

超ハイブリッド材料技術開発
(ナノレベル構造制御による相反機能材料技術開発)
(事後評価) 分科会
資料5-3

「超ハイブリッド材料技術開発
(ナノレベル構造制御による相反機能材料技術開発)」

事業原簿
【公開】

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 電子・材料・ナノテクノロジー部
-----	--

目次

概要

プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について

- 1. NEDO 関与の必要性・制度への適合性 I-1
 - 1.1 NEDO が関与することの意義
 - 1.2 実施の効果（費用対効果）
- 2. 事業の背景・目的・位置づけ I-4
 - 2.1 事業の背景
 - 2.2 事業の目的及び意義
 - 2.3 事業の位置付け

II. 研究開発マネジメントについて

- 1. 事業の目標 II-1
- 2. 事業の計画内容 II-2
 - 2.1 研究開発の内容及び全体スケジュールと予算
 - 2.2 研究開発の実施体制
 - 2.3 研究の運営管理
 - 2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性
- 3. 情勢変化への対応 II-20
- 4. 中間評価への対応 II-22
- 5. 評価に関する事項 II-23

III. 研究開発成果について

- 1. 事業全体の成果 III-1-1
- 2. 研究開発項目毎の成果（(一財)化学研究評価機構・(独)産業技術総合研究所、東北大学、東京工業大学、長岡技術科学大学、九州大学）
 - 2.1 概要 III-2.1-1
 - 2.2 ②相反機能発現基盤技術開発
 - 2.2.1 有機・無機材料界面の制御技術
 - 2.2.1.1 超臨界法による粒子界面制御技術開発 III-2.2.1.1-1
 - 2.2.1.2 分子レベルでの面特異吸着による界面制御技術開発 III-2.2.1.2-1
 - 2.2.2 ナノ空間制御技術 III-2.2.2-1
 - 2.2.3 ナノ構造制御技術
 - 2.2.3.1 ナノ粒子表面の有機修飾の基盤技術開発 III-2.2.3.1-1

2.2.3.2	前駆体法による無機ナノ粒子分散系薄膜材料の開発	Ⅲ-2.2.3.2-1
2.2.4	ナノ空間・構造制御手法最適化技術	
2.2.4.1	表面修飾ナノ粒子と媒体との相互作用の評価法開発	Ⅲ-2.2.4.1-1
2.2.4.2	パターン基板と表面修飾モデル粒子との相互作用解析 による分散因子検証	Ⅲ-2.2.4.2-1
2.2.4.3	マイクロ相分離による材料開発および in-situ 光学測定法の開発	Ⅲ-2.2.4.3-1
2.2.4.4	超ハイブリッド材料の分散安定性向上のための高分子 マトリックスの材料設計と合成技術開発	Ⅲ-2.2.4.4-1
2.3	③相反機能材料創製プロセス基盤技術開発	
2.3.1	官能基導入ナノ粒子合成プロセス技術	
2.3.1.1	超臨界法によるナノ粒子合成基盤技術開発	Ⅲ-2.3.1.1-1
2.3.1.2	超臨界水熱合成装置の開発	Ⅲ-2.3.1.2-1
2.3.1.3	超臨界水反応による高速大量表面修飾プロセス開発	Ⅲ-2.3.1.3-1
2.3.2	高分子中ナノ粒子等均一分散・配向・配列プロセス技術	
2.3.2.1	高分子中ナノ粒子等均一分散・配向・配列プロセス ナノ粒子分散技術.....	Ⅲ-2.3.2.1-1
2.3.2.2	高分子中ナノ粒子の自発的配向制御技術開発 ...	Ⅲ-2.3.2.2-1
2.3.2.3	高熱伝導性ナノシート材料の合成とナノ秒パルス電界 による配向制御手法開発.....	Ⅲ-2.3.2.3-1
2.3.3	プロセス最適化技術	Ⅲ-2.3.3-1
2.4	④材料設計に資する統合評価・支援技術開発	
2.4.1	材料設計に資する統合評価・支援技術開発	Ⅲ-2.4.1-1
2.4.2	3次元 TEM を用いた超ハイブリッド材料候補の微細構造評価	Ⅲ-2.4.2-1
2.5	①超ハイブリッド材料創製技術開発	
2.5.1	電気・電子材料分野（パワーデバイス材料周辺技術）	
2.5.1.1	次世代型放熱シートの開発	Ⅲ-2.5.1.1-1
2.5.1.2	高熱伝導絶縁シート材料の開発	Ⅲ-2.5.1.2-1
2.5.1.3	熱伝導性に優れた新規窒化ホウ素材料の開発 ...	Ⅲ-2.5.1.3-1
2.5.2	電気・電子材料（IC パッケージ周辺材料）	Ⅲ-2.5.2-1
2.5.3	光学材料	
2.5.3.1	低屈折率及び高屈折率光学材料の開発	Ⅲ-2.5.3.1-1

2.5.3.2	高屈折光学材料の開発1	III-2.5.3.2-1
2.5.3.3	高屈折率光学材料の開発2	III-2.5.3.3-1
3.	研究開発項目毎の成果 (三菱化学(株)・(独)産業技術総合研究所)	
3.1	概要	III-3.1-1
3.2	②相反機能発現基盤技術開発	III-3.2-1
3.3	③相反機能材料創製プロセス基盤技術開発	III-3.3-1
3.4	④材料設計に資する統合評価・支援技術開発	III-3.4-1
3.5	①超ハイブリッド材料創製技術開発	III-3.5-1
4.	研究開発項目毎の成果 (東レ・ダウコーニング(株))	III-4-1
4.1	概要	
4.2	③相反機能材料創製プロセス基盤技術開発	
4.3	①ポリシロキサン系超ハイブリッド材料創製技術開発	
IV.	実用化の見通しについて	
1.	(一財)化学研究評価機構	IV-1-1
2.	三菱化学(株)	IV-2-1
3.	東レ・ダウコーニング(株)	IV-3-1
V.	成果資料	
1.	各種展示会での成果の発表	V-1-1
2.	新聞、雑誌記事	V-2-1
3.	論文リスト	V-3-1
4.	研究発表(口頭発表含む)リスト	V-4-1
5.	特許リスト	V-5-1
6.	受賞	V-6-1
	(添付資料1) ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画	
	(添付資料2) プロジェクト基本計画	
	(添付資料3) 技術戦略マップ(ナノテクノロジー分野)	
	(添付資料4) 技術戦略マップ(部材分野)	
	(添付資料5) 事前評価書	
	(添付資料6) パブリックコメント	

概要

		最終更新日	平成24年8月8日
プログラム（又は施策）名	ナノテク・部材イノベーションプログラム		
プロジェクト名	超ハイブリッド材料技術開発 （ナノレベル構造制御による相反機能材料技術開発）	プロジェクト番号	P08022
担当推進部/担当者	電子・材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 沖博美（平成23年4月～現在） ナノテクノロジー・材料技術開発部 担当者氏名 田谷昌人（平成21年4月～平成23年3月） ナノテクノロジー・材料技術開発部 担当者氏名 小林和仁（平成20年4月～平成21年3月） 経済産業省 製造産業局 化学課（平成19年4月～平成20年3月）		
0. 事業の概要	<p>従来実現が不可能と考えられていた、相反する複数機能（トレードオフ機能）を両立できる材料を、異種素材の組合せ（ハイブリッド化）により実現するための技術を開発する。</p> <p>要素技術として、異種材料間の界面挙動の制御と最適化により、ナノレベルよりもさらに微小な原子・分子レベルでのハイブリッド化構造・配列制御のための合成技術を開発する。従来の単一材料では実現困難であったトレードオフの性能を引き出すことで、電気・電子材料、光学材料等を出口イメージとした、高機能革新部材製造に必要な技術基盤を開発する。</p> <p>ユーザーニーズに対応した総合的機能を発現し得る異種素材のハイブリッド化を設計、提案できる能力養成プログラムを研究開発プロジェクト実施と並行して実施することにより、我が国材料産業の人材育成にもつなげる。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>1. 事業の位置付け</p> <p>本プロジェクトは、『情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどあらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新（ジャンプアップ）をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、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等を可能にすること』を目的とした「ナノテク・部材イノベーションプログラム」の一環として取り組むものである。極めて広範囲な産業領域に波及する材料・部材領域について、ユーザー製造業等との連携（川上・川下連携）を促進するプロジェクト体制（垂直連携）で実施することで、高度な部材産業群の「すり合わせ力」を一層強化する。</p> <p>2. 必要性</p> <p>我が国の材料産業は、国際的に高い技術力と競争力を有し、経済社会の発展を支えている。しかし、川下産業との取引のオープンに伴いユーザーとの連携の希薄化が進行する一方で、汎用的な材料技術はアジア諸国の技術力向上によるキャッチアップが進行している。そのため我が国において産学官を含む連携の強化（川上川下の垂直連携、材料創製と加工の水平連携など）を図ることと、次世代の材料分野での高付加価値化に資する高度な技術開発が、今後のイノベーション促進に必要不可欠な課題となっている。すなわち、材料技術の高度化・高付加価値が、国際競争力を強化し、新たな市場や雇用を創出する厳選として期待されている。</p> <p>材料産業の急速な発展を背景に、部材分野における半導体関連部材（パワーデバイス材料）、光学部材（空間光制御部材）、ディスプレイ部材（低屈折率材料）などの位置付けられる有機・無機ハイブリッド材料は大幅な性能向上が期待されている。しかしながら、有機材料に無機材料を混ぜていくと、無機材料の性質が付加されるものの、有機材料の長所が失われる。したがって、単なるハイブリッド化ではなく、従来材料ではなし得なかったトレードオフ（相反機能）をナノレベルでの制御・実現する難易度の高い技術開発が必要である。また、産業界の強いニーズである新規製品・サービスを創造するためには、従来の試行錯誤的な材料開発手法ではリソースの投資効率鈍化やエネルギーや環境への負荷増大が避けられなかった。</p> <p>この背景、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、研究開発力を結集して、新しいパラダイムに基づく、有機・無機ハイブリッド材料の開発を推進し、これを産業技術へ繋げていくと共に、社会の共通基盤として情報の整備、提供を通じて科学的知見の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>		

II. 研究開発マネジメントについて

事業の目標

①超ハイブリッド材料創製技術、②相反機能発現基盤技術、③相反機能材料創製プロセス基盤技術、④材料設計に資する総合評価・支援技術の4技術を確立し、これまでにない相反機能の両立を可能にした超ハイブリッド材料を実現し、我が国材料産業発展に大きく貢献する。

以下、最終目標（平成23年度末）の概要を記載する。

① 超ハイブリッド材料創製技術開発

研究開発項目②相反機能発現基盤技術開発、研究開発項目③相反機能材料創製プロセス基盤技術開発、研究開発項目④材料設計に資する総合評価・支援技術開発の成果をもとに、具体的ないくつかの部材について従来材料では実現できなかったトレードオフを解消するとともに、市場評価が可能な成果物を供試し、市場（ユーザー）から、客観的実用化研究課題を抽出する。また、単なる相反機能の解消ではなく、相反機能を制御・実現する技術を開発する。

② 相反機能発現基盤技術開発

従来材料では実現できなかったトレードオフを解消するため、相反機能発現に必要な界面制御、分散、配向制御等の基盤技術を開発・確立する。

③ 相反機能材料創製プロセス基盤技術開発

官能基導入ナノ粒子等の高効率合成プロセス及び均一分散・配向・配列プロセス基盤技術を開発し、これらプロセスが連動した相反機能材料創製プロセス基盤技術を開発・確立する。

④ 材料設計に資する総合評価・支援技術開発

相反機能を発現する、材料・部材の基本構造の特性解析及び設計に関する総合評価・支援技術を確立する。

研究開発項目① 「超ハイブリッド材料創製技術開発」

（1）機能合目的的達成手法の提案

以降の（I）～（III）に示す分野の部材について、下記の最終目標値を達成する一手法以上を提案すること。ただし単に目標値を達成するのではなく、相反機能を合目的的に実現する手法であること。

[最終目標（平成23年度末）]

（I）電気・電子材料分野

[1] パワーデバイス周辺材料（モーター、自動車電装品）

熱伝導率 $\geq 40\text{W/mK}$ 、耐熱性 $\geq 400^\circ\text{C}$ 、絶縁破壊電圧 $\geq 50\text{kV/mm}$ 、易成型性であること。

[2] ICパッケージ周辺材料（熱伝導材料、封止材）

〈非絶縁タイプ〉熱伝導率 $\geq 60\text{W/mK}$ 、

接着強度（熱サイクル1000回後） $\geq 1\text{MPa}$ （at 260°C ）

〈絶縁タイプ〉熱伝導率 $\geq 15\text{W/mK}$ 、体積抵抗率 $\geq 10^{11}\Omega\cdot\text{cm}$ （at 150°C ）、

接着強度（熱サイクル1000回後） $\geq 1\text{MPa}$ （at 260°C ）

[3] 高放熱性材料

熱抵抗値 $\leq 0.01^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ （厚さ10–100 μm ）、硬化前粘度 $\leq 100\text{Pa}\cdot\text{s}$

[4] 高耐熱材料

貯蔵弾性率の低下率（室温と 300°C での値の比較） $\leq 10\%$

熱膨張係数 $\leq 1.5 \times 10^{-5}\text{K}^{-1}$ 、硬化前粘度 $\leq 100\text{Pa}\cdot\text{s}$

（II）光学材料分野

[1] 低屈折率材料（機能性光学薄膜、ディスプレイ基板、光導波路）

屈折率 ≤ 1.4 、鉛筆硬度（JIS K5600） $\geq 4\text{H}$ 、全光線透過率 $\geq 90\%$

易成型性 MFR（メルトフローレイト JIS K7210） $\geq 30\text{g}/10\text{min}$

[2] 高屈折率材料（機能性光学薄膜、ディスプレイ基板、レンズ）

屈折率 ≥ 1.7 、鉛筆硬度（JIS K5600） $\geq 3\text{H}$ 、全光線透過率 $\geq 90\%$

易成型性 MFR（メルトフローレイト JIS K7210） $\geq 10\text{g}/10\text{min}$

（III）その他工業材料分野

[1] 放熱性材料（液晶画面用LED放熱用、燃料電池車・ロボット駆動部放熱用）

熱伝導率 $\geq 40\text{W/mK}$ 、成形粘度 $\leq 100\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、耐衝撃性 $\geq 24\text{J/m}$ 、

比重 ≤ 2.5 、体積抵抗率 $\geq 10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$

（2）市場評価可能とする成果物の供試

上記の目標達成を客観的に判断できるように、市場評価が可能な条件（形態・数量）を明らかにし、成果物を供試する。市場評価を受けて、実用化するための課題を客観的に抽出する。

