

「革新的マイクロ反応場利用部材技術開発」

事後評価報告書（案）概要

目 次

分科会委員名簿	1
プロジェクト概要	2
評価概要（案）	2 2
評点結果	3 0

「革新的マイクロ反応場利用部材技術開発」(事後評価)

分科会委員名簿

(平成23年8月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	これなが たかし 伊永 隆史	首都大学東京 大学院理工学研究科 教授
分科会長 代理	しょうじ しゅういち 庄子 習一	早稲田大学 理工学術院 基幹理工学部 電子光システム学科 教授
委員	せきみのる 関 実	千葉大学 大学院工学研究科 教授
	どうめん かずなり 堂免 一成*	東京大学 大学院工学系研究科 教授
	にしもと たかひろ 西本 尚弘	株式会社島津製作所 基盤技術研究所 Micro-Total Analysis Systems ユニット長
	ふじい てるお 藤井 輝夫*	東京大学 生産技術研究所 教授
	よしだ としお 吉田 敏雄	フルイドウェアテクノロジーズ株式会社 代表取締役社長

敬称略、五十音順

注*：実施者の一部と同一組織であるが、所属部署が異なるため（実施者：東京大学 総合文化研究所）「NEDO 技術委員・技術評価委員規程(平成23年7月7日改正)」第34条（評価における利害関係者の排除）により、利害関係はないとする。

プロジェクト概要

		作成日	平成23年8月3日	
プログラム名	ナノテク・部材イノベーションプログラム、エネルギーイノベーションプログラム			
プロジェクト名	革新的マイクロ反応場利用部材技術開発	プロジェクト番号	P06035	
事業担当推進部室・担当者	電子・材料・ナノテクノロジー部 主査 上松 靖			
<p>0. 概要</p> <p>マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術等の反応場技術および反応媒体、エネルギー供給手段を組み合わせた協奏的反応場技術を利用し、これまでにない革新的な化学プロセスの基盤技術を開発し、プロセス革新と新機能材料創製技術を実現することで、部材産業の競争力を強化する。</p> <p>1. 事業の目的・政策的位置づけについて</p> <p>【NEDO が関与する意義】</p> <p>マイクロリアクター、ナノ空孔等の反応場利用部材製造技術は、従来の工業的物質生産の方法を根底から変革するものとして、化学産業だけではなく関連する医療、製薬、バイオ関連、食品産業などからも大きな期待が寄せられている。さらに、省資源や省エネルギーに貢献し環境に優しい革新的技術としての評価も高く、21世紀に欠くことのできない科学技術になるものと予想されている。また、今後、15年程度を見据え、燃料電池、情報家電、医療・福祉／安全・安心、環境・エネルギー等の各分野で求められている機能を実現するためには、これらの各分野で必要な部材の技術課題の解決に向けて、産官学の連携を強力に推進することが求められている。その反面、研究開発の難易度が高く、開発リスクが高いことが予想される。</p> <p>以上の背景、理由により、民間投資のみに任せるのではなく、NEDOにて、産学の科学的知見を結集し、これらの技術課題の解決にあたりると共に、材料産業から部材産業への転換を促進することにより、我が国産業の国際競争力を強化し、また、社会の共通基盤として情報の整備、提供を通じて、行政、産業界、地域住民等の間で科学的知見に基づいた正確かつ適切な認識の醸成を図る事業方針に基づき、国家的、集中的プロジェクト実施が必要である。</p> <p>【実施の効果（費用対効果）】</p> <p>研究開発費用： 5年間で約27億円</p> <p>(1)期待される市場： 情報通信、電子機器・家電、医療、バイオ、環境等</p> <p>(2)経済波及効果： 4400億円程度</p> <p>(3)省エネルギー効果： 30万kWh/年程度（原油換算）</p>				

【事業の背景・目的・位置づけ】

マイクロ化学プロセスのコンセプトは海外で生まれたものであるが、我が国は現在研究開発に積極的且つ組織的に取り組んでおり、マイクロ分析・生産システムプロジェクト(H14～H17)では、マイクロ流路を利用した温度均一性や混合均一性といった空間均一性により反応制御が可能であることを見いだした。さらに検討した結果、活性種の生成場を反応場から分離し、それぞれを独立に制御することにより、合成過程の簡略化や収率の向上など極めて効率的な化学品製造技術に繋がること明らかになった。また、近年メソポーラスシリカに代表される構造規則性ナノ空孔材料の技術進歩がめざましく、化学品製造のための反応場としての利用が期待されるようになった。

このような背景下において、本プロジェクトは、マイクロリアクター（マイクロ化学プロセス）技術、ナノ空孔技術等の反応場技術および反応媒体、エネルギー供給手段を組み合わせた協奏的反応場技術を利用した革新的な化学プロセスの基盤技術を開発し、後述のようなプロセス革新と新機能材料創製技術を実現することを目的とする。

本プロジェクトは、「ナノテク・部材イノベーションプログラム」の中で特に「川上・川中・川下の各段階における[擦り合わせ]の連鎖こそが我が国高度部材産業の強みとなっていることから、この擦り合わせ力の向上に資するようなプロジェクト体制（垂直連携）で実施することで、川下産業の競争力向上に貢献すること」を目的として実施した。また同時に、我が国エネルギー供給の効率化に資する「エネルギーイノベーションプログラム」の一環としても本プロジェクトに取り組んだ。

2. 研究開発マネジメントについて

【事業の目標】

本事業はマイクロリアクター技術、ナノ空孔技術を軸とし、これらに更にマイクロ波、超臨界流体などを組み合わせた協奏的反応場を構成することにより、これまでにない革新的な化学プロセスを開発した。さらに、これらの技術を用いて高性能・高機能電子材料、医薬品中間体などの機能性材料の開発を行った。

（個別テーマの具体目標は本文に記載）。

【事業の計画内容】

研究開発項目		スケジュール				
		H18	H19	H20	H21	H22
共通 基板 技術	① マイクロリアクター技術	反応剤・触媒等を用いた活性種生成・反応技術の確立 活性種生成場と反応場を分離した反応装置設計と 生産システム化に関する共通基盤技術の開発				
	② ナノ空孔技術	ナノ空孔反応場と分子触媒の協働作用技術の開発 ナノ空孔反応場と酵素の協働作用技術の開発 ナノ空孔固定化触媒の開発 ナノ空孔反応場を利用した反応制御技術の開発				
	③ 協奏的反応場技術	マイクロリアクターにおける協奏的反応場技術の開発 ナノ空孔における協奏的反応場技術の開発				
実用 化技 術	④ マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術および協奏的反応場技術を利用したプラント技術の開発	活性種生成・反応場を分離したマイクロプラントの構築 ナノ空孔反応場と分子触媒、酵素を利用した プラント技術の開発 外部エネルギー利用協奏的反応場技術の開発 高压との協奏的反応場技術の開発 ナノ空孔子における協奏的反応場技術の開発				

【開発予算（単位：百万円）】

	開発項目*	H18	H19	H20	H21	H22
予算	①	107	93	72	83	65
	②	109	126	129	87	70
	③	372	318	279	149	101
	④			13	125	61
総予算額		588	537	493	444	297

*) ①マイクロリアクター技術、②ナノ空孔技術、③協奏的反応場技術、④実用化技術
(①～③は委託事業、④は助成事業<助成率1/2>)

【開発体制】

運営機関	独立行政法人新エネルギー産業技術総合開発機構
P L	京都大学 長谷部 伸治
委託先	マイクロ化学プロセス技術研究組合 独立行政法人産業技術総合研究所
共同研究先	京都大学
再委託先	大阪府立大学、東京大学、横浜国立大学、三重大学、東北大学、東京工業大学
助成先	日油株式会社、和光純薬工業株式会社、株式会社日立製作所、山田化学工業株式会社、エヌ・イー ケムキャット株式会社、太陽化学株式会社

【情勢変化への対応】

実用化技術（マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術および協奏的反応場技術を利用したプラント技術の開発）の助成事業化を平成20年度より随時開始した。

【中間評価への対応】

「産学官一体となり、有機合成、触媒化学、反応工学、化学工学の専門家が協奏して新しい概念と成果を創出しており、マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術、協奏的反応場構築ともに、中間での研究成果も目標を達成している項目がほとんどで全体として順調に研究開発が進展していると判断する。」とされ、概ね現行通り実施して良いとの評価であった。

また、今後に対する提言として「今後は実用化研究が主体となると考えるが、個々の目標は明確であり、プロジェクト終了時点で実用化可能となるテーマが少しでも多くなるように期待する。なお、マイクロリアクター技術とナノ空孔技術の開発が、やや独立に行われている感があり、マイクロ波利用など、共通開発要素を中心としてより協力を密にして相乗効果が表れることを期待する。」とされた。

このため、マイクロリアクター技術/協奏的反応場技術の開発を進める京都集中研究所研究者とナノ空孔技術/協奏的反応場技術の開発を進めるつくば集中研究所研究者との協力を密にする方策として、交流会（ジョイントミーティング等）を半年に1回以上実施した。

3. 研究開発成果について

1) マイクロリアクター技術

1. 1 反応剤・触媒等を用いた活性種生成・反応技術の確立

【中間目標】 (◎：大幅達成、○：達成、△：一部未達成)

