

ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA CCTAACT CTCAGACC

戦略イニシアティブ

産業競争力強化のための材料研究開発戦略

0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
00110 11111100 00010101 011



エグゼクティブサマリー

わが国の大学等で現在行われている材料関連の基礎研究に、産業の国際競争力強化を明確に指向した新たな方向性を付加するための戦略として、「産業競争力強化のための材料研究開発戦略」を提案する。

大学等における研究は、一般的傾向として研究者の興味や関心に基づくものが多く、産業競争力強化のための戦略性があるとはいいがたい。一方、産業界は、大学等での基礎・基盤研究に対する期待は大きいものの、短期的な利益を重視せざるを得ず、また開発の初期段階では、お互いに競争する関係にあるため、統一的な長期的戦略を大学側に示すことは困難である。

このような状況を克服するため、JST 研究開発戦略センターでは、「国際競争力強化のための研究開発戦略立案手法」を開発^{※1)}し、それを材料開発分野に適用し、さらに「物質・材料分野」俯瞰ワークショップ^{※2)}等の議論も参考にしながら、今後戦略的に取り組むべき研究開発課題を抽出した。下表にその一覧を示す。

産業群	エネルギー系産業・環境系産業	資源開発系産業	情報通信系産業	機械・精密機械系産業	輸送系産業
各産業群からの要求	水素生成と炭酸ガス固定化	工業基幹原料の多様化	ナノエレクトロニクスデバイス技術	人間代替ロボット	燃料電池自動車
	微細藻類によるバイオ燃料生成			自律分散型・低エネルギー消費型機械システム	新型電池を用いた電気自動車
	持続的な水の獲得と評価・モニタリング	低品位・二次資源からの金属・無機原料研究開発	ナノエレクトロニクスプロセス・実装技術		
	環境配慮設計 (DfE: Design for Environment)				
横断的に抽出された重要な要素材料技術	空間空隙制御・利用技術		サーマルマネジメント		
	融合分子材料技術		界面・表面の制御・形成		
	コンポジット材料		軽量化技術		

※ 1) JST 研究開発戦略センター 戦略提言「国際競争力強化のための研究開発戦略立案手法の開発ー日本の誇る「エレメント産業」の活用による『アンブレラ産業』の創造・育成ー」CRDS-FY2008-SP-10

※ 2) JST 研究開発戦略センター 「物質・材料分野」俯瞰ワークショップーナノテクの成果・融合の効果・今後の課題ー報告書 CRDS-FY2008-WR-05

ここに挙げた各産業群からの研究開発に対する要求には、将来へ向けた産業競争力の更なる強化のために優先的に投資すべきテーマが網羅的に記述されている。これらに対し研究開発投資を行うことによって、より効率的な資金配分が可能となり、目的基礎研究から得られる成果の速やかな産業競争力への貢献が期待される。技術課題や要素技術を抽出する際に重要視したのは、「将来目指すべき社会像」ではなく、あくまで、「強い産業をより強くするために必要な公的投資」、「将来の産業競争力のための先行的な公的投資」の2つの視点である。

ここでは、将来の各産業へ向けた研究開発を産業界にだけ任せるのではなく、産業界以外で取り組まれる研究開発に対して要求される重要項目を提示した。これを実行することにより、企業における研究開発に直接期待することが難しい、新たなブレイクスルーの実現、知識の創出等が期待され、わが国における産業の国際競争力維持・強化に貢献することが可能となる。

研究開発の成果を産業競争力により早く繋げるためには、極めて多面からの取り組みや検討が必要であり、また、研究開発を行う分野や目指すべき特性・機能も様々である。本提案では、産業競争力強化のための要求を明確に大学等の研究者へ提示することにより、これまで必ずしも系統的に行われてこなかった産業側から大学等での基礎研究への要求伝達を円滑に行い、研究開発の目的を明らかにし、それらを通して基礎研究と産業との結びつきを強めることを目指している。

目 次

エグゼクティブサマリー

1. 提案の内容と研究投資する意義	1
2. 具体的な研究開発課題	4
3. 研究開発の推進方法	11
4. 科学技術上の効果	13
5. 社会・経済的効果	14
6. 時間軸に関する考察	15
7. 検討の経緯	16
8. 研究開発課題の詳細	17
9. 国内外の状況	69

1. 提案の内容と研究投資する意義

「産業競争力強化のための材料研究開発戦略」とは、我が国で現在行われている材料開発に、産業の国際競争力強化を明確に指向した新たな方向性を付加するための戦略である。

本提言では、産業を広く俯瞰することによって特定された「国際競争力の更なる強化を目指す産業群」に焦点を当て、これらの産業群におけるイノベーションを惹起させるような将来像として「次世代システム」を掲げ、その実現に必要な部品・材料に関連する技術課題を明確化した上で、研究開発を行うべき要素技術を提示する。

