

## ERATO 彌田超集積材料プロジェクト事後評価（最終）報告書

【研究総括】 彌田 智一（東京工業大学科学技術創成研究院超集積材料研究ユニット・  
化学生命科学研究所／教授）

【評価委員】（敬称略、五十音順）

高井 まどか（東京大学 大学院工学系研究科／教授）  
中條 善樹（委員長；京都大学 大学院工学研究科／教授）  
鳥本 司（名古屋大学 大学院工学研究科／教授）  
藤田 照典（三井化学株式会社／シニアリサーチフェロー）

## 評価の概要

ERATO 彌田超集積材料プロジェクトの基本構想は、異種材料をナノ・マイクロスケールで規則性を持って配列させることにより、材料の単なる足し合わせでは顕在化しない構成成分間の相互作用を新たな機能として発現する「超集積材料」の創成であった。構成成分の規則正しい配列を実現するための強力な材料化学プロセスの開発と新しい方法論の提示を達成するため、基盤技術として「テンプレート（鋳型）技術」を据え、様々な材料に適用することにより、全く異なる物性、特徴を持つ先端材料をゼロから探索し、実用化につなげるという意欲的・挑戦的な内容であった。プロジェクト運営に際しても、進捗に応じたフレキシブルな対応、企業との共同研究や学外における研究会設立など積極的な対外連携、弁理士との早期からの情報共有や若手研究員の研究環境への配慮等、研究総括による意欲的な取り組みが見られた。

研究面では上記の基本構想達成に向け、新しい転写プロセスの開発を目指す転写材料グループ、自然界のナノ・マイクロ構造の機能化プロセス開発を目指すバイオテンプレートグループ、分子グリッド配線と単一分子伝導特性の評価法開発を目指す分子回路グループ、異種物質のナノ規則配列により誘起された機能の開発とその実装を目指すナノ接合グループの4グループを組織し、①分子回路工学：異種材料の集積化プロセス（分子回路G、転写材料G、ナノ接合G）、②バイオテンプレート法：かたちの転写プロセス（バイオテンプレートG、転写材料G）、③デバイスを志向した展開研究というテーマにグループ横断的に取り組んできた。

①分子回路工学では、ブロックコポリマー相分離を応用した高密度ナノロット基板、メタルフリー連鎖的重縮合技術を活かした分子架橋による分子グリッド配線を実現するとともに、架橋状態の非破壊的的化学分析法および分子配線の電気伝導度の一括評価アルゴリズムの開発まで達成した点は高く評価できる。さらに、傾斜接合による分子回路に必要な分子素子による電気伝導の整流性の実現にも取り組み、樹状分子ビオロゲンをを用いた分子内で電子伝導を実現するための新たな概念の実証など、ユニークな成果が得られている。②バイオテンプレート法では、らせん藻類であるスピルリナに無電解めっきを施すことで得られるマイクロコイルの作製および電磁コイルへの応用に向けた特性解明のほか、珪藻を用いた金属ナノホールアレイや界面活性剤の添加により機能を保ったまま簡便に得られる高濃度のタンパク質含有物（タンパク質凝縮体）など、顕著な成果が得られている。③デバイスを志向した展開研究については、高密度な細孔が垂直貫通した大面積かつ孔内修飾可能なブロックコポリマースマートメンブレンやナノ構造材料を利用した小型極端紫外光（EUV）線源といった特徴的な成果が得られている。論文発表件数から見ると十分とは言いがたいが目に見える成果が得られており、ERATO で期待される到達レベルにあると言える。また、バイオテンプレートやブロックコポリマースマートメンブレンについては、具体的な応用展開を議論できる段階まで到達しており、産業面からも高く評価できる。

本プロジェクトでは、研究総括が目指す新たな材料化学プロセスについて、インパクトのある

研究が進められ、応用展開を見据えたレベルの高い要素技術が創出されている。新しい学術領域を拓くとともに、未来材料として進展が期待されるものが生まれたと言え、戦略目標「プロセスインテグレーションによる次世代ナノシステムの創製」の達成に資する成果が得られると評価する。

プロジェクトの真価を決めるのは今後の研究活動次第であると言える。プロジェクト終了後も、これまでに得られた成果およびこれからの成果を、学术界、産業界等へより積極的、戦略的に情報発信していくことを強く期待する。

