新規考案した(特許申請)。
- ・泥炭保全、造林からバイオマスの最適利用までのシステムを提示し、温室効果ガス収支、経済性を評価した。

発展:

1. 熱帯湿地における排水路水位の制御による CO₂ 放出量および火災リスクの低減¹

インドネシア共和国において、排水路水位の制御に伴う CO₂ 放出量および火災リスクの低減効果の定量的評価を行い、熱帯泥炭湿地の保全と農業活動のバランスの検討を進めている(図 1)。

2. 畑地における温室効果ガス排出抑制に関する研究^{2,3}

畑地における温室効果ガス排出では、施肥による N₂O 排出が最も多く、施肥と N₂O 排出量の関係について室内実験および圃場実験により明らかにした。沖縄の島尻マージ(石灰質の濃い赤土)² やサトウキビ畑³ からの N₂O 排出量の測定結果について DNDC(DeNitrification and DeComposition)モデルシミュレーションを用いて考察した。

3. 熱帯荒廃湿地の湛水造林の技術開発^{4,5}

タイ国南部の湿地において、植栽直前に苗木を湛水状態に置いて通気組織の形成等を誘導し植栽地に適合した苗木を育成する「湛水馴化処理」による湿地生熱帯樹木の育成試験を行い、適用可能な樹種を明らかにした(図 2)⁵。熱帯泥炭湿地の環境造林に広く適用できる技術が開発され、CO₂ 排出削減に貢献することが期待される。

4. 曲げ加工に適した木材の非破壊選別技術の開発⁶

大館曲げわっぱ協同組合、大館市、東北森林管理局米代東部森林管理署との間で、曲げわっぱに適したスギ人工林材の選別手法の確立に向けた産学官連携協定を締結した。また、国内の家具メーカーおよび自動車内装メーカーと熱帯早生樹を含めた木材の曲げ加工技術の共同研究を実施した。

特記事項: 京都大学、茨城大学と熱帯湿地における排水路水位の制御に伴う CO₂ 放出量および火災リスクの低減効果について共同研究を行った。沖縄県農林水産部森林資源研究センターと沖縄の有用樹木の材質特性について共同研究を行った。インドネシア共和国ボゴール農科大学と「熱帯泥炭地域の森林火災発生メカニズム解明と生態系リスク・マネジメントの共創」で共同研究(科研費)を行った。タイ国王室チャイパッターナ基金とタイ国ナコンシタマラート県の湿地試験地において共同実証試験を行った。

再湛水化と造林による木質バイオマス生産システムの構築

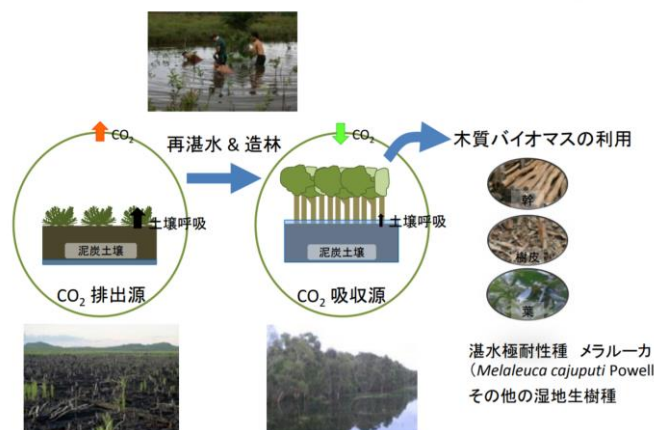


図 1. 熱帯泥炭湿地の開発と二酸化炭素放出⁴



図 2. 苗畑における湛水馴化処理苗

¹ 吉田貢士ら, 土木学会論文集 B1(水工学) 2019, 75 (2), 1355-1360. ² Bellido J. et al., Appl. Ecol. Environ. Res., 2015, 13 (4), 981-992. ³ Bellido J. et al., Appl. Ecol. Environ., 2015, 13 (2), 339-348. ⁴ 森林再生テクニカルノート技術集 湿地(<https://jifpro.or.jp/tpps/>). ⁵ 則定真利子ら, 第 127 回日本森林学会大会 (2017). ⁶ 足立幸司ら, 秋田県立大学ウェブジャーナル A, 2015, 3, 8-14.

触媒技術を活用する木質系バイオマス間接液化

富重 圭一(東北大学大学院工学研究科・教授)

研究期間 2008 年 10 月～2011 年 3 月

展開している事業:

NEDO 先導的技術創出事業、科研費基盤研究(S)・(A)、JSPS NEXT・二国間交流事業

CREST の成果:

- ・バイオマスタールの水蒸気改質に有効なハイドロタルサイトを前駆体とする Ni-Fe 合金触媒を開発した。
- ・安価な鉄酸化物を担体に用いた高活性水性ガスシフト触媒を開発した。
- ・DME/炭化水素合成といった複数触媒反応工程を一段に行う新規カプセル触媒を開発した。



発展:

1. バイオマスタール水蒸気改質に有効な各種合金系触媒の開発^{1,2}

ハイドロタルサイトを前駆体とする合金触媒として、Ni-Fe に限らず、Co 系合金でも長寿命・高コーク析出耐性でバイオマスタール水蒸気改質によるガス化活性を示す触媒を開発した(図 1)。また、Pd との合金化により酸化耐性が向上し、酸化改質にも適用可能となった。

Ni-Fe 系触媒は、コーク析出量の極めて小さい触媒として貴金属を代替する可能性があり、他の改質反応へ応用する共同研究を実施している。

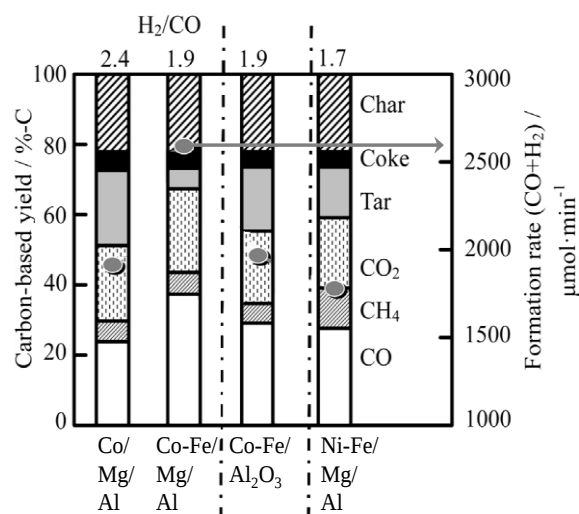


図 1. 各種合金触媒によるバイオマスタール水蒸気改質反応結果¹

2. 藻類バイオマスから液体燃料を合成する Ru 触媒の開発^{3,4}

藻類バイオマスが含む重質油を選択的水素化分解し、ガソリンやジェット燃料に有用な分岐炭化水素を得る触媒として、セリア担持 Ru 触媒を開発した(図 2)。

特記事項: NEDO 環境調和型製鉄プロセス技術開発において日本製鉄とメタン酸化改質用触媒開発を受託。燃料改質用触媒の開発として 2 社と共同研究。本研究領域内の筑波大学・渡邊信を含む共同研究で藻類バイオマスの変換触媒を開発。JSPS-NSFC 日中二国間交流事業として Chinese Academy of Sciences とバイオマス変換触媒について共同研究。

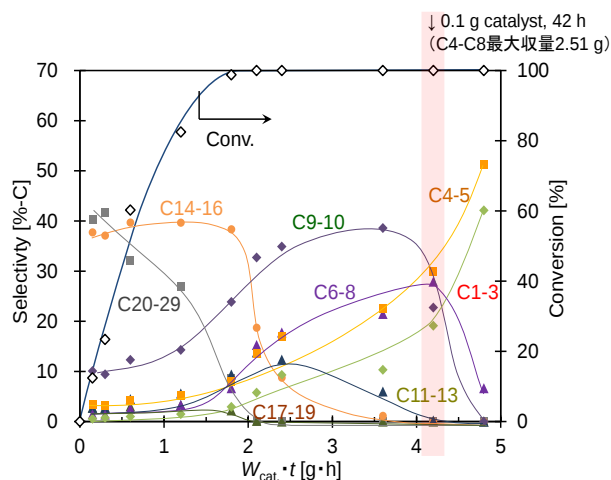


図 2. Ru/CeO₂触媒によるスクアラン分解結果³

¹ Wang L. et al., Appl. Catal. B: Environ., 160–161, 2014, 701–715. ² Chen J. et al., Appl. Catal. B: Environ., 179, 2015, 412–421. ³ Oya S. et al., ChemSusChem, 8, 2015, 2472–2475. ⁴ Nakagawa Y. et al., ChemSusChem, 10, 2017, 189–198.

