

戦略的創造研究推進事業

－CRESTタイプ－

研究領域「エネルギーの高度利用に向けた
ナノ構造材料・システムの創製」

研究領域事後評価用資料

平成20年3月22日

1. 戦略目標

「環境負荷を最大限に低減する環境保全・エネルギー高度利用の実現のためのナノ材料・システムの創製」

2. 研究領域

「エネルギーの高度利用に向けたナノ構造材料・システムの創製(平成14年度発足)」

領域の概要

この研究領域は、ナノテクノロジーを活用した高効率のエネルギー変換・貯蔵技術、環境調和型の省エネルギー・新エネルギー技術を創製し、環境改善・環境保全に資する研究、および、ナノオーダーで構造・組織等を制御することにより、省エネルギーを達成し、エネルギーの高度利用に資するこれまでにない高度な物性を有する機能材料・構造材料・システム等を創製する研究等を対象とするものです。

具体的には、エネルギー効率の極めて高い、高効率・高選択的物質変換プロセスや循環型エネルギーシステムを実現するためのナノ機能材料・システム、熱電変換素子等の創製を目指す研究、新しい太陽電池・燃料電池あるいは熱線反射材料・セルフクリーニング材料等の環境調和型の新エネルギー・省エネルギーに係わるナノ機能材料・システム等の創製を目指す研究、エネルギーの高度利用に資するナノオーダーで材料組成・組織構造・表面界面等を制御した高機能ナノ構造材料の創製に係わる研究、および、これらの構築に必要となるプロセス技術や評価技術に係わる研究等が含まれます。なお、本研究領域は戦略目標「情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・システムの創製」および「非侵襲性医療システムの実現のためのナノバイオテクノロジーを活用した機能性材料・システムの創製」にも資するものとなります。

3. 研究総括

藤嶋 昭 (財団法人 神奈川科学技術アカデミー 理事長)
(東京大学名誉教授)

4. 採択課題・研究費

採択年度	研究代表者	中間評価時 所属・役職	研究課題
平成 14年度	金村 聖志	首都大学東京 教授	高次規則配列複合構造体を用いたエネルギー変換デバイスの
	木島 剛	宮崎大学 教授	高機能ナノチューブ材料の創製とエネルギー変換技術への応
	工藤 昭彦	東京理科大学 教授	可視光水分解を目指したナノ構造体光触媒の創製
	鯉沼 秀臣	東京大学 客員教授	電界効果型ナノ構造光機能素子の集積化技術開発
	河本 邦仁	名古屋大学 教授	ナノブロックインテグレーションによる層状酸化物熱電材料
	佐々木 高義	物質・材料研究機構 ディレクター	光機能自己組織化ナノ構造材料の創製
	中戸 義禮	大阪大学 教授	界面ナノ制御による高効率な太陽光水分解システムの創製
	松本 要	京都大学 助教授	ナノ組織制御による高臨界電流超伝導材料の開発
	山木 準一	九州大学 教授	ナノ構造単位材料から構成される電力貯蔵デバイスの構築
平成 16年度	池庄司 民夫	産業技術総合研究所 部門長	電極二相界面のナノ領域シミュレーション

5. 研究総括のねらい

我々の活動に必要なエネルギーを確保して快適な環境を作ること、食料を得て健康を維持することと同様に最重要課題である。本研究領域では、ナノ材料や機能材料を有効に活用することにより環境保全、エネルギーの変換・利用技術を進展させることを主なテーマとした。

例えば、電気自動車の電源として期待される燃料電池は、ピストンを動かさないためエネルギー変換効率がガソリンエンジンより高く、しかも空気を汚しません。従って、従来にはない新しいアイディアに基づく高効率の燃料電池の研究が必要で、そのための新しい方策の提案を期待した。また、太陽エネルギーの変換法としての高効率・電気変換に関する研究も重要である。セルフクリーニングされる建材や、

熱を反射して電磁波を遮蔽する窓ガラスなど、省資源化を達成し快適な生活空間を創るための研究も大切である。

本研究の実施結果として、新しい基礎概念の提案や基本特許の取得と更に、論文掲載や特許出願の件数（アウトプット）だけでなく、インパクトの大きなアウトカム（研究成果としてのアウトプットが社会にどのように役立っているか）も目指した。研究を推進する上で最も重要なことは研究リーダーの熱意であり、優れたオリジナリティーのある人のリーダーシップとあつい雰囲気が必要なファクターだと考えた。

6. 選考方針

本領域は、戦略目標「環境負荷を最大限に低減する環境保全・エネルギー高度利用の実現のためのナノ材料・システムの創製」を目指して設定されたものであり、ナノテクノロジーを活用した高効率のエネルギー変換・貯蔵技術、環境調和型の省エネルギー・新エネルギー技術を創製し、環境改善・環境保全に資する研究、および、ナノオーダーで構造・組織等を制御することにより、省エネルギーを達成し、エネルギーの高度利用に資するこれまでにない高度な物性を有する機能材料・構造材料・システム等を創製する研究等を対象とした。

選考は、単なる既存概念の延長ではなくナノテクノロジーを駆使した革新的技術シーズの創出、具体的な研究目標、充実した研究体制、研究の進め方、及び熱意にあふれ優れたオリジナリティーを有する研究リーダーの資質なども考慮に入れた。

採択された課題は、太陽光水分解、熱電材料、光エネルギー変換用ナノシート、電界効果型光機能素子、全固体型エネルギー変換デバイス、燃料電池用ナノチューブ、超伝導材料、電力貯蔵デバイス及び燃料電池用電極のシミュレーションなどいずれも意欲的な提案で、革新的技術シーズの創出と大きな成果が期待できた。

7. 領域アドバイザーについて

アドバイザー名	所属	役職	任期
井上 晴夫	首都大学東京	教授・学部長	平成 14 年 11 月～平成 20 年 3 月
朴 鐘震	東邦大学	訪問教授	平成 14 年 11 月～平成 20 年 3 月
小久見 善八	京都大学	教授	平成 14 年 11 月～平成 20 年 3 月
平尾 公彦	東京大学	教授・副学長	平成 14 年 11 月～平成 20 年 3 月
塚本 恒世	東京理科大学	理事長	平成 14 年 11 月～平成 20 年 3 月
岩科 季治	(株) 関電工	副社長	平成 14 年 11 月～平成 20 年 3 月

