

戦略的創造研究推進事業  
－CRESTプログラム－

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」

研究領域中間評価用資料

平成18年3月14日

## 1. 戦略目標

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（平成14年度設定）

### 1. 名称

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（平成14年度設定）

### 2. 具体的な達成目標

原子・分子レベルで物質の組織・構造の制御等を行い、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す。この際、原子・分子レベルでの組織・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。

このため、2010年代に実用化・産業化を図るべく、以下のような成果等を目指す。

- ・太陽電池、熱電変換素子、超伝導電力貯蔵・超長距離送電、燃料電池、水素貯蔵用材料のナノ組織制御による画期的な高性能化
- ・環境に余分な負荷を与えず、資源を無駄なく利用し、エネルギー効率を極限まで高めた、高速・高効率・高選択的物質変換プロセスと循環型エネルギーシステムを実現するためのナノ構造制御触媒の設計指針の確立及び調製技術の開発
- ・ナノスケールオーダーの口径の微小な空間を持つ物質の微細構造を制御した、新たな触媒、分離膜、物質担体、光デバイス、電子デバイス等の創製
- ・熱効率70%を可能とする超高効率ガスタービン材、片手でも持ち上がる自動車ボディ材、その他金属・セラミックス・高分子及びカーボンナノチューブ等の新素材を複合した新機能を持つコンポジット材料の開発
- ・高機能・多機能化のためのナノ組織の設計の実現及び、地球温暖化防止・省エネルギーなどの環境材料、高度情報通信社会実現のための磁性材料等の革新的な金属材料の創製

### 3. 目標設定の背景及び社会経済上の要請

経済のグローバル化と国際競争の激化等に伴う産業競争力の低下、雇用創出力の停滞といった現下の経済社会の課題を科学技術、産業技術の革新により克服し、我が国の産業競争力を強化し、経済社会の発展の礎を着実に築くことが不可欠である。このような革新的な科学技術、産業技術の発展の鍵を握るものとして、ナノレベルで制御された物質創製、観測・評価等の技術であるナノテクノロジーが、近年急速に注目されている。

具体的には、多機能、多段階に機能する触媒、エネルギー貯蔵・変換効率の飛躍的に向上した材料開発等が特に求められる。

また、これらの実用化・産業化の目標を達成するためには、ナノレベルでの計測・評価、加工、数値解析・シミュレーションなどの基盤技術開発や、革新的な物性、機能を有する新物質創製への取組みが必須である。

なお、総合科学技術会議分野別推進戦略（平成13年9月）においても、環境・エネルギー分野においては、国家的・社会的課題の克服のため、「環境保全・エネルギー利用高度化材料」が5つの重点領域の1つとして位置づけられているところである。

#### 4. 目標設定の科学的な裏付け

将来の我が国経済社会の持続的な発展のため、リデュース、リユース、リサイクルを実現し、かつ廃棄物の適正処分や自然循環機能の活用等を図ることにより、天然資源の消費が抑制され、環境負荷が可能な限り低減される循環型社会の構築を図ることが必要である。物質・材料技術は、このような資源循環型技術の中でも主要な役割を担う技術の1つである。

また、エネルギー分野においても、エネルギーインフラを高度化していくために必要な研究開発として、燃料電池、太陽光発電のためのエネルギー変換材料、エネルギー機器・インフラ等各種材料の開発が求められているところである。

産業界においてもその取り組みの強化が図られている環境保全・エネルギー利用高度化材料については、既存の材料分野を越えた多機能・多段階に機能する触媒等の環境保全材料、革新的にエネルギー変換効率を向上させた燃料電池材料等のエネルギー利用高度化材料をはじめとした各種のナノ構造制御材料開発により積極的な取り組みを行うことが必要不可欠。

具体的には、

- ・エネルギー貯蔵・変換材料については、既に、太陽電池、2次電池、水素吸蔵材料等様々な材料や製品が作られているが、エネルギー変換効率が未だ不十分であることから、ナノ組織制御材料により効率向上を目指すことが必要である。
- ・高効率生産、環境浄化、エネルギー変換用などの触媒は現在までにおいても、多大な進化を遂げてきているが、ナノ構造を完全に制御した触媒により、必要な機能を単一の触媒上に付与する技術開発、多段階の合成プロセスについて、次々に機能する触媒開発、光機能触媒開発等への取り組みが求められている。
- ・複合剤の研究は、金属系、セラミックス系、高分子系等既に様々な分野で進められているが、製造コスト、特性劣化の問題等により、製品としては、スポーツ用材料といった比較的小型の製品に限られている。発電用ガスタービン等、大型構造部材への応用のためにナノ複合化が急務である。

#### 5. 重点研究期間

ナノテクノロジー分野については、競争が激しく多くの研究領域を推進する必要があるため初年度のみ公募とし、次年度以降には新たに同じ研究領域での公募は行わない。1研究課題は概ね5年の研究を実施する。(なお、優れた研究成果をあげている研究課題については、厳正な評価を実施した上で、研究期間の延長を可能とする。)

## 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。

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る。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る。

### 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

(百万円)

採択年度	研究代表者	所属・役職	研究課題	研究費
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創製	311
	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用	322
	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	348
	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	485
	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の創製	336
	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	542
	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	530
	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	406
	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	376
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	209
			<b>総研究費</b>	3,865

## 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は、食料を得て健康を維持することと同様に最重要課題です。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ています。

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ます。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す。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だと思います。

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が取得できればと思っています。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思っています。

## 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ている。

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行いました。

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る。

## 7. 領域アドバイザー

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・研究科長	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

### 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、この基本的考えに基づき、領域を運営している。

### 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ている。
- 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名体制で実施しているが、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する。
- 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チームに配算する。
- 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する。各チーム1～2名で、総勢15名程度）
- 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ている。）
- Tryk 先生（臨時アドバイザー）による英語論文添削費補助（年間20件程度）

- 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年報（Annual Research Report）（原著論文の全文掲載他）発行
  - ・ ニュースレター（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）発行
  - ・ 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する本を出版すべく企画し、現在、研究代表者が執筆中で、H18年9月に出版予定）
- ⑥ 領域内、領域間の研究者の交流
  - ・ チーム間の交流：鯉沼－中戸チーム(高品質 TiO<sub>2</sub>)共同研究
  - ・ ミニシンポ：鯉沼－佐々木チーム（International Mini-Workshop on Nano and Combinatorial Technologies for Materials and Devices）
  - ・ 領域間シンポ：京大・松本－大阪府立大・石田－名大・藤巻チーム（超伝導関連領域横断ジョイント国際ワークショップ）
- ⑦ 特許出願
  - ・ 知的財産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。平成17年上期までに、国内特許91件及び国際特許8件を出願し、1件のライセンス中である。
- 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、厳しく評価している。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る。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ている。必要なら、資金面での補助も行ない、バックアップしている。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ている。
- ⑨ 中間評価
  - ・ 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（- 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。

以上述べてきたように、領域として限られた期間、予算の中で、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ている。

## 9. 研究の経過

全ての研究代表者は、研究計画を着実に遂行しており、多くの目覚しい成果が一流の学術雑誌等に掲載され、世界的に注目されて、新聞等にも取り上げられている。それらの中で、領域として特筆すべき成果を上げたのは、以下の3チームである。

### (1) 佐々木チーム

- ・ 本チームは、酸化チタンナノシートから出発し、各種ナノシートの創製、ナノシートの物性解明・構造解析法などの確立、各種ナノシート集積化技術の開発及びデバイス・システムの開発など、ナノシートの基礎から応用展開まで進めており、国際的に見ても独創的かつ先導的な研究であり、得られている成果は、層状コバルト酸化物超伝導体や磁性金属ドーパ酸化チタンナノシートをはじめとして世界的に注目されている。

- ・ その中で、層状コバルト酸化物超伝導体は、コバルト酸化物系で初めて報告された超伝導体として非常に高い注目を集め、その論文（Nature2003）は被引用回数が300回を超えた。
  - ・ 更に、磁性元素をドーピングした酸化チタンナノシートが紫外光に応答する巨大磁気光学効果を発現することを見出しており、高密度メモリー、高速・大容量情報通信に新しい手がかりを与え、環境保全・エネルギーの高度利用の戦略目標に向けて、光機能性ナノ構造材料の創製への展開が期待される。
- (2) 松本チーム
- ・ 本チームは、高温超伝導体中に APC（人工ピンニングセンター）を導入し、これらによって磁束量子を強力にピンニングして高温超伝導体の臨界電流密度(Jc)を飛躍的に向上させることをめざしており、世界記録を達成し新聞報道され世界的に注目された。本チームは、日本の高温超伝導線材開発の基礎部分を担い、米国との競争の矢面に立っており、米国のキャッチアップを受けているが、現時点で世界記録を維持している。
  - ・ 高温超伝導線材の実現は、戦略目標に合致し、更に、社会的インパクトも大きいいため、NEDO などとの共同協力体制も視野に入れ、研究を展開する。
- (3) 工藤チーム
- ・ 本チームは、可視光水分解を目指した光触媒ライブラリーの構築を目指しており、バンドエンジニアリング、ナノ構造、ソフト合成、結晶構造解析、電気化学測定及び時間分解測定などを駆使して行い、当初計画以上の進捗である。特に、粉末系光触媒は、種類及び活性において、世界トップレベルにある。
  - ・ これらの成果は、新聞掲載や「愛・地球博（2005年愛知万博）」の光未来展出展及び「国際光触媒展 2005」に出展され、好評を博した。
  - ・ 可視光水分解の実現は、戦略目標に密にミートする研究であり、太陽光エネルギー変換効率の目標3%を達成できれば、約10,000m<sup>3</sup>/hkm<sup>2</sup>の速度で水から水素を製造することが可能となり、地球規模でのエネルギー・環境問題への貢献が期待できる。
- (4) その他注目すべき成果
- ① 界面二次元電子ガスによる巨大熱電変換特性の発見（河本チーム）
  - ② 全固体型リチウム二次電池（金村チーム）
  - ③ ZnO の室温エキシトン発光や青色接合素子の実証、TiO<sub>2</sub> の透明トランジスタ（鯉沼チーム）
  - ④ 大電流用リチウム電池、電気化学キャパシタ（山木チーム）
  - ⑤ HI の H<sub>2</sub> と I<sub>2</sub> への太陽光分解（中戸チーム）
  - ⑥ 白金ナノグループ担持カーボン（木島チーム）

## 10. 総合所見

- (1) 現時点での研究領域としての成果（課題選考、領域運営、中間評価等を総合して）
- 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ている。
    - ・ 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、領域を運営している。
- 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ている。
- 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ている。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ている。
- 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、特許出願を奨励している。

## ③ 中間評価

- 中間評価の時点ですで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）に領域として研究資金面でバックアップし、更なる研究の進展を期待する。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（- 評価）には、それぞれの状況に応じてアドバイザーの意見も入れ、アドバイス（テーマの方向付け、研究者の査定）及び支援を行った。