有機薄膜太陽電池の高効率化に関する研究

吉川 暹(京都大学・名誉教授、(一社)イノベーションエネルギー・理事、大阪国際サイエンスクラブ・理事)

研究期間 2008 年 10 月～2014 年 3 月

展開している事業:

経産省・SAPOIN 事業(戦略的基盤技術高度化支援事業)、環境省・CO₂ 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業

CREST の成果: 有機薄膜太陽電池(OPV)のパイオニアグループとして、4%に過ぎなかった変換効率を、研究期間中に、OPV で 9.5%、ペロブスカイト(PVK)太陽電池で 11.7%とするなど、いずれも当時のトップデータを実現した。同時に、最大の pn 有機半導体の化合物ライブラリーを創生するとともに、理想的な超階層ナノ構造素子の実現に向け多数のセル構造を提案実証した。

発展:

1. 新構造 OPV、PVK の実用化に向けた展開¹

有機薄膜太陽電池(OPV)実用化を目指し、環境省のプロジェクトにおいてゼロエネルギーファーム ZEF の実証をした(図 1)。

ペロブスカイト太陽電池の変換効率は、世界では 20%を超えるところまでできたが、Ti 基板を用いた新構造ペロブスカイト(PVK)太陽電池で 15%を超え、実用化に向けて進展した。経産省の SAPOIN の 2 期目を提案中である。2019 年 9 月に(一社)イノベーションエネルギーを立ち上げ、企業と共に、独立分散型エネルギー開発を進めている(理事に就任)。

2. 半導体材料ライブラリーの創製

フラーレンを中心に、新たな n 型半導体ライブラリーを創製し、京都大学、大学共同利用機関法人自然科学研究機構分子科学研究所をはじめとする多くの研究グループに提供した²。また、低分子 p 型半導体の計 32 化合物からなるライブラリーを構築した。これまでに定量的指標のなかった成膜性と化合物の構造の相関を SP 値で説明することに成功した。

3. 非真空下での気相薄膜形成手法による有機/無機薄膜太陽電池の作製プロセスの開発

従来のスプレー塗布法に代わる非真空下での気相薄膜形成手法(ミスト法)として、ポリチオフェンとフラーレン誘導体からなるバルクヘテロ接合のみならず、酸化亜鉛の前駆体を超音波噴霧させる有機/無機混合型の薄膜塗布プロセスについて検討し、素子の光電変換特性に影響を及ぼす種々の因子を明らかにした。

4. ペロブスカイト太陽電池用高純度化前駆体材料の開発と^{3,4} 実用化に向けたベンチャー企業の設立(若宮)⁵

高品質なペロブスカイト半導体の作製を可能にする独自の高純度化前駆体材料を開発し、再現性良く高性能のペロブスカイト太陽電池を作製できることを見出した。本材料は、東京化成工業株式会社(東京化成工業)より市販化され、本分野での標準材料として国内外で広く利用されている(図 2)⁶。また、京都大学発ベンチャー「株式会社エネコートテクノロジー」を設立し、NEDO、JST COI、JST ALCA などのプロジェクトを実施中であり、また国内企業との共同開発研究を進め、広く社会実装に向けた取り組みを展開している(図 3)。

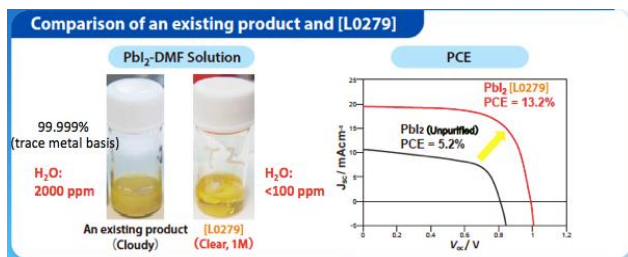


図 2. 国内試薬メーカー(東京化成工業)より市販されペロブスカイト太陽電池用高純度化前駆体材料⁴

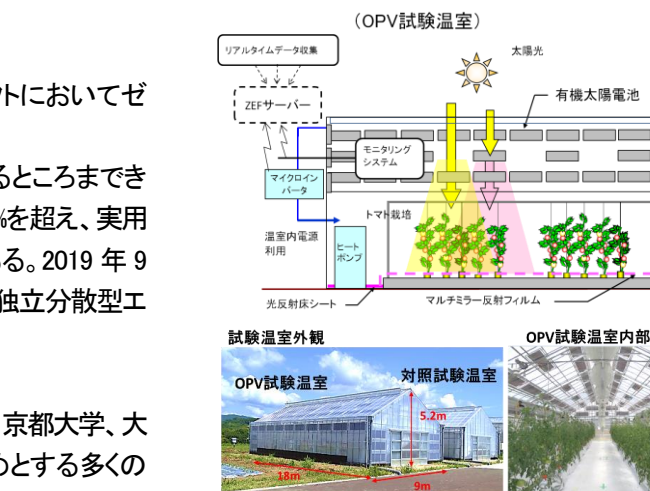


図 1. 施設園芸における農電併産 ZEF の実証実験

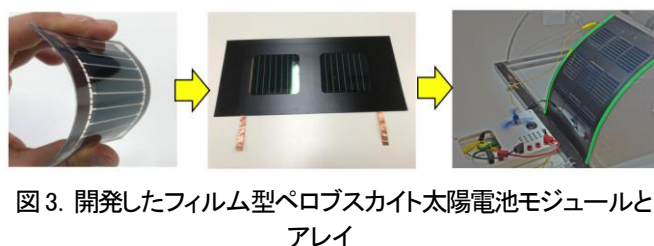


図 3. 開発したフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールとアレイ

¹ 吉川暹 シンビオ研究会発表資料(http://symbio-newsreport.jp.org/files/upload/report/presentation_1568778070.pdf#f#) ² 特許第 5730031 号(米、中で登録) ³ Wakamiya A. et al., Chem. Lett. 2014, 43, 711-713. ⁴ Ozaki M. et al., Angew. Chem. Int. Ed. 2019, 58, 9389-9393. ⁵ 株式会社エネコートテクノロジーズ (<https://www.enecoat.com/profile/>) ⁶ 東京化成工業(株) ウェブサイト <https://www.tcichemicals.com/JP/ja/support-download/tcmail/application/168-16>, <https://www.tcichemicals.com/JP/ja/support-download/tcmail/application/164-06>.

オイル産生緑藻ボトリオコッカス高アルカリ株の高度利用技術

渡邊 信(筑波大学藻類・バイオマス・エネルギーシステム開発センター・特命教授)

研究期間 2008 年 10 月～2012 年 3 月

展開している事業:

農林水産省(農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業)、インドネシアにおける POME to Value by Algae 事業

CREST の成果: 高い炭化水素生産能力をもつ *Aurantiochytrium* 株の発見、*Botryococcus* 増殖に最適な培養条件の決定、炭化水素合成に係る遺伝子配列の決定、除草剤耐性株の開発、エネルギー収支の観点から有効である藻体濃縮法と炭化水素抽出法の開発、全工程におけるコスト・エネルギー収支改善に資する培地の開発、室内でのタネ培養～屋外試験プラント～屋外デモプラントまでのシステム開発を行った。



発展:

1. 混合栄養型藻類ポリカルチャーと水熱液化による効率的なバイオ原油生産技術(図 1)¹⁾

福島県南相馬市の水深 0.8m の藻類培養プラントでは 88 トン/ha/年の高いバイオマス生産と 40 トン/ha/年を超えるバイオ原油生産を可能にした。さらに茨城県小貝川の下水处理場に設置した高深度藻類培養装置で 463 トン/ha/年のバイオマス生産を実現し(図 1)、バイオ原油の生産は > 200 トン/ha/年と大幅に生産性が向上した(図 2)。