将来の産業へ向けて今後要求される技術、つまり産業界からの要求を、大学等の研究者に提示することにより、これまで必ずしも系統的に行われてこなかった産業側から大学等での基礎・基盤研究への要求伝達が円滑に行われるようになる。これにより、研究開発の目的を明らかにし、基礎研究と産業との結びつきが強まり、ひいては産業競争力の強化に繋げることが可能になる。これまでの一般的傾向として、研究開発は研究者の興味や関心をベースにして計画・実行され、産業側はその成果や知見を取捨選択しながら活用してきた。ここで、産業側から必要とされている明確なニーズを示すことができれば、研究開発の効率化、および有効な産業貢献に繋がるものとする。また、科学から技術へと方向を明確にした材料関連の研究開発を加速させることができる。

将来においてもわが国が産業の国際競争力を維持し、強化していくためには、更なる高機能追求やその実現のための高度な特性を備えた材料が必要である。個々の企業は経営と連動した計画の範囲で研究を進めざるを得ず、一方、シーズ研究を担う立場にある大学等へは、産業界からの要求が明確に伝達されてこなかったことから、長期的な戦略性に欠けた研究開発が行われている場合が多い。求められる新たな性能に対して、科学的な根本に立ち戻って系統的に研究開発を行うべきとする施策も乏しい。要求される研究開発課題を産業界だけで解決しようとするのではなく、大学等の研究者に対して、その課題を明らかにする指針を提示することが必要である。ここに掲げられる重要課題に取り組み、解決していくことにより、我が国の産業が国際競争力を維持・強化していくことが可能となる。

ここに挙げた各産業群から大学等の研究者への要求は、産業群毎の個別の要求と、複数の産業群に共通する要素技術とに大別される。産業群毎の個別の要求については、独立する重要課題として挙げており、それぞれに対して集中投資が望まれる。複数の産業群に共通する要素技術は、様々な産業群へ貢献する技術であるために、横断的・融合的な研究領域と位置づ

けて投資すべきである。

本イニシアティブ全体として、多くの産業分野にまたがる研究開発ポートフォリオを提示している。優先的に投資すべき重要課題を網羅的に記述しており、これらに対して投資することにより、無駄を廃した効率的な資金配分が可能となり、目的基礎研究から得られる成果の産業競争力への比較的早い貢献が期待される。さらに大学等の研究者と産業界を繋ぐ重要な接点となることを意図している。

具体的には、戦略提言として JST 研究開発戦略センターから別途発行する「国際競争力強化のための研究開発戦略立案手法の開発」^{※1)}の産業技術俯瞰図から得られた下に示す①～⑤の産業群において、それぞれ複数の「次世代システム」を掲げ、その実現のために今後研究開発を行うべき課題を明確にした。さらに、それら複数の次世代システムに共通する横断的な観点で重要と考えられる要素材料技術を、JST 研究開発戦略センターで行われた「物質・材料分野」俯瞰ワークショップ^{※2)}等の議論も参考に整理した。技術課題や要素技術を抽出する際に重要視したのは、繰り返しになるが、「強い産業をより強くするために必要な公的投資」、「将来の産業競争力のための先行的な公的投資」の2つの視点である。

【A】各産業群から抽出された次世代システム

① エネルギー系産業群・環境系産業群

次世代システム1：水素生成と炭酸ガス固定化

次世代システム2：微細藻類によるバイオ燃料生成

次世代システム3：持続的な水の獲得と評価・モニタリング

次世代システム4：環境配慮設計（DfE：Design for Environment）

② 資源開発系産業群

次世代システム1：工業基幹原料の多様化

次世代システム2：低品位・二次資源からの金属・無機原料研究開発

③ 情報通信系産業群

次世代システム1：ナノエレクトロニクス・デバイス技術

次世代システム2：ナノエレクトロニクス・プロセス・実装技術

※1) JST 研究開発戦略センター 戦略提言「国際競争力強化のための研究開発戦略立案手法の開発—日本の誇る「エレメント産業」の活用による『アンブレラ産業』の創造・育成—」
CRDS-FY2008-SP-10