庄野 晋吉	日本板硝子（株）	特別顧問	平成 17 年 4 月～平成 20 年 3 月
能村 卓	太陽工業（株）	取締役	平成 17 年 4 月～平成 20 年 3 月
土井 利明	東海旅客鉄道 （株）	常務執行 役員	平成 14 年 11 月～平成 17 年 3 月
小川 建	東陶機器（株）	技術顧問	平成 14 年 11 月～平成 17 年 3 月

本領域のアドバイザーの構成は、基礎研究分野（光化学、電気化学、理論化学など）、材料分野（有機及び無機機能性材料など）のトップレベルの研究者及び各分野を横断的、相対的に総合判断できる企業の経営者など多岐に渉る陣容であり、戦略目標に見識の深い方々にアドバイザーをお願いした。

また、企業からのアドバイザー2名の方は、業務上の都合で、期途中での交代になった。

8. 研究領域の運営について

① 基本的運営方針

基礎や応用研究を推進する上で最も重要なことは、研究リーダーの熱意であり、優れたオリジナリティーのある人のリーダーシップとあつい雰囲気が必要なファクターだと常日頃考えており、この基本的考えに基づき、学術的な基礎研究の裏付けを十分に行ないながら、インパクトの大きなアウトカムに向けて領域を運営した。

② 採択課題の進捗状況把握、推進

- 研究課題の進捗状況、直近の計画ならびに将来の方向性については、研究計画作成時、毎年 8 月に開催するオンサイトミーティング 3 ヶ所（10 チームを 3 グループに別け、世話役の研究機関で実施する中間成果報告会で、ポスターセッションなど若手研究者にも発表の機会を与える）及び毎年 12 月に実施する研究進捗会議（全チームが集まり、研究成果、トピックス、次年度計画などの概要を研究代表者が報告し、トピックス等は主に共同研究者が発表する）を通して把握し、アドバイザーらの意見も加味して助言を与え推進した。また、若手 CREST 研究員から直接成果報告を受ける機会を設け、進捗状況の把握と研究員の評価を行った。
- 研究事務所の運営は、総括、技術参事、事務参事、事務員及び派遣事務員の 5 名体制で実施したが、途中、事務参事が長期入院後退職したため、平成 17 年 12 月から交代の事務参事を採用した。事務参事の不在期間中は、事業三課から事務参事代理の応援を得て、運営した。

③ 研究費の配算

- 年度始めの研究費の配算は、全額を一度に配算しないで、一定額の総括準備金

をキープしておいて、残りを前年度の研究成果及び当年度の必要度、緊急度に応じて重点配算した。

- ・例えば、松本チームは、高温超電導体中に人工ピンニングセンター（APC）を導入して、高磁場下での臨界電流密度の世界記録を達成したが、米国・オークリッジ国立研やロスアラモス国立研などの激しいキャッチアップを受けたので、そのキャッチアップを阻止するために、超伝導研究分野の第三者の専門家による客観的評価を経て、領域として年度予算計画時に研究予算面で特別に配慮した。

④ 総括準備金の使途

- ・ 毎年、3ヶ所でのオンサイトミーティング終了後、特に成果を上げたチームをアドバイザー等の意見も入れて選出し、総括準備金の中から一定額を特別追加予算として1～3チームに配算した。
- ・ 外人研究者の招聘補助（各研究チームから招聘意義の高い研究者を提案してもらい、その中から総括が決裁した。各チーム1～2名/年で、総勢44名/4年間であった。）
- ・ 若手研究員及びCREST研究員等の成果報告会・旅費等の補助及び特別追加補助（CREST研究員の年俸は、他ファンドに比べて高く、優秀なポスドクが集まるが、反面、研究費に占める人件費も高くなるため、研究代表者に厳密な査定をお願いするとともに、総括も直接的な評価を実施した。）
- ・ Tryk 先生（臨時アドバイザー）による英語論文添削費の補助（4年間で総数55件の依頼があり、論文はNature MaterialsやAngewandte Chemieなど著名なジャーナルに掲載された。）

⑤ 領域の成果報告、説明責任

- ・ 研究実施報告書を骨格とする領域の詳細年報（Annual Research Report）発行（原著論文の全文他を掲載し、5号発行した）
- ・ ニュースレター発行（研究代表者や共同研究者の紹介、トピックス的成果の報告などを1回/年、5号まで発行した）
- ・ 領域からの出版（教科書的一般的啓蒙書でプロジェクトの成果を優しくアピールした書籍「ナノテクとエネルギー」を出版し、関係者に配布した。また、平成19年11月29日新都市ホールで開催した合同公開シンポ「ナノテク・未来への挑戦」のアンケートに協力頂いた方約300名にも進呈し、好評を得た。）

⑥ 領域内、領域間の研究者の交流

- ・ 合同公開シンポジウム「ナノテク・未来への挑戦」（環境保全・エネルギー高度利用の実現のために）を平成19年11月29日、新都市ホールで開催し、約580名の参加者（内、一般参加者250名）があり、盛況であった。
- ・ 領域間シンポ：藤嶋領域・松本一福山領域一柳領域（超伝導関連領域横断ジョ

イント国際ワークショップ、3 回開催)

- ・ 領域間シンポ：藤嶋領域・池庄司ー御園生領域ー福山領域（電子移動反応のシミュレーション・シンポジウム、2 回開催）
- ・ 領域間シンポ：藤嶋領域・山木ー御園生領域（リチウム電池シンポジウム）
- ・ 領域間シンポ：藤嶋領域・鯉沼ー福山領域（分子を用いるナノ電子デバイス作製ワークショップ）
- ・ チーム間の交流：鯉沼ー中戸チーム(高品質 TiO_2 共同研究)
- ・ ミニシンポ：鯉沼ー佐々木チーム (International Mini-Workshop on Nano and Combinatorial Technologies for Materials and Devices)

⑦ 特許出願

- ・ 知的財産権保護の重要性を研究代表者に認識して頂き、積極的な特許出願を奨励し、基本特許の習得やライセンスを実施した。国内特許 140 件及び国際特許 26 件を出願し、3 件をライセンスし製品化（鯉沼チーム）した。
- ・ 基本特許と考えられる特許は、佐々木チーム 7 件、木島チーム 5 件、金村チーム 4 件、鯉沼チーム 4 件、工藤チーム 2 件、河本チーム 2 件、松本チーム 1 件、山木チーム 1 件であった。
- ・ JST 産学共同シーズイノベーション化事業：
 - ・ 鯉沼チーム：酸化亜鉛発光デバイス、A 社
 - ・ 河本チーム：高温用酸化物熱電変換モジュール、B 社
 - ・ 木島チーム：白金ナノグルーブー炭素系触媒、C 社

