

戦略的創造研究推進事業
—CREST・さきがけ複合領域—

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」

複合領域事後評価用資料

研究総括：江口 浩一

2021年12月

目 次

1. 研究領域の概要	1
(1)戦略目標	1
(2)研究領域	6
(3)研究総括	7
(4)採択研究課題・研究費.....	8
2. 研究領域および研究総括の設定について(JST 記載)	12
3. 研究総括のねらい.....	14
4. 研究課題の選考について.....	16
(1)CREST	16
(2)さきがけ	19
(3)複合領域として	21
5. 領域アドバイザーについて.....	22
6. 研究領域のマネジメントについて.....	24
(1)CREST	24
(2)さきがけ	27
(3)複合領域として/共通事項.....	30
7. 研究領域として戦略目標の達成状況について研究を実施した結果と所見.....	40
(1)CREST	40
(2)さきがけ	50
8. 総合所見	61

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

① 戦略目標名

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

② 達成目標

水素エネルギー社会の到来を控え、水素含有率、低環境負荷、取扱いの容易性等において総合的にエネルギーキャリア(エネルギーの輸送・貯蔵のための担体)としての利用にふさわしいものとなり得る窒素化合物や炭化水素、無機水素化合物等の高効率変換・利用技術を創出する。そのために、以下の目標の達成を目指す。

- 再生可能エネルギーを効率的に化学的なエネルギー(エネルギーキャリア)に変換するための基盤技術の創出
- エネルギーキャリアから、電気エネルギーを取り出し利用するための基盤技術の創出
- エネルギーキャリアを安全に輸送・貯蔵する技術の創出

③ 将来実現し得る重要課題の達成ビジョン

本戦略目標下において「②達成目標」に向けた研究成果が得られることにより、太陽光、風力等の再生可能エネルギーを様々なエネルギーキャリアに変換するとともに、エネルギーキャリアを安全に輸送・貯蔵し、必要に応じて電力や動力、又は化成品原料として利用することを可能とする基盤技術が確立されることを目指す。これらの研究成果を民間企業につなげ、更に国内における再生可能エネルギーの負荷平準化に応用することにより、電力グリッドによらない再生可能エネルギーの新たな利用形態の確立を目指す。これにより、再生可能エネルギーを安定的かつ積極的に利用する社会の実現、水素エネルギー社会の到来に資するシステムの構築に貢献する。

また、本戦略目標において得られる技術を活用し、再生可能エネルギーの賦存量(ふぞんりょう)が大きい諸外国に技術を輸出することで相手国の経済成長に貢献するとともに、相手国の再生可能エネルギーを化学エネルギーの形態で大量に輸入することを可能とし、国内外の再生可能エネルギーの安定的利用に貢献することを目指す。

これにより第4期科学技術基本計画(2011年8月19日閣議決定)に掲げられた「エネルギー供給源の多様化と分散化」、「長期的に安定的なエネルギー需給構造の構築と世界最先端の低炭素社会の実現」の達成に貢献する。

④ 具体的内容

(背景)

我が国の電力需要を賄う一次エネルギー源として、再生可能エネルギーが占める割合を大幅に増やすためには、再生可能エネルギーが自然現象によることに起因する課題を克服しなくてはならない。例えば太陽光、風力等の再生可能エネルギーが得られる地域は国内外において偏っており、都市などのエネルギー消費地から遠隔であることが多い。季節や時間といった月・日・時間単位の変動が大きく、電力の需要と供給のピークが一致しない等の課題がある。

これら再生可能エネルギー特有のいわば地理的・時間的な課題を克服するための方策として、再生可能エネルギーによって生産される電力や熱を用いた化学変換により、その反応生成物にエネルギーを蓄え、エネルギーキャリアとして活用することが考えられる。これによりエネルギーキャリアを介してエネルギーを安全に輸送・貯蔵し、必要に応じて電力や動力、又は化成品原料として利用することが可能となる。変動の大きい再生可能エネルギー発電の負荷の平準化のためには、蓄電池以上に長期間にわたりエネルギーの出し入れが可能となるエネルギーキャリアの活用が有効である。

これまでの水素関連研究により、高効率化や低コスト化の課題は残るもののアルカリ水電解による水素生成技術はある程度確立している。しかし本格的な水素エネルギー社会を見据えると、水素の輸送・貯蔵における大きな課題が残る。水素を大量に輸送するためには、 -253°C まで冷却して液化しエネルギー密度を上げなくてはならないが、これには大きなエネルギーとコストを要する。海上の大規模輸送のみならず燃料電池自動車や家庭用燃料電池に供給するために都市に張り巡らすインフラ構築を考慮すると、これに代わる、水素含有率、低環境負荷、取扱いの容易性等に優れたエネルギーキャリアの利用技術を創出することが必要である。

(研究内容)

本戦略目標の達成には、これまでの水素関連研究とは異なった、新たな着想に基づく独創的研究が必須であり、触媒化学、電気化学、材料科学、プロセス工学などから新規の研究者が参入することが重要である。これらの研究者が同一の目標の下に集結・連携して各分野の知見を融合させた新しいエネルギーキャリア研究に挑むことによって、既存研究の延長線上にはない高効率なエネルギーキャリア合成・利用の基盤技術の確立を目指す。具体的には、以下の研究を想定する。

【エネルギーを変換する】

- (i) エネルギーキャリアを効率的に直接合成するための触媒化学的・電気化学的な技術やその機構解明のための研究
- (ii) 太陽熱や地熱を用いた熱化学プロセスによりエネルギーキャリアを合成するための研究
- (iii) その他、水素含有率、低環境負荷、取扱いの容易性等に優れたエネルギーキャリアとなる新規材料の創出・設計指針の構築や、光化学などにより水素や水を効率良くエネルギー

ーキャリアに変換するための研究

【エネルギーを利用する】

- (i) エネルギーキャリアを燃料として用いて電気エネルギーを取り出す新しい直接燃料電池の研究
- (ii) エネルギーキャリアから低温で高効率に水素を取り出す脱水素技術に関する研究
- (iii) エネルギーキャリアを利用して有用化成品を直接合成する新規プロセスの研究

【エネルギーを安全に輸送・貯蔵する】

各エネルギーキャリアを安全に長距離輸送・長期間貯蔵するための研究

なお、研究が先行している有機ヒドライド、アンモニアについては、既存の合成方法とは全く異なる、例えば電気化学と触媒化学を融合させた新規電解合成による水素を介さない有機ヒドライド直接合成方法、希少金属や入手困難な還元剤を用いることなく窒素三重結合の解離を可能とする新規触媒開発によるアンモニア合成方法などを想定する。

⑤政策上の位置付け(政策体系における位置付け、政策上の必要性・緊急性等)

第4期科学技術基本計画では、「グリーンイノベーションの推進」は、我が国の将来にわたる成長と社会の発展を実現するための主要な柱の一つとして掲げられている。また、「II-3. グリーンイノベーションの推進」において、「製造・輸送・貯蔵にわたる水素供給システム」の研究開発とその海外展開が課題として挙げられている。本戦略目標では、水素をそのまま利用することに加えて、エネルギーの輸送・貯蔵・利用を可能とする新たなエネルギーキャリア利用技術を創出するための研究開発を国として推進することで、より多角的に再生可能エネルギーの導入拡大を図るものである。こうした取組は、第4期科学技術基本計画の「安定的なエネルギー供給と低炭素化」、「エネルギー利用の高効率化及びスマート化」及び「社会インフラのグリーン化」に貢献する。

エネルギー基本計画(2010年6月18日閣議決定)では、「新たなエネルギー社会の実現」として、「中長期的には水素エネルギーを有効活用する社会システムを構築していくこと」の重要性を指摘した上で「水素エネルギー社会の実現」を掲げている。当面は「化石燃料由来の水素を活用し、化石燃料の有効利用を図るとともに、製鉄所等からの副生水素等を活用する」が、将来的には「非化石エネルギー由来水素の開発・利用を推進する」としており、このためには本戦略目標下におけるエネルギーキャリアの利用基盤技術の確立が不可欠である。

さらに、「平成25年度科学技術重要施策アクションプラン」(2012年7月19日総合科学技術会議 科学技術イノベーション政策推進専門調査会)においても、グリーンイノベーションの項目の重点的取組として、「革新的なエネルギー供給・貯蔵・輸送システムの創出」が掲げられている。

本戦略目標はこれらに貢献するものである。

⑥他の関連施策との連携及び役割分担・政策効果の違い

文部科学省・経済産業省合同検討会で、本研究開発分野の両省連携の重要性が認識されるに至った。経済産業省(経産省)では企業等における再生可能エネルギーからの低コスト水素製造技術開発等を推進していく一方、文部科学省(文科省)では革新的エネルギーキャリア変換・利用技術等を中心に研究を実施する。

文科省では、本戦略目標と国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の先端的低炭素化技術開発(ALCA)で分担・連携してエネルギーキャリアの研究開発を推進する。具体的には以下のとおりである。

エネルギーキャリアの実現に求められる研究開発は大きく二つのフェーズに分けられる。一つは産業界が既に着目しているものの、社会普及の前に大規模化や低コスト化が大きな障壁として立ち塞がり、単独企業の努力では突破不可能で産学連携による技術基盤の確立が不可欠なものである。これに該当するのが有機ハイドライド及びアンモニアである。2013年度よりALCAでは、この状況を打破するために、有機ハイドライド及びアンモニアを対象に最長10年の産学官の混成メンバーによる研究開発を実施し、経産省事業や産業に橋渡しすることを目指した。具体的には、例えば有機ハイドライドでは、電解合成、水素化・脱水素、有機ハイドライド燃料電池の研究開発を、アンモニアでは、熱化学合成、脱水素、アンモニア燃料電池の研究開発を予定する。

もう一つのフェーズは、いまだ実用性は可能性の域にあるものの利用技術を確認すれば有機ハイドライドやアンモニアを凌駕(りょうが)する新たなエネルギーキャリアとしての地位を確立できる新規物質、あるいは、有機ハイドライドやアンモニアに関してこれまで想定されてきた合成方法を根底から覆すような技術の創出である。本戦略目標ではこのフェーズに焦点を絞る。

本戦略目標及びALCAで得られた研究成果は、文科省及び経産省が共同で設置するガバナリングボードで共有し、有望な基礎技術が開発されれば速やかに次のフェーズへと橋渡ししていく等、単独のプロジェクトに完結させない連携体制をとる。

また、本戦略目標と同年に設定される戦略目標「選択的物質貯蔵・輸送・変換等を実現する物質中の微細な空間空隙構造制御技術による新機能材料の創製」とも選択的物質貯蔵・輸送・変換等を可能にする革新的な空間空隙材料の創製という観点で、得られた知見を共有するなど効果的な研究体制を推進していく必要がある。

⑦科学的裏付け(国内外の研究動向を踏まえた必要性・緊急性・実現可能性等)

我が国は、太陽電池発電所や風力発電所の設備に関する技術の輸出大国の一つであるが、そのエネルギーを輸入するための技術開発は皆無に等しい。国際的ビジョンにおける新エネルギー生産・輸送・貯蔵・利用に関する研究投資は多くなく、基礎技術から社会工学的視野までを俯瞰(ふかん)した研究が必須である。また、水素国際クリーンエネルギーシステム技術(WE-NET)以降の電気化学、触媒化学、材料科学、プロセス工学などの個々の分野の進展と、

その後の国立大学法人山梨大学の燃料電池ナノ材料研究サテライト拠点や国立大学法人九州大学の次世代燃料電池産学連携研究センターなどの集中的研究拠点の整備が総合的に結実した結果、燃料電池では世界最高水準の研究開発を誇っている。燃料電池の要素技術開発によって得られた基礎的知見は、エネルギーキャリアの研究開発につながるものが多い。さらに、エネルギーキャリアの基盤技術において鍵となる触媒に関しても、材料開発及び有機合成を中心とする反応研究で極めて高い研究水準を維持しているとともに、米国に次いで世界第2位の触媒生産国であり、基礎研究と産業の双方において世界をリードしている※1。

エネルギーキャリアを共通目標に掲げ、関連分野の世界最高水準の科学的ポテンシャルを活用しこれらの連携・融合を一層促進することによって、我が国はエネルギーキャリアの基盤技術を世界にさきがけて確立することができる。

米国エネルギー省(DOE)では、太陽エネルギーを燃料に変換する技術(ソーラーフュエル)や反応の触媒研究などが実施されている。また、欧州第七次研究枠組み計画(FP7)においても、ソーラーフュエルや電解あるいは熱による水素製造に関するプロジェクトが実施されている。こういった国際的な研究開発動向の中、日本、中国、ドイツ、米国におけるエネルギーキャリアに関する研究論文数はここ数年増加している。日本は米国、中国、ドイツに次いで第4位を維持するものの、その数は米国の1/4、中国の1/3にとどまり、5年前よりも差は拡大しつつある※2。

日本では、過去にWE-NETにおいて、水素の利用技術を中心としてエネルギーキャリアに取り組んだ経緯もあるが、最近の米国DOEや欧州での取組を踏まえ、さらに関連分野の科学的水準が世界トップクラスであるというポテンシャルを生かして、再生可能エネルギーの地理的・時間的な課題を克服し、それを輸送・貯蔵が可能な状態に効率的に変換して消費地に安定供給するための技術を確立する必要がある。

※1 JST 研究開発戦略センター(JST/CRDS)、『ナノテクノロジー・材料分野 科学技術・研究開発の国際比較 2011年版』、2011

※2 トムソン・ロイター「WEB OF KNOWLEDGE」〈<http://wokinfo.com/>〉

本戦略目標に関するキーワードを設定し、2007～2011年の原著論文数を検索した結果に基づく。

⑧検討の経緯

東日本大震災復興の観点から、再生可能エネルギーを積極的に利用するための関連技術の必要性を認め、JST/CRDS 環境・エネルギーユニットにおいて検討を開始し、再生可能エネルギーを化学エネルギーに変換、また化学エネルギーから電力へ変換し利用するために取り組むべき技術課題や、研究開発の方向性などについて、有識者へのインタビューなどによる予備調査を実施した。その後、詳細検討チームを発足させ、科学技術未来戦略ワークショップ

ップ「再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けたエネルギーキャリアの基盤技術」を開催(2012年7月28日)した。多分野の研究者により具体的な研究開発課題及び推進方策等について検討を行い、

- ・再生可能エネルギー又はそれを基とした電力からのエネルギーキャリアへの変換技術における研究課題

- ・エネルギーキャリア間やキャリアから電力や動力への変換技術の研究課題

などの俯瞰整理を進めた。これらの検討結果を取りまとめ、戦略プロポーザル「再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けたエネルギーキャリアの基盤技術」が2013年3月に発行された。

他方、文科省では、経産省との合同検討会を開催し、上記のJST/CRDSの検討も踏まえながら両省が連携して2030年頃の実用化を目指して取り組むべき革新的技術について議論し、その一つとして「エネルギー貯蔵・輸送」が特定されるに至った。さらに、合同検討会の下に本技術を議論するため両省と学識経験者等からなるワーキンググループを設置し、2013年2月までに7回にわたり会議を行って、両省の役割や連携の仕組みについて議論を続けてきた。

本戦略目標は、これらの検討の結果を踏まえて作成したものである。

(2) 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」(2013年度発足)

本研究領域は、再生可能エネルギーを安定的・効率的に利用する水素エネルギー社会の実現に向け、再生可能エネルギーを化学エネルギーの貯蔵・輸送の担体となるエネルギーキャリアに効率的に変換し、さらに、エネルギーキャリアから電気エネルギー、水素、動力等を取り出して利用する基礎的・基盤的技術の創出を目指すものである。そのために、電気化学・触媒化学・材料科学・プロセス工学といった分野の垣根にとらわれない異分野間の融合型研究を推進してきた。例えば、風力・太陽光などの再生可能エネルギーを利用してエネルギーキャリアを効率的に直接合成するための電解合成、触媒合成、電極・反応場材料に関する研究、太陽熱・地熱を用いた熱化学プロセスによりエネルギーキャリアを合成するための研究を対象としている。また、エネルギーキャリアを燃料として用い電気エネルギーを取り出す直接燃料電池や、エネルギーキャリアから低温で高効率に水素を取り出す脱水素技術に関する研究も含めるものとした。

本研究領域では、研究が先行している有機ヒドライド、アンモニアを水素含有率、変換効率、安全性において凌駕する新規エネルギーキャリアの合成・利用に資する先導的な研究を推奨してきた。一方で、これら既知のエネルギーキャリアを対象とする研究であっても、これまで想定されてきた合成・利用・貯蔵運搬方法とは異なる、新たな着想に基づく独創的

な技術であれば、本研究領域の採択対象とした。

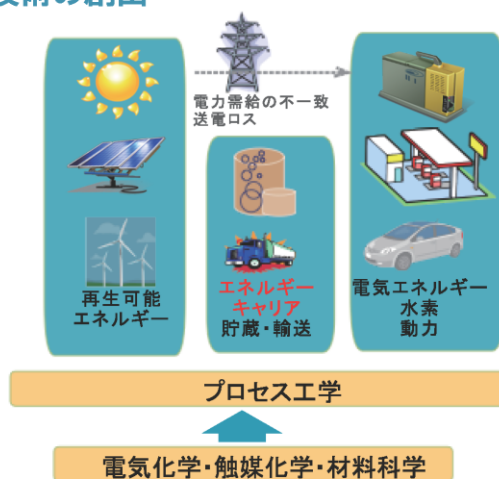
研究領域の概要

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
統括 京都大学大学院工学研究科
教授 江口 浩一

概要 ○電気化学、触媒化学、材料科学、プロセス工学の異分野間の融合型研究
○既知キャリア(有機ハイドライド、 NH_3)を凌駕する新規 **エネルギーキャリア(EC)** の合成・利用に資する先導的研究
○既知のECであっても既存の合成・利用方法とは異なる新たな着想に基づく創造的技術

水素エネルギー社会の実現に資する
基礎的・基盤的技術の創出



(3) 研究総括

江口 浩一 (京都大学 大学院工学研究科 教授)

(4) 採択研究課題・研究費

①CREST

(百万円)

採択年度	研究者	所属・役職 上段：研究終了時 () 内：採択時	研究課題	研究費
2013 年度	永岡 勝俊	名古屋大学・教授 (大分大学・准教授)	エネルギーキャリアとしてのアンモニアを合成・分解するための特殊反応場の構築に関する基盤技術の創成	241
	姫田 雄一郎	産業技術総合研究所 創エネルギー研究部門・上級主任研究員 (*1)	ギ酸の脱水素化反応による高圧水素の高効率製造技術の開発	243
	藤代 芳伸	産業技術総合研究所 無機機能材料研究部門・副部門長 (*2)	新規固体酸化物形共電解反応セルを用いた革新的エネルギーキャリア合成技術(キャリアファーム共電解技術)の開発	183
2014 年度	里川 重夫	成蹊大学 理工学部・教授	固体電解質を用いた電解セルの電極触媒高性能化によるアンモニア合成システムの開発	206
	曾根 理嗣	宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所・准教授	再生可能エネルギー利用による水素製造とエネルギーキャリアとしてのメタン製造技術の研究	204
	西村 睦	物質・材料研究機構 経営企画部門 室長 (*3)	バナジウム系合金膜による次世代エネルギーキャリアからの革新的水素分離・精製基盤技術の創出	272
2015 年度	西林 仁昭	東京大学 大学院工学系研究科・教授 (同・准教授)	分子触媒を利用した革新的アンモニア合成及び関連反応の開発	309
	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 (同・准教授)	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	232

	山口 猛央	東京工業大学 科学技術創成研究院・教授 (*4)	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	206
			総研究費	2096

*研究費：2020 年度上期までの実績額に 2020 年度下期以降の計画額を加算した金額
 コロナに伴う延長支援予算を加算（西林チーム、山内チーム、総研究費）

- *1) 産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門・主任研究員
- *2) 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門・研究グループ長
- *3) 物質・材料研究機構 環境・エネルギー材料部門・ユニット長
- *4) 東京工業大学 資源化学研究所・教授

②さきがけ

(百万円)

採択年度	研究代表者	所属・役職 上段：研究終了時 () 内：採択時	研究課題	研究費*
2013 年度	青木 芳尚	北海道大学 大学院工学研究院・准教授	中温領域で作動する直接アンモニア形水素膜燃料電池の創製	36.5
	大木 靖弘	名古屋大学 大学院理学研究科・准教授	鉄族クラスター分子触媒の創出とエネルギーキャリアの合成	32
	中村 寿	東北大学 流体科学研究所・准教授 (同・助教)	低エクセルギー損失・CO ₂ 無排出燃焼の実現に向けたアンモニア燃焼化学反応機構の解明	32
	日隈 聡士	熊本大学 大学院先端科学研究部・助教 (*1)	ゼロエミッションを実現するアンモニア燃焼触媒の物質設計と応用	32.9
2014 年度	小林 洋治	京都大学 大学院工学研究科・准教授 (同・講師)	酸水素化物による新しいアンモニア合成触媒	44.7
	白石 康浩	大阪大学 太陽エネルギー化学研究センター・准教授	太陽光により水と酸素から過酸化水素を合成する革新的光触媒の開発	43.5
	辻口 拓也	金沢大学 理工研究域・准教授 (同・助教)	固体高分子形燃料電池の代替を実現する直接ギ酸形燃料電池の開発	44
	脇坂 暢	富山県立大学 工学部・准教授 (*2)	液-液-固三相界面構造を制御した有機ハイドライド電解合成	33.4
2015 年度	伊藤 良一	筑波大学 数理物質系・准教授 (*3)	水素ステーション普及のための貴金属を使用しない大規模水素生産材料の開発	43.8
	橋本 望	北海道大学 大学院工学研究院・准教授	エネルギーキャリアとしてのアンモニア普及へ向けた難燃性固体燃料とアンモニアの混焼による着火	41