図 1. 一次処理水+汚泥可溶化液を使った藻類培養装置¹⁾



図 2. 水熱液化によるバイオ原油¹⁾

2. *Aurantiochytrium* を活用したパームオイル工場排液(POME)の利用・浄化ならびに高付加価値産物の生産²⁾

多価不飽和脂肪酸 DHA を産生する *Aurantiochytrium* が POME の BOD 成分を利用して増殖することで、温室効果ガスメタンの発生源となる POME の BOD を減少させるとともに、増殖した *Aurantiochytrium* から DHA を抽出精製する技術を開発した(図 3)。



図 3. 溶媒をつかた DHA オイル抽出

3. *Botryococcus* と *Aurantiochytrium* およびそれが産生する炭化水素の機能と応用³⁾

両種の細胞エタノール抽出液に抗炎症・アンチストレス・アンチエイジング機能があることを確認した。さらに *Botryococcus* が産生する炭化水素ボトリオコクセンからチオールエン反応により様々な誘導体を作る技術を開発した。炭化水素抽出後の残渣は水素リッチであり、炭化することにより電磁気シールド機能を持つ材料を生産する技術を開発した。

4. 混合栄養型藻類を活用した低炭素型バイオプラスチック製造法⁴⁾

混合栄養型藻類の *Euglena* が産生するパラミロンと *Monoraphidium* が産生する脂肪酸を重合させることで高機能性バイオプラスチックを低炭素で生産する技術を開発した(図 4)。

特記事項: 2019 年に *Aurantiochytrium* を活用して、POME の環境・社会・経済問題を解決する事業を国際的に推進するため、日本に MoBiol Corporation、シンガポールに MiBiol Holdings、インドネシアに PT MoBiol AlgaeIndonesia を設立、さらにバイオ燃料生産事業をスタートするため、2020 年 2 月日本に NuFuel 株式会社を設立した。

多くの企業との共同研究を実施した(大半非公開)。デンソーと *Botryococcus* の炭化水素含有のハンドクリーム”Moina”を開発し、累積販売額は 1.5 億円をこえている。バイオプラスチックは三菱マテリアル、NEC および藻バイオテクノロジーと、藻類/バイオ原油は藻類販業創成コンソーシアムに加盟する 9 企業と 6 年間の共同研究を実施した。*Botryococcus* の国際的研究開発は、フランスの CNRS のサポートをうけ、ナント大学、米国の UCSD、オーストラリアのマードック大学と共同研究、情報交換、人材交流を実施しており、さらに継続することとなった。

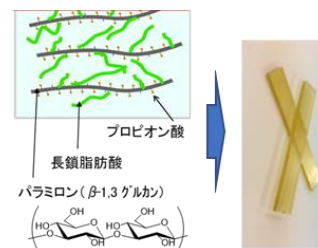


図 4. パラミロンと長鎖脂肪酸から合成したバイオプラスチック⁴⁾

¹⁾ 平成 30 年度微細藻類を活用したバイオ生産のための実証事業報告書。 ²⁾ 特開 2020-54391, WO2020/036216。 ³⁾ Wang A. et al., J. Materials Sci. Chem. Engineer., 2017, 5, 22-34。 ⁴⁾ 筑波大学プレスリリース(<https://www.tsukuba.ac.jp/wp-content/uploads/201710161500.pdf>)。

3.2 2009 年度採択研究課題

- ・CO₂ 固定の新規促進機構を活用したバイオマテリアルの増産技術開発 (小川 健一)
- ・海洋性藻類からのバイオエタノール生産技術の開発 (近藤 昭彦)
- ・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 (田中 剛)
- ・異種接合 GaN 横型トランジスタのインバータ展開 (橋詰 保)
- ・プロトン型大容量電気化学キャパシタの研究 (宮山 勝)

CO₂ 固定の新規促進機構を活用したバイオマテリアルの増産技術開発

展開している事業：
農林水産省関係 4 件、他 1 件

小川 健一(岡山県農林水産総合センター生物科学研究所細胞工学研究部
門植物レドックス制御研究グループ 部門長兼グループ長)
研究期間 2009 年 10 月～2015 年 3 月

CREST の成果: 内生ペプチド「グルタチオン」が、植物の栄養吸収を高め、光合成を賦活化することを示し、その分子・生化学的メカニズムの解明を行った。同時にフィールドでのグルタチオン施用を行い、「緑の革命」の効果を超えるバイオマス生産性の向上を達成させることが可能であることを示した。グルタチオンが発酵生産されることも考慮して、持続可能な循環型農林業構想「グルタチオン農業」を提唱した。

発展:

1. 酸化型グルタチオンを配合した高機能性肥料の開発¹

酸化型グルタチオンを配合した高機能性肥料を開発し、養分吸収および光合成機能を高め、平均 10～40%の増収(Max では収量 2.5 倍)を達成した。

2. カラマツ苗とヒノキ苗および各種栽培の高効率生産技術の確立^{2,3}

カラマツ需要を受け植林が進められているが、種子不足が深刻で安定苗生産が難しい。グルタチオン施用により増殖効率を 6 倍以上に高めることに成功した(図 1)。

ヒノキの造林用苗は地上部の大きさ(高さ、太さ)だけでなく、根系が良好に発達していることが条件である。グルタチオン施用により根系の発達を促して大幅に歩留を高めることに成功した。

グルタチオン施用により、各種の栽培技術の大幅な効率改善を達成した(図 2)。

3. アミノ酸高含有植物の製造方法の確立(図 3)^{4,5,6}

植物体のアミノ酸含量を 2 倍以上に高めることは、従来は遺伝子組み換え手法でしか達成できなかったが、グルタチオン施用と環境条件の設定を行い、アミノ酸高含有の植物の作成に成功した。オルニチンやシトルリンなどのアミノ酸を 1000 倍前後にまで高めることに成功し、新しい食材の可能性を提供した。

特記事項: カネカと実施権許諾包括契約を締結し、酸化型グルタチオンを生産し、「カネカペプチド」として、2015 年に販売を開始した。農林水産省研究ネットワーク「グルタチオン農業の実現を目指す技術開発ネットワーク」に参画する大学、公立機関・団体、民間企業等への技術指導を実施した。



図 1. グルタチオン施用によるカラマツ苗の伸長と根系発達促進 (Control の対照に対して T1 と T2 がグルタチオン施用区)



図 2. グルタチオンの農林業での利用(C の対照に対して、G がグルタチオン施用区)

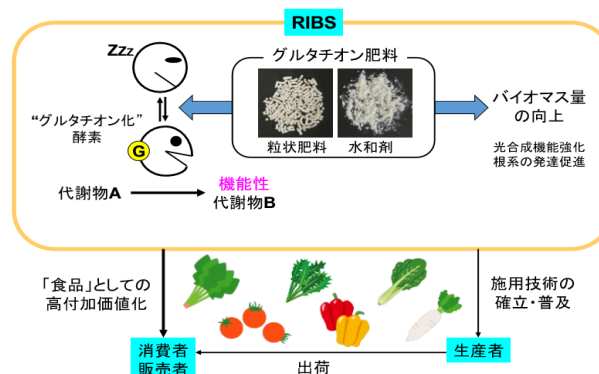


図 3. ブランド農産物の安定増産法の確立の概念図⁵

¹ WO2008072602(日本の他 6 か国で登録) ² 小川健一, 山林, 2019, 1616, 60-67. ³ 森林総合研究所第 4 期成果「カラマツ種苗安定供給のための技術開発(印刷配布版)」&「新しいコンテナ苗生産方法の提案」 ⁴ 岡山県生物科学研究所平成 29 年度研究年報, 2018, 59-78. ⁵ 岡山県生物科学研究所平成 30 年度研究年報, 2019, 64-81. ⁶ WO2013088956(日本の他 4 か国)

海洋性藻類からのバイオエタノール生産技術の開発

近藤 昭彦(神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科・教授)

研究期間 2009 年 10 月～2015 年 3 月

展開している事業:

AMED 2 件、科研費基盤研究(B)、他 2 件

CREST の成果:新規アミラーゼ発現酵母の作出、脱水処理の開発と発酵条件の検討をし、藻類を糖質源とした高生産量・高生産速度・高収率のエタノール生産プロセスを開発した。エタノール濃度 43 g L^{-1} 、エタノール生産速度 $16 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、またエタノール収率 84%となり、これまでの藻類からのエタノール生産の中で最も高濃度にエタノールを生産することに成功した。

発展:

