

プロジェクトプレ終了評価報告書



評価委員会開催日: 令和5年2月9日

評価委員氏名(敬称略, 五十音順)

黒田 一幸	早稲田大学 理工学術院 名誉教授
柴田 直哉	東京大学大学院 工学系研究科 総合研究機構 機構長・教授
杉山 正和	東京大学 先端科学技術研究センター 所長・教授
原 正彦	東京工業大学 物質理工学院 教授

確定年月日: 令和5年3月10日

プロジェクト名	ケミカルナノ・メソアーキテクトニクスによる機能創出
研究責任者の氏名・所属・役職	佐々木高義 フェロー
実施予定期間	平成28年度～令和4年度
研究目的と意義	本プロジェクトでは、材料科学技術が科学技術全般を支えるキーテクノロジーであることを踏まえ、その中でも最先端課題に位置付けられるナノマテリアルの高品位合成、材料・機能設計とともに、さらにそれらを高次集積、複合化して新規機能の実現を狙いとする「ケミカルナノアーキテクトニクス」研究を推進する。すなわち、ナノからメソスケールで次元、組成、構造、階層、空間を精密に設計・制御した新規材料を創製するとともに、高度ナノ解析、評価技術を開発して、発現する新機能の評価を実施する。これらを通じて、ナノ領域特有の物理的特性や化学的機能を積極的に活用するための知識、技術を獲得、蓄積して広範な分野への応用展開を図る。以上を通じて、人類社会の持続的発展、技術的革新、利便性の向上に貢献する多様なシーズの創出を目指す。
研究内容	低次元ナノ物質、ナノ細孔材料などの新規ナノマテリアルを創製するとともに、これらの高次集積により、ナノからメソスケールで次元、構造、階層、空間を設計・制御した高次機能性材料を構築するための新規材料創製プロセス(ケミカルナノ・メソアーキテクトニクス)を確立する。この戦略に立脚して、新しいメカニズム・材料に基づく熱電材料、蓄電技術、光電変換材料、可視光応答光触媒、低消費電力 FET などエレクトロニクス、環境・エネルギー技術の革新・発展に役立つ新材料・技術の開発を行う。
ミッションステートメント(具体的な達成目標)	新規ナノワイヤ、ナノシート、ナノ細孔材料などを組成、構造、サイズ、形状、次元性を精密に制御して合成し、その物性を明らかにする。合成されるナノマテリアルをビルディングブロックとしてナノ～メソスケールで高次集積化、複合化を可能とするケミカルナノアーキテクトニクス技術を開発する。 以上を基盤として、新しいパラダイムによる機能発現を図り、現行材料の性能を大幅に上回る光電変換材料、蓄電材料、熱電材料、誘電デバイス、水分解および二酸またま化炭素還元用光触媒など、次世代エレクトロニクスや環境・エネルギー技術に役立つ機能性材料、デバイスの開発に資するシーズを創出する。
プロジェクト実施期間(平成28年度～令和4年度)の見込みを含む主な研究成果(アウトプット)及び研究成果から生み出された(生み出される)効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト)	➤ 主な研究成果(アウトプット) ナノマテリアル創製に関しては、1次元系では高結晶性で、かつ原子レベルで急峻な界面を持つ Si/Ge コア・シェルナノワイヤの合成、さらにコア、シェルのどちらかへの選択的 p, n ドーピングに成功した。2次元系では、我々独自の剥離技術を活用して、各種酸化物ならびに水酸化物ナノシートを組成、構造、厚み、横サイズを精密に制御して合成し、その中で世界最高レベルの誘電性や OH ⁻ イオン伝導性など、様々な新規機能を見出した。また Si 半導体量子ドットを 1~2 nm のサイズ領域で結晶サイズを制御して作り分けることに成功して、これまでで最高レベルの発光量子効率や優れた光熱変換特性を見出し、高効率 LED、がん細胞の温熱治療応用に有望であることを示した。ナノ細孔材料では球状ミセルを溶液中で様々な集合させ、その隙間で金属を析出させるという独自プロセスを適用することにより、様々な金属、合金の多孔体をナノ粒子、ナノ薄膜、ナノシートといっ

