

戦略的創造研究推進事業
— 個人型研究(さきがけ) —

研究領域「新物質科学と元素戦略」

研究領域事後評価用資料

研究総括: 細野秀雄

2017年2月

目 次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	5
(3) 研究総括	5
(4) 採択研究課題・研究費.....	6
2. 研究領域および研究総括の選定について.....	9
3. 研究総括のねらい	10
4. 研究課題の選考について	10
5. 領域アドバイザーについて	11
6. 研究領域の運営の状況について.....	13
7. 研究領域のねらいに対する成果の達成状況.....	15
8. 総合所見	18

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「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」

① 具体的な達成目標・本戦略の具体的な内容

2007年度より文部科学省が実施している元素戦略プロジェクトは、「物質・材料の特性・機能を定める特定元素の役割を理解し有効利用するという観点から従来の材料研究を再構成し、希少元素・有害元素の代替、戦略的利用のための技術基盤を確立する」ことを目的としている。プロジェクト開始から3年が経過し、順調に成果が得られつつある。上記のような元素戦略の目的に資する研究開発のアプローチとしては、大きく分けて以下のようなパターンが考えられる。

- (i) 代替型：目的機能を有する材料が既に存在しているが、希少・有害元素を含むため、経験的に同等の特性が得られると推定されるユビキタス元素を用いて目的材料を得ようとする開発。
- (ii) 改良型：既にユビキタス元素を活用、もしくは希少・有害元素を削減してある程度の目的機能が得られている材料に着目してその機能の発現原理を追求し、製造プロセス等を最適化してより高い機能を有した材料を得ようとする開発。
- (iii) 創成型：着手前に目的機能を発現させるナノスケールの構造要素（原子配列、磁区構造、分子構造等）が予備的に検討されており、研究開発段階で、その物質構造を材料に持たせることによって目的機能を発現させる開発。

上記の(i)のケースでは、代替元素の選択肢が限られており、希少元素等を含む既存の材料の機能を超えられない場合が多い。(ii)のケースでは、既存の材料の機能発現原理が判明したとしても、その原理の範囲内で動かせる条件には限りがあるため、大幅な機能の向上が難しい。それに対し、(iii)の「創成型」のケースでは、目的とする機能の発現原理の本質を抉り出し、それを実現するためのアプローチを開発するため、既存の機能元素にとらわれることなく目標に到達できる可能性が高く、近年期待が高まっているところである。

本戦略目標は、「希少元素・有害元素の代替、戦略的利用のための技術基盤を確立する」という目標達成に向け、目的とする材料機能の発現原理を検証・把握し、ナノスケールの物質構造（原子配列、磁区構造、分子構造等）を制御することによって、単なる「希少元素・有害元素の代替」にとどまらない、「革新的機能材料」の創成を目指すものである。

本戦略目標においては、以下のように研究開発を進めていくことが想定される。

- 1) 目的とする材料機能（例：磁性、触媒機能、強度・靱性、耐食性等）を設定し、それを実現するための発現原理を、微視的観点で検討する。

- 2) その発現原理を具現化するためのナノスケールの物質構造（例：原子配列、格子欠陥状態、結晶粒、磁区構造、分子構造、表面・界面構造等）をデザインする。
- 3) デザインされたナノスケール構造を有する材料を創成し、その機能の発現を確認・検証する。
- 4) 目的とした機能に達しない場合、その原因を考察して発現原理の再検討（詳細検討）を行う。以後、2)へ立ち返り、最終目的とする材料創成を目指す。

上述のようなナノスケール物質構造制御に基づいた本戦略目標から想定される成果の例としては、

- ・次世代自動車を支える高保磁力・高磁束密度を発揮するジスプロシウム／ネオジム完全フリー高性能磁性材料、貴金属完全フリー触媒、ユビキタス元素による二次電池等
- ・次世代電子機器に資するレアメタルフリー不揮発性メモリー等
- ・エネルギーの回収・再生に資する有害元素フリー高効率熱電変換材料等
- ・来たる水素社会に資するユビキタス元素しか用いない水素貯蔵材料等
- ・構造物のメンテナンスフリー、安全性、加工等に資する各種高性能材料（ニッケルフリー表面改質型耐食材料、ユビキタス元素による耐熱構造材料、タングステン／コバルトによらない新超硬材料等）

等が考えられる。

② 政策上の位置づけおよび社会経済上の要請

本戦略目標は、第3期科学技術基本計画の重点推進4分野の1つであるナノテクノロジー・材料分野における「True Nano」に相当する、革新的材料開発を伴わなければ解決困難な課題と国際競争の優位を確保するための課題の解決を目指すもので、同分野の戦略重点科学技術として挙げられている「資源問題解決の決定打となる希少資源・不足資源代替材料革新技術」につながる重要施策である。資源が少ない我が国が直面する資源問題という大きな課題の抜本的解決策として、社会・産業からの要請も強い。加えて、本戦略目標が目指す希少元素の代替・戦略的利用については、革新的技術戦略において「レアメタル代替材料・回収技術」として革新的技術に選定されている。さらに本戦略目標は、「新成長戦略（基本方針）」（2009年12月30日閣議決定）の「（1）グリーン・イノベーションによる環境・エネルギー大国戦略」に掲げられた「レアメタル、レアアース等の代替材料などの技術開発」に資するものである。

なお、本戦略目標は、「物質・材料の特性・機能を決める特定元素の役割を理解し有効利用するという観点から従来の材料研究を再構成し、希少元素・有害元素の代替、戦略的利用のための技術基盤を確立する」という目標達成に向け、革新的材料の創成というアプローチを採るものであり、前出の第3期科学技術基本計画の重点4分野のナノテクノロジー・材料分野における以下の戦略重点科学技術にもつながる可能性を有する。

