

戦略的創造研究推進事業
— チーム型研究（CREST） —

研究領域

「超空間制御に基づく高度な特性を
有する革新的機能素材等の創製」

研究領域中間評価用資料

研究総括： 瀬戸山 亨

2018年3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) 採択課題・研究費	8
2. 研究総括のねらい	10
3. 研究課題の選考について	11
(1) 研究課題の選考方針	11
(2) 選考結果	11
(3) 選考結果の纏め	13
4. 領域アドバイザーについて	15
5. 研究領域の運営について	17
6. 研究の経過と所見	21
7. 総合所見	36

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「選択的物質貯蔵・輸送・分離・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」

① 達成目標

空間空隙構造制御技術（物質を構成する元素間結合の隙間（「空間空隙」）の形状・寸法・次元及び配列等の構造を自在に設計・制御・活用するための共通基盤となる技術）により、そのもととなる物質が本来持ち得なかった革新的な機能を創出し、通常の方法では解決できない環境・エネルギー、医療・健康等における諸課題を解決するグリーン・ライフ部素材の創製に向け、以下の目標の達成を目指す。

- 選択的物質貯蔵・輸送・分離・変換等を可能とする革新的な空間空隙制御材料の創製
- 空間空隙構造制御技術に係る技術体系の構築

② 将来実現し得る重要課題の達成ビジョン

本戦略目標において「達成目標」に記載した研究成果が得られることで、その諸技術を活用した新たな機能を持った材料が創製され、幅広い社会ニーズや産業分野での課題解決に適用することが可能となる。デバイスや医薬品等の各応用分野に応じて、学术界と量産・市場化等を担う産業界との協力体制を早期から構築することにより、第4期科学技術基本計画（平成23年8月19日閣議決定）に掲げられたグリーンイノベーション及びライフイノベーションの推進に向け、環境・エネルギー、医療・健康、社会インフラ等の分野から、例えば、以下の成果が事業終了後5年程度で得られることを目指す。

- ・不安定な気体を効率的に貯蔵・輸送し、かつ自在に分離・変換する技術の開発
- ・排水や汚染水、大気の浄化を高性能かつ経済的に行う分離膜の開発
- ・感知機能や有効成分の放出調整機能を備えたドラッグデリバリーシステムの開発
- ・耐震・免震機能を飛躍的に向上する空隙率制御による超軽量・高強度構造材料の開発

このほか、太陽電池・二次電池等のエネルギー変換材料や、半導体・超伝導等の電磁気材料、センサー・生体適合材料等の分子認識材料といった様々な分野での実用化が考えられる。

③ 具体的内容

（背景） 「空間空隙」を舞台とする新しい概念へ！

近年、物質・材料の設計の自由度及び組成・構造の制御性が格段に向上し、持続可能社会の実現に不可欠な新機能を発現する物質・材料の創出が可能となってきている。この10年間の成果として、ポーラス（多孔質）材料、メソポーラス材料、カゴ状構造物質などで、特異なナノ構造を特徴とする新物質の形成法や多様な機能を引き出すシーズ技術が発掘さ

れ、熾烈（しれつ）な国際競争の中で、技術の先鋭化が著しく進展してきた。現時点で我が国は素材産業において世界的に高いシェアを誇り、基礎的な研究も高いレベルにあるが、今後も競争力を維持できる保証はない。特に、物質・材料に対し、高エネルギー変換、超伝導、高イオン伝導、耐熱、高機械強度、軽量、生体活性、医療、創薬等に関わる新機能の発現や、飛躍的な機能向上に対する要求が世界的に高まっている中、各国に先駆けて、「界面」「表面」といった概念から歴史的に一歩進んだ「空間空隙の活用」という新しい概念の下、革新的な次世代新機能材料を開発・供給していくという戦略が今こそ求められている。

（研究内容） 「空間空隙」を活用した新機能の創出へ！

本戦略目標で提示した空間空隙構造制御による新機能材料の創製という新たなコンセプトの下、それを目指す過程で創出される多数の技術シーズを基盤とし、基礎・応用、物理・化学など、立場の異なる研究者間の意識を高いレベルで共有し、人的ネットワーク形成を促進しつつイノベーション創出を図る。具体的には、達成目標である「選択的物質貯蔵・輸送・分離・変換等を可能とする革新的な空間空隙制御材料の創製」の実現に向けた（1）技術シーズに基づく機能先鋭化の課題、及び（2）社会実装に向けた基盤的技術課題と、達成目標「空間空隙構造制御技術に係る技術体系の構築」に向けた（3）材料創製の基盤となる観察・解析技術、原理解明等に係る課題を相互に連携しつつ推進することにより、達成目標及び将来ビジョンの実現を目指す。具体的には、以下の研究を想定する。

- （1） 空間空隙制御材料の設計と合成＜機能先鋭化＞
 - ・ 空間空隙制御材料における構造及び相互作用の設計と機能発現
 - ・ 空間空隙構造を有する物質の新規合成技術開拓
- （2） 空間空隙制御材料の実装＜社会実装に向けた基盤的技術＞
 - ・ ナノからマクロへの規模拡大、高強度化、高速合成、低コスト化
- （3） 共通基盤技術の構築＜観察・解析技術、原理解明＞
 - ・ 空間空隙制御材料における物理的諸現象（物質輸送・貯蔵及び物質・エネルギー変換等）の観測・解析技術
 - ・ 計算機シミュレーション及びマルチスケール・モデリングによる空間空隙構造の合成プロセス及び構造と機能の設計・解析技術

④ 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、産業競争力の強化に向けた共通基盤の強化のため、「付加価値率や市場占有率高く、今後の成長が見込まれ、我が国が国際競争力のある技術を数多く有している先端材料や部材の開発及び活用に必要な基盤技術、高機能電子デバイスや情報通信の利用、活用を支える基盤技術など、革新的な共通基盤技術に関する研究開発を推進するとともに、これらの技術の適切なオープン化戦略を促進する」こととされ、また、領域横断的な科学技術の強化に向け、「先端計測及び解析技術等の発展につながるナノテクノロジーや光・量子科学技術、e-サイエンス等の高度情報通信技術、数理科学、システム科学

技術など、複数領域に横断的に活用することが可能な科学技術や融合領域の科学技術に関する研究開発を推進する」こととされている。さらに、「ナノテクノロジー・材料科学技術の研究開発方策について<中間取りまとめ>」（平成23年7月 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 ナノテクノロジー・材料科学技術委員会）においては、「国際的な優位性を保持するためには、革新的な技術の開発が不可欠であることから、社会的課題を設定する際に把握可能な技術のみに重点化するのではなく、中長期的観点から、潜在的可能性を持つ技術の創出に向けた研究開発等の取組も推進すべき」とされ、課題解決に向けた重点研究開発課題である「物質材料設計及び制御技術」の一つに「空間及び空隙構造の制御」が取り上げられている。

以上のとおり、第4期科学技術基本計画に掲げられている重要課題「グリーンイノベーションの推進」「ライフイノベーションの推進」「我が国の産業競争力の強化」に向け、革新的な材料の開発が政策的にも求められているところである。

⑤ 他の関連施策との連携及び役割分担・政策効果の違い

現在、我が国の材料開発関連の戦略目標としては、物質・材料の特性・機能を決める元素の役割の解明を目指す「レアメタルフリー材料の実用化及び超高保磁力・超高靱性等の新規目的機能を目指した原子配列制御等のナノスケール物質構造制御技術による物質・材料の革新的機能の創出」（平成22年度戦略目標）や、「環境・エネルギー材料や電子材料、健康・医療用材料に革新をもたらす分子の自在設計『分子技術』の構築」（平成24年度戦略目標）が存在する。これら既存の戦略目標は材料組成や成分そのものを改変させて「如何（いか）に新機能を創発させるか？」といった考え方であるのに対し、本戦略目標は元素や分子間に存在する「空間や空隙（カゴ）を如何に活用するか？」といった全く異なるアプローチである。すなわち、既存の戦略目標と目的や研究内容において相互補完関係にあり、新機能創出という共通目標を掲げて異なるアプローチから推進するものである。既存の戦略目標との相乗効果により我が国の材料開発の基盤を更に強固なものとすることで、環境・エネルギー、医療・健康等の諸分野における新材料開発において革新をもたらすことが可能となる。なお、空間空隙制御材料の一つの例として触媒や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）があるが、「環境、エネルギー、創薬等の課題対応に向けた触媒による先導的な物質変換技術の創出」（平成24年度戦略目標）及び「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」（平成25年度戦略目標）との研究成果や基盤技術の共有等の連携を図ることが求められる。

文部科学省においては、平成24年度より、ナノテクノロジーに関する研究設備の全国的な共用体制を構築する「ナノテクノロジープラットフォーム」事業を開始するなど、研究施設・設備の共用や異分野融合のための環境整備を促進している。本戦略目標においては、研究の効果的推進、既存の施設・設備の有効活用、施設・設備導入の重複排除等の観点から、大学・独立行政法人等が保有し広く開放されている施設・設備や産学官協働のための「場」等を積極的に活用することが求められる。

⑥ 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）

空間空隙制御材料としては、ゼオライト、メソポーラス材料、多孔性金属錯体（金属-有機骨格体（Metal Organic Framework（MOF））/多孔性配位高分子（Porous Coordination Polymer（PCP））等が主要な材料群となっている。特に、近年 MOF/PCP に関する論文数が中国を中心として世界的に増加傾向にあり、トムソン・ロイターの「Materials Science and Technology 2011」においても、3つの注目研究テーマの1つに MOF が採り上げられ、当分野に対する中国の対応について、「これらのデータは、MOF の研究が中国の研究者と中国政府にとって優先的な研究分野であることを示しており、これは恐らく、単に学術的興味のためだけでなく、エネルギー貯蔵やその他の産業応用に向けた巨大な可能性を狙ったことだろう」と紹介している。また、同社の論文引用数に基づく分析によると、“ドラッグデリバリーやバイオセンサーへの応用に向けたメソポーラスシリカナノ粒子（Mesoporous silica nanoparticles for drug delivery and biosensing applications）”や“高秩序メソポーラスポリマーカーボン構造（Highly ordered mesoporous polymer and carbon frameworks）”が世界的に注目されているところである。

一方、我が国では、世界で初めてメソポーラスシリカの合成に成功するとともに、多孔性配位高分子（PCP）の応用可能性に 1990 年代から着目し世界的な成果を上げるなど、「空間空隙」を活用する試みは他国に先駆けて行われてきた。最近では、セメントの構成成分の一つでもあるナノサイズのカゴ状の骨格が繋がった構造を有する $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ （C12A7、酸化カルシウム・酸化アルミニウム化合物）を活用した高活性なアンモニア合成触媒の実現が発表され、約 100 年前に確立されたアンモニア製造技術（ハーバーボッシュ法）に革新をもたらす可能性があるとして産業的にも学術的にも注目されている。また東日本大震災以降、セシウム等の放射性元素の回収・除去にゼオライト等のメソポーラス材料が着目されるなど、空間空隙制御材料による課題解決の新たな展開も期待されている。

以上のような国内外の研究動向を踏まえ、我が国としてもこれまでの学術的・技術的・人的蓄積を生かし、「空間空隙」という新しい概念の下、応用展開を見据えた基盤的研究を早急に実施すべきである。

⑦ 検討の経緯

国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター（JST/CRDS）が開催した「物質・材料分野」俯瞰（ふかん）ワークショップ（平成 20 年 12 月）及び「ナノテクノロジー分野」俯瞰ワークショップ（平成 21 年 8 月）において、ナノテクによる新機能材料開発の重要性が改めて確認されるとともに、重要課題として「空間空隙制御・利用技術」が挙げられた。これを受け、科学技術未来戦略ワークショップ「空間空隙制御・利用技術」（平成 21 年 10 月）が開催され、「新物質開発を先導する指導原理の一つとして空間・空隙を設計・制御する方法論はコアとなる重要概念であり、そのための具体的な諸技術は社会課題解決や産業競争力強化に大きく寄与する」との共通認識が得られるとともに、具体的な技術的課題の

