

プロジェクト事後評価報告書

評価委員会開催日：平成29年1月17日

評価委員：（敬称略、五十音順）

青柳克信 立命館大学 総合科学技術研究機構 上席研究員

黒田一幸 早稲田大学 先進理工学部 応用化学科 無機合成化学分野 教授

重川秀実 筑波大学数理物質系 教授

確定年月日：平成29年4月7日

プロジェクト名	ケミカル・ナノテクノロジーによる新材料・新機能の創出
研究責任者の所属・役職・氏名	フェロー/国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・副拠点長・佐々木高義
実施期間	平成23年度～平成27年度
研究目的と意義	<p>本プロジェクトでは、NIMSがこれまで開発・蓄積してきたユニークな合成技術を活用し、有機から無機にわたる広範な物質系で新規ナノスケール物質を系統的に探索する。ナノメートルレンジのサイズと形状に加えて、これまでほとんど注意が払われてこなかった組成・構造の精密制御（例えばドーピング）といった視点を加味することにより、ナノスケールに由来する機能を増強、高度化した形で引き出すだけでなく、未知物性や新現象の発見（セレンディピティ）を狙う。</p> <p>次にこれらナノスケール物質の持つ優れた機能を活かして、有用材料やデバイスを創製するために、目的とする機能に合致した特性を有するナノスケール物質と機能性物質をパーツとして、室温付近の化学プロセスにより、これらをナノレベルで集積・複合化する「ケミカル・ナノテクノロジー」と呼べる技術を開発・完成させる。これにより電子的・磁氣的・光学的・化学的機能など、多彩な機能開発が可能となるものと考えられ、基礎・応用の両面にわたる広範な展開が期待される。</p> <p>エレクトロニクスや環境・エネルギー技術に代表される現代先端技術社会の革新のスピードは非常に早く、既存材料、技術の延長線上の改善・改良では限界に達しつつある技術課題が数多く存在する。本プロジェクトで追求するような新パラダイムに基づく材料創製こそが、不連続な性能アップ、全く新しい機能の発現をもたらし、大きな技術革新につながる可能性を秘めているといえる。多くの困難が予想されるこのような基礎・基盤的課題に、NIMSがこれまで蓄積してきた先端的材料合成技術を駆使して取り組むことは大きな意義がある。</p>
研究内容	<p>ソフト化学合成、自己組織化技術、電気化学的エピタキシャル成長法など、MANA（国際ナノアーキテクトニクス研究拠点）が有するユニークな合成技術を用いて、セラミックス・金属・有機材料等種々の材料系について、組成・構造の精密制御を意識した系統的なナノスケール物質探索を行う。これにより、元素置換、欠陥導入・制御、価数制御等を実現した「第二世代ナノスケール物質」としての新規ナノチューブ、ナノシート、ナノ粒子、ナノ細孔材料、超分子材料などを創製するとともに、それらの組成・構造や物性を詳細に解析する。さらに、様々な化学的ナノ操作による配列制御技術を駆使して、これらのナノスケール物質を集積もしくは異種物質と複合化する高次ナノ材料創製プロセスを確立し、次世代エレクトロニクスや環境・エネルギー技術分野に貢献する高度な電子的・磁氣的・光学的・化学的機能の発現・開発を進める。</p>
ミッションステートメント （具体的な達成目標）	<p>(1) 高機能ナノスケール物質の創製：セラミックス・金属・有機系ナノスケール物質を、組成・構造を精密に制御して創製する技術を確立し、優れた電子的・磁氣的・光学的・化学的機能を高度に制御した形で発現させる。</p> <p>(2) 物性開拓：新規ナノスケール物質が示すナノスケール領域での特有の</p>