中間目標	達成度	内容説明
(a) 活性種生成・反応場の精密制御技術に基づく新規合成手法ならびにデバイスを開発する。たとえば新規合成手法およびデバイスを合わせて2件以上開発する。	◎	非対称ジアリールエテンの合成手法、クロスカップリングによるビアリール類の合成手法、 σ -二置換ベンゼンの新合成手法、ラジカル重合の新技术法、熱および光ラジカル反応の新技术法を開発した。また、そのためのデバイスも開発した。これらの成果は、コンセプトの妥当性を示す例として必要十分であり、目標をクリアしている。
(b) 各種活性種に対して、その寿命を考慮した急速混合技術を開発する。	◎	寿命の短い不安定なアリールリチウム種の生成と反応に対応できる急速混合可能なT字型マイクロミキサーを開発した。

【最終目標】

最終目標	達成度	内容説明
各種活性種に対して、その寿命と望ましい急速混合技術の関係を体系化する。	◎	等高線マップを用いて収率に対する活性種の寿命（温度）と滞留時間の関係を求める方法を確立した。そして、非対称ジアリールエテンの合成、クロスカップリングによるビアリール類の合成、 σ -二置換ベンゼンの新合成、求電子性の官能基を有するベンゼン類の合成、ラジカル重合、熱および光ラジカル反応などの合成反応を行い、各種活性種の寿命とそれを制御可能な（急速混合技術に基づく）滞留時間との関係を体系化した。

1. 2 活性種生成場と反応場を分離した反応装置設計と生産システム化に関する共通基盤技術の開発

【中間目標】

中間目標	達成度	内容説明
1) 短滞留時間多段混合反応器を開発する。たとえば4種類の物質を各部の滞留時間0.05秒以下で逐次混合可能な反応器を開発する。	◎	ニードル式、対向式の2種類の混合様式を提案し、基本混合性能をシミュレーションにて検証し、それに基づいて混合ユニットを製作。混合性能試験から、数ミリ秒で完全混合できることを確認した。開発した混合パーツはアSEMBル構造となっている。4段以上数十ミリ秒オーダーの短時間から数秒の滞留時間まで対応できる逐次混合可能なパイプレスの反応器システムを2種類開発した。この成果はH19年度に特許出願している(研究項目A)。 一方、ナノ粒子などの異相系においては、マイクロスラグ流を用いた反応器を開発し、スラグ内の物質を数ミリ秒で完全混合できる操作法を開発した。以上目標値を大幅に上回る成果が得られた。この成果は特許出願(特願2007-210487)している(研究項目C)。
2) 急速混合可能な温度制御機能付き反応器を開発する。たとえば混合時間0.05秒以下で偏差1℃以下の温度制御可能な反応器を開発する。	◎	対向式マイクロミキサーの混合部を直接熱交換する構造のアSEMBルパーツを開発し、温度の異なる原料が数ミリ秒オーダーで急速混合すると同時に、0.1℃以内に直ちに反応温度に温度制御できることを示した。温度調節能力は対 に合わせてパーツを選択することで、対応可能な構造となっており、幅広い反応を対象とできる。以上、目標値を大幅に上回る成果が得られた(研究項目A、B)。
3) 急速昇降温可能な温度制御機能付き反応器を開発する。たとえば20℃/10ミリ秒以上の昇降温、±0.3℃以内の温度制御が可能な反応器を開発する。	◎	上記ニードル式混合パーツと反応部熱交換パーツを提案し、それをパイプレスで組み合わせた反応器を開発した。粒子製造実験などから、混合部で40000℃/秒、反応部で反応熱の発生に対して±0.3℃以内温度制御可能であることを確認した(研究項目A、B)。
4) 微小容積複合計測装置を開発する。	◎	複数の情報を同時計測できる小デッドスペースのデバイスアタッチ型計測装置を開発し、目標は達成された。この成果は特許出願(特願2007-050172)を行った(研 項目D)。
5) 流路の閉塞状態を検知可能な状態監視システムを開発す	◎	限られた数の温度センサの配置問題を扱う手法を提案し、流量、温度などの状態量に対して、推定誤差10%

る。		以下の状態監視システムを開発し目標を達成した（研究項目D）。
----	--	--------------------------------

【最終目標】

最終目標	達成度	内容説明
1) 活性種生成場と反応場の分離に必要な特性である、急速昇降温、精密温度制御、短滞留時間等が可能なマイクロ反応器の形状設計手法を開発する。	◎	混合器を設計する基本的なモデルとして有効セグメントモデルを提案し、形状との定量的な関係を導出することで、所望の混合速度、加熱、除熱速度を有するマイクロリアクターを演繹的に設計する方法論を確立した。これによって、これまで経験的に行われてきた反応器の設計が、有機合成反応などの活性種寿命に対応して厳密に設計可能となった。（研究項目A）
2) 急速混合および短滞留が可能で、広範囲な活性種寿命に柔軟に対応できるデバイスコンポーネントを開発するとともに複数のパイロットプラントへ実装し、その性能を検証する。	◎	<ul style="list-style-type: none"> 衝突、屈曲構造を有した急速混合が可能な形状の混合流路を提示した（研究項目A）。 開発してきた各種マイクロデバイスパーツを組み合わせた反応器を開発し、有機合成の連続試験から既往の技術に比べ収率の大幅な向上を確認した。（研究項目B）。 異相系においても核生成と粒子成長を完全に分離することによる単分散ナノ粒子の合成すること、マイクロリアクター直列システムで任意の粒径のナノ粒子を製造することに成功した（研究項目C）。 これらの装置は数百トン／年の生産能力を有し、活性種生成、反応の場を分離した生産用マイクロリアクターとしては世界初である。以上、実用化へ供与できるレベルで目標を達成する成果が得られた。
3) 開発した計測装置を用いた制御・監視システムを開発し、実験プラントへの実装と性能検証を行う。	◎	<ul style="list-style-type: none"> 対象の物理モデルからプロセスモデル（状態空間モデル）を構築し、少数の管壁温度測定情報から未知の状態量を推定するシステムを開発し、マイクロ装置で実証した。 4 並列 2 液混合型マイクロリアクターシステムを構築し、10 時間以上の連続運転を行ない、安定動作を確認するとともに、閉塞検出方法について性能評価からシステムの妥当性を検証した（研究項目D）。

2) ナノ空孔技術

【中間目標】

中間目標	達成度	成果
<p>(1)情報・電子関連機能性化学品として有用なヘテロ化合物の製造において、ナノ空孔反応場と分子触媒との協働作用を活かすことにより、現行プロセスに対する優位性を明らかにする。たとえば、半導体デバイスプロセス処理剤、電子デバイス作製用化学品材料などとして有用な有機窒素化合物または有機硫黄化合物の製造において、現行プロセスに対して優位な原料転化率 50%以上、選択率 80%以上を達成する。</p>	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・半導体洗浄剤として有用な有機ヒドロキシルアミン合成において、ニトロ化合物の選択水素化による芳香族ヒドロキシルアミン合成に対し、アミノ基で表面修飾したメソポーラスシリカ担持白金触媒を用いることにより、原料転化率 99%、選択率 97%を達成。 ・電子デバイス用化成品として有用な環状イオウ酸エステル合成において、エポキシドへの SO₂ 挿入反応に対し、メソポーラスシリカにアンモニウム塩を固定化した触媒を用いることで、原料転化率 94%、選択率 95%を達成。
<p>(2)食品関連機能性化学品の合成酵素について、ナノ空孔材料への固定化と活性の発現により、現行の非回収プロセスに対して優位が明らかとなる多数回の繰り返し使用を可能とする。たとえば、アミノ酸等の合成酵素では現行プロセスより優位性が明らかとなる 25 回以上の繰り返し使用を可能とする。</p>	◎	<p>アミノ酸類合成酵素であるグルタミナーゼについて、ナノ空孔材料への固定化と活性の発現により、現行プロセスより優位性が明らかとなる 25 回の繰り返し使用を達成した。</p>
<p>(3)分子触媒に近い反応効率を達成するとともに触媒リーチング抑制技術を開発する。たとえば、炭素-炭素結合形成反応触媒では、低反応性基質を用いて収率 80% 以上を達成する。不斉水素化触媒では、分子触媒の不斉収率 (ee) の 80%以上を達成する。また両触媒とも、目的物中の低残留金属濃度 (1 ppm 程度) を達成する。</p>	○	<ul style="list-style-type: none"> ・炭素-炭素結合形成反応触媒では、ナノ空孔材料に多点結合可能な配位子の開発に成功、鈴木カップリング反応に対し、プロモ体基質を用いて収率 80%以上を達成。 ・不斉水素化触媒では、多点結合型配位子を用いて、分子触媒と同等の不斉収率 (95% ee) を達成。 ・鈴木カップリング反応触媒では、リーチングによる目的物中の残留金属濃度が検出下限値 (1.4 ppm) 以下。不斉水素化触媒では、数 ppm のオーダーであるが、平成 20 年度末までに 1 ppm 程

		度を達成できる見込み。
(4) ナノ空孔反応場と分子触媒、酵素との協働作用発現について、実例を示す。また、ナノ空孔内への分子触媒、酵素の有効な固定化手法開発の指針を明らかにする。	○	<ul style="list-style-type: none"> ・ ナノ空孔反応場と分子触媒（もしくは孤立活性点）との協働作用の実例として、1) アルミニウム含有メソポーラスシリカ触媒によるシアノシリル化反応及び3成分ストレッカー型反応、2) 鈴木カップリング反応におけるポリエチレングリコール修飾効果を見出した。 ・ アリルシランを用いた固定化反応において、固定化効率が向上する条件（溶媒等）を見出し、分子触媒の有効な固定化手法開発の指針を明らかにした。 ・ ナノ空孔固定化リパーゼについて、酵素活性の失活抑制をもたらす協働作用発現の実例を示すことができた。 ・ ナノ空孔と酵素間のサイズや表面性状制御により、酵素の有効な固定化手法開発の指針を明らかにした。