- ・クリーンなエネルギーの飛躍的なコスト削減を可能とする革新的材料技術

- ・ イノベーション創生の中核となる革新的材料技術
- ・ 生活の安全・安心を支える革新的ナノテクノロジー・材料技術

③ 本研究事業の位置づけ、他の関連施策との切り分け、政策効果の違い

本戦略目標は、ナノテクノロジー・材料分野における施策の中核の一つを担う。希少元素・有害元素をユビキタス元素で置き換えるという施策としては、2007年度より実施されている文部科学省の「元素戦略プロジェクト」及び経済産業省の「希少金属代替材料開発プロジェクト」がある。前者の文部科学省の「元素戦略プロジェクト」は、「物質・材料の特性・機能を決める特定元素の役割を理解し有効利用するという観点から従来の材料研究を再構成し、希少元素・有害元素の代替、戦略的利用のための技術基盤を確立する」ことを目標とした施策である。本事業では、産官学の連携による提案を義務づけ、基礎から実用化につなげる課題を精選して推進している。後者の経済産業省の「希少金属代替材料開発プロジェクト」は、「非鉄金属資源の代替材料及び使用量低減技術の確立」を目的として、特に、緊急な対応が求められる元素に絞って現実的な削減目標を設定し、集中的な研究開発を進めるものである。これまで、元素種として In、Dy、W、Pt、Eu、Tb、Ce を特定した材料開発を推進している。これら2つのプロジェクトは、主として既存の材料を活用した「代替型」及び「改良型」アプローチにより、希少元素・有害元素の代替材料研究開発を行うものである。

それに対し本戦略目標は、前出の「元素戦略プロジェクト」との共通目標達成に向け、目標とする材料機能を発現させるナノスケール物質構造（原子配列、磁区構造、分子構造等）を材料に持たせることによって革新的機能材料の創成を狙う「創成型」という新しいアプローチにより研究開発を行うものである。このようなナノスケールの物質構造の制御という視点に立った材料機能創成の必要性については、元素戦略／希少金属代替材料開発シンポジウム等でも提言されているところである。

④ 将来実現しうる成果等のイメージ

ナノテクノロジーは、科学技術の新しい世界を切り拓き、産業競争力の強化や新産業の創出に結びつく技術である。第3期科学技術基本計画の分野別推進戦略では、ナノ領域で初めて発現する特有の現象・特性を活かすナノテクノロジーの中で、特に従来の延長線上ではない不連続な進歩が期待される創造的な研究開発、大きな産業応用が見通せる研究開発を「True Nano」と定義している。本戦略目標は、ナノスケールの物質構造デザインによって革新的な高機能を作り出し、既存の物質・材料やありふれた元素に旧来考えられなかったような新しい特性を発揮させるとともに、眠っている未知の機能を引き出すこと等を行おうとするものである。すなわち、天然資源に乏しい我が国が、これまで要素的に蓄積されてきたナノテクノロジー・材料科学技術の成果に立脚し、ユビキタス元素を巧みに駆使することで有用機能を実現し、重要な社会的課題の解決を目指すものであり、いわば我

が国のナノテクの真価を具体的に問うものと位置づけられる。したがって本戦略目標は「True Nano」の実践を明確に視野に入れたものであり、特定の材料や元素に固有であると経験的に考えられてきた機能を、固定観念にとらわれず、材料・物質の様々な形態を駆使して新しい機能を見いだす研究開発を促す、ナノテクノロジー・材料分野の根幹を支える緊急性の高いものである。

⑤ 科学的裏付け

(i) 関連研究例

近年、目標とする材料機能の発現原理となるナノスケールの物質構造の制御という視点に立った材料開発の例が見られるようになり、期待が高まっている。その典型的な開発例として、透明電極材料や鉄系超伝導材料等が挙げられる。前者は、典型的なセメント成分である $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ がその結晶構造中に持つ直径 0.5 ナノメートルのカゴの中にある酸素イオンを電子で置き換えることにより、金属と同じような高い電気伝導性を付与することに成功したものである。後者は、電気絶縁性の層 (LaO 層) と金属的伝導を示す層 (FeAs 層) からなり従来は超伝導性を示さなかった層状化合物 (LaOFeAs) において、絶縁性層である LaO を構成する酸素イオン (O) の格子サイトにフッ化物イオン (F) をあてることで超伝導を付与したものである。いずれも、ナノスケールでの構造制御を行い、材料に対して全く新しい機能が付与されたものである。

一方、「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 2009 年版」(JST 研究開発戦略センター)によれば、本戦略目標において取り組むナノスケールの物質構造制御に関連する研究開発としては、上記の例のほか、スピントロニクス材料を中心とした磁性材料の開発等が挙げられ、これらの分野は日本が世界の先端を進んでいるとしている。

(ii) 本研究分野の発展の可能性

文部科学省が開催する「元素戦略検討会」や、JST 研究開発戦略センターにおける新材料設計探索ワークショップ等において研究開発のコンセプト、取り組むべき課題の議論がなされており、研究者コミュニティに対する働きかけも行われた。それに応える形で、日本化学会、セラミクス協会、日本金属学会、日本鉄鋼協会、材料戦略委員会、応用物理学会等の学協会が、研究シーズの大規模な自発的調査やシンポジウム等を開催し、大きな議論が始まっている。産業界に対して優れた材料の提案が多くなされ、本研究分野が大きく発展することが見込まれる。

(2) 研究領域

「新物質科学と元素戦略」(2010 年度発足)

物質の機能は、それを構成する元素と不可分な関係にあることが知られている。しかし、元素の数は 100 あまりに過ぎず、そのうち実際に材料に使えるものは、資源や毒性などの制約のために、数が限定されてきている。よって、社会を支え要求に応える材料を産み出すためには、これまでの各元素に対するイメージを刷新し、新しい可能性を切り開く成果が研究者に求められている。物質・材料分野の飛躍的進展には、ナノ領域の科学と技術の開拓が不可欠であるとの共通の認識から、世界各国でその研究が重点的に行われてきている。