	<p>物性と、元素ドーピング、原子価ならびに欠陥制御などとの相関に関しての理解を確立し、既存機能の大幅な向上とともに、全く新しい特性や現象の発見を狙う。</p> <p>(3) 材料創製と機能開発：(1)において創製される高機能ナノスケール物質を精密に集積化・複合化するケミカルプロセス技術を開発し、既存材料・技術では実現できない革新的な機能を発揮する新材料 (high-kナノ薄膜、全固体型リチウム電池、放熱基板、ドラッグデリバリーシステム (DDS)、エネルギー変換触媒など)、技術を創製する。</p>
<p>平成23年度～平成27年度までの主な研究成果(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)</p>	<p>1) 主な研究成果(アウトプット)：</p> <p>本研究の最重要課題として位置付けたナノ材料創製に関しては、層状結晶の巨大水和膨潤を介した独自の剥離技術やChemical blowing法などの新規プロセスを開発し、酸化物～水酸化物～窒化物～金属などの広範な材料系で、50種類以上の新規ナノチューブ、ナノワイヤ、ナノシートの合成を達成した。特にこれまであまり注意が払われていなかったナノ材料の組成、構造を能動的に制御するという研究戦略に基づいた研究を実施したことにより、多数の新規ナノ材料の創製につながった。これにより予想を上回る優れた機能の発現、特異な現象の発見に至り、その中でも今後のさらなる発展性が期待できる特筆すべきものとしてTi、Nb系酸化物ナノシートの世界最高の誘電率 ($\epsilon_r > 300$)、遷移金属水酸化物やBNナノシートの貴金属に匹敵する電極触媒活性などを見出した。またこれらナノ材料を対象として、原子レベルの解像度で物性をその場観察するTEM/SPMシステムを開発、活用することにより、これまでアプローチできなかったナノスケールでの振舞いを数多く明らかにした。</p> <p>研究のもう一つの柱である、これらナノ材料を部材とした様々な機能性材料の開発に関しても、既存材料では実現が難しい斬新な機能を発現させる例を多数示すことができ、目標とした誘電体ナノ薄膜、BN/ポリマーコンポジット、DDS、電極触媒について、目標とした高い性能を実現できた。さらに当初計画になかったセシウム検出薬、マルチフェロイック材料、異方性ゲル、構造色を示す水など、興味深い機能を有する多くの新材料の創製にも至った。</p> <p>2) 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>本研究はナノサイエンス、特にナノテクノロジーをベースとした新しいものづくりを先導する基礎研究として当該学術分野に広く波及効果を与えたと考えている。重要な点は、これらの斬新な機能、作用が既存材料の延長線上と言った特性改善型研究によって達成されたものではなく、組成、構造が高度に制御されたナノ材料を合成して機能の先鋭化を図り、ケミカルプロセスにより精密集積、複合化するという新しいアプローチ(ケミカルナノテクノロジー)により創出されたことである。これらの新材料、ユニークな機能に対して実業界から高い関心が寄せられており、一部は商品化もしくはそれに向けた本格的共同開発に発展しており、本研究で生み出された材料が実用的価値も兼ね備えていることを物語っている。</p>
<p>プロジェクトの目標の達成度合い及び自己点検・評価</p>	<p>プロジェクトの目標の達成度合い：大きな成果を挙げており目標を十分上回ったと認識</p> <p>自己点検・評価：</p> <p>本プロジェクトの重要目標である新規ナノ材料の創製については、目標とした30種類を大きく上回る50種類超の合成を達成し、その過程で多くのユニークな機能性を見出した。またこれらナノ材料を部材とした材料開</p>