【最終目標】

最終目標	達成度	内容説明
(1) ヘテロ化合物の製造において、ナノ空孔反応場と分子触媒との協働作用を最大限活かすことにより、転化率、選択率を実用レベルまで向上させる。たとえば、半導体デバイスプロセス処理剤、電子デバイス作製用化学品材料などとして有用な有機窒素化合物または有機硫黄化合物の製造において、実用化の目途となる原料転化率 80%以上、選択率 90%以上を達成する。	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・ リチウムイオン電池の電解液添加剤などとして有用な環状サルファイト類のエポキシドへの SO₂ 挿入反応による合成において、原料転化率 99%、選択率 95% を達成した。 ・ 同様の用途である環状チオカーボネート類のオキシラン及びチイランへの CS₂ 挿入反応による合成において、原料転化率 99%、選択率 98% 及び原料転化率 100%、選択率 98% をそれぞれ達成した。 ・ 半導体洗浄剤などとして有用な有機ヒドロキシルアミン類のニトロ化合物の部分水素化による合成において、芳香族ヒドロキシルアミンについては原料転化率 99%、選択率 97%、脂肪族ヒドロキシルアミンについては原料転化率 99%、選択率 98% を達成した。
(2) 食品関連機能性化学品の合成酵素について、ナノ空孔材料への固定化と活性の発現により、実用レベルの繰り返し使用を可能とする。たとえば、	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・ アミノ酸等の合成酵素について実用化の指標となる 50 回以上の繰り返し使用を可能とすることに成功し、最終目標を達成した。

<p>アミノ酸等の合成酵素では実用化の指標となる 50 回以上の繰り返し使用を可能とする。</p>		
<p>(3) 分子触媒レベルの反応効率を達成するとともに実用可能レベルの触媒リーチング抑制技術を開発する。たとえば、炭素-炭素結合形成反応触媒では、低反応性基質を用いて収率 90%以上を達成する。不斉水素化触媒では、分子触媒と同等の不斉収率 (ee) を達成する。また両触媒とも、目的物中の残留金属濃度について、実用化の目途となる 0.2 ppm 以下を達成する。</p>	<p>◎</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・炭素-炭素結合形成反応触媒では、鈴木カップリング反応において、低反応性クロロ体基質を用いて収率 95%を達成した。 ・不斉水素化触媒では、類似の分子触媒と同等の高い反応転化率 (>99%) と高い不斉収率 (95% ee) を達成した。 ・炭素-炭素結合形成反応触媒では目的生成物中の残留 Pd 濃度を、不斉水素化触媒では目的生成物中の残留 Rh 濃度を、それぞれ 0.2 ppm 以下に抑えることに成功した。
<p>(4) ナノ空孔反応場と分子触媒、酵素との協働作用発現について、協働作用発現機構のモデルを提案する。また、工業触媒へ応用可能なナノ空孔内への分子触媒、酵素の有効な固定化手法を開発する。</p>	<p>◎</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ナノ空孔反応場と分子触媒（もしくは孤立活性点）との協働作用発現の実例として、Al-MCM-41 触媒によるシアノシリル化反応、3 成分ストレッカー型反応、向山アルドール反応を見出した。ナノ空孔内に存在する配位圏が大きく開いた Al^{IV} サイトが強いルイス酸点として機能する協働作用発現機構を提案した。また、鈴木カップリング反応におけるポリエチレングリコール修飾効果を見出した。 ・ナノ空孔内への分子触媒の有効な固定化手法として、安定で取り扱いが容易なアリアルシラン類を用いる方法を開発した。 ・ナノ空孔反応場と酵素との協働作用発現について、ナノ空孔の特性（サイズ適合性や高多孔性）が酵素の特性（立体構造や活性挙動）に作用するモデルを提案し、その作用によって生じる各種の有用な効果（安定性や活性低下の抑制、基質濃縮による活性向上）の実例を実験的に提示できたことにより目標達成。 ・酵素とナノ空孔材料との吸着挙動や活性挙動について系統的に検討し、酵素触媒担体として求められるナノ空孔材料の選定のための有効な指針を得たことにより、工業触媒へ応用可能なナノ空孔内への酵素の有効な固定化手法を開発できたため目標達成。

3) 協奏的反応場技術

3. 1 マイクロリアクターにおける協奏的反応場技術の開発

3. 1. a 外部エネルギーを用いた活性種生成・反応技術の確立

【中間目標】

中間目	達成度	内容説明
1) 電極間距離が短くエネルギー効率に優れたマイクロ電装置を開発する。たとえば電極間距離が100 μ m以下のマイクロ電解装置を開発する。	○	<ul style="list-style-type: none"> 電極間隔 100 μm 以下の装置を作成した。 対象とした反応系において文献での最高収率 (69.5%) に匹敵する収率 (66%) を得た。 エネルギー効率を考慮した反応器構造、副生する気泡の除去機構に関し特許出願を行った。
2) エネルギー効率の高いマイクロ光反応装置を開発する。たとえば光路長が100 μ m以下のマイクロ光反応装置を開発する。	○	<ul style="list-style-type: none"> 光路長 20~100 μm の光反応用マイクロリアクターの作成手法を開発し、実際に種々の反応器を作成した。 フェノールの酸化分解を例にとり、光路長が反応効率に与える影響を整理した。
3) 外部エネルギー利用装置設計のための外部エネルギー・熱流体シミュレーション技術を開発する。たとえばマイクロ波利用装置の形状設計に利用可能なマイクロ波・熱流体シミュレーション技術を開発する。	◎	<ul style="list-style-type: none"> 電磁波シミュレーションと熱流体シミュレーションを連成させたシミュレーション技術を開発した。 シミュレーションに基づき設計・製作した装置によるシミュレーション精度の検証を行い、提案したシミュレーション法が設計利用可能であることを示した。
4) マイクロ波、超音波、光などの外部エネルギーを用いたナノサイズ粒子合成装置を開発する。たとえば有機ナノ粒子 (50nm以下) を安定分散した有機溶媒分散液を合成可能にするエネルギーを出力できる装置を開発する。	○	<ul style="list-style-type: none"> 高温溶媒を直接反応液と混合させ、瞬時に加熱する構造の連続反応装置を開発し、平均粒子サイズ Mn = 49 nm の反応液を得ることに成功した。

【最終目標】

最終目標	達成度	内容説明
1) 活性種制御に基づく高効率の実用的マイクロ電解プロセスを開発する。たとえば電流効率が90%以上のマイクロ	○	<ul style="list-style-type: none"> アミン誘導体の酸化反応で、転化率ベースで89%、収率ベースで87%を達成した。 トルエン誘導体の酸化反応では電流効率95%を達成した。

<p>電解装置を開発する。 トルエン誘導体の酸化、アミン誘導体の酸化に関するパイロットプラントを構築し、連続運転を実施する。</p>		<ul style="list-style-type: none"> パイロットスケールの連続運転用マイクロ電解システムを制作し、連続運転を実施した。
<p>2)高転換率の実用的光反応合成プロセスを開発する。たとえば転換率が90%以上の光反応合成プロセスを開発する。</p>	◎	<ul style="list-style-type: none"> 芳香族アルデヒドの一段合成で収率91%達成した。また、無水マレイン酸の光二量化反応において、原料リサイクル構造を有するプロセスを構築し、転換率90%以上を達成した。 実用化の最大の課題である閉塞を防止する機構として、窒素導入によるスラグ流実現と超音波照射を組み合わせることにより、長時間の連続運転を達成した。
<p>3)外部エネルギー・熱流体シミュレーション技術を利用した外部エネルギー利用装置設計手法を開発する。たとえばマイクロ波・熱流体シミュレーション技術を利用したマイクロ波利用装置の形状設計法を開発する</p>	◎	<ul style="list-style-type: none"> 電磁波シミュレーションと熱流体シミュレーションを連成させたシミュレーションに基づく形状設計法を開発した。 開発した設計法に基づきマイクロ波利用マイクロリアクターを作成し、設計通り水に対して吸収効率95%を達成した。 温度制御機能付きマイクロ波利用反応器を開発した。そして、マイクロ波の効果が、局所加熱による反応率の向上であることを明らかにした。
<p>4)有機化合物の溶媒への溶解性と温度の関係を整理し、マイクロ波、超音波、光などの外部エネルギーを用いたナノ粒子製造プロセスの設計手法を確立する。</p>	○	<ul style="list-style-type: none"> 有機化合物の溶媒への溶解性と温度の関係を整理し、外部エネルギーを用いたナノ粒子製造プロセスの設計手法として温度制御による過飽和を制御する方法を提案した。

3. 1. b 高圧との協奏的反応場技術の開発

【中間目標】

中間目標	達成度	内容説明
<p>1) 高圧反応場に対応したマイクロリアクター(使用可能圧力50MPa以上)および急速昇温可能(100°C/10ミリ秒以上)な装置を開発する。</p>	◎	<p>ニードル式、スワール型、衝突式など計4種類の高温高圧ミキサーを試作し、600°C、圧力50MPaで使用可能であること、400°C以上の流体を数ミリ秒で完全混合、温度均一にできることを示した。さらに、これをもとに、50MPa以上、600°Cまでの高温高圧水あるいは、高圧CO、CO₂ガスを利用できるマイクロリアクターシステムのプロトタイプを完成し、安全に操作できることを確認した。</p>