			特性改善効果の解明	
	嶺岸 耕	東京大学 大学院 工学系研究科・准教授	メンブレン一体型光触媒シートの 開発と人工光合成反応系の構築	42.0
	森 浩亮	大阪大学 大学院 工学研究科・准教授	ギ酸からの高効率水素発生を駆動 する多機能集積型金属触媒の開発	41.8
			総研究費	485.0

*1：日隈研究者採択時：京都大学・特任助教

*2：脇坂研究者採択時：山梨大学・特任准教授

*3：伊藤研究者採択時：東北大学・助教

2. 研究領域および研究総括の設定について (JST 記載)

本研究領域は、再生可能エネルギーを安定的・効率的に利用する水素エネルギー社会の実現に向け、再生可能エネルギーを化学エネルギーの貯蔵・輸送の担体となるエネルギーキャリアに効率的に変換し、さらに、エネルギーキャリアから電気エネルギー、水素、動力等を取り出して利用する基礎的・基盤的技術の創出を目指すものである。

本研究領域は、風力・太陽光などの再生可能エネルギーを利用してエネルギーキャリアを効率的に直接合成するための電解合成、触媒合成、電極・反応場材料に関する研究、太陽熱・地熱を用いた熱化学プロセスによりエネルギーキャリアを合成するための研究、エネルギーキャリアを燃料として用い電気エネルギーを取り出す直接燃料電池の研究、さらには LCA 的な観点からエネルギーキャリアの製造から貯蔵・運搬、利用までにわたるシステム全体を評価する研究、など多岐にわたる研究を対象としている。電気化学、触媒化学、材料科学などの同一分野の研究者間の協働によって研究を推進するのではなく、これら様々な分野を繋いだ連携や融合によって、合成から利用にわたり一貫して研究を推進することが重要である。したがって、研究推進体制としては、異なる研究分野の研究者からなる研究型チームの編成が可能な CREST を選定することが適切である。

一方で、既存研究の延長線上にない高効率なエネルギーキャリアの創生に資する観点で、従来にない斬新な発想による挑戦的な研究や、基礎的段階でのボトルネックの解決に繋がるような独創的な研究の推進も必要である。このような研究の推進体制としては、個人の独創的なアイデアを元に研究を推進することが可能なさきがけを選定するのが適切である。

さらに、一人の研究総括が CREST とさきがけを一体的にマネジメントすることにより、チーム型研究と個人型研究との交流と連携がより一層緊密になり、その相乗効果からそれぞれの研究課題の効率的な推進とともに、広範な分野での革新的技術が期待できる。

エネルギーキャリアの基盤技術において鍵となる触媒化学、材料科学、燃料電池に係る各種要素技術、有機合成技術において、我が国は世界最高水準の研究開発レベルにある。本研究領域は、これら世界最高水準にある科学的ポテンシャルを活用し、低炭素な水素エネルギー社会の実現に向け、エネルギーキャリアの基盤技術の確立を目指す取り組みである。本研究領域選定における調査の結果から、上述の関連分野から新規の研究者が本研究領域に参入することが予想されることから、優れた研究提案が多数見込まれる。

以上のことから、本研究領域は戦略目標の達成に向けて適切に設定されている。

研究総括の江口浩一氏は触媒設計工学と材料科学の分野のうち、特に水素製造用の触媒材料、燃料電池の新規電解質・電極材料、大気浄化触媒、燃焼触媒についての研究で著名な研究者である。同氏は、改質ガスに含まれる微量 CO を除去する金属酸化物担持貴金属触媒について、ナノ構造と触媒活性の相関を分析し、触媒活性・選択性・触媒寿命の向上を目指す研究に取り組み、顕著な研究成果を上げている。また、中温動作燃料電池のための新規の電極・電解質材料の探索や、固体酸化物型燃料電池の信頼性向上、NOx 等を除去する大気

化触媒の研究にも精力的に取り組んでいる。このような同氏の研究業績は、触媒学会賞（学術部門）、石油学会奨励賞の顕彰などに表れているように高く評価されている。このように同氏は、触媒化学と材料科学をベースとして、エネルギー変換技術や環境技術の発展に大きく貢献しており、革新的エネルギーキャリア変換技術・利用技術の創出を趣旨とする本研究領域をリードする上で高い先見性と洞察力を有していると認められる。

また同氏は、触媒学会の理事、石油学会の理事、SOFC 研究会の副会長など多くの要職を歴任されている。このことから、様々な研究分野に関する俯瞰的な視野と豊富な人脈を備えており、幅広い研究分野との交流や連携、文部科学省や経済産業省の関連施策との協調が必要な本研究領域の運営に関して適切な研究マネジメントを行う経験と能力を有していると認められる。

また、同氏が経済産業省の研究開発事業、NEDO のプロジェクトの評価委員などを歴任していることは、公平な評価を行いうるとともに、より広い視座に立って科学技術の将来を展望できる研究者として関連分野の研究者から信頼されていることを示している。

以上のことから、江口浩一氏は、本研究領域の研究総括として適任であると判断される。

3. 研究総括のねらい

(1) 戦略目標に対する研究総括の狙い

我が国のエネルギー問題については、長期のビジョンが必要であり、再生可能エネルギーをいかにして主たるエネルギー源へと成長させていくかは、究極のエネルギー問題解決へ向けての重要な課題である。しかし、自然現象に由来する太陽光、風力等の再生可能エネルギーを大規模に導入するためには、エネルギー生産地が消費地から遠隔であり、また、季節や時間による変動が大きく、電力の需要と供給のピークが一致しないという本質的な障害を克服する必要がある。

これら再生可能エネルギー特有の課題を解決するための方策として、再生可能エネルギーによって生産される電力や熱から、水素を含有するエネルギー貯蔵媒体(エネルギーキャリア)に転換し、安全に輸送・貯蔵を行い、必要に応じて消費地でエネルギーキャリアを電力や動力、熱に変換して利用することが考えられる。このような目的からは蓄電池にも期待が寄せられているが、上述のエネルギーキャリアは化学物質の形で蓄電池以上に高い密度でエネルギーを貯蔵することができ、それ自体が軽量で遠距離へ運搬でき、長期にわたって保存でき、エネルギーの出し入れが可能となるなど、化学的性質を生かした、注目に値する特徴がある。また、種々のエネルギーキャリア候補物質の中でも、貯蔵の密度、時間的な安定性、製造・利用の容易さ、導入の難易などが異なっており、使用する目的と場所によって選択する必要も考えられる。エネルギーキャリアの候補となる化学物質は、たとえばメチルシクロヘキサンなどの有機ヒドライド、アンモニアなどが有力と考えられている。再生可能エネルギーから、水素製造、エネルギーキャリアへの変換、貯蔵・輸送、電力や燃焼エネルギーとしての利用などにおけるそれぞれのエネルギーキャリア物質の優位性を明確にし、最適のシステムを選択し、構築していくことが必要である。

エネルギーキャリアについては、総合科学技術・イノベーション会議が主導して各省庁が連携する、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の一課題として採択され、2014年度から開始した。SIP エネルギーキャリアプログラムでは、エネルギーキャリアとして有力視されている、液体水素、アンモニア、有機ヒドライド、の製造と利用に関するテーマ、及びこれらの安全性評価に関するテーマが重点的に推進されている。

一方、エネルギーキャリアの新規な製造方法、電気化学的な物質・エネルギー相互変換、熱機関をはじめとする利用、その化学的性質を生かした新規な利用技術、Life Cycle Assessment(LCA)解析はこれまで、将来を見据えて系統だって検討される段階になく、いまだに多くの革新的、効果的方法が提案、評価されずに残されている未開拓領域である。

このような背景から、本研究領域では、有機ヒドライドやアンモニアだけでなく、他のエネルギーキャリアも含め、電気化学・触媒化学・材料科学・プロセス工学のそれぞれの視点から基礎的・基盤的な研究開発を実施するための枠組みを設けて、シーズを発掘し、その成果を将来のエネルギーキャリアを利用したエネルギーシステムに活用することを目的とした。その目的を達成するため、上記諸分野の研究者の有機的な協働と共に、個人研究者の独

創的な発想を活かした挑戦的なテーマによる成果も期待されることから、実施体制として CREST 及びさきがけの 2 つのタイプの複合領域を設定した。CREST・さきがけは共通の課題解決を目指す、それぞれの制度の特徴を生かしつつ、一体として運営し、相互に意見・情報を交換する機会を多数設けることとした。また、本研究領域のプロジェクトを推進していく過程で、CREST・さきがけ内での研究チーム、研究者間の連携のみならず、他の研究領域や国の関係プロジェクトなどとの連携を積極的に推進した。

(2) 本研究領域の狙い、研究成果として目指したこと

エネルギーキャリアの可能性を判断するためには量的な評価も重視した。将来、大量の再生可能エネルギーを対象とするためには、少なくとも工業規模で生産、使用する必要がある。ただし、さきがけ及び CREST の研究のステージとしては萌芽的領域あるいは開発初期段階にあるため、実証規模の評価は困難であることがほとんどである。そのような観点から各研究課題について小規模システムからの大規模化の可能性評価やシミュレーションを積極的に採用して、予測や将来展望を推定する方針を指導した。そのため工業的生産の規模で製造速度が達成可能か、またエネルギー収支の点から十分エネルギーシステム内に組み込めるのか適応性からの確に可能性を評価し、助言を与えるとともに、成果に結びつくよう指導を行った。化学反応などは新規で革新性があっても、量的拡大ができないもの、エネルギー収支的に受け入れられないものもあり、できるだけ量的視点からの考察をお願いした。

(3) 科学技術の進歩への貢献科学技術イノベーション創出に向けて目指したこと

エネルギーキャリアの製造と利用を目的としているが、学術領域の基盤としての貢献が重要であることはもちろんである。新規触媒や新規電気化学デバイス、分離材料、燃焼解析など将来の学術基盤となるような研究に導くことを目指した。研究対象とした材料、反応、デバイスのエネルギーキャリアとしての将来性を見極めることは重要であるが、CREST・さきがけ研究はシーズ的側面も強いためそれらの材料等の新規性、特許性について留意し、企業からのアドバイスも積極的に受け入れて知財戦略とした。

4. 研究課題の選考について

本研究領域では再生可能エネルギーに基づく熱や電力を使用して、直接もしくは水素の生成を経由し、低コストかつ高効率にエネルギーキャリアを製造、エネルギー消費地で損失なくエネルギーを取り出して利用するという一連のプロセスを想定している。本研究領域の募集選考においては、この一連のプロセスの全体あるいは一部についての革新的、挑戦的な研究提案を期待した。また、エネルギーキャリアの製造や使用全体をとおして安全性、貯蔵・輸送方法などを提案評価する研究も対象とし、トータルシステムに受け入れられるための、使用目的によるエネルギーキャリアの区別など、LCA 的な観点からの評価に関する研究も含まれるものとした。さらに、現時点でエネルギーキャリアとしての認知度は高くないものの、高い効率で製造、利用が可能な新規なエネルギーキャリアについての提案を歓迎した。これらの提案には単に水素に係る反応の学術的興味からだけでなく、エネルギーキャリアとしての優位性、潜在的能力、導入シナリオなどの説明が記されていることを必要とした。

バイオマス、バイオ燃料由来の再生可能エネルギーの利用、光触媒による水素製造や人工光合成、化石燃料の高効率利用、工業プロセスで副生する水素の利用などに関する研究は、すでに他の複数のプロジェクトで精力的に検討されていたため、2013、2014 年度では本研究領域の募集の対象外とした。しかし、エネルギーキャリアの研究は複数の既存の研究の枠組みの複合領域・境界領域からなるものであり、例えば、光触媒による水素キャリア製造、化石燃料、副生水素、バイオ燃料などからのエネルギーキャリア物質への変換なども、先に述べた再生可能エネルギーからの安定なエネルギーキャリア物質の製造、輸送、利用、安全性に寄与する技術となりうる可能性がある。そこで、本研究領域に取り込むべき技術領域を明確にするために、このような境界領域にあっても、エネルギーキャリアとしての可能性、発展性を強く期待できる提案に対して 2015 年度では募集の対象とした。

エネルギーキャリアを取り扱う体系はいまだはっきりとは確立されておらず、CREST 及びさきがけの研究領域を実施していく過程で、課題中間評価の段階で重点項目を選択し、強化、方針の展開などを決定していくこととした。そのため、本研究領域の開始時には、できるだけ多様なテーマの研究課題を採択するために、CREST では採択時の研究費総額の上限を 1 研究課題あたり 2 億円として提案の募集を行った。

CREST ではチームリーダーのもと、特定のエネルギーキャリアの革新的な製造や利用方法の構想について、複数の側面から戦略的に検討するチーム型研究を、さきがけでは実現性が現時点で不明確であっても、将来、エネルギーキャリアの利用体系の中で重要な位置を占める可能性のある萌芽的な個人型研究をそれぞれ募集した。長期の視野を持って進めるべきエネルギーキャリアの製造・利用基盤技術に関する、革新的・創造的提案を歓迎するものとした。以下に各年度での詳細を述べる。

(1) CREST

① 研究課題の選考方針

本研究領域の目標を着実に達成するため、CREST では以下の視点を重要視した。

- (i) エネルギーキャリア研究は端緒についての段階であるため、新規性、発展性が最も重要と判断した。
- (ii) エネルギーキャリアは、将来、大量に製造、貯蔵、輸送することを念頭に置いている。この観点から、将来、エネルギーシステムとして受容可能で、十分な反応量を達成できることが重要と判断した。
- (iii) 他の省庁のプロジェクトで推進されている、人工光合成や光触媒、バイオ燃料・化石燃料の高効率利用などの課題は 2013 年度、2014 年度の募集対象としなかった。2015 年度の募集では境界領域の課題も採択し、空白な領域を避けるためこれらとの境界領域も募集対象とした。

また、反応の興味が中心で、量的な可能性が考察・評価がなされていないもの、エネルギーシステムとして受け入れ可能か説明がないもの、期間内にどこまで達成しようとしているか目標が明確でない提案も多くみられたが、これらは不採択とした。

②選考結果

<2013 年度>

2013 年度は 29 件の応募があり、9 件の面接選考を経て、最終的に 3 件の研究提案を採択した。

新規なエネルギーキャリア物質と利用システムの提案を期待したが、応募件数としてはあまり多くなかった。一方、水素やアンモニア、水素含有物質の新規な製造法や新規触媒など、興味ある発想に基づいている提案が多くみられた。また、2013 年度の実験提案はエネルギーキャリアあるいは水素の製造、利用に関する研究提案がほとんどで、エネルギーキャリアを取り巻くシステムや輸送、安全といった提案はなかったため、次回以降歓迎するという旨を、総括総評としてさきがけホームページ上で発信した。

2013 年度は新規研究領域ということもあり、準備期間が短かったために、チーム編成や提案の吟味が十分できていなかった可能性もあると考えられる。しかし、結果的にはアンモニアやそれ以外のエネルギーキャリア以外の応募が採択され、この分野の裾野の拡大に結びつく、独創的な研究課題を採択できたものと期待された。

<2014 年度>

2014 年度は 15 件の応募があり、10 件の面接選考を経て、最終的に 3 件の研究提案を採択した。

本年度は 2 回目の公募ということで、十分な提案の準備検討が盛り込まれている提案や、アンモニアや有機ハイドライドだけでなく、新規なエネルギーキャリアの提案もいくつか見られた。全体的には応募件数はあまり多くなかったが、水素やアンモニア、水素含有物質の新規な製造法や新規触媒、分離技術など、興味ある発想にもとづく提案がみられた。選考

過程において、本研究領域の守備範囲やエネルギーキャリアとしての出口や実現性が、革新性、新規性とともによく議論され、慎重に選択・順位付けを進めた。

2014年度はエネルギーキャリアや新規な合成手法、新規な反応システムや分離技術手法などエネルギーキャリア分野の発展に結び付く、独創的な研究課題が採択できたと考えている。

<2015年度>

2015年度の公募では、光触媒反応、バイオ燃料・化石燃料の高効率利用などのエネルギーキャリア研究との境界領域とみなせるものまで募集の範囲を拡大した。その結果、前年度より多い21件の応募があり、9件の面接選考を経て、最終的に3件の研究提案を採択した。

本年度は3回目の募集となり、十分な提案の準備や検討がなされている提案が多く見られた。水素やアンモニア、水素含有物質の新規な製造法や新規触媒、分離技術などから、新規なエネルギーキャリアの提案や光化学反応との境界領域などまで、多様な分野の興味ある発想にもとづく提案があった。

2015年度は新規なエネルギーキャリア物質の提案や、新規な合成手法、高効率な利用システムなどエネルギーキャリア分野の発展に結び付く、独創的な研究課題を採択できたものと考えている。

③選考結果のまとめ

3年間にわたって、9件の多彩な研究課題を採択した。研究課題名は下記の通りである。

- 1) エネルギーキャリアとしてのアンモニアを合成・分解するための特殊反応場の構築に関する基盤技術の創成
- 2) ギ酸の脱水素化反応による高圧水素の高効率製造技術の開発
- 3) 新規固体酸化物形共電解反応セルを用いた革新的エネルギーキャリア合成技術(キャリアアファーム共電解技術)の開発
- 4) 固体電解質を用いた電解セルの電極触媒高性能化によるアンモニア合成システムの開発
- 5) 再生可能エネルギー利用による水素製造とエネルギーキャリアとしてのメタン製造技術の研究
- 6) バナジウム系合金膜による次世代エネルギーキャリアからの革新的水素分離・精製基盤技術の創出
- 7) 分子触媒を利用した革新的アンモニア合成及び関連反応の開発
- 8) 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
- 9) 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

(2) さきがけ

①研究課題の選考方針

さきがけではアンモニア、有機ハイドライドなど、既知のエネルギーキャリアはもちろん、特に独創的・革新的なエネルギーキャリア物質の提案、製造法、利用法などを募集対象とした。特に、下記3点およびそれらのバランスを重要視して選考に望んだ。

- (i) エネルギーキャリアはその候補物質や製造方法、利用システムなど、さきがけにふさわしい革新的、挑戦的な課題を重視して採択する。
- (ii) 将来のエネルギーキャリアとしての実現性や、エネルギーシステムへの導入の優位性、将来、量的に許容される可能性が十分ある点も重要視する。
- (iii) さきがけは個人型研究を対象としており、エネルギーキャリアの新領域を開拓していく意欲にあふれ、柔軟に対応しながら課題の解決、社会への対応をできる人材育成の可能性も意識する。

②選考結果

<2013年度>

2013年度は38件の応募があり、書類選考を通じて候補課題を12件に絞り、面接選考を経て最終的に4件の研究提案を採択した。採択課題は直接アンモニア形水素膜燃料電池の開発、新規分子性アンモニア合成触媒の開発、アンモニア燃焼化学反応機構の解明、アンモニア燃焼触媒の開発に関するものとなった。

2013年度の研究提案においては、研究内容自体は基礎研究として新規性に優れたものが多数あり、エネルギーキャリアという領域を広くとらえて、可能性を開拓するという点では注目される提案がみられた。一方で、新規性はあるものの、現在の専門をエネルギーキャリア領域に少しだけ軌道修正したような研究や、新規性のみで実現性が疑問視されるような研究提案も多くみられ、アンモニアや有機ハイドライド以外の新規なエネルギーキャリアの提案は期待したほど多くなかった。

当年度は第1回目の公募だったので、エネルギーキャリアとしての実現性、有効性を十分に提案書の中で説明できておらず、準備期間が少々不足していると感じる提案が多くあった。反応の面白さ、触媒の新規性、合成法の新規性など興味ある提案は多いので、エネルギーキャリア領域の創成を意識して、新たに提案がなされることを期待した。

<2014年度>

2014年度は36件の応募があり、書類選考を通じて候補課題を12件に絞り、面接選考を経て最終的に4件の研究提案を採択した。採択課題はアンモニア合成触媒の開発、過酸化水素合成光触媒の開発、直接ギ酸型燃料電池の開発、有機ハイドライドの電解合成技術に関するものとなった。

昨年度の公募とほぼ同数の応募が集まったが、内容的にはエネルギーキャリアとしての

有効性を意識した提案が増え、個人の専門領域を形式上エネルギーキャリアに当てはめたような提案が減り、本研究領域の目標の理解度が上がっていることが感じられた。さらに新規性という点では、多くの提案が注目されるものだった。今回は、アンモニアや有機ハイドライドだけではなく、それ以外の新規なエネルギーキャリアの提案も多くみられ、どのような尺度でそれらを比較し、順位づけを行うか、アドバイザーとともに大いに議論することとなった。今回は結果的に、過酸化水素とギ酸をエネルギーキャリアとして合成・利用する研究課題の採択に至った。一方で新規性がある萌芽的提案であっても、将来性、実現性が疑問視されるような研究提案も一部みられた。

2014年度は第2回目の公募だったので、準備状況や出口イメージを強調してある提案も多く、次回このような記述を盛り込んだ優れた応募が多く集まることが期待された。また、反応の面白さ、触媒の新規性、合成法の新規性などの点では興味ある提案も多くあったので、エネルギーキャリア領域の創成を意識して、再度提案されることを期待した。