	<p>発（誘電体ナノ薄膜、BN/ポリマーコンポジット、DDS、電極触媒）においても、目標性能をいずれもクリアできた。これに加えて計画にはなかった材料や機能（セシウム検出薬、マルチフェロイック材料、異方性ゲル、構造色を示す水など）の予期せぬ発見にも至った。これらは今後さらなる研究の発展性を示すものと言える。</p>
【評価項目】	コメント
<p>①研究計画、実施体制、マネジメント、連携 （事前・中間評価の結果を受けて、ロードマップに問題はなかったか、実施体制は十分だったか、マネジメントの是非、連携の範囲や連携課題、連携の成果はどうだったか）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中間評価でのコメントをふまえて応用にも十分目配りされた展開がなされ、極めて高いレベルの成果を挙げている。 ・ 中間評価を受け、グループ間の連携を高めることで、サブテーマ間の共同論文 167 編など、更に多くの成果を得ている。 ・ 中間評価後企業を含め他機関との連携も十分とられ、それを裏付けるように他機関との共同研究予算である CREST や外部資金を豊富に導入できているところは評価できる。 ・ 限られた人員と予算の中で、898 報にも及ぶ論文発表は驚異的である。 ・ 実施体制は定年制職員の数は比較的少ないがポスドクを含む研究参加者の数は本プロジェクトに対し 100 名を超えており、量的には十分なスタッフの数を獲得できている。 ・ これは MANA の優れたポスドク制度のたまものであると考えられる。 ・ 融合プロジェクトに資金提供するなどの試みにより、グループ間の協力関係を推し進めるなど、マネジメントが有効に働いた例といえる。 ・ また電極触媒や熱電材料の成果にみられるように、連携融合研究の成果も 167 報を数え、熱心に分野融合を進めたことが理解できる。 ・ またこの連携による成果は共同論文の形で多くの実を結んでいるが産業界での実用化の観点で、高誘電性ナノシート膜等で大型の共同研究が始まっていることは評価できる。 ・ 数多くの世界トップの成果発信はマネジメントが適切かつ効果的になされたことを示すもので、極めて高く評価できる。 ・ マネジメントは研究成果から 100 名を超える研究者を有機的に配置し、それぞれの独自性を担保しつつ全体として本プロジェクトのナノ材料の組成、構造を制御する新たな材料合成法を中心に新材料を創出し新たな機能を見いだしていく方向で統一されているところは上手なプログラムの実施、運営であった。 ・ 中間評価においてロードマップをしっかり持って数値化すべきであるとの意見が出ていたが、このような新しい材料開発を中心とした基礎研究において研究目標を、数値を含んだロードマップ化するべきであるとの判断は研究や発想の自由度を狭めるものであって、本プロジェクトではマイルストーンの設定にとどめ数値化をしなかったのは正しい選択であった。 ・ その結果がこの様な際だった成果につながったと考えるべきである。 ・ この効果の高い体制を継続され、世界をリードし続けて頂きたい。
<p>②プロジェクトの具体的な達成度 （目標は達成されたか、学術的価値、社会的価値、経済的価値の創造につながったか、技術レベルの向上につながったか）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 目標は十分達成したと評価する。 ・ 本プロジェクトの具体的な目標はケミカル・ナノテクノロジーによる革新的シーズ材料・技術の創出、2次元ナノシートのエレクトロニクスへの応用、無機系ナノチューブ・ナノワイヤーネットワーク物質による放射基板、紫外線センサー、太陽電池セルを望む新材料の創出、超分子テクノロジーによる DDS、有機光電変換素子等の機能性デバイスの開発、ナノチューブ、ナノシートの評価に基づくデバイスプロトタイプの作製、ナノ構造制御電極触媒による高効率化学電気エネルギー交換触媒の創出とされている。 ・ しかし実際に行われた多くの研究成果はそれ自身きわめて基礎的研究で独創性の高い学術的価値の高いものであり、将来の経済的、社会的価値の創出につながるものであるが、本研究の最終ターゲットとの関連からいえば応用への展開がやはり弱かったと見られかねない。