2) 従来より 10%以上耐食性に優れた高圧用マイクロリアクターを開発する。	◎	SUS のミキサー、反応器、高圧配管、継ぎ手の内部にチタン管をはめ合いで装着する方法を開発し、全く腐食しないことを検証した。また、高温高圧下でのニトロ化反応の連続実験で 3N 硝酸を 5 時 流通させた実験 も腐食のないことを検証した。以上より、目標値を大幅に上回る成果が得られた。
3) 高圧との協奏的反応場によって各種高機能材料生成に関して、従来技術と比較して、短時間で反応収率を増加させる技術を開発する。	◎	ニトロ化物製造に主眼をおいて、高圧回転攪拌型マイクロリアクターを開発し、現行の混酸法に比べてニトロ化反応収率を向上させることを検証した。次に、モノニトロ化、ジニトロ化の活性種生成、反応場を分離した多段高圧マイクロプロセスを開発し、200℃以上の高温という従来不可能であった反応条件下で安全にニトロ化を実施し、高収率を達成。さらに、上述の高温高圧耐食マイクロ反応システムを用いて、世界で始めて硝酸と高温高圧水のみ（硫酸フリー）で 90%以上のニトロ化に成功した。一方、高温高圧水マイクロシステムにて溶剤フリーで数種類の有用物質を高収率で合成すること、高圧 CO ₂ のもと表面機能付加した高分子微粒子を製造することも示した。ニトロ化反応に関しては、平成 20 年度から実用化研究に進んでおり、目標は順調に達成している。特許 3 件出願。

【最終目標】

最終目標	達成度	内容説明
1) 高圧、腐食性流体中で使用可能なマイクロリアクターと短時間で混合・反応停止できるマイクロリアクターからなるシステムを開発する。たとえば 50MPa 以上で混合時間 0.01 秒以下のマイクロリアクターからなるシステムを開発する。	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・チタニア内挿管などを新たに開発し、500℃、50MPa までの超臨界水中で腐食性流体を扱えるマイクロ製造プロセスを開発し、連続運転で実証した。 ・各種高圧マイクロ混合デバイスを開発し、50MPa 以上で混合時間数ミリ秒で完全混合可能なミキサーを有するマイクロシステムを開発した。
2) 高圧との協奏的反応場によって各種高機能材料生成のための選択的反応技術を開発する。たとえば高機能材	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・高圧マイクロ反応システムを用いて、芳香族・脂肪族に関わる 3 種類のクライゼン転位反応で選択率 100%を実証した。 ・硝酸アセチルによる低温ニトロ化反応を実施し収率

<p>料として芳香族化合物、選択的反応技術としてニトロ化反応技術を開発する。</p>		<p>100%（選択率 100%）を実現できる高圧マイクロ反応技術を確立した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・開発したマイクロシステムを用いて、世界で初めて、硫酸フリーでの超臨界水中での芳香族のニトロ化反応を 30 時間の連続運転を実施し、迅速なスタートアップ、シャットダウン、安全操業、定常的な収率維持を実証し、実用化への目途をつけた。 ・高圧気液マイクロリアクターシステムを開発し、既往技術では困難であったニトロ化物の直接カルボニル化に成功した。
--	--	--

3. 2 ナノ空孔における協奏的反応場技術の開発

3. 2. a マイクロ波、マイクロリアクター利用触媒反応技術の開発

【中間目標】

中間目標	達成度	成果
<p>3.2a-1 室温から可能な限り高い温度まで、反応器内に充填した物質の誘電特性が高精度で測定可能な評価装置を開発する。たとえば、温度範囲として常温～300℃の範囲で比誘電率、誘電体損失角が±5%の精度で測定できる装置を開発する。 上記装置を用いてナノ空孔およびマイクロリアクター等との協奏的反応場開発に必要な誘電特性データを集積する。</p>	○	<ul style="list-style-type: none"> ・測定精度（変動係数）が 0.6%以内の高精度測定法と単一系・混合系合わせて 1300 点以上のデータ収集、また、室温～200℃以上での温度可変自動測定法を開発した。
<p>3.2a-2 誘電体特性データを用いてマイクロリアクター触媒反応技術を開発する。投入エネルギーに対して高い内部温度上昇効率（たとえば、70%以上）を達成する反応システムを設計する。</p>	○	<ul style="list-style-type: none"> ・円筒共振器型照射器の作成と共振周波数調整法を実証・実用化した。70%熱変換効率に向け調整中。
<p>3.2a-3 マイクロ波加速によるマイクロリアクター触媒反応技術（触媒量 0.1 モル%以内、反応時間 1 分以内）を開発する。マイクロリアクターを用いて転換率 90%以上の実用展開可能な触媒反応技術を開発する。滞留時間を制御可能なマイクロリアクターを開発する。 高い反応率と選択率で位置異性体を合成す</p>	○	<ul style="list-style-type: none"> ・マイクロリアクターで反応時間 1 分の定量的なカップリング反応を達成した。触媒量 0.1 モル%以内に向け調整中。（平成 20 年度に達成予定）。不均一触媒反応に関しては転換率 90%以上の実用展開可能な触媒反応技術を開発した。 ・芳香族修飾反応（アルキル化、アシル化）にてマイクロ波を用いた協奏的反応場により、従来の外部加熱を用いる

る触媒反応技術を開発する。		方法に比べ、反応速度等で、2~10 倍の向上。
---------------	--	-------------------------

【最終目標】

最終目標	達成度	内容説明
3. 2. a-1 反応系の特徴を考慮したマイクロリアクター設計手法を確立する。	◎	<ul style="list-style-type: none"> 誘電特性パラメーターの測定により加熱時の誘電特性変化傾向を把握し、マイクロリアクター形状の最適化に反映させた。
3. 2. a-2 40%以上のエネルギー有効利用（現状20~30%）を可能とするマイクロ波照射技術を開発する。	◎	<ul style="list-style-type: none"> 電磁界強度とリアクター形状を考慮して整合させ、マイクロ波エネルギーを効率よく供給するリアクターを実証した。 自動整合器の利用と反応場の誘電特性の制御により、高いマイクロ波エネルギー投入効率（水で99.9%、トルエンで92.6%）と高いエネルギー有効利用率（装置の消費電力エネルギーのうち反応場の加熱に利用できたエネルギーの割合、水で51%、アニソール反応系で42%）を達成した。
3. 2. a-3 実用レベルの転化率で選択的に位置異性体を合成する触媒反応技術（たとえば、機能性高分子原料となる多官能性化合物の合成では転化率40%以上かつ選択率70%以上）を開発する。	◎	<ul style="list-style-type: none"> マイクロリアクターに対するマイクロ波照射で迅速かつ低触媒量（反応時間1分、触媒量0.1モル%以内）で定量的なカップリング反応を達成した。不均一触媒反応では触媒の溶出を抑えて定量的に進行する実用展開可能な触媒反応技術を開発した。 マイクロ波とナノ空孔触媒による芳香族修飾反応（アルキル化、アシル化）で転化率40%以上かつ選択率70%以上を達成した（2,6-ジアルキルナフタレンの合成で転化率86%、選択率70%、分子内アシル化では、転化率、選択率ともに90%以上）。

3. 2. b マイクロリアクター、マイクロ波および反応媒体利用触媒反応技術の開発

【中間目標】

中間目標	達成度	成果
3.2.b-1 特異的なマイクロ波吸収能をするナノ空孔触媒を反応媒体（超臨界流体、極性溶媒等）と組み合わせた協奏的反応場技術を構築する。例えば、水反応媒体、水素源、酸素源とする還元反応（転化率、選択率60%以上）、酸化反応（転化率、選択率40%以上）を達成する	◎	<ul style="list-style-type: none"> マイクロ波官能性の高い活性炭に担持された金属パラジウム触媒や金属ルテニウム触媒を用いて、水を反応媒体、水素源とするフェニルボロン酸類の還元反応において転化率99%以上、選択率99%以上を達成した。（最終目標達成） 水を反応媒体、酸素源とするフェネチルアセトアミドの酸化反応において転化率77%、選択率92%を達成した。（中間目標達成）

触媒技術を開発する。		
<p>3.2.b-2 研究開発項目②（１）－（３）で実施するナノ空孔反応場利用技術に適用可能なマイクロリアクター、マイクロ波および反応媒体利用についての技術課題を明確にするとともに、触媒反応における協奏的反応場利用の基盤技術を開発する。</p>	○	<ul style="list-style-type: none"> ・ナノ空孔固定化触媒を用いた環状イオウ酸エステル合成にマイクロ波加熱を適用することで、原料転化率、選択率ともに向上することを明らかにした。効率的なマイクロ波の照射が技術課題の一つである。 ・ナノ空孔反応場とマイクロ波による協奏的反応場において、鈴木カップリング反応の初速度が向上することを確認した。マイクロ波加熱と通常加熱の差を明確にするためには、マイクロ波照射装置の攪拌・温度制御が重要であるという技術課題を明らかにした。 ・ナノ空孔反応場利用技術にマイクロリアクターを適用し、ナノ空孔固定化マイクロリアクターの稼働を実証した。 ・ナノ空孔固定化酵素マイクロリアクターの開発に成功し、蛍光物質を用いたリパーゼの加水分解評価手法を開発した。