## (2) 研究領域が存在したことによるメリット、基礎研究に対する功績、問題点等

### ① 本研究領域が存在したことによるメリット

- 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（コンピケム、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ちそうなデバイスの提案など、CREST本領域ならではの基礎から応用までの成果である。

### ② 基礎研究に対する功績

- コバルト酸化物系での超伝導体（世界初の発見）、APC（人工ピンニングセンター）を導入した高温超伝導体（世界記録達成）、水の可視光全分解光触媒、TiO<sub>2</sub>透明トランジスタ、界面二次元電子ガスによる巨大熱電変換素子等の基礎研究で成果をあげ、各分野でのパイオニヤとして貢献している。

### ③ 問題点等

- 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る。

- ・ポストクの採用期間は、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ため、年度毎の厳しい評価・査定が望ましい。
- ・最終年度（平成 19 年度）は、半年分の研究予算で 1 年間運営することになっており、ポストク人件費の捻出が課題となる。
- ・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 年度から燃料電池用電極のシミュレーションチームが参画したので、電極シミュレーションだけでなく、他チームと別テーマでの共同研究（シミュレーションサポート）も期待したが、シミュレーションチームの陣容及び残りの期間等の問題で実施出来なかった。

### (3) 研究領域単位で研究を遂行することの意義

- ① 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、総括の責任と采配部分が増える。共通基礎キーワード（戦略目標）で選択した研究者は、他研究者の異なった研究思考や研究方法などを参考に、時には、刺激・啓蒙しあい切磋琢磨する中に、総括の指導やアドバイザーの意見が加わるので、更なる新展開が期待できる。
- ② 更に、領域間でも同じような情報交換と相互刺激・啓蒙によりバーチャルラボ全体の発展が期待できる。

### (4) 感想、その他

- ・当領域の 3 年間の研究の成果として、基礎研究分野では、層状コバルト酸化物超伝導体、磁性元素ドーパ酸化チタンナノシート、APC（人工ピンニングセンター）導入高温超伝導体、可視光水分解光触媒、ZnO の青色発光、界面二次元電子ガスによる巨大熱変換特性などがあり、戦略目標の実現に向け、将来に多いなる期待が持てる。これらの中には、当初予想しなかった発見があり、大きく育ちつつあるテーマも含まれる。一方、実用面に近い研究では、全固体リチウム二次電池、電気化学キャパシタ及び超平坦化酸化チタン基板などが企業との共同研究のレベルに達しており、明日の我々の生活に役立つエネルギー貯蔵・変換材料として楽しみである。
- ・特に、APC 導入高温超伝導体は、日本の高温超伝導線材開発の基礎部分を担い、日米間の開発競争の渦中にあるので、領域として全面的なバックアップを図り、他国に先駆けて高温超伝導社会を実現させ、我々の活動に必要なエネルギーを確保して快適な環境創生に寄与したい。
- ・更に、領域内外での情報交換や共同実験を通じて、活発な領域の良い雰囲気の下で切磋琢磨し、明日の日本の基礎研究を担う若手の研究者を育てたい。
- ・最後に、評価の方法であるが、論文数や特許申請数などのアウトプットの数だけでの評価では、表面上のものになってしまう。一般概念の提案、新しい領域の創成にかかわる提案などを特に評価したいし、長期的・多面的視野から見た評価も必要である。最近、アウトカム評価が必要であると言われており、アウトプットを活かして作られた製品やアウトプットを基として考え出された概念に注目して、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を尺度とする評価（アウトカム）が重要であると考えます。

領域評価用資料 添付資料 (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」

1. 応募件数・採択件数

採択年度	応募件数	面接件数	採択件数
平成 14 年度	67	14	9
平成 15 年度	28	3	0
平成 16 年度	13	3	1
採択数 計			10

2. 主要業績

2-1 外部発表及び特許出願

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」(H14.11~H17.9)

(年度毎)

年度	論文		口頭発表		総説		外部発表	特許	
	国内	海外	国内	海外	国内	海外	合計	国内	海外
H14下	2	33	142	18	10	3	208	6	0
H15	18	196	475	215	45	8	957	32	1
H16	26	298	606	328	48	4	1310	41	7
H17上	15	208	258	143	46	9	679	12	0
領域合計	61	735	1481	704	149	24	3154	91	8

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」(H14.11～H17.9)

(研究代表者毎)

	チーム	論文		口頭発表		総説		外部発表	特許	
		国内	海外	国内	海外	国内	海外	合計	国内	海外
H 14下 年度	金村	0	1	1	0	0	0	2	0	0
	木島	0	0	5	0	0	0	5	0	0
	工藤	0	4	15	2	0	0	21	1	0
	鯉沼	0	4	36	2	10	2	54	1	0
	河本	1	11	28	10	0	0	50	0	0
	佐々木	0	5	15	1	0	0	21	4	0
	中戸	1	7	36	3	0	1	48	0	0
	松本	0	0	4	0	0	0	4	0	0
	山木	0	1	2	0	0	0	3	0	0
	小計	2	33	142	18	10	3	208	6	0
H 15 年度	金村	1	12	33	16	10	1	73	4	0
	木島	0	7	16	7	0	0	30	1	0
	工藤	0	19	56	9	0	0	84	4	0
	鯉沼	0	36	39	36	11	2	124	6	0
	河本	11	31	89	29	0	0	160	3	0
	佐々木	0	35	57	44	10	0	146	4	1
	中戸	3	33	99	51	9	5	200	2	0
	松本	3	10	36	1	3	0	53	5	0
	山木	0	13	50	22	2	0	87	3	0
	小計	18	196	475	215	45	8	957	32	1
H 16 年度	金村	0	22	65	27	6	0	120	5	0
	木島	1	19	31	12	3	0	66	7	0
	工藤	0	15	74	22	0	0	111	2	0
	鯉沼	4	78	55	77	25	2	241	9	3
	河本	10	41	132	33	0	0	216	5	1
	佐々木	0	49	69	32	4	0	154	7	0
	山木	2	28	56	37	7	1	131	1	1
	中戸	3	32	65	44	3	1	148	3	1
	松本	6	14	55	44	0	0	119	2	1
	池庄司	0	0	4	0	0	0	4	0	0
	小計	26	298	606	328	48	4	1310	41	7
H 17上 年度	金村	1	28	43	13	3	4	92	0	0
	木島	1	11	12	5	1	0	30	4	0
	工藤	0	9	23	12	0	0	44	0	0
	鯉沼	4	30	1	6	3	0	44	0	0
	河本	8	22	16	31	0	0	77	0	0
	佐々木	0	24	15	27	23	0	89	4	0
	中戸	1	20	71	25	5	2	124	0	0
	松本	0	33	23	8	4	0	68	0	0
	山木	0	30	47	12	6	3	98	4	0
	池庄司	0	1	7	4	1	0	13	0	0
	小計	15	208	258	143	46	9	679	12	0
	領域合計	61	735	1481	704	149	24	3154	91	8

研究課題名：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創製  
研究代表者：金村 聖志（首都大学東京）

(1) Kiyoshi Kanamura, Nao Akutagawa and Kaoru Dokko, "Three dimensionally ordered composite solid materials for all solid-state rechargeable lithium batteries", *Journal of Power Sources*, **146**, 86-89 (2005).

全固体型電池の電極を三次元規則配列複合構造体にすることにより、全固体電池の高容量化を目指している。このような電池設計概念はこれまでにない全く新しいアイデアであり、これを実現するため要素技術の確立に取り組んでいる。その結果、多くの電池メーカーが関心を示している。

(2) Kiyoshi Kanamura, Toshinori Mitsui, Hirokazu Munakata, "Preparation of Composite Membrane between Uniform Porous Silica Matrix and Injected Proton Conductive Gel Polymer", *Chemistry of Materials*, **17**(19), 4845-4851 (2005).

固体高分子型燃料電池用電解質として、ナフィオンよりも安価で安定性に優れたコンポジット電解質膜の研究開発を行っている。これまでも無機・有機コンポジット電解質に関する研究は多くの報告例があるが、逆オパール型マトリックス材料（シリカまたはポリイミド）とポリマー電解質との複合化により電解質膜に寸法安定性と自立性を付与し、高いプロトン伝導性と機械強度を両立した点で画期的といえる。また、このコンポジット膜はメタノール透過性が低く、直接メタノール型燃料電池への応用が可能であり、すでに数社と共同研究を始めている。

(3) Md. Abu Bin Hasan Susan, Taketo Kaneko, Akihiro Noda, and Masayoshi Watanabe, "Ion Gels Prepared by In Situ Radical Polymerization of Vinyl Monomers in an Ionic Liquid and Their Characterization as Polymer Electrolytes", *Journal of the American Chemical Society*, **127**, 4976-4983 (2005).

イオン液体はリチウム電池や燃料電池などの電気化学エネルギー変換デバイスの電解質として期待されている。イオン液体をイオンゲルとして固体化に成功したのは世界で最初であり、イオンゲル中に種々の機能を創り込む点は世界的にも独創的な研究である。

研究課題名：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用  
研究代表者：木島 剛（宮崎大学）

(1) Kijima, T. Yoshimura, M. Uota, T. Ikeda, D. Fujikawa, S. Mouri, S. Uoyama, "Noble Metal Nanotubes (Pt, Pd, Ag) from Lyotropic Mixed Surfactant Liquid-Crystal Templates", *Angewandte Chemie International Edition*, **143**, 228-232 (2004).

2種類の界面活性剤を用いる複合鋳型法を独自に開発し、これを白金塩の還元に応用することにより外径 6nm、内径 3nm の白金ナノチューブを合成することに成功するとともに、構造モデルの計算により、C<sub>12</sub>E<sub>9</sub> と Tween60 から成る円筒状ミセルがヘキサゴナル状に配列した液晶が形成され、そのミセル水和殻内で Pt 塩の還元とチューブ状白金への成長が起こることを明らかにした。この成果は、世界で最も細い白金チューブの発見として米国化学会の Chemical & Engineering News (2004)にも紹介された。

(2) H. Kawasaki, M. Uota, T. Yoshimura, D. Fujikawa, G. Sakai, M. Annaka, and T. Kijima, "Single-Crystalline Platinum Nanosheets from Nonionic Surfactant 2-D Self-Assemblies at Solid / Aqueous Solution Interfaces", *Langmuir*, in press (2005).

固液（グラファイト／界面活性剤水溶液）界面に形成させた半円筒ミセル2次元液晶上でのヒドラジンによる白金塩の還元反応を調べ、新規素材である厚さ～3.5nm の白金ナノシートが生成することを見いだすとともに、ポリオキシエチレン3本鎖を有する鋳型成分（Tween60）

が液晶系でのチューブ状ならびにシート状白金の生成に不可欠の役割をしていることを明らかにした。

(3) Uota, H. Arakawa, N. Kitamura, T. Yoshimura, J. Tanaka, T. Kijima, "Synthesis of High Surface Area Hydroxyapatite Nanoparticles by Mixed Surfactant-Mediated Approach", *Langmuir*, **21**, 4724-4728 (2005).