⑧ 研究テーマの導き方

- ・ 領域の各チームの評価は、日常の情報交換及びオンサイトミーティング、研究進捗会議等での成果報告会でアドバイザーの意見も入れ、厳しく評価した。その結果、優れた成果を出したチームには、資金面でのバックアップも含め、更なる研究進展を図った。一方、研究目標に未達のテーマに関しては、未達の原因、設備及び研究要員なども含めて見直しを行い、研究代表者とともに研究の方向付け、テーマの選択と集中などを行なった。必要なら、資金面での補助も行ない、バックアップした。CREST 研究員等の査定及びエンカレッジとして、個人面談や研究員だけの成果報告会などを実施した。

⑨ 課題別中間評価

- ・ 平成 17 年 12 月 2 日、東京国際フォーラムにて、課題別中間評価会を実施した。今回、初の試みとして、産業界から 16 名のプロデューサーにも傍聴頂き基礎研究の中に潜在しているシーズ発掘の場を兼ねることにした。
- ・ 中間評価の時点で既に優れた成果を上げており、今後も更に成果が期待できる 3 チーム（++ 評価）には、領域として資金面を含めてバックアップした。また、当初計画以上の実績を上げたチーム（+ 評価）、一部の課題で計画未

達のチーム（一 評価）には、それぞれの状況に応じアドバイザーの意見も入れて、アドバイス及び支援を行った。

⑩ 研究領域中間評価

- ・ 平成 18 年 3 月 14 日、JST 上野事務所で、研究領域の中間評価を受けた。
- ・ 評価の総合所見を以下に記載する。本研究領域は、「エネルギー」と「ナノ材料」をキーワードとしており、持続可能な社会の実現に向けて「エネルギーの高度利用」は最重要課題の一つであり、その面からも着実に目的に沿った成果を上げており、この分野の進展に大きく寄与していると考えられる。個々の研究課題の成果を見ても、国際的には最先端レベルにあり、関連分野への指標としての役割も十分に果たしていて、今後もこのまま順調に進展していくものと評価できる。本研究領域からの論文掲載や特許出願の件数も多いが、研究総括が強調する「学術的な基礎研究の裏付けを十分行いながら、インパクトあるアウトカムを目指す。」を実現しており、実用化に向けた産業界との共同研究なども推進されている。より一層の発展を期待したい。
- ・ なお、研究領域の運営の評価で、「今後は研究成果の収穫時期に入るので、研究活動へ集中させる意味を含めて、研究者の報告などの負担を少し軽減してもよいのではないかと意見があった」ため、最終年度は、オンサイトミーティングを取りやめ、事後評価会のための準備としての領域会議を平成 19 年 9 月 3 日に実施した。また、詳細年報も取りやめ、研究終了報告書や合同公開シンポジウム時に配布したニュースレター第 5 号（5 年間の成果トピックス集で要旨集の解説的資料）で代替した。

⑪ 課題別事後評価

- ・ 平成 19 年 11 月 6 日、7 日の 2 日間で、課題別事後評価会を開催した。
- ・ 総括のねらいとする「学術的な基礎研究の裏付けを十分行いながら、インパクトの大きなアウトカムを目指す」を充分叶えた研究成果を得た。

以上述べてきたように、領域として限られた期間、研究費の中で、研究効率を如何に上げ成果に結びつけるか、成果を如何に「戦略目標」の問題解決に結びつけるかを念頭に運営した。

9. 研究を実施した結果と所見

（1）研究総括のねらいに対する研究成果の達成度

① 研究総括のねらい

- ・ 本研究領域では、ナノ材料や機能材料を有効に活用することにより環境保全、エネルギーの変換・利用技術を進展させることを主なテーマ（戦略目標）としており、本研究の実施結果として、新しい基礎概念の提案や基本特許の取得を

目標とした。

- ・ 更に、論文掲載や特許出願の件数（アウトプット）だけでなく、インパクトの大きなアウトカム（研究成果としてのアウトプットが社会にどのように役立っているか）も目指した。

② 研究総括のねらいに対する達成度

- ・ 上記の戦略目標の研究総括のねらいに対する研究成果の達成度は、以下に述べるように期待以上の研究成果があった。
- ・ 本領域の10チームは、それぞれ当初計画に従い、あるいは当初予想できなかった新たな展開を行なって国際水準から見ても一級の優れた研究成果をあげた。それらの中で、領域として特筆すべき成果をあげたのは、以下の3チームである。

③ 佐々木チーム

- ・ 層状ホスト化合物を単層分離して得られる無機ナノシートをキーマテリアルに位置づけ、これをビルディングブロックとして高機能光触媒膜や電子デバイス、エネルギー変換材料などエネルギーの高度利用に役立つ新材料、新技術の基礎研究から応用展開まで行った。これらは、国際的に見ても独創的かつ先導的な研究であり、得られた成果は、酸化チタンナノシート類や層状コバルト酸化物超伝導体など世界的に注目されており、新しいナノシートのジャンルを切り開いた。
- ・ 例えば、酸化チタンナノシートは、a)高い超親水性特性と耐摩耗性を利用した車輻窓硝子への実用化検討中であり、b) 高い比誘電率（125）と極めて低いリーク電流（ 10^{-6} A/cm^2 ）を持つ酸化チタンナノシートは、ナノレベルで機能する **high-k** 材料（次世代の高容量メモリ、低消費電力型トランジスター用ゲート絶縁膜など）として大手半導体メーカーと共同研究中である。更に、c)Co、Fe ドープ酸化チタンナノシートは紫外光で動作する磁気光学材料薄膜であり、NEDO プロジェクトに採択され、民間企業と共同研究中である。
- ・ 層状コバルト酸化物超伝導体については、4.7K で超伝導を示し、コバルト酸化物としては初の超伝導体で、**Nature** に掲載され被引用回数は約 600 回を超えており超伝導研究分野に非常に大きなインパクトを与えた。このコバルト酸化物超伝導体は、新規ナノシートの探索研究の中からセレンディピティー的に発見されたもので、その超伝導性の発現メカニズムに関する考察（CoO₂ 層内に電子、スピンの閉じ込められたことによる効果）が、極薄2次元結晶であるナノシートの電子・磁氣的機能へ目を向けさせることになり、誘電特性や磁気光学特性の開拓につながり、チャンスを大きな成果に育てたもので、このような過程は基礎研究が展開する一つの好例と言えよう。
- ・ 更に、ナノシートの精密累積技術は、現在のナノテクノロジーの花形技術であ