【最終目標】

最終目標	達成度	成果内容
<p>2. 2. b-1 マイクロ波エネルギーを高い効率で吸収するナノ空孔触媒を活用した実用レベルの高選択触媒反応技術を開発する。たとえば、水等の反応媒体を化学原料とする還元反応、酸化反応において95%以上の転化率、選択率を達成する。</p>	◎	<p>フェニルボロン酸類から置換ベンゼン類への還元において、転化率99%、選択率99%を達成。 ジアミノアルカンから環状アミンへの変換において転化率99%、選択率99%を達成。 芳香族アルデヒド、ケトン類の酸素-重酸素交換において、重酸素導入率95%を達成。 水素-重水素交換反応において、50種以上の化合物において重水素導入率95%以上を達成。</p>
<p>3. 2. b-2 研究開発項目②（１）－（３）で実施するナノ空孔反応場利用技術に適用可能なマイクロリアクター、マイクロ波および反応媒体利用触媒反応技術を適用</p>	◎	<p>有機窒素化合物、有機硫黄化合物の製造に関しては、研究項目2. 2. 1で達成目標値を達成。環状イオウ酸エステル合成においてマイクロ波加熱と組み合わせることにより原料転化率および選択率の向上が見られた。 アミノ酸合成酵素－ナノ空孔材料複合体を担持した</p>

<p>し、実用レベルでの性能を達成する。たとえば、半導体デバイスプロセス処理剤、電子デバイス作成用化学品材料などとして有用な有機窒素化合物または有機硫黄化合物の製造において、超臨界流体あるいはマイクロリアクターの協奏的反応場利用により、実用化の目途となる原料転化率 80%以上、選択率 90%以上を達成する。また、アミノ酸等の合成酵素について、超臨界流体あるいはマイクロリアクターの協奏的反応場利用により、実用化の目途となる 50 回以上の繰り返し利用を可能とする。さらに、協奏的反応場利用により、炭素-炭素結合反応触媒性能として、低反応性基質を用いて収率 90%以上、不斉水素化触媒の性能として、分子触媒と同等の不斉収率 (ee) を達成する。</p>		<p>流通式マイクロリアクターを用いたアミノ酸の連続合成反応を行い、バッチ式反応 50 回以上に相当する繰り返し耐久性を達成した。</p> <p>協奏的反応場利用による炭素-炭素結合反応触媒としてシリカ系またはカーボン系規則性多孔体に担持した Pd 触媒を合成しマイクロ波と組み合わせることによって、オイルバス加熱では低収率でしか得られない鈴木カップリング生成物 (炭素-炭素結合反応生成物) を 93%以上の収率で得ることに成功した。</p> <p>分子触媒と同等の不斉収率 (ee) を研究項目 2. 2. 1 で最終目標値を達成。</p>
---	--	--

4) マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術および協奏的反応場技術を利用したプラント技術の開発

詳細は事業原簿【非公開版】に掲載

5) 全体の成果資料

- ・論文投稿 「査読付き」 177件、「その他」 25件
- ・特許 「出願済」 73件
- ・その他の外部発表 103件

4. 実用化、事業化の見通しについて

本プロジェクトは、マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術、協奏的反応場を幅広く工業的に利用可能とするためのプラント技術の開発を、以下の実用化研究として行った。

(1) マイクロリアクター技術

- ・活性種生成・反応場を分離したマイクロプラントの構築

(2) ナノ空孔技術

- ・ナノ空孔反応場と分子触媒、酵素を利用したプラント技術の開発

(3) マイクロリアクターにおける協奏的反応場技術の開発

- ・外部エネルギー利用協奏的反応場技術の開発
- ・高圧との協奏的反応場技術の開発

(4) ナノ空孔における協奏的反応場技術の開発

- ・マイクロ波およびマイクロリアクターとの協奏的反応場技術の開発
- ・マイクロリアクター、マイクロ波および反応媒体との協奏的反応場技術の開発

個々の内容については、非公開資料「IV. 実用化の見通しについて」に記述する。

本プロジェクトでは、実用化研究と並行して共通基盤技術に関する研究を継続して進めた。事業化の成功率を向上させるために、助成事業が本格化した21年度以降、プロジェクトとして、基盤技術研究で開発された技術(シーズ)を実用化研究にスムーズに適用できる仕組み、また実用化研究の問題点(ニーズ)を共通基盤技術研究にフィードバックする仕組みが行える体制の構築を行った。また、事業化拡大の観点では本プロジェクト参加企業のみでは不十分であり、プロジェクト外へも積極的に展開する必要がある。そのために、基盤技術の十分な構築とともにプロジェクト非参加企業が本プロジェクトの成果を利用できる仕組み(たとえば、共同利用センター)の構築についても検討を進めた。このような活動を通して、成果の事業化の拡大を図っていく予定である。

5. 基本計画に関する事項

作成時期 : 平成18年3月 作成
変更履歴 : 平成18年6月 (研究開発責任者<プロジェクトリーダー>決定)
平成20年7月 (イノベーションプログラム基本計画制定により、
「(1) 研究開発の目的」を記載)

技術分野全体での位置づけ
(分科会資料5-3より抜粋)

研究開発プログラム(イノベーションプログラムに改編)の中で実施
イノベーションプログラムについて 第27回研究開発小委員会(平成21年4月27日)資料

1. 「イノベーションプログラム」の中での体系的推進 (Inside Management & Accountability)
 - 経済産業省の全ての研究開発プロジェクトは、政策目標毎に7つの「イノベーションプログラム」の下で体系的に推進。
 - 各プログラムの中で、政策目標に向けたプロジェクトの位置付けと目標の明確化、市場化に必要な関連施策(規制改革、標準化等)との一体化を図り、イノベーション実現に向け各プロジェクトを効果的に推進。
2. 「技術戦略マップ」に基づく戦略的企画立案 (Outside Communication & Networking)
 - 先端産業技術動向を把握し、国が取り組むべき技術課題とイノベーションの道筋を明確化するため、産学官で協働するロードマッピング手法を導入(『技術戦略マップ 2005/2006/2007/2008』)。
 - 研究開発プロジェクトの選定に当たっては、イノベーションプログラムにおける政策目標を基に技術戦略マップに位置付けられた重要技術課題を抽出し戦略的に企画立案。

「新・国家エネルギー戦略」の目標を実現するため、総合エネルギー効率の向上に資する技術開発

ナノテク・部材 IPG

①ナノテク加速化領域	36億円
②情報通信領域	28億円
③ライフサイエンス・健康・医療領域	16億円
④エネルギー・資源・環境領域	78億円
⑤材料・部材領域	27億円
⑥共通領域	4億円
21年度予算案	188億円

あらゆる分野に対して高度化、不連続な革新をもたらすナノテクノロジー、革新的部材技術を確立

<p>エネルギー IPG</p> <p>①総合エネルギー効率の向上 707億円</p> <p>②運輸部門の燃料多様化 278億円</p> <p>③新エネルギー等の開発・導入促進 369億円</p> <p>④原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保 268億円</p> <p>⑤化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用 479億円</p> <p>21年度予算 1,281億円</p>	<p>環境安心 IPG</p> <p>①地球温暖化防止新技術 60億円</p> <p>②3R 33億円</p> <p>③環境調和産業バイオ 57億円</p> <p>④化学物質総合評価 11億円</p> <p>⑤共通領域 4億円</p> <p>21年度予算案 165億円</p>	<p>航空機・宇宙産業 IPG</p> <p>①航空機産業の基盤技術力の維持・向上 233億円</p> <p>②宇宙産業の国際競争力強化 87億円</p> <p>21年度予算案 320億円</p>
---	---	---

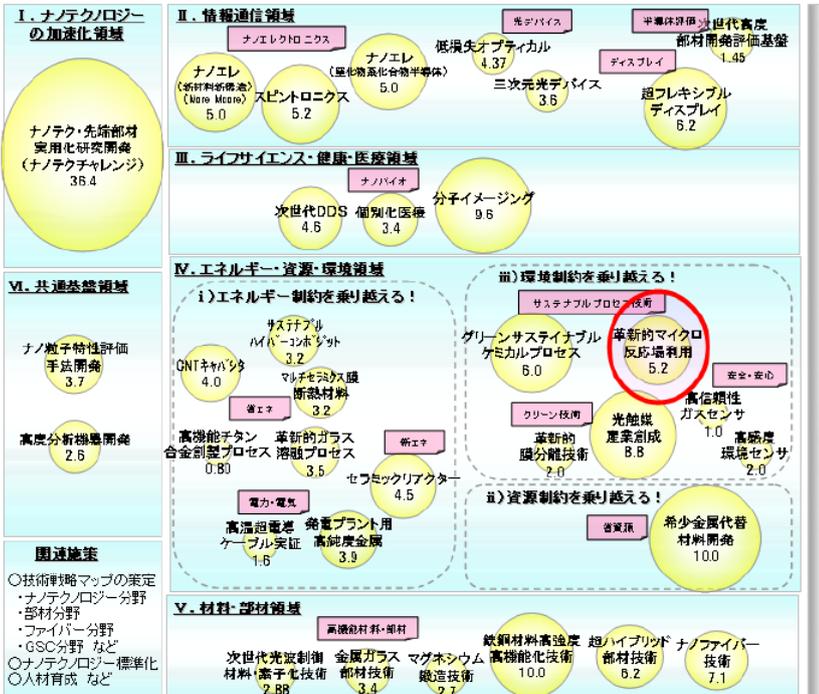
■ 平成20年3月までは革新的部材産業創出プログラム及び省エネルギー技術開発プログラムの位置付けで実施

10/53

ナノテク・部材イノベーションプログラム

【平成20年度予算額:184.5億円】

- あらゆる分野に対して高度化・不連続な革新をもたらすナノテクノロジー・革新的部材技術を確立!
- 我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服!



