

プロジェクト事後評価報告書

評価委員会開催日：平成28年12月22日

評価委員：（敬称略、五十音順）

岸本 昭 岡山大学大学院自然科学研究科 教授

河本邦仁 豊田理化学研究所 フェロー

芹澤 武 東京工業大学物質理工学院応用化学系 教授

確定年月日：平成29年2月20日

プロジェクト名	有機分子ネットワークによる材料創製技術
研究責任者の所属・役職・氏名	機能性材料研究拠点・副拠点長・一ノ瀬 泉
実施期間	平成23年度～平成27年度
研究目的と意義	<p>優れた分子機能をもつ巨大分子（導電性高分子、配位高分子、超分子ポリマー、機能性色素、フラレン誘導体、無機ファイバー等）を合成し、精密なネットワーク構造を設計することで、材料としての革新的性能の実現を目指す。分子ネットワークとしては、多官能性モノマーからのソフトマターの創製、巨大分子の架橋化による多孔性シートの構築、相分離や超分子相互作用による直鎖状高分子のネットワーク化、ネットワーク錯体による多孔性物質の設計などを含む。本プロジェクトでは、ナノからサブナノメートルスケールでの網目状の分子集積構造を設計することで、固液相変化による力学特性制御、分子やイオンの高選択透過、高速電気化学スイッチング、高性能のガス吸着特性などを実証する。また、構造解析と物性理論ならびに物質移動論に立脚した「分子ネットワークの材料科学としての学理」を構築し、情報通信、環境・エネルギー、医療などへの応用が可能な革新的な材料を提供することを目的とする。</p> <p>本プロジェクトでは、高性能の材料・デバイスを創出するための物質設計の基軸となる概念として「精密分子ネットワーク」を捉え、電子・イオン移動の高速化、吸着や物質透過の制御、エネルギー変換の効率化などを合目的的に実現することで、世界的なデファクトスタンダードになりうる有機・高分子材料を創製する。これにより、我が国の国際競争力を強化し、同時に、21世紀の環境・エネルギー問題の解決と新産業の創出に貢献することができる。</p>
研究内容	<p>本プロジェクトは、3つのサブテーマにより実施する。サブテーマ1では、精密分子ネットワークの設計により革新的な分離機能材料を探求する。分離対象としては、水や二酸化炭素などの環境・エネルギー分野における基幹物質に着目し、エネルギー効率に優れたガス分離材料、液体の高速透過を可能にするナノ分離膜の開発を行う。サブテーマ2では、有機合成や超分子化学の手法により、既存の材料を凌駕する光・電子機能を開拓することを目指す。サブテーマ3では、電気伝導性やイオン、分子の透過性に優れた高機能材料を薄膜状に集積し、有機トランジスタや電子ペーパー、スマートウィンドウ、高速駆動アクチュエーターとしてのデバイス機能を実証する。また、多電子光化学反応の高効率化の検討も行う。</p>
ミッションステートメント （具体的な達成目標）	<p>サブテーマ1では、$200\text{m}^2/\text{g}$以上の比表面積をもつ高分子ナノファイバーを大量に製造する技術を確認し、石油随伴水の高効率浄化技術としての評価を行う。また、高強度NF（またはRO）膜を開発し、企業における社会実装をサポートする。サブテーマ2では、従来材料の性能を遥かに凌ぐπ電子系高分子や発光性分子を開発し、有機デバイスとしての基本物性を解明する。ま</p>

	<p>た、相溶性に優れた液状有機色素を開発し、発光材料としての実証実験を行う。サブテーマ3では、高移動度有機FET（電界効果トランジスタ）の構築と集積化、デバイス機能の実証を行う。また、酸化還元反応に伴う発色性や、アクチュエーターとしての力学的特性の変化を評価する。</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) : 比表面積が 300 m²/g を越える高分子メソ多孔体が量産化され、石油随伴水からのオイル吸着材としての有効性が確認された。また、硬質カーボン製の NF 膜を開発し、98%の MgCl₂ 除去率と 5 L/m²·h·bar を越える著しく大きな透水性を達成した。さらに、RO 膜用に量産化されている高分子製非対称膜を用いて、同様の性能と耐圧性を確認し、量産化のための多くの課題を解決した。一方、色素分子の超分子ポリマーにおいて、リビングポリマーと同様のメカニズムで、長さを自在に制御する技術を開発した。また、蛍光特性を有する共役高分子を精密に分子被覆することで、優れた熱可塑性を発現させることに成功した。さらに、フルカラー発光する液状アントラセン色素を開発し、有機硫黄化合物から常温・常圧下で金属電導性を示す新材料を見出した。これらの研究は、有機材料の分子設計と物性制御に新たな指針を与え、世界的な注目を集めている。エレクトロクロミック材料では、表示デバイスとしてマルチカラー化に成功し、濃厚な黒色を作り出すことにも成功した。さらに、耐久性能として、1万回を越える On-Off 性能が達成され、スプレーコーティングによる大面積化も実証された。また、有機 FET デバイスでは、シリコンに匹敵する移動度と 6%以下の性能バラツキを達成した。さらに、医療センサ用の表面増強ラマン分光基板を作製し、増強度の揺らぎを極限まで抑えることで、超高感度化を実現した。</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) : 高分子メソ多孔体では、溶解パラメータが小さな物質を吸着し、かつ減圧下で高速脱着することが分かった。この特性を活かした分離システムは、平成 28 年度からの実用化プロジェクト(5年間)に展開している。硬質カーボン製 NF 膜も 9 年間の大型プロジェクト(COI-STREAM)が進行しており、社会実装が近づいている。学術面では、5年間で 150 報を越える論文が執筆され、平均 IF 値も 5.8 を越えている。特に、有機材料の研究では、独自の分子設計により、発光性能・電子物性において世界を先導する研究が行われ、マテリアルサイエンスの COE としての NIMS の一翼を担いつつある。</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 : 120%</p> <p>自己点検・評価 : 本プロジェクトでは、実用化可能な革新的機能材料を創出する観点から、参画者に「基礎研究の深掘りとターゲットの明確化」を求めた。その研究成果は、Science や Nature 姉妹誌への 6 報の論文掲載、5 件の文部科学大臣表彰を含む 27 件の受賞、38 件の特許出願と 24 件の登録特許に繋がっている。プロジェクトの中盤からは、学術面での若手研究者の活躍が目立ち、骨太の基礎研究は、大型の外部資金(CREST 3 件、A-STEP、COI-STREAM、最先端若手、e-ASIA、ALCA)の獲得にも繋がっている。プロジェクトの参画者は、実用化への道筋を説明することが求められたが、このような環境において、有機・高分子材料としての性能/品質/生産性を高めつつ、多くの新しい材料を生み出したことを、極めて高く評価している。</p>
<p>【評価項目】</p>	<p>コメント</p>
<p>①研究計画、実施体制、マネージメント、連携</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ロードマップは問題ない。 ・実施体制は十分である。