## 1. 研究プロジェクトの設定および運営

### 1-1. プロジェクトの全体構想

多くの材料は単独で用いられることは少なく、他の材料や技術と併せて用いられている。従来の混合物、複合材料、ハイブリットといった材料では、各成分の混合状態の均質性や規則性がほとんど考慮されずに混ぜ合わされ、基本的には各材料・成分の性質や機能を単純に足し合わせた（線形性）複合機能が利用されてきた。一方で、ナノスケールでの混合では、各成分間の多様な相互作用によって、単なる足し合わせを超えた新たな性質が期待されるが、実際には各成分のドメインサイズ、構造周期、配置配列にある程度の均一性がないと、混合物全体の機能としては現れにくい。したがって、各成分間の多様な相互作用を顕在化させ、新たな物性や機能を生み出すためには、ナノスケールで高い規則性を持って配列した混合状態を作り出すことが重要である。既知の材料であっても、「適切なスケールで、規則正しく（上手に）混ぜる」ことが可能になれば、非線形的な未知の機能を生み出すことができるはずである。

本プロジェクトは、異種材料をナノ・マイクロスケールで、「規則性を持って上手に混ぜ合わせる」ことにより、単なる性質の足し合わせからは得られない、各成分間の相互作用が新たな機能として顕在化した「超集積材料」の作製プロセスを目指した。既存の複合材料やナノ・マイクロ材料の延長ではなく、ナノ・マイクロレベルでの構造制御と制御体の均質な混合状態の実現による「革新的機能を持つ新材料」の開発を目指す意欲的・挑戦的な構想である。また、ゼロからの課題探索を基本に、構造構築要素として微生物、生体高分子、有機分子、無機化合物、高分子、半導体、金属等を幅広く検討しており、従来の研究手法の延長ではない材料合成の新たな概念を提案するものである。さらに、「なぜ、その技術が求められているのか」を重視した材料化学プロセスの開発を進めており、材料化学研究の新しい方法論の提示と次世代産業への創出の両方が期待される、極めて挑戦的かつ融合的なプロジェクトであったと言える。

### 1-2. プロジェクトの目標・計画

上記の全体構想に基づき、本プロジェクトでは（1）分子の力で異種材料を組織化する新しい転写プロセスの開発を目指す「転写材料グループ」、（2）自然界のナノ・マイクロ構造の機能化プロセスの開発を目指す「バイオテンプレートグループ」、（3）精密重合を用いた分子グリッド配線と単一分子伝導特性の評価法開発を目指す「分子回路グループ」、（4）異種物質のナノ規則配列により誘起された機能の開発とその実装を目指す「ナノ接合グループ」の4つのグループを置いた。そして、これらのグループが連携しながら、①分子回路工学：異種材料の集積化プロセス（分子回路G、転写材料G、ナノ接合G）、②バイオテンプレート法：かたちの転写プロセス（バイオテンプレートG、転写材料G）、③デバイスを志向した展開研究をグループ横断的なテーマとして取り組んできた。プロジェクト4年目の予備評価（平成27年度実施）以降は、評価結果を踏まえテーマの選択と集中を行い、「分子グリッド配線の実証」を重点テーマに据え研究を実施した。

いずれの研究項目も、従来技術の延長線上にはない、革新的な技術開発を目指す挑戦的で画期

的なテーマであり、研究計画は妥当なものと思われる。

### 1-3. プロジェクトの運営

本プロジェクトは、プロジェクト発足当初は研究総括、研究総括補佐（グループリーダー兼任）とグループリーダー4名という体制で進められた。まったく新しい視点での基礎探索から応用展開（材料化学プロセス開発）まで包括するプロジェクトであることから、プロジェクト前半は各グループが応用展開を視野に入れつつも、探索・基盤研究をメインとするグループとデバイス化を目指すグループに分けて運営された。また、プロジェクト後期においては、4年次（平成26年度）に行われた予備評価の結果を踏まえ課題の選択と集中を行い、「分子グリッド配線の実証」を重点テーマに据えて研究を実施するなど、研究進捗にあわせて研究グループを何度か再編している。再編後に集中的に論文が出されており、研究プロジェクトの再編と集中がうまく機能したと言える。プロジェクト前半はERATOのポリシーである「新潮流を創る」ことに主眼を置き、ゼロからの課題探索と実践を行い、中盤以降に新しい方法論の提示、材料開発、および開発したナノ材料の活用とデバイス化を行うなど、研究進捗に併せた研究開発の効率化・加速化が図られた。