IPGの目標

世界に先駆けてナノテクノロジーを活用した非連続な技術革新を実現する!

我が国部材産業の強みを更に強化することで、他国の追従を許さない競争優位を確保するとともに、部材産業の付加価値の増大を図る!

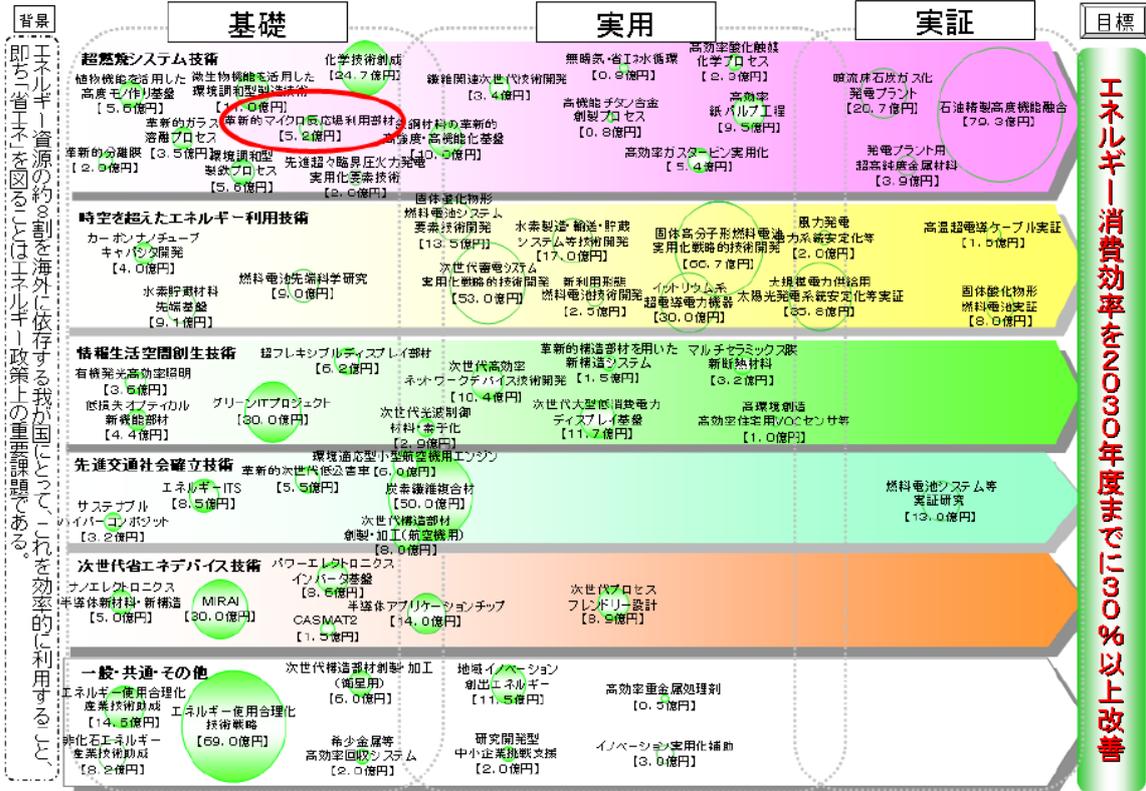
ナノテクノロジーや高機能部材の革新を先導することで、これら部材を活用した情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの幅広い産業の付加価値の増大を図る!

希少金属などの資源制約の打破、圧倒的な省エネルギー社会の実現など、解決困難な社会的課題の克服を目指す!

エネルギーイノベーションプログラム

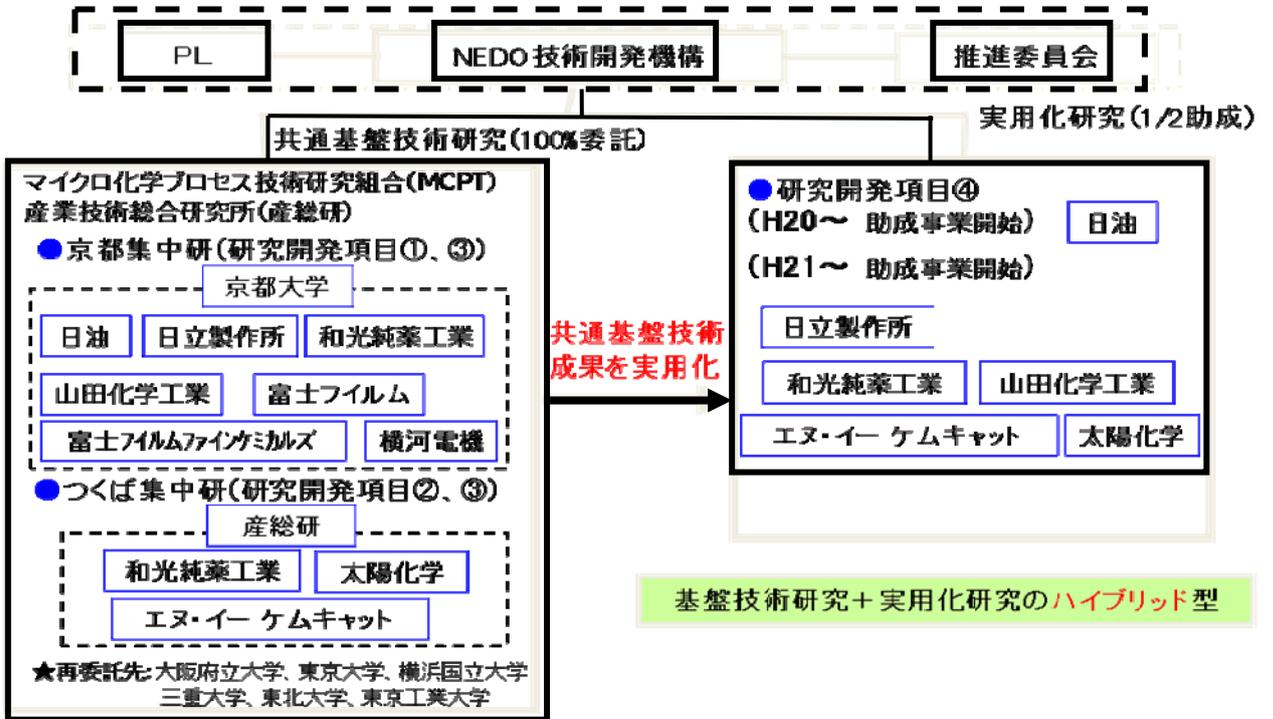
【20年度予算額 817億円】

※基礎、実用、実証の区分内は、任意に配置。



「革新的マイクロ反応場利用部材技術開発」

全体の研究開発実施体制



「革新的マイクロ反応場利用部材技術開発」（事後評価）

評価概要（案）

1. 総論

1) 総合評価

本プロジェクトは、共通基盤技術と実用化技術のハイブリッド研究であり、その共通基盤技術としてマイクロリアクター、ナノ空孔、協奏的反応場を位置付けた意欲的な計画である点、および実用化技術の開発において共通基盤技術の成果を適切に取り入れた点が評価できる。マイクロチップ関連技術の流れとしても、前プロジェクトの分析・合成から本プロジェクトの化学工学への移行は極めて妥当である。全ての研究開発項目において、研究成果が最終開発目標をクリアしており、高く評価できる。学術的レベルも高く、また実用化が十分視野に入る成果が研究開発項目ごとに幾つか見受けられる。

一方、異なる技術体系であるマイクロリアクターとナノ空孔にマイクロ波を結合させたため、協奏的反応場技術等で本来の成果が見込めないままにプロジェクトが構成された箇所が目立ち、予備検討不足や不整合課題が見受けられた。

今後、本技術分野については、実用化を促進する観点から、大企業・上場企業中心への助成から研究開発力のある中小企業・非上場企業等への助成に移行して、空洞化を避け国際競争力の基盤を高めるため集中的に実施することも検討して欲しい。

2) 今後に対する提言

企業ではコスト認識がきわめて重要なため、高く売れなければ製品化しないのは言うまでもない。マイクロ反応場によって医薬品、化学品等を製造するプロセス開発を行う実用化技術の開発においては、装置コスト、製造コスト、維持メンテナンスなどに精通した製造技術者や事業企画者をプロジェクト初期から参画させ、コストを意識した開発を実施することが重要である。

国際的な流れを見ると中国などアジア諸国の追い上げが急であり、日本の優位性を確保するには、日本の持つ優れた材料工学、精密微細加工、マイクロ流体工学を有効に活用することも必要であろう。また、実用化・事業化に関して、各企業における「継続的かつ集中的な技術蓄積と人材育成」が必要であり、その継続的な取組に対する公的支援を期待する。

2. 各論

1) 事業の位置付け・必要性について

本プロジェクトの中核となるマイクロリアクター技術およびナノ空孔技術は、革新的な化学プロセスの構築に貢献するものであり、そのことが部材産業の競争力を強化するという意味において、ナノテク・部材イノベーションプログラムの目的達成のために大きく寄与するものと言える。同時に、本プロジェクトの中核技術がもたらすであろう反応エネルギーの効率的な投入、副生物・廃棄物の減少などによって、化学プロセスの省エネルギー化が進めば、エネルギーイノベーションプログラムの目的達成のためにも大きく貢献することになる。また、本プロジェクトの中核技術は、化学プロセスの革新にとって基盤的・普遍的なものの一つになる可能性が高い。幸いにも、我が国の技術的な蓄積は世界の最先端に近いところにある。従って、実用的な技術として確立する前の段階で、基礎的な研究開発投資を行い、国内の化学産業の国際的な競争力を高めることに繋げるという事業目的は妥当なものである。