抽出や制度設計上の課題に関する検討が行われた。上記の議論を踏まえ、JST/CRDS 戦略プロジェクト「空間空隙制御材料の設計利用技術～異分野融合による持続可能社会への貢献」が策定され、「微細な空間・空隙を設計・制御することにより、革新的物質機能を生み出す方法論」がコアとなる概念として示され、地球規模の社会的課題解決や、我が国の産業競争力強化に大きく寄与することが期待されている。

以上の議論も踏まえ、科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 ナノテクノロジー・材料科学技術委員会が取りまとめた「ナノテクノロジー・材料科学技術の研究開発方策について<中間取りまとめ>」(平成23年7月)において、課題領域「科学技術基盤」における「物質材料設計及び制御技術」として、「空間及び空隙の制御(ナノ、マイクロ、ミリのマルチスケールのポーラス構造等で、高比強度、強靱性、選択透過性、反応性等の実現等)」が課題解決に向けた重点研究開発課題とされ、既存の組織を超えて活動を統合するような新たな枠組みが必要であるとの指摘がなされ、それ以降、継続的に議論が重ねられた。

また、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 ナノテクノロジー・材料共通基盤技術検討ワーキンググループにおいて、今後強化すべき技術領域の一つとして空間空隙制御材料が取り上げられ(平成24年11月)、特許網構築の重要性、実用化に向けた集中的な取り組みとともに、合成・物性・相互作用等のメカニズムの理解に向け、計算科学を含む基礎的なアプローチを並行して進めることの重要性が示された。

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。

⑧ その他

本戦略目標においては、「空間空隙」という新しい概念の下、応用展開を見据えた基盤的研究を推進することとしている。環境・エネルギー、医療・健康等における諸課題の解決のためには、空間空隙構造制御技術を軸に様々な研究領域の研究者が積極的に参入し、実質的に協働するための環境が必要となる。また、本戦略目標の成果を共通基盤技術の構築に向けて発展させていくためには、産業界との協力体制を早期から構築するなどの取組が重要である。

(2) 研究領域

「超空間制御に基づく高度な特性を有する革新的機能素材等の創製」(平成25年度発足)
研究領域の概要

本研究領域は、21世紀の人類社会が直面する環境・資源・エネルギー・医療・健康等の諸課題を解決するために、空間空隙を有する物質の次元、形状、大きさ、組成、規則性、結晶性、および界面を高度設計する超空間制御技術を構築し、既存材料・技術では到達困難な革新的機能素材等の創製を目的としている。

具体的には、エネルギー(原料)や化学資源の貯蔵、輸送、分離、(触媒的)物質変換、エネルギーの高効率利用、環境汚染物質の低減・除去、生活水の獲得、さらに医療・健康に関わる素材において、実現されていない“あらまほしき高度の機能・物性”の発現を目的として、物質を構成する原子・分子の配置と結合によって生じる空間空隙構造を高度設計・制御すること、すなわち、超空間制御により、十分に差異化された革新的機能素材等の創製を目指した研究開発を推進する。

研究対象は、ポーラス材料、メソポーラス材料、層状構造物質、かご状構造物質、ナノチューブ、高分子、超分子、生体分子、構造材料などの一般的な空間空隙材料に限らず、空間空隙が機能発現の場となりうる物質・材料であり、化学、物理、生物学、工学、計算科学、計測技術等の異分野間の知見を融合したチーム体制のもと、単なる基礎研究ではなく、世界でダントツの素材・製品につながる機能・物性が発現し産業化の端緒となる研究課題を推奨する。

物質中の微細な空間・空隙構造を制御した材料の設計・利用技術

空間空隙制御材料とは 物質・材料を構成する元素間結合の「すき間」の形状・寸法・次元および配列などの構造をナノ～マイクロメートルで制御することによって、バルク材料にはない新機能を発現する材料。構造、機能、相互作用を検討し、それらを組織化して新機能を創出、革新的機能材料を開発する。分離、吸着、触媒、貯蔵、イオン伝導、エネルギー変換などの機能を発揮させる。

機能・物性は構成**元素と構造**(結晶系、アモルファス)でほぼ決まる。

ナノスケールで「すき間」の制御
ナノテクの進展で制御が可能に!

バルク材料

元素戦略を補完する戦略

環境・資源・エネルギー分野に強み
“バルク材料にはない革新的新機能の発現”

分離 吸着 触媒 貯蔵 熱電変換 超伝導
軽量 イオン伝導

空間空隙制御材料

- ・エネルギー変換: 光電、電気化学、熱電、摩擦
- ・超伝導: エレクトロニクス、電力貯蔵、送電
- ・物質貯蔵: 触媒、吸着、捕獲、輸送、電極材料
- ・反応・合成: 触媒(MOF)、反応場
- ・構造材料: 軽量、高強度、高耐久、断熱
- ・分離: レアメタルやガス、液体の分離・吸着技術

・CRDS戦略プロポーザル: 空間空隙制御材料の設計利用技術 ～異分野融合による持続可能社会への貢献～ (平成22年3月発行)
・CRDS WS報告書: 科学技術未来戦略ワークショップ「空間空隙制御・利用技術」(平成21年10月開催)

(3) 研究総括

瀬戸山 亨（三菱ケミカル株式会社 執行役員・フェロー／横浜研究所瀬戸山研究室
室長）

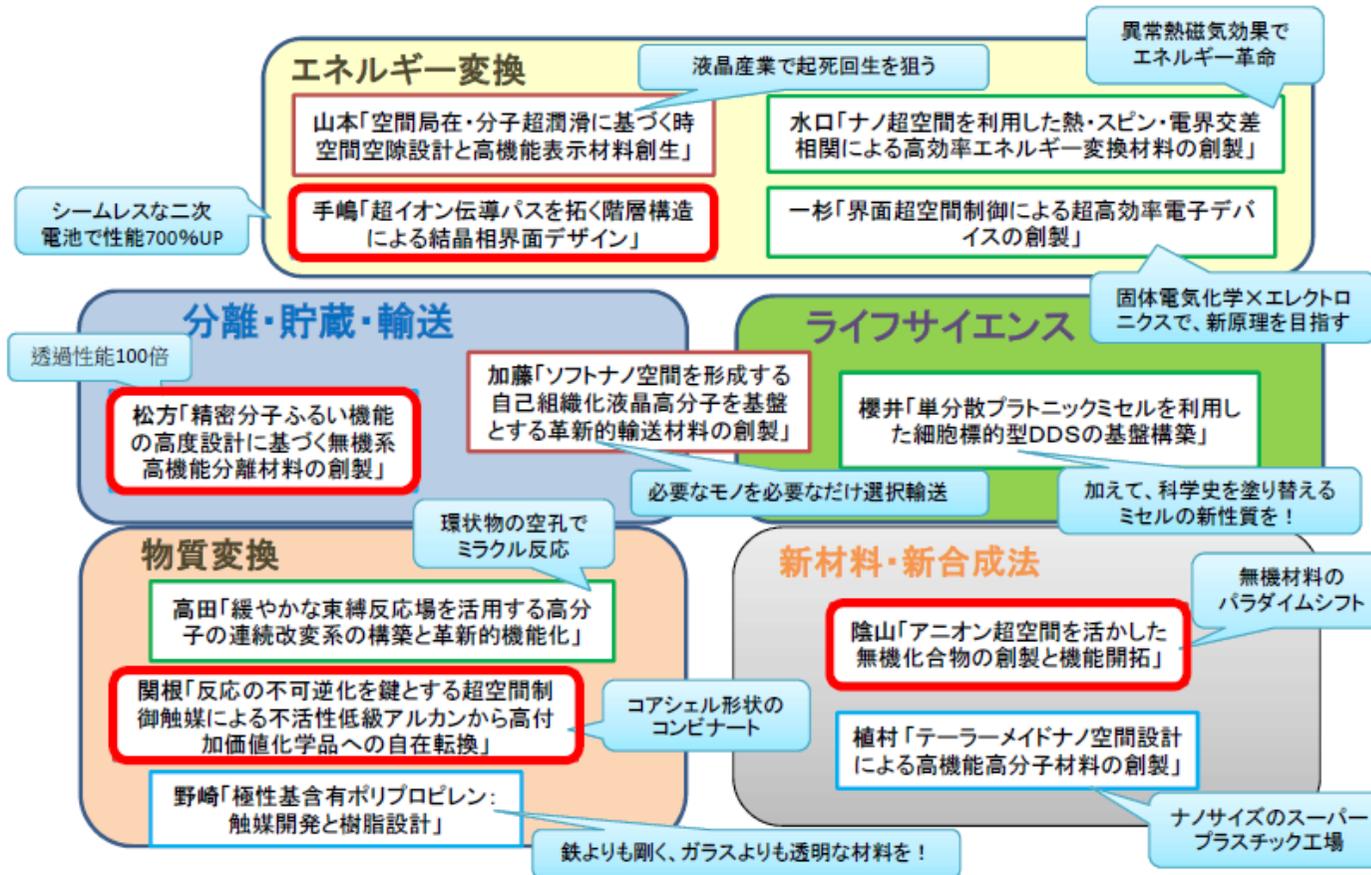
(4) 採択課題・研究費

※2017.12.1時点（百万円）

採択年度	研究代表者	中間評価時 所属・役職	研究課題	研究費*
2013年度	植村 卓史	京都大学・准教授	テーラーメイドナノ空間設計による高機能高分子材料の創製	323
	手嶋 勝弥	信州大学・研究所長／教授	超イオン伝導パスを拓く階層構造による結晶相界面デザイン	307
	野崎 京子	東京大学・教授	極性基含有ポリプロピレン：触媒開発と樹脂設計	332
	松方 正彦	早稲田大学・教授	精密分子ふるい機能の高度設計に基づく無機系高機能分離材料の創製	394
2014年度	陰山 洋	京都大学・教授	アニオン超空間を活かした無機化合物の創製と機能開拓	326
	加藤 隆史	東京大学・教授	ソフトナノ空間を形成する自己組織化液晶高分子を基盤とする革新的輸送材料の創製	289
	関根 泰	早稲田大学・教授	超空間制御触媒による不活性低級アルカンの自在転換	282
	山本 潤	京都大学・教授	空間局在・分子超潤滑に基づく時空間空隙設計と高機能表示材料創生	243
2015年度	櫻井 和朗	北九州市立大学・教授	単分散プラトニックミセルを利用した細胞標的型DDSの基盤構築	298
	高田 十志和	東京工業大学・教授	緩やかな束縛反応場を活用する高分子の連続改変系の構築と革新的機能化	241
	一杉 太郎	東京工業大学・教授	界面超空間制御による超高効率電子デバイスの創製	303
	水口 将輝	東北大学・准教授	ナノ超空間を利用した熱・スピン・電界交差相関による高効率エネルギー変換材料の創製	267
			総研究費	3609

*研究費：2017.11時点の実績額に2017.12以降の計画額を加算した金額（直接経費）

CREST超空間制御ポートフォリオ



Technology起点の差異化が困難な時代 ⇔ Scienceとしての深化／差異化 : 社会実装

2. 研究総括のねらい

21 世紀に入り、国際環境は大きな変動の渦中にあり、それに伴い日本も適切な戦略をもって対応しないと世界から取り残されかねない状況にある。特に経済、環境面での変化は著しく、中国に代表される新興国の経済的台頭、地球規模での大規模な気候変動(いわゆる地球温暖化)、福島第一原発事故以後の原子力政策、さらにシェールガスと呼ばれる非在来型化石資源の急速な普及は、これからの人類社会にとって適格な方針・戦略をもってのぞまないと取り返しのつかない結果につながりかねない。しかしながら、これらのことは、科学立国を目指す日本にとっては最先端科学の発展系として差異化された技術・製品を世界に発信する好機ととらえることができる。