※2) JST 研究開発戦略センター 「物質・材料分野」俯瞰ワークショップ—ナノテクの成果・融合の効果・今後の課題—報告書 CRDS-FY2008-WR-05

④ 機械・精密機械系産業群

次世代システム 1：人間代替ロボット

次世代システム 2：自律分散型・低エネルギー消費型機械システム

次世代システム 3：生体適応・自律分散型医療デバイス・システム

⑤ 輸送系産業群

次世代システム 1：燃料電池自動車

次世代システム 2：新型電池を用いた電気自動車

次世代システム 3：軽量カー

【B】横断的な重要要素材料技術

①空間空隙制御・利用材料技術

②軽量化技術

③融合分子材料技術

④界面・表面の制御・形成

⑤サーマルマネジメント

⑥コンポジット材料

以上合計 20 の技術課題について、第 2 章において、その内容を解説し、さらに第 8 章において、詳細な研究開発課題を記述した。

2. 具体的な研究開発課題

【A】各産業群から抽出された要求（次世代システム）

①エネルギー系産業群・環境系産業群

次世代システム1：水素生成と炭酸ガス固定化

地球温暖化を抑制するためには2つのアプローチが考えられる。それは、エネルギー生成時に炭酸ガスを発生させない手法と、発生してしまった炭酸ガスを固定化して有効に利用しようという手法である。家庭における小規模なエネルギー生成を考えると、水素を使った小型燃料電池の導入が、環境負荷低減の観点からクローズアップされている。水素生成法には、化石燃料を使う方法と使わない方法があり、今後注目されるものは、炭酸ガスが全く発生しない、自然エネルギーを利用した水素生成法である。その際に、エネルギー変換効率を大幅に向上させることが必要であり、反応系での新たな触媒開発が鍵となる。一方炭酸ガス固定化に関しては、生物学的なものや化学的なものがあり、大規模に実施できるものは化学的な固定化である。地中や深海底への貯留に加え、炭酸ガスを化成品の原料として使用することも検討されている。この場合にも、反応効率を向上させるために新たな触媒開発が望まれている。また、炭酸ガス回収工程における分離膜の開発も重要であり、ナノ空間・構造の制御による分子篩効果を応用することが挙げられる。

次世代システム2：微細藻類によるバイオ燃料生成

太陽光エネルギーを利用した植物による化学燃料生成は、石油の代替ばかりでなく、炭酸ガス固定化の意味合いからも地球温暖化抑制のキー技術の一つである。しかも海洋国日本を考慮すると、植物の中でも特に海洋性の藍藻など、微細藻類の適用が本命と考えられる。従来から自然界にある微細藻類をスクリーニングし、高効率生成株を樹立する研究が行われてきたが、最新のバイオ技術（オミクス技術など）を導入することによって、更に高効率なバイオ燃料変換を達成できる可能性が出てきている。米国ではベンチャーやDOEを中心に、本分野への積極的な研究投資が開始されており、一刻も早く我が国でも着手することが望まれる。

次世代システム3：持続的な水の獲得と評価・モニタリング

世界的に水資源の重要性が高まってきている。特に砂漠地帯のように飲み水の確保すらできない地域が広がっている。こうした背景のもと、持続的に水をどのように確保するかを戦略的に考えなければならない。世界で

は、一部の限られた水メジャーがこの市場を独占している状況であるが、日本の優れた基盤材料技術を使って、この市場に一層入り込んで行く必要がある。基本的要素技術は機能膜であるが、更なる低コスト化に繋がるような新しい膜の開発が望まれている。また、水の管理で問題となる水質モニタリングに関し、従来技術では計測が不可能であった毒性の簡易評価に繋がる選択性物質の開発が重要である。これらは水ビジネス全体を通じて、大きな差別化技術になる可能性がある。

次世代システム4：環境配慮設計（D f E：Design for Environment）

環境配慮設計とは、製品のライフサイクル全体に渡り省エネや環境負荷低減を意識した製品設計をしようとする概念であり、究極のリサイクル技術である。一般的には、製造や輸送・解体などの各段階でLCA解析を仮想的に実施して、製品設計に反映させている。しかし現実と大きく異なるのは、製品の解体工程である。例えば、現在のパソコンはリサイクルが義務付けられており、処理業者において殆ど手作業で分解されているが、各部品レベルまで厳密に分解することは難しく、基板上の金などの希少金属は十分に回収できていないのが現状である。このためには、ある刺激を与えた時に、簡単に自ら分解するような材料（部品）が実現できれば良い。このような機能を持つ材料を「環境調和型知的複合材料」と名付け、これは換言すれば「インテリジェント自己解体材料」ともいえる。解体時に、ある刺激を製品に与えると自らバラバラになる材料（部品）である。この実現のために、ソフトマテリアルと呼ばれる複合材料が適用できる。材料科学、ナノテクノロジー及び計算科学がその基盤になる。