る MBE などの気相成膜技術で行なわれている結晶格子レベルからの材料の人工的構築に匹敵する新しいナノ構造設計技術で、ウェットプロセス・ナノテクノロジーとも言うべき新しいものづくりツールへの発展が期待できる。

- ・ また、特許は、国内出願 35 件、海外出願 4 件で、ナノシートの基本特許を 7 件含んでいる。例えば、層状コバルト酸化物超伝導体（特許第 4,041,883 号）、酸化チタンナノシートの高品位超薄膜形成技術（特許第 3,726,140 号）及び高い磁気光学効果を発揮する Co、Fe ドープ酸化チタンナノシート（特願 2005-015492）などである。
- ・ 以上のように、佐々木チームは、研究総括のねらいとする新しい基礎概念の提案、基本特許の取得及びインパクトの大きなアウトカムが期待できる成果を出しており、期待以上の成果である。

④ 河本チーム

- ・ ナノブロックインテグレーションという新しい設計概念を提案し、導電率とゼーベック係数がトレードオフの関係にある電子輸送系とフォノン輸送系を複合結晶の別々の部位（ナノブロック）でそれぞれ独立に制御することによって高効率熱電材料を創製した。
- ・ 例えば、 SrTiO_3 系人工超格子において、2 次元的に閉じ込められた電子ガスが巨大起電力を発現することを発見・実証し、室温における無次元性能指数 $\text{ZT}=2.4$ は、従来の重金属系超格子 ($\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ 超格子、埋蔵量少なく有害・有毒) と並ぶ、世界タイ記録を達成した。今後、有害・有毒元素を含まない材料により、膨大な未利用熱エネルギーを電気エネルギーに直接変換出来るゼロエミッション発電技術として実用化が期待される。
- ・ $\text{p} - \text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9 / \text{n} - \text{LaNiO}_3$ 系等において、バルク焼結体の配向制御、ドーピング及び電極等を最適化し、熱電発電モジュールの作製と評価を行い、民生分野への応用（携帯電話充電器のデモとプレス発表、家庭用ガス湯沸かし器の余熱利用で大阪ガスと共同研究しプレス発表）での可能性を示した。
- ・ 更にこれらの本研究成果は、文部科学省、経済産業省の研究支援制度で発展的に受け継がれ、日本が発信する熱電変換材料・デバイスの開発と環境・エネルギー分野への貢献に向けた研究の一層の強化に繋がるものと期待される。

⑤ 山本チーム

- ・ 本研究は、電極活物質をナノサイズ化することにより電力貯蔵デバイスの性能向上（リチウムイオン電池の高出力化や金属空気電池鉄負極の充放電容量の増加、電気化学キャパシタの容量増加）を達成した。
- ・ 例えば、リチウムイオン電池の正極活物質をナノサイズ化（リチウム過剰法、基本特許第 397994 号）することにより、放電速度を従来の 5 倍に高め、ハイブリッド車等への応用の可能性を見出した。更に、リチウム電池の発火事故な

ど安全性対策の基礎研究も行い成果をあげており、NEDO 次世代自動車用高性能蓄電システムの技術開発に採択された。

(2) 領域全体としてみた場合の特筆すべき研究成果

以上 3 チーム以外の特筆すべき成果を、(a) 科学技術の進歩に資する研究成果、又は、(b) 社会的及び経済的な効果・効用に資する研究成果に分類して次に示した。

(a) 科学技術の進歩に資する研究成果

① 金村チーム

【革新技术創製および展開】

- ・ 高次規則配列多孔体作製技術を確立し、機能を有する物質（セラミックス微小粒子、ポリマー電解質、イオン液体、イオンゲルなど）を充填・複合して高次規則配列複合構造体を作製した。これらの複合構造体を用いて電気化学エネルギー変換デバイス（全固体型リチウム二次電池、燃料電池、キャパシタ、ソフトアクチュエータなど）の開発を行い、原理の検証を行なった。これにより、これまでには考えられなかった新規電気化学デバイスの構築が期待できる。

② 木島チーム

【革新技术創製および展開】

- ・ Tween 系界面活性剤を利用した新規の液晶鋳型法によって合成した各種白金ナノ構造体は、その特異構造由来の高活性を発揮し、白金使用量の低減に寄与し、燃料電池の実用化に向けてブレークスルーをもたらす可能性を秘めている。

③ 工藤チーム

【革新技术創製および展開】

- ・ 水の分解光触媒の開発において、高い効率を実現し、豊富な材料のデータベースを構築し、光触媒ライブラリーを充実させ、バンドエンジニアリングによる可視光応答性光触媒の設計指針を示した。更に、可視光応答性光触媒を用いたソーラーハイドロジェン生成の実証実験は、この分野の研究開発を促進させる大きな原動力になることが期待できる。

④ 鯉沼チーム

【革新技术創製および展開】

- ・ 室温透明強磁性体 Co ドープ TiO_2 の機構解明の研究（スピトロニクス）に対して、論文引用数が 500 を超え、トムソンサイエンティフィック賞を受賞し、今後の進展が期待できる。
- ・ TiO_2 表面の原子レベルでの超平坦化方法及び TiO_2 を活性層とする新規電界効果トランジスタなどの研究は界面現象・電界効果に基づく新しい物性の探索と応用で今後の進展が期待できる。

- ・ 世界最高移動度の分子性固体 n 型半導体電界効果トランジスタの作製及び赤外線半導体レーザーを用いた連続波レーザーMBE 法により π 共役半導体フラーレン薄膜の成長過程における RHEED 振動の観察に初めて成功するなど、有機分子エレクトロニクスにおける構造と機能の理解を深め、今後の進展が期待できる。
- ・ 取り扱う材料、プロセスの複雑性・多様性に起因する大量の反応・構造制御パラメーターの最適化問題を 100 倍早くすることを目指し、コンビナトリウムテクノロジーを積極活用する集積化システムを構築し研究の効率化と進展に大きく寄与した。本システムによる酸化物を中心とするコンビナトリアル薄膜技術の開発に対して、井上春成賞（装置開発、科学技術振興機構、2004 年）に続き、向井賞（東京応化財団、2006 年）を受賞している。