研究員の集め方、専門分野、各グループの人数などのバランスも妥当であった。研究総括のもと、ヘッドクォーターも適切に管理されており、JSTや研究総括所属機関との各種調整等も含む研究支援の役割が十分に果たされた。

研究総括のリーダーシップのもと、若手研究員が研究しやすい環境整備や、半期に一度の研究員、技術員、事務支援員らとの面談など人材育成を意識して、本プロジェクトは運営された。特に成果の発信に関して、主担当の若手研究員を論文の責任著者としている点は、人材育成の視点から評価できる。また、知的財産権利化にも力を入れ、若手研究員の啓発と早期のシーズ発掘を目指した若手弁理士との定期的面談の実施など意欲的な取り組みが進められた。

研究総括所属機関からの支援は、ハード面、ソフト面、共に充実したものであった。本プロジェクトでの研究拠点を研究総括本務の研究室の近くに集約できたことは、装置等の有効活用や人材交流の面で有利に働いたと考える。

企業との共同研究、産学連携プラットフォームとしてのバイオテンプレート研究会設立など、国内外の研究者との連携が積極的に行われた。現在の情報発信はバイオテンプレートグループの成果が中心となっているが、今後はプロジェクト全体として外部との連携を強化し、特に産業界との連携を従来に比して積極的に進めていくことで、よりいっそうの展開が期待される。

しかし、成果としての特許・論文数については、予備評価の時と比べれば格段に増えているものの、本プロジェクトの予算規模・研究体制を考慮すると満足できるものとは言い難い。研究総括には科学・技術を「育てる力」と「活かす力」の両方が求められる。高いレベルの研究開発がなされているので、その凄さ、優位性、展開の広さなどを分かりやすく発信して、メンバーの業績や貢献をアピールすることが運営上、重要である。プロジェクト終了後も、これまでの成果、その後の成果を発信する努力をしっかりと続けていただきたい。

〔研究プロジェクトの全体構想〕〔研究プロジェクトの目標・計画〕〔研究プロジェクトの運営〕  
a (的確かつ効果的である)

## 2. 研究の達成状況および得られた研究成果

### 2-1. 分子回路工学：異種材料の集積化プロセス

本テーマにおいては、分子・高分子、金属などの異種材料を構成物として電極、接続、配線を行う分子と材料の統合プロセスの開発、および作製した分子グリッド配線の解析手法開発により、分子伝導特性のマクロ計測法を開発し、真に工学的に使える分子回路工学の基盤技術の開発が進

められた。要素技術としては、①配線基板となる超高密度金属ナノ構造配列基板開発、②金属ナノ電極間をつなぐ分子架橋技術・評価法の確立、③電導経路解析法の開発に大別できる。

配線基板の開発においては、研究総括がプロジェクト開始前から有していた完成度の高いブロックコポリマーの相分離構造を応用し、数十 nm 以下のドット間隔で各種金属を配列させることに成功した。化学的なボトムアップ技術で高密度ナノドット基板を作製する技術は他にも見られるが、本技術では基板に垂直配向したナノロッド構造が構築されている点が特徴である。この金属電極間を架橋する手法として、ナノ電極表面から重合を開始し、隣接する電極表面にタッチダウンする重合停止が可能な導電性  $\pi$  共役系連鎖的重縮合技術を開発した。これにより、分子グリッド配線の基本形は実現できたといえる。また、この分子量制御可能なメタルフリー精密合成は、それ自体も新しい概念の研究であり、学術的に高いポテンシャルを有している。

さらに、架橋した  $\pi$  共役系高分子を表面増強ラマン散乱スペクトルによって分光学的に測定する手法を提案し、実際の測定に成功した。世界の趨勢が分子のランダム吸着に頼っている現状においては、分子量を制御しながらの架橋を可能とし定量化する本提案は、分子配線技術の確立に大きな優位性を持つと考えられる。