<2015年度>

2015年度は過去最多の42件の応募があり、書類選考を通じて候補課題を12件に絞り、面接選考を経て最終的に4件の研究提案を採択した。採択課題は水電解による水素生産のための電極開発、アンモニアの混焼による難燃性固体燃料の着火特性改善効果の解明、メチルシクロヘキサン生産のための光触媒シートおよび人工光合成系の構築、多機能集積型ギ酸の合成・分解触媒の開発に関するものとなった。

燃料電池自動車や水素ステーションなど水素社会の関心の高さを反映して、意欲的な興味深い提案が見られた。多様なエネルギーキャリア物質の提案が含まれ、合成から利用、社会への適応性などまで過去2回に比べ、提案内容に多様性が増しており、本研究領域の目標の理解度は上がっていると感じられた。さらに新規性という点では、多くの提案が注目されるものであった。

今回も準備状況や出口イメージが明確に示された提案が多くあったが、その中でも採択課題は、エネルギーキャリアとしての反応の重要性、触媒や合成法の新規性なども主張されており、エネルギーキャリア領域の創成を意識して研究を推進することが期待された。

③選考結果のまとめと運営方針

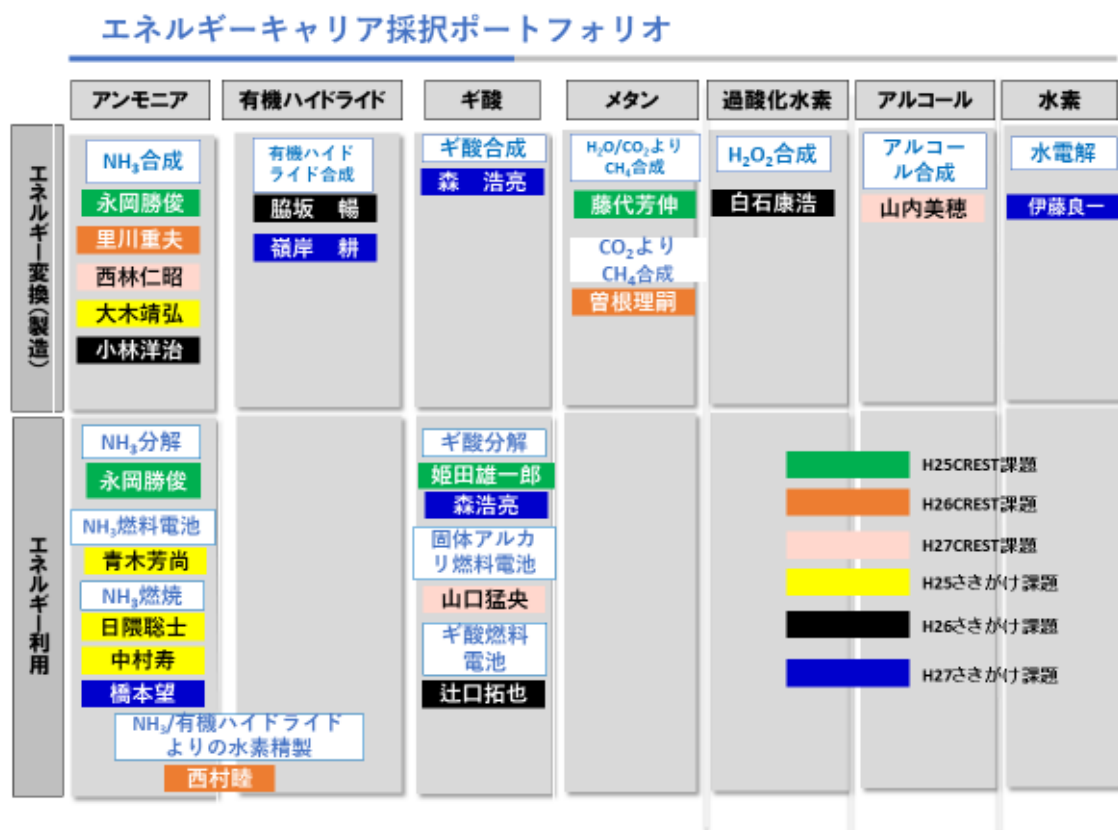
3年間にわたって、12件の課題を採択した。研究課題名は下記の通りである。

- 1) 中温領域で作動する直接アンモニア形水素膜燃料電池の創製
- 2) 鉄族クラスター分子触媒の創出とエネルギーキャリアの合成
- 3) 低エクセルギー損失・CO₂無排出燃焼の実現に向けたアンモニア燃焼化学反応機構の解明
- 4) ゼロエミッションを実現するアンモニア燃焼触媒の物質設計と応用
- 5) 酸水素化物による新しいアンモニア合成触媒
- 6) 太陽光により水と酸素から過酸化水素を合成する革新的光触媒の開発

- 7) 固体高分子形燃料電池の代替を実現する直接ギ酸形燃料電池の開発
- 8) 液-液-固三相界面構造を制御した有機ハイドライド電解合成
- 9) 水素ステーション普及のための貴金属を使用しない大規模水素生産材料の開発
- 10) エネルギーキャリアとしてのアンモニア普及へ向けた難燃性固体燃料とアンモニアの混焼による着火特性改善効果の解明
- 11) メンブレン一体型光触媒シートの開発と人工光合成反応系の構築
- 12) ギ酸からの高効率水素発生を駆動する多機能集積型金属触媒の開発

(3) 複合領域として

上記の研究課題をエネルギーキャリアの種類、および開発対象となる技術で分類すると次の図の通りになる。



5. 領域アドバイザーについて

本 CREST・さきがけとも共通の観点からの視野が必要であり、また複合領域としての相互の連携の必要性から、同じメンバーで領域アドバイザーに就任いただいた。エネルギーキャリアは材料、化学、化学工学、機械、電気、システムなどの複合領域であり、さらには学術的な重要性のみならずエネルギーへの量的貢献や将来展望などに対する観点からの判断も必要となることから、全体としてそれらの領域を包含する学問分野の大学、企業、研究所から第一線の研究者の中から人選し、就任依頼した。また、サイトビジットをはじめ合同で開催する検討会、領域会議、評価会、及び個別研究課題議論に際しては、領域アドバイザーにも参画の協力を依頼した。大学関係 5 名(のちに 4 名)、研究機関 2 名、企業関係者 3 名が領域アドバイザーを構成し、研究の視点に加えて産業化へのつながりの視点も含めて、アドバイス・評価を行った。

領域アドバイザーの具体的な専門分野は、秋鹿アドバイザーがアンモニアを始めとする触媒である。岡田アドバイザーは触媒・化学工学が現在の専門ではあるが、以前は燃料電池が専門である。酒井アドバイザーも専門は燃料電池であるが、現在は研究管理に従事している。村田アドバイザーはエネルギーキャリアを始めとする、エネルギー経済性評価、堤アドバイザーは熱力学やシステム評価の第一人者である。出来アドバイザーは電気化学全般、増田アドバイザーは触媒・化学工学の専門家である。松本アドバイザーは燃料電池を始めとするエネルギーシステムに関する専門家であり、水野アドバイザーは触媒・化学工学が専門である。以上のように、幅広いエネルギーキャリアの科学領域に対して、産学両方から専門的に一流のアドバイスができる布陣となっている。

また、秋鹿アドバイザーは 2014 年度より SIP「エネルギーキャリア」のサブプログラムディレクターに着任し、同プログラムとの間での情報交換が積極的になされた。

なお、山内美穂教授は 2015 年 3 月をもって領域アドバイザーを退任した。

領域アドバイザー名 (専門分野)	終了時の所属	役職	任期
秋鹿 研一 (触媒化学)	東京工業大学	名誉教授	2013 年 6 月～2021 年 3 月
岡田 佳巳 (電気化学、触媒化学)	千代田化工建設(株) 技術開発ユニット	技師長	2013 年 6 月～2021 年 3 月
酒井 夏子 (電気化学、無機化学)	産業技術総合研究所 イノベーション推進 本部	副本部長	2013 年 6 月～2021 年 3 月
堤 敦司 (化学工学、プロセス工 学)	東京大学 教養学部 附属教養教育高度化 機構	特任教授	2013 年 6 月～2021 年 3 月

出来 成人 (電気化学、界面化学)	神戸大学	名誉教授	2013年6月～2021年3月
増田 隆夫 (触媒化学、反応工学)	北海道大学 大学院 工学研究院	教授	2013年6月～2021年3月
松本 信一 (エンジン燃焼、燃料電池システム)	トヨタ自動車(株) 未来創生センター	プロフェッショナル・パートナー	2013年6月～2021年3月
水野 雅彦 (触媒化学)	住友化学(株) 先端材料開発研究所	グループマネージャー	2013年6月～2021年3月
村田 謙二 (燃料電池、水素エネルギー)	(一財) エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部	参事	2013年6月～2021年3月
山内 美穂 (燃料電池、触媒化学)	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	2013年6月～2015年3月

6. 研究領域のマネジメントについて

研究総括の研究領域運営方針について

本研究領域の研究は学術的価値と出口イメージの両面から常に評価され、両面での成功を求められる。学術的価値の創出は最も重要な面であり、単に既存技術を組み合わせたものや、予想される結果を埋めていく研究は CREST・さきがけにはふさわしくない。その観点からそれぞれの研究課題において、高い目標を設定して新たな学問や新規な材料、新規なデバイスの創成に繋がるようレベルの高い研究をお願いした。一方で本研究領域はエネルギーキャリアの看板を掲げていることから、単に新規性、革新性だけで評価されるのではなく、エネルギーシステムの中で有効な可能性を持つよう、実際上の出口イメージを持ってもらうこともお願いした。これは量的生産性の可能性はエネルギー収支での有効性の観点からの評価である。しばしば、大学の研究者や研究所研究員はそのような視点で研究方針や研究結果を判断する経験が不足している場合もあり、領域会議などにおいて常に意識するよう指導した。

研究領域のマネジメントについて

研究領域がバーチャル・ネットワーク型研究所として機能し、しかも CREST・さきがけ複合領域として効果的に働くよう、研究チーム構成メンバー、さきがけ研究者、総括、アドバイザーらが様々な専門性と経験から自由にそれぞれの研究課題に対して意見を述べられるような環境を作るよう配慮した。アドバイザーは CREST・さきがけで進行している研究課題を広く見渡せるよう共通のメンバーにお願いし、大学、研究所、企業のそれぞれの観点から自由に発言いただいた。チームや研究者らはそれら異なる視点からの複数のアドバイスの中から自身の判断や総括との打ち合わせによって方針を決定し、しばしば当初の方針から軌道修正することも可能とした。さらに CREST とさきがけの研究者間の情報交換も奨励し、その結果さきがけ研究者間、CREST・さきがけをまたぐ研究会や共同研究なども進められた。さらに国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) や SIP のエネルギーキャリアに関連する課題とも情報交換の機会を設けたことによって、それらとの共同研究に進んだ例もある。

(1) CREST

① チーム会議・サイトビジット

課題評価チーム以外の各チームは、毎年少なくとも 1 回ずつのチーム研究進捗報告会かサイトビジットを実施、さらにチーム内での報告会などを開催した。研究総括として、サイトビジットには必ず出席して進捗情報の把握、推進方針へのアドバイスをを行った。さらに、領域アドバイザーにも参加を呼び掛け、毎回、数名程度のアドバイザーの参加を得て、専門性の高い内容の議論を研究代表者以外のチーム研究者と直接に議論し、領域内、領域外、産業界との情報交換、連携研究に向けた取り組みなど、適切なアドバイスを行ってもらった。

サイトビジットにおいては、CREST 予算で購入した装置類の活用状況の確認も行った。

CREST の各研究チームで開催する個別の打ち合わせ研究会には、チームからの出席要請に応じて、総括及びアドバイザーは可能な場合には出席し、研究の進捗状況や研究環境上の課題等の把握に努めた。

②研究費の配分

研究開始後、年度毎に研究計画および研究費の見直しと共に増額要求等の提出を求め、主に研究領域内の総括裁量経費から必要に応じて、重点配分などを行ってきた。主な重点配分措置(3,000千円以上)の案件は次ページの一覧表の通りである。

全般的には、永岡チーム、姫田チーム、西村チーム、西林チームへの増額案件と合計金額が多いが、これらのチームは研究成果も順調であり、課題中間評価でも他のチームに比較して、良い評価となっている(表中では中間評価結果による、増額を*)で示した)。

永岡チームの杉本グループには熊本地震(2016年4月)による震災被害があった。床下に落下した計算機が上の階からの水に浸り、使用できなくなった。JSTの震災復興予算を利用し、早期の対応を図った。増額支援により、アンモニア触媒上に配位した窒素に水素が反応していく様子が計算により表現できるようになってきた。

西林チームは学部内学科の移動に伴い、場所の変更が必要となり、CREST研究のための実験設備を新設する増額を実施した他、学術的に大きな成果が上がり、研究をさらに加速するために錯体触媒研究用の先進的な研究装置向けの予算や電気化学的な装置を増額した。また、山内チームには中間評価時に発電側の性能も検討することになり、その装置向けの予算を手当てした。山口チームには、新しい分析手法で燃料電池層の劣化解析に非常に有効である、クライオ電顕の依頼測定用に予算を増額した。

また、2013年度採択の永岡チームと姫田チーム及び2014年度採択の西村チームについては、10,000千円までの予算で1年追加支援を実施した。さらに、2015年度採択の西林チーム(6グループ共)と山内チーム(山内グループのみ)については、2021年4月～9月の間、新型コロナウイルス対応の6ヶ月延長支援を実施した。

③人材育成

CRESTでは、西林研究代表者と山内研究代表者が2015年に採択後、准教授から教授に昇任した。藤代研究代表者は産業技術総合研究所材料・化学領域研究戦略部の研究企画室室長を経て、無機機能材料研究部門副部門長に、西村研究代表者は物質・材料研究機構経営企画部門の部門長に昇任した(現在は経営企画部門TIA推進室長)。また、永岡研究代表者が2019年に大分大学理工学部准教授から名古屋大学大学院工学研究科教授に昇任した。

増額案件の一覧表(3,000千円以上の案件)

代表者氏名	年月	支援金額 (千円)	支援内容
永岡 勝俊	2014年7月	12,000	高精度ガス吸着量測定装置の購入
	2014年7月	6,500	2色式熱画像計測システムの購入 (500℃以上での測定が可能)
	2015年7月	16,000	赤外分光装置一式
	2015年7月	10,000	タイトバインディング分子動力学計算システムの購入
	2016年6月	4,730	熊本地震支援 (杉本グループ計算機購入)
	2016年7月	16,000	多目的化学吸着量脱離量測定装置一式の購入
	2016年11月	3,600	シミュレーション用計算機一式とライセンス費など*)
	2016年11月	6,400	マテリアルズ・インフォマティクス用開発環境ソフトウェアの購入*)
	2017年10月	4,000	断熱型熱量計用特注容器一式
	小計	79,230	
姫田 雄一郎	2014年7月	6,000	オンラインマイクロGC
	2015年7月	3,500	試料吹付低温装置
	2015年7月	5,000	オンラインガスクロ
	2015年7月	3,000	高圧NMRセル一式 (保護ケース含む)
	2016年7月	8,000	反応装置の高圧仕様化 (改造)
	2016年7月	4,000	高速液体クロマトグラフィーの購入
	2016年11月	10,000	EasyMax102Advanced 反応熱量測定装置*)
	2017年10月	9,000	In Situ FT-IR装置の購入および設置費用
	小計	48,500	
藤代 芳伸	2015年7月	3,024	FT-IR用真空加熱型拡散反射測定装置一式
西村 睦	2015年7月	15,000	X線2次元検出器
	2015年7月	6,480	断面試料作製装置一式
	2016年7月	3,500	雰囲気中引張試験装置のヒーター改造
	2017年11月	19,872	アークプラズマ法ナノ薄膜蒸着装置の購入*)
	2018年7月	9,990	金属箔プレス成形試験装置の購入
	小計	54,842	
西林 仁昭	2016年7月	10,000	卓上フード/実験設備の購入
	2016年7月	6,750	実験室の借用(1回のみ)の支援)
	2018年7月	10,000	ストップフローラピッドスキャン分光測定装置
	2018年11月	15,000	アンモニア合成を行う為のグローブボックスの購入*)
	2018年11月	5,000	BAS電気化学反応装置の購入*)
	2019年7月	32,940	液体窒素吹付装置単結晶X線結晶構造解析装置一式の購入
	2019年11月	4,000	アンモニア電解合成に必要な電気化学還元反応装置一式
	2019年11月	5,000	ウルトラマイクロ天秤装置一式
	2019年11月	11,000	小型スプレー塗布装置
	2020年1月	3,000	電気化学的還元反応に必要な電気化学反応装置一式
	2020年12月	3,500	IR分光光度計IRSpirit-T装置一式の購入
	小計	106,190	
山内 美穂	2016年7月	3,500	ポテンショスタット(Versastat4-400とFRAオプション)の購入
	2018年7月	9,800	電気化学その場測定用赤外分光装置の購入
	2018年11月	9,750	アルコール燃料電池評価用装置一式*)
	2019年7月	4,900	ガスクロマトグラフ装置一式
	小計	27,950	
山口 猛央	2019年11月	5,160	クライオ電顕による触媒層の劣化解析
	2020年7月	7,000	クライオ電顕による触媒層の劣化解析

④課題中間評価時に進捗が思わしくなかった課題のマネジメント

藤代チームは中間評価において、検討内容を戦略目標の達成に向けて集中することが必要と判断し、構成するグループの見直しを指導した。具体的には、伊原グループ（東京工業大学）と清水グループ（北海道大学）の研究を中止し、荒木グループ（横浜国立大学）と小倉グループ（関西学院大学）を新設した。

里川チームは電気化学アンモニア合成という、もともと難易度の高い課題を設定しており、世界的にみても優れたアンモニア生成速度を達成したが、採択時の目標に掲げた速度、ファラデー効率には至っていない。革新性が高い課題で、世界的にいくつかの研究例があるが、本研究課題の推進によりその実態と困難さを認識でき、重点的に開発を進めるべき材料群や目標とすべき効率等が明らかになってきた。広範な研究実施範囲を絞り、研究を加速する方向で検討するようにした。もともと 500℃程度の中温での電解質を使用してアンモニア合成を試みていたが、平衡論的にも困難であり電気化学的に生成することではないことが分かってきたため、主たる共同者の福岡大学・久保田教授が Pd による膜分離と低温作動の電解質による電解を組み合わせて、200℃程度の低温で運転したところ、これまででないアンモニア合成速度の高い成績を達成させることに成功した。

曽根チームについては開発課題の一つに掲げた新規プロトン伝導体について、伝導率は高いものが得られたが、膜として電解セルに適応できるレベルにない。当初この膜の開発を待って電解セルを構成する予定であったが、耐熱性の高い市販電解質膜を使用する方針に切り替えて、電解セルと触媒反応器の組み合わせたデバイスを早急に試験する方針に変更し、課題の解決に進みつつある。さらにデバイスのスタック化については計算科学的手法を本格的に導入し、九州大学の中島研究員が参加して実施した。

(2) さきがけ

① サイトビジット

研究総括およびアドバイザーが、各さきがけ研究者に対し 2 回ずつサイトビジットを実施した。1 回目のサイトビジットは採択年度の第三四半期に実施した。研究環境の視察のみならず、所属上長への、さきがけ事業趣旨説明を実施し、円滑な運営への準備を行った。2 回目のサイトビジットは第 3 年次の第一四半期に実施した。主にさきがけ予算によって購入した機器・設備等について視察し、安全面の確認・予算運営等の基本的情報の取得および課題進捗状況に対する指導を行った。

② さきがけ研究進捗検討会議

さきがけ研究者に対しては、研究課題の達成はもとより、異なる専門分野や視点からアドバイスを与えることにより、視野を広げるとともに個人で研究方針を決定しつつも、新たな方向性の出口にも導くことを重視した。さきがけ研究者の研究進捗について細やかに把握・指導するため、年 2 回のさきがけ進捗検討会と CREST と共同開催の年 2 回の領域会議で議

論を行い、必要な場合には研究方針見直しを行うとともに、研究者として育成することを重視した。検討会、領域会議の多くは合宿形式とし、エネルギーキャリアに関する大学、研究所、企業の見学会も多く開催した。年2回の領域会議ではCRESTと合同で行うことで、CRESTのテーマを知るとともに、研究総括や領域アドバイザーからだけでなくCREST研究者からも幅広く指導情報提供を受ける機会を持った。また、これらの領域会議では、会議中の議論、アドバイスに加えて、各領域アドバイザーからのコメントを文書で各研究者に提供することで、研究の進め方への指導を行った。さきがけ研究進捗検討会議の実績は下記の通りである。

第1回：2014年4月25日(金)

見学地：京都大学 江口研究室

第2回：2014年10月20日(月)

見学地：なし

第3回：2015年6月9日(火)～10日(水)

見学地：昭和電工株式会社 川崎事業所

第4回：2015年11月20日(金)～21日(土)

見学地：国立研究開発法人物質・材料研究機構、国立研究開発法人産業技術総合研究所

第5回：2016年6月28日(火)～29日(水)

見学地：田中貴金属工業 湘南工場

第6回：2016年12月13日(火)

見学地：なし ※1期生の事後評価会を兼ねて実施

第7回：2017年5月29日(月)～30日(火)

見学地：東北大学 流体科学研究所 小林研究室、丸田・中村研究室

第8回：2017年11月28日(火)～29日(水)

見学地：なし ※2期生の事後評価会を兼ねて実施

第9回：2018年4月20日(金)～21日(土)