②資源開発系産業群

次世代システム1：工業基幹原料の多様化

生活、産業の様々な場面で使用する製品には化石資源を原料とするものが数多くあり、特に化学工業における石油化学製品は、原油（ナフサ）を分解・加工したエチレンやフェノール類を原料とすることに始まる。しかし原油は将来の枯渇可能性や生産量・価格の変動によって、安定的な供給に常に懸念がある。そこで原料を化石資源以外の他の資源へ多様化し、原油の生産・価格変動が起きた際にも影響を最小化し、二次・三次産業が左右されないように備えることが望まれている。原油以外の他の主要炭素資源としては、(1) 植物体であるバイオマスを変換して利用する、(2) 大気中や工業的に大量排出される二酸化炭素を変換して利用する、(3) 二次製品を再資源化して利用する、の3種が主に挙げられる。これらを効率的に実現するための研究開発が必要である。特にバイオマスの変換では、

最適な反応により目的物質、有用中間体を得る、バイオリファイナリーを構築するための研究開発が必要である。

次世代システム2：低品位・二次資源からの金属・無機原料研究開発

近年の鉱山開発では、過去の開発の結果、高純度・高品位な利用しやすい形態で産出される資源は徐々に減少しており、低純度で不純物を多く含んでいる鉱石や、目的とする資源が他の鉱石と複雑な形態を形成したままの「複雑鉱石」など、低品位な鉱石の有効利用法が求められている。低品位鉱石は、従来の精製・分離・精錬プロセスでは利用することができないため、新たな精製・分離・精錬を実現するための基礎的な科学・技術開発が望まれる。その他にも、現在は未利用の資源、重質油の残渣に含まれている有用金属を回収することや、海水・火山性地下水に含まれている希少金属を回収し利用する新たな科学・技術の開発が期待されている。また、ハイテク産業において大量に廃棄される製品を回収し、それを分解・分離することによって有用元素を取り出し、再び新たな工業製品として利用するといった、いわゆる「都市鉱山」の有効利用が注目視されている。これらを実現するために必要な科学・技術及びプロセス技術を構築することが必要である。

③情報通信系産業群

次世代システム1：超微細化・超集積化・超低消費電力化ナノエレクトロニクス・デバイス技術

エレクトロニクスデバイスの微細化、集積化は現在必須の流れとなっているが、微細化の物理限界が近づいていることや、集積化に伴う消費電力の増大が大きな問題となっている。これらの問題を考慮して、次世代エレクトロニクスシステムでは、新概念、新材料を含む新しい技術の導入が必要である。デバイスの切り口からは、「記憶機能」、「論理機能」、「情報伝達機能」のそれぞれにおいてブレイクスルーが必要である。これらを実現する新規材料候補として、低次元材料、機能性高分子材料、スピン機能材料、複合金属酸化物材料、自己組織化材料が挙げられる。これらの材料の基礎研究と共に上記デバイス機能実現のための研究開発が必要である。

次世代システム2：超微細化・超集積化・超低消費電力化ナノエレクトロニクス・プロセス・実装技術

超微細化・超集積化・超低消費電力化ナノエレクトロニクスデバイス実現のためには、それを作製するためのプロセス技術や実装技術、電源、放熱を含むエネルギー変換、蓄積技術／熱制御技術が極めて重要である。作

製プロセスとして微細化の限界に直接関わるリソグラフィ技術は欠くことのできない研究開発領域である。そのための材料研究開発として、低次元材料、機能性高分子材料、自己組織化材料が挙げられる。またエネルギー変換、蓄積技術／熱制御技術では、ナノ構造制御による高熱伝導率材料や高効率熱電変換材料の研究開発が必要である。

④機械・精密機械系産業群

次世代システム1：人間代替ロボット

ロボットの用途は産業等の利便性の追求が主であったが、これまで限定的にしか展開がなされていない極限環境下での積極使用や、医療・介護等の現場における人間の役割の代替、輸送等のシステムとの融合など、広範な用途での応用が求められる。その実現のために必要な技術として、極限環境下での材料技術や耐環境材料、パワー源となる電池・電源技術、エネルギー変換材料技術、軽量材料技術等が挙げられる。

次世代システム2：自律分散型・低エネルギー消費型機械およびシステム

機械・精密機械を必要な場所・用途に応じて分散して使用する流れは今後確実に加速していく。そのような中、超微細集積技術の必要性は益々高まっていく。また、各種機械やコンピューター等を分散使用する際には、効率的な冷却技術や装置が必須となる。