また、上記で作製した分子架橋基板（分子グリッド基板）について、抵抗値を定量的に扱うアルゴリズムを提案した。従来の分子抵抗では個々の分子配線の抵抗を繰り返し計測し、特性評価を行う必要があったが、本提案はマクロ計測によって各分子配線の抵抗値を高い精度で評価可能とするオリジナルなものであり、すでに分子グリッド配線デバイスのグロス抵抗値の測定を予備的に開始している。1回の電気伝導度測定から、個々の配線の伝導度の統計値を得ることにはまだ成功していないが、その解析に必要な理論の構築は進んでおり、近いうちに達成されることを期待したい。構想提案時の分子グリッド配線としての完成には至っていないものの、基板製作、配線からその評価までを一括で開発しようというハード・ソフト両面の基盤的な検討として高く評価でき、新たな分子配線技術として期待できる。今後は、実用化に向けての産業界との連携強化を目指し、既存の分子回路研究における本成果の位置づけや、特長を精査して研究を遂行することが求められる。

本テーマでは、傾斜接合による分子回路に必要な分子素子による電気伝導の整流性の実現にも取り組んでいる。ひとつは金属表面を基点とした傾斜構造を持った樹状分子の非対称性構造を利用した、エネルギーロスを最小限に抑えるエントロピー駆動による電子輸送という新しい概念の提案である。半導体素子において達成されている様なビルトインポテンシャルを分子内部のレドックス官能基の傾斜配列によって達成し、電極から垂直方向の化学ポテンシャルのわずかな傾斜を構築して電子の流れの方向を一方向にするという狙いで、ビオロゲンをレドックス官能基として、これらが放射状に連なった dendrimer 分子を合成し、実際に分子内に整流性が生じることを確認している。さらに、分子を電極上に配列させた分子デバイスの作製も行い、分子内での電子伝導の整流性を実現するための新たな概念を実証している点も高く評価できる。今後、さらなる分子種の電気伝導異方性データの蓄積により、分子ダイオードの実現が期待できる。

もうひとつは、ガリウム合金・脱合金化法による金属ナノポーラスの作製で、電極側ナノ傾斜接合作製プロセスである。マイクロ相分離と電気化学的手法を組み合わせたユニークな構造形成手法で、プロセス技術の開発までが成果として挙げられている。整流性の実証には至らなかったが、ナノポーラス化によって、局在表面プラズモン特性等、構造依存的と考えられる違いが見えてきている。金属の構造化により本質的に全く異なる材料に発展するかどうかは今後の検討が必要であるが、新しい物理的特性が見出されることがあれば興味深い。

また、プラズモニック材料への展開が期待される金属ナノ構造体のサイズ制御を目指し、ガリウムを用いた可逆的な粒径制御法を開発し、サイズ変化に伴う表面プラズモン共鳴吸収波長の変化も確認している、

## 2-2. バイオテンプレート法：かたちの転写プロセス

かたちの転写工学プロセスは、バイオテンプレートグループ、転写材料グループの成果に基づき、生物の持つ構造を利用し、材料に活かすことを目的としたものであった。

このテーマでの大きな成果のひとつは、らせん藻類による金属マイクロコイルの作製である。らせん形状を持つ藻類のスピルリナをテンプレートとして無電解めっき法を駆使し、スピルリナの持つらせん構造を活かしたマイクロコイルを作製するプロセスは非常にユニークで、細胞との親和性の最適化など様々な技術的工夫がなされていると評価できる。培養法の確立により、このサイズ領域における長さ、直径サイズ、らせんピッチ、らせん構造の制御にも成功した。得られるテンプレートが十分に高い均一性を持つこと、培養により量産も可能であることから、この成果は本サイズ領域における機能性材料の新たな方向性を示すものと言える。また、材料プロセスへの利用の一例として、銅マイクロコイルの電磁コイルとしての性能を提示した。テラヘルツ波応答特性（電磁波吸収）の解明、さらに多数集合体を、磁場を用いて高度配向させる新手法の開発により、3次元空間異方性を持つ興味深い集合体の構築に成功した点は高く評価できる。これらのコイルは、サイズ、巻き方向、構造の制御、生産性という特長を持つため、競合する既存技術と比較しての材料の加工精度や電磁波吸収特性の優位性、用途の方向性等をアピールすることにより、新たなニーズを生み出す新規材料としての展開が期待される。