見学地：大陽日酸株式会社 山梨事業所

第10回：2018年12月3日(月)～4日(火)

見学地：なし ※3期生の事後評価会を兼ねて実施

③研究費の配分

各研究課題への研究費の配分額は「1. 研究の概要(4)採択課題・研究費」に記載のとおりである。研究費の見直し・増額について下記に詳細を述べる。

合同領域会議・進捗検討会議での研究進捗報告に基づき、研究の加速が期待できる研究課題に対して、適宜増額措置を行っている。また、2016年4月に日隈研究者の所属する熊本大学が地震によって被災した際は、故障した物品修理のための増額措置を行い、研究計画の遂行に支障がないよう措置した。

また、エネルギーキャリアを生産・利用する新規システムを開発するためには、さきがけ研究者の持つ各要素技術同士の連携が重要である。そのため、領域内外のさきがけ研究者間の共同研究も積極的に推進しており、成果の期待できる研究課題に対しこれまで増額措置を行った。

実績は下記の通りである。

研究者氏名	年月	支援金額 (千円)	支援内容
青木 芳尚	2015年12月	4,300	FRA付きポテンシostat・セラミックス高温電気化学セル購入
日隈 聡士	2016年10月	350	熊本震災によって故障した物品修理
	2016年10月	500	さきがけ内共同研究に使用するXAFS測定用物品・消耗品
小林 洋治	2015年7月	1,600	IR用高圧対応拡散反射セル・真空ライン購入
	2016年6月	3,500	高圧反応ライン増設
白石 康浩	2015年12月	2,592	示差熱・熱重量測定装置購入
	2017年5月	1,000	さきがけ内共同研究に使用するアンモニア合成光触媒開発用消耗品購入
辻口 拓也	2015年7月	3,000	ドラフトチャンパー式購入
	2017年5月	1,000	さきがけ内共同研究に使用するギ酸燃料電池開発用消耗品購入
脇坂 暢	2017年1月	3,400	ポテンシostat一式購入
伊藤 良一	2017年5月	1,000	さきがけ内共同研究に使用するグラフェン触媒担体開発用消耗品購入
	2017年8月	1,400	電気炉一式購入
	2017年10月	1,000	さきがけ内共同研究に使用する化学ドーピンググラフェン作成用消耗品購入
	2018年8月	400	卑金属水素発生電極の実機性能試験に必要な外注費用
橋本 望	2017年10月	1,000	さきがけ内共同研究に使用する微小固体燃料供給装置製作用消耗品購入・旅費
森 浩亮	2017年5月	1,000	さきがけ内共同研究に使用するギ酸分解触媒開発用消耗品・加圧反応容器購入
	2017年8月	2,650	島津製GC-2014一式・分析用ガス購入
	2018年8月	650	大阪北部地震で破損した物品の購入
嶺岸 耕	2017年5月	1,950	電気化学インピーダンス測定装置購入

④人材育成

3章でも述べたように、本研究領域はエネルギーキャリア研究分野を強力に率いる次世代の人材育成も大きな任務である。

採択後、1期生の中村研究者が東北大学助教から准教授（現在、東北大学ディスティングイッシュトリサーチャー兼務）に、辻口研究者は助教から終了時、准教授に、3期生の伊藤研究者が東北大学助教から筑波大学准教授に昇任した。また、1期生の日隈研究者は京都大学特定助教から熊本大学助教（現在、産業技術総合研究所触媒化学融合研究センター主任研究員）に、脇坂研究者が山梨大学特任准教授から富山県立大学准教授（現在、教授）に昇任し、任期なしの職を得た。また、大木研究者は2021年1月より京都大学化学研究所に教授（採択時：名古屋大学大学院理学研究科准教授）に昇任予定である。小林研究者は採択時、京都大学講師であったが、終了時は准教授へ昇任し、最近、KAUST（サウジアラビア）へ准教授として赴任した。

さきがけ研究課題の中で継続的な指導が必要と判断したものに関しては、研究者自身の自主性、発想を十分に尊重しつつ、総括または専門に応じた特定の領域アドバイザーによる「マンツーマン」によるサポートも実施した。

⑤進捗が思わしくなかった研究者への対応

第1期の大木研究者については穏和な条件下でのアンモニアの錯体触媒による合成を目的とし、アンモニアの生成までは成功したものの、触媒的に大量に合成できる段階までは至らなかった。同様の研究課題については、本研究領域 CREST の西林チームではアンモニアの錯体触媒による合成に成功し、世界的にも注目される研究となっている。大木研究者の合成した錯体においては、極めて反応性の高い触媒が錯体の不安定性に結びつくという性質によることが明らかとなった。一方で、得られた新規な錯体群は反応性、構造とも注目されるもので学術的には評価されるものである。

第3期の橋本研究者はアンモニア、微粉炭混焼火炎の観察から燃焼機構を解析することを目的としているが、アンモニア、微粉炭それぞれの燃焼火炎の観察には成功したものの、混焼火炎の観察には成功していなかった。シュリーレン光学系による観察を試みたが、それぞれの火炎の輝度が異なるために観察が不可能で、OH ラジカル自発光計測に光学系を切り替えて検討するよう方針変更して成果を得ることに成功した。

(3) 複合領域として/共通事項

① 合同領域会議

研究進捗の報告・検討の場として、年2回の領域会議を CREST・さきがけ合同で開催している。出席者は研究総括、領域アドバイザー、CREST 研究代表者、主たる共同研究者、研究参加者、さきがけ研究者と多数の研究参加者の出席を求め、情報交換の機会としつつ、深い議論につながることを期待した。これらの領域会議では、会議中の議論、アドバイスに加えて、各領域アドバイザーからのコメントを文書で各研究者に提供することで、研究の進め方への指導を行った。領域関係者間での交流・情報交換を促進するために、毎回懇親会(意見交換会)を実施し、さきがけで特徴的な合宿形式の会議を CREST も巻き込んで進め、各層での議論の促進を図った。

また、会議のスケジュールにはなるべく企業見学の時間を設けて、エネルギーキャリアの製造プラントや触媒製造工場など、再生可能エネルギー関連技術を扱う施設見学を実施した。多くの企業見学を通じ、工場での大量製造過程・スケールアップの手法、製造コストなどについて研究者に実感してもらうことで、社会実装への意識付けを行う目的のもと実施した。

領域会議の実績は下記の通りである。

第1回：2014年1月15日(水)～16日(木) 出席者：約30名

見学地：千代田化工建設株式会社 子安オフィス・リサーチパーク

第2回：2014年7月30日(水)～31日(木)出席者：約20名

見学地：三井化学株式会社 大阪工場

第3回：2015年2月21日(土)～23日(月)出席者：約20名

- 見学地：クラリアント触媒株式会社 富山工場
- 第4回：2015年8月26日(水)～27日(木)出席者：約50名
見学地：国立研究開発法人産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所(FREA)
- 第5回：2016年2月20日(土)～22日(月)出席者：約60名
見学地：三井化学株式会社 岩国大竹工場
- 第6回：2016年9月25日(日)～27日(火) [府中] 出席者：約70名
見学地：株式会社東芝 水素エネルギー研究開発センター
- 第7回：2017年2月15日(水)～16日(木) [品川] 出席者：約70名
見学地：なし
- 第8回：2017年9月25日(月)～26日(火) [新大阪] 出席者：約70名
見学地：岩谷産業株式会社 中央研究所
- 第9回：2018年1月26日(金)～27日(土) [名古屋] 出席者：約70名
見学地：なし
- 第10回：2018年9月10日(月)～11日(火) 見学地として、日本CCS調査・苫小牧実証センターを予定していたが、北海道胆振東部地震が9月6日に発生し、余震・停電が続いていたために千歳での会議を中止し、急遽、JST東京本部にて開催した。
- 第11回：2019年1月28日(月)～29日(火) [姫路] 出席者：約60名
見学地：なし
- 第12回：2019年9月27日(金) [札幌] 出席者：約55名
前日の9月26日に北大・化学反応創成研究拠点(WPI、前田拠点長：【分子技術】研究代表者)とキャリア研究代表者の情報交換会を北大で開催した。
- 第13回：2020年2月2日(日)、3日(月) [市ヶ谷] 出席者：約60名
見学地：なし
- 第14回：2021年2月1日(月) [オンライン会議] 予定
尚、公開シンポジウムを10月29日に開催したために2020年9月は開催しなかった。

②特許申請とプレスリリース

本研究領域としては、権利化の必要な成果は特許申請することを推奨した。各さきがけ研究者およびCREST研究チームは企業領域アドバイザーからの助言などを基に、特許申請に積極的に取り組んだ。

研究成果の適切な知的財産化を促す目的の下、JSTの知財関連部署から講師を招き、第1回および第8回領域会議にて知的財産講習会を実施した。領域開始時に知財講習会を開催することは戦略的創造研究推進事業では多いが、領域の途中で知財講習会を開催した領域例は少ない。実際、講習会直後にさきがけ研究者から相談が寄せられ、大学で不承継となった発明がJSTから特許出願されるケースがあった。

また、領域会議や課題中間・事後評価会に産学連携展開部および知的財産マネジメント部

の担当者を招き、CREST・さきがけ研究の成果展開について意見交換を実施している。

所属研究機関で出願しなかった特許について、所属研究機関から JST に譲渡を頂き、JST から出願に取り組んだ。さきがけの成果からは国内 2 件、PCT1 件を出願した。また、所属研究機関で国内出願したものの、国際出願を実施しなかった特許についても譲渡をいただき、PCT 出願を実施した。CREST からは永岡チーム 3 件、山内チーム 4 件の PCT 特許を JST から出願した。山内チームには INPIT から知的財産プロデューサーを長期間にわたり、派遣頂き、多数の特許出願に貢献頂いた。

また、プレスリリースにも積極的に対応するように、研究代表者・研究者へ指導した。11 件については、JST との共同プレスリリースとして発表し、その詳細資料を添付したが、案件としては次の通りである。

(i) 永岡チーム 2016 年 9 月 21 日

「世界最高レベルの性能を持つアンモニア合成触媒を開発—金属の特殊な積層構造と塩基性酸化物の相乗作用」

(ii) 永岡チーム 2017 年 4 月 29 日

「アンモニアから水素を簡単に取り出す触媒プロセスを開発～触媒への吸着熱を利用した新しい反応の起動方法～」

(iii) 姫田チーム 2015 年 12 月 11 日

圧縮機を使わない高圧水素連続供給法を開発
「ギ酸を用いたコンパクトな水素ステーション構築に向けて」

(iv) 西林チーム 2017 年 4 月 4 日

「世界最高の活性を示すアンモニア合成触媒の開発に成功～モリブデン錯体を触媒とした常温・常圧での窒素固定反応～」

(v) 山内チーム 2017 年 12 月 13 日

「世界初、電力のみを使ってシュウ酸からグリコール酸を連続的に合成する装置の開発に成功—貯蔵や輸送が容易な次世代燃料の実用化に期待—」

(vi) 永岡チーム：2018 年 1 月 29 日

「再生可能エネルギー利用型のアンモニア合成プロセスに適した触媒を開発
～高温還元処理で発現する複合酸化物担体と金属の特異的な協働作用～」

(vii) さきがけ・白石研究者：2019 年 7 月 2 日

「常識はずれ」な光触媒を開発～太陽光と水と酸素で H_2O_2 を合成～」

(viii) 西林チーム：2019 年 7 月 26 日

「ルテニウム錯体を用いたアンモニアの触媒的酸化反応の開発を達成～アンモニア社会に向けた直接的なエネルギー変換反応～」

(ix) さきがけ・森研究者：2019 年 9 月 25 日

「輸入に頼っていた高価な重水素を安価な原料から製造～触媒により重水素 D_2 と HD を選択的に合成できる新技術～」

(x) 山内チーム：2019年11月1日

「電気エネルギーを使った有機酸と水からの高効率なアミノ酸合成に成功～再生可能電力を用いた低環境負荷型の化学合成プロセスとして注目～」

(xi) 永岡チーム：2020年1月23日

「再生可能エネルギーを利用したアンモニア合成に期待～エネルギー問題、食糧問題の解決に寄与する高活性触媒を開発～」

尚、西林チームの「世界で初めて窒素ガスと水からのアンモニア合成に成功～常温常圧で世界最高の触媒活性、持続可能な社会へ～」(2019年4月25日)については、4月10日の日経産業新聞に一部掲載があったため、JSTは残念ながら共同発表から辞退し、東京大学、単独の発表となった。

③成果の一般公開

CREST・さきがけ研究で得られた成果を将来的な社会実装に繋げていく上で、研究成果の外部発表は重要である。本研究領域では下記のような展示会で成果発表を行い、領域の宣伝および共同研究先となりうる企業の探索を行った。また、学会とは異なる場での成果発表について経験を積んでもらう、他ブースの見学を通じて企業での研究開発動向を学んでもらう、という意図のもと、発表は主にさきがけ研究者またはCRESTの若い研究参加者に依頼した。

(i)再生可能エネルギー世界展示会

再生可能エネルギー世界展示会は、再生可能エネルギーをはじめ、エネルギーと環境の全分野において、地球環境保全に貢献する製品・技術・サービス・周辺機器・情報を展示する日本最大の展示会である。

本研究領域はSIP「エネルギーキャリア」と共に、2014年度から現在までに4回ブースを出展し、本研究領域事業の広報およびCRESTにおける研究成果の発表を実施した。

(ii)nanotech 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議

nanotechは国内最大規模のナノテク分野の展示会であり、研究開発や製品開発等、R&D関係部署からの来場者が約50%を占めている。

2016年度は、さきがけ1期生の成果報告会、および企業関係者への成果宣伝の場として、JST出展ブース内にてポスター発表・および口頭プレゼンを実施し、産業界に向けて成果を発信した。2017年度もさきがけ2期生が同様に成果報告を実施した。

(iii)水素エネルギー協会定例研究会

第158回定例研究会(2019年3月8日、タワーホール船堀小ホール)にて、さきがけ5件・CREST2件の成果を約100名の参加者向けに講演した。

(iv)世界水素技術会議(WHTC)2019

特別セッション(2019年6月4日午後、東京国際フォーラム)でCREST4件・さきがけ2件の口頭発表を行った(聴講者数十名)。

(v) エネルギーキャリア成果報告シンポジウム

2020年10月29日にオンライン形式で開催し、参加登録者数は約330名であった。

(vi) JSTの新技术説明会で日隈研究者が2017年8月1日、姫田研究代表者と曾根研究代表者が2018年1月18日、永岡研究代表者が2019年10月18日、西村研究代表者が2020年11月6日（オンライン形式）で講演した。

④他のエネルギーキャリア関連事業との連携

エネルギーキャリア関係のプロジェクトを持つ他機関との連携も積極的に実施した。本研究領域の江口総括はSIP「エネルギーキャリア」の課題において研究責任者を務めた。総括がSIP内の会議でCREST・さきがけの活動紹介をしたことがきっかけとなり、SIPとNEDOが合同で実施する情報意見交換会（非公開）に第3回から参画することとなった。CREST・さきがけの研究者から希望者を募りポスター発表を実施した。SIP-NEDO情報意見交換会でのポスター発表状況は次の通りである。

第3回：2016年8月3日（火）CREST3件、さきがけ2件

第4回：2017年3月28日（火）CREST5件、さきがけ2件

第5回：2018年2月8日（木）CREST8件、さきがけ2件

⑤共同研究の推進

ここでは、研究領域内外共同研究、国際連携および産業界との連携について述べる。

(i) 研究領域内共同研究の推進

バーチャル・ネットワーク型ラボの特徴を最大限に生かすために、研究領域内各チーム間の共同研究を推奨してきた。

●CREST研究者間での連携例

・曾根チーム松本グループでは、150℃程度でのプロトン伝導体を探索したが、その候補材料として、里川チームから各種の耐水熱性ゼオライトの提供、山内チームから界面イオン伝導性ナノ粒子を提供してもらい、その特性を評価して共同研究を進めた。その研究成果については、各1報の論文を発表した。

・永岡チームと西村チームの湯川グループ・南部グループが連携して「バナジウム合金メンブレンリアクターを用いた高効率アンモニア分解による高純度水素製造技術の開発（JST A-STEP 機能検証フェーズ：研究期間2019年11月18日～2020年11月30日）」をスタートさせた。永岡チームが開発したRu触媒と西村チームが開発したV-10mol%Fe合金膜とを組み合わせた小型のメンブレンリアクターを試作し、アンモニアガスから直接水素を分離できることを確認している。またメンブレンリアクター化によってアンモニア転化率が向上することを実証した。さらに、高濃度アンモニアに対する合金膜の耐腐食性や耐久性を評価し、実用化する上での課題を抽出する。

・西林チームと姫田チームでは、アンモニア電解還元反応を達成するために必要な三ヨウ化

サマリウム (SmI_3) から二ヨウ化サマリウム (SmI_2) へ電解還元反応について共同研究を行った。その研究成果については、2020年に該当する内容を含む原著論文 (Electrochemical Reduction of Samarium Triiodide into Samarium Diiodide, K. Arashiba, R. Kanega, Y. Himeda, and Y. Nishibayashi, *Chem. Lett.* 2020, **49**, 1171-1173.) を発表済みである。更に、開発に成功した電気化学的還元手法を用いて、触媒的アンモニア合成反応の開発に成功した。その形式的なファラデー効率は約 80%に達した。その研究成果については論文として投稿するべく準備中である。

・曾根チームは、低温サバチエ触媒の研究開発と、サバチエ反応の発熱を液体の水の電機分解に活用する連携プロセスを検討していた。一方、藤代チームでは、高温での SOEC と炭酸ガス還元を組み合わせるシステム検討を進めており、特に藤代チームの荒木氏 (横浜国立大) から支援を受け、藤代チームの開発した計算手法に基づき曾根チームのデバイスのエネルギー利用効率の計算を行うことで、デバイス成立性に対する妥当性検証をうけることができた。

● さきがけ研究者間での連携例

・青木研究者・日隈研究者：青木研究者が提案した研究課題「実用的中温動作型水素膜燃料電池の開発」が、2017年度 JST 未来社会創造事業(探索加速型)に採択された。また、本研究課題には同じくさきがけ 1 期生の日隈研究者が参画した。

・中村研究者・橋本研究者：マイクロフローリアクタ用の固体燃料揮発分分離供給装置を開発する共同研究を実施し、高精度な固体燃料揮発分の反応メカニズム構築を目指して開発を進めた。

・脇坂研究者・伊藤研究者：KOH 溶液中でのポーラス Ni 電極の水素発生能に関する共同研究を実施し、成果は次の共著論文として発表した。

Chem. Lett., 46, 267-270, 2017、*Metals*, 8, 83, 2018.

ACS Catal. 8, 3579-3586 2018、*ACS Energy Lett.*, 3, 1539-1544, 2018.

・さきがけの研究者 3 名での共著論文が 2 報発表されている。

日隈研究者、脇坂研究者、伊藤研究者 *J. Mater. Chem. A*, 7, 2156-2164, 2019.

脇坂研究者、青木研究者、伊藤研究者 *Reaction, Nat. Comm.*, 2020 in press.

● CREST・さきがけ研究者間での連携例

・アンモニアに関する研究課題を実施している領域関係者が有志で「アンモニア合成・利用研究会」を立ち上げ、成果の共有および意見交換の場を設けた。これまでに 3 回開催され、CREST 永岡チーム、里川チームおよびさきがけ日隈研究者、小林研究者が参加した。

・CREST 曾根チームの主たる共同研究者である阿部孝之教授とさきがけ脇坂研究者が、バレルスパッタ法による Ti 担体 Pt 触媒の調製という内容での共同研究を実施した。本研究は富山大学水素同位体科学研究センターにおける一般共同研究課題として採択された。

(ii) 研究領域外共同研究の推進

●他の CREST またはさきがけ研究領域との研究連携

・さきがけ研究領域「相界面」の研究者(代表：井上元研究者)と本研究領域の辻口研究者の共同研究提案が、さきがけネットワーク(※)に採択(研究費総額 20,000 千円、うち辻口研究者配分額 5,000 千円/1.5 年)された。本研究課題はギ酸燃料電池を題材とし、多孔質電極内部の物質移動という観点から性能向上を目指すもので、辻口研究者のさきがけ研究での知見が土台となった。

・さきがけ研究領域「相界面」の狩野旬研究者と本研究領域の日隈研究者の共同研究が、SPring-8 XAFS 実験課題(Proposal No. 2014B1516, 2015B1463)として採択された。

・永岡チームは九州大学超顕微解析研究センター 松村晶教授と超高分解能 STEM-EDX によるアンモニア合成・分解触媒の構造解析について 2013 年 10 月から共同で研究を進め、これまでに 5 報の論文を報告した。

・山内チームはアンモニウムの電極酸化のための新規 Fe 系ナノ合金触媒を開発している。CREST 研究領域「革新的触媒」の松村チーム(九州大学超顕微解析研究センター 松村晶教授)との共同研究によるナノ合金の顕微観察をもとにナノ合金触媒の活性発現メカニズムの解明を行っている。その結果について論文を投稿中である。

・伊藤研究者・高橋研究者(一細胞解析)の共同 FS で 2 報を発表した。

Adv. Sci., 6, 1900119, 2019; Angew. Chem. Int. Ed., 59, 3601-3608, 2020.