1. 微細藻類・シアノバクテリアを利用した CO_2 からの直接物質生産^{1,2,3,4,5,6}

微細藻類やシアノバクテリア(ラン藻)は光環境下で CO_2 を吸収し、オイルや有用物質等を直接生産することができる。さらに、メタボローム解析等の先端計測技術を用いて分子レベルでの代謝メカニズムを解明することにより、藻類が元々作らない有用物質を作らせることが可能とした。微細藻類を用いたバイオ燃料の生産の向上(図 1)^{1,2}、ラン藻による CO_2 からのコハク酸生産の大幅な生産向上^{3,4}、また高増殖性の海洋ラン藻によるアスタキサンチンの効率的生産^{5,6} などの成果をあげた。

2. 微生物(酵母、大腸菌、放線菌、糸状菌など)を利用した有用物質生産^{7,8,9,10}

微生物は様々な有用物質の生産に用いられるが、遺伝子組換え技術を利用して細胞内で特定の遺伝子の発現を強化あるいは抑制することで、微生物の物質生産能力を向上させることができる。酵母や大腸菌などの微生物を対象として、バイオインフォマティクスやゲノム編集等の先端的な遺伝子工学技術を活用することにより、Design(設計)–Build(構築)–Test(評価)–Learn(学習)の微生物育種フロー(DBTL サイクル)を開発した(図 2)。

この手法により、鎮痛薬等の医薬品原料として使用されるベンジルイソキノリンアルカロイド(BIA)の前駆体テトラヒドロパパペロリンの生産性を向上させることができた^{7,8}。また、抗腫瘍薬等の医薬品や化成品の原料となる 1,2,4-ブタントリオール生産のボトルネックが、異種生物由来の鉄硫黄タンパク質による反応であることを明らかにし、酵母の鉄代謝機構の改変により、バイオマス(稲わらの水熱処理物)を原料とした生産性向上を実現した^{9,10}。

3. バイオベンチャー企業の設立¹¹

神戸大学のイノベーション研究科長として、大学の資金は一切使わずにベンチャー企業の創業支援と投資育成を行う「神戸大学スキーム」を立上げ、研究科の成果をシーズとしたベンチャー企業 6 社の設立を支援した(表 1)。

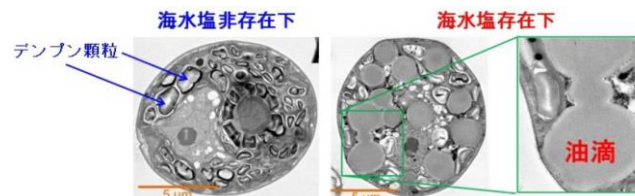


図 1. 海水塩の有無による細胞形態の違い。細胞内で油脂生産時に起こる代謝変化をメタボロームレベルで捉えた。²

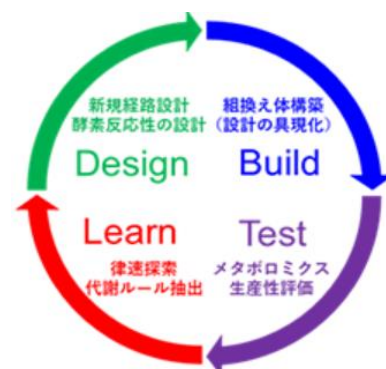


図 2. DBTL サイクルによる有用物質を大量に生産できる高機能微生物の迅速な開発⁸

表 1 神戸大学発バイオベンチャー概要

社名	資本金等	事業内容等
(株)バイオバレット 設立: 2017 年 2 月	776 百万円	ゲノム編集(米系大手 VC より資金調達)
(株)シンプロジェン 設立: 2017 年 2 月	1,118 百万円	DNA 合成(大手バイオベンチャーと提携)
ViSpot(株) 設立: 2017 年 9 月	40 百万円	ウイルス安全性評価(サンスターとの JV)
アルジー・ネクサス(株) 設立: 2019 年 1 月	4 百万円	微細藻類関連
(株)シンアート 設立: 2019 年 3 月	10 百万円	合成バイオ・合成化学関連
(株)バックス・バイオイノベーション 設立: 2020 年 3 月	—	統合型バイオファウンドリー

¹ Ho S.H. et al., Sci. Rep., 2017, 7: 45471. ² 神戸大学プレスリリース, 2017 年 4 月 5 日. ³ Hasunuma T. et al., Metab. Eng., 2018, 48, 109–120. ⁴ 神戸大学プレスリリース, 2018 年 6 月 1 日. ⁵ Hasunuma T. et al., ACS Synth. Biol., 2019, 8 (12), 2701–2709. ⁶ 神戸大学プレスリリース, 2019 年 11 月 6 日. ⁷ Vavricka C.J. et al., Nat. Commun., 2019, 10 (1), 2015. ⁸ 神戸大学プレスリリース, 2019 年 5 月 7 日. ⁹ Bamba T. et al., Metab. Eng., 2019, 56, 17–27. ¹⁰ 神戸大学プレスリリース, 2019 年 8 月 28 日. ¹¹ 文部科学省「官民協働による新たな地域科学技術施策に関する調査」2020.3 p.118.

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

田中 剛(東京農工大学工学部・教授)

研究期間 2009 年 10 月～2015 年 3 月

展開している事業:

科研費基盤(B)2 件、NEDO※

CREST の成果: オイル高蓄積珪藻 *Fistulifera solaris* の全ゲノム解析、遺伝子組み換え系の確立、屋外大量培養技術の開発により、当該株を用いたバイオディーゼル燃料(BDF)製造プロセスの基盤技術を確立し、また遺伝子組み換え技術による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。作出した変異株を用いた、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。

発展:

1. 海洋珪藻 *F. solaris* のマルチオミックス解析による細胞内オイル動態の解明^{1,2,3,4,5}

微細藻類では世界で初めてオイル蓄積珪藻 *F. solaris* の全ゲノム情報¹を公開した(GenBank assembly accession: GCA_002217885.1)。 *F. solaris* の異質倍数体ゲノムの構造を解明し、BDF 原料となるオイルを高蓄積する形質への寄与を明らかにした²。また、メタボローム解析・トランスクリプトーム解析・細胞イメージング解析から、オイル蓄積³およびオイル分解過程⁴における *F. solaris* の代謝活性と細胞構造の経時的変化を詳細に解明した(図 1)。さらに、オイルを蓄積するオルガネラであるオイルボディに局在するタンパク質のプロテオーム解析を基に、リポファジーが珪藻のオイル分解への寄与を世界で初めて提唱した⁵。

2. BDF 生産性向上のための遺伝子組み換え株の作出^{6,7}

ペントースリン酸回路で機能する酵素が過剰発現し、オイル蓄積時ににおいて律速になっている NADPH の供給を強化したところ、オイル生産性が 1.5 倍に向上した⁶。さらに、BDF 生産プロセスにおいてボトルネックとなる細胞回収工程の省エネルギー化に向け、細胞表層にシリカ粒子に結合するペプチドをディスプレイした組み換え株を作出した。この組み換え株の培養液にシリカ粒子を添加することで、培養液から細胞を容易に回収できた(図 2)⁷。

3. 大規模屋外培養技術の確立⁸

研究期間中に作成した 500L クラスの屋外培養試験装置の培養規模を拡大し、10,000～640,000L クラスの屋外培養実証装置(オープンポンド型)を開発した(図 3)⁸。本装置は培養液の移動・攪拌に伴うエネルギー消費を最小限に抑えつつ、微細藻類バイオマスの安定的生産を可能とする。春季～秋季にかけては *F. solaris*、冬季は新たに単離した低温環境下で培養可能なオイル蓄積珪藻 *Mayamaea* sp を培養することで、BDF の通年生産ができた⁸。

4. BDF 以外の有用物質生産への応用^{9,10}

珪藻細胞は BDF 以外の有用物質生産も行うことができる有望なホストである。*F. solaris* のオイルが魚油の代替となる高度不飽和脂肪酸の供給源となり得ることが示唆され、医薬品原料、化粧品原料など有用物質生産能の向上を進めている。

特記事項: *F. solaris* の凍結乾燥バイオマスが市販された(<https://axel.as-one.co.jp/asone/d/3-7062-01/>)。