事業の目標	<p>研究開発項目② 「相反機能発現基盤技術開発」 [最終目標（平成 23 年度末）] 研究開発項目①「超ハイブリッド材料創製技術開発」の最終目標に達成する相反機能の発現機構を明らかにし、それに基づき相反機能発現材料のナノ空間・構造制御手法を確立する。</p> <p>研究開発項目③ 「相反機能材料創製プロセス基盤技術開発」 [最終目標（平成 23 年度末）] 研究開発項目①「超ハイブリッド材料創製技術開発」の最終目標に達成する相反機能の発現する材料を合成するプロセスを確立する。</p> <p>研究開発項目④ 「材料設計に資する統合評価・支援技術開発」 [最終目標（平成 23 年度末）] 相反機能材料の表面・界面、バルク・深さ方向の構造及び状態をナノレベルまでの分解能で複合的・多角的に解明できる計測手法を構築する。得られた計測結果に開発部材の機能評価、相反機能発現・相反機能材料創製過程における評価から得られる分解能、雰囲気などが異なる階層的なデータを統合、情報科学的に処理し、機能発現に関わる経験則などの新しい知識体系として取り出すための手法を開発する。得られた結果を超ハイブリッド材料の設計に反映させる。</p>							
	事業の計画内容	主な実施事項	H 1 9 f y	H 2 0 f y	H 2 1 f y	H 2 2 f y	H 2 3 f y	総額
		①超ハイブリッド材料創製技術開発	353	319	187	207	255	1321
②相反機能発現基盤技術開発		159	109	115	58	123	565	
③相反機能材料創製プロセス基盤技術開発		155	208	258	105	234	961	
④材料設計に資する統合評価・支援技術開発		133	81	69	49	58	391	
その他								
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位：百万円)	会計・勘定	H 1 9 f y	H 2 0 f y	H 2 1 f y	H 2 2 f y	H 2 3 f y	総額	
	一般会計	800	620	590	420	543	2973	
	特別会計 (一般・電源・需給の別)	0	0	0			0	
	加速予算 (成果普及費を含む)	0	97	39		128	264	
	総予算額	800	717	629	420	671	3237	
開発体制	経産省担当原課	産業製造局 化学課						
	プロジェクトリーダー	国立大学法人 東北大学 多元物質科学研究所 教授 阿尻雅文						
	委託先(*委託先が管理法人の場合は参加企業数および参加企業名も記載)	東北大学、東京工業大学、長岡技術科学大学、九州大学、(独)産業技術総合研究所、(一財)化学研究評価機構、日東電工(株)、日立化成工業(株)、電気化学工業(株)、住友ベークライト(株)、日油(株)、新日鐵化学(株)、住友大阪セメント(株)、(株)アイアテック、(株)戸田工業(~H22)、三菱化学(株)(香川大学(H23~)、大阪大学(~H22)、関西大学、(地独)大阪市立工業研究所、油化電子(株)(~H21))、東レ・ダウコーニング(株)(東京大学(~H21))						

中間評価結果への対応	<p>国策に適合した公共性が十分にある、専門分野の研究機関が有機的かつ競争的に研究を推進する体制で進められている、世界的に独創性のある一定以上の成果があるとの評価が得られた。提言としては下記に示すものをうけ、それぞれに対し計画への反映を行った。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材料設計の目的をはっきりさせ、今までにない新規性とコンセプトと力強く提案すること →新規性とコンセプトを意識し、コスト面、生産技術面の課題を明確にしながら実用化を目指す。 ・プロセス技術に関して、生産技術としての課題を明確にすること →大型装置を導入し、超臨界のスケールアップ時の問題点とコスト構造を把握し、対策を講ずる。 ・有機合成や高分子合成の専門家を交えて、精密に高分子材料設計を行うべき。 →高分子の専門家を追加。 <p>また、目覚ましい技術的成果が期待される案件に対しては、更なる追加配分を行い、加速的に研究を進捗させた。</p>	
情勢変化への対応	<p>進捗状況や技術推進委員会の結果をふまえ、当該技術分野における国際競争上の優位性が確立できることが期待されるテーマに関して、研究加速財源の配分を行った。</p>	
評価に関する事項	事前評価	18年度 実施 担当 経済産業省 産業技術環境局 研究開発課
	中間評価	21年度 中間評価実施
	事後評価	24年度 事後評価実施

<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p>研究開発項目①「超ハイブリッド材料創製技術開発」(JCII・三菱化学・東レ・ダウコーニング)</p> <p>(1) 機能合目的的達成手法の提案 以降の(Ⅰ)～(Ⅲ)に示す分野の部材について、下記の最終目標値を達成する一手法以上として材料を提案出来た。</p> <p>[最終目標(平成23年度末)] (Ⅰ) 電気・電子材料分野 [1] パワーデバイス周辺材料(モーター、自動車電装品) 熱伝導率 //面 40~50 W/mK、上面 40~42 W/mK 耐熱性 400°C 絶縁破壊電圧 50kV/mm 易成型性 各社所有技術によるプロセス技術に適合</p> <p>[2] ICパッケージ周辺材料(熱伝導材料、封止材) (非絶縁タイプ) 熱伝導率 60W/mK、 接着強度(熱サイクル1000回後) 2MPa (at 260°C) (絶縁タイプ) 熱伝導率 15W/mK、体積抵抗率 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ (at 150°C)、 接着強度(熱サイクル1000回後) 7MPa (at 260°C)</p> <p>[3] 高放熱性材料 熱抵抗値 $0.01^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$ (厚さ 10~100μm) 硬化前粘度 98Pa·s</p> <p>[4] 高耐熱材料 貯蔵弾性率の低下率(室温と300°Cでの値の比較) 8% 熱膨張係数 $8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 硬化前粘度 37Pa·s</p> <p>(Ⅱ) 光学材料分野 [1] 低屈折率材料(機能性光学薄膜、ディスプレイ基板、光導波路) 屈折率 1.36~1.38 鉛筆硬度(JIS K5600) 4H 全光線透過率 $\geq 90\%$ 易成型性 MFR(メルトフローレイト JIS K7210) $\geq 30\text{g}/10\text{min}$</p> <p>[2] 高屈折率材料(機能性光学薄膜、ディスプレイ基板、レンズ) 屈折率 1.70~1.83 鉛筆硬度(JIS K5600) 3H 全光線透過率 $\geq 90\%$ 易成型性 MFR(メルトフローレイト JIS K7210) $\geq 10\text{g}/10\text{min}$</p> <p>(Ⅲ) その他工業材料分野 [1] 放熱性材料(液晶画面用LED放熱用、燃料電池車・ロボット駆動部放熱用) 熱伝導率 43W/mK 成形粘度 82Pa·s 耐衝撃性 26J/m 比重 1.9 体積抵抗率 $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$</p> <p>(2) 市場評価可能とする成果物の供試 市場評価が可能な条件(形態・数量)を明らかにし、成果物を供試した。市場評価を受けて、実用化するための課題を客観的に抽出した。</p>
----------------------	--

②相反機能発現のための基盤技術開発
下記成果により達成した。

- ・超臨界法により、熱伝導性粒子および高屈折率ナノ粒子の表面の分子レベルでの有機修飾制御に成功した。(東北大学)
- ・耐熱性あるいは透明高屈折率高分子に高濃度でナノ粒子を良分散する有機修飾ナノ粒子合成を実現した。(東北大学)
- ・表面修飾ナノ粒子の溶媒・ポリマー中でのナノ粒子—ポリマー間相互作用評価のための基盤を確立し、有機修飾ナノ粒子を高濃度に低屈折率かつ高硬度を併せ持つポリマー中に分散させる基盤技術を確立した。(東北大学)
- ・プレポリマーを用いた2段階重合最適化と合成プロセスの汎用化を行った。ウェットアニーリングプロセスによる高屈折率化を新提案した。(東北大学)
- ・電場応答性分子修飾形態制御ナノ粒子の合成法を確立し、配向制御につなげるための基盤を確立した。(東北大学)
- ・多波長レイリー散乱測定系の構築により、ハイブリッド材料の損失要因の把握を定量的に行なった。(東北大学)
- ・ポリイミド系マトリックス材料の化学構造・分子配向・凝集状態制御による屈折率・熱伝導性制御のための基盤技術を開発した。(東京工業大学)
- ・前駆体法によるポリイミド中での金属/無機ナノ粒子自発析出技術の確立と高/低屈折率材料および熱伝導材料の創製を行った。(東京工業大学)
- ・ナノ粒子の相平衡・溶解度・粘性を評価することにより、ナノ粒子と媒体との相互作用評価に関する基盤技術を確立した。(東北大学)
- ・親水・疎水パターン基板上での表面修飾モデル粒子の吸着挙動を明らかにし、表面修飾ナノ粒子と媒体との相互作用に関する基盤技術を確立した。(東北大学)
- ・マイクロ相分離構造を制御した超ハイブリッドを用いることにより高熱伝導性の目標値を達成した。(東京工業大学)
- ・マイクロ相分離構造を形成するポリイミド・ブレンド中へのZnOナノ粒子の選択導入による二重パーコーション構造の創製と高熱伝導化に成功した。(東京工業大学)
- ・新規アダマンタン含有高分子を合成、基礎物性(高耐熱性)の確認し、マトリックス設計に関する基盤技術を開発した。(東京工業大学)
- ・高分子の屈折率異方性に基づく膜厚方向熱伝導率の新たな指標の提案と鎖末端をシリル化した新規反応性高分子マトリックスの創製を行った。(東京工業大学)
- ・TiO₂被覆Agナノロッド、BNナノプレート、Si₃N₄ナノワイヤ合成のほか、BNを更に高熱伝導化する合成条件を確立した。(大阪大学・香川大学・三菱化学)
- ・液晶性エポキシ/BNへの磁場印加と熱伝導率との関係を把握した。(関西大学・三菱化学)
- ・表面修飾の粘度、熱伝導率、強度等への効果を確認した。(大阪市立工業研究所・三菱化学)

	<p>③相反機能材料創製プロセス基盤技術開発 下記成果により達成した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・合成・回収プロセスのスケールアップに必要な設計基盤技術を確立した。(東北大学) ・超高压ナノ秒パルス電源を開発して BN 粒子の配向を実現した。(長岡技術科学大学) ・高濃度スラリー連続供給・回収システム等の流通式装置の基本技術を開発した。(アイテック) ・修飾ナノ粒子の連続合成技術を開発し、修飾粒子等を提供した。(アイテック、東北大学) ・ナノ粒子分散光硬化樹脂の合成条件を最適化し、ナノ粒子配列を行った。(東北大学) ・平板・凝集 hBN 粒子のポリイミド中での自発配向を制御し、異方的な熱伝導を発現させた。(東京工業大学) ・合成プロセスの可視化技術、シミュレーション手法を開発し、最適化を可能とした。(東北大学) ・等方的高熱伝導材料を得るためのフィラーの凝集崩壊特性を把握した。(三菱化学) ・特殊な金型を用い射出成形の流動場による熱伝導率異方性制御手法を確立した。(油化電子) ・高温高压水を使用した新規合成法による、表面修飾率が制御されたポリシロキサン修飾ナノ粒子の合成に成功した。(東京大学) ・二段階加熱反応による表面修飾、酸化状態の制御を確認した。(東京大学) ・流通式装置による製造のための要素技術を確認した。(東京大学) ・エポキシシロキサンの高い表面修飾効果を確認した。(東京大学) ・シリカナノ粒子を硬質ポリシロキサンに良分散させる技術を提案した。(東京大学) 	
	<p>④材料設計に資する統合評価・支援技術開発 下記成果により達成した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・固体 NMR による粒子表面修飾状態解析のための基本データを整備し、超臨界合成 TiO₂ 粒子の特徴的な表面就職状態を明確化するとともに、BN 粒子に適した修飾基の探索結果を提供した。(産業技術総合研究所) ・3次元 TEM により粒子分散状態を立体的に解析する技術を構築し、ZrO₂系光学材料で粒子サイズや分散状態と光学特性との関係を明確化した。(九州大学) ・陽電子消滅法による3次元ナノ空隙分布計測を実現し、ZrO₂系光学材料でナノ空隙の制御が屈折率向上の鍵であることを確認した。(産業技術総合研究所) ・機器毎に構造の異なる計測データ統合管理を実現するソフトを開発し、知財登録した。(産業技術総合研究所) ・材料構造の形態学的特徴を数値化する手法を開発し、BN 粒子の表面修飾が粒子配列を容易にすることで熱伝導率向上に寄与することを確認した。(産業技術総合研究所) ・材料構造と機能との関係解析にヘテロ相関解析を適用し、有効性を確認した。(産業技術総合研究所) ・微小領域の熱伝導率評価技術を確認し、熱物性顕微鏡による熱浸透率分布解析を構造相関に応用した。(産業技術総合研究所) ・熱物性顕微鏡像のゆらぎ解析による構造のパラメータ化を検討した。(三菱化学) 	
	投稿論文	202件 うち査読付き89件
	特許	37件 (うち国際出願0件)
	その他の外部発表 (プレス発表等)	新聞・雑誌等発表 57件、研究発表 584件 受賞 29件、各種展示会での成果発表 45件
IV. 実用化見通しについて	電気・電子材料、光学材料、その他工業材料を対象とする市場の2020年推定値として、年間1800億円を見込む。	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成19年3月 経済産業省制定 平成20年3月 NEDO制定
	変更履歴	平成20年7月 改訂 (イノベーションプログラム基本計画の制定により、「(1) 研究開発の目的」の記載を改訂)

プロジェクト用語集

用語（日本語）	English	用語の説明
E V	Electric vehicle	電気自動車
H E V	Hybrid electric vehicle	ハイブリッド自動車
Lorentz-Lorenz 式	Lorentz-Lorenz Formula	物質の屈折率を分子分極率と単位体積あたりの分子数と結びつけた式。屈折率予測・制御の基本となる。
MD 方向	Machine direction	射出成形などにおいて成形品を作製した場合の射出方向。
T D 方向	Transverse direction	射出成形などにおいて成形品を作製した場合の射出方向に垂直な方向。
TMA	Thermal Mechanical Analysis	試験片の温度を、調整されたプログラムに従って変化させながら、非振動的な荷重のもとで、試験片の変形を温度または時間の関数として測定する方法。
XML	Extensible Markup Language	インターネットのホームページ作成に用いられる HTML 形式に類似したデータ記述形式の一つ。数値、画像といったデータの種類の違い、計測手法、計測機器、解析ソフト毎のデータ形式の違いをデータの意味や構造を含めた「タグ」で記述することにより統一化、効率的にデータベース保存、参照利用することが出来る。
アスペクト比	Aspect ratio	2次元形状の物の長辺と短辺の比率を指し示す言葉。
アダマンタン	Adamantane	$C_{10}H_{16}$ で表される脂環式化合物で、全ての炭素間の結合角は sp^3 混成軌道に基づく 109.5 度を取り、全く歪みのない構造を持つ。熱的にも化学的にも非常に安定で、正四面体の対称性を持ちダイヤモンド分子とも呼ばれる。
アニオン重合	Anionic Polymerization	アニオン種を開始剤かつ活性種とする連鎖重合の一種で、ビニルモノマーおよび環状モノマーの重合に用いられる。
アルコキシシリル基	Alkoxysilyl Group	$Si-OR$ で表される官能基で、加水分解されるとシラノール ($Si-OH$) を与え、さらに脱水縮合によりシロキサン結合 ($Si-O-Si$) に変化する。金属や無機化合物と有機化合物との間の反応に使用されることも多い。
インバータ	Inverter	直流電力を交流電力に変換する電源回路、またはそれを含む電力変換装置。
界面フォノン散乱	Interface Phonon Scattering	無機粒子（フィラー）と高分子（マトリックス）など、熱振動の伝達速度や密度が大きく異なる2つの物質が接する界面において、フォノンが直線的に伝搬されず、散乱される現象。
核磁気共鳴	Nuclear Magnetic Resonance	微少な磁石である原子核の特性を利用して、原