※さきがけネットワーク

さきがけ研究の実施やさきがけ研究者間の交流を契機として生まれた、挑戦的な研究構想の実現可能性を検証する取り組み。さきがけ研究者を対象とし、研究期間約 1 年半、研究費は 2,000 万円(直接経費)を上限、共同研究者としてさきがけ研究者(終了 1 年以内の研究者も対象を含む)1 名以上の参加を条件としている。

詳細は下記を参照。

http://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research/sakigake_nw/index.html

●国際連携

・姫田チームでは、以前からブルックヘブン国立研究所(米)、藤田恵津子シニアケミストと DFT 計算によるギ酸脱水素化反応の反応解析で共同研究を進めており、本領域での研究成果として論文 4 報(これまでに 29 報の共著論文)を発表した。また、2014 年から大連理工大学(中国)、王万輝副教授と有機物からの水素発生について共同研究を進め、論文 1 報を既に報告した。加えて、欧米で実施されているギ酸を水素キャリアとする研究開発プロジェクトやベンチャー企業との情報交換を進めた。

・姫田チーム・川波グループでは、キングアブドラ科学技術大学(サウジアラビア)、触媒センター、Kuo-Wei Huang 教授と 2016 年以降、ギ酸脱水素化触媒の開発で論文 2 報を既に報告

した。現在、共同研究契約の手続き中であり、近日中に締結が完了する。

・曾根チームでは、産業技術総合研究所の支援を受けつつ、JAXA と連携協定をもつドイツ航空宇宙センター（DLR）との間で、水電解技術や生成水素からのメタン合成技術の有効利用について議論を開始した。特に、DLR では、再生可能エネルギー利用による航空機燃料製造を目的とした「Power to Liquid」の研究を進めており、その一環として炭酸ガスからのメタン合成である「Power to Gas」を解決されるべき最初のステップの一つと位置付けている。討議議論の一部は2020年のDLR-JAXA Strategic Dialogueでも取り上げられた。

・山内チームでは、精密に構造されたナノ合金触媒を作製している。イリノイ大学のケニス教授との共同研究により明らかとなったナノ合金の電気化学的CO₂還元特性について、アメリカ化学会のJ. Am. Chem. Soc. 紙上で報告した論文が2017年～2018年トップレベルの被引用数をもつ、日本の著者による論文としてアメリカ化学会から紹介された。

・山口チームでは、2015年10月からCouncil of Scientific & Industrial Research-National Institute for Interdisciplinary Science and Technology (CSIR-NIIST, India)、Materials Science and Technology DivisionのU. S. Hareesh 主席研究員、およびPhysical and Materials Chemistry DivisionのSreekumar Kurungot 主席研究員と新規エネルギー材料の開発で共同研究を進めており、本事業実施中に論文8報を発表した。また、JSTの国際強化支援策・研究者招へい支援制度を利用して、Hareesh 主席研究員の研究グループより2017年度にSankar 博士、2019年度にShijina 氏を招へいし、触媒研究の活性化を図った。2020年度には、同支援制度によりSreekumar 主席研究員の研究グループよりNadeema 博士を招へいし、MEA 開発を推進している。同支援制度では、電気化学触媒・解析で著名なインドTata Institute of Fundamental Research(TIFR)のNarayanan 助教の研究グループからもSreekanth 博士を招へいし、ギ酸塩再生反応に関する検討を行った。同支援制度での招へい期間中に得られた成果をもとに、論文2報を既に発表した。

●産業界との連携

・永岡チームでは、アンモニア分解に関して、プロセスの実用化に向けた共同研究をA社と開始し、2020年度には共同で特許を出願した。また、B社とはルテニウム系アンモニア合成触媒の製造販売を目的とするライセンス契約および共同研究に向けた準備を進めている。C社とはプロセス化を志向した共同研究に着手している。

・姫田チームでは、A社に不要物となるギ酸の除去向けとして、触媒を有償で試料提供した。また、B社とは固定化触媒開発で2017年以降に秘密保持契約を締結した。C社とは、技術コンサルタント契約を締結し、技術指導を行った。D社には、触媒を有償で試料を提供した。

・曾根チームでは、京セラ(株)および(株)ケミックスと連携し、新規水電解技術の特許を出願している(特開2018-78,098、名称「水電解/燃料電池発電用セル及びこれを複数積層したセル積層体」、出願日2016/11/01)。当該特許については、現在、国外登録移行の準備を進めているところである。また、水電解と炭酸ガス還元反応を組み合わせたメタン合成装置

については(株)ケミックスと(特開 2019-89,713、名称「メタン合成装置」、出願日 2017/11/10)、また新規水電解槽を運転するための装置開発では三菱重工業(株)と(特開 2020-66,796、名称「水素及び酸素生成システム並びに水素及び酸素生成方法」、出願日 2018/10/26)連携して特許を出願した。これらの実績から派生し、特に水電解技術の実用化を目指し、民間企業1社と共同研究契約を締結している。

・藤代チームでは、開発成果の産業展開に繋がるよう日本ガス協会や複数の企業とも議論を進め、プロジェクト終了後、産学体制でのNEDOプロジェクト提案へつなげた。

・西林チームでは、チームに参画している日産化学株式会社や出光興産株式会社と連携しながら、新しい企業の参入も前提にした本CRESTプロジェクトの終了後の継続した共同研究の体制について検討中である。

・山内チームは、2020年10月からD社と液体燃料を用いた発電に関する連携を開始した。

・山口チームでは、C社とカプセル触媒に関する研究で2016年10月～2018年2月に共同研究を実施した。

⑥複合領域中間評価結果への対応

(i) 領域アドバイザーに関しては、多様な学問分野から、また大学、研究機関、企業とバランスよくアドバイザーを選出しており、産学両面から専門的にアドバイスができるようになっている。一方で、材料科学の観点や理学的な研究者が参加することで更に多面的な外部意見等も必要と考えられる。

(ii) また研究費の有効活用の点で、今後は複合領域内での設備の共同利用の促進も重要である。

CREST及びさきがけの導入設備に関してはできるだけ目的の反応、デバイスに対応して、性能を評価できる設備の導入を優先するよう依頼した。その結果、汎用性や一般性の高い高額な分析装置などはこの領域に関してはあまり導入が進んでいないのが現状である。例えば永岡チームの研究は超高分解能電子顕微鏡の使用で飛躍的に触媒の状態分析が可能となったが、これは他領域CRESTにおける保有設備の使用によるところが大きい。その他の研究者において触媒や電極材料の物性評価に共同利用設備や既存設備を積極的に利用している。この領域内では単に設備の借用、転用にとどまらず、研究者+設備の組み合わせで領域内他チーム、他研究者と協働することを勧めている。さきがけの日隈研究者と青木研究者の燃料電池共同開発、脇坂研究者と伊藤研究者の電極調製・評価技術の共有、曾根チームと脇坂研究者の触媒調製法の共同利用、曾根チーム、里川チーム、山内チーム間の材料及びその評価結果の共有などが例として挙げられる。

(iii) 今後、複合領域としての特徴をより鮮明に出すためにも、各キャリアのメリット・デメリットを俯瞰する視点も重要である。

アンモニアについては最近エネルギーキャリアとしての優位性が認められ、実際にアンモニアを燃料として利用するための国際間の取引などが開始される段階になった。本領域で取り扱ったアンモニア合成触媒、電解合成法についても将来技術として期待され、各担当機関で他プロジェクトとして継続されている、利用の面でも燃焼や石炭との混焼は大規模な実証まで展開されるステージまで展開され、本領域で実施された基礎研究としてのアンモニア燃焼はそれらの基礎知識として貢献している。

メチルシクロヘキサンについても国際取引が開始され、電解合成、光触媒合成など省エネルギーでの合成プロセスは将来技術として必要とされる。

本領域ではギ酸あるいはギ酸塩をエネルギーキャリアとして分解して水素を取り出す触媒技術、直接燃料電池として発電する技術に大きな進展を見た。一方で電解合成なども従来法に頼らない合成も可能ではあるが、十分な可能性を見出すには至っていないギ酸のエネルギーキャリアとしての可能性を十分明確にするためにはギ酸の安価でエネルギー投入の少ない製造方法の確立が必要である。

メタン合成については単純な水素キャリアとしてのとらえ方ではなく、CO₂の貯蔵有効利用と組み合わせて検討がなされている。Power to Gas の概念の発展とともに注目度が上がっていることから、都市ガス利用と結びつけられて活用することが考えられる。熱量調整をすれば、都市ガス配管に導入できる可能性があるため、比較的早期にそのような導入が可能である。

アルコールなど本領域で取り扱った他のエネルギーキャリアは酸化、還元 reversible と効率をさらに見極める必要がある。むしろレドックスフローバッテリーと競合する技術となるか、さらに検討が必要な段階である。

7. 研究領域として戦略目標の達成状況について研究を実施した結果と所見

(1)CREST

①研究総括の狙いに対する研究成果の達成度

CREST においては、専門領域の異なる複数の研究者が協力して、将来、実現の可能性のあるエネルギーキャリア物質において、その使用環境まで考慮して現実性を示すことが必要であると考えている。当初、興味のある触媒反応、電気化学反応、材料など、特定の専門から出発したチームは多かったが、領域会議などで、エネルギーシステムとしての有効性、量的適応性、エネルギーキャリアとしての有効性を明確にするよう求めたことから、将来のエネルギーキャリアとしての有効性を認識して研究をすすめるようになった。その点では狙いに従った方向性となっている。しかし、研究期間内に試作段階のデバイスや小規模の反応装置から、大きな反応器成績の予想などに結び付けていくには依然努力が必要であり、研究課題に対する多角的視点が必要である。そのような観点からは計算によるシステム計算デバイス計算が有効に活用された。永岡チームでは新たに中坂研究者の参加により、反応速度式を構築し、中規模反応器の成績予測までができるようになった。藤代チームでは荒木研究者の途中からの参加により熱利用などを考慮したシステム計算がなされて、有効性が実証された。曾根チームでは中島研究者がデバイスのマルチフィジクスモデリングによって、小規模セルの結果からスタックの性能を予想することにより Sabatier 反応と水電解を組み合わせたデバイスの成立性について示すことができた。このように大型化や複数の反応の統合が現時点でも困難な場合は計算科学を活用して領域の出口として有効な情報を得られた。

②研究領域全体として見た場合の特筆すべき研究成果

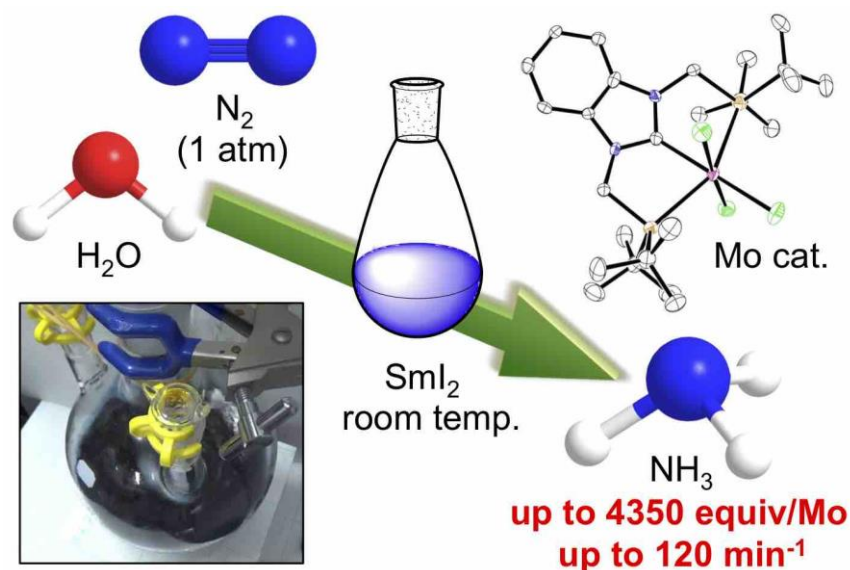
科学的に最も優れた成果としては、2019年4月24日付の Nature (オンライン速報版) で公開された、西林チームが世界で初めて窒素ガスと水からアンモニア合成に成功し、常温常圧で世界最高の触媒活性を有する錯体触媒系を見出したことが挙げられる。モリブデン触媒を用い、窒素ガスおよびプロトン源として水、還元剤としてヨウ化サマリウムを用いることで、常温・常圧の反応条件下で世界最高の触媒活性を達成した。本研究成果は国内・海外の各メディアに掲載され、NHK おはよう日本でも紹介された。

従来はメタロセン系の還元剤とプロトン源存在下で窒素と水素の反応系からのアンモニア合成であったことを鑑みると大きな飛躍であった。本件は、JST の成果トピックスとして 2019 年度文部科学白書及び JST 成果集 2020 に掲載された。

窒素固定酵素ニトロゲナーゼが示すアンモニア合成の活性に匹敵する極めて高活性な触媒能を示す新規なモリブデン錯体を触媒として用いたアンモニア合成反応を開発することに成功した。この開発に成功した新しいアンモニア合成法は、窒素ガスと水とを原料として利用する画期的なものである。

西林チームでは上記の他に Nature 系雑誌に 3 報が掲載されている。ピロール骨格を持つアニオン性 PNP 型ピンサー配位子を有する鉄窒素錯体を新しく設計・合成し、これが触媒的

窒素固定反応における有効な触媒として働くことを明らかにした (Nature Communications 誌、2016 年)。N-ヘテロサイクリックカルベン骨格を含む PCP 型ピンサー配位子を持つ窒素架橋二核モリブデン錯体が常温常圧の温和な反応条件下で進行する触媒的アンモニア生成反応において極めて有効な触媒として働くことを明らかにした (Nature Communications 誌、2017 年)。さらに、酸化剤と塩基を組み合わせた反応系を用いることで、ルテニウム錯体がアンモニアの触媒的酸化反応において有効な触媒として働くことを明らかにした (Nature Chemistry 誌、2019 年)。



③研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

CREST9 チームの論文件数は 247 件(国際 234 件、国内 13 件)に達し、口頭発表は 890 件におよび、その内の招待講演は 311 件であった。

CREST 藤代チームと曾根チームによって実施された、電気化学反応を伴うメタン合成は特に欧州において最近活発に技術開発されている Power to Gas (P2G)に関連したユニークな国内技術として今後の貢献が期待できる。P2G は主として再生可能エネルギーからの電力を利用して水素を製造し、その水素またはそれを原料とした炭化水素ガス燃料を供給して保存、利用する手法である。両チームはそれぞれメタン合成に至るプロセスを水蒸気電解または水電解と触媒反応を組み合わせたシステムとして統合することの有効性を示した。水素よりも汎用性の高いメタンをエネルギー的に有利な条件で合成することにより、再生可能エネルギーの有効利用、CCU (Carbon dioxide Capture and Utilization) への展開、合成都市ガスの製造の観点から近い将来の実用化につながる技術となる可能性を含んでいる。このような技術は再生可能エネルギー利用の推進で一歩先を行く欧州に対抗する国内技術として、企業との連携や後継プロジェクトへも展開されている。

山内チームでは、カルボン酸であるシュウ酸と水から電力を使ってアルコール様物質で

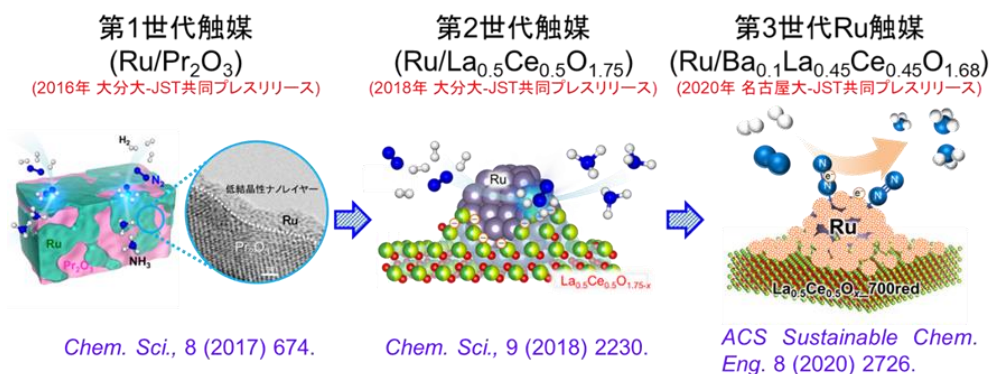
あるグリコール酸の連続的な合成に成功し、Scientific Reports に報告した。従来のグリコール酸の合成プロセスは、高温高压条件を必要とするか、環境汚染物質となる有機物や塩の排出を伴うが、本研究では、電力のみを使ってシュウ酸からグリコール酸を連続的に製造する装置の開発に成功した。この技術により、効率的なグリコール酸の製造が可能になるだけでなく、再生可能エネルギーによって作られる電気エネルギーを貯蔵性及び輸送性に優れたグリコール酸に直接的に貯められるようになる。この装置を用いることで、不純物を添加せずにシュウ酸からグリコール酸を連続的に製造することに世界で初めて成功した。また、直接アルコール型燃料電池をつかって、100%のファラデー効率（選択率）でアルコールをカルボン酸あるいはカルボニルに変換することで二酸化炭素の排出のない発電に成功した。さらに、高分子電解質形アルコール電解合成セルから生成する高濃度の液体キャリアを選択率 100%でカルボニルに変換して発電できることも確認した。この結果は、同一のキャリアを使って充電と放電を駆動できることを実証し、原理的には大型蓄電池として駆動できることを示した。大型蓄電池としては、NAS 電池（一部実用化も高温保持必須）とバナジウムレドックスフローなどの限られた候補しかなく、科学的に重要な成果である。

④研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

アンモニア合成触媒については国内において最近メディアなどで頻繁に取りざたされており、燃料あるいはエネルギーキャリアとしての認識が大きく進展した。これには SIP、ACCEL、及び本研究領域など JST 事業の貢献が大きい。本研究領域の永岡チームで発見された Ru 触媒は従来の Fe 系 Haber-Bosch 触媒や最近発見された他の Ru 触媒を凌駕する高い活性を有する。触媒の担持構造も特異的で注目に値する。最近、複合酸化物担体に担持した Ru 触媒でさらに高い触媒性能が得られることを見出し、PCT 出願を終了した。空気中でも取扱いやすい触媒であることから、実用上の観点からも優れた触媒である。

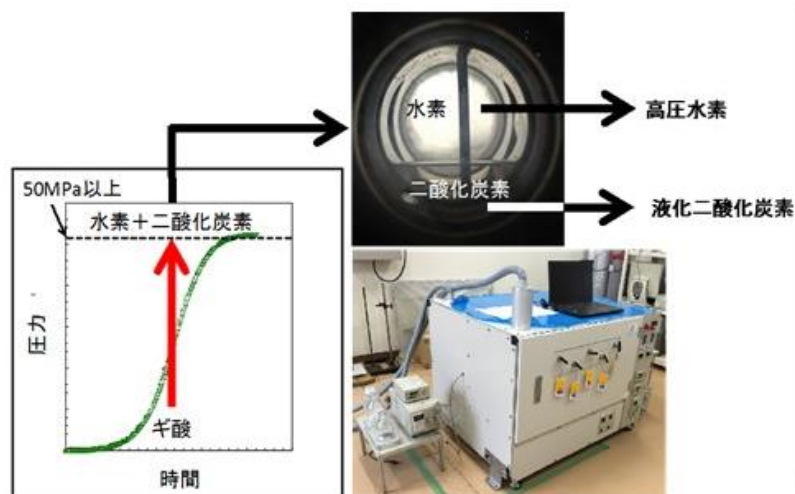
永岡チームは、これまでに複数の企業が研究室を訪問し、アンモニア合成触媒について意見交換を行った。特に第 2 世代触媒 ($\text{Ru}/\text{La}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}\text{O}_{1.75-x}$) 第 3 世代触媒

($\text{Ru}/\text{Ba}_{0.1}/\text{La}_{0.45}\text{Ce}_{0.45}\text{O}_{1.68}$) に関するプレスリリース以降の反響が大きく、現在企業 B 社、C 社と触媒開発に関する共同研究を実施している。特に C 社とは 2021 年度以降の大型プロジェクトへの申請について準備を進めている。また、材料メーカーである E 社からは第 2、第 3 世代触媒の販売を視野に入れたライセンスおよび共同研究の実施を提案されている。



一方、アンモニア分解に関して、プロセスの実用化に向けた共同研究を企業 A 社と開始しており、2020 年度には共同で特許を出願した。2021 年度以降の産学連携型予算の申請を予定しており、準備を行っているところである。

姫田チームでは、ギ酸から水素を効率的に発生させる現象を利用して、化学エネルギーを圧力エネルギーとして取り出し、高压水素を得る方法を考案した。この手法は、圧縮機を必要としない、簡便でかつ連続して高压水素を供給できる特徴をもつ。本技術では、ギ酸からの水素発生において、イリジウム錯体が容易に 50 MPa 以上の高压の水素と二酸化炭素のガスを連続的に発生することを見出した。本触媒は副生成物の一酸化炭素がほとんど生成せず、しかもギ酸水溶液中での安定性も高いことは錯体触媒としては特異的である。二酸化炭素からギ酸を製造する反応で実用的なものが開発されることが、エネルギーキャリアとしての実用化に向け待ち望まれる。



藤代チームでの共電解技術については、将来に向けた脱炭素、カーボンリサイクル技術として、日本ガス協会等との議論を進めるとともに、政府で取りまとめた技術ロードマップの電気化学技術の事例として成果を提供した（固体酸化物共電解を活用する CO₂ 再資源化技術）

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/carbon_recycling/pdf/tech_casebook.pdf。