	<p>た多様な形態に制御して合成した。得られた金属ナノ多孔体はその高い比表面積、細孔構造に由来する高い触媒機能、反応性を発揮することを明らかにした。</p> <p>評価・モデリングに関しては、TEM 内その場物性評価装置に熱分析顕微鏡機能を付加するなど拡張、高度化を進め、本プロジェクトで合成された様々なナノマテリアルに適用することにより、多くの新しい特性、挙動を発見した。あわせて物性予測を目指した基礎理論、計算手法の整備を進め、SiB₂, BC₂ など新規グラフェン類似物質を同定し、構造および電子状態の計算により特異な量子物性発現の可能性を予測した。</p> <p>ナノマテリアルのナノレベルの複合化、ヘテロ接合、形態制御を行うことにより、様々な機能の高度な制御、大幅増強が達成された。熱電機能では代表的熱電材料であるスキテルダイトなどへのナノ・マイクロ孔の導入、ナノ界面によるエネルギーフィルタリングにより、性能指標が大きく増大することを明らかにした。さらに Mg₃Sb₂ 系材料に Cu をドーピングすると、粒界への偏析および原子間サイトへの導入が同時に起こり、電気伝導性の向上とともに熱伝導度が低減し、大幅な熱電性能増強が起こることを見出した。同材料を用いて試作したモジュールは、これまで最高性能が報告されている Bi₂Te₃ と同等の変換効率 7.3% を記録した。光触媒機能においても異種物質のヘテロ複合化などを通じて、高効率水分解、CO₂ の CH₄ への還元など多くの成果が得られた。特に半導体 TiO₂, ZnO と Au 助触媒のナノハイブリッドを設計・構築することにより、CH₄ から C₂H₆ への高効率、高選択的変換を室温で初めて達成した。またカーボンナノリングを独自の超分子集合技術を駆使して大面積カーボン膜を簡便に合成するプロセスを確立した。さらに各種 2 次元ナノシートをビルディングブロックとし、本研究で開発、確立したプロセスにより自在にレイヤーバイレイヤー累積して、多様な多層構造、超格子構造、階層構造を設計、構築し、多彩な機能（誘電、蓄電、エネルギー貯蔵、変換、光化学）を実現した。その中のハイライトとして All-nanosheet で構築した MIM 素子は BaTiO₃ を用いた現行のセラミックスコンデンサの 1/100 の小型化、1000 倍以上の高容量化を達成した。</p> <p>➤ 研究成果から生み出された(生み出される)効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト)</p> <p>高度に制御された組成、構造、形状、サイズを持つ高品位ナノマテリアルが多様な物質系で合成され、ライブラリー化された。またこれらをナノ～メソレンジで集積化、配列制御、異種物質と複合化する新規技術(ケミカルナノメソアーキテクニクス)が開発、高度化された。これらを用いて現行材料では実現、到達が困難であった新規機能の発現や性能の大幅増強が熱電、光触媒、蓄電機能などにおいて達成されており、これらは次世代エレクトロニクス、環境・エネルギー技術に革新をもたらす重要なシーズとして活用が期待できる。</p>
<p>プレ終了評価時の見込みを含む進捗状況及び自己点検・評価</p>	<p>➤ プレ終了評価時の見込みを含む進捗状況 計画以上の進捗</p> <p>➤ 自己点検・評価</p> <p>本プロジェクト研究で重点項目として設定した、新規ナノマテリアルの探索・創製、物性の解明、集積化、複合化による機能性材料創製のいずれにおいても、当初計画通りもしくは計画を上回る進捗を得たと認識している。その中で一部民間企業へのライセンスにつながったり、大型プロジェクトへの展開も得られた。これに加えて OH⁻イオン伝導性、ナノシートの超長周期配列による構造色発現、異方性ゲルの創製など、当初計画になかった成果も多数得られており、総合的に順調な進展が得られていると判断している。</p>