(NMR) 法		子の性質を観測する手法である。観測したい試料を強磁場中に置いて、FM ラジオに使われる帯域の高周波を試料に照射し、試料から生じるシグナルを検出する。水素核および炭素核のNMR法は有機化合物の同定に必須の手法となっている。
ガラス転移	Glass Transition	熔融状態の高分子を冷却した場合、結晶化することなく過冷却状態を経てガラス状態となる転移のこと。高分子を材料として利用する際に、ガラス転移温度の高低が有用な指標となる。
近接場光	Near field light	光の波長よりも微小な物質構造に光を当てた際に、その物質構造の表面に発生するが遠くへ伝搬してゆくことがない、特殊な光のことである。
顕微ラマン分光	Raman microscopy	分光器に光学顕微鏡を組み込むことで、レーザー照射されたマイクロオーダーの微小領域から生じるラマン散乱光のスペクトルを測定する。コンピュータ制御による試料台の移動あるいはレーザー光のスキャンにより広範囲の測定(マッピング)を行うこともできる。
コア-シェル複合微粒子	Core-Shell Hybrid Particles	内層(コア層)と外層(シェル層)の化学的性質が異なる複合粒子。
交流温度波分析法	Temperature Wave Analysis	薄膜表面でジュール熱を発生させ、全方位に拡散する波のうち、厚み方向に伝搬する成分のみに着目し、ヒーターと相対する裏面に取り付けられた薄膜抵抗センサーでの温度波の位相遅れを観測することにより試料の熱拡散率を測定する方法。
固体NMR法	Solid-State Nuclear Magnetic Resonance	固体状態の試料をそのままの状態でのNMR観測する手法である。有機化合物の同定に用いる場合は、通常、重水素化溶媒に試料を溶かしてから測定するが、固体NMR法では固体状態のまま非破壊で観測する。高強度の高周波パルス発生器、高耐圧の検出器などが必要となる。
固溶	Solid solution	2種類以上の元素(金属の場合も非金属の場合もある)が互いに溶解し、全体が均一の固相となっているものをいう。非金属元素同士が互いに溶解した場合は、混晶(こんしょう)ともいう。
シッフ塩基	Schiff base	窒素原子に炭化水素基(アリアル基やアルキル基)が結合したイミンを指す呼称。一般式 $R^1R^2C=N-R^3$ ($R^3 = \text{alkyl, aryl, etc., not H}$) と表され、炭素・窒素二重結合を含む。
自由体積	Free Volumes	高分子鎖間にできる径がサブナノメートルオーダーの空隙。高分子の種類・温度によって大きさが異なる。高分子の物性、例えば熱膨張、粘性、気体透過性、力学特性などは、自由体積と密接な関係があるとされている。
垂直型ダブルパーコ	Vertical Double Percolation (VDP)	フィルム状試料において相分離した2相がそれ

レーション構造	Structure	ぞれ膜厚方向に連続的に連なる連続的な構造を形成した場合をさす。
スパイラルフロー	Spiral Flow	成型時の材料の流れ易さを表す数値。渦巻状の溝を彫りこんだ試験金型を用いてトランスファー成形し、流れが止まった時の材料の長さで表す。
前駆体法 (<i>In situ</i> 析出法)	Precursor Method (<i>In situ</i> precipitation method)	金属の硝酸塩、酢酸塩、フッ化物、有機錯体など極性溶媒に可溶性前駆体をポリマーに溶解させ、熱処理などにより無機/金属ナノ粒子を析出させる方法。
地球統計学	geostatistics	地下資源の分布予測を行うために発達した統計学の一分野。地下資源の他、地下水の水脈、植生分布など自然界における種々の現象の空間的相関をモデル化し、限られたデータから全体像の推測を行うことを目的とする。
超解像	super-resolution	顕微鏡観察や分光分析など光による観測において、低解像度の情報を基に高解像度の情報を推定・生成することで、用いる光の特性に依存する装置固有の値よりも高い分解能を計算科学的に得る技術。
超臨界流体	Supercritical Fluid	分子量の低い化合物に温度・圧力を加えていくと、ある点を境に化合物の物理特性が大きく変化し、高拡散・高密度を有する高圧流体となる。これを超臨界流体と言ひ、その温度・圧力をそれぞれ臨界温度・臨界圧力と言う。
貯蔵弾性率	Storage Modulus	刺激を与えた物質からの応力の内、内部に蓄えられた応力を保持する能力、いわば弾性成分を指す。物質の粘弾性測定により算出される。一方、与えたエネルギーが熱となって逃げってしまう成分を損失弾性率と言ひ、該測定で同時に算出される。
定常法	Steady Flow Method	試料板の片面を加熱、反対面を冷却し、試料板厚み方向に温度勾配をつけ、その温度差と加熱に要した熱量から熱伝導率を算出する方法。簡便なために多用されるレーザーフラッシュ法などは非定常法に分類される。
透過 WAXD 測定	Transmission Wide-angle X-ray Diffraction Measurement	単色の X 線を試料に透過させ、散乱された X 線を広い角度で検出することにより、試料中に存在する小さな (オンGSTロームオーダー) の構造秩序を検出する方法。
二値化処理	binarization	濃淡のある画像において、画像の輝度値に特定の閾値を設定し、閾値よりも高い画素を白、低い画素を黒の二つの値に変換する画像処理技術。この処理により、観察対象の境界を抽出することが容易になる。
熱浸透率	Heat penetration rate	樹脂成形の時など、高温の樹脂が冷却された型で成形する場合の型の表面温度を推定する時などに使う指数。この指数が使われるのは、熱浸透率

		が互いに異なった物質が接しているときに、接触面を通して熱が移動するときで、たとえ熱伝導率及び体積熱容量が異なっても、2つの物質の熱浸透率が等しいときは（それらの積が等しければ）、熱の拡散は境界面が存在しないのと同様に振る舞う。
熱抵抗値	Thermal Resistance	実際に樹脂が使用される状態に近い条件での試料中の熱の伝えにくさを表し、値が小さいほど放熱特性が良いことを示す。試料厚さを熱伝導率で割った値。
パーコレーション	Percolation	高い熱伝導性や電気伝導性を有する物質(粒子)が系内でどのように繋がり、それが系の性質にどのように反映されるかを説明とする理論で、対象物質が閾値濃度以上で凝集し、系全体に連なるクラスターが形成されると高い熱・電気伝導性が発現する。
パーコレーション理論	Percolation theory	ランダム系を統計的に考察するための理論。導電性複合材料の導電性機構を説明するために良く用いられる。対象とする物質の分散凝集状態と導電性との関係を統計的に処理する理論。
波長分散	Wavelength Dispersion	物質の屈折率の波長依存性を指す。光学材料は一般に色収差を低減するため、波長分散が小さいことが期待される。
バリオグラム	variogram	空間内二点間におけるデータ値の差の二乗の期待値（＝分散）を二点間の距離（離間距離）の関数として表したもので、地球統計学において現象の空間的相関をモデル化する際に用いられる。自己空間相関関数ともいう。すべての離間距離で一定値を示す場合には、データ間に空間的相関はないと考えることができる。
パワーデバイス	Power device	電力変換（整流やスイッチング）に用いられる半導体素子の総称。整流ダイオード、サイリスタ、パワートランジスタ等。
表面処理	Surface Treatment	材料そのものの特性は維持したまま、表面の性質を変化させるために行う処理または化学的修飾反応のこと。紫外線照射やめっき、金属材料や無機化合物の表面に有機化合物を反応させる場合などが相当する。
フォノン伝導	Phonon conduction	振動を量子化したもので、結晶中の格子振動の伝播のことをさす。単結晶で最も伝播しやすく、結晶中の欠陥や電子との衝突などによって伝播距離は著しく減少する。
フラクタル次元	Fractal dimension	図形を評価するために導入されたもの。フラクタル次元は、数学的に定義された図形などでは、厳密な値が算出できることもあるが、海岸線評価などの場合は、フラクタル次元自体が測定値になる。比較的なめらかな海岸線では、フラクタル次元は1に近い値となり、リアス式海岸などの複雑な海岸線では、それよりは大きな値となり、その

		値により図形の複雑さが分かる。
ポリイミド	Polyimide	繰り返し単位にイミド結合を含む高分子の総称だが、通常は芳香族構造がイミド結合で連結された高分子を指し、高分子中で最高レベルの熱的・機械的・化学的性質を持つ。
曲げ強さ	Flexural Strength	試験片の両端部分を支点で支えて両端支持ばりとし、その中央部に上部から集中荷重を加えた時の最大曲げ応力。
マジック角回転 (MAS)	Magic Angle Spinning	磁場方向に対し 54.7 度傾いた軸の周りで試料を高速回転させる方法である。54.7 度をマジック角という。固体試料のNMRスペクトルにおけるシグナルの線幅は、溶液試料に比べて非常に広く、スペクトルの分解能が低い。試料をマジック角回転させることにより、シグナルの線幅が狭くなり、高分解能スペクトルが得られる。
末端官能基化	End-Functionalization	末端官能基化ポリマーの合成反応のこと。官能基を有する開始剤または停止剤を用いて合成する場合や、連鎖移動反応を利用して官能基導入を行う経路が知られている。
末端官能基化ポリマー	End-Functionalized Polymer	片末端または両末端に官能基を有する鎖状高分子の総称。官能基の反応性を生かしてブロック共重合体やグラフト共重合体の合成に使用される。
マイクロ相分離	Microphase Separation	異種ポリマーの共重合体や混合物 (ブレンド) において観測される微視的な相分離を指す。
面内配向	In-plane Orientation	ポリマーの分子鎖が製膜過程および乾燥・硬化過程において基板面に沿って配向する現象。ポリイミドのような剛直な構造を有する高分子は自発的に面内配向することが多い。
熔融粘度	Melt Viscosity	加熱によって熔融状態にある材料の粘度。規定温度に加熱した金型に充填した材料に一定荷重をかけ、プランジャーの下降距離と時間との関係から得られた粘度の最小値。
ラウンドロビンテスト	Round Robin test	試験結果の妥当性を評価するために、まったく同じと考えてよい材料を各試験所に配布して、いっせいに試験して結果を持ち寄って比較する、持ち回り試験。
ラビング	Rubbing	液晶では、配向膜に配向性を与える為、布を用いて一方向にこすり、筋を付ける処理を指す。
乱層構造	turbostratic structure	無秩序な積層構造。低温または気相法で合成したボロンナイトライド (BN) で見られる。
リビング重合	Living Polymerization	開始反応と生長反応のみからなる連鎖重合で、停止反応や連鎖移動反応を含まず、設計通りの分子量をもつポリマーやブロック共重合体、末端官能基化ポリマーの合成が可能である。

I. 事業の位置付け・必要性について

1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDOが関与することの意義

我が国の材料産業は、国際的に高い技術力と競争力を有し、経済社会の発展を支えている。しかし、川下産業との取引のオープン化に伴いユーザーとの連携の希薄化が進行する一方で、汎用的な材料技術はアジア諸国の技術力向上によるキャッチアップが進行している。そのため我が国において産学官を含む連携の強化（川上川下の垂直連携、材料創製と加工の水平連携など）を図ることと、次世代の材料分野での高付加価値化に資する高度な技術開発が、今後のイノベーション促進に必要不可欠な課題となっており、我が国の国際競争力を強化し、新たな市場や雇用を創出する源泉として期待されている（図1）。

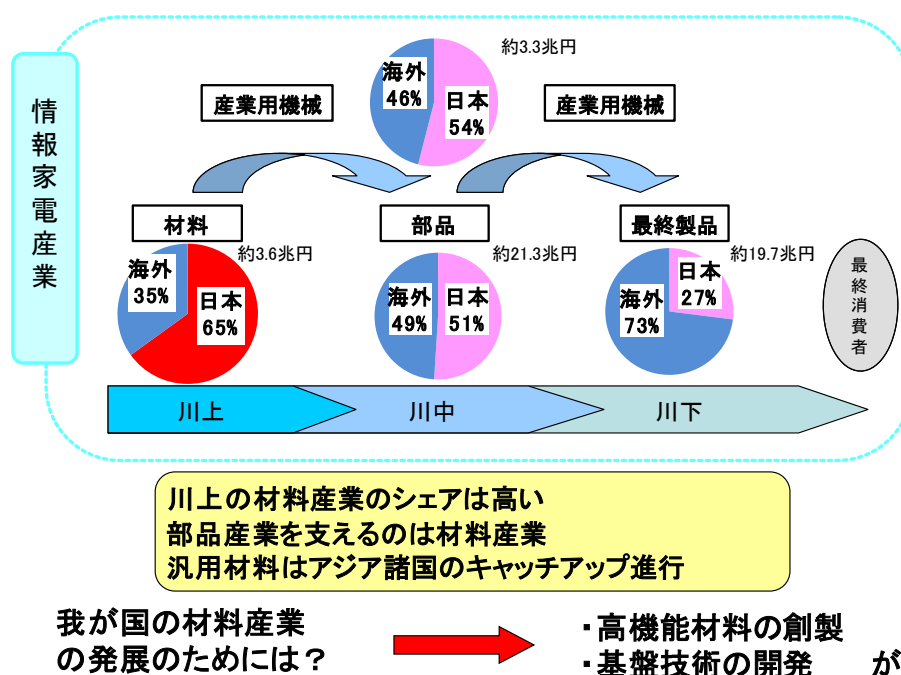


図1 高度な材料開発の必要性（経済産業省作成資料）

有機・無機ハイブリッド材料は、半導体関連部材（パワーデバイス材料）、光学部材（空間光制御部材）、ディスプレイ部材（高・低屈折率材料）などを支える基盤技術として大幅な性能向上が期待されている。これまでの有機・無機ハイブリッド材料では、有機材料に無機材料を高濃度に混ぜていくと、無機材料の性質が付加されるものの、有機材料の長所が失われるものであり、大幅な性能向上は望めなかった。そこで、ナノテクノロジーを活用し、ナノレベルでの界面・空間・構造を制御することにより、これまでになく高度な機能を有する有機・無機ハイブリッド材料開発の機運が高まっている。

本プロジェクトでは、有機・無機ハイブリッド材料に着目し、「単なるハイブリッド化ではなく、従来材料ではなし得なかったトレードオフ（相反機能）をナノレベルでの界面・分散・構造制御で解消し、相反機能を合目的的に制御・実現することができる技術」を超ハイブリッド材料技術（ナノレベル構造制御による相反機能材料技術）と定義し、①超ハイブリッド材料創製技術開発、②相反機能発現基盤技術開発、③相反機能材料創製プ