アパタイトは生体材料としてだけでなく、光触媒（酸化チタン）担体としても用いられ、その比表面積の向上が望まれている。本論文では、複合鋳型法をリン酸カルシウム系に適用し、ステアリン酸 Ca で被覆されたカプセル型前駆体を経て従来の2倍以上の比表面積  $364\text{m}^2/\text{g}$  をもつ高表面積ヒドロキシアパタイトナノ粒子を合成することに成功した。これにより白金系で開発した複合鋳型法が従来法では困難な新規素材の合成手法としても有用であることが示された。

**研究課題名：可視光水分解を目指したナノ構造体光触媒の創製**  
**研究代表者：工藤 昭彦（東京理科大学）**

(1) H. Kato, K. Asakura, and A. Kudo, "Highly Efficient Water Splitting into  $\text{H}_2$  and  $\text{O}_2$  over Lanthanum-Doped  $\text{NaTaO}_3$  Photocatalysts with High Crystallinity and Surface Nano-Structure", *J. Am. Chem. Soc.*, **125** [10], 3082-3089 (2003).

ランタンをドーピングしたタンタル酸ナトリウム光触媒が、水の完全分解反応に量子収率 50% という非常に高い活性を示した。この高活性は、光触媒の微結晶性と特徴的な表面ナノ構造によることがわかった。

紫外光照射下ではあるが、水の完全分解に世界最高活性を示す光触媒である。愛知万博や国際光触媒展に出展され、新聞や雑誌に取り上げられた。そして、多くの方から称賛を得た。現在は光触媒ミュージアムに展示されている。

(2) H. Kato, M. Hori, Y. Konda, Y. Shimodaira, and A. Kudo, "Construction of Z-Scheme-Type Heterogeneous Photocatalysis Systems for Water Splitting into  $\text{H}_2$  and  $\text{O}_2$  under Visible Light Irradiation", *Chem. Lett.*, **33** [10], 1348-1349 (2004).

われわれが独自のバンドエンジニアリングで開発した可視光応答型光触媒 Pt/SrTiO<sub>3</sub>:Rh と BiVO<sub>4</sub> を組み合わせて、Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> メディエーターを介在させることにより、水の可視光全分解に成功した。440nm での量子収率は 0.3% であり、520nm までの可視光が利用できた。

太陽光照射下でも活性を示す水の可視光全分解の光触媒である。可視光水分解の粉末系光触媒の中では、もっとも高活性で長波長までの可視光に応答するという特徴を持つ。

(3) I. Tsuji, H. Kato, and A. Kudo, "Visible-Light-Induced  $\text{H}_2$  Evolution from an Aqueous Solution Containing Sulfide and Sulfite over a ZnS-CuInS<sub>2</sub>-AgInS<sub>2</sub> Solid Solution Photocatalyst", *Angew. Chem., Int. Ed.*, **44**, 3565-3568 (2005).

固溶体形成というバンドエンジニアリングにより、可視光応答性 ZnS-CuInS<sub>2</sub>-AgInS<sub>2</sub> 光触媒を開発した。還元剤を含む水溶液からソーラーシミュレーター照射下で 8 リットル/時  $\text{m}^2$  の速度で水素を製造できた。

廃硫黄化合物を含む水溶液から太陽光照射下で水素を効率良く生成する光触媒である。コストの問題はあるが、水素製造に対して実用の可能性を秘めた光触媒である。高いインパクトを持つ *Angew. Chem.* からプレス発表された論文で、その結果ドイツやアメリカの web や雑誌にその内容が取り上げられた。また、それ以前に日経産業新聞にも掲載された。

**研究課題名：電界効果型ナノ構造光機能素子の集積化技術開発**  
**研究代表者：鯉沼 秀臣（東京大学）**

(1) A. Tsukazaki, A. Ohtomo, T. Onuma, M. Ohtani, T. Makino, M. Sumiya, K. Ohtani, S. F.

Chichibu, S. Fuke, Y. Segawa, H. Ohno, H. Koinuma, M. Kawasaki, "Repeated temperature modulation epitaxy for p-type doping and light-emitting diode based on ZnO", *Nature Materials*, **4(1)**, 42-46, 2005.

酸化亜鉛は安価で高効率な青色・紫外発光材料として注目されていたが、p型材料の作製は困難であり、pn接合からの電流注入発光の成功例はなかった。高い結晶性を維持し、かつ十分な窒素ドーピングを両立させるために成長温度変調法を新たに開発し世界で初めて酸化亜鉛pn接合の青色発光に成功した。

(2) Y. Yamamoto, K. Nakajima, T. Ohsawa, Y. Matsumoto, H. Koinuma, "Preparation of atomically ultra-smooth TiO<sub>2</sub> single crystal surfaces and their photochemical property", *Jpn.J. Appl. Phys. Express Letter*, **44**, 511-514, 2005.

フッ酸溶液処理と高温熱処理を組み合わせることによって酸化チタン単結晶基板の様々な方位の表面について原子レベル平坦な面を得ることに成功した。光触媒活性などの基礎的なデータを得るための標準的な表面として用いることができるだけでなく、基板材料としても重要な意味を持つ。原子レベル平坦面を用いることにより、コバルトドーピング室温透明強磁性体の低温成長が可能となることや、世界で初めて酸化チタン電界効果トランジスタの動作に成功するなど、応用面でも重要な技術である。

(3) J. Yamaguchi, S. Yaginuma, M. Haemori, K. Itaka, H. Koinuma, "An in-situ fabrication and characterization system developed for high performance organic semiconductor devices", *Jpn.J. Appl. Phys. Part 1, Selected Issue "Organic Devices and Related Science and Technology"*, **44(6A)**, 3757-3759, 2005.

酸素・水などの大気に非常に弱い有機半導体のポテンシャルを十分に引き出すために、製膜装置・電気評価装置の組み合わせで構成されるIn-situデバイス作製装置を開発した。この装置で作製されたトップコンタクト型のC<sub>60</sub>有機トランジスタは、有機n型トランジスタとしては最高値である1.4cm<sup>2</sup>/Vsという高い移動度を示した。有機トランジスタは、p型についてはアモルファスシリコンの移動度(1cm<sup>2</sup>/Vs程度)を上回る移動度が報告されており、値としては既に実用レベルにある。しかしながら、n型の移動度はこれまで上回るものがなく、実用上大きな隘路となっていた。

**研究課題名：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の創製**  
**研究代表者：河本 邦仁 (名古屋大学)**

(1) Ohta, T. Nomura, H. Ohta, M. Hirano, H. Hosono and K. Koumoto, "Large Thermoelectric Performance of Heavily Nb-doped SrTiO<sub>3</sub> Epitaxial Film", *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 092108 (2005).

世界最高のZT(無次元性能指数)を示すn型酸化物熱電変換材料を報告した論文である。すでに、ライトドーピングNb-SrTiO<sub>3</sub>単結晶の特性評価から、ヘビードーピングNb-SrTiO<sub>3</sub>が極限值としてZT=0.34 at 1000 Kが達成できることを予測した(J. Appl. Phys., 97, 034106 (2005))を受けて、本論文ではエピタキシャル薄膜を用いた研究によりZT=0.37 at 1000 Kが達成可能なことを実証した。また、さらに高いZTを発現する材料を創製するためのナノブロックの有力な候補になることを提案した。

本CRESTプロジェクトで世界初かつ最高のZTを持つn型酸化物熱電変換材料を見出した論文である。

(2) A. Satake, H. Tanaka, T. Ohkawa, T. Fujii and I. Terasaki, "Thermal conductivity of the thermoelectric layered cobalt oxides measured by the Harman method", *J. Appl. Phys.*, **96**, 931-933 (2004).

CoO<sub>2</sub>層間のレーヤーが異なる3種類の層状コバルト酸化物単結晶について、Harman法により面内熱伝導率を初めて明らかにし、層間レーヤーの構成元素が重くなって厚みが増す効

果がミスフィットの効果より大きく熱伝導に影響することを見出した。また、本CRESTのコンセプトであるナノブロックインテグレーションの有効性についても議論している。

本プロジェクトの基本概念である「ナノブロックインテグレーション」が、高効率酸化物熱電変換材料を開発する上で極めて有効なことを実験的に示した論文である。

(3) R. Funahashi, S. Urata, K. Mizuno, T. Kouuchi and M. Mikami, “Ca<sub>2.7</sub>Bi<sub>0.3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub>/La<sub>0.9</sub>Bi<sub>0.1</sub>NiO<sub>3</sub> thermoelectric devices with high output power density”, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 1036-1038 (2004).

酸化物熱電モジュールの実用化には避けて通れない、低い接触抵抗と高い機械強度を有する電極接合の形成に関する論文。従来の酸化物熱電モジュールは市販の銀あるいは白金ペーストなどで電極が形成されていた。しかしこの方法では、接触抵抗が高くなることと、高温で発電を行った後、モジュールを室温まで冷却する段階で酸化物素子とペースト部が容易に剥離してしまう問題があった。本論文では市販の銀ペーストに共剤として p 型の酸化物粉末を混合するだけで、これらの問題が解決でき、優れた発電出力を示し、繰り返し使用にも耐えうる素子の作製に成功した。

この論文の成果は後に実用可能な酸化物モジュールの製造につながっており、熱電酸化物発電の実現に向けたマイルストーン的な成果といえる。

**研究課題名：光機能自己組織化ナノ構造材料の創製**

**研究代表者：佐々木 高義（物質・材料研究機構）**

(1) K. Takada, H. Sakurai, E. Takayama-Muromachi, F. Izumi, R. A. Dilanian, T. Sasaki, “Superconductivity in Two-Dimensional CoO<sub>2</sub> Layers”, *Nature*, **422**, 53-55 (2003).

層状コバルト酸化物 Na<sub>0.7</sub>CoO<sub>2</sub> をソフト化学的に酸化後、水和処理を行うと、層間距離が約 2 倍に拡大し 4.7K で超伝導性を示すことを発見した。構造解析の結果、層間に水分子層が 2 層挿入されたため CoO<sub>2</sub> 層の間隔が大きく広がったことが判明した。これにより CoO<sub>2</sub> 層の 2 次元性が高まったことが超伝導性発現の主要な要因と考えられる。

新しいナノシートを合成しようとした過程でセレンディピティックに得られた成果である。コバルト酸化物で初の超伝導体であり、精力的な研究が行われてきている銅酸化物超伝導体との対比の意味からも大きな反響を得ている。本論文の被引用回数はすでに 300 回近くに達しており、2003 年～2004 年の 2 年間に物理分野で発表された全論文中で第 2 位にランクされた。このように注目度が高いことに加えて、本プロジェクト研究の中でナノシートの電子、磁気的特性に着目する契機となり、紫外光に応答する巨大磁気光学効果の発見など最近の新展開につながってきている。

(2) N. Sakai, Y. Ebina, K. Takada, T. Sasaki, “Electronic Band Structure of Titania Semiconductor Nanosheets Revealed by Electrochemical and Photoelectrochemical Studies”, *Journal of the American Chemical Society*, **126**, 5851-5858 (2004).