⑤ 中戸チーム

【革新技术創製および展開】

- ・ 太陽光による直接水分解・水素製造を課題とし、新規に多結晶 Si/アモルファス Si (a-Si)/GaP 複合電極を開発して、効率 2.3・3.5%を達成した。また、n-pGaP の作製法を適正化することにより、実用化の可能性の目処となる効率 10%の達成の見通しがあることを示したので、今後の展開に期待が持てる。
- ・ 高効率期待できるヨウ化水素の分解を利用する光レドックスフロー型電池を取り上げ、多結晶 Si や微結晶 Si 薄膜電極でそれぞれ高い変換効率を達成した。これは実用化に向けて大きく一歩進める成果である。

⑥ 松本チーム

【革新技术創製および展開】

- ・ 本プロジェクトで進めてきた APC 技術は、日米欧の各国で盛んに研究されるようになり、高温超伝導線材の性能向上に不可欠な技術となった。高 J_c を有する高温超伝導線材によって超伝導技術の普及が一層促進されると期待できる。

⑦ 池庄司チーム

【革新技术創製および展開】

- ・ 電気化学系の基本である電流-電位曲線を決める電極反応、電極表面、電解質膜などについて、電場などが存在するより現実に近い条件下でナノ領域の第一原理シミュレーションを行う方法を新たに開発して、固体高分子型の水素燃料電池に適用した。この新たな手法は、これまでになくリアルなシミュレーションを可能としたので、今後の燃料電池材料探索に大きく貢献することが期待できる。また、Li 電池やメッキ、エッチング、電解合成などの他の電解化学系の関わる系や、半導体素子など電場のかかる系にも有効で、幅広い応用が期待できる。

(b) 社会的及び経済的な効果・効用に資する研究成果

① 金村チーム

【経済・産業への展開】

- ・ 全固体型リチウム二次電池(全セラミック電池は実用化に向け企業と共同研究、ポリマー電解質を用いた全固体型リチウム二次電池は企業と共同で実用化研究を実施し、事業化に向けた研究開発に移行)は、可燃性液体の電解質を用いないので発火など現在社会問題となっている電池の安全性に大きく資するものであり社会に与えたインパクトは大きい。
- ・ 燃料電池用プロトン伝導性コンポジット膜はダイレクトメタノール型燃料電池(DMFC)の電解質膜として Nafion 膜の 137 倍の膜性能を有しており、DMFC の飛躍的な性能向上が期待できる。

② 工藤チーム

【実用化及び社会的価値の発見・発明】

- ・ 愛知万博、国際光触媒展、科学未来館の特別企画展での光触媒の展示、高校化学教科書掲載、サイエンスチャンネル番組作成により光触媒研究が進展していることを社会に対して示すことが出来た。これにより、水から水素を作ることの重要性を多くの研究者や一般の人に認知でき、エネルギー・環境問題の啓蒙とこの研究分野の更なる発展に貢献できると期待される。

③ 鯉沼チーム

【経済・産業への展開】

- ・ コンビナトリアルレーザーMBE 装置、有機膜 IR レーザー堆積装置 (P 社)、レーザー加熱システム (SA 社) 及び原子レベル平坦化酸化チタン基板 (SK 社) などはパテントライセンスによる製品化を進めた。
- ・ 酸化物蛍光体 (A 社)、酸化物磁性体 (B 社) 及び環境触媒 (C 社) などの新機能物質・材料の実用化に向けた産学共同研究を実施している。
- ・ レーザー基板加熱法を取り入れた有機金属化学堆積法を用いて酸化亜鉛発光デバイス用薄膜の高品質化に成功し、実用化に向けて産学協同研究を開始している。

④ 松本チーム

【実用化及び社会的価値の発見・発明】

- ・ 工学的にデザインされたナノスケールの人工ピン (APC) を導入して、量子化磁束を強力にピン止めして、液体窒素温度の高磁場下で高温超伝導薄膜の臨界電流密度 (J_c) を飛躍的に向上させ、現時点でも世界最高の J_c 特性を維持している。更に、短尺金属基板テープによる線材適用性検討でも同等の J_c ($0.2\text{MA}/\text{cm}^2$ 、5 テスラ、77K) を得ており、77K で動作する大電流通電可能

な高温超伝導線材の実用化が期待できる。

(3) 本研究領域終了後の発展

① 金村チーム

1. 文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 (平成 19 年度～20 年度)
研究課題: 高分子のゲル化挙動を利用したイオンゲルアクチュエータ材料の創製
研究代表者: 小久保 尚 (横浜国立大学)
2. 産業技術総合開発機構 「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発／次世代技術開発」(平成 19 年度～平成 21 年度)
研究課題: 構造規制型新規金属負極の研究開発
研究代表者: 金村聖志 (首都大学東京)
3. 産業技術総合開発機構 「次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発／次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発 (次世代技術開発)」(平成 19 年度～平成 21 年度)
研究課題: リチウムイオン液体を用いた安全性と高性能を兼ね備える蓄電システム構築
研究代表者: 渡邊正義 (横浜国立大学)
4. 産業技術総合開発機構 「平成 19 年度産業技術研究助成事業」(平成 19 年度～平成 21 年度)
研究課題: 多重階層ポーラスカーボンを用いた高容量電気化学キャパシタの開発
研究代表者: 獨古 薫 (首都大学東京)

② 木島チーム

1. 研究費補助金「萌芽研究」(平成 18～20 年度)
研究課題名: 「分子鋳型法による高分子およびカーボンナノヘリックスの合成と特性」
研究代表者: 木島 剛、酒井 剛 (宮崎大学)
2. 産学共同シーズイノベーション化事業 (平成 19.10～20.9)
研究課題名: 白金ナノグループをベースにした炭素系触媒の開発
代表研究者: 木島 剛 (宮崎大学)
共同研究企業: 関西熱化学株式会社