しかし、マイクロリアクターまたはナノ空孔における協奏的反応場の共通基盤技術開発では、開発目標と達成状況が複雑多岐にわたり、予備検討および絞り込みが不十分であったといわざるを得ない。

欧州との競争も重要であるが、中国等アジアの追従も無視できず、今後、国際水準の客観的な評価を定期的に行う必要を感じる。

2) 研究開発マネジメントについて

事業化に近いフェーズでの開発を含むプロジェクトであり、困難な部分も多かったであろうが、全体としてマネジメントが適切に行われたといえる。特に、集中研のメリットを活かして、効率的な知識の共有を行ったことが、プロジェクト全体の成功につながったものと考えられる。また、共通基盤＋実用化のハイブリッド研究の試みは実用化に向けた意欲が感じられる。

しかし、委託事業である共通基盤技術研究と助成事業である実用化技術開発との相乗効果を大きくするには、有益な情報交換が可能な仕組み作りが必要である。また、プロジェクト期間を通して、技術の全体像を俯瞰的に描く努力がもう少しなされても良かったであろう。すなわち、ここで開発された共通基盤技術が、どのような範囲に適用可能であるのか、その将来展開も含めたマップを描くことにより、技術の優位性や可能性がよりの確に示せるだけでなく、今後の発展にもつながるものと考えられる。

産学技術連携や実用化・産業技術化を担うファンディング及びマネジメントの公的機関として、プロジェクトの全期間を通して一人が責任を持ってプロジェクトを監視監督する NEDO のマネジメントが望まれる。

3) 研究開発成果について

マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術ともに世界最高水準あるいは世界初の成果がいくつか達成されている。これらの成果がそのまま実用化に繋がるかは、今後の課題ではあるが、当該分野において我が国が世界をリードできる程度の基盤はできたと判断する。また、成果の普及の観点から、論文数、学会発表も妥当である。特に、活性種の生成場と反応場を分離できるマイクロリアクター技術の開発はユニークであり、従来の反応器では実現が難しかったり多段反応プロセスであったものを、簡便かつ効率的に行える可能性があり、今後の展開が期待される。ナノ空孔に関しては、ナノ空孔反応場＋分子触媒の協働性を実現するための基礎技術を分解し、それぞれの有効性を確認している点で評価できる。協奏的反応場については、圧力・電子移動・触媒・光・マイクロ波(熱)等パラメータを整理し、その効果について評価した点が評価できる。

一方、個々の成果に対する化学工学的データ普遍化、汎用化の解析作業が必ずしも十分とはいえない。また、成果に基づいて描きうるプラントのイメージや運用サイクルなどを、もう少し俯瞰的に示すことができれば、技術の更なる普及につながるであろう。その意味では、成果全体をもう少し整理してみる必要がある。

今後、技術開示の問題点等はあると考えるが、今回の研究開発において実現された技術を、基盤的なものとして広く普及するための方策を検討することが望まれる。特に、共通基盤技術の成果はデータベース化あるいは体系化が強く望まれる。

4) 実用化、事業化の見通しについて

実用化に向けた基盤研究の実証およびパイロットプラントの作成など、産業化への道筋がある程度示されたことは評価できる。現時点では、まだ十分とは言えないが、マイクロ化学生産研究コンソーシアムを立ち上げて技術的フォローアップを計画している点は大いに評価できる。特に、ナノ空孔担体は、中小規模の市場を狙った最適な実施者が得られ、従来のアモルファスシリカよりも担体価格は上がるが高機能触媒のナノ細孔径制御担持体として商品価値が期待されるため、適切な市場規模の産業技術になるであろう。

しかし、実用化・事業化するために残されている課題も多い。連続運転時の操作安定性、規模の拡大、コスト削減など、個々の企業が今後も継続的に取り組む必要があり、コンソーシアムだけでなく、NEDOによるフォローアップも望まれる。また、個々の共通基盤技術の有効性は示されているものの、今後の産業化に向けてはいわゆるキラーアプリケーションが必要で、その探索は十分行われているとは言えない。

市場への販売ターゲット価格は、プロジェクト初期に明確にしておくことが望まれる。

個別テーマに関する評価

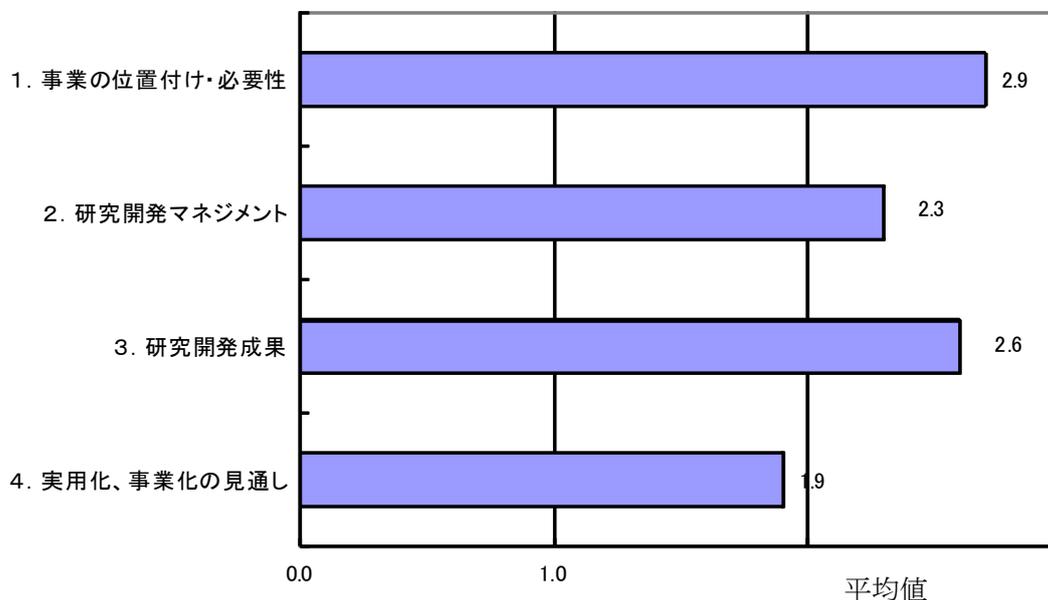
	成果に関する評価	実用化の見通しに関する評価	今後に対する提言
マイクロリアクター技術	<p>マイクロ反応場の革新性を追求するため、時間軸で2ケタ下げたミリ秒単位の反応にこだわって扱ったことは評価に値する。日本の化学装置産業の競争力向上に寄与する。特に、活性種寿命に注目した反応解析法による高効率・高収率生成は応用範囲が広く、その系統的な研究を続けることにより汎用性が広がればその波及効果が大いに期待される。また、マイクロ化と高速混合技術により寿命の短い活性種の利用を可能とする点で本研究の成果を十分に引き出せると考えられる。活性種の生成場・反応場の分離は有効な方法であり、装置設計上重要な発想となっている。パイプレス型反応器と温度絶縁機構の導入は性能向上に大いに貢献する</p>	<p>しかし、細い流路の閉塞が避けて通れないのであれば、交換や切り替えなどのシステム開発、閉塞を遅らせる材料を含めた装置の製造技術・加工技術の開発とそのコスト削減など、実用化にあたっては、マイクロリアクター技術を応用して生産規模拡大を可能にするナンバリングアップの一括ポンピング技術が未解決であり、まだ多くの課題が残されている。</p>	<p>今後も、有機合成分野の研究者と密接に連携することにより、より広範な応用が広がるであろう。また、実用化推進、人材育成のための体制としてのコンソーシアム（京都大学）の活動成果が期待される。</p>

	と考えられる。		
ナノ空孔技術	<p>ナノ空孔技術は、実用化イメージ・出口イメージが明確になっており、最適な中規模市場を狙っている企業が実施者として参画しているため、ナノ空孔担体の早期の製品化が可能であろう。特に、適度な大きさのナノ空孔の安定供給可能な合成手法が短期で完成したことは評価される。ナノ空孔反応場と分子触媒の組み合わせにより収率の高い化学合成が実現されており、その有効性が確認された点も優れている。ナノ空孔の表面処理による長寿命化・固定化触媒など、実用化へ向けた意欲的な基礎研究も行われている。</p>	<p>一方、実用化への見通しを強く求められているために止むを得ない点はあるが、ナノ空孔を実現する方法論をもう少し広く検討してもよかったであろう。</p>	<p>ナノ空孔反応場の化学工学的適用範囲については未知である。今後は、本研究テーマで開発されたナノ空孔利用技術を起点として、特定の材料や製法のみに限定するのではなく、技術をさらに幅広く適用可能なものに展開することが望まれる。</p>
協奏的反応場技術	<p>種々のエネルギーを外部から与える「協奏的反応場」のコンセプトは大変重要なもので、具体的な実証を行った点は評価できる。高圧の協奏的反応場については、</p>		