こうした背景の下、空間空隙の高度な設計・制御、すなわち“超空間制御”は、特にエネルギーの効率的利用、環境負荷の低減といった領域において、幅広い用途・応用展開が期待できるものである。

本研究領域においては、ポーラス材料、メソポーラス材料、層状構造物質、かご状構造物質、ナノサイズ粒子、ナノチューブ、高分子、超分子、生体分子、構造材料などの一般的な空間空隙材料ばかりでなく、空間空隙設計が高い機能や物性発現に主要因として寄与する様々な物質・材料等を研究対象としている。日本の研究者による材料の構造設計・制御の先進性、自由度は既にかなり高い水準にあるが、本領域では更に具体的な高い物性・機能の発現につながる材料等の設計・制御を目指している。また、材料・素材が単独で機能を発現することは極めて希であり、多くの場合には他との組み合わせや界面設計によって機能が発現する。本研究領域ではこうした視点に立ち、現状では達成しえない“あらまほしき物性・機能”を念頭において、それにかなう新材料等を超空間制御技術によって達成すること、さらに機能・物性発現のメカニズムを解明・予測することを目指す。また、ひとつの優れた物性やひとつの機能では差異化が不十分の場合が多く、他の追随を許さないダントツの材料等を日本が発信するには「複合化」という視点が不可欠であり、実際の材料とリンクした“複合化した超空間制御”によって創出される物性・機能の理論的裏づけ、これらを実証する評価・解析技術の構築もターゲットとしている。

3. 研究課題の選考について

(1) 研究課題の選考方針

新しい産業の創生には10年後、20年後の社会が欲する大きな課題、すなわち狭義の「needs」ではなく「wants」を予見することが重要である。本研究領域での言う「wants」として、

- ・エネルギー原料、化学原料等を高効率で分離・貯蔵・輸送する、さらにそれを有価な化学品に(触媒的に)変換・効率的に分離するための材料等の創製
- ・環境汚染物質の低減・除去、生活水の確保に必要な材料等の創製
- ・エネルギーの効率利用、省エネに関わるエネルギー変換材料、構造材料等の創製
- ・ライフサイエンス分野における新しい反応(機能)場の創生

等が挙げられる。しかしながら、これらに限らずさまざまな「wants」が存在しているのも事実であり、現時点で想定される「wants」に対応する課題・解答案を“超空間制御”という切り口で挑む提案も広く歓迎した。

また課題解決への取り組み方として、産業化に必要な要件についての協議が十分に尽くされるよう、原則として各課題については企業との協働が望ましいとし、本研究領域での研究開発は大きな新産業創生の足がかりを作るための incubation 期間と位置づける時間感覚で捉えることとした。

“超空間制御”は新しい概念であり、異分野間交流による融合の促進やシナジー効果が不可欠であり、化学、物理、生物学、工学などの多数の学問的視点を持ち、かつ、日本が誇る最先端の計算科学や計測技術を活用した提案を募った。

なお、研究提案書には下記5点の明示をお願いした。

- 「wants」の具体的なイメージと産業への波及効果(規模感)
- 「wants」の実現に必要な素材・部材、プロセスの性能・物性・機能の目標値の定量化
- 目標値を達成する具体的な「超空間設計」の技術戦略と研究計画(CREST 期間内)
- Scientific の視点での技術戦略優位性(差異化)と Technology への落とし込み手法
- 可能な範囲で、複数領域の Synergy 効果の発現

(2) 選考結果

① 平成 25 年度選考結果

初年度は、物質変換・エネルギー変換、貯蔵・分離・輸送、構造材料、ライフサイエンスの4分野を主として、空間・空隙自身の設計、配列を利用した高機能素材やデバイスにつながり、かつ産業創生に貢献できると期待される応用を強く意識した提案を期待し、合計63件の応募があった。13名のアドバイザーからの助言を受けながら書類選考で12件、面接選考で4件を採択した。最終的な採択課題は、物質変換2課題(下記1,2)、エネルギー変換1課題(3)、分離1課題(4)である。

1. メソ多孔体(MOF)を利用した高機能性材料創生「場」の設計
2. 錯体触媒の配位子場の高度空間設計による機能性ポリマー合成とその構造材料

への応用

3. 高度な結晶性・配向性制御による高性能二次電池の設計

4. 分子ふるい機能の高度設計と高透過性能を有する無機系分離膜の設計

ここでは、CREST 研究期間が終了した 5 年後に、実用化研究の段階に入れる水準に達することが期待できそうな課題を半分程度採択した。

構造材料分野の提案は、特異的な構造であるところに留まっており、それによってどのような物性・機能を発現させ、どういった実際の応用につながるかという意識の高いものが少なかった。またライフサイエンス分野の提案は、研究内容自体は素晴らしいものもあったが、本領域の「超空間制御」という基本コンセプトにどうつなげるかという点で不十分であった。これらの分野では、十分準備の上、来年度以降に再度提案するよううながした。

初年度は“答えを出す”という意思を強く打ち出し、開発色の強い課題をかなり意図的に採択したが、次年度以降はもう少し長期的でスケールの大きな課題を設定することとした。

② 平成 26 年度選考結果

平成 26 年度は 61 件の応募を得て、書類選考で 12 件、面接選考で 4 件を採択した。採択課題は、物質変換 1 課題（下記 1）、エネルギー変換 2 課題（2, 3）、分離 1 課題（4）であった。

1. 不活性低級アルカンから高付加価値化学品への効率的触媒反応プロセス
2. 「アニオン超空間」の視点を導入した無機化合物の新たな機能の開拓
3. 超空間設計と分子超潤滑を活用した高機能表示材料の創製
4. 自己組織化液晶高分子を基盤とした高精度高分子系分離膜の設計

これらの提案は、企業からの具体的な「needs」を聞き取り、それを「wants」に昇華させることによって、将来の大きな事業性を予測することが出来ることに加えて、science としての進化・深化が大いに期待でき、提案内容に記載されていない科学上の発展、産業上の発展もありうるのではないかと考え採択した。

物質変換、エネルギー変換分野は、予備的な検討がしっかりしており、また 21 世紀の科学が解決すべき課題、日本の産業競争力の維持の為の課題といったものを良く整理し、それに対する科学上の「wants」を“超空間制御”という設計の概念に従って、具体的な材料・プロセスとして提案し、産学両方の評価委員から高い評価を受けたものが数多くあった。

ライフサイエンス・ヘルスケア分野からの提案は、募集開始時に積極的な応募を呼びかけたこともあり平成 25 年度の 2 倍以上の提案があり最終選考にも数件残ったが、依然として“超空間制御”による場の設計が十分に説明しきれていないこと、特定の疾患の予防、検知といった 1 対 1 的な内容のものが多く、研究というよりは開発という色彩・匂いが強かったことなどの点で、採択には至らなかった。

③ 平成 27 年度選考結果

平成 27 年度は、3 年間を通じて最多の 69 件の応募があった。書類選考で 12 件、面接選

考で4件を選び採択課題とした。最終年度もライフサイエンス領域から20件近い応募があり、また、社会的要請の故か、熱電変換材料を中心としたエネルギー変換領域からの応募も多数あった。採択課題は、物質変換1課題(下記1)、エネルギー変換2課題(2,3)ライフサイエンス1課題(4)であった。

1. 緩やかな束縛反応空間を活用する高分子の連続改変系の構築
2. 界面超空間制御技術による次世代革新記憶材料設計
3. スピントロニクスの高次元空間制御による高効率熱電変換材料の創製
4. ミセル超空間の特異的な束縛構造を利用する細胞標的型DDSの基盤構築

これらの課題はいずれも科学的に興味深く、また将来の社会実装も期待できるものと考えられる。

最終年度、ライフサイエンス領域から1課題採択し、「超空間制御」ポートフォリオとしてバランスの良い課題構成となったと考えている。

(3) 選考結果の纏め

3年間で採択した12課題を概観すると、エネルギー変換領域4課題(手嶋チーム、山本チーム、一杉チーム、水口チーム)、物質変換領域3課題(野崎チーム、関根チーム、高田チーム)、分離2課題(松方チーム、加藤チーム)、新規機能設計2課題(植村チーム、陰山チーム)、ライフサイエンス領域1課題(櫻井チーム)となっており、「超空間制御」の概念をベースにした興味深い課題を採択できた。12課題のタイトルは以下の通り。

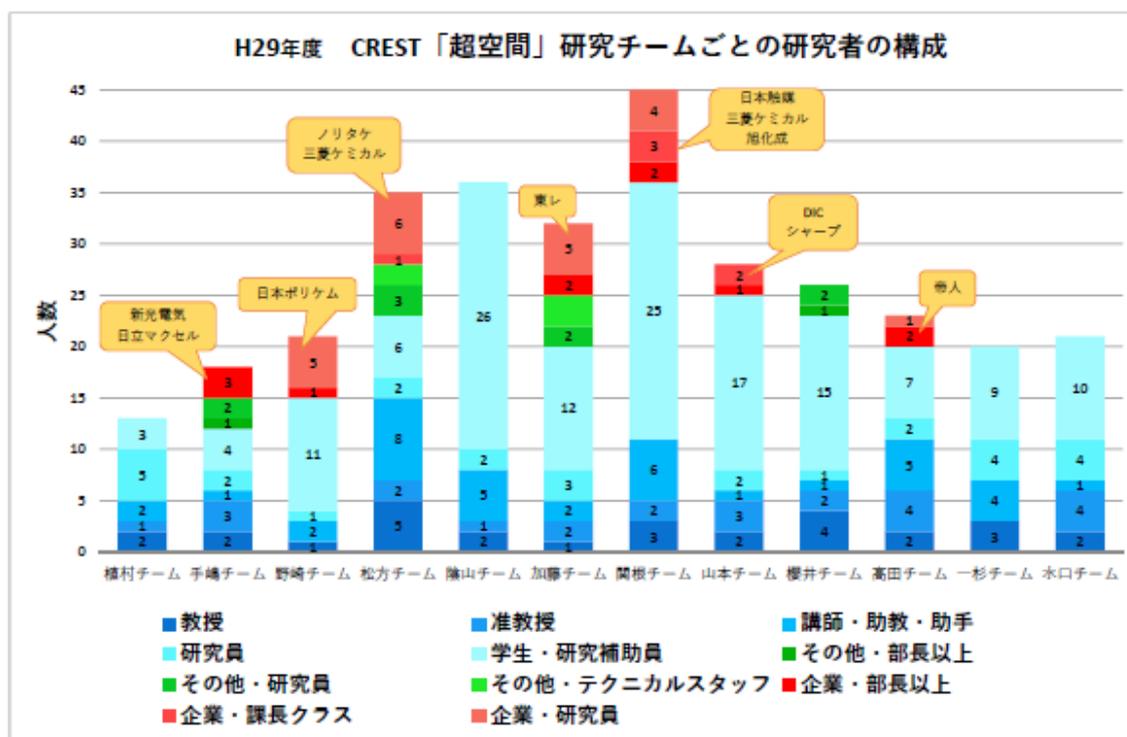
1. テーラーメイドナノ空間設計による高機能高分子材料の創製(植村T)
2. 超イオン伝導パスを拓く階層構造による結晶相界面デザイン(手嶋T)
3. 極性基含有ポリプロピレン:触媒開発と樹脂設計(野崎T)
4. 精密分子ふるい機能の高度設計に基づく無機系高機能分離材料の創製(松方T)
5. アニオン超空間を活かした無機化合物の創製と機能開拓(陰山T)
6. ソフトナノ空間を形成する自己組織化液晶高分子を基盤とする革新的輸送材料の創製(加藤T)
7. 超空間制御触媒による不活性低級アルカンの自在転換(関根T)
8. 空間局在・分子超潤滑に基づく時空間空隙設計と高機能表示材料創生(山本T)
9. 単分散プラトニックミセルを利用した細胞標的型DDSの基盤構築(櫻井T)
10. 緩やかな束縛反応場を活用する高分子の連続改変系の構築と革新的機能化(高田T)
11. 界面超空間制御による超高効率電子デバイスの創製(一杉T)
12. ナノ超空間を利用した熱・スピン・電界交差相関による高効率エネルギー変換材料の創製(水口T)