これからは、その基盤の上に各国の特質を反映した施策が実行される時期である。「元素戦略」は、天然資源に乏しい我が国が世界に先駆けて開始した研究施策のひとつで、これまで希少な元素を駆使して実現してきた有用な機能を、できるだけありふれた元素群から知恵を絞って実現しようというものである。これは学術的には、持続可能な社会のための新しい物質科学を確立することを意味する。

本研究領域は、資源、環境、エネルギー問題などを解決するグリーン・イノベーションに資するべく、クラーク数上位の元素を駆使して、ナノ構造や界面・表面、欠陥などの制御と活用による革新的な機能物質や材料の創成と計算科学や先端計測に立脚した新しい物質・材料科学の確立を目指す。

(3) 研究総括

細野秀雄 (東京工業大学元素戦略研究センター長、科学技術創成研究院 教授)

(4) 採択研究課題・研究費

(百万円)

(2016年11月30日現在)

採択年度	研究者	所属・役職 上段：領域終了時 下段：応募時	研究課題	研究費 *
2010年度	阿部英樹	国立研究開発法人 物質・材料研究機構エネルギー・環境材料研究拠点 水素製造材料グループ 主幹研究員	金属間化合物を活性点とする貴金属フリー排ガス清浄化触媒の開発	34
		物質・材料研究機構 主任研究員		
	有田亮太郎	理化学研究所 創発物性科学研究センター チームリーダー	非バルク的環境を活用した次世代材料の理論設計	40
		東京大学 准教授		
	上野和紀	東京大学総合文化研究科 准教授	希少元素を含まない新規超伝導体の電場誘起キャリアドーピング法による開発	40
		東北大学 助教		
	梅澤直人	物質・材料研究機構 独立研究者	ユビキタス元素を用いた高活性光触媒の開発	39
		同上 主任研究員		
	遠藤恆平	東京理科大学理学部第一部化学科 准教授	有機化学による擬元素創製へのアプローチ	58
		早稲田大学助教		
	小西玄一	東京工業大学物質理工学院 准教授	新しい電子移動パラダイムに基づく有機触媒の創製	38
		東京工業大学 准教授		
佐藤和則	大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 准教授	ナノスピノダル分解による高効率太陽電池材料の設計	15	
	大阪大学 特任准教授			
中村芳明	大阪大学大学院基礎工学研究科 教授	ユビキタス元素を用いた高性能熱電変換ナノ材料の創成	40	
	大阪大学 准教授			
一杉太郎	東京工業大学物質理工学院 教授	酸化物エレクトロニクスのパラダイムシフトを目指したアトムエンジニアリング	38	
	東北大学 准教授			
水口将輝	東北大学金属材料研究所 准教授	ナノ自己組織化を用いたスピン注入型超高効率熱電素子の開発	40	
	同上			

2010 年度	守谷 誠	静岡大学大学院理学研究科 講師	イオン伝導パスを有する分子結 晶電解質の創製	39
		名古屋大学 助教		
2010 年度	山田幾也	大阪府立大学 21世紀科学研究機構 ナノ科学・材料研究センター 特別 講師	新規異常高原子価物質における 革新的機能の開発	42
		愛媛大学 助教		
2011 年度	石坂香子	東京大学大学院工学研究科 准教授	酸化物半導体表面における新機 能の探索	40
		同上		
	竹内恒博	学校法人トヨタ学園豊田工業大学 大学院工学研究科極限材料専攻 教 授 (博士課程主担当教授)	フェルミ準位近傍の微細電子構 造と特徴的フォノン分散を利用 した環境調和型熱電材料と機能 性電子材料の創製	91
		名古屋大学 准教授名古屋大学エコ トピア科学研究所 准教授		
	辻 勇人	神奈川大学理学部化学科 教授	有機エレクトロニクス革新に 資するユビキタス有機材料の開 発	39
		東京大学 准教授		
	中野秀之	豊田中央研究所機能性Si低次元材料 プログラム プログラムマネジャー	遷移金属フリーのアニオン二次 電池の開発	38
		豊田中央研究所無機材料研究部 主 任研究員		
	西山宣正	東京工業大学科学技術研究創成院 WRHI (World Research High Initiative) 特任准教授	SiO ₂ ナノ多結晶体: 超高靱性高硬 度を有する新材料の開発	40
		愛媛大学 准教授		
野呂真一郎	北海道大学電子科学研究所 准教授	「フェイク分子」法による多孔性 金属錯体空間の超精密ポテンシ ヤル制御とオンデマンド二酸化 炭素分離機能発現	38	
	同上			
畠山琢次	関西学院大学理工学部 准教授	次世代半導体材料を目指した螺 旋π共役分子の創製	39	
	京都大学 助教			
藤田武志	東北大学 原子分子材料科学高等研 究機構 准教授	ユビキタス元素を用いた革新的 ナノポーラス複合材料とデバイ	40	

2011 年度		同上	スの創成	
	堀毛悟史	京都大学大学院工学研究科 合成・生物化学専攻 助教	固体イオニクス未開領域を拓く 錯体集積体の創出	40
		京都大学 助教		
	松尾 司	近畿大学理工学部 准教授	低配位汎用元素を鍵とする機能 性物質科学の開拓	40
		理化学研究所 副ユニットリーダー		
薬師寺 啓	産業技術総合研究所ナノスピエレ クトロニクス研究センター 研究チ ーム長	単原子層デザインによる希少金 属フリー超高磁気異方性薄膜の 開発	39	
	同 主任研究員			
山本明保	東京農工大学大学院グローバルイ ノベーション研究院テニュアトラック 推進機構 (兼) 大学院工学研究院先 端物理工学部門 特任准教授	粒界エンジニアリングで創る超 高保磁力ユビキタス磁石	40	
	東京大学 助教			
2012 年度	梅津理恵	東北大学金属材料研究所 准教授	新規高スピン偏極材料の探索と 原子配列制御に伴う電子状態と 物性変化	40
		東北大学 助教		
	岡田純平	東北大学金属材料研究所 准教授	超過冷却液体を用いたナノスケ ール複合材料の創製	40
		宇宙航空開発研究機構 助教		
	亀川厚則	室蘭工業大学環境調和材料工学研究 センター 教授 室蘭工業大学環境 調和材料工学研究センター 教授	革新的磁石材料の為の超高压合 成法による新規磁性化合物の探 索	40
		東北大学 准教授		
	紅林秀和	University College London, London Centre for Nanotechnology (LCN), Department of Electronic & Electric Engineering, Group Leader (LCN) / Lecturer (Dpt. of EEE)	界面電子軌道混成を利用した新 物質創生と超省電力磁化反転技 術の開発	48
		ケンブリッジ大学 博士研究員		
小林玄器	自然科学研究機構分子科学研究所協 奏分子システム研究センター 特任 准教授	ヒドリド酸化物の直接合成によ る新規機能性材料の探索	40	
	神奈川大学 助手			
近藤剛弘	筑波大学数理物質系 准教授	グラファイトの電子状態制御に	40	