③ 工藤チーム

1. 科学研究費補助金特定領域研究「協奏機能触媒」(平成 18 年度～平成 21 年度)
研究課題名: 二酸化炭素還元のための可視光応答光触媒の開発

研究代表者：工藤昭彦（東京理科大学）

④ 鯉沼チーム

1. 産業技術総合開発機構研究助成（平成 19 年～平成 22 年）
研究課題名：マルチフェロイクスセンサ素子のナノ構造設計と材料探索
研究代表者：松本祐司（東京工業大学）
2. 産学共同シーズイノベーション化事業（平成 19.10～20.9）
研究課題名：有機金属化学堆積法による酸化亜鉛発光デバイスの開発
共同研究企業：三菱化学
研究者代表者：角谷正友（物質・材料研究機構）

⑤ 河本チーム

1. 産学共同シーズイノベーション化事業
研究課題名：水管パネル一体型熱電コンポーネントのための高温用酸化物熱電変換モジュールの実用化（平成 19 年度）
共同研究企業：（株）フジコー
研究代表者：大瀧倫卓（九州大学）
2. 科学研究費補助金 基盤研究（平成 18～20 年度）
研究課題名：金属酸化物の熱電物性における酸素イオン副格子の構造とダイナミクス
研究代表者：大瀧倫卓
3. 科学研究費補助金 基盤研究（平成 19～22 年度）
研究課題名：次元性を制御したナローギャップ半導体の機能デバイス化
研究代表者：梶谷剛（東北大学）
4. 科学研究費補助金 基盤研究（平成 18～20 年度）
研究課題名：化学修飾された層状コバルト酸化物の結晶構造と電子輸送特性に関する研究
研究代表者：宮崎 譲（東北大学）
5. 科学研究費補助金 基盤研究（平成 19～21 年度）
研究課題名：高熱電変換性能を有する高配向有機薄膜作製の基礎研究
研究代表者：林 慶（東北大学）

⑥ 佐々木チーム

1. 産業技術総合開発機構研究助成（平成 18 年～平成 21 年）
研究課題名：強磁性半導体ナノ材料を用いた短波長光通信用磁気光学素子の開発
研究代表者：佐々木高義（物質・材料機構）

⑦ 中戸チーム

1. (JST)戦略的創造研究推進事業（さきがけ）（平成 18～22 年度）

研究課題：興奮性固液ナノ界面における物質ベクトル輸送

研究代表者：中西周次（大阪大学）

2. 企業との共同研究

研究課題：可視光応答性光触媒の研究

構成：大阪大学先端イノベーションセンター、竹中工務店、TOMATEC、
古川技術士事務所

研究代表者：中戸義禮（大阪大学）

⑧ 山木チーム

1. JST 平成18年度革新技术開発研究事業（H18～H20）

研究課題：ポリアニオン頂点共有構造を利用した全固体セラミックス電池の
開発

申請者：日本ガイシ（株）

協力研究者：岡田重人（九州大学）、金村聖志（首都大学東京）

2. NEDO 次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発（H19～H23）

研究課題：ポスト鉄オリビン系高性能リチウム二次電池の研究開発

申請機関・代表者：三菱重工業長崎研究所（弦巻 茂）、九州大学先端物質化学
研究所（岡田重人）、九州電力総合研究所（和田好広）

（4）今後の研究発展への期待や課題

- ① 領域として特筆すべき成果をあげた3チームの中で、特に佐々木チームの成果は領域の全アドバイザーが賞賛する成果をあげている。

本研究において、重点検討項目として設定した新規ナノシートの探索・創製、物性の解明、ナノシート集積化技術の開発は、満足すべきレベルで目標をほぼクリアし、さらにこれに加えて層状コバルト酸化物超伝導体の発見という予期していなかった大きな成果を挙げ、遷移金属酸化物超伝導体の研究の進展に貢献した。この成果は究極の2次元物質であるナノシートの中での電子、スピンの振る舞いに目を向ける契機となり、本研究の後半でナノシートの機能開拓の新たな課題として取り上げた。その結果、電子的、磁氣的に興味深い性質を見だし、ナノシートの研究に今後さらなる展開の可能性を秘めた新分野を開拓した。

一方ナノシートの応用、機能開発に関しても、光触媒コーティング膜のように本格的な実用化に向けて検討が進められている課題も含めて、本研究領域での戦略目標であるエネルギーの高度利用に役立つと期待できるいくつかのシーズを得ることができた。これらの多くは、ナノシートという新素材とその精密累積という新技術によって、解決の糸口を提案したものであり、既存技術で開

題となっていた諸課題に対してこれまでとは異なる視点から取り組んだことによって得られた成果であると考えられる。

現在ナノスケール物質の探索、合成とその応用に関する研究が隆盛を極めている。その中でナノシートはナノチューブ、ナノ粒子などと比べるとまだ研究の歴史は浅く、知見の蓄積も十分ではない。そのような状況の中で本研究ではナノシートに関する研究を基礎から応用にわたって、多面的、総合的に推進したものであり、世界的に見ても特筆すべき多くの成果を挙げたものと見なされ、今後の進展に大いに期待できる。

- ② 河本チームは、ナノブロックインテグレーションという新しい設計概念による熱電変換材料を提案・実証した。従来の重金属系熱電変換材料は、埋蔵量が少なく、猛毒で耐熱性の低い重金属を多く使用しなければならないという問題点があったが、埋蔵量が豊富で、耐熱性が高く、かつ毒性のないありふれた酸化物であるチタン酸ストロンチウムを極薄膜加工（超格子化）することにより、重金属材料を凌ぐ変換性能を示す熱電変換材料の開発に世界で初めて成功した。工場、火力発電や自動車から排出される廃熱を直接電気に変換、再利用することが可能で、化石燃料を輸入に頼っている我が国において、廃熱として捨てている一次供給エネルギーの約 2/3 の一部を熱電変換により電気エネルギーに変えることが出来れば、化石燃料の利用効率が高められ、深刻な地球温暖化防止に繋がる技術として今後の展開に期待が持てる。
- ③ 社会生活において安全・安心に繋がる研究としては、山木チームのリチウム電池の安全性対策研究や金村チームの全固体型リチウム電池の研究があり、現在社会問題となっている電池の安全性に大きく寄与することが期待される。
- ④ 科学技術の進歩に資する研究成果の革新技术の創製および展開に該当する研究は、松本チームの人工ピン止めによる高温超伝導線材の性能向上、鯉沼チームの室温透明強磁性体 (Co ドープ TiO_2)、 TiO_2 を活性層とする新規電界効果トランジスタ、世界最高移動度の分子性固体 (C_{60}) n 型半導体電界効果トランジスター及びコンビナトリアル薄膜技術、工藤チームの可視光応答性光触媒の設計指針とソーラーハイドロジェン生成の実証実験などがあり、今後の展開に期待が持てる。
- ⑤ 社会的及び経済的な効果・効用に資する研究成果で、実用化に近い経済・産業への展開に繋がる取り組みに該当する研究は、鯉沼チームのコンビナトリアル MBE 装置、有機膜 IR レーザー堆積装置、原子レベル平坦化酸化チタン基板などのパテントライセンスによる製品化、有機金属化学堆積法による酸化亜鉛発光デバイス薄膜の実用化に向けた産学共同研究など、金村チームの燃料電池用プロトン伝導性コンポジット膜はダイレクトメーターノール型燃料電池用の電解質膜として Nafion 膜の 137 倍の性能を有しており、実用化が期待できる。