これら採択した課題は、企業からの具体的な「needs」を聞き取り、それを「wants」に昇華させることによって、将来の大きな事業性を予測することが出来ることに加えて、サイエ

ンスとしての進化・深化が大いに期待でき、提案内容に記載されていない科学上の発展、産業上の発展もありうる。今後の研究の進展・発展が大いに期待できるものである。

運営については、基本的に大きな4領域（①物質変換・エネルギー変換領域、②分離・貯蔵・輸送領域、③機能性素材領域、④ライフサイエンス領域）を柱とし、これらをより太くすることを最優先とし、さらに領域間のシナジーにより新しい革新的な素材等の創製に繋げていく。他者にコピーされにくい素材であるためには、特徴ある複数の機能・特性の組合せによる「知の複合化」（ブラックボックス化）が不可欠である。組み合わせ界面を科学的に解析し、それを深化させると同時に有効な知財戦略の確立を目指す。そのためには近視眼的ではない民間企業との連携が不可欠であり、研究開発ステージに応じた研究体制の最適化に努める。

以下に、本研究領域を構成する各研究チームの構成（民間企業も含む）を示す。



4. 領域アドバイザーについて

領域アドバイザー名	現在の所属	役職	任期
猪俣 誠	日揮(株)	特別理事	平成25年6月～
上田 渉	神奈川大学	教授	平成25年6月～
北川 宏	京都大学	教授/理事補	平成25年6月～
黒田 一幸	早稲田大学	教授	平成25年6月～
佐々木 高義	物質・材料研究機構	フェロー	平成25年6月～
多辺 由佳	早稲田大学	教授	平成25年6月～
千葉 雅俊	田辺三菱製薬(株)	部長	平成25年6月～
土井 正男	北京航空航天大学	教授	平成25年6月～
堂免 一成	東京大学	教授	平成25年6月～
中田 道生	三菱エンジニアリング プラスチック(株)		平成25年6月～平成27年3月
駒谷 隆志	三菱エンジニアリング プラスチック(株)	常務執行役員	平成27年4月～
中山 智弘	科学技術振興機構	室長 /フェロー	平成25年6月～
原田 宏昭	日産財団	常務理事	平成25年6月～
平野 愛弓	東北大学	主任研究者/ 教授	平成25年6月～

領域運営 アドバイザー名	現在の所属	役職	任期
浅見 正弘	富士フイルム (株)	執行役員	平成25年6月～
軽部 大	一橋大学	准教授	平成26年4月～

研究推進委員名	現在の所属	役職	任期
須崎 友文	三菱ケミカル (株)	嘱託研究員	平成28年8月～

*人選にあたっての考え方

本領域で取り扱う研究の専門領域(専門的視点)、産業化に繋げるための視点(産業的視点)、経済学や未来社会学等、社会情勢との整合性(社会的視点)から十分な議論が行えるよう、幅広い領域の専門家に領域アドバイザー、領域運営アドバイザーをお願いした。

(1) 専門的視点：(領域アドバイザー)

無機系領域 3名 (北川、黒田、佐々木)

有機/高分子系領域 3名 (多辺、土井、原田)

バイオ系領域 2名 (平野、千葉)

触媒系領域 2名 (上田、堂免)

プロセス領域 2名 (猪俣、駒谷)、JST1名 (中山)

(2) 産業的視点：(領域アドバイザー)

企業 4名 (猪俣、千葉、駒谷、原田)

大学等 8名 (上田、北川、黒田、佐々木、多辺、土井、堂免、平野)、JST1名 (中山)

(3) 社会的視点：(領域運営アドバイザー)

企業 1名 (浅見)

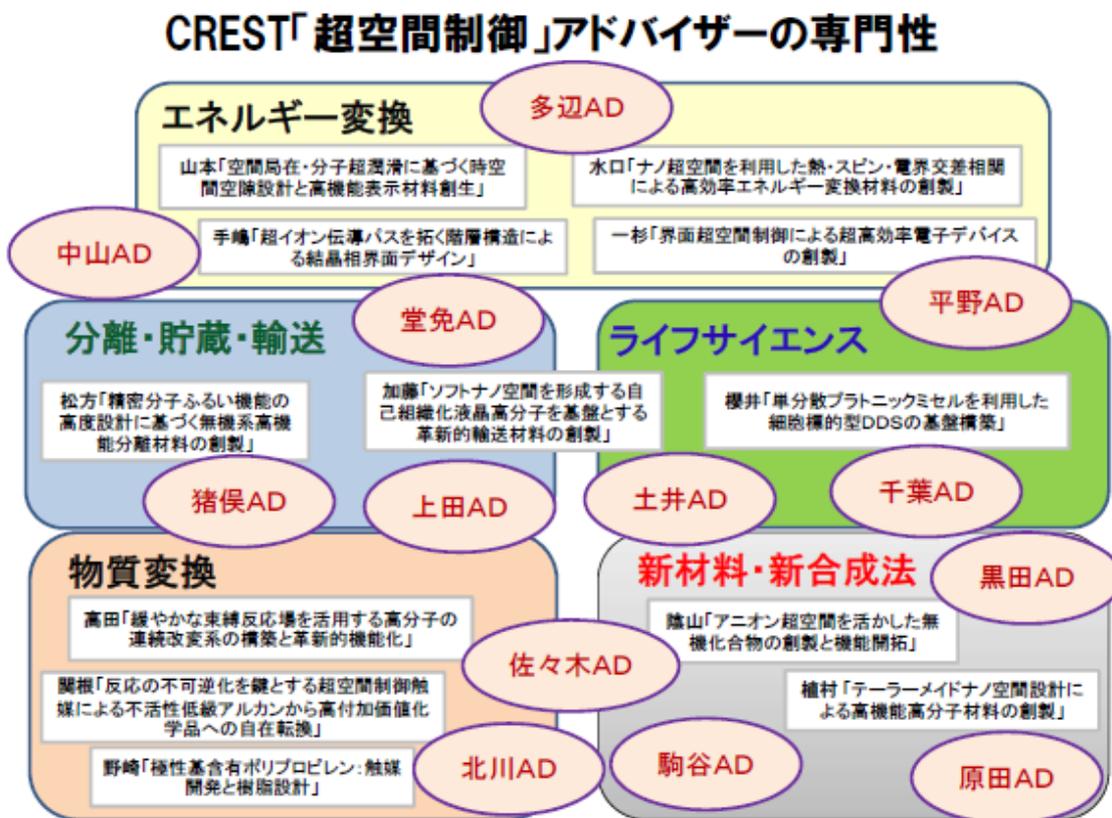
大学 1名 (軽部)

(JST 1名 (中山))

(4) その他

課題の推進を本格化するにあたり表面物理、分光解析等の専門領域補強のため、研究推進委員1名(企業1名、須崎)を任命した。

各研究課題に対応した領域アドバイザーの専門性を以下に判り易く示す。



5. 研究領域の運営について

新しい産業の創生には10年後、20年後の社会の欲する大きな課題を予見することが必要であり、本CREST領域では、産業化に必要な要件について企業と協議を進めていただきながら、CREST終了段階で「五合目」突破を目指し、新産業創出の足がかりを作りたいと考えた。

CREST研究に要求されるのは、現状では達成しえない“あらまほしき物性・機能”を念頭において、①従来路線ではない尖ったダントツ性、②科学的論理性、③Wants性、④事業化可能性の4点。さらに、模倣できない、他社の追従を許さないという視点も重要であり、理論に裏打ちされた基礎技術の組合せ・連携、複合化により、強く革新的な技術の創成を目指した。

募集段階からなるべく企業と協働した体制で取り組むようお願いしており、結果、12チーム中7チームがチーム内に企業を取り込んで研究を進めている。また、産業界からのアドバイザーを4名配置した。

チーム内の共同研究グループを含めて成果の展開が見えるものについては、研究代表者と協議した上で部分的にでも次のステージ、例えば、ACCELや新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)プロジェクト等に紹介し、テンポ良く繋いでいくことを意識して進めている。

各チームより月報を提出いただき、こまめに最新状況を把握し、必要に応じて、特許出願、関連企業の研究状況確認や連携、他プロジェクトへの切り出し申請等について、検討するようコメントしている。

また、さきがけ「超空間」研究者との連携を深めるため、領域会議でのオブザーバー参加、合同キックオフ会、合同シンポジウム等を通して、バーチャルネットワーク型研究所としての研究体制をフル活用した。

研究課題の進捗管理、指導については、採択直後(10月)に研究代表者の研究サイトを訪問し、具体的な研究計画を主たる共同研究者を含めて議論し、3年後、5年後の達成目標のイメージをチーム内で共有化した。研究進捗は、月報(全体版;A4、3-4枚でチームとしての進捗状況を報告、グループ版:各グループの中間目標に対する進捗状況を3,4行で報告)で把握している。進捗状況に不安がある場合は別途サイトビジットを行い研究方向性等の詳細議論を行い、各チームで行われる研究進捗報告会へは可能な範囲で参加している。

(1) 総括サイトビジットと各チームの研究進捗報告会

基本的に、採択年度の10月に全研究チームのサイトビジットを行い、その後は必要に応じて適宜実施した。各チームの研究進捗報告会は研究代表者の主催で定期的に行われており、適宜出席して議論に参加した。

① サイトビジット 合計16回

植村 T(H25, H26, H28)、手嶋 T(H25)、野崎 T(H25)、松方 T(H25)

陰山 T(H26, H28)、加藤 T(H26)、関根 T(H26)、山本 T(H26, H28)

櫻井 T(H28)、高田 T(H27)、一杉 T(H27)、水口 T(H27)

② 研究進捗報告会 合計 11 回 (総括 or 領域担当出席会議)

(2) 領域会議

領域会議の実績は以下の通り。現在までに、4 回 (年 1 回開催) 実施。出席者は、研究総括、領域アドバイザー、領域運営アドバイザー、研究代表者、主たる共同研究者、研究参加者 (有志)、さきがけ研究者 (有志) であり、「超空間」研究領域メンバーの交流、情報交換が積極的に行えるよう、親睦・交流会を含めて実施した。

第 1 回 : 2014 年 4 月 15 日 (火) 13:00~17:15 JST 東京本部別館 40 名参加

第 2 回 : 2015 年 4 月 14 日 (火) 13:00~18:30 JST 東京本部別館 65 名参加

第 3 回 : 2016 年 4 月 8 日 (金) 9:30~18:00 JST 東京本部別館 78 名参加

第 4 回 : 2017 年 4 月 17 日 (月) 9:30~17:45 JST 東京本部別館 100 名参加

(3) CREST・さきがけ「超空間」合同キックオフミーティング

CREST と同時に発足したさきがけ「超空間」研究領域との合同キックオフミーティングを開催した。同じ研究領域に属する研究者が集い、人的ネットワーク作り、研究課題の情報交換を目的としたもので、口頭発表、ポスター発表で議論を深めた。