プロセス基盤技術開発、④材料設計に資する統合評価・支援技術開発を実施し、我が国材料産業の発展に大きく貢献することを目的とする。

超ハイブリッド材料の実現により、従来材料では不可能であった高度な新材料が期待できる。また、将来幅広い産業分野で利用可能な共通基盤技術ができる可能性がある。しかしながら、産業界の強いニーズである新規製品・サービスを創造するためには、従来の試行錯誤的な材料開発手法ではリソースの投資効率鈍化やエネルギーや環境への負荷増大が避けられない。また、高度なナノテクノロジーを駆使する材料開発は難易度が高く、投資規模も大きく、開発期間も長くなることが予想されるため、民間企業だけの開発ではリスクが非常に大きい。以上の理由により民間投資のみに任せるのではなく、産学の科学的知見、研究開発力を結集して、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下NEDOと略記する。）による国家的、集中的な研究開発プロジェクトにより、超ハイブリッド材料技術の開発を加速して実施する必要がある（図2）。

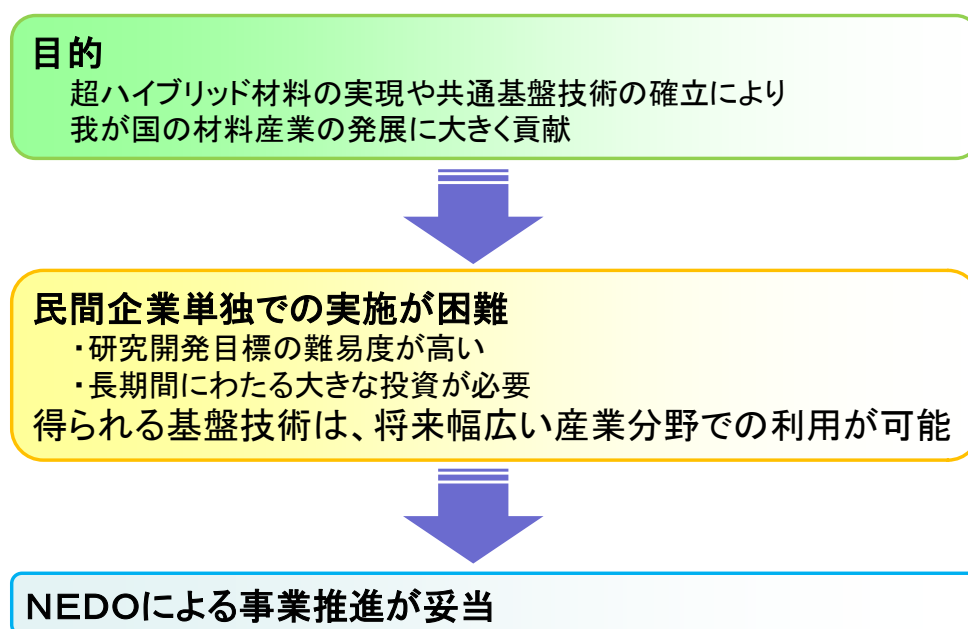


図2 NEDOが関与することの意義

1.2 実施の効果（費用対効果）

- (1) 総事業費：平成19年～23年度の5年間で32億円。平成19年度は経済産業省による直執行であったため、総事業費のうちNEDO事業費は平成20～23年度の4年間で24億円。
- (2) 効果：電気電子材料、光学部材、構造部材の分野に関連して、2020年度に国内（海外展開含む）で年間約1800億円程度の市場を見込んでいる。（図3）

富士キメラが出版した『2009年ハイブリッドマテリアルの現状と将来展望』及び『2007年機能性高分子フィルムの現状と将来展望』に基づき超ハイブリッド材料に関する市場規模予測を表1にまとめた。ここで取り上げた用途分野の多くは今後も高い成長が見込まれる。これらの材料は、電気・電子産業・自動車産業等を支える基盤となるものである。こ

これらの材料が切り開く産業は、技術革新が激しく市場サイクルの短い分野でもあるので、時期を逸さないよう早期の材料開発が重要であり、本プロジェクトはそれを目指すものである。

表1 超ハイブリッド材料の市場規模予測

分野	電気・電子材料 その他の工業材料	光学材料	
用途例	放熱シート、ポリマー系ナノコンポジット、導電性接着剤、銀ナノペー スト等	高屈折率材料、低屈折率材料、有機無機ハイブリッドコート、透明導電性フィルム等	総計
2020年市場予測 (億円)	244	1530	1773

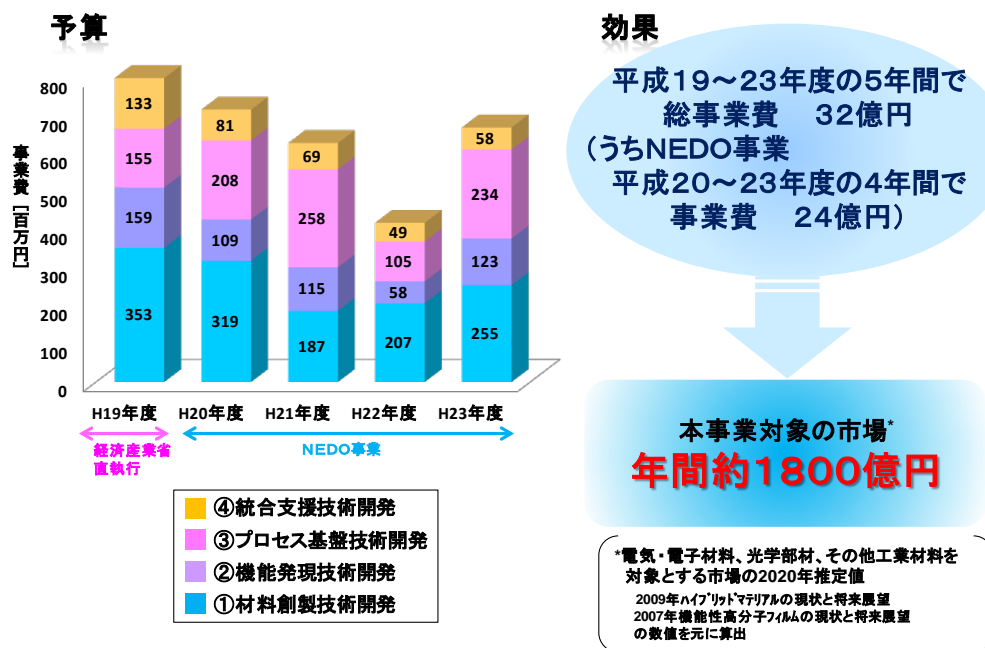
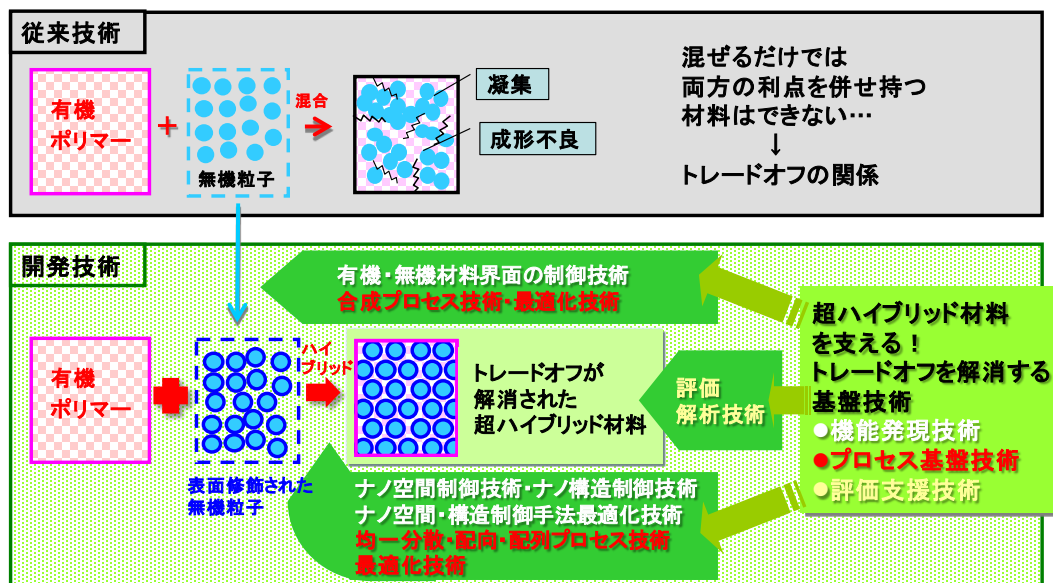


図3 予算と実施の効果

2. 事業の背景・目的・位置づけ

2.1 事業の背景

急速に進展する情報家電、自動車産業等の高度な要求を満たすパワーデバイス材料、耐熱材料、高度情報通信に不可欠な光学材料等でトレードオフを解消する材料、すなわち、相反機能を両立する材料が求められている。例えば、高熱伝導性と易成形性、高・低屈折率と透明性等のトレードオフの関係にある材料に関するニーズが非常に強くなってきている（図4）。高分子・金属・セラミックといった単体材料では実現できないため、従来から有機・無機材料を複合する試みがなされてきたが、既存の手法の延長線上にある技術ではトレードオフを解消するのは非常に困難で、未だ達成されていなかった。



分野	情報家電・自動車分野	高度情報通信分野
対象材料	高熱伝導・高耐熱材料 【放熱シート】 【封止材】 【接着剤】	光学材料(高・低屈折率) 【反射防止フィルム】 【レンズ】 【LED封止材】
ユーザからの要求事項	高熱伝導性 ↔ 易成形性 トレードオフ	高・低屈折率 ↔ 透明性 トレードオフ
従来材料	高分子・金属・セラミック材料単体では実現できない 有機・無機材料を複合するが、トレードオフを解消できない 熱 → 凝集、高伝熱抵抗 <課題> 凝集、高伝熱抵抗	光 → 凝集、光散乱 <課題> 凝集、光散乱
超ハイブリッド材料	トレードオフの解消 分散配向 <ポイント> 分散配向	トレードオフの解消 高濃度完全分散 <ポイント> 高濃度完全分散

図4 超ハイブリッド材料への要求

2.2 事業の目的及び意義

本プロジェクトは有機・無機ハイブリッド材料に着目し、「単なるハイブリッド化ではなく、従来材料ではなし得なかったトレードオフ（相反機能）をナノレベルでの界面・分散・構造制御で解消し、相反機能を合目的的に制御・実現することができる技術あるいはそれに資する技術」を超ハイブリッド材料技術（ナノレベル構造制御による相反機能材料技術）と定義し、①超ハイブリッド材料創製技術開発、②相反機能発現基盤技術開発、③相反機能材料創製プロセス基盤技術開発、④材料設計に資する統合評価・支援技術開発を実施し、極めて広範囲な産業領域に波及する材料・部材領域について、ユーザー製造業等との連携（垂直連携）を促進する産学連携のプロジェクト体制で実施することで、高度な部材産業群の「すり合わせ力」の強化を図り、我が国材料産業の発展に大きく貢献することを目的とする（図5）。

本技術の確立により、相反機能の両立を可能にした超ハイブリッド材料の実現など、将来、幅広い産業分野で利用される共通基盤技術の形成が見込まれる。

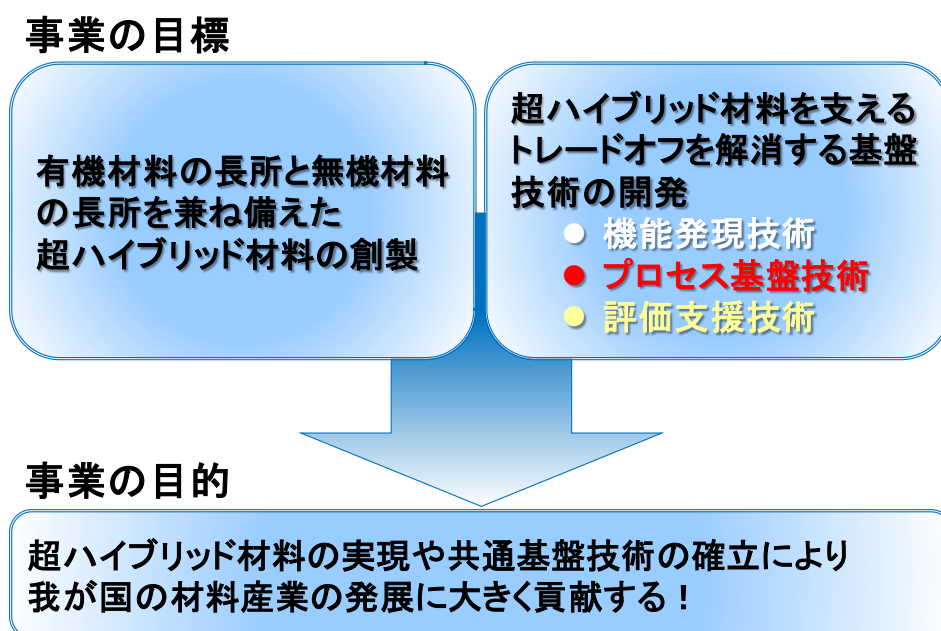


図5 事業の目標と目的

2.3 事業の位置付け

本プロジェクトは、経済産業省が推進する7つの「イノベーションプログラム」（図6）のうち、『情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどあらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新（ジャンプアップ）をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、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等を可能にすること』を目的とした「ナノテク・部材イノベーションプログラム」の一環として取り組むものである（図7）。