西村チームが開発した水素分離膜は、Pd より安価な V を用いながら従来の Pd 系膜を凌駕する性能が得られている。同チームは水素分離デバイスを作成するための強度を確保するための構造や接合方法、大面積化、モジュール作製方法についても明確に示しており、今後水素に関連した分離技術として実際に使用される可能性を示す技術となった。同チームには、材料メーカーの太陽鋳工が主たる共同研究者として参加しており、実用化への課題を明確に視野に入れて研究を進める体制となっている。その結果、実用的な処理速度で高純度水素を精製可能な水素分離デバイスを開発できた。社会実装には未だ至っていないが、2020 年 11 月の JST 新技術説明会にて説明を行った結果、複数社から問い合わせがあり、今後の協働について検討を進めている。

山口チームでは、分解の起点となるエーテル結合を含まず、かつ主鎖構造へ折り曲がり構造を導入して溶媒への溶解性を付与した高耐久かつ製膜性に優れたアニオン伝導性ポリマーを開発した。また、高性能・高耐久な触媒と電解質を組み合わせた MEA を開発して直接ギ酸塩溶液型アルカリ燃料電池の発電試験を行い、200 mW/cm² を超える高い出力密度とともに、従来困難であった 80 °C において 150 時間にわたる安定な発電性能が得られ、高出力密度と高耐久性の両立に成功した。また、MEA のさらなる高性能・高耐久化へ向けて、クライオ電顕による加湿触媒層の観察を行い、開発したアニオン伝導性ポリマーが発電試験条件で高耐久であることを示した。この結果は実用化に向けて大変に重要な成果になっており、NEDO の 2 つのファンドでさらに実用化基礎検討が進むことになった。

⑤本研究領域に続く研究資金の獲得状況

永岡チーム

- ・JST、研究成果展開事業 研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) 機能検証フェーズ「バナジウム合金メンブレンリアクターを用いた高効率アンモニア分解による高純度水素製造技術の開発」(研究代表者：永岡勝俊；2019～2020 年)
- ・JFE21 世紀財団、研究助成「コークス炉ガス中のアンモニアを水素リソースとして利用するための機能性触媒開発」(研究代表者：永岡勝俊；2019～2020 年)
- ・トヨタ・モビリティ基金、水素社会構築に向けた革新研究助成「貴金属フリーアンモニア合成触媒の高活性化に関する研究開発」(研究代表者：永岡勝俊；2020～2023 年)
- ・日本学術振興会、科学技術研究費補助金基盤 B「高温水素雰囲気での酸化物の移動現象を起源とした高活性窒素還元サイト発現の学理解明」(研究代表者：永岡勝俊；2020～2023 年)

藤代チーム

- ・NEDO 次世代火力発電技術開発/次世代火力発電推進事業/CO₂ 有効利用技術の先導研究 (CO₂ 直接分解) の委託業務 (2019 年～2021 年)

西村チーム

- ・天田財団 重点研究開発助成、大型水素分離合金膜の形状最適化および成形技術の開発

(9936 千円, 2020 年 12 月～2024 年 3 月、代表：湯川伸樹)

・科研費 基盤研究 (B) (一般) B2 型金属間化合物における水素固溶体の科学と低温作動型水素透過合金への展開 (16,640 千円、2019 年度～2021 年度、代表：湯川宏)

西林チーム

・基盤研究(S)：「超触媒を利用した窒素分子からの革新的分子変換反応の開発」(研究代表者：西林 仁昭；2020 年度～2025 年度)

山内チーム

・JAXA 宇宙探査イノベーションハブ 2020-2021 の課題として採択「CO₂ の高度利用に資する電気化学的アミノ酸合成」

山口チーム

・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における「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」(研究代表者：山口 猛央、2018～2022 年度)

・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における「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」(研究代表者：山口 猛央、2020～2022 年度)

各チームの研究経過と総括の所見は下記の通りである。

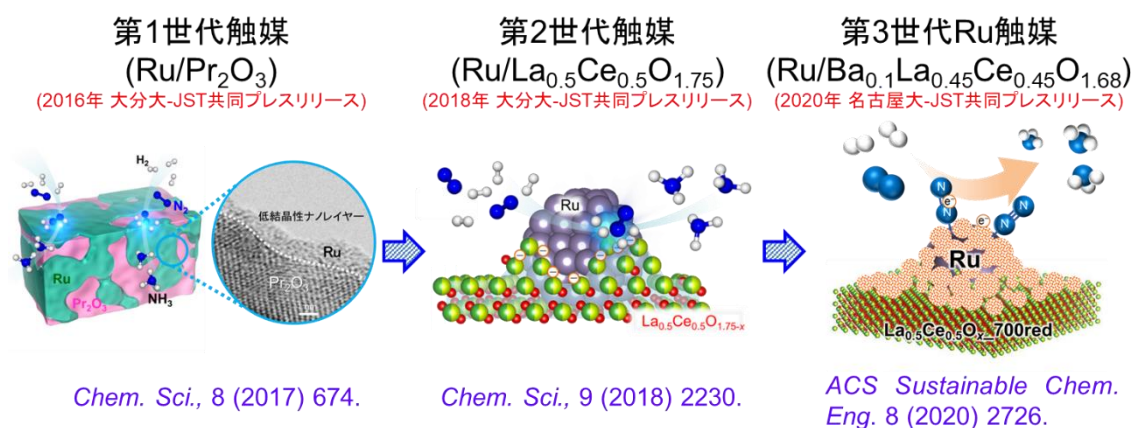
<2013 年度採択>

永岡チーム

本研究課題では、アンモニアをエネルギーキャリアとして利用するためのキーテクノロジーである、ハーバー・ボッシュ法よりも温和な条件でアンモニアを合成する触媒、そして、室温でアンモニアと空気を流すだけで無加熱・瞬時にアンモニアを分解し水素を製造するプロセスの創成に取り組んだ。実用上有意な性能を示す触媒の開発に成功したのみならず、チーム内での協働により、触媒上でのアンモニア合成、及びアンモニア分解について第一原理計算を駆使して理論的な解析に成功したほか、アンモニア分解・合成プロセスのスケールアップ時の反応挙動を化学工学的シミュレーションで再現できた。

アンモニア合成触媒の開発においては、第一世代触媒として、Ru/Pr₂O₃ が非常に高活性であることを見出した。実験的手法と計算科学的手法によって、この触媒では Ru が粒子状ではなく低結晶性のナノレイヤーとして担持されていること、Pr₂O₃ が高い塩基性を有することによって、律速段階である窒素分子の吸着解離が促進され高い活性を示すことが明らかとなった。この知見をもとに希土類酸化物担体の研究に注力し、第二世代触媒として Ru/La_{0.5}Ce_{0.5}O_{1.75}、第三世代触媒として Ru/Ba_{0.1}/La_{0.45}Ce_{0.45}O_{1.68} を用い、非常識であるが反応温度よりもはるかに高温の 650-700°C で前還元すると、非常に高いアンモニア合成活性が得られることを見出した。後者の触媒のアンモニア合成速度は最終目標値である 3 L h⁻¹ g⁻¹

に達し、取り扱いが容易で工業化に適した酸化物担持 Ru 触媒としては世界最高値を示した。さらにこれらの触媒設計の指針を展開した非 Ru 系触媒の開発にも取り組み、延長支援期間中に特許を出願した。



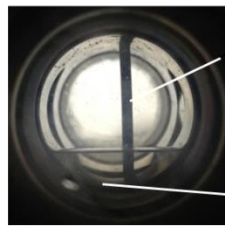
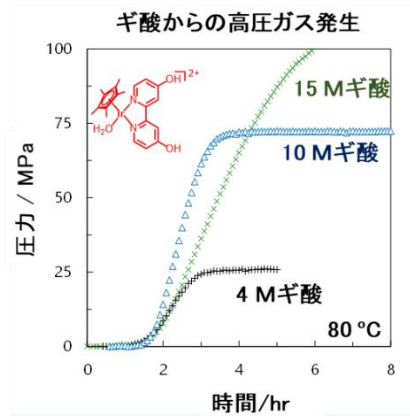
アンモニア分解プロセスの創成に関しては、触媒の酸点でのアンモニアの吸着熱、あるいは還元した触媒の酸化熱といった触媒の自己発熱を利用することで、室温でアンモニアと空気を流すだけで無加熱・瞬時にアンモニアを分解し水素を製造するプロセスの創成に成功した。還元した触媒の酸化熱を利用する場合は、全てのサイクルで一切の加熱処理を必要としないという、実用上非常に意義のあるプロセスの構築に成功した。

姫田チーム

安価・大規模な化学系水素貯蔵材料としてギ酸に着目して、高圧水素供給システムの基礎的・基盤的な技術開発を行った。水中 100℃以下の温和な条件下、高性能・高エネルギー効率で、ギ酸から一酸化炭素を含まない“高圧・高品質水素”の連続供給を可能とする錯体触媒の開発を行った。実用に適した温度領域で、低環境負荷型かつ高性能・高耐久性なギ酸脱水素化触媒の開発を行い、耐久性の向上にも成功した。この結果、ギ酸脱水素化触媒の新しい触媒設計概念を確立するとともに、高耐久性触媒を開発した。これにより、ギ酸の供給により連続 1000 時間、触媒回転数 1200 万回を達成した。ギ酸から高圧ガスの発生プロセスの構築と、このプロセスを利用した簡便な水素の濃縮技術の開発を行った。結果として、最終目標を上回る 100 MPa 以上のガス発生を実証した。さらに高圧条件下でも触媒劣化がみられない高耐久性触媒を開発した。発生した高圧ガスの冷却により気液および固気分離を行い、水素純度 95%以上の高圧水素が得られた。本手法はポンプレスで高圧かつ高純度水素ガスを供給できるため、ギ酸を用いた水素ガスステーションへの実証検討を目指した技術開発の目処が立った。



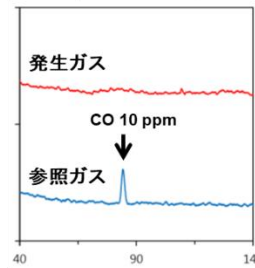
高圧水素発生装置



気液分離による水素濃縮

ガス相
H₂

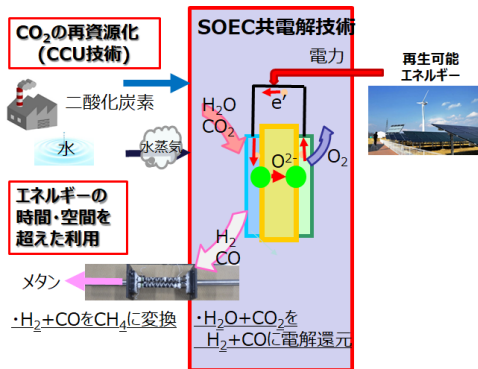
液相
CO₂



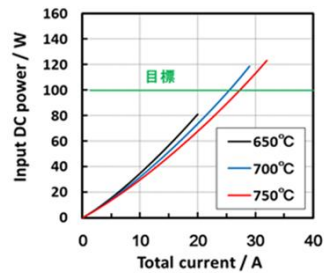
気液分離による水素濃縮

藤代チーム

共電解セル・スタック試作技術・評価技術開発として、触媒反応のみのメタン合成反応での転化率に対して優位性を持つ二段階での電解セル試作技術開発を進め、(1)高温向けセルで高い電解電流密度を達成することに成功した。一方低温向けセルで、CO₂水素化によるメタン合成反応が電気化学的に促進される現象を見いだした。さらにプロトン伝導型共電解セルの試作プロセスを開発し、酸化物イオン伝導型共電解セルと異なる電極反応促進効果を確認した。電極触媒粉体の無電解条件における素反応解析、(2)電解条件におけるメタン合成のモデル化実験にて素反応の電気化学的な促進効果の解析を行った。Ni 触媒を用いたCO₂からのメタン合成の実験結果を再現する詳細反応モデルを得ることが出来た。従来の水電解利用メタン合成システムよりも、提案する共電解システムの方が逆シフト反応の向上と低電流での転化反応を促進し、1.5倍程度高効率なメタン合成システムになる可能性があることが判明した。



試作3直列円筒SOEC
スタックと120W級電解試験装置



〈2014 年度採択〉

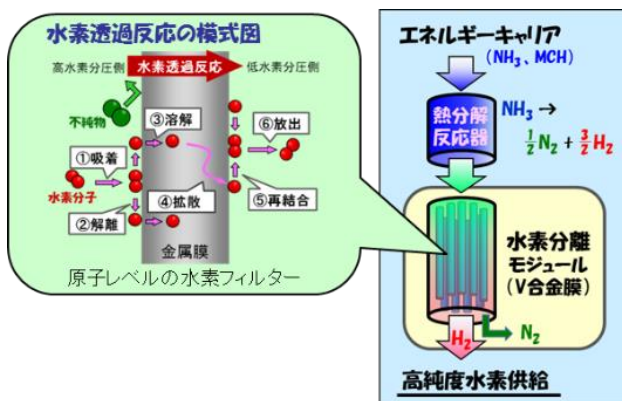
里川チーム

新規なアンモニア製造技術として、電解合成法に取り組んだ。プロトン伝導性固体電解質を用いて、カソードに窒素、アノードに水蒸気を供給する電気化学セルでアンモニア合成に成功した。運転温度域のことなるセラミックス系固体電解質、リン酸塩系固体電解質を用いたアンモニア電解合成システムの研究を並行して進め、セラミックス系固体電解質にサーメット電極を組み合わせ水-窒素系で既報を超えるアンモニア生成速度を得た。さらにこの電解セルを用いた反応機構の解明に取り組み、アンモニア生成反応が電気化学的に進行していることを明らかにした。リン酸塩系電解質についてはパラジウム膜とアンモニア合成触媒を組み合わせた新規電解セルを考案した。リン酸塩系固体電解質材料を用いたアンモニア電解合成とプロセス効率計算にも取り組んで、リン酸塩系電解質を用いた系で初めてアンモニア電解合成に成功した。

曾根チーム

水素を回収炭酸ガスと反応させることでメタンを合成しエネルギーキャリアとする技術の有効性を示すことを主目的とした。炭酸ガスのメタン化反応の低温化、吸熱反応域水電解の実現により高効率水素製造の個々のプロセスを試験し、今後両者を組み合わせたデバイス化を進めた。メタン化反応温度の低温化について、低温で活性を示す触媒の合成に成功した。水の電気分解において熱自立電解電圧は 1.48V であるが、加圧供給した水をこれより低電圧の吸熱域で高い電流密度域で電解可能なセルの設計・試作に成功した。炭酸ガス還元時の熱入力を活用しつつ、電解を吸熱的に行うためのスタックの設計、試作を進め、要素試験を通じて要素技術の検証を進めるに至っている。ガス拡散層の導電率を損なわない表面撥水加工技術や、カーボンペーパー側面や背面を含めた全面の撥水手法、撥水触媒層の作成技術等、エンジニアリング上の課題解決に成果をあげた。

西村チーム



エネルギーキャリアからの水素分離・精製に、高価で資源量も少ないPd膜に代わるバナジウム系合金膜を初めて適用し、水素分離デバイスを試作した。V系合金膜にPd表面層を被覆した分離膜構造を確立し、エネルギーキャリアを含む混合ガス中でのV合金の水素固溶特性、水素透過特性、機械的特性の基礎的な性質や構成成分に関するデータを

を整備した。合金成分について探索を行い、混合ガス中での水素化特性に及ぼす合金効果を

明らかにした。作動温度による性能や劣化の状態を明確にし、動作条件についての知見を得た。実際に差圧がかかった時の応力の効果や、破断の対策などについて検討し、水素分離デバイスを作製するための強度を確保するための構造や接合方法、大面積化、モジュール作製法を明確にし、実デバイス化に近づけた。さらに、アンモニアやメチルシクロヘキサンなどエネルギーキャリア由来の微量ガス成分が含まれる分解模擬ガスを供給し、共存ガス種の影響などを明らかにし、劣化要因とはならないことを明らかにした。

<2015 年度採択>

西林チーム

錯体触媒を用いた新しいアンモニア合成法の開発に取り組み、分子触媒を用いて窒素ガスから触媒的にヒドラジンが直接生成した世界発の例を示すことができた。実用化を見据えた高効率なアンモニア合成法の開発に関しては、種々のピンサー型配位子を持つ金属窒素錯体を触媒とするアンモニア合成に使用し、モリブデン窒素錯体が常温常圧の温和な反応条件下で進行する触媒的窒素固定反応における有効な触媒として働くことを明らかにした。従来の触媒活性を凌駕する触媒あたり最高 230 当量のアンモニアが生成する世界最高の触媒活性を示した。触媒反応を理論計算と組み合わせることによって、さらに高活性の触媒の設計にフィードバックした。また、実用化を見据えた反応開発を目的として、担持系触媒の開発と大規模スケールの触媒合成についてそれぞれ研究を展開中である。空気、水、太陽光からのアンモニア合成法の開発のために、水をプロトン源とした触媒的アンモニア合成反応の開発に成功した。

本研究課題は6ヶ月間期間を延長し、鍵中間体の一つであるモリブデン錯体の精製・同定や反応性、関連する反応の検討を行った。その結果、モリブデン-ニトリド錯体の単離に成功し、実験及び理論化学の両面から詳細な反応性について検討を行い、今後の研究展開に必要で重要な知見を得ることに成功した。また、電気化学的還元手法を利用した触媒的アンモニア合成反応について詳細な検討も行い、高いファラデー効率で進行する反応系の開発に成功した。コロナ延長支援により、今後の錯体触媒を用いたアンモニア合成、分解の両反応においてイノベーションに向けた展開をより一層後押しする成果が得られた。

山内チーム

化学的安定性と高いエネルギー密度を備えるアルコールは、輸送・貯蔵コストがかからないエネルギー媒体として期待されている。本研究では、電力を使って、カルボン酸と水からアルコールを連続的に製造するための高分子電解質型アルコール合成セル (PEAEC) の構築を行った。水溶液透過性を有する網目状の Ti 材料を用いて、高活性のカルボン酸還元カソードと、それを

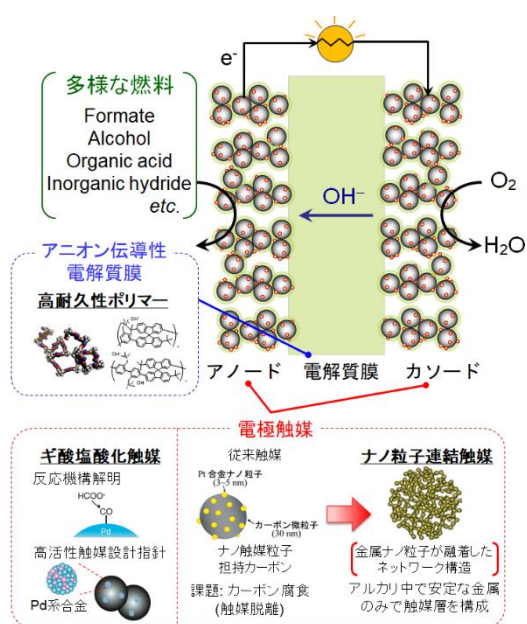


用いた膜-電極接合体(MEA)を構築することにより、世界で初めて **PEAEC** の製造することに成功した。また、電極触媒および電極構造の大幅な改良を行うことにより、水素製造の場合と同程度の 0.4 Acm^{-2} の電流密度およびエネルギー変換効率 50% の高効率でのアルコール合成を達成した。さらに、新規に作製した直接アルコール燃料電池 (DAFC) 装置をもちいることで、アルコールからカルボン酸への選択的酸化により CO_2 を排出せずに発電できることが明らかとなった。本システムは、液体をキャリアし、ゼロエミッションの蓄放電を実現する新たな電力循環システムになると期待される。

本研究課題は6ヶ月間期間を延長し、実用的な燃料電池の想定を含む、性能向上に関する研究に集中して取り組んだ。その結果、PEAEC/DAFC として高濃度ピルビン酸の電解による還元及び乳酸を燃料とする直接形燃料電池発電の可逆反応系についてさらに検討し、高エネルギー密度で蓄放電を繰り返すことができる有効性を確認することができた。コロナ延長支援により、フローバッテリーと同様に液体キャリアを使った蓄電装置としてのイノベーションに向けた今後の展開をより一層後押しする成果が得られた。

山口チーム

エネルギーキャリアとなる液体燃料を高効率に電気へ変換する液体燃料直接供給型燃料電池として、アニオン伝導性膜を用いてアルカリ環境で作動する固体アルカリ燃料電池の研究開発を行った。固体アルカリ燃料電池の重要課題であったアニオン伝導性膜について、本研究チームが明らかにした分解機構をもとに、分解の起点となるエーテル結合を含まず、かつ主鎖構造へ折り曲がり構造を導入して溶媒への溶解性を付与した高耐久かつ製膜性に優れたアニオン伝導性ポリマーを開発した。触媒として、アルカリ環境で高活性・高耐久なカーボンフリー・金属ナノ粒子連結触媒、および白金フリー・ヘテロ元素コードープカーボン触媒を開発した。また、再生反応も考慮して選定したギ酸塩溶液を用いるエネルギーキャリアシステムについて、ギ酸アニオン酸化用 Pd 系触媒の研究を行い、分析科学との連携により新たな反応機構を明らかにし、高活性触媒を開発した。開発した電解質膜と触媒を組み合わせた MEA により、直接ギ酸塩溶液型アルカリ燃料電池の高出力密度と高耐久性の両立に成功した。