超微細集積技術は、産業ニーズと技術的な必然性のある方向に向かう流れが、今後もより強まることが予想される。機械、MEMS、LSI、ナノエレクトロニクスと区別して個別に研究開発に取り組んでいても将来の発展は限られる。エレクトロニクスを駆使して、より高度な機能を実現する方向に技術は発展する。

また、情報通信技術の課題として、高速化に伴う発熱増加・大消費電力を省電力化するための技術開発が急務である。さらなる高速化のためにも熱処理と冷却技術が鍵となる。多くの次世代冷却技術が提案されてきているが、用途や市場は膨大であり、広く研究開発が行われるべきである。

次世代システム3：生体適応・自律分散型医療デバイス・システム

医療・検査の将来において、機械が果たす役割は非常に大きい。中でも医療・検査がオーダーメイド化、分散化していく中での自律分散型医療検査機械器具は、この分野の将来を支える技術である。要求される部品・材料は、永久体内埋め込み型機械、局所・遠隔医療器械（手術ロボット、ナビ医療）、超微小検査・計測機器や医療チップ、などである。その実現や発展のためには、完全生体親和性材料、動力源（微小エネルギー発電等）、

メンブレン技術、マイクロ（ナノ）TAS の研究開発が挙げられる。

⑤輸送系産業群

次世代システム 1：燃料電池自動車

燃料電池自動車を実現するために重要な構成要素は、白金を触媒として使用しない燃料電池、広い温度範囲（特に低温）で安定作動する燃料電池、水素安定供給システム、および希少資源不使用・高性能モーターである。これらの構成要素を実現するための研究開発としては、触媒原理の解明、電解質中をイオンが移動するメカニズムの解明およびその計測技術の開発、温暖化ガスを排出しない大容量の水素製造技術の開発および耐脆性および耐高圧性の水素貯蔵材料の開発などが挙げられる。また、次世代システム 2 の新型電池を用いた電気自動車と共通の研究開発課題としては、添加剤の作用メカニズムの解明や新規の高保磁力磁石の開発などが挙げられる。

次世代システム 2：新型電池を用いた電気自動車

電気自動車を実現するために重要な構成要素は、ハイパワー・高信頼電池、高性能電子制御部品、および希少資源不使用・高性能モーターである。これらの構成要素を実現するための研究開発としては、充放電時における電極での元素の存在状態の解明、電極界面の反応の素過程の可視化のための分析・計測技術の開発、生体を模倣した新型電池の開発を目指した筋肉のエネルギー変換メカニズムや光合成メカニズムの解明、およびワイドバンドギャップの基盤材料の開発などが挙げられる。

次世代システム 3：軽量カー

軽量カーを実現するために重要な構成要素は、軽量の構造材料および透明材料である。これらの構成要素を実現するための研究開発としては、合金材料の開発、結晶構造制御技術や微細構造制御技術および複合化技術による複合材料の開発などが挙げられる。

【B】横断的に抽出された重要要素材料技術

①空間空隙制御・利用材料技術

微細スペースの次元、形状、サイズ、界面特性等を制御し、それらミクロ～ナノレベルで設計した空孔材料の開発や利用を行うことは、環境・省エネルギーなど今後の重要な研究開発課題や産業からの要求に応えるための重要な横串として存在する。微細空間の制御は機能発現の一つの本質であり、各種検討の随所に現れ大きな研究開発領域に成り得る。さらに縦割

りの領域を融合して、相互に知見を融通することによって大きく飛躍することが期待できる。

「空間空隙制御の科学」と、「空間空隙利用による新材料技術創出」を同時並行的に行うことが肝要であり、明確に出口を意識した研究開発戦略が求められる。

②軽量化技術

あらゆる部品・材料の軽量化を狙った技術開発は、製品の使用時、製造時、および輸送時に消費するエネルギーあるいは工業資源の消費効率の削減を産業横断的に実現し、産業の国際競争力の強化および国際貢献に寄与することができる。また、例えば、生体内に使用する医療用装置など、使用環境によって重量に対する制限が大きい製品を軽量化することができれば、これら製品の付加価値が向上し、産業の国際競争力を強化することができる。部品・材料の軽量化のための研究開発としては、素材そのものを軽元素で代替する軽量化技術開発と、結晶構造・微細構造の制御および複合化技術による軽量化技術開発の、大きく2種類がある。