本プロジェクトでは珪藻を用いた金属ナノホールアレイの構築にも成功しており、直径数百 nm 程度のナノホールが貫通した金属基板を作製した。この材料は可視-近赤外領域光に対して興味深い異常光透過特性を示す。この性質は、ホールアレイ全体だけではなく、シングルホールにおいても確認されている。また、得られた金ナノホールアレイのプラズモン特性が、金ホールサイズと配列規則性によって制御可能であることも実証している。このような異常光透過機能を有する金属ナノホールアレイは、近年になって見出された新しい材料で、将来的には複次の無機・有機色素材料との組み合わせによる全く新しい光制御デバイスへの応用が期待され、世界中で開発競争が行われている。現行の電子ビーム加工では、ナノレベルでの孔径、孔の深さなどの加工精度を保持したままアスペクト比を上げることは非常に困難であり、この状況に大きなブレークスルーを与える技術として、本プロジェクトの成果に期待がかかる。新たな光学材料・電子素子の開発に役立つ技術であり、大いに発展すると期待できることから、転写体のプロセス開発に留まらず、安価、簡便、迅速な製品供給を可能とする技術として、既存技術の現状との客観的な比較（特長、優位性）および情報発信が重要であろう。

また、生物のかたちの利用のひとつとして、タンパク質からのセラミック構造体作製やタンパク凝縮構造を制御する技術開発も進めている。後者については、ある種の界面活性剤をタンパク質と混合すると、水層から相分離し、高濃度のタンパク質含有物（タンパク質凝縮体）を取り出すことができるプロセスを見出しており、凝縮メカニズム、制御因子など基礎的な検証も着実に進めている。多くのタンパク質に適用できること、高粘性の液体サンプルであるため、取り扱いが簡便であること、酵素を用いて作製したタンパク質凝縮体では酵素活性が保持されることから、タンパク質の保存、試薬や医薬品開発等への「上手く混ぜる」プロセスの利用が期待できる。さらに、ゲル化、薄膜かといった操作も可能で新たな生体分子材料として化学センサーなどの新たなデバイス作製の手がかりとなるものであり、今後の研究進展と実用化が大いに期待できる。

本テーマはナノ・マイクロ構造を実現するために多くの生物の持つかたちに着目し、その可能性を広く検証しており、バイオテンプレート技術という概念を感じる事ができた。構造形成が達成された成果例から、地道な機能向上の取り組みが着実に進められていることが分かり、プロジェクトの標榜する「工学的に利用可能な新しい作製法の提示」は達成されていると言える。引き続き、これらの成果を学术界、産業界に確実に発信することに努めてほしい。

### 2-3. デバイスを志向した展開研究

本テーマでは、研究総括が開発した両親媒性液晶ブロックコポリマー等、プロジェクト発の材料・物質を利用して、新機能・デバイスの創出やさらなる展開を目指すものであり、①ブロックコポリマースマートメンブレン、②小型極端紫外光（EUV）線源の研究を進めた。本テーマは、特別重点期間（平成28年度）においては、東京工業大学の総括所属研究室に拠点をシフトする形で継続した。

ブロックコポリマースマートメンブレンとは、液晶性ブロックコポリマーを用いることにより、基板から垂直に細孔が形成された薄膜作製技術を発展させたもので、企業との共同研究により Roll-to-Roll 技術を開発し、メートル単位でのスマートメンブレンの量産に成功した点は、研究加速の面で高く評価できる。また、細孔の配列規則性を自在に制御することに成功したほか、鎖長の異なる液晶性ブロックコポリマーからなる薄膜を積層化することによって、基板から細孔が貫通し、かつ途中で細孔径が異なる異方性細孔薄膜を作製することにも成功した。ナノレベルのチャンネルを設計可能な本技術では、従来のリソグラフィ技術では困難なスマートメンブレンの大量積化が簡便にできるという利点もあり、機能性電池セパレータ、逆浸透膜、DNA 選択的透過膜、触媒を入れて反応場として利用するといった幅広い用途への応用が期待される。