(2) さきがけ

① 研究総括のねらいに対する研究成果の達成度

さきがけはエネルギーキャリアに関連する最も萌芽的、革新的な研究の展開が可能な領域であると位置づけられる。そのため新規な着想に基づく新たなエネルギーキャリア物質の提案と諸特性、水素貯蔵物質の新規な合成法、新しい着想に基づく利用法、エネルギーキャリア物質の反応解析などチャレンジングな提案を採択した。一方で、多くの採択テーマで、研究の推進が順調に進まずに、難局や問題に遭遇することが多くみられた。そのような時でも総括やアドバイザーらの適切な助言により、研究方向の軌道修正を行いながらも着実に研究が推進された。これは一つにはエネルギーキャリアは複合的な領域であるため、採択研究者の専門分野だけではなく、多面的な視点から評価して推進することが求められるためである。

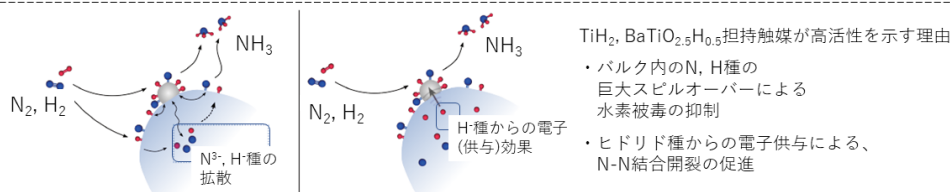
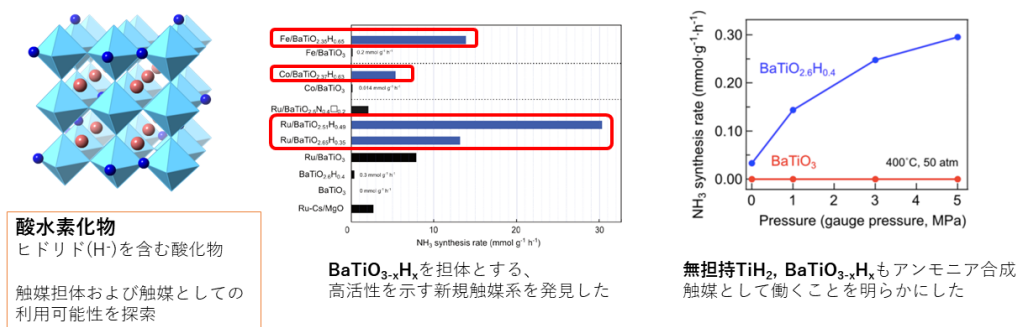
②研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

さきがけ 12 研究者の論文発表件数は 110 件(国際 100 件、国内 10 件)であり、口頭発表は 204 件(内、招待講演は 70 件)であった。

本研究領域の特筆すべき成果として、触媒、光触媒に関する研究課題において、いくつかの新規性の高い、高活性なものが見出されたことが挙げられる。

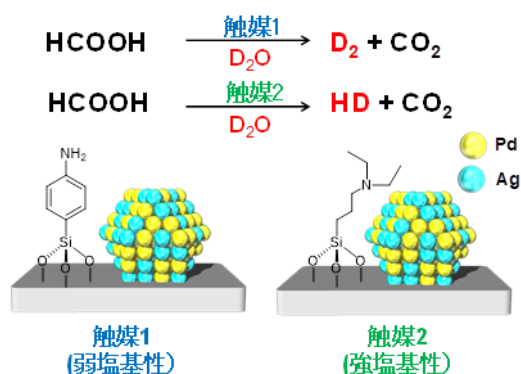
小林研究者が開拓したアンモニア合成触媒としての Ru 担持酸水素化物は、全く新規な触媒系でありながら従来の触媒に匹敵する高活性を持っており、今後新しい触媒群への展開が期待されるという点で重要である。加えて、小林研究者はチタン系水素化物(BaTiO_3 , TiH_2)が遷移金属を担持することなくアンモニア合成の触媒作用を示すことも発見しており、従来の系と異なるメカニズムで触媒反応が起こることが示唆された。Ru 等の担持行程を必要としない、安価で調製が簡便な触媒の開発に繋がらうという点でも、注目に値する。

酸水素化物による新しいアンモニア合成触媒(京大・小林)



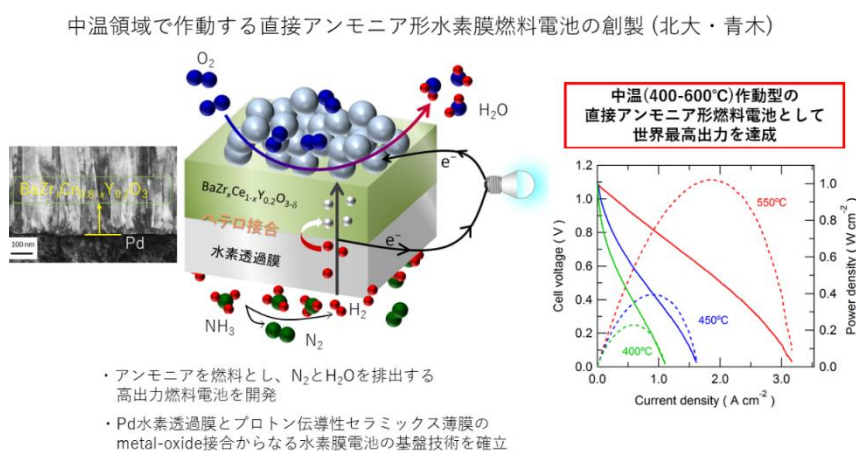
森研究者は従来の 10 倍以上の活性を示すギ酸分解不均一触媒の開発に成功し、本触媒が二酸化炭素からのギ酸の合成にも有効である両機能性触媒として働くことも明らかとした。

また、理論計算を通じて、ギ酸合成触媒を高活性化するための設計指針も示している。さらに、森研究者は独自に開発した触媒を用いて、安価なギ酸（HCOOH）と重水（D₂O）を原料とし、高価な重水素（D₂ および HD）を選択的に作り分けて製造することに成功し、Nature Communications に掲載された。



③研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

本研究領域ではアンモニア燃焼、アンモニア合成などアンモニアを取り巻く触媒反応や新規デバイスを扱う研究者、チームが多い。これらの研究者、チームは緊密に情報交換を行っており、燃料・エネルギーキャリアとしてのアンモニア研究において、本研究領域は大きな貢献をしている。中でも、青木研究者は新規な発想に基づくアンモニア燃料電池の発電を実現し、従来にない高出力を低温でも達成することに成功した。従来のアンモニア燃料電池のピーク出力密度の最高値が 600°C で 0.4 Wcm⁻² 程度であるのに対し、550°C で 1.0 Wcm⁻²、また 450°C でも 0.4 Wcm⁻² の値を示しており、より低い温度で効率よく作動することが明らかとなった。さらに水素分離型燃料電池における動作時の欠陥生成に基づく伝導機構なども明らかにしており、将来の新たな方向性と固体イオニクス分野での学術的発展に寄与するものとして期待される。



また、ギ酸は安定で溶液として貯蔵しやすく、容易に水素に変換でき燃料としても利用で

きるためエネルギーキャリアとしての性質に優れているが、ギ酸をエネルギーキャリアとして利用するための技術開発は遅れていた。辻口研究者は、直接ギ酸形燃料電池に利用可能な高活性・高担持触媒の開発や、数値解析を用いた電極内部の物質移動の可視化に取り組み、電極の設計指針を得ることに成功している。高出力な直接ギ酸形燃料電池を開発する上で重要な知見となると考えられる。

白石研究者は過酸化水素合成活性を示す新規光触媒を開発した。レゾルシンフェノール (RF) 樹脂触媒が過酸化水素の合成に活性を示す新規な光触媒系であり、現在までに 1% を超える光量子効率を達成している。過酸化水素 (H_2O_2) は漂白剤や消毒剤として重要な化学物質である。これまで絶縁体であるため、半導体光触媒には用いられてこなかった RF 樹脂を、独自の高温水熱法により合成することにより、太陽光エネルギーを用いて水と酸素から H_2O_2 を最大効率で生成する RF 光触媒樹脂の開発に成功した。 H_2O_2 をオンデマンドで生成する抗菌・殺菌デバイスの実現に向けての社会実装が期待できる。尚、本成果は Nature Materials のオンライン版に掲載され、2019 年 7 月 2 日に阪大・JST で共同プレスリリースした。

④本研究領域に続く研究資金の獲得状況

大木研究者

- ・ 科研費基盤(B)「窒素固定化酵素の機構解明に資する Mo-Fe-S クラスターの開発」(2019-2021 年度)

中村研究者

- ・ ニトロメタンの窒素反応モデルについて技術研究組合と 2019-2020 年度共同研究を実施中

- ・ アンモニアの新燃焼法について民間企業と 2020 年度共同研究中

- ・ アンモニアの簡略化燃焼反応モデル構築について民間企業と 2020 年度共同研究中

日隈研究者

- ・ 科学研究費助成事業若手研究 (2018~2019 年度) 総額(直接経費): 3,200 千円

- ・ 環境省 環境再生保全機構 環境研究総合推進費(2019~202 年度) 総額(直接経費): 11,500 千円

小林研究者

- ・ 大手の企業 (重工業) と共同研究の 2 年目に入った。

白石研究者

- ・ 産業界との連携と実装の実例

- ・ 樹脂光触媒に関する特許出願技術に対してオプション契約を締結

A 企業 (2018/10~2019/9) (500 千円)、B 企業 (2020/3~2021/2) (1000 千円)

C 企業 (2020/4~2021/3) (1000 千円)、

C 企業と共同研究契約を締結 (2020/10~2021/9) (2,000 千円)

- ・ 科学研究費助成事業 新学術領域研究 (研究領域提案型) (2020~2021 年度) 総額(直

接経費)：4,000 千円

辻口研究者

- ・J社との大型共同研究を推進し、デモシステムの作製に取り組んでいる。
(2018年度～現在：特許申請6件) 2018年度 4,500千円 2019年度 15,000千円 2020年度 15,000千円(予定)
- ・さきがけネットワーク(2016年度～2017年度)、未来社会創造事業(2019年度～2020年度)で他領域のさきがけ研究者と共同で推進している。

脇坂研究者

- ・富山大学水素同位体科学研究センター 一般共同研究(2017-18年度)
共同研究者：阿部孝之(エネキャリ CREST 分担者) 研究費 150千円
- ・富山県立大学産学官連携研究費(先行型) 研究費 3,000千円(2018年度)

伊藤研究者

- ・公益財団法人 東電記念財団 直接経費 10,000千円
- ・トヨタ・モビリティ基金「水素社会構築に向けた革新研究助成」 直接経費 10,000千円
- ・ENEOS 水素基金研究助成 直接経費 8,000千円

橋本研究者

- ・科学研究費補助金 基盤研究(B) 2019年～2022年度、総額 17,940千円
- ・ホソカワ粉体工学振興財団 平成30年度研究助成, 2019年度、総額 700千円

森研究者

- ・公益信託 ENEOS 水素基金 2019年11月～2020年10月 10,000千円
- ・トヨタモビリティ基金「水素社会構築に向けた革新研究助成」2020年4月～2023年3月 10,000千円

⑤その他特記事項

顕彰、受賞

さきがけ研究者のうち、大木研究者、中村研究者、日隈研究者、白石研究者、脇坂研究者、伊藤研究者、橋本研究者、森研究者が学会等から賞を授与された。この内、中村研究者、伊藤研究者はそれぞれ平成28年度、29年度の科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞した。伊藤研究者は王立イギリス化学会から PCCP Prize(国際賞)を受賞などの多くの賞を受賞した。

各研究課題の経過と研究総括の所見については下記の通りである。

<2013年度採択>

青木 研究者

アンモニアは将来、燃料やエネルギーキャリアとしての利用が期待される。本研究はアンモニアを燃料として、高効率で電気エネルギーに直接変換するための燃料電池について、新

規な発想に基づく構造を提案したものである。プロトン伝導性固体酸化物を電解質として水素透過金属膜をアノードに取り付けた水素膜燃料電池 (HMFC) を開発し、 NH_3 を燃料として低温、高出力の発電を目指した。 H_2 燃料を用い 600°C にて発電試験を行うことにより、従来にない高出力の発電特性を達成した。電気化学インピーダンス解析よりポテンシャル分布や伝導機構を明確にした点も学術的意味も大きい。また、直接アンモニア形水素膜燃料電池を作製し、極めて高い出力データを得ることに成功した。さらに中低温領域での発電が可能となる指針が明らかになった。新規な発想に基づく直接アンモニア形水素膜燃料電池の成果はエネルギーキャリア領域の目的にも十分かなうものであり、また新規性や学術的価値も大きい。

大木 研究者

アンモニアを、金属錯体触媒を用いて低温で合成するための触媒開発を目的とした。複数の金属を分子内に含み、多数のヒドリド配位子を持つ高い反応性を兼ね備えた Fe, Co クラスタ分子や Mo_2Fe_2 ヒドリドクラスタ分子を作製し、その反応性を検討した。本研究で合成された金属錯体はいずれもユニークで複雑な分子構造であり、高い反応性を有しており、数種の錯体によって NH_3 の生成が観察された。一方、高い反応性が同時に触媒としての安定性の障害となるという点で大きな壁となることも明らかになった。当初掲げたアンモニアの触媒的合成という観点からは、十分な活性を得ることはできなかったが、窒素を還元するための錯体合成や関連する新規な錯体群の調製に成功しており有機金属錯体分野での功績は大きいといえる。

中村 研究者

これまでアンモニアの燃焼モデルが含まれる解析例は脱硝反応などに関連したものはあったが、アンモニア燃焼に特化した速度式の解析は十分ではなく、既報の速度式では十分にアンモニアの燃焼を記述できなかった。本研究ではマイクロリアクタを用いた燃焼解析を、アンモニア燃焼に適用することで、従来手法では試験が困難な低温のアンモニア着火特性の計測を実施、気相化学種の分析から新たな燃焼モデルを構築した。マイクロリアクタの試験結果を用いて、より直接的に燃焼反応機構の検証が実現できるよう、化学種濃度分布計測法を構築した。反応経路解析と感度解析により、各化学種の濃度分布に影響が大きく、かつ、反応速度定数の不確かさが大きい素反応を特定し、これらを更新することで、実験結果を再現する燃焼反応機構を構築した。特に N_2 化学種であるヒドラジンに関連する素反応を追加することにより、アンモニアの低温着火過程のモデル精度を高めることができた点は重要である。

日隈 研究者

本研究では NH_3 のクリーン燃料として利用するために触媒燃焼法の適用を検討した。高性

能な NH₃ 燃焼触媒の材料設計指針を、低温 NH₃ 燃焼開始、低 N₂O・NO 生成量、耐久性・耐熱性という視点から評価した。比較的低温での燃焼において空燃比 $\lambda = 2$ 程度を中心に触媒開発の方針とした。低い NO 選択率を示したことから、種々の担体に担持した CuO_x の NH₃ 触媒燃焼 ($\lambda = 2$) の活性および生成物選択性を系統的に調べたところ、ホウ酸塩担持 CuO_x 触媒が他の担持触媒に比べて、高活性と高 N₂ 選択性を示すことを見出した。この触媒性能は、低 NH₃ 燃焼開始温度、低 N₂O 及び NO 生成量、十分な耐熱性という点で優れていた。さらに高い性能を有する触媒も開発できた。以上のように本研究によって、高性能な NH₃ 燃焼触媒を開発できた点は高く評価できる。

<2014 年度採択>

小林 研究者

新規なアンモニア合成触媒の開発を試み、酸水素化物を担体、及び触媒自身としてアンモニア合成に用いることが可能なことを証明できた。主として活性種を Ru とするものについては、酸水素化物の組成に関しては、Ti 系のもののみが担体として活性を有することがわかり、活性、反応次数、活性化エネルギーなどの速度論的パラメータを網羅的に明らかにし、反応機構を考察した。酸水素化物を担体とすることによって Ru 触媒で問題となる水素被毒が著しく軽減される。また、ABO₃ ペロブスカイト構造の A サイト構成原子などの電子供与性、同位体交換活性などの評価により、諸物性を明らかにし、特に塩基性が活性にも影響していることを指摘した。無担持の酸水素化物、金属水素化物が単独でも長期間安定な NH₃ 合成触媒として働くことを発見した。本研究で発見された触媒は、今後アンモニアのエネルギーキャリアとしての新用途が開拓されれば、十分候補となる触媒である。本触媒の考えられるメカニズムとして、N₂ 分子乖離段階前での水素化や格子中の水素による反応などの可能性が示唆されており、学術的なインパクトは高い。

白石 研究者

光触媒反応により水と O₂ から過酸化水素を製造方法として、励起電子による O₂ の二電子還元 ($O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O_2$) を検討した。本研究ではグラファイト状窒化炭素 (g-C₃N₄) が O₂ を選択的に二電子還元する特性を見出し、触媒設計を進めた。g-C₃N₄ は水の酸化に対して低活性であるため、電子受容性のピロメリト酸ジイミドなどのドーピングにより、高い効率で過酸化水素が生成することを示した。また、還元型酸化グラフェン (rGO) と窒化ホウ素 (BN) の複合により、励起電子および正孔を、それぞれ rGO および BN へ移動させて電荷分離を向上させ、粉末光触媒による人工光合成反応における最高効率 (0.27%) を達成できることを示した。さらに、フェノール樹脂を、酸触媒存在下で合成した触媒では、バンドギャップの低下 (長波長吸収) と高導電性の発現により、高い変換効率で過酸化水素を生成させた。さらに、炭素粒子と RF 樹脂の複合により O₂ の二電子還元選択性を向上させ、1% を超える極めて高い変換効率で過酸化水素を生成できることを明らかにした。上述のように目標とする変換効率

2%に向かって着実に光触媒性能は向上しており、1%を超える変換効率で過酸化水素を再生可能エネルギーから合成するメタルフリー光触媒の開発が可能であることを明らかにした。

辻口 研究者

直接ギ酸燃料電池(DFAFC)高温度での運転時における阻害因子を解析し、アノードの物質移動に起因する過電圧が及びアノードの活性化過電圧の低減が重要であることを明らかにした。アノード触媒開発においては、活性化過電圧の低減に向けて、新たな触媒担体として微粒子埋没カーボンナノファイバーを提案し、その最適化に取り組んだ。その結果、粒子を埋没させた触媒担体の粒子含有量を最適化することによって、従来の3倍を超えるギ酸酸化活性を得ることに成功した。また、薄層触媒層を作製するために、担体へ触媒を担持する際の処理の最適化による高担持触媒の作製にも取り組み、高担持量のPd/Cを作製することに成功した。セルの開発においては、濃度過電圧の改善に向けて超音波を用いた触媒層の形成に取り組む、触媒層の厚さを最適化した。また、物質移動過電圧の削減のために、数値解析を用いた電極内部の物質移動現象の可視化に取り組む、燃料の供給と生成気体の排出をいずれも促進可能な電極設計指針を得ることに成功した。DFAFCの高出力化に向けて、触媒の開発はおおよそ目標通りに進行したが、高出力が得られるDFAFCセルの開発は未達成である。今後、得られた電極設計指針をもとに高出力DFAFCを作製できると考えている。

脇坂 研究者

硫酸/トルエン系マイクロエマルジョンの相分離構造を利用した新規なトルエンの電解水素化を試み、過剰油相から目的のメチルシクロヘキサン(MCH)を回収することに成功した。支持電解質の種類・濃度、界面活性剤のタイプ・鎖長、補助界面活性剤の種類・添加量を検討した。高表面積を有する電極触媒の作製について検討し、金属網担体Pt黒電極触媒においてPt量の低減を可能にした。H型セルを用いた静置定電流電解において、電解電流は十分ではなかったもののトルエン/MCH変換反応のファラデー効率100%を達成した。マイクロエマルジョンが反応場として働くことを明らかにしただけでなく、電解反応機構の解析を進め、電極表面上における水素化反応機構、マイクロエマルジョン中の物質輸送、電極近傍の三相界面構造が及ぼす影響について明らかにした。これらの新しい知見から、酸性電解質中におけるトルエン電解合成に最適なマイクロエマルジョンのタイプ、電極構造および担体の種類が明らかになり、活性化反応場と電極材料に関する今後の開発指針を得た。高電流密度を達成するために、回転ディスク電極による速度論パラメータの評価ならびにフローセルによる実証試験を行っている。

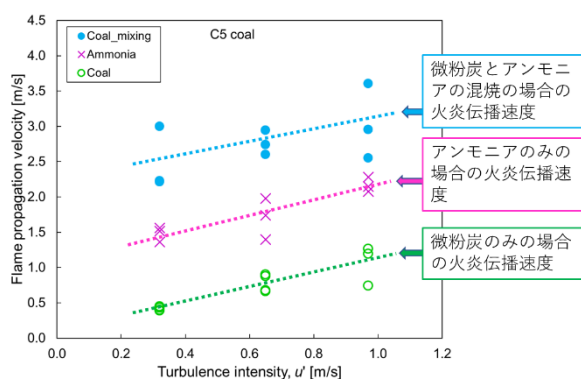
<2015年度採択>

伊藤 研究者

本研究は水素社会実現に向けて再生可能エネルギー電力を固体高分子 (PEM) 型水電解装置に適用し水素生産の基盤技術を確認することを目指している。水素発生には強酸(水素イオン)を取り扱うため、貴金属以外は陰極として用いられていない。本研究課題では、酸性条件下で溶解しない卑金属電極と金属を一切使用しない炭素陰極の開発を行っている。酸性条件下で溶解しない卑金属陰極は、卑金属ナノ粒子をグラフェンで覆うことで、過剰な酸からの保護と卑金属ナノ粒子の高い触媒機能を両立させた陰極が出来ている。また、金属を一切使用しないグラフェン陰極は、導電性の高いグラフェンの上に触媒能力の高い化学ドーピンググラフェンを別々に成長させることで、触媒サイトと導電性担体の役割の分離に成功し、非常に高い陰極性能を示している。これらは酸性条件下での非貴金属系触媒メカニズムの知見と触媒設計指針になることが期待されている。