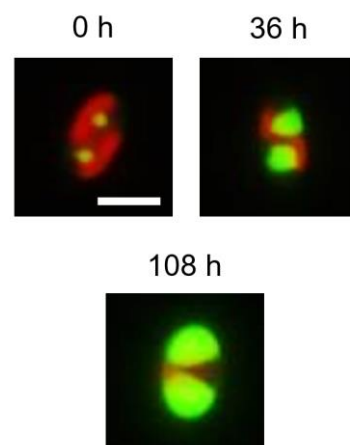


図 1. オイル蓄積時における *F. solaris* の葉緑体(赤色)とオイルボディ(緑色)の構造変化(スケールバー: 5 μm)³

シリカ粒子(無) シリカ粒子(有)

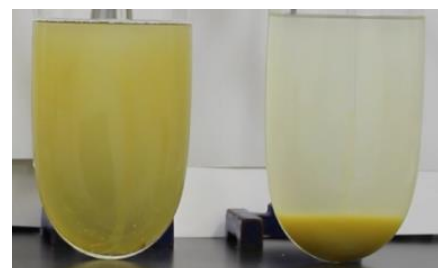


図 2. シリカ粒子に結合するペプチドを細胞表層にディスプレイした *F. solaris* 組み換え株の沈殿回収⁷



図 3. オープンポンド型屋外培養実証装置(10,000 L クラス)

¹ Tanaka T. et al., Plant Cell, 2015, 27 (1), 162–176. ² Nomaguchi T. et al., BMC Genomics, 2018, 19 (1), 330. ³ Liang Y. et al., Algal Res, 2015, 12, 359–367. ⁴ Nomaguchi T. et al., J Biosci Bioeng, 2018, 126 (2), 258–265. ⁵ Nonoyama T. et al., Algal Res, 2019, 44, 101660. ⁶ Osada K. et al., Algal Res, 2017, 23, 126–134. ⁷ Maeda Y. et al., Biotechnol Biofuels, 2016, 9 (1), 10. ⁸ Matsumoto M. et al., Mar Drugs, 2017, 15, 94. ⁹ Maeda Y. et al., ACS Appl Bio Mater, 2018, 1 (6), 2021–2029. ¹⁰ Tanaka T. et al., Bioresour Technol, 2017, 245, 567–572.

※バイオマスエネルギー技術研究開発/好冷性微細藻類を活用したグリーンオイルー貫生産プロセスの構築

異種接合 GaN 横型トランジスタのインバータ展開

橋詰 保(北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター・特任教授)

研究期間 2009 年 10 月～2015 年 3 月

展開している事業:

SICORP、科研費(新学術領域研究
(研究領域提案型))

CREST の成果:

窒化ガリウム(GaN)横型トランジスタの高性能化とインバータ展開を目標に、1)異種接合の界面制御、2)多重台形チャネル高移動度電界効果トランジスタの開発、3)GaN インバータ回路の設計と実装試験を実施した。

発展:

1. Al_2O_3 膜を用いた GaN MOS 構造の界面特性の向上^{1,2}

原子層堆積法と独自に開発したゲート電極形成後の低温熱処理(PMA: Post-metallization annealing)を組み合わせることで $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ 構造の界面欠陥準位密度を劇的に低減し、Si の MOS 構造に匹敵する界面特性を実現した。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ MOS 構造の容量-電圧(C-V)測定(図 1)では、PMA 処理により、理論値に非常に近く、かつ周波数分散のない C-V 特性が観測され、界面準位密度は $10^{10}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 台で Si MOS 構造に匹敵する特性を得た。PMA 法は、GaN MOS 構造の界面制御法として利用され始めている。

2. 絶縁ゲート型 GaN 高電子移動度トランジスタ(HEMT)の高性能化^{3,4}

絶縁ゲート型 GaN 高電子移動度トランジスタ(HEMT)における界面準位と電流線形性の関係を明らかにした。さらに PMA による界面制御を AlGaIn/GaN 構造および InAlN/GaN 構造に適用し、良好な電流線形性と動作安定性を実現した。 Al_2O_3 ゲート AlGaIn/GaN HEMT の伝達特性(図 2)では、逆バイアスを掛けながらの PMA 処理により $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ 界面の電子準位密度の低減が観測され、相互コンダクタンス g_m の平坦性(電流制御の線形性)を大幅に向上することができた。

3. GaN 基板上 AlGaIn/GaN MOSHEMT の優れた動作安定性⁵

共同研究により GaN 基板上へ AlGaIn/GaN 構造を成長し、低結晶欠陥密度の MOSHEMT を作製した。詳細な電気的評価より、優れたゲート制御性と低い漏れ電流を観測し、さらに 150°C まで極めて安定に動作することを確認した。 GaN 基板上 AlGaIn/GaN MOSHEMT の伝達特性の温度依存性(図 3)では、 150°C の高温でも、非常に小さな漏れ電流としきい値電圧 V_{th} 変動が観測された。結晶欠陥密度の低減が安定動作に寄与していると思われる。

MOS 型 GaN HEMT は 5G 通信システム用の高出力トランジスタとして研究され始めており、世界各地の研究機関から報告が続いている。

特記事項: MOS 型 GaN HEMT に関する共同研究を、三菱電機、住友電気工業、富士通研究所と、また GaN 基板販売のトップ企業であるサイオクスと、GaN 基板上 HEMT の共同研究を継続している。名古屋大学、NIMS、福井大学、熊本大学と GaN MOS 構造に関する共同研究も継続している。また、JST 戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)「高い安定性を有する GaN-MOS トランジスタスイッチ」に日本側代表者として参画し、スロバキア科学院、ハンガリー科学院およびシレジア工科大(ポーランド)との共同研究を行い、共著の国際会議発表論文を 7 報、共著の学術論文を 8 報公表した(2015 年 11 月～2019 年 3 月)。なお、スロバキア科学院とは共同研究を継続している。

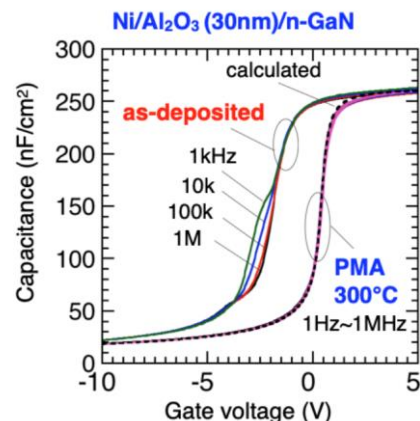


図 1. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ MOS 構造の容量-電圧(C-V)測定結果¹

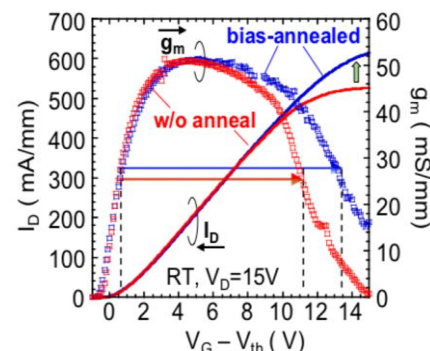


図 2. Al_2O_3 ゲート AlGaIn/GaN HEMT の伝達特性³

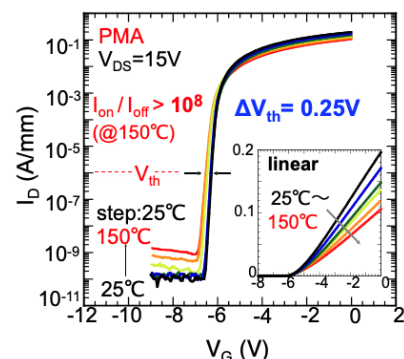


図 3. GaN 基板上 AlGaIn/GaN MOSHEMT の伝達特性の温度依存性(対数スケールと線形スケール)⁵

¹ Hashizume T. et al., Appl. Phys. Express, 2018, 11, 124102. ² Kaneki S. et al., Appl. Phys. Lett., 2016, 109, 162104. ³ Nishiguchi K. et al., Jpn. J. Appl. Phys., 2017, 56, 101001. ⁴ Ozaki S. et al., Semicond. Sci. Technol., 2020, 35 (3), 035027. ⁵ Ando Y. et al., Appl. Phys. Express, 2019, 12, 024002.