2012 年度		筑波大学 講師	よる新規触媒の創成	
	関真一郎	理化学研究所創発物性科学研究センター ユニットリーダー	磁気バブルメモリの刷新に向けた、スキルミオンの結晶学と電磁気学の構築	40
		東京大学 助教		
	塚崎 敦	東北大学金属材料研究所 教授	自発分極変調を機軸とする物質探索と機能開発	42
		東京大学 特任講師		
	中辻 知	東京大学物性研究所 教授	スピンのナノ立体構造制御による革新的電子機能物質の創製	45
		東京大学 准教授		
	宮内雅浩	東京工業大学物質理工学院 教授	ユビキタス量子ドットの創製と光エネルギー変換材料への展開	40
東京工業大学 准教授				
			総研究費	1,402

2. 研究領域および研究総括の選定について

本研究領域は、資源・エネルギー・環境問題に対して、資源小国である日本が持続可能社会を実現させるための新たな物質・材料科学を構築することを目的として、既存の物質・材料の特性を新しい切り口で捉え直し、構造をデザインすることで、ユビキタス元素に由来考えられなかった新しい特性を発揮させることや、眠っている未知の機能を引き出すための基礎研究を推進するものであり、独創的なアイデアを持った個人研究者の、飛躍的あるいは挑戦的な発想によって、新しい機能を持った革新的材料を創成することが期待される。また、「革新的機能材料の創出」といった共通目標に向け、多分野にまたがる個人研究者間の交流を深め、互いに切磋琢磨していくことで、新しい物質・材料科学を開拓するための新しい研究者コミュニティを形成することが見込まれるため、さきがけとして選定することが適切である。

以上の通り、革新的機能材料の創成に結びつく新しいアプローチの開発および革新的機能材料の創出を目指して相乗的な研究を推進していくことが期待される。また異分野間の分野融合と知識融合による研究を推進していくことで、新しい材料を合理的に設計・探索する研究開発手法のパラダイムを創出し、物質・材料科学にブレークスルーを起こすことが期待される。従って、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。

対象となりうる研究分野は、化学、物理、工学、材料科学、計測技術等、多岐にわたり、「元素戦略に資する革新的機能材料の創成」を共通目標とした独創的かつ挑戦的な研究提案が多数見込まれる。

細野秀雄氏は、透明酸化物半導体、無機光材料・ナノポーラス機能材料などの分野で世

界をリードする研究者である。透明アモルファス酸化物半導体 (TAOS) の創始やありふれた酸化物 $C_{12}A_7$ ($12CaO \cdot 7Al_2O_3$) を舞台とした新しい電子機能の開拓、鉄系高温超伝導物質の発見、など酸化物をベースとした革新的機能材料の創出において、数々の優れた研究業績を有し、紫綬褒章を始め多くの受賞歴があり、また「超伝導物質」の論文では科学雑誌「サイエンス」で「2008年ブレークスルー オブ ザ イヤー」に選ばれ、論文引用数でも世界一を記録している。このように、元素の根本に立ち返って新規機能を創成する研究において、数多くの実績があることより、本研究領域について、必要な先見性および洞察力を十分に有していると考えられる。

これまでには、文部科学省 21 世紀 COE「産業化を目指したナノ材料開拓と人材育成」拠点リーダーや Journal of Non-Crystalline Solids の Editorial board などの要職を歴任していることから、当該分野での研究課題の効果的、効率的な推進を目指し、適切な研究マネジメントを行う経験、能力を有しており、研究についての公平な評価を行うことができると期待される。特に、文部科学省 21 世紀 COE 拠点リーダーとして若手研究者の人材育成面で積極的に取り組んでいる。

以上を総合すると、細野秀雄氏は材料科学における世界的な第一人者であり、関連分野の研究者から広く信頼されており、当分野の若手研究者をリードして世界的な研究を推進していくことができると思われるので、本さきがけ研究領域において、研究総括として適任であると考えられる。

(JST 記載)

3. 研究総括のねらい

「元素戦略」というと、希少元素の代替やリサイクルという課題を連想しやすいが、本領域は、学術のジャンプと優れた若手研究者の育成という視点から、以下のように「元素戦略」を捉えた。すなわち、従来の元素のイメージの刷新により新領域の開拓というブレークスルーを目指す。そのため、領域名称を「新物質科学と元素戦略」として、元素戦略の視点に立った物質・材料科学の領域のフロンティアの開拓を行い、そこから希少元素に頼らないで有用な材料機能の実現に繋がる成果が生まれることを狙った。

4. 研究課題の選考について

以下の基準で選考を行った。

(1) 提案内容と本領域の趣旨の整合性

どんなに研究業績が優れていても、元素戦略という視点が欠けている提案は採択しない

(2) 提案内容のオリジナリティとこれまでの実績に照らしての実現性

提案内容を裏打ちする予備的な研究成果が得られているかどうかを慎重に判断した。

(3) 本領域に採択されることでの伸びしろの大きさ

自分の構想やアイデアを強く主張できる研究者を優先した。こういう個性の強い「生意気」な研究者は、切磋琢磨の中で大きく化ける可能性が高く、かつ領域全体の活性化に繋がると判断した。