<p>(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、マネージメントの是非、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"> ・設定されたロードマップはおおむね妥当であり、必要十分な実施体制と評価できる。 ・国内外との共同研究が積極的に行われ、また研究目標を明確にしながら、良好なマネージメントが実施されている。 ・マネージメントも良く行われる中で、他研究機関との連携・共同研究があまり多くない一方、内部研究者の連携が上手く進んで多くの高水準の成果が上がっている。 ・人材を入れ替えつつ、若手メンバーの多くが表彰を受けるなど研究を通じての人材育成に成功している。
<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"> ・当初の目標を十分に達成している。 ・目標の120%が達成されている。 ・いずれのテーマについても得られた成果は高い学術的価値が認められる。 ・異なった分野それぞれで、ハイインパクトな論文誌に掲載されている。 ・産業化された、あるいは新しい産業化を提案するような研究が見られ、実用化を通して社会貢献が図られている。 ・DLC(ダイヤモンド状カーボン)製濾過フィルター、高分子メソ多孔体、各種光・電子機能を持つポリマーなどの合成・製造に関する成果が多く上がっており、デバイス応用の技術も着実に向上している。 ・分離膜についての技術レベルの向上につながっている。
<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"> ・当初目標であった「真に競争力のある材料を各サブテーマから少なくとも1件以上」の条件を優に超えており、目標以上の成果が得られている。 ・有機分子のネットワークに基づく機能創製に特徴がある研究であり、世界レベルの成果であると評価できる。 ・研究成果の多くが世界レベルに達している。 ・将来の新しい研究の芽もいくつか得られている。 ・アルカン分離に関する新たな研究シーズが得られており興味深い。 ・予算に見合った成果と言える。 ・外部資金の獲得額も多い。
<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"> ・質が高い論文が数多く出ており、有機材料に関する新技術および実用材料の創製につながる成果である。 ・Nature 姉妹誌、Science 等に質の高い論文を発表している。 ・若手研究者が順調に育っており、人材育成についても評価できる。 ・分子集合体の構造制御について魅力的な成果が得られており、他分野への波及効果が期待できる。 ・特に、DLC 濾過膜の開発は COI-STREAM (革新的イノベーション創出プログラム)へ採用されるなど、将来の実用化に向けた展開が期待される波及効果の高い成果である。 ・サブテーマ1の「有機分子ネットワークによる分離機能材料の創製」では、多くの企業が参画したプロジェクトで求められているコア材料を創生することに成功しており、今後の企業化が見込まれる。 ・今回得られた基礎研究成果を種にして、今後さらに応用研究、実用化研究へ展開して真に使える材料の開発に結び付けて行かれることを期待する。 ・思いがけない成果としては、高い導電性を示すポリマーメタルの発見が挙げられる。 ・また、特許出願も積極的に行われている。 ・多くの競争的資金の獲得に至っており、基礎的にも高いインパクトが認められる。
<p>総合評価点平均 (10点満点)</p>	<p>9.7点 (小数第二位四捨五入)</p>
<p>その他 研究全体に対する総合的な</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・「分子ネットワークの材料科学としての学理の構築」を目指したが、果たして構築できたであろうか?5年のプロジェクトであるから難しいとは思

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	うが、得られた成果を繋げて学理とまでは行かなくても材料設計指針・戦略を導くことを心掛けてほしい。 ・有機分子だけでなく、金属原子を含む MOF (metal-organic framework) も分子ネットワーク材料の仲間に入れて、今後検討を進めると更に広がると思われる。
--	--

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