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。

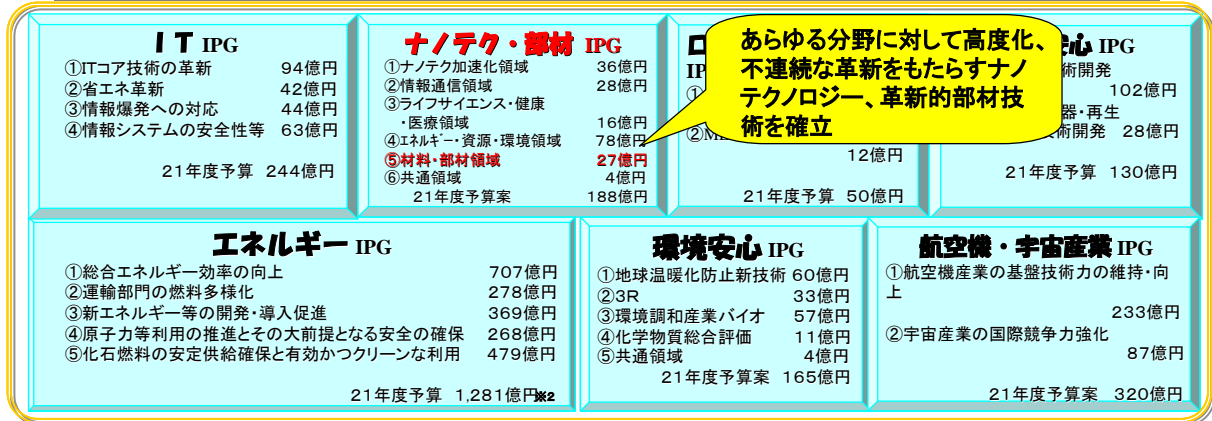
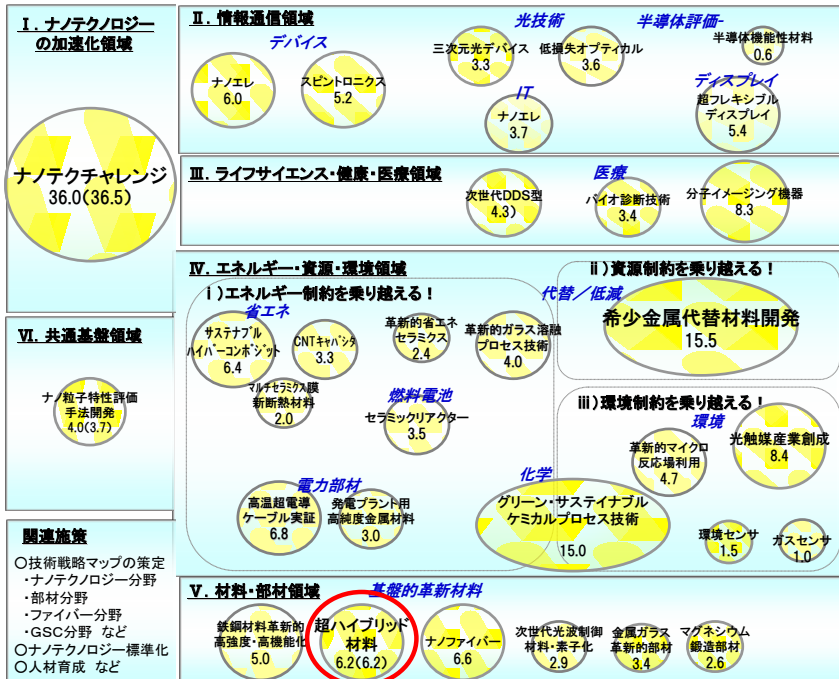


図6 イノベーションプログラムにおける本プロジェクトの位置付け

ナノテク・部材イノベーションプログラム

【平成21年度予算額：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する。
○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を可能とする。



IPGの目標

- ナノテクによる非連続技術革新-
世界に先駆けてナノテクノロジーを活用した不連続な技術革新を実現する。
- 世界最強部材産業による価値創出-
我が国部材産業の強みを更に強化することで、他国の追随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。
- 広範な産業分野での付加価値増大-
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。
- エネルギー制約・資源制約などの課題解決-
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。

図7 ナノテク・部材イノベーションプログラムにおける本プロジェクトの位置付け

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

我が国の材料産業の発展に大きく貢献することを目的に、本事業では有機・無機ハイブリッド材料に着目し、「単なるハイブリッド化ではなく、従来材料では成し得なかったトレードオフ（相反機能）をナノレベルでの界面・分散・構造制御で解消し、相反機能を合目的的に制御・実現することができる技術あるいはそれに資する技術」を超ハイブリッド材料技術（ナノレベル構造制御による相反機能材料技術）と定義し、①超ハイブリッド材料創製技術開発当該技術、②相反機能発現基盤技術開発、③相反機能材料創製プロセス基盤技術開発、④材料設計に資する統合評価・支援技術開発を実施する。（図1）

◎事業の目標

有機材料の長所と無機材料の長所を兼ね備えた超ハイブリッド材料の創製

超ハイブリッド材料を支えるトレードオフを解消する基盤技術の開発

- 機能発現技術
- プロセス基盤技術
- 評価支援技術

◎超ハイブリッド材料技術

（ナノレベル構造制御による相反機能材料技術）を

『単なるハイブリッド化ではなく、従来材料では成し得なかったトレードオフ（相反機能）をナノレベルでの界面・分散・構造制御で解消し、相反機能を合目的的に制御・実現することができる技術あるいはそれに資する技術』

と定義

図1 事業の目標と超ハイブリッド材料技術の定義

以下、最終目標（平成23年度末）の概要を記載する。

研究開発項目① 超ハイブリッド材料創製技術開発

研究開発項目②相反機能発現基盤技術開発、研究開発項目③相反機能材料創製プロセス基盤技術開発、研究開発項目④材料設計に資する統合評価・支援技術開発の成果をもとに、具体的ないくつかの部材について従来材料では実現できなかったトレードオフを解消するとともに、市場評価が可能な成果物を供試し、市場（ユーザー）から、客観的実用化研究課題を抽出する。また、単なる相反機能の解消ではなく、相反機能を制御・実現する技術を開発する。

研究開発項目② 相反機能発現基盤技術開発

従来材料では実現できなかったトレードオフを解消するため、相反機能発現に必要な

な界面制御、分散、配向制御等の基盤技術を開発・確立する。

研究開発項目③ 相反機能材料創製プロセス基盤技術開発

官能基導入ナノ粒子等の高効率合成プロセス及び均一分散・配向・配列プロセス基盤技術を開発し、これらプロセスが連動した相反機能材料創製プロセス基盤技術を開発・確立する。

研究開発項目④ 材料設計に資する統合評価・支援技術開発

相反機能を発現する、材料・部材の基本構造の特性解析及び設計に関する統合評価・支援技術を開発・確立する。

図2は4つの研究開発の関係を示したものである。超ハイブリッド材料を創製する研究開発項目①を、3つの研究開発項目からなる基盤技術が支える形となっている。



図2 4つの研究開発項目

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容及び全体スケジュールと予算

2.1.1 研究開発の内容

研究開発項目ごとに記載する。

研究開発項目① 超ハイブリッド材料創製技術開発

・研究開発の必要性

急速に進展する情報家電、自動車産業等の高度な要求を満たすパワーデバイス材料、耐熱材料、高度情報通信に不可欠な光学材料等でトレードオフ、すなわち、相反機能(既存材料では同時に発現させるのが困難で、材料特性上その機能が相反する複合機

能を言う。例えば絶縁性と熱伝導性など）を有する材料等が求められている。

高分子、金属、セラミックス等の個別の材料では、新素材の開発が期待される一方で、様々な観点から、この要求を満足させることは困難になりつつある。例えば、新たに複合材料を創製する場合でも、既存の手法である剪断力による混練等の手法では限界があり、目標とする性能を達成すること、すなわちトレードオフを解消することは困難である。

そこで、新素材の開発を標榜するのではなく、ナノテクノロジーを活用しナノメートルサイズでも精密な分子設計（構造制御）を行い、既存材料の複合化を分子レベルで制御することにより、トレードオフの解消を図る。

・ 研究開発の具体的内容

（１）達成手法の選択・提案・実施

研究開発項目④の「材料設計に資する統合評価・支援技術開発」を活用し、効率的に材料設計と評価を実施するとともに、研究開発項目②の「相反機能発現基盤技術開発」、研究開発項目③の「相反機能創成プロセス基盤技術開発」の成果を活用し、相反機能材料を創成、すなわち超ハイブリッド材料創製に資する要素技術を開発する。

開発材料の使用環境も考慮した機能評価手法を提案するため、上記研究開発項目②、③、④から最適な達成手段を選択し、あるいは新規に提案し、機能評価結果を材料設計に反映させるとともに目標値を達成する。

（２）市場評価可能とする成果物の供試

（１）の目標達成を客観的に判断できるように、市場評価を受けて実用化するための課題を客観的に抽出するために、市場評価が可能な条件（形態・数量）を明らかにし、成果物を供試する。

・ 達成目標

（１）機能合目的的達成手法の提案

以下の（Ⅰ）～（Ⅲ）に示す分野の部材について、下記の最終目標値を達成する一手法以上を提案すること。ただし、単に目標値を達成するものではなく、相反機能を合目的的に実現する手法であること。

（Ⅰ）電気・電子材料分野

[1]パワーデバイス周辺材料（モーター、自動車電装品）

熱伝導率 ≥ 40 W/mK、耐熱性 ≥ 400 °C、絶縁破壊電圧 ≥ 50 kV/mm、易成型性であること。

【設定理由】

熱伝導率については、アルミナ相当値でデバイス構造によらずセラミック代替可能な目標数値。耐熱性については電力分野での SiC デバイス使用可能温度(400°C)以上。絶縁破壊電圧についてはインバータの高電圧化に対応した余裕のある値に設定。

図3は体積抵抗率と熱伝導率との関係を示す。目標は従来ハイブリッド材料の値から、並外れて高く、不連続な技術革新が必要であることが判る。

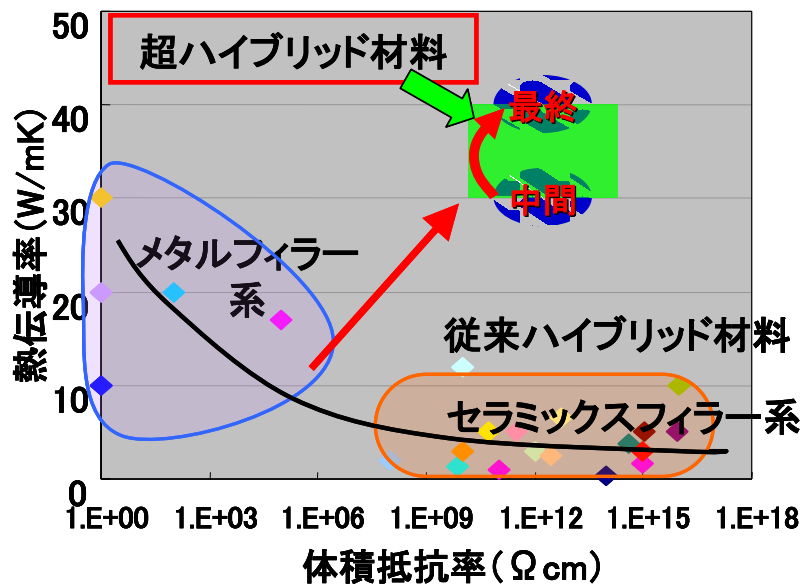


図3 体積抵抗率と熱伝導率との関係

[2]IC パッケージ周辺材料（熱伝導材料、封止材）

〈非絶縁タイプ〉熱伝導率 ≥ 60 W/mK

接着強度（熱サイクル 1000 回後） ≥ 1 MPa（at 260°C）

【設定理由】

熱伝導率については電気絶縁性が不要であることを前提にハイリスクではあるが、到達可能レベルとして設定。接着強度は接着剤として必要不可欠な強度として設定。

〈絶縁タイプ〉熱伝導率 ≥ 15 W/mK、体積抵抗率 $\geq 10^{11}$ $\Omega \cdot \text{cm}$ （at 150°C）、

接着強度（熱サイクル 1000 回後） ≥ 1 MPa（at 260°C）

【設定理由】

熱伝導率については数年先の市場要求値を上回る数値を設定。体積抵抗率、接着強度は本用途で必要不可欠な数値として設定。

[3]高放熱性材料

熱抵抗値 ≤ 0.01 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$ （厚さ 10–100 μm ）、硬化前粘度 ≤ 100 Pa \cdot s

【設定理由】

熱伝導性充填材を配合したポリシロキサン系放熱材料の熱抵抗値は $0.08 \sim 0.15$ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$ であるが、数年後には $0.02 \sim 0.05$ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$ の値が要求されることを予想して設定。ポリシロキサンの成形加工性を考慮し、硬化前粘度を設定。

[4]高耐熱材料

貯蔵弾性率の低下率（室温と 300℃での値の比較） $\leq 10\%$ 、
熱膨張係数 $\leq 1.5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 、硬化前粘度 $\leq 100 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

【設定理由】

シロキサン系材料は一般に耐熱性は高いが、組成を最適化することにより、300℃での弾性率低下をかなり抑制できると考え、上記の貯蔵弾性率の低下率の目標値を設定。熱膨張係数については、充填材を含まないポリシロキサンの値が $15\sim 25 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ であるが、有機系ハイブリッド材料の値が $1.0\sim 2.0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ であることから、競合材料となり得るために必要な値として設定。ポリシロキサンの成形加工性を考慮し、硬化前粘度を設定。

(II) 光学材料分野

[1]低屈折率材料（機能性光学薄膜、ディスプレイ基板、光導波路）

屈折率 ≤ 1.4 、鉛筆硬度（JIS K5600） $\geq 4\text{H}$ 、全光線透過率 $\geq 90\%$ 、
易成形性 MFR（メルトフローレイト JIS K7210） $\geq 30\text{g}/10\text{min}$

【設定理由】

屈折率については反射防止フィルム用途を想定して設定。鉛筆硬度については光学レンズとして実用レベルの値。全光線透過率については光学ガラスと同等レベルの値。易成形性については現行樹脂成形条件を設定。

[2]高屈折率材料（機能性光学薄膜、ディスプレイ基板、レンズ）

屈折率 ≥ 1.7 、鉛筆硬度（JIS K5600） $\geq 3\text{H}$ 、全光線透過率 $\geq 90\%$ 、
易成形性 MFR（メルトフローレイト JIS K7210） $\geq 10\text{g}/10\text{min}$

【設定理由】

屈折率については現行樹脂材料では未達成レベルを設定（高屈折率粒子が 60 wt%以上で分散が可能となった場合の屈折率を想定）。鉛筆硬度については光学レンズとして実用レベルの値。全光線透過率については光学ガラスと同等レベルの値。易成形性については現行樹脂成形条件を設定。

図 4 に光学材料の目標最終を示した。汎用の光学樹脂材料の屈折率は 1.45～1.6 弱程度である。低屈折率化の方法としてフッ素化の手法があり、現状 1.32 レベルの材料が商品化されているが、成形法がスピコートと限定されている。したがって、低屈折率と成形性がトレードオフの関係になる。高屈折率化の方法としてイオウの導入や高屈折率ナノ粒子の分散がある。イオウの導入で高屈折率化は可能であるが、黄色に着色するため透過率が低下する。高屈折率ナノ粒子分散の手法でも従来の方法では、凝集が起これ、光散乱が発生し透過率が低下する。即ち、高屈折率と透過率がトレードオフになる。最終目標はこれらのトレードオフを解消するものである。