- (4) さきがけ経験者は、総合順位が採用枠の上位 1/2 以内に入った場合のみ採択。

なるべく多くの若手にチャンスを与えることを原則とし、特に優れた成果が期待できる研究者は別扱いとした。

- (5) 女性研究者については、採用枠の 1.5 倍以内の順位で、かつ全体の 20%を超えない範囲で採択する方針をとった。

毎年の採択に際しては、それまでに採用した研究者の専門（対象とする物質系と実験/理論系）が領域内でバランスが取れ、コラボレーションが上手く機能するように、これから応募して欲しい分野を募集要項に明瞭に記載するようにした。また、審査にあたっては、総括関係者は応募が禁止されているが、審査にあたる領域アドバイザーの関係者が、有形無形を問わず有利にならないように慎重に行った。

採択者の専門は、スピントロニクス、有機エレクトロニクス、機能性酸化物、触媒、計算科学、熱電材料、イオニクスと広く分布しており、特定の領域に過度に集中していない。計算科学が専門の研究者は 3 名、女性研究者は 2 名、企業の研究者は 1 名であった。物質・材料の解析（TEM, ARPES など）、高圧合成、計算科学を専門とする研究者を 3 名くらいずつ採用したので、ここがハブとなって領域内コラボレーションを推進することが可能となった。

5. 領域アドバイザーについて

領域アドバイザー名	所属	現役職	任期 / 専門分野
相田 卓三	東京大学	教授	2011 年 4 月～2016 年 3 月 高分子・超分子化学
掛下 知行	大阪大学	教授	2011 年 4 月～2016 年 3 月 金属電子物性、磁性
北川 宏	京都大学	教授	2011 年 4 月～2011 年 11 月 錯体化学、触媒
佐々木 高義	物質・材料研究機構	フェロー	2011 年 4 月～2016 年 3 月 無機材料科学、酸化物ナノシート
瀬戸山 亨	三菱化学(株)／ (株)三菱化学科学技術 研究センター	フェロー・ 執行役員／ 所長	2011 年 4 月～2016 年 3 月 触媒化学
田中 勝久	京都大学	教授	2012 年 1 月～2016 年 3 月

			無機材料科学 (磁性、アモルファス)
田中 健	東京工業大学	教授	2012年12月～2016年3月 有機合成化学
谷垣 勝己	東北大学	教授	2011年4月～2016年3月 物性物理実験、有機エレクトロニクス
玉尾 皓平	理化学研究所	教授	2011年4月～2016年3月 元素化学 (反応)
常行 真司	東京大学	教授	2011年4月～2016年3月 物性理論 (超伝導、磁性、酸化物)
中嶋 敦	慶應義塾大学	教授	2011年4月～2016年3月 クラスター化学
中山 智弘	科学技術振興機構	エキスパート	2011年4月～2016年3月 科学技術政策企画
野崎 京子	東京大学	教授	2011年4月～2016年3月 有機金属化学
真島 豊	東京工業大学	教授	2011年4月～2016年3月 ナノエレクトロニクス, プローブ顕微鏡
村井 眞二	奈良先端科学技術大学院大学	特任教授	2011年4月～2016年3月 有機触媒化学、有機反応化学
山口 周	東京大学	教授	2011年4月～2016年3月 固体イオニクス、金属電気化学
山根 久典	東北大学	教授	2011年4月～2016年3月 無機合成
若井 史博	東京工業大学	教授	2013年2月～2016年3月 構造材料、セラミックス

アドバイザーの人選は、以下の視点からおこなった。

- (1) 科学技術政策としての「元素戦略」の成り立ちを熟知し、かつ、高い見識を有している方。
- (2) 物質・材料科学の領域で、独自の視点からオリジナリティの明確な研究を推進している研究者。
- (3) 本領域がカバーする分野が広範なことから、専門性はもとより俯瞰的視点を持っていると判断した方々。
- (4) 領域発足時にお願いした方々に加え、採択したメンバーに適切なアドバイスができる

専門の近いアドバイザーがいない場合は、その都度適任者を人選し、お願いした。

6. 研究領域の運営の状況について

(1) 運営方針とマネジメント

・「改良より革新」を

これは高い目標を掲げ、それに向けてステップを踏みながら、思い切って邁進しないと、大きな成果は得られないという総括の経験に基づく。特に、30歳代にはこれまでの研究から、ジャンプを求めて格闘することを強く奨励した。成果として論文の数にこだわらず、これまでで一番いい内容の論文を出して欲しいと要求した。

・領域内コラボレーションを強力に推進

これまで所属する研究室内に活動が閉じていたメンバーが多い。また、この領域に参画しているメンバーの多様性とレベルの高さ、そしてエネルギーは凄い。そこで、各メンバーは競争相手ではなく、優れた能力を持つ同僚であることをしっかりと確識してもらい、相補的な共同研究を実施する仕組みを設けた。具体的には、領域会議の場では夕食後にランプセッションを設け、「若手研究者の自立」と並んで「コラボレーション」をテーマに領域アドバイザーの経験談を基に研究者が討議する他に、一期、二期生の数名が発起人となってインフォーマルな領域自主討論会を開催して（総括は出席しないが技術参事はコーディネーター）、コラボレーションの可能性を具体的に検討した。その結果、一期生の阿部研究者を核とする排ガス浄化触媒などのコラボレーションのテーマが動き出した。外部発表できるような成果が得られるまでには、2年近くを要したが、領域内コラボレーションがかなり活発に進んだのが、本領域の1つの特徴になっている。