	<p>当初より実用化が明確にイメージされており、実用化のための助成事業に繋がっている点で評価できる。マイクロ波とナノ空孔の協奏的反応場技術開発では、誘電特性パラメータの測定やエネルギー利用効率の高いマイクロ波照射技術の開発など、基盤技術開発に繋がる成果も上げているが、実用化という観点からは、反応装置の構造やマイクロ波照射方法などに課題が多く残されているよう見える。本研究の実施により、マイクロ反応場関連分野の研究開発のみならず、マイクロ波やナノ空孔と融合した先端研究開発分野の人材育成を促進するなどの波及効果も生じている。</p> <p>一方、協奏的反応場の有効性を示すために、いくつもの適用例を実現しようとして、全く反応条件の異なる多種類の装置を個別に開発する必要があったかどうか</p>		
--	--	--	--

	<p>は疑問である。協奏的反応場というユニークな反応場を構築することに主眼を置いたために、必ずしもマイクロ反応場やナノ空孔の特徴と十分にマッチングしていない適用例も見受けられる。</p>		
<p>マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術および協奏的反応場技術を利用したプラント技術</p>	<p>プロジェクト全体の中での予算比率が少ないにも拘わらず、実施企業は成果を挙げている。個々の研究について見てみるとマイクロ反応場およびナノ空孔ともに基礎研究で得られた成果の有効性を利用した内容になっており、実用化の道筋がある程度示されている。実用化へ向けたハードルは研究課題ごとに差があるが、概ねクリアできる見通しが見えている。特に、ナノ空孔技術については、中堅企業の事業方針や事業規模とマッチングするので早期の実用化が望める。</p>	<p>しかし、事業化に向けては、自動運転や長時間運転時の信頼性とナンバリングアップに関わるプラントメンテナンスの煩雑性の回避などが課題であろうが、これらについては今後、更なる検討が必要である。短期的事業化を目指すという観点からは、一部の達成目標の設定の妥当性に疑問が残る。また、コスト検討、市場の予測など、見積もりの甘さがあるケースも見られる。</p>	<p>マイクロリアクター・ナノ空孔の利点を有効かつ安定的に長時間生かすには、今後のサポート体制が不可欠であり、マイクロ化学生産研究コンソーシアムが有機的に機能することを期待する。国際競争力の確保は、シーズとニーズが噛み合った有機的なコンソーシアムの構築に掛かっている。</p>

評点結果〔プロジェクト全体〕



評価項目	平均値	素点 (注)							
		A	A	A	A	B	A	A	
1. 事業の位置付け・必要性について	2.9	A	A	A	A	B	A	A	
2. 研究開発マネジメントについて	2.3	B	B	B	B	B	A	A	
3. 研究開発成果について	2.6	B	A	A	B	A	A	B	
4. 実用化、事業化の見通しについて	1.9	B	B	B	C	B	B	B	

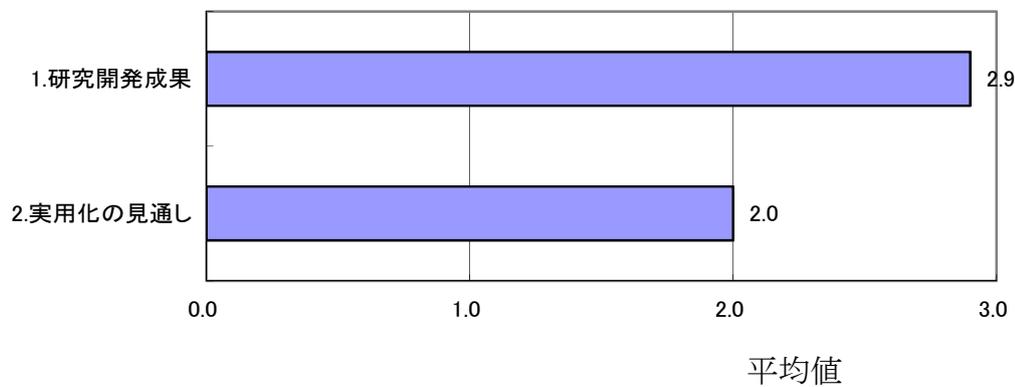
(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

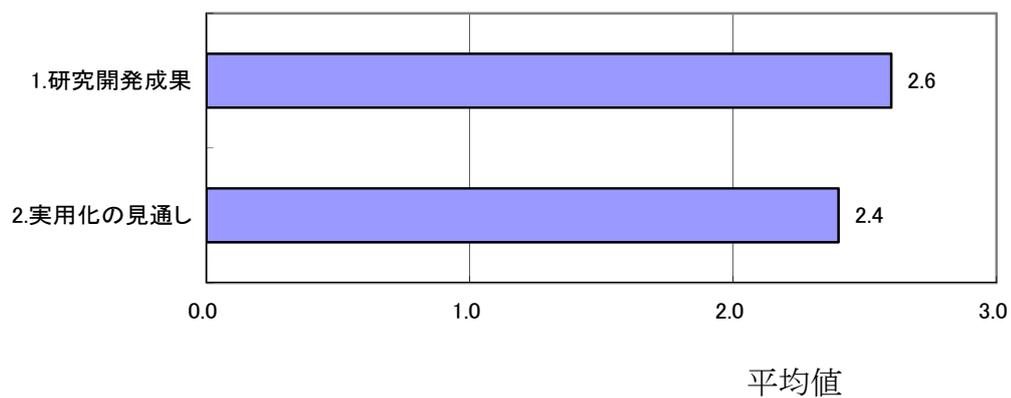
1. 事業の位置付け・必要性について	3. 研究開発成果について
・非常に重要 →A	・非常によい →A
・重要 →B	・よい →B
・概ね妥当 →C	・概ね妥当 →C
・妥当性がない、又は失われた →D	・妥当とはいえない →D
2. 研究開発マネジメントについて	4. 実用化、事業化の見通しについて
・非常によい →A	・明確 →A
・よい →B	・妥当 →B
・概ね適切 →C	・概ね妥当であるが、課題あり →C
・適切とはいえない →D	・見通しが不明 →D

評点結果〔個別テーマ〕

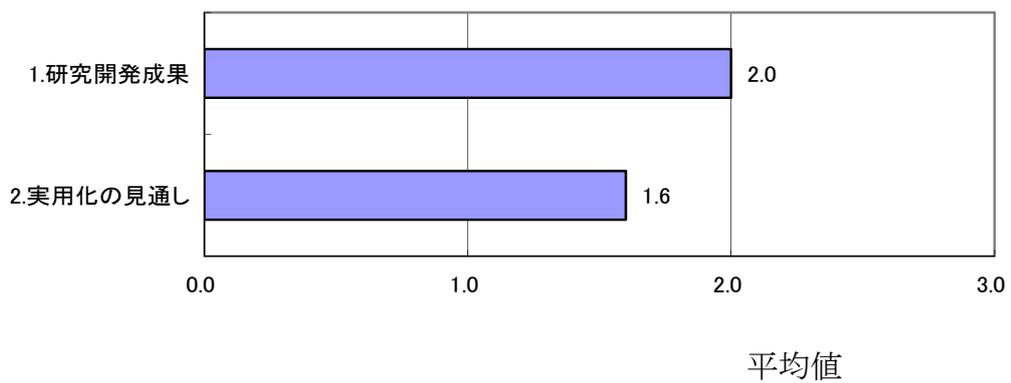
マイクロリアクター技術



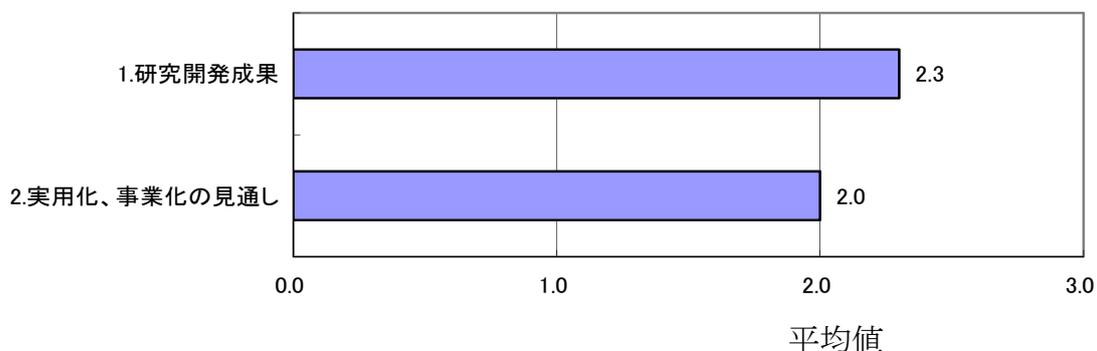
ナノ空孔技術



協奏的反応場技術



マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術および協奏的反応場技術を用いたプラント技術



個別テーマ名と評価項目	平均値	素点 (注)							
マイクロリアクター技術									
1. 研究開発成果について	2.9	A	A	A	B	A	A	A	
2. 実用化の見通しについて	2.0	B	B	B	C	B	A	B	
ナノ空孔技術									
1. 研究開発成果について	2.6	B	A	B	B	A	A	A	
2. 実用化の見通しについて	2.4	B	A	B	A	B	A	B	
協奏的反応場技術									
1. 研究開発成果について	2.0	C	A	B	C	B	A	B	
2. 実用化の見通しについて	1.6	C	B	C	C	B	B	B	
マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術および協奏的反応場技術を利用したプラント技術の開発									
1. 研究開発成果について	2.3	B	A	B	C	A	A	B	
2. 実用化、事業化の見通しについて	2.0	B	B	B	C	B	A	B	

(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

1. 研究開発成果について		2. 実用化 (、事業化) の見通しについて	
・非常によい	→A	・明確	→A
・よい	→B	・妥当	→B
・概ね適切	→C	・概ね妥当であるが、課題あり	→C
・適切とはいえない	→D	・見通しが不明	→D