小型 EUV 線源は、超集積材料をターゲットとして、大型放射光を利用せずに実験室で使用可能な小型 EUV 光源を実現しようという提案である。EUV は次世代リソグラフィ光源として期待されているが、EUV 光学系、レジストといった周辺技術の開発研究には、大型放射光施設で実験を行う必要があった。本提案の小型 EUV 線源が実現すれば、実験室レベルでの関連技術開発が加速され、学術的にも EUV 光化学といった新分野の創成が期待できる。現時点までに、ナノ秒レーザー誘起 EUV 発生まで確認された。ナノ構造化ターゲットの安定性向上や放射特性（回折増強など）の検証・制御といった課題も多く残されているが、今後の研究進展によってテーブルトップサイズの小型 EUV 線源の実用化は可能と思われる。本提案により極短波長の光源が手軽に利用できるようになれば、ナノ構造材料の利用として非常にユニークな提案になりうると考えられる。

本テーマは、超集積材料の新しい展開を強く求めた研究の位置付けであり、応用が期待できる成果が得られたと言える。今後、期待する機能がいかに発現されるのか、それが学術的にどのような新しさを持つのかをしっかりと発信していくとともに、競合技術／製品（同種・異種）との違い、技術の特徴や限界、その技術ならではの具体的な利用例などを産業展開に対しても発信して欲しい。

以上にに基づき研究成果を俯瞰すると、プロジェクトで開発された各要素技術は非常に高いレベルにあり、評価できる。特に、分子グリッド配線、金属マイクロコイル、タンパク質凝縮体に関しては、顕著な成果が得られたと評価できる。またバイオテンプレートグループが主導した「バイオテンプレート」や展開研究である「ブロックコポリマー透過膜」については、具体的な応用展開の議論ができるところまで来ており、応用という視点からも評価できる。分子回路グループが主導した「分子回路工学」については、異種材料の組み合わせによる集積材料としての分子回路「分子の電気伝導特性を高い信頼性で一括評価できる分子グリッド配線」を新しく提案し、配線技術の確立、伝導経路解析アルゴリズムの評価、分子配線の化学的検証まで実施したことは大きな成果と評価できる。分子グリッド配線、ナノ傾斜接合、小型 EUV 線源などの、学術的な価値は高いがすぐに応用に結びつかない成果についても、特徴と考えられる可能性や限界、具体的な利用例を発信していくことで、産業的な展開につながることを期待する。

本研究は、新しいプロセス技術と集積化材料をゼロから見出すというコンセプトの研究であり、大胆な挑戦を貫徹する、という研究総括の強い意志のもと実施された。新潮流を創る、価値の芽を創るという ERATO の目的は達成されているが、論文数や特許数の観点からは、もちろんそれらのみで成果を測ることはできないことは認めつつも、プロジェクト規模を鑑みると満足いく水準とは言いがたい。プロジェクト終了後も、継続してこの分野の基礎学術さらに産業化などの情報

発信や展開を進めていくことを期待する。その際に、既存材料や技術との客観的な比較を明示することで、より学术界、産業界にアピールできると思料する。

〔研究の達成状況および得られた研究成果〕 a（高い水準にある）

### 3. 研究成果の科学技術、社会・経済への貢献

#### 3-1. 科学技術への貢献

従来技術ではなしえない、要素材料の形・配置・配列を規定した均質な混合状態を実現する強力な材料合成プロセスの開発と新しい方法論を、真に提示している。現在の科学技術水準を一步先に進めることができたといえ、十分な科学技術への貢献が見いだせる。

バイオテンプレートにおける金属めっきの技術は、生物の「性質」を模倣し類似の機能を生み出す（バイオミメティクス）のではなく、生物を鋳型として「かたち」を模倣し、新たな機能を生み出しデバイス化するという発想であり、新しい科学技術を拓く研究テーマであったと評価できる。

また、その他の技術に関しても、スマートメンブレンなどに進展が見られ、新たな機能性材料プロセスとしての展開が期待される。個々の技術は高いレベルに達しており、科学として高く評価できる。今後、実際に利用可能な技術にまで展開できるかが、重要な課題である。