(2) 研究テーマの導き方

・サイトビジットを踏まえ、テーマをよりシェープアップ

採択した研究者の現地調査を行い、そこで提案書に記載された構想について具体的に議論すると、軌道修正をした方が明らかによいと判断される場合も少なからずあった。多くの場合、提案が総花的でブレークスルーを狙うというスタイルになっていない。研究者の嗜好と性格、研究室のインフラ（設備、大学院生、上司）などを考慮し、テーマの絞り込みを提案して、本人の同意が得られた場合は、当初の研究計画を変更し、早急に軌道修正を行った。

(例) 中村研究者（1期）

鉄シリサイドの量子ドットを使った高性能熱電素子の開発を行うことになっていたが、その前段であるシリコン量子ドットの作製とその熱電特性の評価だけでも大きなテーマであると判断し、ここに集中することを進言。本人も納得し MOS プロセスを利用した独自の

方法でシリコンナノドットを作製し、アモルファスシリコンよりも低い熱伝導度をもつことを見出し、目標を達成した。この成果で学長表彰を受け、特例で教授に昇任。

- ・当初の構想だけに固執せず結果に応じてフレキシブルな対応

最初に描いた構想どおりに研究が進捗するとは限らない。研究を進めるうちに、想定外の結果に遭遇する場合も少なくない。その結果、当初のストーリーよりも発展性を含んでいそうだと判断できる場合は、領域アドバイザーの意見も参考に本人と相談し、当初の計画から変更し、新たな展開に集中するようにした。しかし、当初の提案課題への取り組みが十分でない場合は、大幅な変更は容認しなかった。

(例) 近藤研究者 (3期)

ヘテログラフェンの局所電子状態と触媒活性の検討が提案テーマであったが、遂行の過程で MgB_2 からボロフェンシートと思われる物質が得られることを発見。新規物質であり、学術・応用の両面で発展の可能性があるかと判断し、ここに集中した。尚、同氏は元のテーマの成果でも Science 誌に論文を掲載した。

(3) 人材の輩出・成長の状況

メンバーのかなりの割合(24/34)が昇進した。年齢的な要素にかなり関係していると思われるが、明らかにさきがけの成果が認められて昇任した研究者が複数名含まれる。その好例として、採択時に Cambridge 大の PD であった紅林研究者(3期生)は、2年前に University College London の電子工学科の Senior Lecturer に採用され、独立研究室を構えている。同様に採択時、愛媛大准教授だった西山研究者(2期生)は、ドイツ電子シンクロトロン施設(DESY)の高圧測定専用ビームラインの責任者として移籍し、最近 東工大科学技術創成研究院 WRHI 准教授に就任した。

教授昇格者 8 名、准教授/講師昇格者 10 名(特任准教授 3 名含む)など、昇格者総数は 34 名中の 24 名に上る。

准教授→教授 8 名

特任講師→教授 1 名

講師→准教授 1 名

助教→准教授 5 名

特任准教授→准教授 1 名

国立研究所 主任研究員准教授 1 名

助教→特任准教授 2 名

助教→講師 1 名

助教→特別講師 1 名

准教授→チームリーダー 1 名(理化学研究所)

主任研究員→主幹研究員 1 名(物質・材料研究機構)

主任研究員→プログラムマネジャー 1名（豊田中央研究所）

表彰・受賞は約 40 件を数え、その中には所属学会からの受賞に加え、日本学士院学術奨励賞、日本学術振興会賞、久保亮五記念賞、凝縮系科学賞など有力な賞が含まれ、文部科学大臣表彰若手科学者賞は 5 名を数えている。

本領域の特徴は学際テーマであることから、参画したメンバーの専門分野は極めて広範である。そして、領域内コラボレーションを強く推進したので、メンバーは新しい研究の進め方や研究費の獲得の仕方を実践的に習得できたと捉えている。その成長の一端は、後出のメンバーが研究代表者となって CREST を 4 件獲得するという形で具現化したことに現れている。

7. 研究領域のねらいに対する成果の達成状況

本領域の目的は、物質科学のフロンティアの開拓に繋がる成果と元素戦略に直接に寄与する成果を挙げることであった。この観点から成果を分析すると、各々について以下のような成果が得られたと判断している。

(1) 学術としての「新物質科学」らしい成果

計算科学、先端計測、およびスピントロニクスなどで、物質科学としてかなり、インパクトのある成果が得られていると捉えている。以下にその好例を挙げる。

- ・有田研究者（1期）による新たに開発した超伝導密度汎関数理論の適用を使って、プラズモンが媒介する超伝導体の T_c の定量的予測法の確立。2報が Phys. Rev. Lett. に掲載された。久保亮五記念賞受賞。
- ・紅林研究者（3期）のスピン軌道相互作用による電流誘起磁化制御の発現機構を電子状態レベルで解明。Nature 姉妹誌に論文が 3 報掲載。同誌の News & View でも取り上げられた。
- ・関研究者（3期）磁気スキルミオンが存在する物質の条件とその振動電場による駆動法を見出す。Phys. Rev. Lett. などに掲載され、米国物理学会（APS）のトピックスに取り上げられた。
- ・松尾研究者（2期）のケトン基の炭素の代わりにゲルマニウムをもつ「ゲルマノン」の合成に成功。Nature Chem. に掲載された論文は既に 42 回引用され、ゲルマニウムの分子化学の先駆けとなった。
- ・石坂研究者（2期）2D 物質 MoS_2 や強いスピン軌道相互作用を持つ超伝導体 PdBi_2 の電子構造を ARPES によって明らかにし、スピンバレートロンクス物質がトポロジカルなバンド構造をもつことをそれぞれ明らかにした。Nature 姉妹誌の 2 誌に掲載された。
- ・一杉研究者（1期）自作の高分解能 STEM で、 SrTiO_3 のホモエピタキシャル成長の初期過

程で、余剰な Ti 原子が最表面に浮かび上がっていくことを明らかにした。これは、ペロブスカイト酸化物の初期薄膜成長を初めての原子レベルで観測となった。ゴットフリード・ワグネル賞受賞。