③融合分子材料技術

有機材料の特徴として、構造や機能を自在に設計できるという点を挙げることができる。産業界から材料開発に寄せられる様々な要望に応える一つの解決策が、有機材料や分子材料の適用である。ここでいう分子材料技術とは、分子科学と分子技術とを融合することで拓かれる新しい技術分野であり、その主役は有機材料である。本技術は、環境・エネルギー・IT・生活・医療などと幅広い産業分野で要望されている重要技術である。

④界面・表面の制御・形成

多くの応用分野の技術的なボトルネックとなっている界面・表面の制御・形成は、様々な産業からの要求の、横串的な研究開発領域として存在する。

異種接合界面の飛躍的な高機能化技術を創出すること、医療用材料技術、エレクトロニクス技術、および発電・蓄電エネルギー技術にそれぞれ関連した生体材料と人工物との接合界面、ソフト材料とハード材料との接合界面（有機物と金属・絶縁体を含む）、およびエネルギー変換と物質移動を伴う異種材料・異種物質状態間の接合界面の高機能化、また界面や表面の機能を積極的な追求により、新規反応場や新規プロセスおよび新機能の創製を行うこと、さらに異種材料の接合の結果生じる分子反応場としての界面の機能を積極的に活かすこと等が重要な研究開発として挙げられる。

これら各種接合界面の機能の飛躍的な改善のためには、分子工学、界面

工学、精密材料創製化学、ナノメカニクス、精密分子操作、微細加工等の各分野を動員、融合して機能界面工学を構築し、ナノスケールレベルで各種接合界面を横断的に俯瞰し、界面のナノ構造制御に資する知識と実験技術の統合・集約を行う事が不可欠である。

⑤サーマルマネジメント

熱の制御やそれを実現する技術と、各材料や部材の熱物性とをあわせて「サーマルマネジメント」と呼ぶことにする。物理学における物性から、熱のコントロール、さらには熱をマネジメントするための材料まで考えを発展させ、ナノテクノロジーや先端的な物質材料技術を結集した新たな技術開発が必要である。冷却、放熱、電熱、熱伝導、ヒートシンク材料、超冷却技術等々において、目的に応じた制御、たとえば熱膨張率の制御や、高放熱特性のためのナノ複合材料の開発などを視野に入れる。

ナノテクノロジーは、単に物を小さくすることにとどまらず、様々な分野の発展に寄与している。例えばナノテクノロジーを使って、従来は不変と考えられていた熱伝導率や熱輻射などの物質特有の性質が制御可能になってきた。これにより、飛躍的な高効率性能を有する熱電材料の開発や、新しい機能を持った素子の開発に繋がる可能性がある。素子の集積化、微細化に伴い、ナノ構造における熱伝導制御は極めて重要な研究開発課題となっており、またエネルギーの高度利用の観点からもサーマルマネジメントの必要性は今後益々高まると予想される。

⑥コンポジット材料技術

コンポジット材料は、金属、セラミックス、有機材料等の異種材料の複合化により、元の材料だけでは得られない新機能・高機能を発現させるもので、ナノスケールで複合化したものがナノコンポジット材料と呼ばれている。複合化により、各構成材料の長所を併せ持つ特性、あるいは構成材料単体では実現できない新規な特性が得られる可能性があり、自動車、航空、エネルギー・環境、医療等、様々な産業分野への応用が期待されている。複合化により発現する機能としては、高強度、耐久性等の機械的特性、耐熱性、断熱性等の熱的特性、導電性、絶縁性等の電気的特性、飽和磁束密度等の磁気的特性、屈折率、吸収係数等の光学的特性がある。研究開発課題として、所望の機能に対するコンポジット材料の設計手法確立、ナノ界面設計、粒界寸法、分散状態等の制御、評価・解析法の確立、製造プロセスの開発等がある。

3. 研究開発の推進方法

産業競争力強化のための材料研究開発を推進し、研究開発の成果を産業競争力により早く繋げるためには、極めて多方面からの取り組みや検討が必要であるが、一方で研究開発が行われる分野や目指すべき特性・機能は様々である。そのような中で本戦略は、各産業群からの明確な要求を大学等の研究者に提示することにより、これまで必ずしも系統的に行われてこなかった産業側からの要求伝達を、大学等の研究者に対して円滑に行うことによって、研究開発の目的を明確にし、基礎研究と産業との結びつきを強化することを目指している。

従来の産学連携においては、大学等で行われている基礎研究成果が産業に直結することは稀であり、研究者の興味や関心で選んだテーマと企業が偶然出会うことによる産学連携が多く、必ずしもシステムティックな連携が出来ているとはいえない。また、大学等に存在する研究シーズや成果を、企業は把握していないということが非常に多い。場合によっては、企業の研究と大学等の研究が同じ課題を抱えているにも関わらず、それぞれ別個に2重投資され、国全体としての投資効率を落としている可能性もある。