	<ul style="list-style-type: none"> ・目的とする数値を超えた機能材料の開発が進み、Cs 検出試薬の実用化、誘電体ナノ薄膜の企業との共同研究の開始など、研究成果が社会に還元されるとともに、経済価値の創出についても、今後、十分な展開が期待できる。 ・本研究は基礎的な研究でありその価値の普遍性が将来の価値を生み出していくのであるとの信念に基づいて研究を立案された方がもっと革命的な成果が出た予感を持たせるものである。 ・評価法にしても、TEM とプローブ顕微鏡を組み合わせ、原子レベルで評価しながら、構造の制御にともなう特性の解析を行う新しい取り組みも、技術レベルの向上に繋がっている。 ・研究成果の質の高さは数多くの招待講演、受賞、被引用数などからあきらかで、学術的にも社会的にも価値創造につながったといえる。 ・ナノシートの学術は” beyond graphene” として世界的にも活発な研究が展開されているが、この分野において佐々木プロジェクトリーダーは数多くの重要な国際会議に招待され、世界の第一人者として認知されている。 ・そもそも論になるがこの様な研究機関のプロジェクト研究は大きな研究の流れを作り出すのが使命でそれはこの様な研究機関しかできないのであるから、今後も自信を持ってその方向で研究を展開されることを勧めたい。
<p>③研究開発の進捗状況 (研究により得られた成果は、世界レベルで比較して高いか、予算に見合った成果が得られたか、将来の新しい研究の芽が得られたか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・世界的に見て、非常に卓越したレベルの成果が得られている。 ・被引用回数の多い論文も多数ある。 ・得られている成果は世界的レベルに比較してトップレベルに十分行っており、高い評価が与えられると考えられる。 ・上記のように研究開発は世界トップレベルであり、予算額からは到底不可能とも思える質量ともに非常に優れた成果が得られている。 ・配分予算に比べて非常に大きな進展があったプロジェクトと言える。 ・相対的には少ない直接的な予算で大きな成果が出ており、優れた研究者集団であることを示唆している。 ・また、新規機能材料開発は、将来の新しい研究の芽となり、更なる展開が期待される。 ・またメソ領域への展開など将来にむけて新しい芽へも目配りされており、今後更なる発展が期待できる。 ・またナノシートの研究を中心に種々のナノシートが開発されており、将来大きな発展が期待される分野の創出に成功している。 ・また DDS やセシウム検出試薬等時代の要請にも対応できる柔軟性を示したことは本グループの卓越性を示している。 ・また TEM のその場観測装置の開発はきわめて特徴的であり、その技術の普及を是非図ってもらいたい。
<p>④見込まれる直接の成果(アウトプット)、効果・効用(アウトカム)や波及効果(インパクト) (質の高い論文・特許が多く出たか、新技術や実用材料につながるか、思いがけない成果があったか、他分野への波及効果はあるか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・本プロジェクトは数多くの成果を出している。 ・高 IF ジャーナルに圧倒的な数の論文発表を行うとともに、それらの被引用数の多さが示す波及効果の大きさは、文句のつけようがない。 ・Nature、Science などを含む原著論文 898 編、特許 175 件、招待講演 824 回、受賞 41 件、50 種類を超える新規ナノチューブ、ナノシートの創成など、卓越した成果と考える。 ・その結果は原著論文がトップジャーナルへの数多くの寄与も含め約 900 報、招待講演 800 回以上、特許登録 100 件以上、受賞 40 件以上という数値に如実に表されている。 ・また論文引用頻度も高く世界的に高い評価を得ている。 ・これらの結果は本プログラムが成功裏に行われていることを示しており、将来への発展が期待される。 ・ナノシートを用いたキャパシター作製の成功と民間企業との大型共同開発は波及効果の高さを示す好例である。 ・ナノシートに関する研究を中心に高誘電体シートの発見、DDS、セシウム検出試薬等の開発等多くの応用可能性を見いだしてきた。

	<ul style="list-style-type: none"> ・また多くの特許も取得しており、際立った成果といえる。 ・層状結晶の巨大水和膨潤現象の発見、機能性ヒドロゲルの創成など、新たな成果が得られており、セシウム可視化試薬（セシウムグリーン）は2013年夏から販売されている。 ・誘電体ナノ薄膜は共同研究に発展している。 ・またエレクトロニクスへの展開の可能性も出てきており、将来が期待される成果となっている。 ・新規機能材料の開発は、その目的にとどまらず、他分野への影響、波及効果も大きいものと考えられる。 ・ただどこまで実用材料になり得るかはこれからの研究課題であり、本研究はその種を大きくまいたことになるかと評価される。
総合評価点 (10点満点)	9.0点 (小数第二位四捨五入)
その他 研究全体に対する総合的な所見、①～④に入らない所見、問題点、あるいはプロジェクトに対する印象など自由にご記入ください	<ul style="list-style-type: none"> ・大変質の高い基礎研究を成果としてその応用の芽を生み出している。 ・NIMSの特徴・利点を活かし、多くの大学との連携など進めて卓越した成果をあげており、材料科学分野をリードするグループと考える。 ・CRESTをはじめ、外部資金の獲得も十分に達成されている。 ・申し分のないプロジェクトであるが、理論と実験の融合をさらに進め世界トップの現状を維持発展させるべく、よりエネルギーを注力されることを期待している。 ・今後、同様の機能材料開発に加え、これまでに得られた成果を基にメソ領域へと展開することで、材料自体の新しい特性開発に加え、システムとしての新規機能の発現も期待できる。 ・ただ最終ターゲットとしてエレクトロニクスへの応用をかなりの重点で目指しているが、現在のエレクトロニクスは高度の信頼性と再現性が担保されない限り材料として使うことができないのでエレクトロニクスへの応用を考える場合はその専門家とのさらなる共同研究が是非必要である。

第3期中長期計画プロジェクトの事後評価基準

評価点	評価	評価基準
10	S	全ての点において模範的に優れていた。 多くの点において模範的に優れていた。
9		
8	A	総合的に優れていた。 顕著な成果が出た優れたプロジェクトであった。
7		
6		
5	B	平均的なプロジェクトであった。 一部の計画の見直しが必要であった。
4		
3		
2	C	期待されたほどではなかった。 計画を大幅に見直して実施すべきであった。
1		