□ 日時 : 2014 年 3 月 10 日 (月) 12:50~18:00

□ 場所 : JST 東京本部別館

□ 参加 : 研究総括、領域アドバイザー、CREST/さきがけ研究者 60 名参加

(4) CREST・さきがけ「超空間」合同シンポジウム

日本化学会春季年会での特別企画、コラボレーション企画として、CREST・さきがけ合同シンポジウム「超空間を舞台とする新しい化学」「超空間が拓く革新的機能と新素材」を過去 3 年間にわたり開催した。日本化学会年会会場での開催もあり、毎回 100 名以上の参加を得て盛況であった。

① 日本化学会第 95 春季年会 (2015) 特別企画

「超空間制御」研究領域合同シンポジウム～超空間を舞台とする新しい化学～

□ 日時 : 2015 年 3 月 26 日 (木) 13:40~16:30

□ 場所 : 日本大学 船橋キャンパス

② 日本化学会 第 96 春季年会 (2016) コラボレーション企画

「超空間制御」研究領域合同シンポジウム～超空間を舞台とする新しい化学～

□ 日時 : 2016 年 3 月 25 日 (金) 13:30~16:40

□ 場所 : 同志社大学 京田辺キャンパス

③ 日本化学会 第 97 春季年会 (2017) コラボレーション企画

「超空間制御」研究領域合同成果シンポジウム～超空間が拓く革新的機能と新素材～

日時：2017年3月18日(土) 10:00～16:00

場所：慶応義塾大学 日吉キャンパス

(5) 対外向け PR

日本化学会秋季事業「CSJ 化学フェスタ」では、「元素戦略」「分子技術」と連携した物質・材料の創出に関する紹介、「超空間」の切り口で拓く新しい化学分野の展開の説明を積極的に行った。

① 第4回 CSJ 化学フェスタ JST 特別企画

“元素”と“分子”と“空間”の総合制御で未来の物質・材料を生み出そう

日時：2014年10月15日(水) 10:00～17:10

場所：タワーホール船堀

② 第6回 CSJ 化学フェスタ テーマ企画

ナノ空間材料 ～穴ぼこだらけがいい感じ～

日時：2016年11月15日(火) 9:30～12:00

場所：タワーホール船堀

③ JST フェア (櫻井 T1 件、さきがけ 1 件)

日時：2017年8月31日～9月1日

場所：東京ビックサイト

さらに、現代化学、523号、頁24-32、2014において、座談会「超空間を設計する化学」(北川進、黒田一幸、瀬戸山亨)、「空間制御の歴史」(辰巳敬)、「儂い穴、頑固な穴」(小谷元子)、「ジャイロイドの迷宮」(堂寺知成)の解説記事を掲載し、超空間研究領域のPRにつとめた。

(6) 研究費の追加支援と導入設備

CREST追加支援(増額)主な導入設備

チーム名	グループ名	年度	金額(千円)	機器名
植村チーム	植村	2014(H26)	4,000	高分子分子量測定SEC専用システム
手嶋チーム	手嶋	2014(H26)	6,000	充放電検査装置、スパッタ用カソード電極
		2014(H26)	4,300	X線回折試料加熱装置
		2015(H27)	3,000	充放電装置/恒温槽
		2015(H27)	10,000	雰囲気制御型大型電気炉
		2015(H27)	4,500	遊星型ボールミル
		2015(H27)	3,500	混練機
		2016(H28)	6,000	第一原理計算プログラムVer.Up
		2016(H28)	3,500	高温DSC装置
		2016(H28)	2,500	冷間静水等方圧プレス機
		2016(H28)	3,500	真空蒸着装置
		湯蓋	2016(H28)	3,725
	藤田	2015(H27)	5,000	AFM用サンプル加熱ステージ
		2016(H28)	6,000	充放電用大気非暴露搬送システム、他
野崎チーム	野崎	2014(H26)	12,000	ガス循環精製装置付パージ式グローブボックス
松方チーム	金子	2014(H26)	6,500	極低温ガス吸着用冷却装置
		2015(H27)	8,000	流通系気体温度制御(200万円未満、機器4点)
	児玉	2014(H26)	3,200	赤外線式ガス濃度測定装置
		2015(H27)	10,000	質量ガス分析計
陰山チーム		2015(H27)	43,000	薄膜成長(MBE)、電子銃蒸発源
		2016(H28)	9,340	クヌーセンセル、放射温度計、他
	陰山	2016(H28)	6,000	ガスクロマトグラフ質量分析計
加藤チーム	加藤	2015(H27)	3,200	イオンクロマトグラフィー
関根チーム	関根	2016(H28)	9,000	化学吸着測定装置
			2014(H26)	1,600
	窪田	2015(H27)	8,900	粒子径・ゼータ電位測定装置
		2015(H27)	3,000	真密度測定装置
		2016(H28)	4,000	インピーダンス測定装置
	横井	2014(H26)	2,800	SU9000用リターディングホルダ
		2015(H27)	1,000	断面試料作成イオンミリング試料台
山本チーム	山本	2014(H26)	4,800	ツイスト弾性測定動的光散乱装置
		2015(H27)	2,800	顕微鏡精密大型温度制御装置
櫻井チーム	櫻井	2016(H28)	9,000	粒子径分布測定装置
一杉チーム	一杉	2016(H28)	20,000	大気非接触デバイス評価設備移設、設備改造(チャンパー連結)
	合計		233,665	

※黄色地は 2,000 万円以上の支援

陰山チーム (MBE : 43,000 千円)

混合アニオン人工超格子薄膜の異種積層による革新的物理機能の開拓

一杉チーム (デバイス評価装置 : 20,000 千円)

”実験室の AI ロボット化” 成膜・評価装置を複合・一体化した実験ロボットシステム

6. 研究の経過と所見

(1) 各チームの研究経過と所見

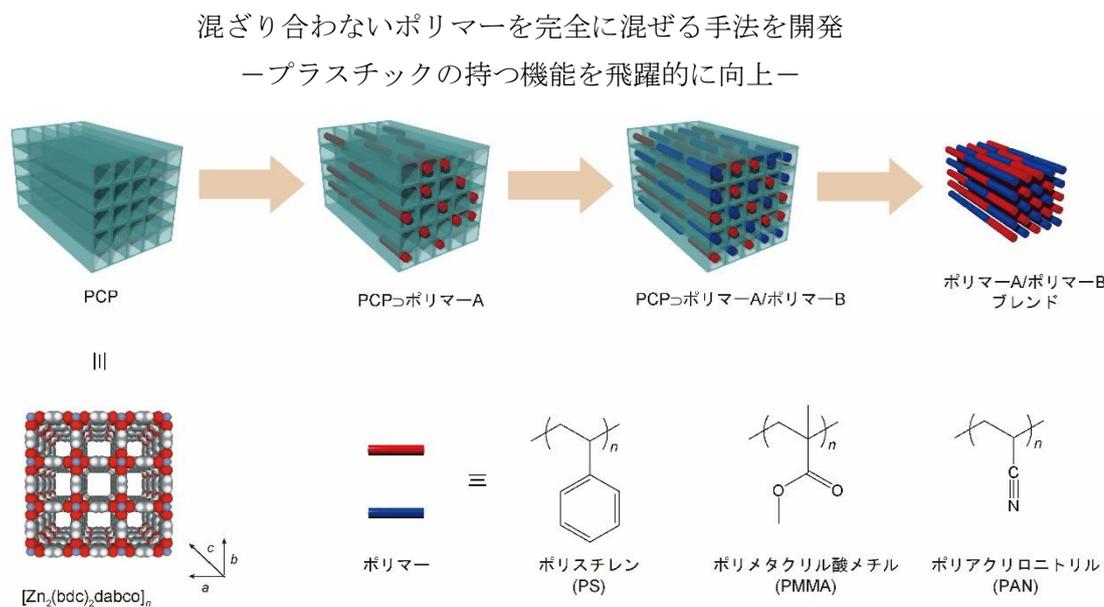
平成 25 年度、及び平成 26 年度採択課題を対象として、平成 28 年及び平成 29 年にそれぞれ課題中間評価会を行った。これらの結果を踏まえ、平成 27 年度採択課題を含めた各チームの研究経過と所見について述べる。

① 平成 25 年度採択課題

・植村チーム：テーラーメイドナノ空間設計による高機能高分子材料の創製

[研究課題の概要]

本研究課題は、デザインされたナノ空間を用いることで、高分子を目的に応じた構造、集積様式で合成できるシステムの構築を目指すものである。このような革新的な合成システムを開発することで、通常法では合成することができなかった高分子材料や、潜在的に有していた機能性を発現する超構造高分子材料の構築の実現が期待できる。



PCP を鋳型としたポリマーブレンド作成のイメージ

[研究経過と所見]

MOF の多孔性空間を利用したシークエンス制御、導電性付与、ナノアロイの精密制御等、当初計画していた研究課題に対して一定の成果は得られており、インパクトファクタの高い論文誌への掲載を含め、チーム成果の発信も十分なされていると考え、優れていると言える。

MOF の構造を利用した応用研究がその発見以来、多くの場合実用的進展を見ていないのは、ある程度の機能・構造上の特異性を発現することが可能になったが、格段の性能が見出されることがないからであると考えられ、MOF 自身を大規模スケールの反応場として利

用するには、コンセプト反応場としてどれほどのことができるかということが非常に重要である。本研究課題におけるポリマー設計においても、例えば、構造材料用の汎用ポリマーの劇的な物性改善や従来の合成法とは異なる MOF の内部空間を利用した重合触媒の設計など、よりインパクトの大きな課題に取り組んでいただき、顕著な成果を期待したい。

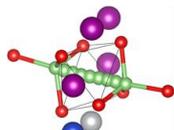
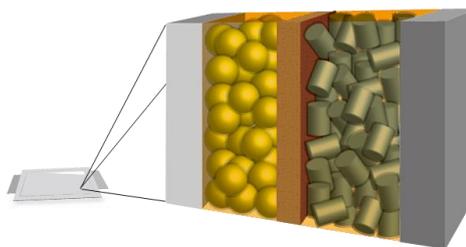
・手嶋チーム：超イオン伝導パスを拓く階層構造による結晶相界面デザイン

[研究課題の概要]

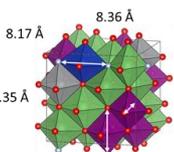
本研究課題では、結晶相「界面デザイン」の学理構築を目標に、独自のフラックス法による自形結晶育成技術を基軸に、イオン伝導経路予測、結晶形状及び結晶面配向制御、結晶層の空間制御、異相界面の精密接合、イオン伝導パスを可視化する技術を開発する。イオン伝導経路を自在に設計し、負極から正極までシームレスな超イオン伝導パスをもつ、『高入出力対応バルク型全固体リチウムイオン二次電池』の実現を目指すものである。

超空間制御-酸化物系全固体電池

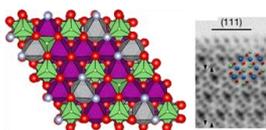
全固体電池製造：
テープ成型 + 焼結，一体成型で実現する異種界面接合



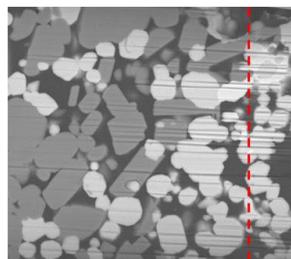
リチウムイオン伝導空間制御



リチウムイオン格納空間制御

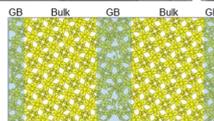
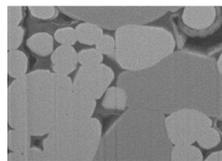