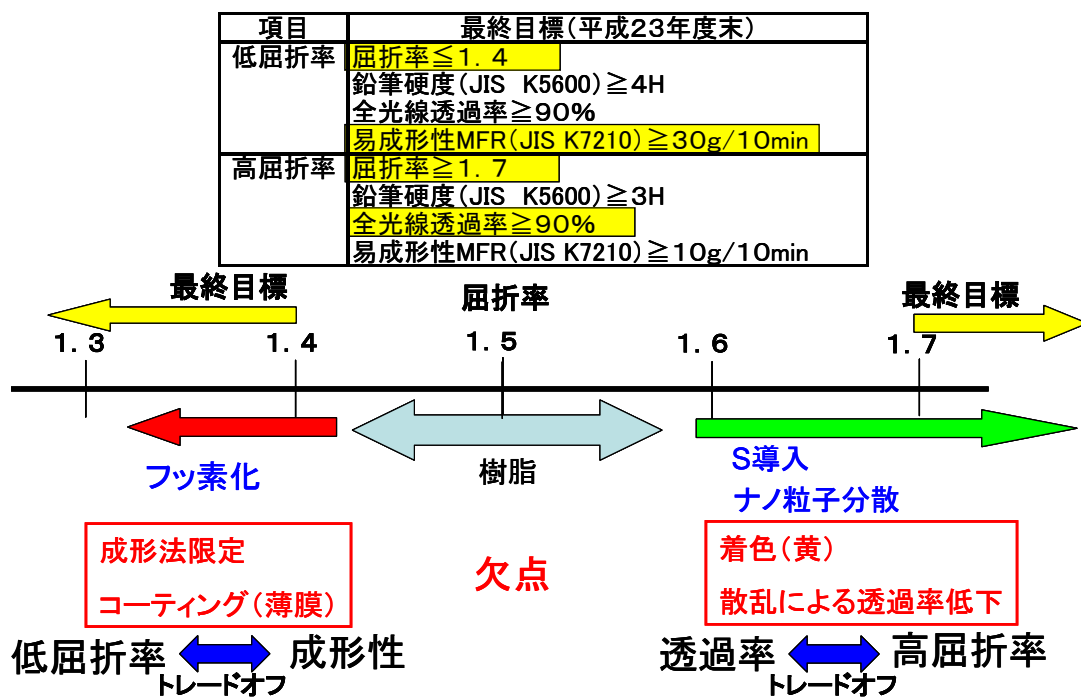


図4 光学材料の最終目標

(Ⅲ) その他工業材料分野

[1]放熱性材料(液晶画面用 LED 放熱用、燃料電池車・ロボット駆動部放熱用)

熱伝導率 $\geq 40 \text{ W/mK}$ 、成形粘度 $\leq 100 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、耐衝撃性 $\geq 24 \text{ J/m}$ 、

比重 ≤ 2.5 、体積抵抗率 $\geq 10^{12} \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$

【設定理由】

アルミナ程度の熱伝導率目標を設定。成形粘度に関しては射出成形が可能であることを目標に設定。耐衝撃性については、表面処理技術の高度化による高分散性になると考え、エポキシ樹脂と同等の値を設定。比重については、アルミニウム(比重:2.7)と比較して考え2.5以下を設定。体積抵抗率についてはエポキシ樹脂など通常の電気絶縁性プラスチックの値を目標値とした。

(2) 市場評価可能とする成果物の供試

(1)の目標達成を客観的に判断できるように、市場評価が可能な条件(形態・数量)を明らかにし、成果物を供試する。市場評価を受けて、実用化するための課題を客観的に抽出する。

図5、図6は研究開発項目①の最終目標を簡単にまとめたものである。

①超ハイブリッド材料創製技術開発

(1)機能合目的的達成手法の提案

高熱伝導・高耐熱材料

		両立すべき相反機能	その他の目標値	最終目標の設定理由
電気電子材料分野				
パワーデバイス 周辺材料 JCH		熱伝導率 ↔ 絶縁破壊電圧 (加工性)	耐熱性 易成形性	熱伝導率:アルミナ相当値で、セラミック代替可能な数値。 耐熱性:SiCデバイス使用可能温度以上。 絶縁破壊電圧:インバータ高電圧化に対応した余裕ある数値。
ICパッケージ 周辺材料 JCH	封止材	熱伝導率 ↔ 密着強度 (成形性)	体積抵抗率	熱伝導率:数年先の市場要求値を上回る数値。 密着強度/体積抵抗率:本用途で必要不可欠な数値。
	接着剤	熱伝導率 ↔ 密着強度 (成形性)	—	熱伝導率:電気絶縁性が不要であることを前提に到達可能レベルとして設定。 密着強度:接着剤として必要不可欠な強度。
高放熱材料 東レ・ダウ		熱抵抗率 ↔ 低粘度 (加工性)	—	熱抵抗率/粘度:ポリシロキサン系放熱材料を想定し、将来の要求値。
高耐熱材料 東レ・ダウ		低熱膨張係数 ↔ 低粘度 (加工性)	貯蔵弾性率 低下率	高耐熱性を有するポリシロキサン系を前提として 低膨張係数:有機系ハイブリッド材料と競合できる数値。 貯蔵弾性率低下率:ポリシロキサンの特長示す数値。
その他の工業材料分野				
放熱性材料 三菱		高熱伝導 ↔ 粘度 (加工性)	比重 耐衝撃性 体積抵抗率	熱伝導率:アルミナ同程度の値として設定。 粘度:射出成形が可能な数値。 比重:アルミニウム(比重2.7)以下を設定。 耐衝撃性/体積抵抗率:エポキシ樹脂など通常の絶縁性樹脂程度の値を設定。

図5 研究開発項目①の最終目標1

①超ハイブリッド材料創製技術開発

光学材料 (高・低屈折率)

		両立すべき相反機能	その他の目標値	最終目標の設定理由
光学材料				
低屈折率材料 JCH		低屈折率 ↔ 全光線透過率 (透明性)	鉛筆硬度 易成形性	屈折率:樹脂だけでは達成不可能な数値。 透明性/鉛筆硬度/易成形性:反射防止フィルム想定値。
高屈折率材料 JCH		高屈折率 ↔ 全光線透過率 (透明性)	鉛筆硬度 易成形性	屈折率:樹脂だけでは達成不可能な数値。 透明性/鉛筆硬度/易成形性:反射防止フィルム及び光学レンズ想定値。

(2)市場評価可能とする成果物の供試

市場の評価を受けて、実用化するための課題を客観的に抽出する

図6 研究開発項目①の最終目標2

研究開発項目② 相反機能発現基盤技術開発

・研究開発の必要性

ナノメートルサイズにおける精密な分子設計（構造制御）の進歩により、既存材料の複合化を分子レベルで制御すれば、材料特性が向上する可能性が示されてきた。各材料の特性を重ね合わせただけの従来型複合材料を超えた新たな機能創出を図るためには、分子レベルで表面修飾や界面制御等を行うことが必要であり、ナノレベルでの精密な材料設計、材料構造制御の手法の開発が強く求められている。

・研究開発の具体的内容

（１）有機・無機材料界面の制御技術

電気・熱伝導等を発現させつつ無機ナノ粒子等表面に有機官能基を結合させる機構の解明とそれに関する基盤技術、並びに有機材料と無機材料の界面での相互作用等を制御する機構の解明とそれに基づく界面制御技術を開発する。

（２）ナノ空間制御技術

層間化合物・空孔化合物・デンドリマー等をナノ形成単位とし、これらを有機マトリックスとし、サイズ・形状・配列等が制御されたナノ中空構造材料とするなどにより、相反機能を実現するナノ空間制御技術を開発する。

（３）ナノ構造制御技術

外場付与・自己組織化等により、無機ナノ粒子等の有機マトリックス中での分散・配向・配列等を制御することにより相反機能を発現させる無機材料を主とした基盤技術を開発する。

（４）ナノ空間・構造制御手法最適化技術

ナノ空間・構造が合成過程でどのように形成されているかを *in-situ* に解析し、（１）、（２）、（３）の機構解明の成果を援用も得つつ、また研究開発項目④の総合評価・支援技術と共同し、相反機能を発現する制御手法最適化技術を確立する。

・達成目標

研究開発項目①「超ハイブリッド材料創製技術開発」の最終目標を達成する相反機能の発現機構を明らかにし、それに基づき相反機能発現材料のナノ空間・構造制御手法を確立する。

研究開発項目③ 相反機能材料創製プロセス基盤技術開発

・研究開発の必要性

開発された材料を、用途に応じた部材として利用するためには、その構造、機能、形状等を制御するとともに、生産量・コスト面でユーザ等からの要望に応えることが求められている。このため、実用化段階で予測される超ハイブリッド材料への多様な用途、機能等のニーズに対応して、各種の相反機能材料を創成できるプロセス技術の確立が必要である。

・研究開発の内容

超ハイブリッド材料の分子レベルの構造制御により相反機能を発現する材料創製プロセスを開発する。プロセスの高度・精密制御を可能にするため、プロセスと一体になった *in-situ* 測定技術、プロセス設計技術を併せて開発する。

(1) 官能基導入無機ナノ粒子等合成プロセス技術

i) 粒子等表面に有機官能基を大量、高速に導入する技術

高分子中への高濃度、完全分散を目的とし、マイクロ・ナノメートルサイズの粒子等の表面に、有機官能基を大量、高速、経済性良く導入する基盤技術を確立する。

ii) 有機官能基を導入したナノ粒子等の *in-situ* 合成技術

上記 i) の知見に基づき、目的とするナノ粒子等を合成しつつ、*in-situ* で単一粒子表面に目的の有機官能基を導入する基盤技術を確立する。

iii) 有機修飾ナノ粒子等の大量、高速、精密合成技術

上記 i)、ii) の有機無機修飾に関する知見に加え、反応場の相の状態や反応の進行の *in-situ* 測定を行い、また (3) のプロセス最適化技術の知見に基づいて、粒子径分布を精密に制御しつつ、大量、高速に合成するプロセスを開発する。

(2) 高分子中ナノ粒子等均一分散・配向・配列プロセス技術

表面修飾ナノ粒子等を高分子中に均一に分散させ、配向・配列を制御するプロセス技術を開発する。精密外場制御、基板相互作用制御等による高分子の相分離・配向構造の動的変化過程、さらにはその結果生じるナノ粒子等と高分子間の相互作用の制御を行うことで、高分子中のナノ粒子等の分散・配向・配列性制御基盤を構築するとともに高分子中ナノ粒子等均一分散・配向・配列プロセスを開発する。

(3) プロセス最適化技術

表面修飾ナノ粒子等の合成プロセス、高分子中のナノ粒子等の配向・配列プロセスを *in-situ* に解析し、研究開発項目④の統合評価・支援技術と共同し、表面修飾ナノ粒子等の合成プロセス、均一分散・配向・配列プロセスを開発する。

・達成目標

研究開発項目①「超ハイブリッド材料創製技術開発」の最終目標を達成する相反機能の発現する材料を合成するプロセスを確立する。

研究開発項目④ 材料設計に資する統合評価・支援技術開発

・研究開発の必要性

相反機能発現から相反機能創成プロセスにわたっては、表面、界面をナノレベルで制御する必要があるが、表面、界面の構造・状態をナノレベルで解析するのは計測手段の原理の物理的限界を超える場合が多いため一般的には困難と考えられてきた。したがって、現状市販レベルの計測解析手法だけでは相反機能材料の設計に必要な情報が不足するのは明らかである。

近年、従来は不可能だった特異な現象のナノレベル計測や、ナノレベルあるいはそれ以下のサイズの状態を推定できる解析手法が開発され、これら技術を相反機能材料の解析評価に適応させることで、分子レベルでの解析手法が開発され、これら技術を相反機能材料の解析評価に適応させることで、分子レベルでの構造制御等の技術開発を効果的に推進することが可能になった。これらを積極的に応用し、相反機能材料の構造・状態に関する情報量を飛躍的に増加させることは材料開発にとって必要不可欠である。

また、相反機能材料設計を効率的に進めるには、前述の高度計測結果とともに、研究開発項目①における機能評価や研究開発項目②、③における現場モニタリング等の各階層における結果を情報科学的に収集、分類、統合し、機能発現に関わる経験則などを新しい知識体系として取り出し、材料設計にフィードバックするという一連の取り組みを材料に応じて柔軟に実施できることが不可欠である。

・研究開発内容

一企業又は団体では開発や保有維持が困難な先端分析手法を活用し、市販の装置に頼るのみでは計測が困難である相反機能材料の局所構造及び状態を高度計測する。ナノレベル空間分解能を達成するためには、実際の計測手段だけでなく、計算機による画像復元技術も活用する。相反機能材料では原子・分子の配列や欠陥から界面・表面の状態までの多階層のスケールでの現象が機能発現に密接に関係するため、測定対象とのインタフェース部分を高度化・最適化するとともに現象のスケールに適合した手法を駆使し、多元的な情報を収集する。多変量解析等の情報解析技術を着目する材料機能に絞って活用し、上記の計測解析結果、さらに研究開発項目①における機能評価や研究開発項目②、③における現場モニタリング等の各階層における情報を収集、分類、統合し、相反機能発現の鍵となる因子を探索する。成果を研究開発項目①～③の技術開発チームにフィードバックし、相反機能材料の設計に反映させる。

・達成目標

相反機能材料の表面・界面、バルク・深さ方向の構造及び状態をナノレベルまでの分解能で複合的・多元的に解明できる計測手法を構築する。得られた計測結果に開発部材の機能評価、相反機能発現・相反機能材料創製過程における評価から得られる分解能、雰囲気などが異なる階層的なデータを統合、情報科学的に処理し、機能発現に関わる経験則などの新しい知識体系として取り出すための手法を開発する。得られた結果を超ハイブリッド材料の設計に反映させる。

図7は研究開発項目①の最終目標を簡単にまとめたものである。

②相反機能発現基盤技術開発
③相反機能材料創製プロセス基盤技術開発
④材料設計に資する統合評価・支援技術開発

	最終目標	最終目標の設定理由
研究開発項目②		
相反機能発現基盤技術開発 JCII 三菱	相反機能の発現機構を明らかにし、相反機能発現材料のナノ空間・構造制御手法を確立する。	材料特性を飛躍的に向上させる超ハイブリッド材料創製のためには、ナノレベルでの精密な材料設計、材料構造制御の手法の開発が強く求められているため。
研究開発項目③		
相反機能材料創製プロセス基盤技術開発 JCII 三菱 東レ・ダウ	相反機能材料を合成するプロセスを確立する。	超ハイブリッド材料の活用のためには、生産量・コスト面でユーザ等の要望に応えることが求められており、プロセス技術の確立が必要である。
研究開発項目④		
材料設計に資する統合評価・支援技術開発 JCII 三菱	相反機能材料の計測・解析技術を構築する。計測・解析により相反機能材料の開発を支援する。	超ハイブリッド材料の構造・状態に関する情報をナノレベル計測・解析することが強く求められており、その結果を材料設計にフィードバックすることにより材料開発が効率的に推進される。

図7 研究開発項目②③④の最終目標

2.1.2 全体スケジュールと予算

2.1.2.1 全体スケジュール

図8に研究開発項目毎の全体スケジュールを示す。平成19年度は経済産業省による直執行事業、平成20～23年度はNEDO事業である。

研究開発項目	H19	H20	H21	H22	H23
①超ハイブリッド材料技術 電気・電子材料 光学材料 工業材料	基本検討・原理試作・評価		試作評価・実用化課題抽出		
②相反機能発現基盤技術 界面制御・ナノ空間制御 構造制御・最適化技術	発現手法検討・手法提供		ナノ空間・構造制御技術確立 発現機構解明		
③プロセス基盤技術 官能基導入ナノ粒子合成 均一分散・配列・配向 プロセス最適化	ナノ粒子流通式合成・技術・供試物提供		流通式大量合成		
	分散・配列・配向予備検討		分散・配列・配向技術開発		
	流通式装置導入・検討		スケールアップ・可視化技術 大量合成装置設計技術確立		
④統合評価・支援技術	概念設計 環境整備	データ収集・選定指針 統計処理アルゴリズム開発	統合プログラム 開発	設計支援 データ解析	
	課題抽出	高度化	系統的なデータ収集と解析		