(2) 材料としての「元素戦略」らしい成果

総括はシリコンと二酸化ケイ素で有用な材料機能が実現できれば、最も元素戦略らしいと考えていたが、以下のような成果が得られた。

- ・中村研究者（1期） 独自技術である極薄 Si 酸化膜技術を用いて、結晶方位が揃った極小（～数 nm）の Si ナノドットを連結させた新規ナノ構造（Si ナノドット連結構造）を作製し、熱伝導率をその古典的限界値（アモルファスリミット）以下まで低減することに成功した。界面熱抵抗が、その曲率半径に依存して、大きくなったことに解明。成熟した LSI プロセスが適用できる Si が、高性能熱電材料となり得る可能性を示した。2015 年度 CREST で採択された研究課題（代表：一期生水口研究者）のメンバーとして参画し、研究を継続。
- ・西山研究者（2期） 酸化物としての最高の硬さと高い破壊靱性値 ($>10 \text{ MPa m}^{0.5}$) を合わせもつシリカの高圧相であるスティショバイトのナノ多結晶体の高靱性化は、破断面にアモルファスシリカが形成されることによることを解明し、ナノスケール変態強化の概念を提唱した。超硬工具 WC の代替と期待されている。科研費国際共同研究加速基金「帰国発展研究」（海外の研究機関で優れた研究実績を重ねた PI を支援する新制度）に採択され、研究を継続。
- ・中野研究者（2期） 層状シリコン結晶を陰極とする BF_4 アニオン 2 次電池を開発した。リチウム電池に比べ、容量的には劣るが、発火性がなく、低温動作する (-30°C でも OK) という優位性をもつ。この特徴を活かせるフォークリフト用に企業との協業が進んでいる。

(3) 新たな応用展開が期待できる成果

- ・藤田研究者（2期） ナノポーラス金属の触媒作用を TEM でその場観察し、原子ステップで反応が生じ、表面がファセット化すると活性が落ちることを実証した。そして電気化学による「脱合金化法」によって、マイクロからナノにわたる高次の孔サイズを持っている多孔質材料を作製し、高い触媒活性をもつことを見出した。

Nature 姉妹誌掲載、民間との共同研究や 2015 年度に採択された阿部研究者（1期）が研究代表者を務める CREST の参加メンバーとして研究を継続。

- ・畠山研究者（2期） π 共役化合物に対する直接的なホウ素導入法を開発し、得られた含ヘテロ多環芳香族化合物は優れた両性半導体特性と電気化学的安定性を有しており、有機 EL のホスト材料として既存の材料と大きく上回る特性を示し、実用レベルの材料として企業でパイロットスケールの生産が開始された。アジア最大のディスプレイ大会 IDW 2014 の論文賞を受賞。世界最大のディスプレイ学会 SID 年会で招待講演。JST ACCEL 「エ

レクトライドの物質科学と応用展開（研究代表者 細野秀雄）でこの研究を継続。

・山本研究者（3期） 米国が天然ガスからシェールガスの採掘に転換したのが原因で、理化学用の液体ヘリウムの供給がタイトになり、元素戦略の観点から解決策が求められている。鉄ニクタイト超伝導体が磁場に強く、しかも結晶粒界の特性が銅酸化物系超伝導体よりも優れているのを利用し、バルク磁石を焼結法で合成した。直径1センチメートルと小粒でも、ネオジム磁石の2倍以上の強い磁力を発揮し、硬く割れにくい特性がある。小型冷凍機が使える、持ち運びに向いており、ポテンシャルとしては10Tクラスを実現できる。超伝導磁石を用いないNMR装置などの応用の可能性が出てきた。希少元素を用いない革新的な代替材料の創製を行う「MEXT 元素戦略プロジェクト」で研究を継続。

(4) 最もさきがけらしい研究成果

・小林研究者（3期）のヒドリドイオン（ H^- ）が高速の導電キャリアとなることを証明した成果。このテーマは採択時にアドバイザーから、悲観的な見解が示されたが、上手くいけばブレイクスルーになる可能性が高いので採択に至った。当時、所属研究室では制約が多かったが現所属の分子科学研究所の新しい制度（特任准教授）に応募して、第一号として採用された。そして、研究室を立ちあげ、本テーマに専念して、ヒドリド伝導体を実現し、論文を投稿し、1年超にわたる審査員とのやりとりを経て、Science誌への掲載にまで至った。ありふれた水素のマイナスイオンのイオン電導キャリアとしての可能性を実証し、プロトン電導体よりも高い伝導度を中温域で示す物質を実現した。この成果は学術、応用（燃料電池）の両面でインパクトがあり、本領域の目指すものを見事に具現化した研究といえる。

(5) 学術と応用の可能性を含め、最もインパクトのある成果

・中辻研究者（3期）低消費電力を実現する不揮発性メモリーして有用なホール素子を、マンガン系などの遷移金属の反強磁性体中で、ナノスケールでのスピン構造の制御で実現しようというのが目的。結果として以下の3つの成果を得ている。①パイロクロア型酸化物における特異なスピン・電子状態の解明、②カイラル反強磁性体における反強磁性スピン構造の制御技術の開発、③反強磁性体での室温における巨大なホール効果の実現とその磁場制御技術の開発。特に③の成果は室温で、磁歪効果により現れる弱い強磁性を用いて磁場で制御が可能で、かつ、ドメイン制御によりカイラルホール効果としてメモリー効果を読み取れる反強磁性物質 Mn_3Sn と Mn_3Ge を見出している。反強磁性物質で異常ホール効果の発見は世界初でかつ、通常の強磁性体でみられるものよりも大きい。よって、その発現の機能の解明は物質科学として新しい学術が開ける可能性があるのみならず、反強磁性構造のスピン流による制御やスピン構造の変化が簡便な手段で検出で