プロトン型大容量電気化学キャパシタの研究

宮山 勝(東京大学先端科学技術研究センター/大学院工学系研究科・教授)

研究期間 2009 年 10 月～2015 年 3 月

展開している事業:

科研費基盤研究(A)

CREST の成果:

- ・Ni-Co-Mn 系酸化物などの単原子層シート合成とその 3 次元構造化技術を確立した。
- ・ナノサイズグラフェンおよびポリアニリンとの 3 次元再積層体で大電極容量を得た。
- ・それら正負極を用いたプロトン型電気化学キャパシタで、従来値を大きく上回るエネルギー密度を得た。



発展:

1. フレキシブルな全固体薄膜型プロトン電池の開発^{1,2}

電極として使用する単原子層シート積層薄膜が耐曲げ変形特性に優れることを発見した。正負極に異なる酸化物薄膜、固体電解質に層状複水酸化物を用いた全固体シート積層薄膜素子を作製し、高速・大容量のプロトン電池特性および優れた耐曲げ変形特性を持つことを見出した(図 1)。

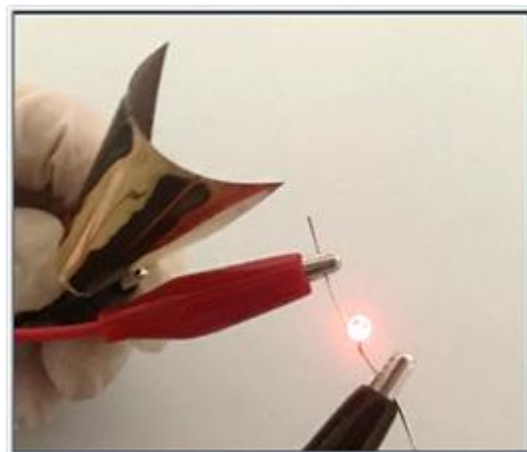


図 1. 開発したフレキシブル全固体薄膜型プロトン電池¹

2. 酸化物ナノシートの物性解明と多孔構造シートの開発^{3,4,5}

Mn-Ni 系および Ni-Co-Mn 系酸化物の単原子層シートについて、格子欠陥に伴う局所構造ひずみと半導体的物性を明らかにした。また、製造プロセスと組成の制御により、微小な多孔体構造をもつ単原子層シートの形成に成功した(図 2)。

3. 導電性ポリマーを用いたフレキシブル複合ポリマ電極の開発^{6,7}

高濃度のプロトン活性物質と電子導電性ポリマーの複合体を形成し、優れたプロトン電極特性を確認した。ポリマー固体電解質を用いた全固体プロトン電池を試作し、液体電解質の場合と同様な充放電特性と優れた耐曲げ変形特性を持つことを明らかにした。

全固体・薄膜・耐曲げ変形(フレキシブル)特性を備える電池(発展 1 及び 3)は、フレキシブル電子デバイス用の電源として様々な用途への適用が期待される。

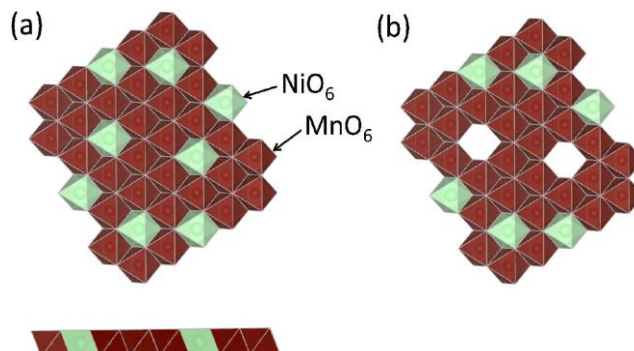


図 2. 格子欠陥をもつ Mn-Ni 系酸化物ナノシートの構造モデル² (a) M81N19 (b) M81N13²

特記事項: 水平配置電極型全固体電気化学キャパシタについて特許を出願した(特願 2017-000969、出願日: 2017/01/06)。

電池関連企業へ全固体素子のサンプル提供(成果有体物提供)を行い、実用素子としての特性評価を行った(2017 年)。

¹ Miyayama M., 13th Annu. Conf. Mater. Sci., Metal, Manufacturing, Paris 2017. ² 宮山 勝, セラミックス, 2015, 50, 620-623. ³ Suzuki S. et al., J. Ceram. Soc. Japan, 2017, 125(4), 293-298. ⁴ Suzuki S. et al., Nanomaterials, 2017, 7 (10), 295-303. ⁵ Suzuki S. et al., Bull. Chem. Soc. Jpn., 2019, 92(2), 352-358. ⁶ 大畑 暁 et al., 2018 年電気化学秋季大会, 2018.9, 1F15. ⁷ 大畑 暁 et al., 第 57 回セラミックス基礎科学討論会, 2019.1, 1G05.

3.3 2010 年度採択研究課題

- ・固体界面を制御した全固体二次電池の創製（辰巳砂 昌弘）
- ・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（山内 美穂）
- ・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（山口 猛央）
- ・超低損失パワーデバイス実現のための基盤構築（山崎 聡）

固体界面を制御した全固体二次電池の創製

辰巳 昌弘(大阪府立大学・学長、兼大学院工学研究科物質・化学系専攻
応用化学分野・教授)

2010 年 10 月～2013 年 9 月

展開している事業:

科研費基盤(A)2 件、科研費基盤研究(S)、ALCA、他 1 件

CREST の成果:

- ・硫黄、硫化物系固体電解質およびナノカーボンからなる正極複合体を用いた全固体 Li-S 電池が、室温下で高容量を保持できることを示し、全固体化によるサイクル特性向上を実証した。
- ・硫化物固体電解質と金属リチウム界面を調べ、固-液界面に比べて固-固界面における電荷移動の活性化エネルギーが小さいことから、全固体電池は高出力化が期待できることを示した。
- ・究極の負極活物質である金属リチウムを用いた全固体電池の実現に向けて、固体電解質上に金属リチウム薄膜層を備えた界面の構築が、サイクル特性の大幅向上に寄与することを明らかにした。

発展:

1. 全固体 Li-S 電池に向けた新規硫黄系正極複合体の開発^{1,2}

硫黄系正極複合体として、アモルファス遷移金属多硫化物、硫化リチウム-ハロゲン化リチウム固溶系複合体、硫黄-カーボン複合体等を開発し、それらを用いた全固体電池が高容量、長寿命で動作することを示した。例えば、メカノケミカル反応によって得られた高イオン伝導性 $\text{Li}_2\text{S-LiI}$ 固溶体粉末を用いた全固体電池の 25°C 、 2C レートでの充放電サイクル特性では(図 1)、2000 回の充放電を繰り返しても Li_2S 重量あたり 970mAh g^{-1} の容量を保持した。クーロン効率が 100%で、充放電時の副反応が見られないことが優れたサイクル特性に寄与していると考えられる。

2. 金属リチウム負極の全固体電池への適用^{3,4}

金属リチウムを負極に用いた全固体電池の界面解析を進め、固体電解質にわずかに存在する粒界にリチウムが析出しやすいこと、固体電解質のホットプレスによる緻密化がサイクル特性向上に有効であることを明らかにした。また、リチウム-電解質界面に In や Au 薄膜を生成させることで、飛躍的に充放電特性を向上した。さらに、電解質にハロゲン化物を加えることで、リチウム-電解質界面がより安定に保持された。 $\text{Li}_3\text{PS}_4\text{-LiI}$ 系電解質を用いた Li 対称セルに対して 100°C で行った Li 溶解析出試験の電圧変化では(図 2)、LiI を添加した電解質とすることで、高電流密度下で安定に作動した。

3. 全固体電池用二元機能電極活物質の作製^{5,6}

LiCoO_2 と低融性 Li_2SO_4 の混合物に対してメカノケミカル処理を施すことによって、立方晶 LiCoO_2 を一部含む新規なアモルファス酸化物 $\text{Li}_{1.2}\text{Co}_{0.8}\text{S}_{0.2}\text{O}_{2.4}$ 電極活物質を作製した。断面 SEM 像では(図 3)、約 $150\mu\text{m}$ 厚の緻密な正極層が得られており、電解質層とも密着した界面接合が実現されている。このアモルファス活物質は成形性に優れるだけでなく、電子およびリチウムイオン伝導性を示す混合伝導体であり、この材料のみを正極に用いた全固体電池が作動することを初めて示した。 100°C 、 0.13mA cm^{-2} の電流密度で、初期放電容量は 170mAh g^{-1} であった。

特記事項:トヨタ自動車、パナソニック、日産自動車をはじめ数社と、また JST ALCA-SPRING のチームリーダーとして全固体電池の共同研究を進めている。さらに、米国アイオワ州立大学との共同研究やスペイン国立研究協議会と共同研究および共著論文投稿を行った。なお、2019 年 4 月 1 日に大阪府立大学学長に就任した。