☆結晶表面の複合アニオン化

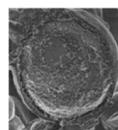


合剤電極

混合電解質
セパレータ

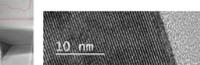
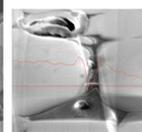


☆粒界伝導解析

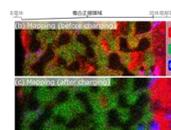


☆結晶表面への機能性被膜形成

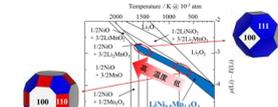
マルチスケール階層的超空間制御



☆清浄界面形成



☆リチウム濃度分布を計測



☆晶癖発達面予測

[研究経過と所見]

超高性能全固体二次電池の創生に向けて、稠密配向性結晶薄膜正極材料の合成法の確立、固体電解質材料の広範囲にわたる探索・絞り込み、界面制御など、要素技術としては実用化が意識できるものが中間評価時点で複数みられることは大いに評価できる。

成果の公表についても学会・新聞発表等によって社会の関心を集め、実際いくつかの材料については民間企業との共同開発の準備が進んでいることは特筆すべきであろう。科学の発展性という視点では、フラックス法による結晶性セラミックス材料の精密設計、反応機構の解明も期間中に進展がみられ、より評価の高い学術誌への投稿等、自身の研究者としての国際的な評価の確立を今後一層意識して進めていただきたい。

また、チームとしての運営は、多くの共同研究者と垣根を低くして上手に進められており、チームを統括する研究代表者として高く評価している。今後は、高性能全固体二次電池の性能発現において、界面の精密制御やデバイスとしての構造設計等、鍵となる課題に積極的に取り組み、実際に高性能で動く全固体二次電池を実現していただきたい。

・野崎チーム：極性基含有ポリプロピレン：触媒開発と樹脂設計

[研究課題の概要]

本研究課題は、触媒活性中心近傍の精密な空間制御に基づいて、プロピレンと極性モノマーの共重合を可能にする触媒を新たに開発し、今まで合成することのできなかつた、接着性、相溶性、着色性等の特性を備えた「新ポリプロピレン」の創出を目指すものである。

[研究経過と所見]

極性基含有ポリエチレン製造用のポストメタロセン系の重合触媒の知見が採択時にあったとはいえ、ほぼゼロからの出発でより高難度の極性基含有ポリプロピレン製造用の重合触媒について、自主中間目標をクリアできる触媒を複数発見できたことは特筆すべき成果である。当初予想していなかった反応機構がある程度解明されつつあり、学界発表・論文等の実績は充分である。今後、活性（TOF、TON）、構造規則性（高度の結晶性）実現に向けてよい指針となることが期待できる一方、工業触媒の活性レベル、使用できる主触媒金属種には制限があると考えべきであり、これまでに見出された触媒以外の可能性についても検討を拡げていただきたい。

複合材料としての高機能化については、プロジェクト後半では、ある程度極性ポリプロピレンを操ることも期待できるので、それらを活用した複合材の設計・評価についても段取りを工夫することが求められる。イソタクチック性の高いポリマー製造用の触媒開発が主課題ではあるが、現時点で製造しうるポリマーをベースにした複合材でどれほどの機能が発現しうるかは将来に向けての大きな知見になると考えられ、アカデミアー民間の意思疎通により一層努めながら進めていただきたい。

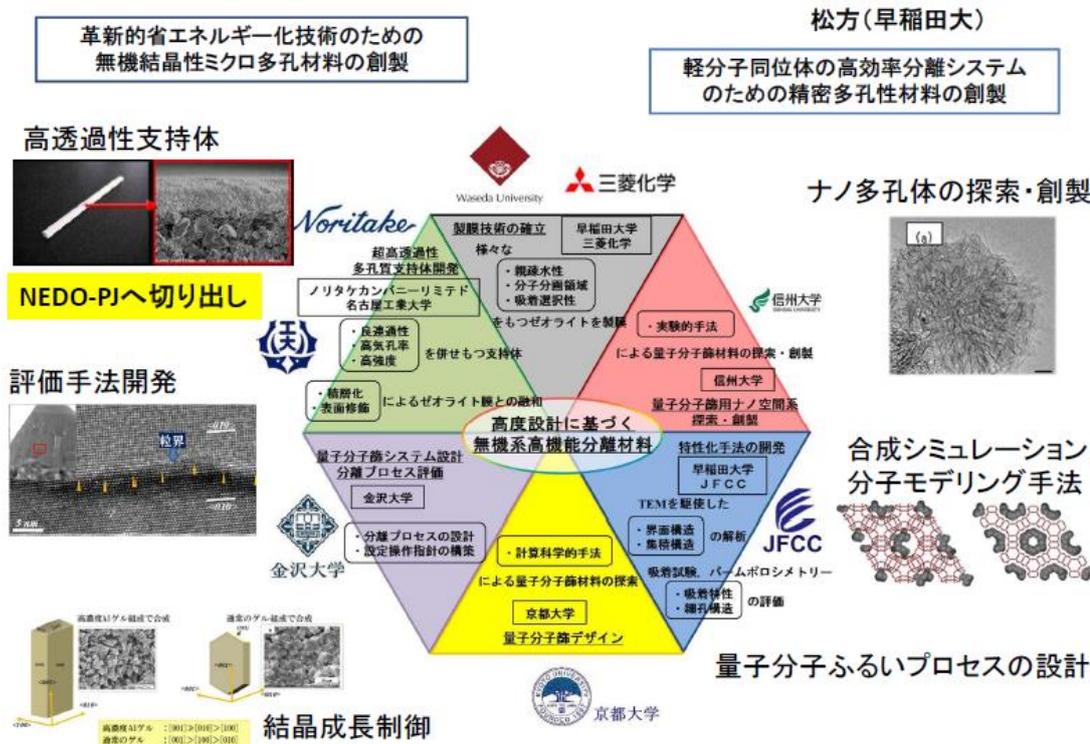
・松方チーム：精密分子ふるい機能の高度設計に基づく無機系高機能分離材料の創製

[研究課題の概要]

本研究課題は、省エネルギーで分子レベルの精密分離を可能とする無機結晶性マイクロ多孔性材料を用いた新規な膜分離技術の開発を目指すものである。さらに、量子分子ふるい作用に着目し、次世代先端医療で必要とされる軽分子同位体の高効率分離システムの

ための精密多孔性材料と分離技術を創製する。

精密分子ふるい機能の高度設計に基づく無機系高機能分離材料の創製



[研究経過と所見]

ゼオライト膜の設計・機能向上は、過去5年程度で大きな進展があり、産業利用の可能性への期待が大きくなってきている。本研究課題は、その為の要素技術としての支持体構造設計、高透過性化、膜形成の反応機構解析等で、一定以上の成果が出ていると評価できる。いくつかの得られた成果は、産業応用という意味で、次のフェイズに移行できるレベルに達しているように思われ、積極的な応用展開を幅広く考えていただきたい。一方で、研究成果の科学的な視点での発信が極めて少なく、日本の分離膜の卓越性を世界的に認知・認識してもらうという観点からも、後半は必ず真剣に取り組んでいただきたい事項である。

ゼオライトと炭素の複合ナノ多孔性材料による量子分子篩は、当初想定していた同位体分離目的には解決すべき課題が多くあることが明らかになってきたが、分子篩機能の新概念につながるような実験・シミュレーションの結果も得られているので、あまり同位体分離という応用に縛られることなく、検討を継続していただきたい。

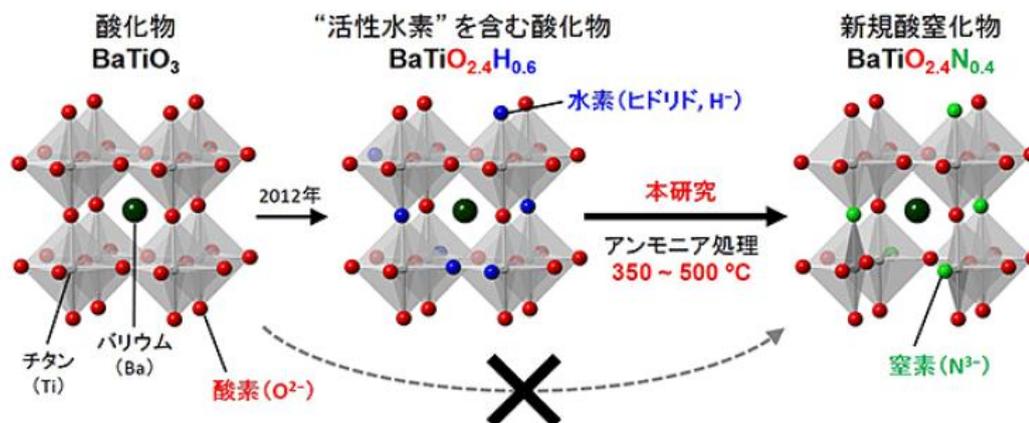
② 平成26年度採択課題

・陰山チーム：アニオン超空間を活かした無機化合物の創製と機能開拓

[研究課題の概要]

本研究課題は、無機結晶内のアニオン超空間（通常のアニオンに加え、分子、希ガスな

ども含める) 内でアニオンに着目して自在に操作することで「新物質」の創製を目指すものである。アニオン種の分極率、軌道準位などの違いを利用し、酸化物では決して得られない電子状態を設計し、アニオンが主導する革新的な化学機能(触媒など)や物理機能(強誘電など)を創発する。



[研究経過と所見]

新物質探索、化学的機能および物理的機能の開拓において順調な研究進展がみられる。特に、酸水素化物の合成とそれを利用した材料設計技術、光電変換材料である層状酸ハロゲン化物 $\text{Bi}_4\text{Nb}_8\text{O}_{20}\text{Cl}$ をはじめとした材料候補群の発見とバリエーションの拡張、それら機能発現についての新しい概念の提案は高く評価できる。

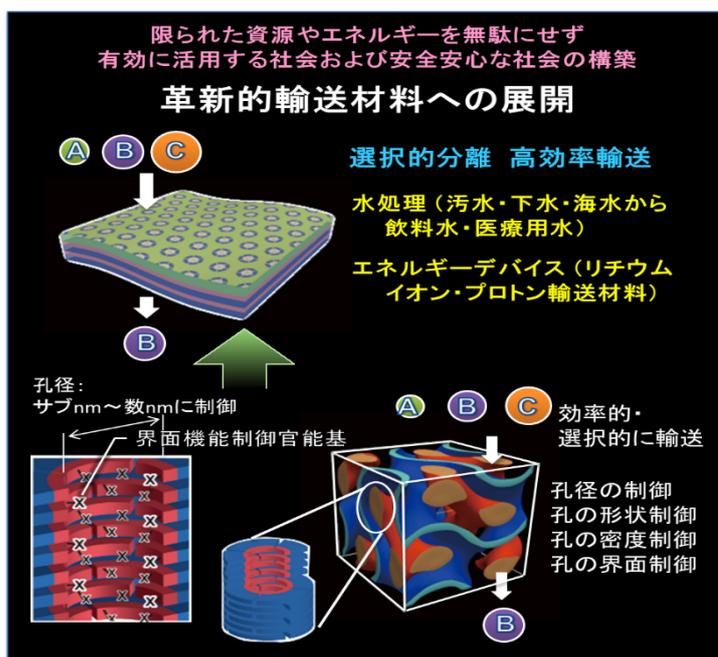
各研究グループを中心に合成プロセス、化学機能、物理機能の三つの視点から精力的に研究展開を実施しており、数多くの新発見・新概念が質の高い論文誌に数多く発表されている。さらに、研究代表者は本研究課題が深く関与する新学術領域“アニオン化合物”を設立し、その牽引を担っている点も、新しい学理構築に向けて大きく期待したい。