評価結果		
【評価項目・基準】	評価	コメント
研究計画・実施体制・マネジメント・連携活動 【評価基準】 ・研究成果の最大化のための研究実施体制や研究開発の進め方(マネジメント)は妥当であったか。 ・国や社会のニーズに適合しているか。 ・進捗に応じ、研究計画の必要な見直しを行ったか。 ・機構内連携や大学・産業界との連携の取組は十分であったか。	s:2 a:1 b:1 c:0	・シーズ志向型のテーマ展開・社会の要請からのバックキャスト的視点に欠ける感があるが、組織の強みを活かした成果を最大化しやすいテーマ展開となっている。 ・新材料開発は、持続可能な社会を維持・展開する根幹をなすもので、重要なテーマであり、着目されているナノ物質はより発展性のあるもので、今後実用化に向けた産業界との連携が期待される。 ・当プロジェクトは基礎研究と目的基礎研究に分類されており学術的価値の高い成果が続々と生まれていることは真に素晴らしい。研究実施体制はサブテーマ毎に整理され、サブテーマ内は更に4～5件の研究グループから構成され、幅広いナノマテリアルを形態、構造、評価、モデリング、機能開拓など統一視点で整理されている。光電変換や光触媒を含め機能面でも他プロジェクトと一線を画し、差別化が明確に図られている。高誘電体物質の企業へのライセンスなど社会ニーズに沿った成果創出にも顕著な成果が得られている。国内のみならず米独仏をはじめ海外の多くの一流研究機関との共同研究を展開し、バランスよく人員を配置して成果の最大化を図っている。 ・優れた研究成果を多数出しており、マネジメントは妥当であったと判断できる。 ・ナノアーキテクトの概念を用いて、社会に必要とされる材料分野に挑戦しており、評価できる。 ・研究進捗のあるものに関しては、国内メーカーにライセンスして社会実装を目指すなど、柔軟に対応している。今後はもっと社会実装を意識した研究計画を期待する。 ・連携の取り組みは十分行われていると判断する。
研究開発の進捗状況及び目標の達成状況 【評価基準】 ・設定した目標は達成されたか(または当初目標以上の成果が得られたか) ・設定された目標以外の成果があるか。	s:2 a:2 b:0 c:0	・計画通り、もしくは計画以上に達成されている。 ・設定された目標はおおむね達成されている。新しい物性、現象を発見、提示されたことは高く評価出来る一方で、今後期待される、という記述について、どのように実装し、実現して行くかの道筋が見えるようであれば、その内容を示してもらえるとさらに良かった。 ・サブテーマ1及び3において当初目標以上の成果が得られ、サブテーマ2においても計画通りの成果が得られており、当初目標以上の成果が得られたと評価する。例えばイオン伝導材料において異方性の高いナノシートを用いながらその垂直方向への高イオン伝導性の発現や超大容量キャパシタの開発など従来常識を覆す成果が得られており、当該グループが長い間築いてきたナノレベルの物質設計技術が遺憾なく発揮されており、非常に高く評価できる。 ・ナノレベルから制御された新しい材料の芽が多数生まれしており、設定した目標はクリアしていると判断できる。
研究成果の創出等 【評価基準】 <科学的・技術的視点> ・世界トップレベルの研究成果が得られたか。 ・対外発表(論文・学会等)の量や質について費用対効果は十分なものであるか。 <社会的・経済的視点> ・研究成果は新技術や実用化につながるものであるか。	s:3 a:1 b:0 c:0	・FWCI、トップ10%論文の両観点で国際的なトップ機関に伍しており、日本の研究機関としては突出した成果である。ただし、シーズ思考で応用よりは新規性を重視した研究展開の成果が目度の高い学術論文として結実しているともいえる。一方で、滴下法によるナノシートの層状構造をキャパシタに応用するなど、実用化につながる成果も出ている。 ・トップレベルの研究者で構成され、論文発表なども、非常にハイレベルで、高く評価出来る。研究成果は新技術や実用化につながるものと期待されるが、まだ基礎研究段階の内容が多く、応用展開には時間がかかると思う。一方で逆に、そう焦らず、今の基礎研究をしっかり推進することも大切で、良いと思う。 ・傑出した多数の成果創出があり、国内外のトップレベル研究機関の成果創出に伍してNIMSの存在感を高めている有力なプロジェクトとして極めて高く評価できる。対外発表は質量ともにトップレベルの成果が続出しており非常に優れていると判断できる。尚、ごく一部ではあるが2018年前後の成果が代表的論文として挙げられておりプロジェクト初期の重要成果と認めら

<p>・得られた研究成果により、優れた効果・効用（アウトカム）や波及効果（インパクト）が得られたか（期待されるか）</p>	<p>れるので、相対的に2022年前後の最近の進捗がやや不鮮明に見えるものがあった。論文成果は継続して発表されているので、プロジェクト後半期の展開についてより丁寧な説明があると本プロジェクトの価値が更に明確になったのではないかと思われる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ナノアーキテクトの概念からいくつもの新規高性能材料の芽が生まれており、世界トップレベルの成果であると考えられる。 ・質の高いハイインパクト論文も多数出版しており、アクティビティの高さが伺える。 ・一部実用化に近いものもあるが、現状は基礎的な研究が主体である。しかし、国研のミッションおよび材料分野の特徴に鑑みて、今後はもっと社会実装を意識した研究開発に展開して頂きたい。本分野では、基礎から社会実装までを如何にスピーディーに行えるかが重要な観点になると考えられる。
<p>総合</p>	<p>S:2 A:2 B:0 C:0</p> <ul style="list-style-type: none"> ・傑出した成果を出しており、プレゼンスが大きい。ただし、学術論文狙いのシーズ研究が多い懸念もあり、今後積極的な応用展開が期待される。 ・物質系が限られている感は否めないが、ここは逆に広く展開せず、低次元物質に特化した、特異的な研究者集団となる方向性も良いかと思う。アウトカムや社会的波及効果を気にせず、基礎研究に集中できる環境もまた良いのではないかと思う。この研究者集団には、そのような環境を与える価値があるのではないかと思う。 ・当該プロジェクトは基礎研究と目的基礎研究に分類されており、限られた予算と研究者数の条件下ではあるものの、数々のトップレベル成果を発信するとともに、高誘電体物質の企業へのライセンスなど社会ニーズに沿った成果創出に顕著な成果が得られている。ナノシートテクノロジーの更なる高度化が新たな機能発現に繋がるなど、従来の延長線を超える成果が得られている。当該グループが長い間築いてきたナノレベルの物質設計技術が遺憾なく発揮されており、当プロジェクトが創出した成果は非常に高く評価できる。 ・ナノアーキテクトの概念から高性能かつ新奇な材料が多数生まれており、研究レベルの高さを伺わせる。また、論文の質、量ともに高い水準にあり、本分野を世界的にリードしていると判断できる。しかし、材料研究を担う国研としてのミッションに鑑みると、今後はさらに学術的な側面を深化させるとともに、社会実装を意識した研究開発を進めて頂きたい。材料である以上、実際に使われることが最終的なゴールであり、その多寡こそが最終的には評価されると認識すべきである。