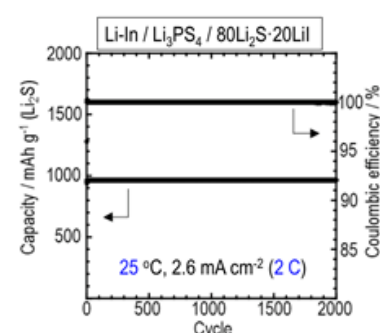


図 1. $80\text{Li}_2\text{S}\cdot 20\text{LiI-VGCF-SE}$ 複合体を用いた全固体電池の充放電サイクル特性¹

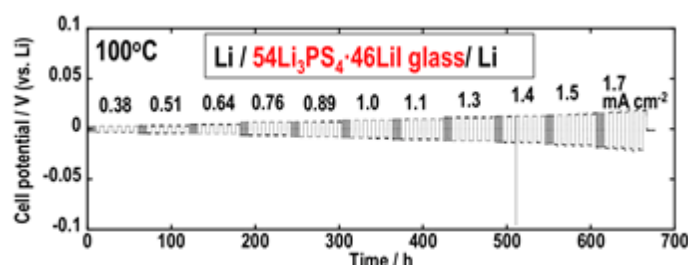


図 2. $\text{Li/Li}_3\text{PS}_4\text{-LiI/Li}$ セルの 100°C における溶解析出試験の電圧変化³

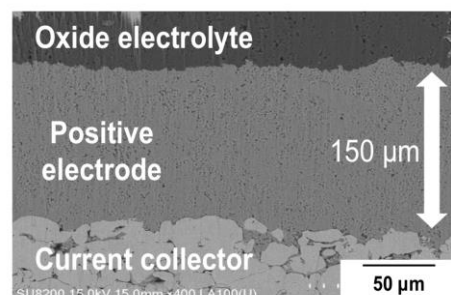


図 3 アモルファス $80\text{LiCoO}_2\cdot 20\text{Li}_2\text{SO}_4$ 活物質のみを正極層に用いた全固体電池の断面 SEM 像⁵

¹ Hakari T. et al., Adv. Sustainable Syst. 2017, 1700017, 1–6. ² Pan M. et al., Electrochem., 2018, 86 (4), 175–178. ³ Suyama M. et al., Electrochim. Acta, 2018, 286, 158–162. ⁴ Kato A. et al., J. Electrochem. Soc., 2018, 165 (9), A1950–A1954. ⁵ Nagao K. et al., J. Power Sources, 2017, 348, 1–8. ⁶ Nagao K. et al., Adv. Mater. Interfaces, 2019, 6, 1802016, 1–10.

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

山内 美穂(九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所・教授)

研究期間 2010 年 10 月～2016 年 3 月

展開している事業:

科研費(新学術領域研究(研究領域提案型))、CREST

CREST の成果: 高選択的ナノ触媒の開発を行い、電気化学的に水とカルボン酸から液体燃料であるアルコールを製造する蓄電装置とアルコールからカルボン酸に変換する発電装置を組み合わせることにより、CO₂を全く排出することなく電力を効率よく循環するカーボン・ニュートラル(CN)サイクルシステムの実証を行った。

発展:

1. PEAEC によるシュウ酸からの連続的グリコール酸合成による蓄電法の開発^{1,2}

カルボン酸からアルコールを連続的に生成する高分子電解質アルコール電解合成セル(PEAEC, Polymer Electrolyte Alcohol Electrosynthesis Cell)と呼ばれる液体フロー式電解槽を作製し(図 1b)、シュウ酸の 4 電子還元を介してアノターゼ TiO₂ 触媒で水の酸化を伴い、グリコール酸に変換することに成功した。このプロセスは、貯蔵および輸送が容易であるグリコール酸を使った効率的な電力貯蔵を可能とする。

PEAEC のカソードとして、Ti 自体を金属源として用い、触媒であるアノターゼ TiO₂ を Ti 電極上に担持した Ti メッシュ(TiO₂/Ti-M)または Ti フェルト(TiO₂/Ti-F)を新たに作製した。TiO₂/Ti-M、Nafion 117、およびガス拡散炭素電極担持 IrO₂ で構成される膜電極接合体を用いた PEAEC において、最大エネルギー変換効率 49.6%、1M シュウ酸の 99.8%の連続変換を達成している(図 2)。PEAEC は、再生可能エネルギーから作られる電力の貯蔵デバイスとして新たな候補となる可能性がある。

2. バイオマスと水を原料に、電力を用いたアミノ酸生成に成功^{3,4}

電力をエネルギー源、水を水素源として、木質バイオマスから抽出可能な α -ケト酸から 7 種類のアミノ酸の高効率合成に成功した。アスパラギン酸、ロイシン、フェニルアラニンおよびチロシンの 4 種のアミノ酸は、電気エネルギーを使った初めての合成となる。これまで、有毒な鉛や水銀、あるいは高価な白金の電極上でのアミノ酸の合成例はあったが、合成効率は非常に低いものだった。一方、本手法は、より安全で安価な酸化チタンを電極触媒として用い、高選択的なアミノ酸合成を達成した新しい低環境負荷型のファインケミカル製造法と言える(図 3)。

さらに、アミノ酸を連続的に合成するフロー型リアクターの構築にも世界で初めて成功した。

特記事項: 現在、CREST「再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出」において、「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」のテーマで研究を行っている。

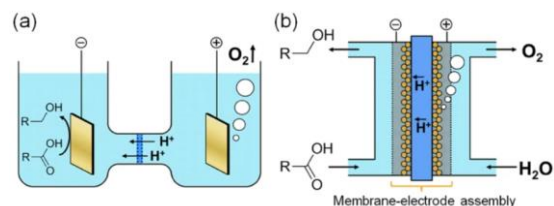


図 1. (a)二室式アルコール電解合成セルと(b)カルボン酸からアルコールを合成するフロー式アルコール電解合成セル(PEAEC)¹

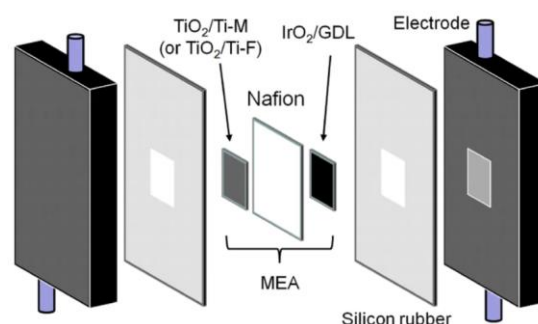


図 2. PEAEC の構成要素の組立図¹



図 3. 電気化学反応を介した還元的アミノ化による木質バイオマスを原料にした継続可能なアミノ酸生産³

¹ Sadakiyo M. et al., Sci. Rep., 2017, 7, 17032. ² Fukushima T. et al., Sci. Technol. Adv. Mat., 2018, 19, 142. ³ Fukushima T. et al., Chem. Commun., 2019, 55 (98), 14721-14724. ⁴ 九州大学, JST プレスリリース, 2019 年 11 月 1 日

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

山口 猛央(東京工業大学科学技術創成研究院化学生命科学研究所・教授)
研究期間 2010 年 10 月～2016 年 3 月

展開している事業:
科研費基盤研究(A)、CREST、NEDO
水素利用等先導研究開発事業、他 1
件

CREST の成果: アニオン伝導膜としての OH⁻イオン伝導機構を提案し、高速伝導が可能なことを実証した。また、アニオン交換膜のアルカリ中での分解機構を解明し、高耐久電解質膜の設計指針を確立した。細孔フィリング構造および架橋構造を用い、高い性能と高い耐久性を両立する膜開発に成功した。この電解質膜を用い高性能・高耐久固体アルカリ燃料電池のメンブレン電極アセンブリ(MEA)の実証をモデルと実験の両面から行い、開発基盤を構築した。

発展:

1. 高耐久・高性能アニオン伝導膜の開発^{1,2}

主鎖にエーテルやヘテロ元素を持たず、溶媒に溶解するポリフェニレン系アニオン交換膜の開発に成功し、さらに高い耐久性と性能を実現した(図 1 左)。

2. 高耐久・高性能アニオン伝導膜を用いた液体燃料直接供給燃料電池開発に成功²

高耐久なポリフェニレン系アニオン交換膜を用い、ギ酸塩水溶液を直接利用する固体アルカリ燃料電池開発に成功した。80℃の高温で 100 時間以上の耐久性と、200mW/cm² 以上の高出力を実証した(図 1 右)。