酸化チタンナノシートを導電性透明ガラス基板上に累積し、これを作用極として分光電気化学および光電気化学測定を行った。得られたデータの詳細な解析によりフラットバンド電位、バンドギャップエネルギーを定量的に決定した。その結果酸化チタンナノシートが半導体として機能することを確認するとともに、ナノシート固有の 2 次元ナノ状態に基づき量子閉じ込め効果が発現することを初めて見いだした。

目覚ましい展開が続いている酸化チタンの新しいナノ素材に位置づけられる「ナノシート」の電子状態を明らかにしたものであり、酸化チタン系材料での電子状態とナノ構造の関係を理解する上で大きな意義がある。さらに得られた知見は本プロジェクト研究で目標としてい

るナノシートをビルディングブロックに利用したエネルギー変換材料、電子デバイスなどの開発にとって不可欠で、極めて重要なものと位置づけられる。

(3) T. Tanaka, K. Fukuda, Y. Ebina, K. Takada, T. Sasaki, “Highly Organized Self-Assembled Monolayer and Multilayer Films of Titania Nanosheets”, *Advanced Materials*, **16**, 872-875 (2004).

酸化チタンナノシートを基板上に自己組織化吸着させた後、超音波処理することにより、基板表面をすき間なく被覆できることを見いだした。これにより原子レベルで平滑で、かつ厚み1ナノメートルの酸化チタンコーティングが可能となった。さらに上記操作を反復することによって秩序性の極めて高い高品位多層ナノ薄膜の構築にも成功した。

本成果により表面がナノレベルで平滑で、かつ厚みを1ナノメートル単位で制御可能な酸化チタンコーティング技術が実現できた。得られたナノシート超薄膜を加熱することによりアナターゼナノ結晶が緻密に集合した薄膜も得られた。これらのナノシート薄膜およびアナターゼ薄膜は高い光誘起親水化特性を示すことが明らかになり新幹線車輛の窓などへのセルフクリーニングコーティングとしての応用につながりつつある。

**研究課題名：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**  
**研究代表者：中戸 義禮 (大阪大学)**

(1) Ryuhei Nakamura and Yoshihiro Nakato, “Primary Intermediates of Oxygen Photoevolution Reaction on TiO<sub>2</sub> (Rutile) Particles, Revealed by In Situ FTIR Absorption and Photoluminescence Measurements”, *J. Am. Chem. Soc.*, **126**, 1290 (2004).

In situ 内部多重反射 FTIR 法に改良を加え、低波数領域を高感度化することにより、光酸素発生反応時に TiO<sub>2</sub> 微粒子表面に生成する反応中間体(表面過酸化物)の直接検出に成功し、これをもとに、この反応が表面正孔への H<sub>2</sub>O の求核攻撃により開始するという新しい機構を明らかにした。この結果は、光酸素発生という重要な反応の分子論的機構の解明として世界で初めてのものであり、今後の可視光応答性光触媒(光電極)の開発にこれまで思いも及ばなかったような重要な視点を切り開いた。

(2) S. Takabayashi, M. Ohashi, K. Mashima, Y. Liu, S. Yamazaki, and Y. Nakato, “Surface Structures, Photovoltages, and Stability of n-Si (111) Electrodes Surface-Modified with Metal Nano-Dots and Various Organic Groups”, *Langmuir*, **21**, 8832-8838 (2005).

Si 表面を光塩素化した後、グリニア試薬またはアルキルリチウムと反応させる方法により、鎖長の異なる種々のアルキル基 (C<sub>n</sub>H<sub>2n+1</sub>, n=1, 4, 6) の被覆に成功し(被覆率 C<sub>1</sub> の場合で 50-70%)、この上に白金ナノ粒子を担持した Si 電極を作製して、アルキル鎖長、アルキル基や金属微粒子の被覆率、これらの分布の光電流-電位特性や電極の安定性に及ぼす影響を詳しく検討した。これにより、数 nm のサイズの金属粒子をまばらに担持し、高い被覆率でアルキル基を結合すれば、高効率で安定な Si 電極が得られることが明らかにし、新型の高効率・安定な Si 電極の作製方法を確立した。

(3) Ryuhei Nakamura, Tomoaki Okamura, Naomichi Ohashi, Akihito Imanishi, and Yoshihiro Nakato, “Molecular Mechanisms of Photo-induced Oxygen Evolution, PL Emission, and Surface Roughening at Atomically Smooth (110) and (100) n-TiO<sub>2</sub> (Rutile) Surfaces in Aqueous Acidic Solutions”, *J. Am. Chem. Soc.*, **127**, 12975 (2005).

TiO<sub>2</sub> 電極において、光酸素発生反応が、表面捕捉正孔への H<sub>2</sub>O の求核攻撃で開始されるという機構はすでに発表しているが、この論文では、原子レベルで平坦かつ安定な TiO<sub>2</sub> (rutile) (110), (100) 面の作製に成功し、これを電極に用いてこの機構を詳しく調べ、この機構を疑う余地なく証明した。特に、光酸素発生下で起こる表面構造の原子レベルでの乱れの発生、

これによる PL 強度の減少を詳しく解析し、PL が surface-trapped hole と伝導帯電子の再結合から生じていること、surface-trapped hole は(110), (100)面のテラスでは安定で、H<sub>2</sub>O の求核攻撃は正孔がテラス上を表面拡散してステップに到着したときに起こることなどを明らかにした。多電子移動型の電極反応について、このような原子レベルの詳細な機構が明らかになったのは初めてであり、これは今後、表面光反応の機構のモデルとなる。

**研究課題名：ナノ組織制御による高臨界電流超伝導材料の開発**  
**研究代表者：松本 要（京都大学）**

(1) Kaname MATSUMOTO, Tomoya HORIDE, Ataru ICHINOSE, Shigeru HORII, Yutaka YOSHIDA and Masashi MUKAIDA, "Critical Current Control in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> Films Using Artificial Pinning Centers", *Japanese Journal of Applied Physics*, **44**, 7, L 246-L 248(2005).

松本チームで開発中の各種人工ピン技術のうち、基板表面の修飾によって YBCO 薄膜中に高密度の転位を導入して臨界電流密度を向上させる方法を述べた論文。高密度の転位は磁束量子の強いピン止め点として作用し、転位を導入していない同様の薄膜と比べ、高磁場中において著しい臨界電流密度の向上を達成した。薄膜中に人工的に結晶欠陥（この場合は転位）を導入する方法を具体的に提案し、その結果として特性の向上を世界で初めて実現していることに先見性がある。この方法は国内外の研究機関で追試され、同手法の有効性が確認されておりこの分野ではよく知られた方法となった。

(2) Yutaka YOSHIDA, Kaname MATSUMOTO, Yusuke ICHINO, Masakazu ITOH, Ataru ICHINOSE, Shigeru HORII, Masashi MUKAIDA and Yoshiaki TAKAI, "High-Critical-Current-Density Epitaxial Films of SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> in High Fields", *JJAP Express Letter*, **44**, 4, L129-L132(2005).

高い超伝導特性を有するが成膜のむずかしかった SmBCO 薄膜について、著者らが開発してきた低温成膜法 (LTG 法) を適用することで同薄膜の磁場中臨界電流特性を劇的に増大することに成功した。得られた値は松本チームで目標としてきた実用線材である NbTi の 4.2K の電流特性に匹敵する値で、高温超伝導体の 77K 磁場中臨界電流特性が実用レベルに達したことを世界で初めて明らかにした論文。臨界電流の磁場印加角度依存性からは、LTG 法 SmBCO 薄膜のピン止め点は等方的であることも分かり、この結果は SmBCO 薄膜を線材としてコイル等に利用する際にも非常に有効であることも明らかにした。現在この手法で臨界電流特性の世界記録を更新中。

(3) M.Mukaida, M.Ito, R.Kita, S.Horii, A.Ichinose, K.Matsumoto, Y.Yoshida, A.Saito, K.Koiike, F.Hirose, S.Ohshima, "Reduction of surface resistance of ErBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> films by BaZrO<sub>3</sub> nano-particle inclusion", *JJAP Pt2 Express Letter*, **43**, 12B, L1623-L1625(2004).

高温超伝導薄膜中に BaZrO<sub>3</sub> のナノ粒子をドーピングすると、ナノ粒子は自己整列し、直径が 10 nm 以下のナノロッドが薄膜中に高密度に導入されることを示した論文。ナノロッドは基板表面に垂直に導入されており、転位以外の 1 次元的なナノ結晶欠陥を導入する新規な方法となった。この方法は米国オークリッジ国立研究所でもほぼ同時期に発見されたが、別機関でそれぞれ独立に達成された。ナノロッドの形成機構はまだ解明されていないが、ナノロッドを高温超伝導薄膜に導入すると、マイクロ波を与えたときの薄膜の表面抵抗が大きく低下することを確認しており、エネルギーロスの解消につながることを世界で初めて示したことに大きな意味がある。

**研究課題名：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**  
**研究代表者：山木 準一（九州大学）**

(1) T. Kawamura, M. Makidera, S. Okada, K. Koga, N. Miura, J. Yamaki, "Effect of nano-size LiCoO<sub>2</sub> cathode powders on Li-ion cells", *J. Power Sources*, **146**, 27-32 (2005)

[ナノ構造単位材料を用いたリチウムイオン電池]

電気自動車用の加速性能を向上させ、快適な乗り心地を得るため、リチウムイオン電池を大電流放電可能とする研究を行っている。反応面積増加のため、正極活物質である  $\text{LiCoO}_2$  の焼成法によるナノ化を検討した。通常の焼成法ではナノ化は困難なため、リチウム過剰法という新規手法を検討し、20 nm 程度の微粒子を得る事に成功した。

このナノ化  $\text{LiCoO}_2$  を用いて、市販のリチウムイオン電池と同じ手法で正極シートを作製した。12 mA/cm<sup>2</sup> の大電流放電で、通常の粒径 5 μm の  $\text{LiCoO}_2$  を用いた場合は容量が 50mAh/g であったが、ナノ化  $\text{LiCoO}_2$  を用いると 100~110mAh/g という大きな容量を示した。

(2) B. T. Hang, T. Watanabe, M. Egashira, S. Okada, J. Yamaki, S. Hata, S. Yoon and I. Mochida, "The electrochemical properties of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -loaded carbon electrodes for iron-air battery anodes", *J. Power Sources*, **150**, 261-271 (2005).