- ⑥ 社会的及び経済的な効果・効用に資する研究成果で、応用・実用化及び社会的価値に繋がる重要な発見・発明とその後の取り組みに該当する研究は、松本チームの金属基板テープによる線材適用性検討で、液体窒素温度の高磁場下で高温超伝導薄膜の世界最高の臨界電流密度を達成しており、実用化が期待できる。
- ⑦ 本研究終了後の発展に関して、NEDO 産業技術研究助成、JST 産学共同シーズイノベーション事業、新規 JST の CREST やさきがけ及び科研費特定領域などに採択された研究件数は19件を数え研究を継続して発展することが期待できる。

10. 総合所見

(1) 研究領域としての成果

① 課題の選考

- ・ 戦略目標「環境負荷を最大限に低減する環境保全・エネルギー高度利用の実現のためのナノ材料・システムの創製」は、原子・分子レベルで物質の組成・構造制御等を行い、機能触媒及び循環可能な新材料等の環境保全材料並びに、高効率エネルギー変換システム等のエネルギー利用高度化材料の開発を目指しており、原子・分子レベルでの組成・構造の制御から求める材料開発までを総合的に推進することを求めた。
- ・ そこで、単なる既存概念の延長ではなくナノテクノロジーを駆使した革新的技術シーズの創出、具体的な研究目標、充実した研究体制、研究の進め方、及び熱意にあふれた優れたオリジナリティーを有する研究リーダーの資質なども考慮して、提案課題を選考した。
- ・ 採択された課題は、太陽光水分解、熱電材料、光エネルギー変換用ナノシート、電界効果型光機能素子、全固体型エネルギー変換デバイス、燃料電池用ナノチューブ、超伝導材料、電力貯蔵デバイス及び燃料電池用電極のシミュレーションなど10課題で、いずれも意欲的な提案で、革新的技術シーズの創出と大きな成果が期待できた。結果として前述したように期待以上の成果をあげたチームも多くあり、選考方針が正しかった査証である。

② 領域運営

- ・ 基礎や応用研究を推進する上で最も重要なことは、研究リーダーの熱意であり、優れたオリジナリティーのある人のリーダーシップと活発な雰囲気が必要なファクターだと常日頃考えており、この基本的考え（研究は人である）に基づき、領域を運営した。その結果、領域として特筆すべき成果をあげた佐々木、河本及び山木の3研究代表者らは、リーダーシップを発揮し、当初予想できなかった新たな展開を行い国際水準から見ても一級の優れた成果をあげた。
- ・ 具体的には、採択課題の進捗状況把握・推進は、オンサイトミーティング、研究進捗会議などを通して把握し、アドバイザーの意見も加味して助言を与え推

進した。工藤や松本らの比較的若い研究代表者や博士課程の学生やポスドクなど若手研究者の成長と活躍が目覚しく、研究進展に大きく寄与した。また、テーマが多く研究が分散しているチームには、選択と集中を指導し、多くの成果をあげた。

- ・ 研究費の配算は、総括準備金を担保しておき、残りを研究テーマの必要度及び緊急度に応じて、当初配算し、担保した総括準備金は、成果を上げたチームへの特別追加研究予算、外人研究者招聘補助、若手研究者の成果報告会等の補助、英語論文添削費などに使用した。多くの研究者から適格でタイムリーな資金配分・援助のお陰で、研究の進展を見たとの報告を受けている。
- ・ その他、領域の成果報告（年報）、説明責任（ニュースレター及び書籍の出版）なども積極的に実施した。また、研究者間の活性化の為に、領域内、領域間の研究者の交流を行った。最終年度には、合同公開シンポジウムを開催し、企業からの参加者も多く、大変盛況であった。これも学術的な基礎研究の裏付けを十分行ないながら、インパクトあるアウトカムを目指した成果であろう。
- ・ 特許出願は、基本特許の取得や価値ある特許（ライセンス）の出願を目指して、特許出願を奨励し、国内特許 140 件、海外特許 26 件を出願し、3 件をライセンスし製品化した。基本特許と考えられる出願は、佐々木チーム 7 件、木島チーム 5 件、金村チーム 4 件、鯉沼チーム 4 件、工藤チーム 2 件、河本チーム 2 件、松本チーム 1 件、山木チーム 1 件であった。

③ 研究領域中間評価及び課題別事後評価を経て

- ・ 中間評価以降の研究方針は、選択と集中を重視し、インパクトある成果を目指した。中間評価以降、更にブレイクスルーや当初予想できなかった新たな展開があり急激な研究成果の進展を得て、目覚ましい成果をあげたチームも出てきた。
- ・ 以上のように本研究領域としての成果は、5 年間の全体研究計画、研究テーマの取捨・選択、研究費、研究期間、研究者のチーム構成、領域アドバイザー、研究事務所等による支援体制が全体として、上手く機能したことを示している。

（２） 本研究領域を設定したことの意義、科学技術に対する貢献、問題点等

① 本研究領域を設定したことの意義

- ・ 文科省の戦略目標に対応する研究領域を設定し、研究総括の下で課題選考から評価まで一貫して運営に当たる体制により、選出・運営した 10 課題の多くは、戦略目標の具体的な達成目標に掲げられている課題であり、「エネルギー」を「共通基礎キーワード」とする横串で俯瞰して運営することにより、相互に刺激しあい、期待以上の成果を上げ得た。
- ・ 具体的には、水素を作る（可視光水分解、複合電極による太陽光水分解）、電気を作る、ためる（熱電素子、リチウム電池、超伝導、燃料電池）、デバイス