研究開始前半では、各種材料の設計、機能設計に向けて幅広い領域への応用を目的としており、具体的な産業応用に展開するには時間が必要と考えられる。今後の発展が期待できる領域に成長しつつあることを考えると、より深く科学の根を掘り下げ、幹を太らせる研究戦略で臨んでいただき、顕著な成果を期待したい。

・加藤チーム：ソフトナノ空間を形成する自己組織化液晶高分子を基盤とする革新的輸送材料の創製

[研究課題の概要]

本研究課題は、直径のそろったナノメータサイズの連続的な孔を有する材料である「自己組織化ナノ液晶高分子」の創製を目指すものである。この新しい材料を膜として用いて、水の浄化(微量有害物質やウイルスの選択的除去)を行うことで環境・ライフの問題の解決に貢献する。



[研究経過と所見]

液晶高分子薄膜のナノ構造制御・配向性制御により、イオン分離、水浄化、二次電池電解質応用等で優れた性能発現の可能性を示した点は高く評価できる。特に、ウイルス除去やイオン濃縮、分離選別等は、今後、社会実装に展開できるレベルであると考えられる。それらを実現するための材料設計は、研究代表者がこれまでに深耕してきた科学的なコンセプト、方法論が具体的な展開へ機能することを示すものであり、科学的に裏打ちされた成果といえる。

本研究課題の運営において、分離膜事業を展開している参画企業と密なコミュニケーションがなされており、チーム内の予算配分等の点においても、円滑な研究開発進捗への配慮がなされている。現実的な社会・産業界からの“needs”に対して、深みを持ったサイエンスがテクノロジーへと発展していく過程を示している状況であると理解しており、その研究過程が質の高い論文誌に多く掲載されている点も評価できる。

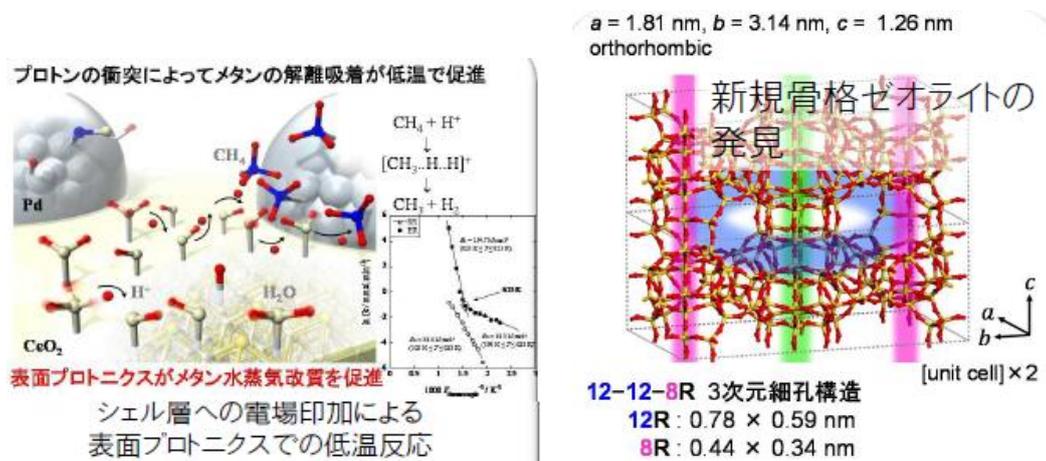
今後、いくつかの課題は社会実装に向けた展開が期待され、知財戦略を含め、その方法論について十分協議し進めていただきたい。特に、イオン分離・濃縮、移動・移送については、今後 21 世紀社会の頭在“needs”として発展していくものと思われ、更なる学術的深耕を期待したい。

・ 関根チーム：超空間制御触媒による不活性低級アルカンの自在転換

[研究課題の概要]

本研究課題は、低温作動の電場印加触媒反応と、高度に制御されたコアシェル構造触媒を用いて、低級アルカン原料から高付加価値な化学品を直接作り出すことができる、新規触媒プロセスの確立を目指すものである。実現すれば石油化学のパラダイムシフト、化学

の国際的競争力増大につながる事が期待される。



[研究経過と所見]

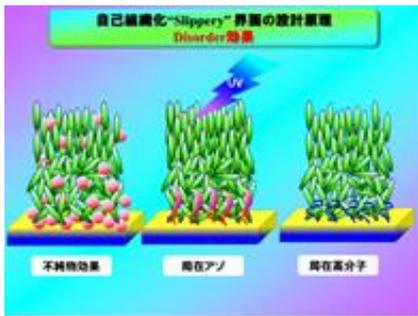
電場印加による低温プロトニクスを応用するメタン、窒素等の不活性分子の触媒的活性化、ゼオライトのナノレベルでのコアシェル構造化による機能分担型触媒設計、世界初12×12×8員環三次元構造のアルミノシリケートの発見等、秀逸な結果が数多く提案されており、その多くの課題において参画企業との連携で社会実装を意識した取り組みがなされている点は高く評価できる。

また短期間の間に、本研究課題を起源とした新しい研究テーマへ発展させて、さきがけをはじめとする他の戦略事業の研究者として若手研究者を輩出した点は十分評価できる。研究レベルは十分高く、多くの論文に掲載されているが、更なる質の高い論文誌への掲載を目指す工夫を期待している。

低温プロトニクスは十分興味深い現象である反面、従来の触媒反応の常識では説明しにくい未知なる点が数多くあるため、その発見機構についての理解を深めるとともに、低温プロトニクス、ゼオライトのナノ構造設計の両課題ともより大きく発展させるための反応工学的見地およびスケラビリティについても検討いただきたい。

・山本チーム：空間局在・分子超潤滑に基づく時空間空隙設計と高機能表示材料創生

本研究課題は、液晶材料界面を「分子超潤滑」する原理を確立し、液晶表示材料の高速応答性と超低電圧駆動の両立を目指すものである。実現すれば、既存の物質設計原理では到達できなかった物性の設計、特に「液晶」材料において近未来の情報表示機器への多様な応用が期待できる。



自己組織化スリッパリー界面の原理

[研究経過と所見]

日本がかつて世界を席卷した液晶表示材料の研究課題として、その復活に向けた技術課題を系統的に分類整理し、ナノ液晶によるスリッパリー現象を高速・低エネルギー消費作動の液晶材料実現に応用する研究諸課題に取り組んでおり、ほぼ予定通り進展している点は評価できる。研究課題が多層構造、多重構造であるため、研究の進捗が見えにくい部分もあるが、本課題領域での成果の発信はステルス性が要求されるべきであり、研究目標地点近くまで到達した時点で初めて開示されるようなものと考えており、完成度の高い学術論文が本研究課題の成果物として発表されることを期待している。

一方、その液晶材料構造の複雑性については参画企業と協議し、知財戦略的な立場から十分協議し対策を練っていただきたい。一つ一つの素材が新規材料ではないので、コンセプト、機能の知財化方針がポイントになると認識している。アカデミアとしてどこまでの技術を提案すれば社会実装に繋がる道が開けるかについても考察し、実践いただきたい。

③ 平成 27 年度採択課題 ※ 中間評価は未実施

・ 櫻井チーム：単分散プラトニックミセルを利用した細胞標的型 DDS の基盤構築

[研究課題の概要]

本研究課題は、プラトンの正多面体（会合数：2、6、8、12、20）のミセルを作る化合物の発見をさらに展開して、特定の細胞に到達する DDS の技術構築（ペプチド医薬を内包する粒子の分子設計）を目指すものです。実現すれば、細胞が好む大きさと形だけの粒子を作り、今までより遥かに効率的に、薬剤の送達が可能となります。

[研究経過と所見]

研究の進展により、ほぼ単分散と思われるプラトニックミセル形成の必然性、そのミセル形成メカニズムの実験的な確認、加えて、動力学的シミュレーションによる検証など、課題目標達成に繋がる事実が明らかになってきたと思う。これまで考えられていたミセル形成メカニズムでは説明できない現象が合理的に説明できる点、およびその優れた単分散性の実現という点で科学的な価値は高いと考えている。一方、現状においてはミセルの構成因子が限定的であるため、より適用範囲の拡大可能性についての検討等により、プ

ラトニックミセル形成の科学をひとつの学術領域に発展させることができるよう積極的な論文投稿、学会発表を期待したい。

ひとつの応用形態としてドラッグデリバリーシステムとして薬剤の単分散化にも取り組んでいるが、長い研究期間を必要とする研究課題であることを考慮すると、社会実装時を意識した実質的に有為な知財権の確保・維持を民間企業との連携により実施していただきたい。

・高田チーム：緩やかな束縛反応場を活用する高分子の連続改変系の構築と革新的機能化

[研究課題の概要]

本研究課題は、緩やかな束縛系を活用する内包型反応場による高分子構造改変の技術基盤の構築を目標とし、従来高分子反応や重合反応では合成できない新高分子、有用な高機能高分子の創製を目指します。学術と産業の両者に大きなインパクトを与えることが期待されます。

[研究経過と所見]

汎用ポリマーを基質としたポスト合成（触媒反応）による高機能化を可能にすると思われるコンセプトであり、将来大きな産業技術に発展する可能性がある。利用可能な環状触媒の複数の絞り込み、その触媒の適用範囲の拡大・限界について具体的な重合反応及び反応の動力学的シミュレーションの両面から検討が進んでいる。まだ適用範囲は限定的ではあるが、コンセプトが実践的なものであるという幾つかの事例が見え始めている。基質として高分子、オリゴマーおよび低分子を対象にしており、学術領域としての基盤構築の戦略としては妥当であると思われる。

さらに、本コンセプトの産業的価値を早い時期に実証することによって、より学術領域として発展する可能性が高まると考えている。その意味では、特に有望な反応系を特定し、民間企業との協力によって研究開発を推進し、具体的なポリマーとしての性能・物性評価、および有為な知財権の確保に努めていただきたい。

・一杉チーム：界面超空間制御による超高効率電子デバイスの創製

[研究課題の概要]

本研究課題は、新たに見いだした固体電解質を用いた新型不揮発性メモリーの動作原理の解明と実用化に向けた低消費電力化を実現するものです。その研究過程は、「マクロな電気化学の理論体系がナノ領域の極限で適用できるのか」を探る研究と一致することから、界面超空間を対象に、量子力学に基づく原子レベル固体電気化学の体系化を目指します。

[研究経過と所見]

本研究領域では無機材料を原子レベルで精密設計するという上位概念を、高度に洗練された真空蒸着法を駆使し、特に薄膜系二次電池、記憶材料を具体的なターゲットとして

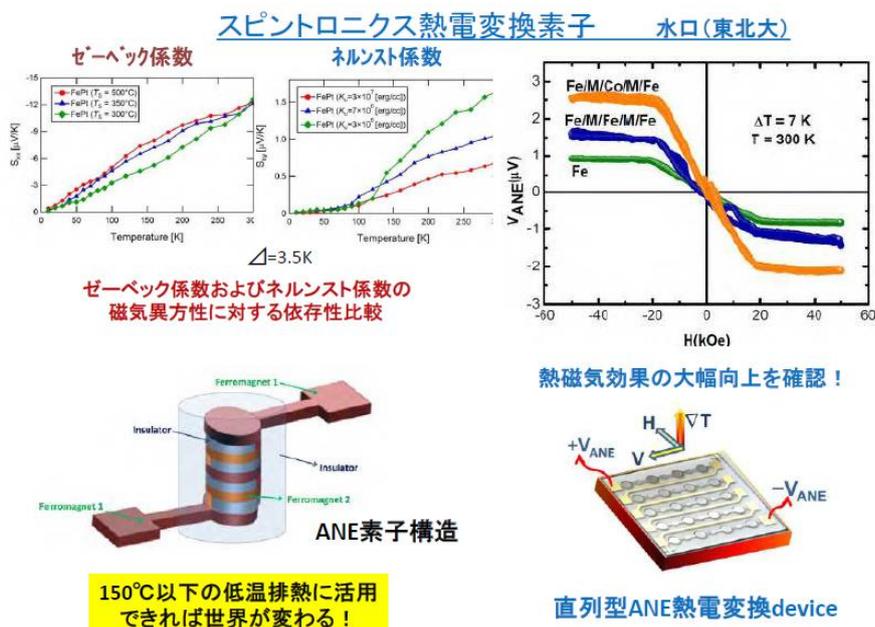
研究に取り組んでいる。二次電池において原子レベルで無欠陥に近い構造に由来する優れた特性を確認できたことは“量子力学に基づく原子レベル固体電気化学”という基本コンセプトの価値を実証したという意味で価値が高いと考えている。研究成果については論文投稿、学会発表を通じて学術領域としての基盤構築に努めていただきたい。