#### 3-2. 社会・経済への貢献

研究総括が中心となって、産業界・アカデミアを巻き込んだ研究会の立ち上げや、様々なアウトリーチ活動を実施している。既に産業界との連携には取り組んでおり、企業からのアプローチも受けているが、より積極的な交流を進め産業界とのニーズのマッチングに努めることで、社会・経済への貢献はさらに大きくなると期待できる。これまで異分野融合の成果として開発・提示してきた材料集積化プロセスを、いかにデバイス化していくかを想定される用途も含めて示すことにより、化学、物理、電気、医療など様々な分野への波及を期待する。

〔科学技術への貢献〕〔社会・経済への貢献〕 a（貢献が期待できる）

### 4. その他特記すべき事項

#### 4-1. 若手研究者支援

研究総括の高い見識に基づきプロジェクトを運営し、有機的なつながりのあるプロジェクトとであった。国内外の研究者との積極的な交流や、半年ごとの面談といった試みもなされており、若手研究者支援やキャリアパス支援など人材育成の視点から、高く評価できる。一方で、若手研究員の研究成果発信は十分とは言えないことから、プロジェクト終了後も若手研究員の成果発信を勧奨することが望まれる。

#### 4-2. アウトリーチ活動

プロジェクト発足以来、バイオテンプレート研究会を中心として、企業や他の研究コミュニティに向けたアウトリーチ活動を続けてきた。また、学会等に対する活動のほか、次世代を担う高校生とのコミュニケーションや小中学生向け教室など、本プロジェクトで独自に開発したプログラムを用いた多様な活動に積極的に取り組んだ。プロジェクト終了後もこのようなスタイルで継続して実施することが望ましい。

## 5. 総合評価

本プロジェクトは、ナノ・マイクロスケールにおいて、要素材料のサイズ、かたち、配列、配置を規定し、均一な混合状態を実現する強力な材料化学プロセスを開発し、工学的に利用可能な革新的機能材料の開発と新たな方法論の提示を目標としたものであった。目標達成に向けた基盤技術として、テンプレート材料化学プロセスを据え、機能分子やナノ材料を、規則性を持って配置配列させ、その相互作用を顕在化させることによる新機能創出を目指した。

この目標に向け、①分子回路作製からその評価法までを包括的に提案する分子グリッド配線、②生物のかたちを転写し、有用な機能を持たせるバイオテンプレートプロセス、③ブロックコポリマースマートメンブレンや超集積材料を利用した小型 EUV 線源など、今後の発展が期待されるユニークな提案をしており、個々の研究からは、いずれも興味深い成果が得られている。各グループ進捗の差はあるものの、新しいテンプレート技術としてレベルの高い要素技術が開発されており、科学的にインパクトのある研究と評価できる。研究が進めばコアテクノロジーとして材料化学分野のみならず、応用物理、電気・電子工学、エネルギー化学等、様々な分野への広がりも期待できる。本プロジェクトで提示する構想は、材料化学研究の新しい方法論の提示に繋がると共に次世代の産業基盤の創成も期待される。壮大な研究構想の下、困難な課題にチャレンジした結果、上述の通り成果の芽は着実に育っており、目に見える成果が得られている。プロジェクトの進捗を鑑みると、さらなる成果が期待できることから、プロジェクト終了後も確実に成果を発信していくことを強く期待する。特に開発された要素技術と既存の類似技術との客観的な比較を明確に提示していくことにより、本プロジェクトの研究成果が際立ってくるものと思われる。

プロジェクトの運営については、若手人材育成や弁理士との定期的な面談といった意欲的な試みや、ヘッドクォーターの有効活用によるサポート体制の構築など研究総括の理念に基づき、工夫がなされた。また、産業界や一般に向けたアウトリーチ活動にも着実に取り組み、社会への貢献を見据えた活動が行われたと評価する。

以上、総合的に判断すると、本プロジェクトは高水準の要素技術の開発に成功している。新しいテンプレート技術で科学的に大変インパクトのある研究を進め、手法論の提示にとどまらず、機能探索に関してもデバイス特性の評価の実施あるいはその手前まで達している。新しい学術領域を拓くとともに、未来材料として進展が期待されるものが本プロジェクトから生まれたと言え、戦略目標「プロセスインテグレーションによる次世代ナノシステムの創製」の達成に資する成果が得られると評価する。

〔総合評価〕 A（成果が得られた）

以上