[ナノ構造単位材料を用いた金属空気電池の研究]

鉄/空気電池用負極として炭素の表面に微粒子上の鉄塩を高度に分散させた複合材料の検討を行った。天然黒鉛 (直径約 1800 nm)、アセチレンブラック (直径約 50 nm)、気相成長炭素繊維 (直径約 200 nm)、および 2 種のナノ炭素繊維 (tube type および platelet type ; 直径約 20 nm) に硝酸鉄を含浸担持し、400°C で焼成して酸化鉄-炭素複合材料 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -loaded carbon electrodes) を調製した。この複合材料電極の負極特性をサイクリックボルタンメトリーで評価したところ、鉄と炭素を混合した材料を用いた場合に比べ大きな充放電電流を得ることができ、約 500mAh/g と高い充放電容量を示した。

(3) K. R. Prasad, N. Miura, "Potentiodynamically deposited nanostructured manganese dioxide as electrode material for electrochemical redox supercapacitors", *Journal of Power Sources*, **135**, 354-360 (2004).

[ナノ構造単位材料を用いた電気化学キャパシタの研究]

電気化学キャパシタに用いる電極として、カーボンを全く用いずに、従来の  $\text{RuO}_2$  などの高価な材料ではなく、安価な  $\text{MnO}_2$  薄膜を高速電位走査電析法により作製した。 $\text{MnO}_2$  薄膜電析の際の電位走査速度を増加させるほどポーラスな薄膜電極が得られることがわかり、電位走査速度がかなり高速な場合に、直径：7-10 nm、長さ：約 50 nm のナノ構造を示すアモルファス状  $\text{MnO}_2$  薄膜が作製できた。この電極では、これまでの報告値よりもかなり高い約 400 F/g という比容量 (他機関では約 250F/g) を示すことがわかった。

### 3. 受賞等

平成 17 年 10 月 1 日現在

受賞者名	賞の名称	授与者名	受賞日
金村 聖志	Research Award	The Electrochemical Society (ECS), Energy Technology Division	H17.5
大西 洋	Paper of The Year 2004 (Gold Prize)	e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	H17.1
鯉沼 秀臣	井上春成賞	科学技術振興機構	H16.7
山本 隆一	紫綬褒章	日本	H16.10
寺崎 一郎	Best Scientific Paper Award	The 22nd International Conference on Thermoelectrics	H15.8
太田 裕道	日本セラミックス協会 進歩賞	日本セラミックス協会	H17.5
佐々木 高義	市村学術貢献賞	新技術開発財団	H16.4
高田 和典	第 9 回超伝導科学技術賞	(社)未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会	H17.6
中戸 義禮	電気化学会学会賞 武井賞	電気化学会	H16.3

今西 哲士	電気化学会進歩賞 佐野賞	電気化学会	H17.4
中西 周次	The Hans-Jurgen Engel Prize 2005	The International Society of Electrochemistry	H17.9
山木 準一	Technology Award of Battery Division	The Electrochemical Society	H15.10

#### 4. シンポジウム等

平成 18 年 2 月 10 日現在

シンポジウム名	日時	場所	入場者数	特記事項
スタートアップ ミーティング	H14.12.27	JST 八重洲 事務所	非公開（総括、アドバ イザー、研究代表者、 JST 関係者）30名	H14年度採択 研究代表者
オンサイトミーティング 大阪	H15.8.6	大阪大学 シグマホー ル	非公開（中戸、工藤、 佐々木チーム、総括、 アドバイザー、JST 関 係者）33名	H15中間成果 報告会
オンサイトミーティング 名古屋	H15.8.7	名古屋大学 ベンチャー ビジネスラ ボ	非公開（鯉沼、松本、 河本チーム、総括、ア ドバイザー、JST 関係 者）36名	H15中間成果 報告会
オンサイトミーティング 宮崎	H15.8.22	宮崎大学 総合研究棟	非公開（金村、木島、 山木チーム、総括、ア ドバイザー、JST 関係 者）29名	H15中間成果 報告会
藤嶋研究領域 研究進捗会議	H15.12.18	化学会館	非公開（総括、アドバ イザー、研究代表者、 共同研究者、JST 関係 者）70名	H15領域成果 報告会
藤嶋領域 若手研究者個人面談	H16.5.17	J S T 八重 洲事務所	非公開（総括、CREST 若手研究者他）22名	若手研究者 モチベーショ ンアップ
オンサイトミーティング つくば	H16.8.4	NIMS 物質研究所	非公開（木島、河本、 佐々木チーム、総括、 アドバイザー、JST 関 係者）57名	H16中間成果 報告会
オンサイトミーティング すずかけ台	H16.8.6	東京工業大 学すずかけ ホール	非公開（鯉沼、工藤、 中戸チーム、総括、ア ドバイザー、JST 関係 者）71名	H16中間成果 報告会
オンサイトミーティング 京都	H16.8.10	京都大学 百周年時計 記念館	非公開（山木、金村、 松本チーム、総括、ア ドバイザー、JST 関係 者）54名	H16中間成果 報告会
藤嶋研究領域 研究進捗会議	H16.12.17	学会会館	非公開（総括、アドバ イザー、研究代表者、 共同研究者、JST 関係 者）115名	H16領域成果 報告会
オンサイトミーティング 九大	H17.8.2	九州大学 総合研究棟	非公開（鯉沼、松本、 山木チーム、総括、ア ドバイザー、JST 関係 者）66名	H17中間成果 報告会

オンサイトミーティング 東京理科大	H17.8.8	東京理科大学 森戸記念館	非公開（工藤、木島、 河本チーム、総括、ア ドバイザー、JST 関係 者）61名	H17中間成果 報告会
オンサイトミーティング 首都大学東京	H17.8.11	首都大学東京 国際交 流会館	非公開（佐々木、金村、 中戸、池庄司チーム、 総括、アドバイザー、 JST 関係者）88名	H17中間成果 報告会
藤嶋研究領域 研究進捗会議	H17.12.12	学士会館	非公開（総括、アドバ イザー、研究代表者、 共同研究者、JST 関係 者）148名	H17領域成果 報告会
CREST 研究員 研究成果報告会	H18.2.6 H18.2.9	KAST	非公開（総括、アドバ イザー、CREST 研究者、 JST 関係者）30名	CREST 研究者 モチベーショ ンアップ

## 5. その他の重要事項（新聞・雑誌・テレビ等）

主要報道紙は以下の通りで、その他地方紙は省略。

### (1) 金村チーム

- ① 日刊工業新聞「全固体型リチウム電池用電解質・電極複合体を提案」（2003.5.2）
- ② 日経産業新聞「人工筋肉 1.5 ボルトで作動」（2004.5.25）
- ③ 化学工業日報「高分子アクチュエータ・大気下で駆動可能」（2004.5.31）
- ④ 日経産業新聞「微小粒子を精密配列、都立大、電池などに利用」（2004.11.11）
- ⑤ Chemical & Engineering News 「Ionic Liquids for Fuel Cell Electrolytes」（2003.4.21）

### (2) 工藤チーム

- ① 日経産業新聞「硫黄系廃液から水素」（2004.1.23）
- ② Spektrumdirekt（独）、Redaktion Chemie.DE（独）及び C&EN（米）に論文紹介（2005.05.24（独）、2005.05.30（米））
- ③ 「愛・地球博（2005年愛知万博）」の光未来展出展（2005.5.12）
- ④ 「国際光触媒展 2005」出展東京ビッグサイト（2005.9.14）

### (3) 河本チーム

- ① 朝日新聞、読売新聞、日本経済新聞、化学工業日報、日刊工業新聞「温度差でどこでも発電機」（2005.6.1）

### (4) 佐々木チーム

- ① 日本工業新聞「東大が強固な LB 膜」（2003.2.28）
- ② 化学工業日報「低コストでナノコート実現」（2005.5.10）
- ③ 日経産業、日刊工業、化学工業日報「チタニアでナノシート」（2005.9.13）
- ④ Nature、「超伝導を示すコバルト酸化物の合成に世界で初めて成功」  
Superconductors Cobalt Oxides Join the Party（2003.3.6）
- ⑤ 上記論文は、2003年～2004年に物理分野で発表された全論文中第2位の被引用回数（Thomson ISI社統計）。被引用回数 280回（2005.10末現在）

### (5) 松本チーム

- ① 日本経済新聞「高温超伝導物質、京大が世界最高性能、リニア実用での低コスト化

へ道」(2004.3.13)

- ② SUPERCONDUCTIVITY COMMUNICATIONS, Vol.14, No.1, 「人工ピンニングセンター導入で表面抵抗を大幅低減」(2005.2)

## 6. その他の添付資料

(1) ニュースレター発行

- ① 創刊号 (2004.2.1) 研究代表者紹介
- ② 第2号 (2004.12.17) 共同研究者紹介
- ③ 第3号 (2006.3 予定) 中間評価の研究成果

(2) 年報 (Annual Research Report) 発行

- ① 第1巻 (2003.9.1)
- ② 第2巻 (2004.9.1)
- ③ 第3巻 (2005.7.1)

## 7. 中間評価結果

1. 研究課題名：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創製

2. 研究代表者名：金村 聖志 (首都大学東京 都市環境学部 教授)

3. 研究概要

電気化学反応を利用したエネルギー変換デバイスを、全固体で構築するために、テンプレート法による三次元および二次元規則配列多孔体の作製を行った。この多孔体の孔内部に異なる物性を有する物質を充填することにより、複合構造体を作製し、電気化学的機能デバイスの構築を行った。燃料電池用コンポジット電解質膜、全固体リチウム電池用電極活物質・固体電解質複合体、キャパシタ用規則配列多孔性炭素材など、種々の新規電極システムおよび電解質膜を創製した。ナノからマイクロの構造の規則化が材料創製にとり有益であることを明らかにした。

4. 中間評価結果

4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本研究チームは、首都大学東京 (金村グループ、益田グループ)、横浜国立大学 (渡邊グループ) 及び早稲田大学 (門間グループ) から構成されており、当初の計画からするとやや遅れているテーマもあるが、ほぼ計画通りの進捗である。エネルギー変換デバイスの電極材料と電解質材料のバルク及び界面構造の制御を全固体系で自由自在に行えるようにするため、高次規則配列構造体に関する要素技術の確立を行っており、セラミックス電解質を用いた全固体リチウム二次電池、新規なポリマー電解質膜を用いた燃料電池は予定通りの進捗であり、キャパシタに関しては、研究業績はやや少ないものの、三次元規則配列構造を有する多孔性カーボン電極の開発に成功し、電気二重層キャパシタ用電極材料として実用化レベルの性能を得ている。今後、これらの要素部材の更なる特性向上と実際のデバイス作製へと研究開発のシフトが望まれる。

4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

高次規則配列複合構造体を利用して、リチウム二次電池、燃料電池、キャパシタを全固体で構築し、これらの全固体デバイスのエネルギー変換効率、耐久性、安全性、エネルギー密度及び出力密度などの特性評価を行い、ナノ構造の制御とエネルギー変換材料との関連性を実践的に示した。そのことにより、これまで考えられなかった新規電気デバイスの構築の