できれば、磁気メモリーやセンサーとしても応用が有望と思われる。さきがけ終了時に「量子力学的な波動関数の位相を利用した、仮想的な磁場（「仮想磁場」）が物質の中に存在するという認識に至り、現在はそれをどのように制御するのかがその応用に資する技術に育てるために大きな課題」というスケールの大きな構想が本研究者から出てきたことは、新物質科学を標榜した本領域に相応しいジャンプだと高く評価したい。この構想の一部を切り出した熱電材料の提案が CREST に採択（パートナーは一期生有田研究者）となった。Nature, Science, Nature 姉妹誌に 3 報。日本学士院学術奨励賞。

(6) 終了後の研究費獲得状況

本領域の修士生が中心となってチームを組み CREST に応募し 4 件が採択に至った。そのうち 3 件は領域内共同研究から採択に繋がった。結果として参画メンバーの総数は領域メンバーの約 3 割。

- ▶ 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」
 - ・一期生 一杉太郎 研究課題「界面超空間制御による超高効率電子デバイスの創製」
 - ・一期生 水口将輝 研究課題「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」
- ▶ CREST 研究領域「多様な天然炭素資源の活用を資する革新的触媒と創出技術」
 - ・一期生 阿部英樹 研究課題「高効率メタン転換へのナノ相分離触媒の創成」
- ▶ CREST 研究領域「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」
 - ・三期生 中辻 知 研究課題「トポロジカルな電子構造を利用した革新的エネルギーハーヴェスティングの基盤技術創製」

また、2 期生竹内研究者が企業と連携し、NEDO エネルギー・環境先導プログラム「超高性能バルク熱電材料(ZT20 以上)の創製」(2 年 1.5 億円)を獲得した。その他にも新学術創成研究、科研費若手研究 (A) などにも採択されている。

8. 総合所見

本研究領域は、我が国の資源・エネルギー・環境問題を解決するために、革新的機能材料の創成に結びつく新しいアプローチの開発および革新的機能材料の創出を目指し、異分野間の分野融合と知識融合による研究を推進していくという戦略目標の達成に向け、化学、物理、工学、材料科学など多岐にわたる個人研究者による、「元素戦略に資する革新的機能材料の創成」を共通目標とした独創的かつ挑戦的な研究を実施する研究領域として、適切に設定された。また、材料科学における世界的な第一人者である細野秀雄氏を研究総括に選定したことにより、元素の根本に立ち返って新規機能を創成する研究において、卓越した先見性および洞察力に富む指導および研究マネジメントが可能となり、また、若手研究者の人材育成に積極的に取り組んだ結果、研究領域の目的である新しい物質・材料科学を開拓する多くの若手研究者を輩出することができた。(JST 記載)

研究者には、元素の秘められた可能性の開拓による物質科学のフロンティアの開拓、あるいは希少元素に頼らないで有用な機能の実現を目指して、失敗を恐れず思い切った挑戦をお願いした。結果的に、この意図は研究者によく伝わり、果敢な挑戦が数多く行われたと判断している。成果としても現時点まででも世界トップレベルの journal に多くの論文が掲載され (Nature 系, Science 系だけに限っても 10 報以上)、多くの学会賞・進歩賞はもとより、より広範な領域を対象とした学術賞も数多く受賞するなど、予想を超えるレベルと判断している。

本領域では当初から領域内コラボレーションを強く研究者に求めてきた。時間を要したが、1 期生が修了する時期にはその成果が外部から見えるようになった。そして、修了生が中心となってチームを組み CREST に応募し 4 件が採択に至った。そのうち、3 件は領域内コラボレーションから採択に繋がった (結果として参画メンバーの総数は領域メンバーの約 3 割) のは、特筆すべき成果と捉えている。さきがけが終了すると、CREST を取るまでが「研究費の死の谷」であったが、これを乗り越える一つの具体的アプローチを示したといえる。

サイトビジットすると、置かれている人的環境 (スタッフ、学生)、上司との関係、専門領域による文化、研究インフラ (スペースも含む) が、研究者によって予想をはるかに超えて異なることが分かった。よって、画一的なマネジメントは無理であり、研究者ごとに状況を勘案するやり方を行った。上司には「さきがけ採択前と比較して、研究者の自由度と顔が見えるようにしてください」とお願いした。また、研究成果も論文数で画一的に測らず、オリジナルな挑戦を果敢に行ったかと領域内コラボレーションを推進したかどうかを重視した。

また、これまでさきがけの領域総括は現役を退いた方々が務めているが、私は現役の研究者で総括を務めることになったので、自分の研究と具体的に関連させないように強く自制した。

全体の感想を、一言でいうと「楽しかった」。現役で FIRST や元素戦略のプロジェクトリーダーをやっていると時間的には総括の仕事はタイトと感ずることも少なくなかったが、コーチとして一緒に併走しながら優れた研究者の成長過程を生で見られるという楽しみが明らかに勝った。自分のプロジェクトでは Playing Manager であったが、ここでは領域を一つの Virtual 研究所として manager としての経験を初めてしたことになる。とはいっても明らかに本人もメンバーも私は現役の研究者であると思っているので、領域会議は研究者同士の真剣勝負の場という色彩も濃厚であった。メンバーのエネルギーに負けないように、数日前からは体調を整えるなど準備をした。そのために領域会議は双方にとって緊張感に満ちた場になった。領域としても活動がほぼ終了という現時点でのもう一つの正直な感想は「若さに嫉妬」ということである。私自身も若い時に恩師などにこの言葉をいわれたことを思い出す。メンバーがこれからどういう軌跡を描くか本当に楽しみである。

改善を要すると感じる点を以下に挙げる。

- ・大挑戦の 5 年タイプは不要。応募の時点で相応しいかどうかの判断が困難であり、かつ ACCEL という制度ができたので、優れた成果を挙げた研究はこれに繋げればよいと思う。
- ・総括の裁量経費は多少なりともあった方がいい。年間 500 万-1000 万円程度か。少し応援すればジャンプすると判断できる研究者に配分すれば効果的。
- ・さきがけと CREST は同様なテーマであっても、本領域のように別々に実施した方がいい。若手の横の連帯が強くなり、自立心が強くなる。CREST との合同シンポジウムの開催は双方に効果があると思う。

以上