3. 高耐久・高性能アニオン伝導膜を用いた固体アルカリ水電解デバイス開発に成功^{3,4}

高耐久なポリフェニレン系アニオン交換膜を用いた固体アルカリ水電解装置によって、80℃での高耐久性と、供給液にアルカリ水溶液の代わりに純水を用いても高い性能を示すことを実証した(図 2)。

特記事項: 固体アルカリ燃料電池、固体アルカリ水電解について、国内外の大学および、NEDO プロジェクトを含めた企業との共同研究を実施した。現在、CREST「再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出」において、「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」および NEDO「水素利用等先導研究開発事業/水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発/高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発」のテーマで研究を行っている。

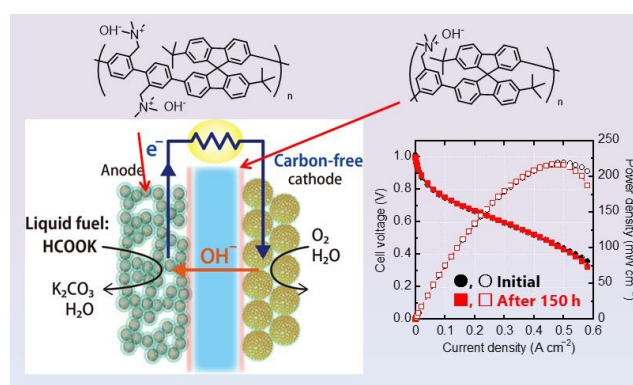


図 1. 開発した高耐久性ポリフェニレン系アニオン交換膜を用いて作製したギ酸塩アルカリ燃料電池(80℃運転)

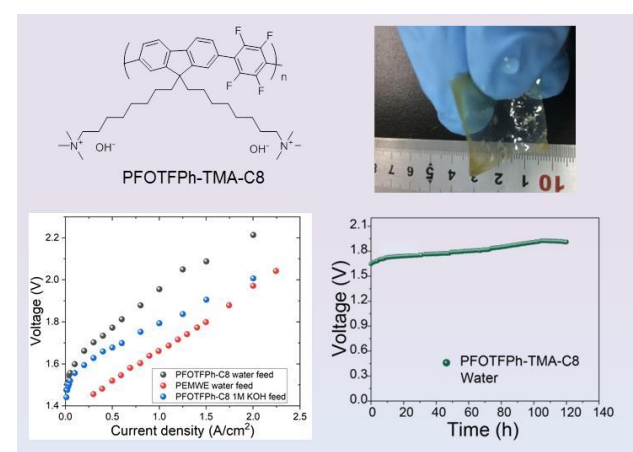


図 2. 開発した材料を用いて作製した固体アルカリ水電解の性能(80℃)及びその耐久性(80℃ 200mA/cm² 保持下)^{3,4}

¹ Miyanishi S. et al, J. Mater. Chem. A, 2019, 7(5), 2219–2224. ² Kuroki H et al., J. Power Sources, 2019, 438, 226997. ³ Miyanishi S. et al, Polym. Chem., 2020, 11, 3812. ⁴ Soni R. et al., ACS Appl. Energy Mater., 2021, <https://doi.org/10.1021/acsaem.0c01938>

超低損失パワーデバイス実現のための基盤構築

山崎 聡(金沢大学ナノマテリアル研究所・特任教授)

研究期間 2010 年 10 月～2016 年 3 月

展開している事業:

科研費基盤研究(A)

CREST の成果:ダイヤモンドパワーデバイスとして、新規な構造であるショットキーpnダイオード、ホッピング伝導を利用した p+in+ダイオード、バイポーラトランジスタ、接合型電界効果トランジスタ(JFET)などの作製に成功した。また、実用化に必要な、シリコンウエハを出発材料としたヘテロダイヤモンド基板上のショットキーダイオードを作成し、良好な電気的特性を得ることに成功した。

発展:

1. 反転層型ダイヤ MOSFET の動作実証に成功^{1,2,3}

省エネルギー・低炭素社会の実現のために、ノーマリーオフ特性や小型かつ高耐圧で低損失な次世代パワーデバイスである MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor)が望まれている。ダイヤモンドは高耐圧で低損失な究極の MOSFET 材料として期待されていたが、Si のような自然酸化膜を形成することができないため、ノーマリーオフ動作が不可能とされてきた。しかし、低濃度 P ドーピング技術とウェットアニール技術を組み合わせることでダイヤモンド界面を高品質化することによって、反転層チャネルダイヤモンド MOSFET を実現した(図 1)^{1,2}。

MOSFET の電流-電圧特性においてはノーマリーオフ特性が確認され、ゲート負電圧の増加による空乏層の広がり、正孔の流れ込みにより反転層チャネルが形成される。反転層チャネル MOSFET のダイヤモンドによる実現は、ダイヤモンドパワーデバイス開発に大きなマイルストーンとなる。さらに、高性能パワーデバイスを作製中であり、デバイス開発では株式会社東芝等との共同研究が進行中である。

2. シリコン上ダイヤモンド基板作製

研究期間中の成果である Si 上ヘテロダイヤモンド(001)成長に続き、信越化学との共同研究により、量子デバイスとして有用な(111)面における成長にも成功した。ダイヤモンド基板の実用化に欠かせないコスト低減に直結するものであり、パワーデバイスのみならず、量子デバイスへの適用に向けての研究開発につながっている。

3. ダイヤモンド超高感度量子磁気センサ

ダイヤモンドの炭素原子を窒素原子で置き換え、その隣に空孔がある窒素-空孔複合体(NV センター)はスピン三重項状態を形成するが、この三重項状態を磁場、電場、温度や歪みのセンサとして利用することができる。現在、NV 中心を利用した量子コンピュータ、量子シミュレータの材料開発を行っている。また、文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)「固体量子センサの高度制御による革新的センサシステムの創出」(代表者:東京工業大学 波多野睦子/CREST での主たる共同研究者)において、NV センターの個数また配向制御による超高感度磁気センサが開発⁴されており、バイオ分野への展開が進められている。

特記事項: パワーデバイス開発は、産総研と金沢大学との共同研究を進めている。産総研では、先進パワーエレクトロニクス研究センター新機能デバイスチーム、新機能材料チーム、ダイヤモンドウエハチームにおいて、引き継がれている(代表:牧野俊晴)。また、金沢大学ではナノマテリアル研究所の徳田規夫を中心に進められている。国際共同研究としては、フランス・グルノーブルのニール研究所と学生交換を中心に、また、ドイツのフラウンホーファー研究所(フライブルグ)と行っている。

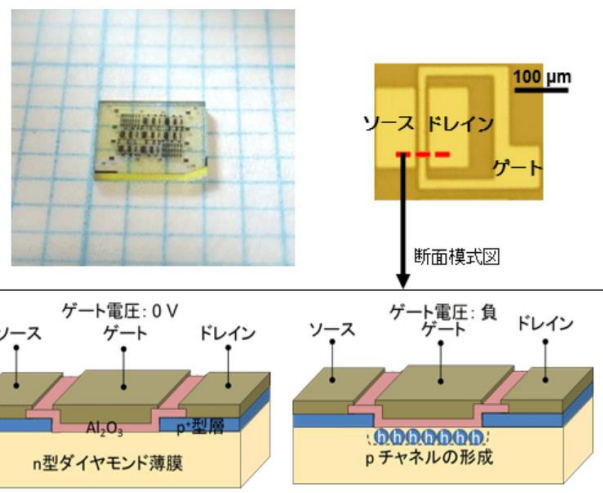


図 1. 作製した反転層チャネルダイヤモンド MOSFET(左上)と一素子の拡大画像(右上)、赤い破線部の断面模式図(左下:ゲート電圧が 0 V 時、右下:ゲート電圧が負の時)。^{1,2}

¹ 産総研, 金沢大学プレスリリース, 2016 年 8 月 22 日. ² Matsumoto T. et al., Sci. Rep., 2016, 6, 31585. ³ 特開 2018-6572「ダイヤモンド半導体装置及びその製造方法」. ⁴ Ishiwata H. et al., Appl. Phys. Lett., 2017, 111, 043103.