可能性が示唆され、ナノ化学とエネルギー変換の関係、ナノ構造制御の重要性を明確に示しつつある点で、社会的な意義は大きい。その中で特筆すべき成果は、リチウム二次電池では、全固体型で動作する正極および負極複合材の作製に成功し、この技術を基礎に実電池の構築を開始している点が挙げられる。既に具体的な応用検討（電子ペーパー、医療用デバイス、電気自動車用途）に入っている点も評価される。燃料電池では、Nafion<sup>®</sup>膜を超える低メタノール透過性コンポジット電解質膜の作製に成功し、かつ実燃料電池への応用段階にある点である。キャパシタでは、100 F g<sup>-1</sup>以上の容量を有する炭素を開発しており、既に実用レベルにある点は特筆すべき成果である。

今後は、更に、それぞれの要素部材の電極と電解質からなる界面反応や充填率の向上を図り、デバイス化検討に期待する。

#### 4-3. 今後の研究に向けて

これまで要素技術・材料の開発を中心に進めてきたので、今後は、全グループが協力してデバイスの実現を進めてもらいたい。具体的には、①リチウム二次電池用合金負極の高容量化と多孔質構造導入による高出力化、②規則配列多孔カーボンの合成と電気二重層キャパシタ用電極の開発、③イオン液体・シリカ多孔体の複合化膜の中温動作無加湿燃料電池への適用などである。

#### 4-4. 戦略目標に向けての展望

高次規則配列複合構造体を利用して、リチウム二次電池、燃料電池、キャパシタを全固体で構築し特性評価することにより、ナノ構造の制御とエネルギー変換材料との関連性を示したので、コロイド結晶鋳型法による全固体リチウム二次電池及びプロトン伝導性コンポジット電解質膜の燃料電池については、多くのメーカーが興味を示し、既に、数社と共同研究を開始しており、環境保全・エネルギーの高度利用の戦略目標に向けて、今後の展望に期待がもてる。

#### 4-5. 総合的評価

本チームの研究は、リチウム二次電池、燃料電池、キャパシタなどのエネルギー変換デバイスを、全固体で構築しナノ構造の制御とエネルギー変換材料との関連性を示したパイオニアとしての意義は大きい。これまでに要素部材の評価はある程度進んでいるので、今後は要素部材の更なる特性向上と充填率の向上を図り、デバイス化と実用化の推進を希望する。

### 1. 課題名：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用

### 2. 研究代表者名：木島 剛（宮崎大学 教授）

### 3. 研究概要

独自に開発した複合鋳型法により白金ナノチューブと白金ナノグループ（nanogroove-network structured platinum、網状溝をもつシート状単結晶ナノ粒子）の創製に成功し、反応場となる液晶構造を解明するとともに、固液界面液晶上で単結晶質白金ナノシートが生成することを見いだした。さらに、白金ナノグループ担持カーボンは電気化学的酸素還元活性が高く、燃料電池用カソード電極として極めて有望であることを明らかにした。また、レゾルシノール系熱硬化性ナノ高分子及びナノカーボンの形態制御法を開拓するとともに、電気二重層キャパシタの電荷分布測定法を開発した。

### 4. 中間評価結果

#### 4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本研究チームは、宮崎大学（木島及び大坪グループ）と九州大学（川崎グループ、平成16年度より参加）の計3グループから構成される。複合鋳型法によるナノチューブ、

ナノグループ、ナノシート等の新規な白金ナノ材料の合成、生成機構の解明と評価、ならびに新規なナノ高分子、ナノカーボン材料の開発を進めている。当初計画からするとナノチューブの特性評価に遅れがみられるが有望な新規素材も新たに発見しており、全体としてほぼ予定通りの進捗である。今後はこれら新規素材を燃料電池に応用する基盤技術の構築に向けた研究の一層の進展に期待したい。

#### 4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

新規素材である世界最細の白金ナノチューブは、まだその収率が低い、2次元液晶上の反応解析を効果的に活用した共同研究に基づく生成機構の解明が進んでおり、特性究明に繋がることを期待する。一方、本研究チーム独自の合成手法により新たに創出された、幅～1 nmの網状溝構造を持つ白金ナノグループを担持したカーボンは、高い電気化学的酸素還元活性を示すことから、燃料電池用カソード電極として有望であり、今後、企業との連携も視野に入れ、重点的に研究を推進する必要がある。カーボンのナノ形態制御は、展開途上ではあるが、電気二重層キャパシタや燃料電池用白金担体開発に繋がる成果である。電気二重層キャパシタの電荷分布測定法は、特性評価への有効活用が望まれる。

#### 4-3. 今後の研究に向けて

白金ナノチューブは、鋳型となる3D液晶場での白金塩の還元によって生じた金属表面に、液晶成分から派生した分子が吸着し粒子の異方的成長を促すことによって生成することがほぼ明らかになっている。今後、これを踏まえた反応の詳細分析を基に各素反応のより効果的な制御を行い、収率の大幅向上を図ることが望まれる。一方、白金ナノグループ担持カーボンについては、これをカソード電極とする燃料電池セルの試作と評価試験ならびに電極の製造条件の確立を重点研究として行い、燃料電池の高性能化を図ることが望まれる。形態制御したナノカーボン材料は、電気二重層キャパシタ等としての特性評価が必要である。

#### 4-4. 戦略目標に向けての展望

本課題は、白金および高分子系ナノ材料を創製し、燃料電池および電気二重層キャパシタに応用する基礎技術の開発を目指したものである。白金ナノグループ担持カーボンの評価結果は、燃料電池用カソード電極の開発指針として白金のナノ構造（露出結晶面等）が粒子サイズや分散性以上に重要であることを示している。本研究の進展により、白金ナノグループあるいはナノチューブ担持カーボンをカソード電極として、白金使用量の削減を可能にする燃料電池の高性能化が達成され、エネルギー・環境問題に貢献することが期待できる。

#### 4-5. 総合的評価

界面活性剤複合ミセルを鋳型として創製された外形6 nmの白金ナノチューブは、世界最細の金属チューブとして米国のC&E Newsなどにも取り上げられ、発見の意義は高く評価できる。今後、収率の大幅向上による特性究明が望まれる。また、幅～1 nmの網状溝構造を持つ白金ナノグループは独自の合成手法により創出された新規素材であり、これを担持したカーボンは燃料電池用カソード電極としての応用が期待でき、今後の重点的な研究の推進が望まれる。カーボンのナノ形態制御は、電荷分布測定法の開発とともに、電気二重層キャパシタや燃料電池用白金担体開発に繋がる成果である。チーム内の共同研究は、白金ナノ粒子の生成機構の解明において特にその効果が発揮されたが、提案課題の達成に向けた共同研究の一層の推進を期待する。

### 1. 研究課題名：可視光水分解を目指したナノ構造体光触媒の創製

### 2. 研究代表者名：工藤 昭彦（東京理科大学 理学部 教授）

### 3. 研究概要

人工光合成および革新的な水素製造技術を確立するために、充実した光触媒ライブラリ

一を構築するとともに高効率な可視光水分解光触媒を開発することを目的とした。新規光触媒を開発する上で、独自の材料設計指針と幅広い研究分野との連携により、材料開発、物性測定・キャラクタリゼーション手法の確立を遂行した。その結果、数多くの新規光触媒を開発し、水の可視光全分解Zスキーム光触媒系や廃硫黄化合物を利用した太陽光照射下で効率良く働く硫化物固溶体光触媒の開発に成功した。さらに、光触媒材料の分光ダイナミクス、光電気化学、精密結晶構造解析等を確立し、新たな光触媒のサイエンスを展開した。

#### 4. 中間評価結果

##### 4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

可視光水分解を目指した光触媒ライブラリーの構築は、バンドエンジニアリング、ナノ構造、ソフト合成、結晶構造解析、電気化学測定及び時間分解測定などを駆使して行い、当初計画以上の進捗である。特に、粉末系光触媒は、種類及び活性において、世界トップレベルにある。最終目標の有効波長 600nm で量子効率 30%の目標には達していないが、着実に進展していることは明らかである。光触媒材料開発やキャラクタリゼーションの確立において、6グループとも夫々独創的な成果を出しているため、今後それらの成果を充分共有して、共同研究を促進することを期待する。

##### 4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

①水の可視光全分解光触媒Zスキーム系は、水素生成触媒( $\text{SrTiO}_3$ : Rh)と酸素生成触媒( $\text{BiVO}_4$ )の組合せで、量子収率はまだ低いですが、520nm までの可視光を利用できるようになった。今後、水素生成触媒の高活性化を図り収率アップを期待する。②Ru/AgInS<sub>2</sub>-CuInS<sub>2</sub>-ZnSの固溶体光触媒は、硫黄系の還元剤を含む水溶液から、疑似太陽光照射下で、水素生成速度 8,000 (目標 10,000)  $\text{m}^3/\text{h km}^2$  を達成し、更に、830nm までの可視光が利用可能な黒色硫化物光触媒を開発した。これは、石油化学工業などから副製する廃硫黄化合物を有効利用した水素製造に利用出来るので、実用化への積極的展開を希望する。③光触媒のキャラクタリゼーションにおいて、分光ダイナミクス、光電気化学、精密結晶構造解析という独自の手法を確立してきた。今後、チームが開発してきた光触媒にこれらの手法を幅広く展開し、材料設計へフィードバックすることを期待する。

##### 4-3. 今後の研究に向けて

研究は順調に進んでおり、可視光水分解光触媒の分野では、世界のトップクラスである。今後、夫々の共同研究チームとの連携を一層深め、テーマの絞込みを行い、さらには優秀なポスドクなどの参加により研究を推進してもらいたい。また、本プロジェクトで開発された光触媒を用いて、水素製造に対するフィールドワークを展開し、システム構築における可能性を検討していただきたい。

##### 4-4. 戦略目標に向けての展望

可視光水分解の実現は、戦略目標に密にミートする研究であり、目標の 600nm 波長の光を利用して 30%の量子効率を達成できれば、太陽光エネルギー変換効率が約 3%となり、約 10,000 $\text{m}^3/\text{h km}^2$  の速度で水から水素を製造することが可能となり、地球規模でのエネルギー・環境問題への貢献が期待できる。

##### 4-5. 総合的評価

光触媒ライブラリーの充実と高活性可視光・光触媒の発見など目覚ましい成果を上げており、高く評価でき、当該分野で、世界をリードしている。今後、これまでに材料設計において得られた知見をもとに量子収率を向上させるとともに、分光ダイナミクスや光電気化学評価などの詳細な検討により、更なるブレークスルーを期待したい。