を作る（コンビケム、ナノシート、固体イオニクス、白金ナノチューブ）であり、世界で初めての基礎的発見、世界記録の達成及び日常生活で直ぐに役立つようなデバイスの提案、新しい研究ジャンルの確立、基本特許の取得、パテントライセンスによる製品化など、CREST 本領域ならではの基礎から応用までの成果である。

② 科学技術に対する貢献

- ・ 研究を実施した結果と所見で詳細に述べたように、科学技術に対する貢献は数多く見られる。例えば、酸化チタンナノシート、チタン酸ストロンチウム系熱電変換材料、人工ピン導入の高温超伝導体、室温透明強磁性体、フラーレン系電界効果トランジスタ、コンビナトリアル薄膜技術、可視光応答性光触媒などである。

③ 社会及び経済に対する貢献

- ・ 同じく、研究を実施した結果と所見で詳細に述べたように、社会及び経済に対する貢献は、例えば、酸化チタンナノシート関連の実用化試験や企業との共同研究、パテントライセンスによる製品化（コンビナトリアル成膜装置、超平坦酸化チタン基板など）、有機金属堆積法による酸化亜鉛発光デバイスの実用化に向けた共同研究、全固体型リチウム電池関連の企業との共同研究、ナノサイズ化したリチウムイオン電池、熱電発電モジュール、ソーラーハイドロジェン生成の実証実験、77K で動作する大電流通電可能な高温超伝導線材などである。

④ 問題点

- ・ 研究代表者がプロジェクト期間の途中で大学等を退官し、他機関に移動して研究環境・体制が変化した場合でも、当初の研究費を保証するのか、それとも、その変化に対応して年度毎の見直し時に研究費の大幅削減などを実施すべきかなどの課題があった。
- ・ ポスドクの採用期間は、年度毎の契約であり、プロジェクト存続期間中の雇用を約束したものでないので、年度毎の厳しい評価・査定が望ましい。
- ・ 現行の CREST 研究では、研究期間中に価値ある新たな研究分野を創出しても、研究期間が終了すれば、CREST での継続研究は出来ない。その創出した研究分野の重要度が高ければ、評価を経て、継続研究できるシステムの再考が必要と考える。
- ・ 平成 16 年度から参画した燃料電池用電極のシミュレーションチームは、シミュレーションの基礎が出来、これから多くの成果が出始める時点でプロジェクトの終了を迎えた。継続研究して今後の展開を見守りたい。

(3) 今後への期待や展望

- ① 研究総括は、研究の実施結果のねらいとして、新しい基礎概念の提案や基本特許

の取得を基本とし、更に、論文数や特許出願数の件数（アウトプット）だけでなく、インパクトあるアウトカム（社会に役立つ成果）を目指した。それぞれにおいてかなりの成果をあげたと考えている。

- ② 新しい基本概念の提案に関しては、a) ナノシートと b) ナノブロックインテグレーションによる熱電変換材料をあげることが出来、それぞれのジャンルを確立した。特にナノシートは世界的に見ても特筆すべき成果をあげており、更なるジャンルの深耕と応用面での発展を期待したい。熱電変換材料の実用化により深刻な地球温暖化防止に繋がる技術として期待できるが、課題も多いものと思われるので、用途を特定した応用展開も今後は必要であろう。
- ③ 前項（２）の「科学技術に対する貢献」にあげたテーマで、a) 人工ピン導入の高温超伝導体は、現時点では世界記録を保持しているが、日米欧での実用化研究の競争が激しいので、日本でも NEDO などとの大型プロジェクトを組織し、超伝導線材の実用化検討を始めることを希望する。b) 室温透明強磁性体、フラーレン系電界効果トランジスタ及びコンビナトリアル薄膜技術などは、基礎研究から応用研究への移行期にあるので、もう一段の飛躍により製品化を期待したい。
- ④ 前項（２）の「社会及び経済に対する貢献」にあげたテーマで、酸化チタンナノシート関連の実用化試験、パテントライセンスによる製品化（コンビナトリアル成膜装置、超平坦酸化チタン基板など）、有機金属堆積法による酸化亜鉛発光デバイスの実用化に向けた共同研究、全固体型リチウム電池関連の企業との共同研究、ナノサイズ化したリチウムイオン電池、熱電発電モジュールなどは、企業との実用化試験や共同研究にまで進んでいるので、インパクトあるアウトカムを期待できる。

(4) 感想、その他

5 年半における研究をさせていただき、今は少しホッとしているところです。私たちのナノテクとエネルギーに関する研究者に配分していただいた研究費だけでも 40 億円以上という多額の研究費を使わせていただきました。領域の事務所経費や、サポートの人々の人件費などを加えるとトータルではどのくらいなのか、私にとりまして詳細はわかりませんが、いずれにしろ、貴重な税金を使わせていただいたわけで、厚くお礼を申し上げます。

10 チームのリーダーはもちろん研究員の方々、また周辺の学生の方々、さらに JST 本部の方々を含めて、多数の方々のご協力を頂き実施することができました。厚くお礼申し上げます。

研究成果として、予想以上の成果を出してもらったところでは、新聞やテレビでも成果を広く報道していただいたものも多く、各研究者の方々に感謝申し上げます。一方で、一部には期待した通りには成果が出なかったところもありますが、これも未知に向かったの挑戦としての結果ですのでやむを得ないところもありました。

5 年間以上にわたるこの期間中、貴重な研究成果をもとに、研究員の方々の昇任や転任などうれしいニュースも多くありました。終わりに近づいてきますと、さらにこの領域を続けることができたらの思いも起こります。すばらしい成果をあげた全体の三分の一ぐらいのチームは規模を小さくしてでも、研究を継続するシステムがあればとの思いもあります。システムとして検討していただけたらと思います。

子曰く、これを知る者はこれを好む者に如かず。これを好む者はこれを楽しむ者に如かず。論語(卷三第六雍也篇 20)

これは孔子の言葉です。研究を楽しむことができました。ありがとうございました。

以上