東北大から東工大への研究室の移動に加え、新たなスパッター装置の導入等に時間を要したが、環境整備もほぼ目処が立ち、今後の研究加速を期待している。また研究課題は産業的にもホットな領域であることから、共同研究や意見交換を実施している企業との連携を最大限利用して有為な知財権を確保していただきたい。

・水口チーム：ナノ超空間を利用した熱・スピン・電界交差相関による高効率エネルギー変換材料の創製

[研究課題の概要]

本研究課題は、ナノメートルスケールのドット・ワイヤ・空隙を有機的に組み合わせた超空間構造を設計することにより、熱・スピン・電界などの交差相関現象を基軸とした高効率エネルギー変換材料の創製を目指すものです。既存材料の置き換えと同時に、学理構築とエネルギー問題の解決手段の獲得が実現します。



[研究経過と所見]

スピントロニクス熱電変換は、従来のゼーベック効果型の熱電変換とは異なる概念であり、性能指標、評価手法について自らが設定する必要があるように思われるが、まだ研究の途上であるため今後の検討を期待したい。構造設計・性能向上の可能性を実験的にいくつか提示できており、短期間の成果として十分評価できる。領域内外の研究チームでもスピンゼーベックを検討しており、協奏体制を上手に作っていただきたい。

一方、研究グループでの役割分担を明確にして、それぞれの専門領域を活かした協調体制について工夫を加えていただきたい。この研究分野は世界的に注目度が高まっており、知財的価値の獲得と科学的成果の発信のバランスを考慮しつつ、十分な知財戦略(構造+製造技術+etc.)を構築の上研究を進めていただきたい。

(2) 各チームの研究成果の国際的水準及び領域全体としての国際的水準

研究成果として、国際論文誌への掲載が 384 件（1 期：113 件、2 期：175 件、3 期：96 件）、国際会議での招待講演数が 267 件（国内は 256 件）に達しており、国際的な水準は高いと思われる。質の高い論文誌での発表は（2017 年 11 月時点）、Nature 系姉妹誌が 10 件、J. Am. Chem. Soc. が 11 件、Angew. Chem. Int. Ed. が 12 件にのぼり、研究の質の高さを表している。

(3) 科学技術イノベーションに寄与する成果の見通し

① 特許出願実績

出願は 2017 年 11 月時点で 47 件（国内 42 件、国際 5 件）であり、出口に近い研究課題から比較的多くの出願がなされている（関根 T:13 件、野崎 T:9 件、手嶋 T, 山本 T, 植村 T:5 件）。ただ、現状では国際出願の比率がまだ低く、今後、特許戦略に応じてその比率を高めていきたいと考えている。

また、領域会議、サイトビジット等において特許出願を含めた成果発信の可能性についても検討しており、論文投稿、特許出願、ノウハウ蓄積のそれぞれにおいて適切なアクションが取れるように指導している。

② 産業界との連携（※社名については非公開）

JST 新技術説明会、JST フェア、ナノテク展などでの研究課題 PR、産業界との共同研究を通して、社会実装を目標とした実用的評価、データ収集を積極的に行っている。各チームの共同研究状況（終了含む）を以下に記載する。

【植村チーム】6 社

- 重合制御：2 社
- フィルター開発：1 社
- ポリマーアロイ：1 社
- MOF 材料開発：1 社
- カーボン材料：1 社

【手嶋チーム】16 社

- LIB 安全性向上：5 社
- 高エネルギー密度化、高出力化：2 社
- 正極結晶材料開発：4 社
- 固体電解質開発：2 社
- ベンチャー設立への初動：地域イノベ・エコシステム採択（2017～2021 終了予定）
- 単粒子測定に関する共同研究：2 社
- 質量分析装置内電流電圧印加測定機構開発：1 社

○CREST での連携：2 社

【野崎チーム】1 社

○CREST での連携：日本ポリケム

【松方チーム】6 社

○Silicalite-1 膜：石油エネルギー技術センター(JPEC)

○ガス分離性能評価：NEDO エネルギー環境先導プログラム

○脱水膜反応器への応用：NEDO エネルギー環境先導プログラム

○メタノール合成用膜反応器開発：NEDO 二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス
技術開発

○Ag-FAU 膜：プロピレン精留塔代替膜分離プロセス (A 社)

○Cs - BEA 膜：化学品製造プロセスへの膜導入の検討 (B 社)

○Na-ZSM-5 膜：化学品製造プロセスへの膜導入の検討 (C 社)

○Si-CHA 膜：炭化水素脱水素メンブレンリアクター開発 (D 社)

○CREST での連携：ノリタケ、三菱ケミカル

【陰山チーム】6 社

○複合アニオン系：民間企業 A、B アドバイザ契約

○酸水素化物：民間研究所 C 共同研究

○触媒研究：民間企業 D 共同研究開始予定

○太陽電池：民間企業 E 共同研究中

○光触媒：民間企業 F 共同研究

【関根チーム】3 社

○CREST での連携：日本触媒、三菱ケミカル、旭化成

【加藤チーム】1 社

○CREST での連携：東レ

【山本チーム】2 社

○CREST での連携：DIC、シャープ

【高田チーム】1 社

○CREST での連携：帝人

(4)国内外での受賞、報道など

①主な顕彰・受賞

- ・植村卓史：日本学術振興会賞 日本学術振興会 2016年2月
- ・手嶋勝弥/是津信行：ACS OMEGA Award アメリカ化学会 2017年8月
- ・手嶋勝弥：Selected Highly Prolific Authors アメリカ化学会 2017年7月
- ・野崎京子：Casey Lectureship University of Wisconsin 2014年2月
- ・野崎京子：Tarrented Lecturer of Organic Chemistry Univ. of Florida 2015年3月
- ・野崎京子：Arthur K. Doolittle Award アメリカ化学会 2015年
- ・伊藤慎庫：Polymer Journal 論文賞（日本ゼオン賞） 高分子学会 2016年5月
- ・伊藤慎庫：日本化学会進歩賞 日本化学会 2017年3月
- ・宮原稔：化学工学会研究賞（内藤雅喜記念賞） 化学工学会 2014年3月
- ・陰山洋：第34回日本化学会学術賞 日本化学会 2017年3月
- ・加藤隆史：第69回日本化学会賞 日本化学会 2017年3月
- ・稲垣怜史：平成27年度奨励賞 触媒学会 2016年3月
- ・西川元也：第17回永井賞 日本DDS学会 2017年7月
- ・高田十志和：日本化学会賞 日本化学会 2017年3月
- ・南谷英美：若手奨励賞 日本物理学会 2017年3月

②報道、プレスリリース

数多くの新聞・雑誌、TV等で研究成果が報道された。研究機関と科学技術振興機構との共同プレス発表を以下に記載する。

【植村チーム】

○平成27年7月1日：京都大学／科学技術振興機構

混ざり合わないポリマーを完全に混ぜる手法を開発—プラスチックの持つ機能を飛躍的に向上—

【陰山チーム】

○平成27年10月20日：京都大学／科学技術振興機構

“活性水素”を利用した新しい酸窒素化物の合成法の開発

○平成29年10月31日：京都大学／科学技術振興機構

負電荷をもつ水素の新たな性質を発見～圧縮しやすく、金属原子間の相互作用をブロック～

【関根チーム】

○平成29年6月7日：早稲田大学／株式会社日本触媒／科学技術振興機構

再生可能エネルギー等を利用して、ほしいときにほしだけ低温小型でオンデマンドに駆動するアンモニア合成プロセスを開発

○平成29年6月7日：横浜国立大学／産業技術総合研究所／科学技術振興機構

新規な骨格構造を持つゼオライトの合成に成功～高選択的触媒機能と反応活性点の自在制御～

【一杉チーム】

○平成 29 年 2 月 9 日：京都大学／東北大学／東京工業大学／科学技術振興機構

数理的フレームワークにより微小電線の形成過程を再現—ナノエレクトロニクスへの応用に期待—

○平成 29 年 6 月 30 日：東北大学／東京工業大学／東京大学

スピネル型酸化物材料の原子観察に成功—超伝導材料やリチウムイオン電池の高性能化に向けて大きな一歩—

7. 総合所見

* 研究領域としての研究成果の見通し

一期採択では出口をかなり意識し、二期採択では出口意識と科学的な新規性・独創性のバランスを重視し（1対1）、三期採択では、科学的に興味深いもの、長期的に新産業創造につながる課題、といった方針で採択したが、多くの課題で民間企業との共同研究を積極的に推奨したことが機能して、いくつかの課題については科学から技術への移行が進みつつある、或いは、見え始めていると認識している。

また当初は予想していなかった新しい発見（8員環と12員環の3次元ゼオライト、新しい光半導体の発見とその概念の拡張等）もあり、科学の深耕、新学術領域の創出という意味でも成果になりつつあると考えている。

* 研究領域のマネジメントについて

研究代表者から月報を提出いただき、研究の進捗を積極的に把握している。特に興味深い進捗、成果については、特許出願やプレス発表等について適宜対応しているが、民間企業との共同研究を推奨したことで、民間企業における技術詳細など一部の情報が取得しにくい状況があるのは今後の課題点であろう。一方、NEDO等への技術移管も心がけているが定期的な実施など今後の課題である。

* 本研究領域を設定したことの意義

ナノテクノロジーは新産業創出の有望な手段であるということを、“超空間制御”という言葉で表現し、研究課題を募集した。その際に民間企業との共同研究を推奨したことにより、アカデミアの研究で散見される自己主張的な将来事業ではなく、真に未来社会が求める研究課題について、現実的に要求される多くのハードルの理解、気づき等を研究代表者、研究参加者が体験できたことは意義深いことであると思う。他のCRESTと比較してこの色合いが強いのと思っているが、多くの研究領域が立ち上がっているのです。このような領域が一部にあっても良いと考えている。また研究代表者の中には、新学術領域を運営する、今後そのような展開に繋がる可能性の高い研究の芽も出てきており、研究領域全体として考えると科学と技術が良くバランスできていると考えている。

* 今後への期待や展望

開発ステージに移行して良いと思われる研究課題が複数出始めている。NEDO等への研究成果の切り出し・移行、民間企業との共同開発の加速については極めて重要であることと理解しており、研究総括である私自身も心がけたいが、JSTとしてもそのような仕組みを期待したい。特に長期的な観点で維持・発展すべき技術をどのような仕組みで運営するかについては、JSTの産学連携事業など他事業との連携にも期待したい。

***感想、その他**

民間企業の研究者を PO にする事例をもう少し増やすと良いと考える。上述のように成果の出たものをどのように発展させるか (Science としての学術領域、Technology としての新産業創出) について、横断的な仕組みが必要であると思う。CREST の PO はとても面白いと個人的には思っており、新しい Science を目の当たりにする楽しさとそれが何に使えるかという想像は極めて魅力的な作業である。

以上