* H19年度は経済産業省直執行

図8 全体スケジュール

2.1.2.2 予算

表1、図9に予算を示す。平成19～23年度の5年間で総事業費は32億円である。うちNEDO事業は平成20～23年度の4年間であり、NEDO事業費としては24億円である。

表1 開発予算

研究開発項目	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	総事業費	NEDO事業費
①材料創製技術開発	353	319	187	207	255	1321	968
②機能発現技術開発	159	109	115	58	123	565	406
③プロセス基盤技術開発	155	208	258	105	234	961	806
④統合・支援技術開発	133	81	69	49	58	391	258
合計	800	717	629	420	671	3237	2437

* 平成19年度は経済産業省直執行

**各数字を四捨五入しているため、数値合計がずれているものもある

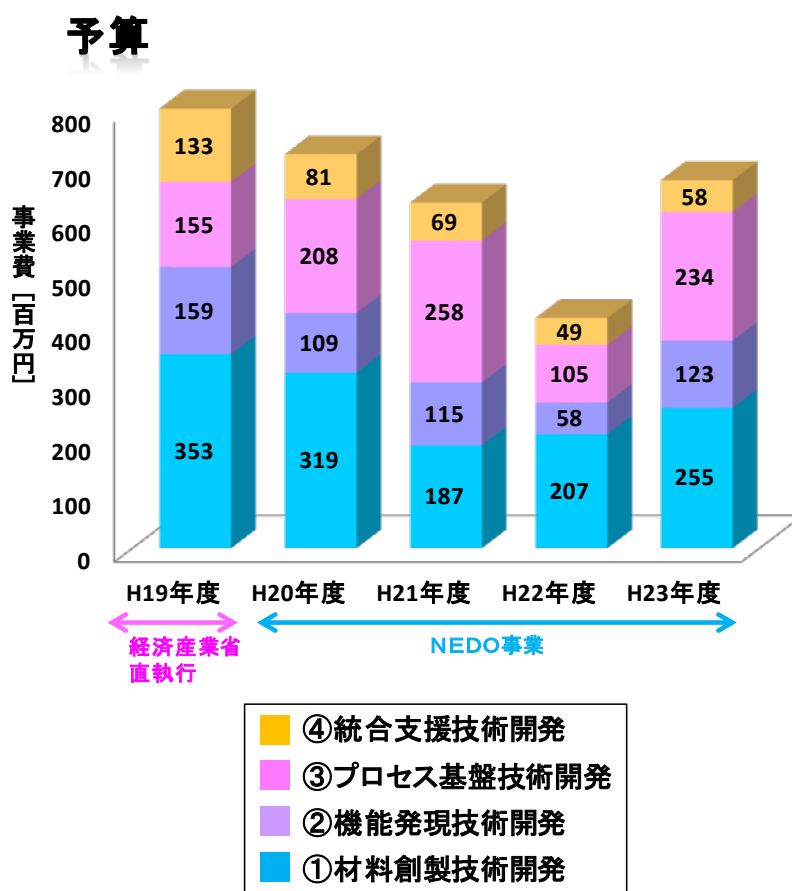


図9 開発予算

2.2 研究開発の実施体制

本プロジェクトの目的を達成するため、国立大学法人 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構、(兼) 多元物質科学研究所 教授 阿尻雅文をプロジェクトリーダーとして、以下の実施体制とする。(図 10)

(一財) 化学研究評価機構 (以下 JCII と略記する。)・(独) 産業技術総合研究所 (以下 産総研と略記する。) グループ、三菱化学 (株) グループ、東レ・ダウコーニング (株) グループの 3 グループで競争原理のもと研究開発を推進する。

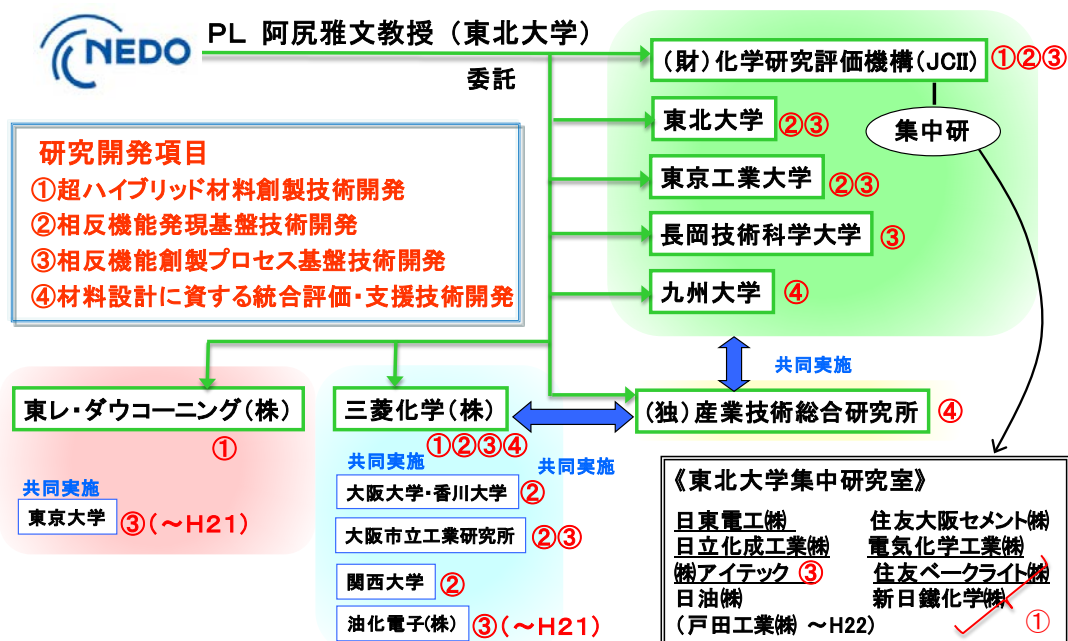


図 10 超ハイブリッド材料技術開発実施体制

研究開発項目①超ハイブリッド材料創製技術開発における開発材料は、「高熱伝導・高耐熱材料」「光学材料」の 2 つに大きく分けられるが、この視点からまとめた研究開発の体制を図 11 に示す。



図 11 開発材料別の研究開発体制

いずれにおいても、①超ハイブリッド材料創製技術開発を企業（JCII 集中研参画企業、三菱化学、東レ・ダウコーニング）が、②相反機能発現基盤技術開発、③相反機能発現プロセス基盤技術開発については大学が、④材料設計に資する統合評価・支援技術開発は産総研が中心となり進める、産学連携体制となっている。また、各企業は、それぞれのユーザにあたる企業とは定期的に情報交換を実施している。

以下に研究開発項目ごとの個々のテーマと担当を記載する。

研究開発項目① 超ハイブリッド材料創製技術開発 7テーマ 1法人 9社

(I) 電気・電子材料分野

[1]パワーデバイス周辺材料

【JCII（日東電工(株)・日立化成工業(株)・電気化学工業(株)】

[2]IC パッケージ周辺材料

【JCII（住友ベークライト(株)】

[3]高放熱性材料

【東レ・ダウコーニング(株)】

[4]高耐熱材料

【東レ・ダウコーニング(株)】

(II) 光学材料分野

[1]低屈折率材料

【JCII（日油(株)】

[2]高屈折率材料

【JCII（日油(株)・新日鐵化学(株)・住友大阪セメント(株)】

(III) その他工業材料分野

[1]放熱性材料

【三菱化学(株)】

研究開発項目② 相反機能発現基盤技術開発 4テーマ 4大学 1法人 1社

・有機・無機材料界面の制御技術

【東北大学】

・ナノ空間制御技術開発

【東北大学】

・ナノ構造制御技術

【東北大学・東京工業大学】

・ナノ空間・構造制御手法最適化技術

【東北大学・東京工業大学】

・有機・無機材料界面の制御技術

・ナノ空間制御技術開発

・ナノ構造制御技術

・ナノ空間・構造制御手法最適化技術

【三菱化学(株)・(香川大学・
関西大学・大阪市立工業研究所)】

研究開発項目③ 相反機能材料創製プロセス基盤技術開発 3テーマ 4大学 2法人 5社

・官能基導入ナノ粒子合成プロセス技術

・高分子中ナノ粒子等均一分散・配向・配列プロセス技術開発

・プロセス最適化技術

【東北大学・東京工業大学・長岡技術科学大学・

JCII（(株)アイテック・(株)戸田工業)】

【東レ・ダウコーニング(株)（東京大学)】

- 研究開発項目④材料設計に資する統合評価・支援技術開発 2テーマ 1大学 1法人 1社
- ・材料設計に資する統合評価・支援技術開発 【産総研・九州大学】
 - ・超ハイブリッド材料における熱物性計測法の開発 【三菱化学㈱・産総研】

2.3 研究の運営管理

研究開発全体の管理・執行に決定権を有する NEDO は、経済産業省及び研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、本プロジェクトの目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施した。また、必要に応じて、外部有識者の意見を運営管理に反映させた。

2.3.1 プロジェクトリーダー

NEDO が実施・管理を行う当該プロジェクトの、より効率的な開発の推進を図るため、研究開発の現場において指示、指導、調整の任にあたり、研究開発計画原案の策定、研究成果のとりまとめ等の役割をプロジェクトリーダー（PL）として国立大学法人 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構、(兼) 多元物質科学研究所 教授 阿尻雅文のもと、本プロジェクトを推進した。PL の役割を表 2、図 12 に示す。

表 2 プロジェクトリーダー（PL）の役割

組織関係	<ul style="list-style-type: none"> ・研究体の研究室の設置、廃止等の組織構成の決定 ・研究体のサブリーダーの選任と解任
研究体所属研究者関係	<ul style="list-style-type: none"> ・大学、産総研、企業が提出する研究者候補リストの中からの研究体所属研究者の選任 ・研究体所属研究者の任期の設定および変更に関する調整 ・研究体所属研究者の担当研究項目の決定 ・その他研究体所属研究者の総合的な統括
予算、研究場所、研究設備および装置等	<ul style="list-style-type: none"> ・実施時における予算の配分の調整 ・研究体の活動に割り当てられた研究場所の配分、模様替え等の調整 ・研究設備および装置等の使用範囲等の調整
研究計画および報告	<ul style="list-style-type: none"> ・年度毎の概算要求案（年間研究計画書案、実施計画書案の策定） ・研究計画の変更（実施計画書変更申請案の策定） ・軽微な研究計画の変更（実施計画書変更届出書の策定） ・研究経過の報告（成果報告書案、その他必要に応じた研究報告書案の策定） ・研究終了報告（研究終了報告書案の策定）

研究評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ 研究内容の研究体内での評価 ・ 研究者の研究体内での評価
研究成果	<ul style="list-style-type: none"> ・ 別途定める研究体知的財産権取扱規程の施行およびその遵守に関する指導管理 ・ 論文発表等による公開を、知的所有権による保護に優先させるか否かの判断
第三者との共同研究、研究者等の招聘	<ul style="list-style-type: none"> ・ 第三者との共同研究の実施と管理（①共同研究および共同研究契約に対する要望事項の取り纏め、②共同研究契約書案の策定、③各種報告書案の策定） ・ 外部研究者（産総研、大学、企業等）の調整および選任
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・ 研究体の研究活動推進のための総合調整 ・ 経済産業省、NEDO、大学、企業に置かれた各種関係会議への対応、総括 ・ ワークショップ、シンポジウム等、事業計画の策定および実施

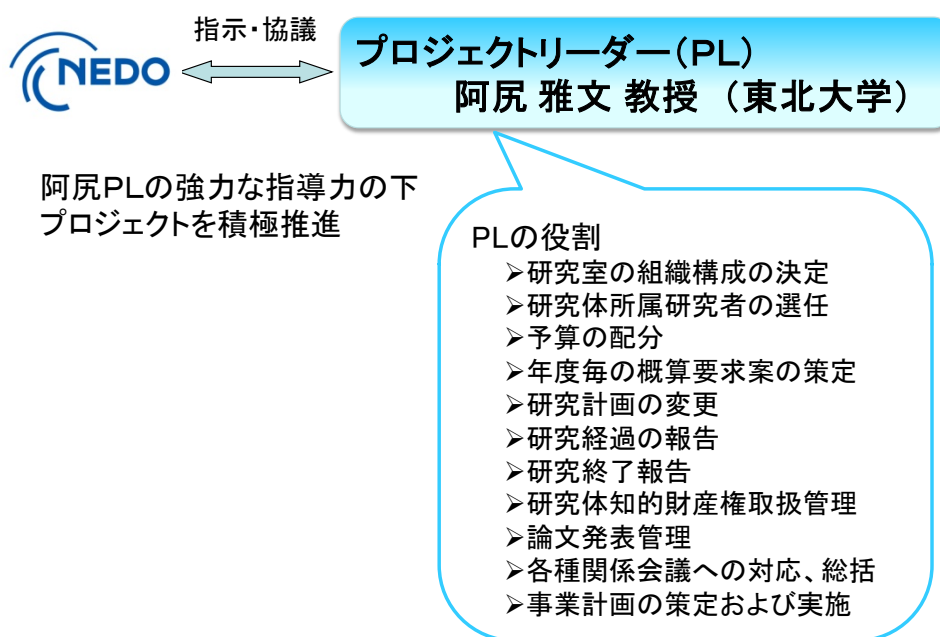


図12 PLの役割

2.3.2 技術推進委員会

技術推進委員会は平成20年度に開催され、その開催内容を下記に示した。

第一回技術推進委員会

- ・評価の実施時期：平成20年12月25日
- ・評価手法：外部有識者による評価（表3）
- ・評価事務局：NEDO ナノテクノロジー・材料技術開発部
- ・評価項目・基準：評価項目を以下に示す。
 - 1) マイルストーンについて
 - 2) 研究開発成果について
 - 3) 実用化の見通し

表3 第一回技術推進委員会外部有識者委員

	氏名（敬称略）	所属・役職
委員	西 敏夫	東北大学 教授
委員	菅原 義之	早稲田大学 教授
委員	住田 雅夫	東京工業大学 教授
委員	高原 淳	九州大学 教授

（敬称略・順不同）

2.3.3 プロジェクト内の委員会等

阿尻PLとNEDOとで各グループの定期打合せに参加し、進捗状況のフォロー及び方針指導及び技術指導を行った。

①JCII・産総研グループ

定例会議…43回、プロセス検討会…15回

総合調査研究委員会…10回、材料評価委員会…5回

プロジェクトでの包括的な研究内容に関する討議とその進捗状況の把握、問題点の検討を目的に、総合調査研究委員会、評価分科会を実施した（表4）。総合調査研究委員外部有識者名簿を表5に示した。総合調査委員会は、研究進捗状況と成果について把握すると共に、次年度における研究実施計画等を検討する会、評価分科会はユーザ企業等に参加いただくもので、開発した材料へのアドバイス・評価解析を行う会である。