#### 1. 研究課題名：電界効果型ナノ構造光機能素子の集積化技術開発

## 2. 研究代表者名：鯉沼 秀臣（東京大学 新領域創成科学研究科 客員教授）

### 3. 研究概要

本研究チームは、新しい電子・光材料として世界的に関心の高まっている酸化物と有機 $\pi$ 共役物質について、新しいナノ構造形成法を確立して電子の動きを制御し、新機能発現と光応用デバイスの可能性を組織的に探索することを目的としている。研究手法の上でも、代表者自身が開発したレーザーMBE法を中心とする原子スケールの薄膜技術をコンビナトリアルに拡張し、ナノマテリアルの集積合成と高速評価を組み合わせた‘ものづくりシステムの革新’にもアプローチしている。酸化物研究については、コンビナトリアルレーザーMBEは特に威力を発揮し、理論予測により期待されていたZnOの室温エキシトン発光や青色接合素子の実証、TiO<sub>2</sub>表面の原子レベル平坦化によるセレンディピタスな透明トランジスタの発明や光触媒の量子効果、Coドーピング透明磁性におけるキャリア依存性など、物理学界にもインパクトを与える成果を得ている。有機半導体研究においても、薄膜成長の分子層制御に挑戦して結晶性を向上させ、移動度の記録を更新するトランジスタの作製に成功している。さらに新物質による価電子制御、分子エレクトロニクス研究の基盤となるナノ電極アレイの開発に取り組んでいる。

### 4. 中間評価結果

#### 4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本研究チームは、東大・新領域、東工大・応セラ研及び資源研、早稲田大・ナノテク研、静岡大から構成されており、酸化物・窒化物・有機材料とかなり幅広い材料分野の研究を展開している。夫々の材料分野で進捗状況に多少の差はあるが、全体としては、ほぼ、予定通りの進捗である。その中で、デバイス開発にとって重要な原子レベル表面平坦化技術やフラックスエピタキシー技術、結晶の極性制御、2段階薄膜成長などのユニークな要素技術が確立されてきており、今後、人工結晶、超格子の機能探索、新規電界効果デバイス、分子エレクトロニクスへの展開が期待できる。

#### 4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

新機能デバイスを開発・探索するにあたって、その基盤となる原子レベル平坦化基板や、高品質薄膜成長技術を確立した。特に酸化物薄膜のナノ構造制御と機能開発では、コンビナトリアル技術は極めて効果的であり、研究のスピードアップにより世界をリードする成果を上げている。特筆すべきは、ZnO、TiO<sub>2</sub>などの酸化物材料の成果で、TiO<sub>2</sub>ルチル基板の原子レベルでの平坦化の成功や、TiO<sub>2</sub>透明トランジスタの動作と言った大きなブレイクスルーが上げられる。有機材料に関しても、2段階成長やペンタセンバフナー法などの高い結晶性をもつ薄膜製造技術を開発した。更に、13件の特許申請を行っており、実用化や新産業の創成も視野に入れた研究を進めている。最終成果を支える要素技術となるナノ集積化開発システムや超平坦集積化センサアレイについても、目に見える成果が出始め研究を加速する準備が整ってきた。今後の研究の進展が期待できる。

#### 4-3. 今後の研究に向けて

夫々の分野でレベルアップを図ると共に長期的、短期的の両面からテーマの選択と集中を行い、研究代表者の強力なリーダーシップの発揮を期待する。

#### 4-4. 戦略目標に向けての展望

3年間の知的研究資産として、電界効果型a-Si太陽電池、TiO<sub>2</sub>透明トランジスタ、CoドーピングTiO<sub>2</sub>透明強磁性の起源、ZnOをベースとする新規青～紫外発光素子、高効率光触媒、高移動度有機FET、分子素子研究用ナノ電極チップ、デスクトップ型超クリーンナノ材料集積研究システム、などがあり多岐に渉る。その中の多くが、戦略目標の具体的な達成目標に上げられているテーマであり、戦略創造研究にふさわしい展開といえよう。実用化の観点

からも成果を評価し、テーマの絞込みによる加速的進展が望まれる。

#### 4-5. 総合的評価

研究期間の前半では、酸化物、窒化物、有機材料と幅広い分野で研究を展開し、各グループで、確実な取り組みが行われ、国際的にみても独創的かつ先導的研究成果を出している。コンビナトリアル効果により研究範囲は多岐に渉るが、今後は長期的な展望からテーマの選択と集中を行い、研究代表者の強力なリーダーシップを発揮して、新分野の開拓と選択したテーマの早期の実用化が期待される。

### 1. 研究課題名：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の創製

### 2. 研究代表者名：河本 邦仁（名古屋大学大学院工学研究科 教授）

#### 3. 研究概要

金属-酸素配位多面体を構造単位とするナノサイズの「機能ブロック」を複数組み合わせることでインテグレートすることにより、巨大な熱起電力と高導電率の両立、電荷輸送と熱輸送の独立制御を可能にする高効率層状酸化物熱電材料の創製を目的とし、自然超格子及び人工超格子構造の設計とナノ構造制御法の開発により、新規酸化物系材料の発掘、界面二次元電子ガス（2DEG）による巨大熱電変換特性の発見、酸化物モジュールの構築による実用化への展望等の成果が上がってきた。

#### 4. 中間評価結果

##### 4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本研究チームは、名古屋大学、早稲田大学、東北大学、九州大学及び産総研から構成されており、物理と化学の専門家が一つの概念と戦略のもとに研究を進めており、各グループとも概ね当初計画どおりの進捗である。また、当初予想しなかった界面二次元電子ガスによる巨大熱電特性の発見により新たな展開が生じ、全体としては、順調に推移している。今後、理論・実験の両面から Ti 含有化合物が有望であるので、n型酸化物材料の開発は Ti 化合物に注力することを期待する。

##### 4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

ナノブロックインテグレーションという新しい概念に基づく材料探索の中から、新規ナノブロックの発掘やそれらをインテグレートした層状酸化物熱電材料の創製に成功している。また、巨大界面熱電現象の発見や新物質の合成、モジュールの作製・評価などにも成功しているため、ブレークスルーとなる高い熱電変換効率の発現と未来の応用展開に期待が持てる。

##### 4-3. 今後の研究に向けて

本チームの酸化物熱電材料の研究は、国際的に見ても独創的かつ先導的な研究であり、この成果に基づく新技術、新産業の展開が期待される。今後、新しいメカニズムによる巨大熱電特性を生かした高効率熱電変換材料デバイスの構築、更に、各種バルク及び薄膜熱電モジュールの開発により、応用分野の拡大展開を促し、熱電科学技術の大いなる開花に結びつくことに期待したい。

##### 4-4. 戦略目標に向けての展望

本テーマ（熱電変換素子）は、戦略目標の具体的な達成目標に上げられており、2010年代の実現・産業化が期待されているものである。新規材料の開発によって変換効率が実用化レベルに近づいてきており、解決すべき課題もクリアになって目標達成に向けた今後の研究開発に拍車がかかると期待される。また、新しいメカニズムによる巨大熱電特性を生かした高効率熱電変換デバイス構築の可能性も見えてきたので、新たな応用展開が期待できる。

#### 4-5. 総合的評価

本チームの研究は、国際的にみても独創的であり、世界の酸化物熱電材料研究をリードしている。新規酸化物熱電材料の開発により、バルクモジュールのエネルギー変換効率が実用化レベルに接近してきたとともに、界面二次元電子ガスによる巨大熱電特性の発見という革新的ブレイクスルーにより、飛躍的な進歩が期待出来るようになった。今後、更に各グループとの連携とテーマの集中化を図り、新産業の創成を期待する。

#### 1. 研究課題名：光機能自己組織化ナノ構造材料の創製

#### 2. 研究代表者名：佐々木 高義 ((独) 物質・材料研究機構 ディレクター)

#### 3. 研究概要

層状物質を単層剥離することにより多様な機能性ナノシートを合成し、その基本特性の把握を行うとともにこれをナノブロックとして様々に集積化、複合化する技術の開発を行った。以上で得られた知見、技術を基盤としてエネルギー変換材料、高機能光触媒、電子デバイス、センサーなど、エネルギー高度利用に役立つナノ構造材料の創製を進めている。

#### 4. 中間評価結果

##### 4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

①新規ナノシートの創製、②基本特性の解明、③集積化技術の開発、④電子デバイスへの応用、⑤水分解光触媒システムへの応用などは、当初計画以上の進捗である。現在世界的にホットなトピックスとして注目されている層状コバルト酸化物超伝導体の発見と関連する物性研究など当初計画にない新たな展開も見られ、総合的に見て極めて順調な研究進捗である。今後は、ナノシートの応用及び機能開発の研究に期待する。

##### 4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

①レドックス活性を示す酸化マンガナノシートなど8種類以上の新規ナノシートの創製、②酸化チタンナノシートの量子閉じ込め効果及びその磁性元素ドーピングによる室温強磁性などバルクには見られない新規特性の確認、③酸化チタンナノシートとメソポーラスシリカ複合積層膜での従来を大きく上回る長寿命電荷分離の達成などの成果に加えて、④層状コバルト酸化物超伝導体のセレンディピティの発見は、コバルト酸化物系で初めて報告された超伝導体として非常に高い注目を集め、その論文(Nature2003)は被引用回数が300回を超えた。更に、磁性元素をドーピングした酸化チタンナノシートが紫外光に応答する巨大磁気光学効果を発現することを見出しており、高密度メモリー、高速・大容量情報通信に新しい手がかりを与えると期待される。

また、ナノシート光触媒コーティング膜は、新幹線の車窓などへの実用展開の段階に入っており、商品化が期待できる。

##### 4-3. 今後の研究に向けて

研究は順調に進んでおり、世界から注目される研究を展開している。今後ナノシートの第一人者としてのアドバンテージを活用し、磁性金属ドーピング酸化チタンナノシートなど、研究テーマの絞り込みを行い、研究を推進してもらいたい。

##### 4-4. 戦略目標に向けての展望

国際的に見ても独創的かつ先導的な研究であり、得られている成果は、層状コバルト酸化物超伝導体や磁性金属ドーピング酸化チタンナノシートをはじめとして世界的に注目されている。環境保全・エネルギーの高度利用の戦略目標に向けては、光機能性ナノ構造材料の創製への展開が期待される。

#### 4-5. 総合的評価

酸化チタンナノシートから出発し、各種ナノシートの創製、ナノシートの物性解明・構造解析法などの確立、各種ナノシート集積化技術の開発及びデバイス・システムの開発など、ナノシートの基礎から応用展開まで進めてきたことは、ナノシートの創始者として高く評価される。今後は、更なる展開を図るために、領域としてバックアップして展開する。

## 1. 研究課題名：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

## 2. 究代表者名：大阪大学大学院基礎工学研究科 中戸 義禮

### 3. 研究概要

多結晶シリコン (Si) 薄膜と可視光応答性の金属酸化物薄膜とからなる複合電極による高効率・低コストの太陽光水分解を目的に研究を進め、高性能な微結晶 Si 薄膜の製造および Si 表面のアルキル化とアルキル末端へのアニオン基の結合に成功し、世界最高効率のヨウ化水素の太陽光分解を達成するとともに、可視光応答性の高活性な新規金属酸化物を発見した。さらに、複合電極について新たな構造をいくつか考案し、それぞれ動作原理を実証して、太陽光水分解に成功した。