橋本 研究者

本研究では、アンモニア等のエネルギーキャリアを高い混合率で低着火性固体燃料と混焼させることにより、低着火性固体燃料の着火・燃焼特性が改善される効果を解明することを目的としている。乱流場中における固体燃料の火炎伝播実験を行える実験装置を開発した。乱流強度が微粉炭の火炎伝播速度に大きな影響を与えることが分かった。このような研究報告例は世界を見渡しても前例が無く、国際的にもインパクトの大きい成果と考えられる。開発した実験装置を用い、アンモニアの乱流場における球状火炎伝播に関する実験も行っている。アンモニアの混合により、低着火性固体燃料の着火特性が改善されることを明らかにしたことに加え、アンモニアと固体燃料を混焼させた場合の火炎伝播速度がそれぞれを単体で燃焼させた場合の火炎伝播速度よりも速くなる条件があることを解明した。本研究の成果は、アンモニアと固体燃料の混焼メカニズムの解明に貢献できると共に、実機産業ユニットを対象とした数値シミュレーションのモデル開発に役立てられると考えられる。



嶺岸 研究者

本研究においてはこれまでに紫外光応答光触媒シートを利用し、水を水素源としてトルエンを直接水素化、99vol%と高濃度のメチルシクロヘキサン生成が可能な反応系構築に成

功している。これは、濃縮の必要の無い水素キャリアが直接得られる人工光合成反応系が構築可能であることを示した最初の例である。この他、太陽光の有効利用を可能とする可視～近赤外領域の光で動作するタンデム構成の反応系構築を可能とする半透明メンブレン一体型光触媒シートも開発した。現在、反応系の構築と高効率化に取り組んでいるが、有意な効率で太陽エネルギーをメチルシクロヘキサンの形に変換できればそのインパクトは世界的に見て大きい。現在までに本研究を通して新規固溶体光触媒材料 $(\text{ZnSe})_{0.85}(\text{CuIn}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Se}_2)_{0.15}$ を開発、吸収端が 900 nm と近赤外域であるにもかかわらず電圧に換算して 0.9 V の大きな反応の駆動力を示すことを明らかにした。

森 研究者

ギ酸の分解/合成反応をターゲットに、活性点および触媒反応場を精密制御した高活性固体触媒の開発を行った。ギ酸からの水素生成反応では、PdCuCr 三元合金触媒を開発しその高活性発現機構も明らかにした。また、PdAg 合金ナノ粒子と塩基性メソポーラスカーボンを組み合わせることで従来触媒の 10 倍以上の活性向上に成功し、当初の数値目標を達成した。本触媒は二酸化炭素の水素化によるギ酸合成にも有効であり、両機能性触媒として作用することを見出した。一方ギ酸合成反応では、シングルアトム Ru 触媒、PdAg 合金ナノ粒子担持塩基性メソポーラスシリカ触媒を開発し、さらにその機能と詳細な構造解析および理論計算の結果、重要な触媒設計指針を得るに至っている。ギ酸合成反応における固体触媒の開発例は少なく、本研究成果は次世代触媒開発の重要な知見となりうる。

(3) 複合領域として

① 複合領域としての研究総括のねらいに対する研究成果の達成度

本研究領域の推進に当たっては、領域会議など CREST チームとさきがけ研究員が共存する機会が多く、同じ会場でアドバイザー総括からの意見や指導を聞くことになるので、エネルギーキャリア研究の推進方法や目指す方向性、重要性、評価の視点など理解、知識の浸透、計画方針の立案や修正など比較的スムーズに加速されたと考えている。アドバイザーには長年、エネルギーキャリアや水素製造、利用分野に携わってきた経験がある研究者が多いため、研究開発の歴史や社会的背景、取り巻く世界情勢などに通じており、これらの情報を CREST/さきがけのすべての関係者に周知できたことは構成員の専門性と知識を高めるうえで大きく貢献した。そのような指導や情報が本領域の研究開発過程に大きく生かされ、単に触媒化学、電気化学、材料科学、燃焼工学、化学工学など研究者が得意とする専門分野にとどまらず、広く社会的にも認められるそれぞれの研究成果に結びついている。複合領域として、領域内でより多くの共同研究が組織されれば複合領域としてのメリットを明確に示すことができたであろうが、CREST チーム間、さきがけ研究者間で新たに組織された研究もあり複合領域としての利点は示されたものと考えられる。

②研究領域全体として見たときの特筆すべき効果

研究成果の科学的・技術的な観点、社会的・経済的観点からの貢献について特筆される点はすでに (1) CREST、(2) さきがけそれぞれの項目で述べた。CREST はチーム研究であるために提案した課題に対して十分な達成度が求められる。多くの採択課題で A 以上の評点となったがその中でも A+評価となった永岡チームはアンモニア合成の特筆される触媒を見出しており、特に国内におけるこの分野での研究に対する動きにも大きなけん引役となったと考えている。CREST 発足時はアンモニアのエネルギーキャリアとしての研究開発はまだほとんど開始されていなかったが、現在では国際的協力や各国間の競争が活発になっており、その環境の変化の中で重要な位置を占めていくことを期待する。もう一つの A+の評価となった西林チームはアンモニアの錯体合成分野でエネルギーキャリアとしてよりも、学術的意義が極めて高く、N-N 結合の切断とアンモニアの生成に新規な反応過程と触媒を発見した成果が大きい。この分野は世界的にも競争が激しく、鎬が削られているが、同チームの成果は世界的にも秀でており、追従を許さない反応成績となっている。そのような成果が Nature 誌をはじめとする多くの著名な国際誌に掲載され、論文の被引用回数などの業績にも反映されている。

さきがけ研究については個人型研究でありその成果がほとんど新たなプロジェクトに引き継がれている。比較的若い研究者が実施したために、将来の大きな成果に結びつくことが期待される。人材育成という点では本さきがけ領域は特筆される効果を持ったといつてよい。実際にさきがけ研究者 12 名の内、8 名がさきがけ開始時と異なる新たな研究機関や職位に就いており、今後のそれぞれの活躍が十分期待される。

③今後の期待や展望

いずれのチームにおいてもエネルギーキャリアに関するユニークな研究が実施され、またできるだけ出口を意識した検討が進められた。ただし、実用化という観点からはエネルギーキャリアの使用は先になるため、さらに他の後継プロジェクトなどに移行して、発展させることも考えておくべきであろう。数件の電解によるエネルギーキャリア合成反応は、いずれもユニークな反応へと展開しているため、再生可能エネルギーの導入を待つだけでなく、社会適合性の検討や他化合物などへの展開も進める必要が出てくると考えられる。錯体触媒によるアンモニア合成は従来法とは全く発想のことなる合成法として学術的要素が高く、今後革新的触媒へと進展が期待できる。

さきがけ研究は提案時当初の研究の方向とは軌道修正した研究課題も多いが総じて興味ある成果が得られた。後継プロジェクトへの展開も含めて、エネルギーキャリア研究の分野で新規性、学術性を発揮できる成果に結びつきつつある。また研究者としての人材育成に大きな効果があったものと期待しており、今後それぞれの専門領域で実力を伸ばしてもらえるものとする。

8. 総合所見

(1) 研究領域のマネジメント

本研究領域の目標達成のため、CREST・さきがけとも研究者と総括・アドバイザーの打ち合わせの機会を多く持ち、順調な成果の取得と目標の達成に向けた、かじ取りが進むよう配慮している。主たるものはさきがけの年2回の研究進捗検討会、及びCREST・さきがけ合同の年2回の領域会議である。サイトビジットも定期的実施するものはもちろんであるが、必要があれば不定期なサイトビジットも開催するなど、CREST研究チームの打ち合わせにも要請があればアドバイザーとともに積極的に参加した。検討会、領域会議におけるアドバイザーの出席率は高く、さらにサイトビジットなども多くのアドバイザーのご参加をいただいた。研究がうまく進まなくなったときには、その問題に最適の専門性を持ったアドバイザーまたは総括に会って、相談する機会を積極的に設け、それら不定期な会合も、総括、JST領域担当が把握できるようにしている。

さらに本研究領域はCREST・さきがけ複合領域であるため相互の情報も年2回の領域会議を合同で実施することにより、成果が見えやすくするよう心掛けた。そのため、アドバイザーもCREST・さきがけで共通で同じ視点からのアドバイスができるようにしている。また各研究者は領域会議での情報・意見交換にとどまらずいくつかのテーマについては専門性の似た研究者同士で打ち合わせを不定期に実施している。例えば、本研究領域にはCREST・さきがけともエネルギーキャリアとしてのアンモニアに関する研究に携わっている複数のチームあるいは研究者が属しているが不定期に情報交換、打ち合わせを行っている。このような領域内の意見交換は奨励され、活発に行われている。複合領域で研究を進めている効果が現れたものといえる。

(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

CREST・さきがけ複合領域としての本研究領域の成果を概括すると下記の通りとなる。

- (i) 新規アンモニア合成プロセスの開発
- (ii) 燃料としてのアンモニア利用技術の開発
- (iii) ギ酸のエネルギーキャリアとしての有効性の提示
- (iv) 多様な電気化学反応のエネルギーキャリア合成への応用
- (v) 光触媒反応のエネルギーキャリア合成への応用
- (vi) 高性能なV系水素透過膜開発

(i) 新規アンモニア合成プロセスの開発

触媒によるアンモニア合成プロセスは、特に国内において最近いくつかの研究チームが高活性な触媒を開発しており、本研究領域のCREST及びさきがけで見出されたいくつかのアンモニア合成に活性な固体触媒は、他で開発された触媒とも十分競合し得る性能を誇っ

ている。しかもこれらの固体触媒は複合酸化物担体や水素化物など従来の枠組みにない触媒系であり、反応条件も大きく異なるなど新たなプロセスに発展する可能性を持っている。アンモニアのエネルギーキャリアあるいは燃料として使用が現実味を帯びて来れば、Haber-Bosch 法に代わるプロセスとして、実用化に向けた検討対象とされると考えられる。アンモニアの錯体触媒合成や電解合成は CREST2 件、さきがけ 1 件が実施されたが、固体触媒反応よりも難易度の高い技術として、実用化の検討は先の将来になると考えられる。科学技術への貢献という点ではインパクトは大きく、特に錯体触媒合成は国際的にも学会や専門誌で高い評価を受けている。一方、電解合成についても世界的に取り上げられている課題であるが、本領域では分離膜を組み合わせる比較的低温で実施し、高い成績を誇るなど将来に向けての発展が期待される。

(ii) アンモニア利用技術の開発

本研究領域ではアンモニアの利用技術の開発にも取り組んできた。6(1)で青木研究者のアンモニア燃料電池の開発について言及したが、その他にもさきがけのアンモニア利用技術としての燃焼は、火炎燃焼と触媒燃焼に関する研究課題をさきがけで 3 件採択した。いずれもエネルギーキャリアあるいは燃料としてのアンモニアの利用技術として重要となることは間違いない、特に火炎燃焼については基礎的な機構解析やモデリングのベースとなる研究であり、アンモニア燃焼の応用を推進している SIP プロジェクトとも緊密に情報交換を行った。これらの燃焼技術はアンモニアガスタービンや石炭との混焼など大規模な実証に発展しており、これらに先駆けて実施した重要な基礎研究と捉えられている。触媒燃焼についてはこれもさきがけのアンモニア直接燃料電池との共同研究として、未来社会創造事業において新たなプロジェクトを実施するに至っている。オートサーマル分解についても室温起動特性が発展的に検討されている。

(iii) ギ酸のエネルギーキャリアとしての有効性の提示

本研究領域ではギ酸またはギ酸塩をエネルギーキャリアとして合成、利用する研究課題を CREST で 2 件、さきがけで 2 件実施している。ギ酸のエネルギーキャリアとしての認知度は未だ低く、NEDO や SIP でも取り扱われていなかった。本研究領域の研究を推進することによって、そのポテンシャルを大きく知らしめることになった。特に、ギ酸分解錯体触媒反応による超高压の発生は化学的な高压水素の発生という、重要な発見に結びついており、機械式圧縮機と比較して実用化に向けたアピールポイントとなっている。CREST・さきがけで推進されているギ酸の研究は今後のエネルギーキャリア候補物質としての可能性を大きく示すものである。ギ酸燃料電池に関する課題はさきがけネットワークの研究課題として引き続き推進された。ギ酸塩を燃料とする燃料電池は新規な手法であり、アニオン交換膜を電解質として有効に動作することが示された。その他、カルボン酸であるシュウ酸を還元してグリコール酸としてエネルギーを貯蔵する手法はユニークであり、新規エネルギーキャ

リア物質として提案され、研究が進んでいる。この電解合成反応は高効率で進行させる電極がみいだされただけでなく、逆反応としてグリコール酸を燃料とする燃料電池発電も可能であり、まだ成績は十分でないものの可逆性が示されている。

(iv) 多様な電気化学反応のエネルギーキャリア合成への応用

エネルギーキャリア物質の合成技術として触媒合成のほかに、CREST で 3 件、さきがけで 3 件の電解合成が検討されたのも本研究領域の特徴である。電解合成の対象物質としては前述のアンモニアのほかに、水素、メタン、メチルシクロヘキサン、アルコールと多様である。再生可能エネルギーからの安価な電力が入手可能となった場合、電解合成がエネルギーキャリア物質直接合成の有力な手法であることを示すことができた。電解方式や動作温度、電解質系は各研究課題で大きく異なっており、多様で新規な電気化学セルが研究されている。このように多様な電気化学反応をエネルギーキャリア合成に展開できた点は本研究領域の成果であり、これらの技術は他の電気化学的合成反応にも展開可能である。

(v) 光触媒反応のエネルギーキャリア合成への応用

本研究領域では 2 件のさきがけが光触媒反応によるエネルギーキャリア合成に携わっている。光触媒反応は他のプロジェクトでも推進されているが、この 2 件はエネルギーキャリアのかかわる境界領域の研究として採択された。この内、さきがけ白石研究者が取り組んだ過酸化水素合成については、エネルギー消費型の合成反応であるが光量子収率が極めて高く、物質合成法としても注目される。一方、メチルシクロヘキサンはすでにエネルギーキャリアとしての認知度も高いが、さきがけ嶺岸研究者の成果では触媒反応ではなく光触媒反応で単一のデバイスで合成できる点がユニークで、再生可能エネルギーから直接エネルギーキャリア合成ができる重要な研究例である。原理的には強い太陽光と受光する十分な面積があれば、デバイスを放置しておけばメチルシクロヘキサンが合成できることになり、現在実現可能な効率に向けて性能の向上を行っている。

(vi) 高性能な V 系水素透過膜開発

水素利用技術として水素分離膜が CREST で検討されている。Pd 系の膜はよく知られているが、それよりも安価で、かつ透過速度のはるかに高い V 系膜の開発により、十分に実用化を見通せるレベルに達し、すでにデバイス化や強度耐久性の向上実用化を視野においた試験が実施された。

このようにそれぞれの研究課題で開発のステージや適用分野は異なっているが、いずれもエネルギーキャリア研究としては興味深いものである。

(3)-1 本研究領域を設定したことの意義 (研究開始以前や中間評価時点と、終了時点の比較

を念頭において)

エネルギーキャリアの研究は最近の水素製造利用技術の進展と再生可能エネルギーの将来利用の機運から世界的に活性化されつつある。アンモニアについては、本研究領域で見出された合成触媒、電解合成、錯体合成はユニークで新規性が高く、また学術的にも高く評価される研究となっている。電解合成や燃料電池などの電気化学セルはエネルギーキャリアの製造、利用で重要であることが本研究領域によって再認識され、ここで開発された電極材料や電気化学セルは新規性が高く、他の電気化学反応にも展開可能なものが多い。また、光触媒反応によるエネルギーキャリア物質の製造の試みなどは直接、再生可能エネルギーからの製造という点で注目される。本研究領域は CREST・さがけの公募制度に則っているため、エネルギーキャリアの必要な研究課題を網羅することはできないが、それぞれの課題はエネルギーキャリア開発の重要な位置を占めており、学術的にも評価される研究となりつつあると考える。

(3)-2 国内の NEDO や SIP におけるエネルギーキャリアプロジェクトとの比較

国内においては NEDO や SIP のエネルギーキャリア関連プロジェクトも推進されている。このように複数のプロジェクトが並行して実施されていることは、この関連課題が特に国内において、将来極めて重要になるという認識によるもので、将来の再生可能エネルギーの大規模利用やエネルギーセキュリティの面から多角的に進める必要がある。実際にアンモニア、メチルシクロヘキサン、液化水素の3種の主要なエネルギーキャリアについては国際的な調達、輸送、貯蔵の実証試験が実施され、この分野の重要性を物語っている。このように水素に関わる技術は各国で国策として進められており、国内では NEDO や SIP だけでなく、本 CREST・さがけ領域も重要な位置を占めている。NEDO の水素利用等先導開発事業や SIP のエネルギーキャリアプロジェクトは実証や実用化につながる開発フェーズを扱っており、本研究領域の CREST・さがけがシーズや革新性の高いフェーズを扱うのとは大きく異なる。したがって、NEDO、SIP が実用化を目指した大規模化、実証を強く志向するのに対し、本研究領域は出口を見据えつつも学術性も重要視している。研究内容としては NEDO が水および水蒸気電解、液化水素貯蔵、水素大規模利用、パワーガス (P2G) 関連、メチルシクロヘキサンの利用、水素を取り巻くトータルシステムなどを取り扱っており、SIP では太陽熱利用、アンモニアの合成と利用、有機ヒドライド、液化水素利用、安全性評価などのテーマを担当している。アンモニア合成と利用、P2G 関連、メチルシクロヘキサン、水電解などキーワードは一部本研究領域と重なっている部分もあるが、触媒や合成手法、利用法など NEDO、SIP とは材料や手法が異なっており、重複する技術はない。特に穏和な条件でのエネルギーキャリアの合成、種々のエネルギーキャリア物質の電解合成の試みなどは本研究領域の特徴といえる。一方、これらプログラム間でキーワードが共通のテーマについては相互の情報交換が重要であるため、NEDO、SIP 研究者との交流の機会は個人、グループ、領域のいずれのレベルでも頻繁に持つようにしている。さらに、ギ酸やアルコール、過酸化水素などは他

のエネルギーキャリアプログラムでは取り扱われておらず、触媒合成、電解合成と光触媒反応の境界領域を扱っているのも本研究領域の特色といえる。

NEDO や SIP は細分化、明確化されたテーマについての公募であるのに対し、CREST・さきがけは広くエネルギーキャリア分野から公募して優れた提案課題を採択する制度上の違いが大きい。水素のトータルシステム解析やエネルギーキャリアの安全性評価は CREST・さきがけでも重要であるため関連する NEDO や SIP の報告会などで情報収集をするようにした。

(4) 科学技術イノベーション創出に向けた、今後への期待、展望、課題

エネルギーキャリア領域は学際的領域であり触媒化学、電気化学、化学工学、システム工学、機械、環境化学など種々の側面からの評価が必要な学問分野である。また将来の目的が明確なため、実用化してからの評価もそれぞれの開発ステージにおいて求められる。CREST・さきがけは新規性や学術的側面も求められる。そのような中でギ酸などの新しいエネルギーキャリアを提案できるなど、新規な触媒や反応、新規な電気化学セルなど発想から始まり有効性を示すことができた。今後これらがエネルギーキャリアとして注目され、実用化されることを期待している。また、実用化に至らなくても新規な反応やシステムは注目に値するため何らかの新領域として発展することを期待している。

また、本研究領域のさきがけは 2018 年度、CREST は 2020 年度で全研究課題が終了するが、すでに領域参加研究者間、企業との連携、他プロジェクトの推進など何らかの形で研究内容を進化しつつ継続しているものがほとんどであり、発展的な分野でのそれぞれの成果の進展に期待している。さらに、再生可能エネルギー、水素、エネルギーキャリアなどのキーワードはこの領域が進行している間にも急速に注目度が高まっており、新型コロナウイルスの出口に向けて、全世界的に大きな潮流となろうとしており、本領域はその観点で極めてタイムリーであり、将来に向けて貢献できればと考えている。

(5) 所感、その他

CREST についてはチーム型研究のためもともと多角的な視点から研究を推進するが、エネルギーキャリアとしての多角的な視点からの評価、指導、推進が必要となる。チーム研究といっても大学、公的研究機関の研究者が中心となっているため、専門の学術領域に基づく視点に陥りがちである。本領域ではエネルギーキャリアとしての専門性を長い期間経験したアドバイザーを中心として、広い視点から、企業化、実用化の出口をうかがいつつ研究を進めることができ、各研究グループの構成研究者もこれまでに経験していない観点からの研究を推進し、発展性を発揮することができたと考えられる。

さきがけ研究については研究者、アドバイザー、総括が一丸となって、今後の方針を検討し、様々な視点から助言を与え軌道修正してきた、さきがけ研究者にとってはこのように多くの専門の異なる研究者からの意見を受けながら指針を定めていく貴重な機会であったと考えられる。実際に転出や昇進などのキャリアに結び付けることができた例も多く、人材育

成に本領域における研究への取り組みが貢献するとともに、今後の研究者としての発展に結びつくものと信じる。ほとんどの研究者がさきがけの成果を次のプロジェクトに結びつけており、研究者としてのさらなる成長に期待する。

以上