研究開発を推進する上で重要なことは、産学の結び付け方と研究開発課題の選定である。JST 研究開発戦略センターでは、「国際競争力強化のための研究開発戦略立案手法」を開発し、それを材料開発分野に適用することにより、今後戦略的に取り組むべき研究開発課題を抽出した。これらの課題に沿って、産学連携の研究を行うことにより、研究開発成果を産業競争力により一層早く繋げることができる可能性が高いと考える。各々の課題に関し、研究領域等を設定し、可能な限り産学連携を重視して取り組むべきである。その際の連携は、企業と大学との共同研究であることが望ましいが、少なくとも企業はアドバイザーとして必ず大学等の研究開発チームに所属し、必要なスペックや要望を出し続けることが重要である。また、府省の連携も不可欠であり、重要要件の一つである。例えば、文部科学省や JST 等で取り組む研究テーマは、産業競争力を指向していても、時間軸としてはかなり先を意識している。5～10年程度の文部科学省や JST のファンディングの先に、すぐに直結すべき経済産業省や NEDO のファンディングがあることによって、より効果的な産業競争力強化のための材料研究開発を描くことができる。このような連携が、研究開発の構想段階から行われることが望まれる。

ここで挙げた研究開発課題は、企業や産業の要望として抽出しているが、産業応用直前の研究開発というよりは、むしろ産業が今手を付けられない基礎研究を多く挙げている。産業界が真に外部へ求める研究開発とは何で

あるかとの問いに対し、企業が自社内では取り組み難い次々世代に必要な基礎基盤的な研究開発を挙げていることも事実である。そこには、研究者のボトムアップ的なアプローチとは一線を画し、企業の真のニーズを汲み取って欲しいとの強い要望がある。これまでの大学等における基礎研究や、ファンディングに対する企業側からの不満もこの部分にある。これまでの一般的傾向として、研究者の興味・関心に基づいて行われた研究開発の成果や知見を、産業側は取捨選択して活用してきた。よって、いかにして産業界のニーズを大学等の研究者へ伝えるかが焦点となる。産業競争力に資する目的指向型基礎研究として、研究開発の効率化を図るためにも、ここに挙げた産業側の明確なニーズが示されたテーマに沿って、企業の目利きが常に介在する仕組みの中で研究開発を行うことが必要である。

本プロポーザルは、研究システムの提案ではなく、重要研究課題の提案である。産業側が要求する重要課題を大学等の研究者へ示し、産業からの要求に叶った研究を増やすこと、およびそのような重点投資領域やさらに深掘して調査すべき事項を明らかにすることを目的としている。

4. 科学技術上の効果

本イニシアティブ「産業競争力強化のための材料研究開発戦略」を推進するにあたって、大学等における従来型の材料研究、すなわち研究者の興味・関心によるボトムアップ的なテーマ選定と、産業やニーズとの結びつきは後から考えるという旧来の流れとは、一線を画す推進方策を採らなくてはならないことは前章で述べた。あらかじめ産業側からの要求を大学等の研究者に提示することにより、これまで必ずしも系統的に行われてこなかった要求伝達が円滑に行われ、科学から技術へと方向を明確にした材料研究開発を増加させることを目指している。

物質・材料の研究に対する産業側の要求は、本質的に基礎・基盤的なものが多く、そこから発生する成果は他の技術領域へと波及し、新しい技術領域を誕生させる。事実、本プロポーザルでは、横断的な重要事項として、「空間空隙制御・利用材料技術」、「融合分子材料技術」、「軽量化技術」、「界面・表面の制御・形成」、「サーマルマネジメント」、「コンポジット材料技術」等を挙げているが、これらはいずれも未解明・未解決の問題を多く含み、本イニシアティブ実施によって、物質科学や材料工学の学術的な発展も期待される。

本プロポーザルの効果は、ここに挙げた研究開発の成果が産業へ直結することと、それによる産業の国際競争力の向上である。産業横断的な技術課題への挑戦から、異分野融合と垂直連携が進み、今後進むべき科学技術の健全な方向が自ら決定されることになる。