### 4. 中間評価結果

#### 4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本研究チームは、大阪大学（基礎工、産業科学研）、岐阜大学、奈良教育大学、兵庫県立大学、長岡技術科学大学、奈良先端科学大学院大学の化学、物理及びシミュレーション系の多くの研究者が機能別にグループを形成して系統的な研究を推進している。当初計画からみてシミュレーション系がやや遅れているほかは、ほぼ当初計画どおりの進捗である。チーム全体の最終目標は、多結晶シリコン薄膜／可視光応答性の金属酸化薄膜 (Si /MOx) 複合電極による太陽光水分解で効率 10%以上を目指すというチャレンジ度の高いものであるが、個々の要素技術の開発を達成し、太陽光水分解の可能性と目標達成の道筋を明らかにしており、今後の太陽光水分解の効率向上が期待できる。

#### 4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

要素研究として、Hot-wire CVD 法により微結晶 Si や 3C-SiC:H 薄膜を製造し、これらの薄膜の高性能性を実証するとともに、表面メチル化・Pt ナノ粒子担持という独自の方法を開発して、高効率で安定な Si 電極を実現し、HI の H<sub>2</sub> と I<sub>2</sub> への太陽光分解で世界最高の太陽エネルギーの化学エネルギーへの変換効率 7.4%を達成している。また活性アルキルを用いる新規の手法を開発して末端にアニオンを有するアルキル基の Si 表面への導入に成功するとともに、新規のテクスチャー化法を開発して多結晶 Si ウェーハに均一な無反射処理を施すことに世界で初めて成功している。さらに世界最高の光触媒的酸素発生活性を有する可視光応答性の金属酸化物 BiTiVO<sub>6</sub> の開発にも成功している。一方、これらの要素技術を組み合わせた種々の複合電極で可視光水酸化分解を達成し、複合電極の原理（二段階励起機構）も実証している。以上の成果により、今後は、高効率化と安定性の向上に向けた研究の進展により、目標達成が期待される。

#### 4-3. 今後の研究に向けて

多結晶シリコン薄膜の高性能化など個々の要素技術の進展は認められるので、今後は研究テーマを絞り、共同研究チームとの連携を深めて、低コスト化を視野に入れながら、太陽光水分解の効率と耐久性の向上を図ることを期待する。さらには 10 cm 角程度の大面積の複合電極による実証試験にできるだけ早期に着手することを期待する。

#### 4-4. 戦略目標に向けての展望

多結晶シリコン薄膜と可視光応答性の金属酸化薄膜からなる安価な複合電極による太陽光水分解で効率 10%以上の達成は、非常にチャレンジ度の高いテーマであり、難度も高い

が、これが実現すれば、水素を用いた燃料電池自動車の開発が活発に進められている現在において、実社会でのインパクトは非常に大きい。ソーラーハイドロジェンが叫ばれている昨今では、社会の注目度も高く、地球規模でのエネルギー・環境問題への大きな貢献が期待できる。

#### 4-5. 総合的評価

将来の水素エネルギー社会の実現に向けて、非常に重要なテーマである。現時点では、太陽光水分解のための基礎技術、狙いの要素技術や周辺技術はかなり押さえられているので、それらを整理した上で、選択と集中を考慮し、課題を焦点化して研究を進めることを期待したい。

### 1. 研究課題名：ナノ組織制御による高臨界電流超伝導材料の開発

### 2. 究代表者名：松本 要（京都大学大学院工学研究科 助教授）

#### 3. 研究概要

ナノ組織制御により、高温超伝導体中に工学的にデザインされたナノスケールの結晶欠陥(Artificial Pinning Center: APC)を導入し、これらによって磁束量子を強力にピンニングして高温超伝導体の臨界電流密度( $J_c$ )を飛躍的に向上させることをめざし研究を実施した。具体的には、最適ピン止め構造を調べる APC デザイン技術、ナノアイランドやナノコンポジション制御による 1 次元および 3 次元 APC 導入やナノ粒子ドーピングによる APC 作製プロセス技術、および各種のナノ組織の分析や特性評価などの APC 構造・特性評価技術の研究を行った。また APC 応用技術に関しても一部実施した。

#### 4. 中間評価結果

##### 4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本研究は、高温超伝導体中に APC を導入し、これらによって磁束量子を強力にピンニングして高温超伝導体の臨界電流密度( $J_c$ )を飛躍的に向上させることをめざすものであるが、当初計画を前倒しで達成し、世界記録を維持しており、高く評価できる。本研究チームの研究は、日本の高温超伝導線材開発の基礎部分を担い、米国との競争の矢面に立っており、今後米国のキャッチアップを阻止する体制構築が必要である。

##### 4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

各種高温超伝導体に 0 次元から 3 次元の APC を導入し最適化した結果、1 次元 APC として転位、2 次元 APC として結晶粒界の導入と制御に成功し、従来の YBCO 系高温超伝導薄膜に比べ 5 テスラの磁場下、77 K おいて 2 倍～5 倍の  $J_c$  向上を実現した。さらに 3 次元 APC を導入した SmBCO 薄膜は、5 テスラの高磁場下、77 K で世界最高の臨界電流密度( $J_c = 3.8 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ ) を達成した。これは、APC の効果を実証したもので、高く評価される。今後、内外の動きから APC 応用技術の線材応用研究を加速させることが望まれる。

##### 4-3. 今後の研究に向けて

研究は順調に進んでおり、高温超伝導の基礎部門で先導的立場にあり、現時点では、世界のトップランナーであるが、米国のキャッチアップを阻止し、線材での実証研究を促進する為、領域としてのバックアップと国内の超伝導研究機関などとの共同開発が望まれる。

##### 4-4. 戦略目標に向けての展望

APC 導入による高温超伝導線材の実現は、戦略目標に合致し、更に、社会的インパクトも大きいものであり、バックアップ体制の確立が急務である。

#### 4-5. 総合的評価

高温超伝導研究チームとしては、少人数の体制であるが、APC 導入による高磁場、液体窒素温度下での臨界電流密度の世界最高記録の達成は、素晴らしい成果である。今後は更なる  $J_c$  の向上と線材開発促進のため、NEDO などとの共同協力体制も視野に入れた体制強化が望まれる。

#### 1. 研究課題名：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

#### 2. 研究代表者名：山木 準一（九州大学先導物質化学研究所 教授）

#### 3. 研究概要

ナノ微粒子の合成を液相レーザアブレーション法、電析法、特殊な焼成法により行い、これらを用いて、リチウムイオン電池、金属空気電池、電気化学キャパシタの特性向上を検討した。その結果、リチウムイオン電池で、25C の大電流放電で、正極利用率 80% を達成（他機関では、70%）した。鉄空気電池用鉄極では、容量 500mAh/g を達成（他機関では 300mAh/g）し、電気化学キャパシタでは、約 400 F/g の容量を達成（他機関では約 250F/g）した。

#### 4. 中間評価結果

##### 4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本研究チームは、九州大学（先導物質化学研究所、総合理工学府、産学連携センター）、山口大学、インド国立電気化学中央研究所などから構成されており、各グループとも概ね当初計画どおりの進捗であり、着実な成果を上げている。ナノテクを利用した高出力リチウム電池の研究は、日本が世界をリードしているが、その中でも本研究はトップクラスである。鉄-空気電池はポストリチウムイオン電池の一つであるが、世界でも研究例が少ない中、本研究は、かなりの容量を達成している。キャパシタ用ナノ電極材料の作製方法として開発された高速電位操作法は、新規であり、合成した金属酸化物ナノ材料の機能は、高いレベルである。今後、実用化の視点に加えて、中長期的視野に立った研究戦略が期待される。

##### 4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

本研究は、ナノ材料を創り電池/キャパシタに応用するものであり、リチウム電池、金属空気電池及び電気化学キャパシタの分野で、かなりの水準にある。

リチウムイオン電池では、リチウム過剰法による  $\text{LiCoO}_2$  正極を用いて、25C の大電流放電で、正極利用率 80%（他機関では、70%）を達成した。鉄空気電池では、ナノ炭素を複合した鉄極により、容量 500mAh/g（他機関では、300mAh/g）を達成した。また、電気化学キャパシタでは、逆沈殿法や電位走査電析法により、ナノ構造電極を作製し、カーボンに 5 wt.% の ITO を高分散担持することにより、カーボン単独の場合より約 80% の容量増加を、電析法による  $\text{MnO}_2$  ナノ電極では、約 400 F/g の容量を達成した。

今後、電気自動車用リチウムイオン電池を目指して、多孔体電極理論を併用した  $\text{LiCoO}_2$  正極物質の高性能化や新規安全性向上の検討を企業や他機関との連携も視野に入れ、重点的に推進する必要がある。また、電気化学キャパシタに関しては、高速電位走査電析法の高い比容量が得られるメカニズムを解明し、その知見をもとに更なる性能向上をめざす。

##### 4-3. 今後の研究に向けて

電気自動車用リチウムイオン電池は、正極活物質のナノ化による効果（正極利用率の向上）を期限内に更に明確に実証し、副産的に得られた正極電位の上昇に関しては、学術的な基礎原理に関することなので、時間をかけて確実な実験結果を出すべきであろう。電解液への添加剤や負極表面処理による新規安全性向上法の開発は、実用的インパクトも大きいので、企業との共同研究が望まれる。また、鉄空気電池用の鉄負極は、充放電による容量低下の改善対策を重点指向すべきであろう。

電気化学キャパシタの金属酸化物単独薄膜電極の作製は、新規な高速電位走査電析法により、均一でポーラスなロッド状の安価な  $\text{MnO}_2$  のナノ構造を作製できたので、今後は、他

の酸化物との複合化や作製条件の最適化で更なる高性能化を目指すことが望まれる。

#### 4-4. 戦略目標に向けての展望

本研究テーマは、ナノ材料を創製し、それらをリチウムイオン電池、金属空気電池や電気化学キャパシタなどに応用して、ナノ化により、飛躍的な性能向上をめざすもので、正に、戦略目標そのものである。電気自動車用リチウム電池や電気化学キャパシタで、ナノ化による効果を明確に出来、かなりの性能向上を達成しているので、企業との連携を視野に入れた実用化検討が期待される。

#### 4-5. 総合的評価

ナノテクを利用した高出力リチウムイオン電池研究は、世界的に実施されており、日本が世界をリードしている。このような類似研究の激しい競争の中で、本チームの電気自動車用リチウム電池の研究は、地道であるが確実に成果を上げており、今後、企業との連携で、実用化が期待できる。

電気化学キャパシタに関しては、逆沈殿法によるナノサイズITO添加カーボン電極、高速電位走査電析法によるナノ構造  $\text{MnO}_2$ 、ポリアニリンナノワイヤーとカーボンナノチューブとの複合体電極で、ナノ化の効果を実証しており、更なる高性能化が見込める。

以上