表4 総合調査研究委員会・評価分科会開催日

会議名称	開催日	総回数
総合調査研究委員会	H19/11/09, H20/03/12, H20/09/16, H21/03/09, H21/10/06, H22/03/11, H22/10/08, H23/03/01, H23/09/20, H24/02/27	10回
評価分科会	H19/12/11, H20/06/09, H21/03/09, H23/09/20, H24/02/27	5回

表5 総合調査研究委員会 委員名簿（平成24年2月27日現在）

委員	氏名	所属・役職名 等
委員	岡本 佳男	名古屋大学 エコトピア科学研究所 客員教授
委員	木村 恒久	京都大学 大学院農学研究科 森林科学専攻 教授
委員	横川 弘	パナソニック株式会社 材料技術開発部 光機能材料 開発グループ グループL
委員	岡本 徹志	東芝電力システム社 電力・社会システム技術開発セン ター 開発主担
委員	杉浦 昭夫	株式会社デンソー 材料技術部 第5材料技術室 主幹
委員	村上 亮	日産自動車株式会社 材料技術部 パワートレイン材 料開発グループ 主担
委員	三上 佳朗	株式会社日立製作所 日立研究所 電子材料研究部 部長

②三菱化学グループ

定例会議…14回、PL技術指導会…11回、研究報告会…5回

③東レ・ダウコーニンググループ

定例会議…48回、PL技術指導会…4回、研究報告会…4回

・阿尻PLの個別指導等

阿尻PLとNEDOで以下の技術指導、情報交換を行った。

- ▶ 三菱化学グループへの研究方針指導、加工性（相反機能）発現の共通基盤情報交換…11回
- ▶ 東レ・ダウコーニンググループへの共通基盤としての超臨界技術の指導…4回

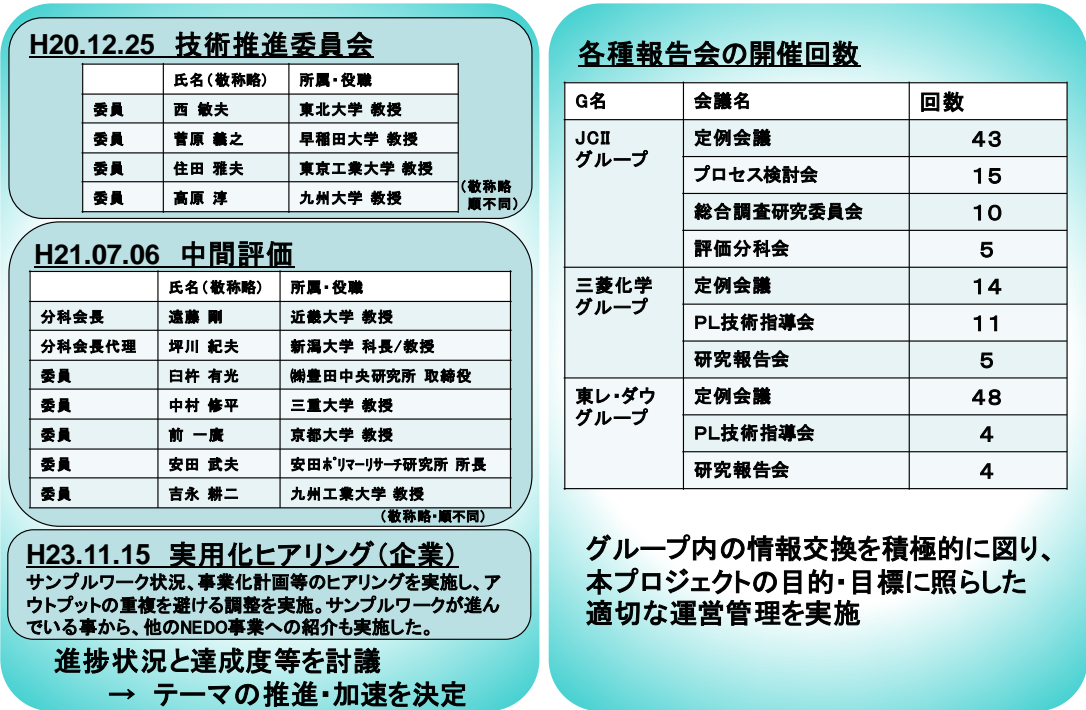


図13 プロジェクトの運営管理

2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

研究開発に関するマネジメントとしては、下記を実施した。

- ・異なる強みを持つ3グループ体制を構築した。
JCII・産総研グループ、三菱化学(株)・産総研グループ、東レ・ダウコーニング(株)グループ。
- ・材料開発(企業)と基盤技術(大学・産総研)の産学連携体制を構築した。
- ・市場の評価を受けて、実用化するための課題を抽出するため、基本計画に「市場評価可能とする成果物の供試」を設定した。
- ・JCIIグループに集中研を設置した。
複数企業が同目標に向かって材料開発を実施するため、企業間の調整及び企業-大学等間密接な連携が必要であったためである。

運営に関するマネジメントとしては、下記を実施した。

- ・3グループの進捗確認と必要に応じた対応をPLと協力して実施した。
- ・JCII集中研において、開発ステージに応じた集中研での開発と参画企業での開発の使い分けをすることとした。集中研では基礎的開発、参画企業では最終配合検討やユーザ供試用サンプル作製を実施することとした。
- ・東北大-JCII集中研間の密接な連携を促進し、東北大学のキー技術である超臨界水熱合成装置を活用した表面修飾粒子の供給を実施させた。具体的には、綿密な調整の実施や企業個別対応の供給体制により、材料開発を促進させた。

知的財産に関するマネジメントとしては、下記を実施した。

- ・開発した材料に関する知的財産は企業に帰属することを明確にし、企業の知的財産の保護と事業化の促進を行った。
- ・事業戦略上秘匿した方がよいと思われるノウハウは知的財産化しないこととした。

実用化の促進に関するマネジメントとしては、下記を実施した。

- ・平成23年11月15日に企業個別ヒアリングを実施し、初期のアウトプットの重複を避ける調整を実施した。それにより開発の効率化がなされた。
- ・目覚ましい技術的成果が期待できる案件に関する追加配分や震災復興のための追加配分を実施した。具体的には、超臨界水熱合成システムの実用化に向けた追加配分と被災した装置の修理費用として、最終段階の開発を遅滞させないための迅速な追加配分の実施である。
- ・関連する他のNEDO事業者にもサンプル提供すべく、プロジェクトの紹介を実施した。

以上のように、NEDOの研究開発成果の実用化に向けたマネジメントは妥当であった。

3. 情勢変化への対応

情勢変化への対応として、進捗状況や技術推進委員会の結果をふまえ、目覚ましい技術的成果をあげており、加速的に研究を進捗させることで当該技術分野における国際競争上の優位性を確立できることが期待されるテーマに関して、年度内の更なる追加配分を行った。具体的には以下の通りである。

- ・平成20年度は、材料創製・基盤技術検討を前倒しして実施することで、世界最高レベルの材料を創製し、中間目標を達成。
- ・平成21年度は、超臨界プロセスの量産化検討のため、スラリー供給装置を1年前倒しで開発。
- ・平成22年度は、超臨界プロセスの量産化検討のため、回収装置を開発し、10 t/年の連続式超臨界表面処理装置を完成。
- ・平成23年度は、3月の東日本大震災で被災した東北大学、JCII集中研に震災復興費用として追加配分を行い、5月の現場立入禁止解除後実質3カ月弱で通常研究業務へ回復。

追加配分の実績を図14、図15に示す。

- 進捗状況や中間評価、技術推進委員会の結果をふまえ、目覚ましい技術的成果が期待される案件に関し、年度内に更なる追加配分を行い、加速的に研究を進捗させた。
- 平成23年3月震災被害を被った東北大学、JCII集中研に対して、速やかに復興支援として追加配分を行い、研究が停滞するのを防いだ。

追加配分による加速からみた予算推移

研究開発項目	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	予算計
①材料創製技術開発	追加(49) 319	187	207	255	968
②機能発現技術開発	追加(22) 109	115	58	復興(4) 123	406
③プロセス基盤技術開発	追加(26) 208	追加(39) 258	追加(100) 105	復興(24) 234	806
④統合・支援技術開発	81	69	49	58	258
予算計	717	629	420	671	2437

* 各数字を四捨五入しているため、数値合計がずれているものもある

図14 追加配分による加速からみた予算推移

●平成20年度追加配分 100百万円 ⇒ 材料創製・基盤技術検討を前倒しで実施することで世界最高レベルの材料を創製し、中間目標を達成。		
①材料創製②機能発現	表面修飾ナノ粒子複合解析機・分光装置	45百万円
①材料創製③プロセス基盤	分散装置(小型混練・成形機)	18百万円
①材料創製③プロセス基盤	多機能薄膜材料評価X線回折装置	34百万円
●平成21年度追加配分 39百万円 ⇒ 超臨界プロセスの量産化検討のため、スラリー供給装置を1年前倒しで開発。		
③プロセス基盤	超臨界水熱合成用スラリー供給装置	39百万円
●平成22年度追加配分 100百万円 ⇒ 回収装置を開発し、10t/年の連続式超臨界表面処理装置を完成。 ⇒ 窒化ホウ素、アルミナの表面修飾サンプルを大量合成し、材料創製グループへ供給。		
③プロセス基盤	超臨界水熱合成システム化装置(能力10t/年)	60百万円
③プロセス基盤	表面改質粒子濃縮スケールアップ装置	40百万円
●平成23年度追加配分 28百万円 ⇒ 実質3ヶ月弱で通常研究業務へ回復。		
②機能発現③プロセス基盤	震災復興費用	28百万円

➡ 「超ハイブリッド材料の創製技術」と「トレードオフを解消する基盤技術」を確立！！

図15 追加配分による研究開発の加速

○体制の変更

プロジェクトの実施体制として、(一財)化学研究評価機構からの再委託先であった東北大学、東京工業大学、長岡技術科学大学、九州大学の4大学をPLの指導力を迅速に反映することを目的として、NEDOとの直接委託契約に変更した(平成21年3月31日付け)。

4. 中間評価への対応

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果などについて、外部有識者による研究開発の中間評価を平成21年7月6日に実施した。評価結果の概略を図16に示す。

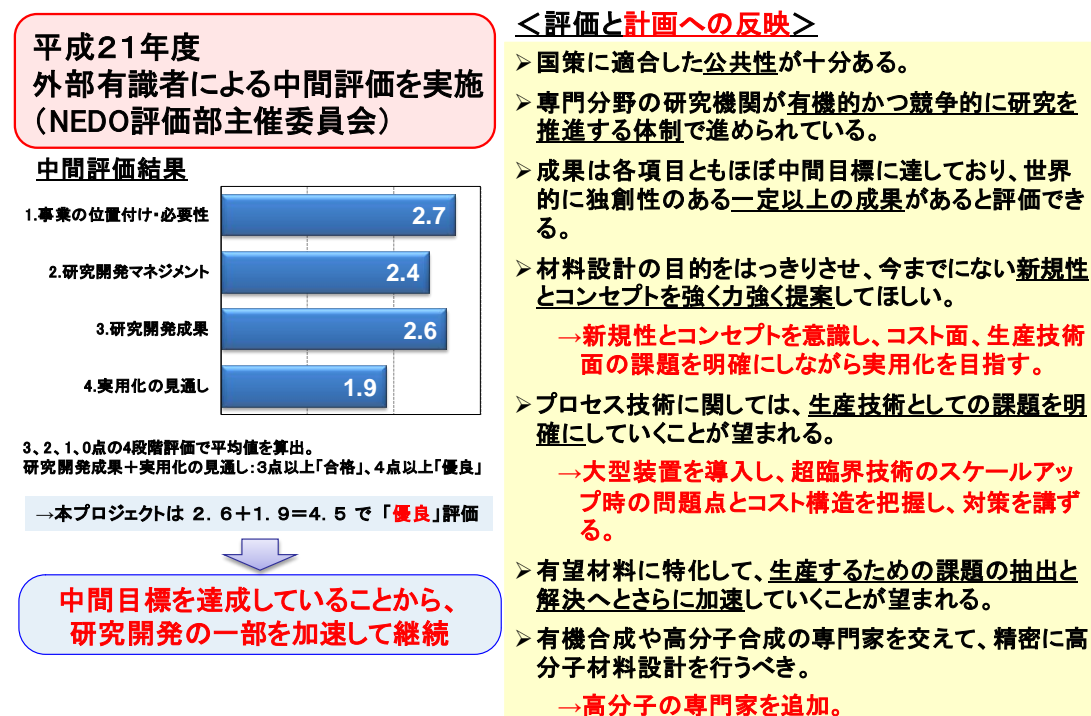


図16 中間評価結果への対応

評価委員からの指摘に対する、事業計画への反映内容を表6にまとめる。

表6 中間評価委員の指摘に対する反映内容

評価委員からの指摘事項	事業への反映内容
<ul style="list-style-type: none"> ・ 国策に適合した公共性が十分ある。 専門分野の研究機関が有機的かつ競争的に研究を推進する体制で進められている。 成果は各項目ともほぼ中間目標に達しており、世界的に独創性のある一定以上の成果があると評価できる。 材料設計の目的をはっきりさせ、今までにない新規性とコンセプトを強く力強く提案してほしい。 プロセス技術に関しては、生産技術としての課題を明確にしていくことが望まれる。 	<ul style="list-style-type: none"> →新規性とコンセプトを意識し、コスト面、生産技術面の課題を明確にしながら実用化を目指す。 →大型装置を導入し、超臨界技術のスケールアップ時の問題点とコスト構造を把握し、対策を講ずる。

<p>有望材料に特化して、生産するための課題の抽出と解決へとさらに加速していくことが望まれる。</p> <p>有機合成や高分子合成の専門家を交えて、精密に高分子材料設計を行うべき。</p>	<p>→高分子の専門家を追加。</p>
--	---------------------

5. 評価に関する事項

NEDOは、国の定める技術評価に係わる指針及びNEDOが定める技術評価実施要領に基づき、技術及び実用化の観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果などについて、外部有識者による研究開発の中間評価を平成21年度に実施した。その対応については、4. 中間評価への対応に示した。その開催内容は以下の通りである。

中間評価

- ・評価の実施時期： 平成21年7月6日
- ・評価手法： 外部有識者による評価（表7）
- ・評価事務局： NEDO 評価部
- ・評価項目・基準： 評価項目を以下に示す。
 - 1) 事業の位置付け・必要性
 - 2) 研究開発マネジメント
 - 3) 研究開発成果
 - 4) 実用化の見通し

表7 中間評価の評価委員

	氏名（敬称略）	所属・役職
分科会長	遠藤 剛	近畿大学 教授
分科会長代理	坪川 紀夫	新潟大学 科長／教授
委員	臼杵 有光	(株)豊田中央研究所 取締役
委員	中村 修平	三重大学 教授
委員	前 一廣	京都大学 教授
委員	安田 武夫	安田ポリマーリサーチ研究所 所長
委員	吉永 耕二	九州工業大学 教授

（敬称略・順不同）