5. 社会・経済的効果

わが国が将来にわたって経済成長を維持するためには、産業の国際競争力の更なる強化が必要不可欠である。部品や材料およびその強みを活かした完成品（自動車や電気機器等）で世界をリードしていかなければならない。そのための研究開発の最先端には、これまで日本が培ってきた技術力、研究開発力、生産技術力等が高いレベルで存在し、今後もそのレベルを維持し続けていく必要がある。しかしながら同時に、わが国に新しいアンブレラとなる産業が出現しない限りは、部品や素材産業による限られた付加価値しか得られないことは、多くの統計データが示すところである。この状況を打破するためには、出口である産業側と入口である研究者側の不断の会話が必要であり、シーズ側がニーズ側の要求を熟知して、それを研究に反映させることにより、成果の産業への効率的な貢献が期待される。

本イニシアティブで提示した「次世代システム」は、産業界単独で構築できるシステムではなく、大学等の研究者が解決すべき重要課題を含んでいる。両者が連携して研究開発を行うことにより、企業における研究開発期間の短縮、コスト削減、研究開発システム全体としての投資効率の最大化を図ることができる。本来の意味での産学連携の効率向上こそが本イニシアティブの本懐であり、これに沿った研究開発政策の推進により、格段に向上した連携効果を実現することが期待される。さらに国内に研究開発の強力なネットワークを構築することによって、激しく追いつけてくる中国等の新興勢力に対する先端技術力のリードを維持しうると考えられる。

6. 時間軸に関する考察

産業競争力の維持・強化を求める声は、日増しに強くなり、弱くなることはない。諸外国の動きも急であり、これまではわが国が優位にあった部品・材料産業においても、近年は外国の競争力向上が著しい。産業の国際競争力の更なる向上のためにも、基礎研究発のイノベーションへの期待に応えるためにも、本イニシアティブの内容はすぐに実行する必要がある。

各産業群から要求されている次世代システム、および横断的に抽出されたテーマは、それぞれすぐに重点研究領域として投資、もしくはさらなる深堀の調査が行われるべきである。実際に部品や部材として産業界で活用される時期は、概ね 10～20 年先を見越している。

したがって 5～10 年程度の文部科学省や JST のファンディングの先に、すぐに直結すべき経済産業省や NEDO のファンディングがあることによって、より効果的な産業の国際競争力強化に資する材料研究開発を描くことができる。

7. 検討の経緯

JST 研究開発戦略センター産業技術ユニットが2008年に行なった、各種経済指標を用いたわが国の産業の国際競争力に関する調査・分析^{※1)}によって、現在、日本で国際競争力を維持しているのは部素材産業であり、これら産業群が製造業の強さの源泉であるとし、エレメント産業と定義した。また、この検討により、将来、日本において国際競争力を更に強くするためには、エレメント産業のみではなく、それをシステムとして包括するアンブレラ産業の成長が重要であり、具体的には、機械系産業群、輸送関連産業群、電気電子系産業群、資源・環境・エネルギー系産業群であることが見えてきた。本イニシアティブは、上記各産業群から将来の国際競争力の維持・強化の観点で必要とされる材料に関する要素技術を抽出し、重要課題を特定することが必要であるとの議論を検討の端緒とした。

産業群毎に小規模な検討会やディスカッション会、有識者インタビュー等を広く行い、投資すべき重要課題の抽出を行った。その際、企業の研究開発において、俯瞰的視野を持つ有識者からの意見を重要視し、さらに大学等の研究者からは科学技術的な裏付けを取った。

「次世代システム」が要求する科学技術を整理していく中で、横断的に重要な要素技術が多く浮き上がってきた。それらに関しては、JST 研究開発戦略センターで別途行われた「物質・材料分野」俯瞰ワークショップ^{※2)}等の議論も参考に整理し、本イニシアティブでは、「横断的な重要要素材料技術」として、横断的・融合的な位置づけでそれらを記載した。

本戦略イニシアティブ発行の後、ここに挙げた「次世代システム」や要素技術に対して、速やかな研究開発投資がなされることが一つの狙いである。また、いくつかの事項に関しては、それらの深掘り調査をさらに行うことも視野に入れ、効果的な活動を行っていく予定である。

※ 1) JST 研究開発戦略センター 戦略提言「国際競争力強化のための研究開発戦略立案手法の開発ー日本の誇る「エレメント産業」の活用による『アンブレラ産業』の創造・育成ー」
CRDS-FY2008-SP-10

※ 2) JST 研究開発戦略センター 「物質・材料分野」俯瞰ワークショップーナノテクの成果・融合の効果・今後の課題ー報告書 CRDS-FY2008-WR-05

8. 研究開発課題の詳細

【A】各産業群から抽出された次世代システム

①エネルギー系・環境系産業群

エネルギー・環境関連の材料に関し、産業群から求められている材料をまとめて表した俯瞰図を示す（図 8-1）。

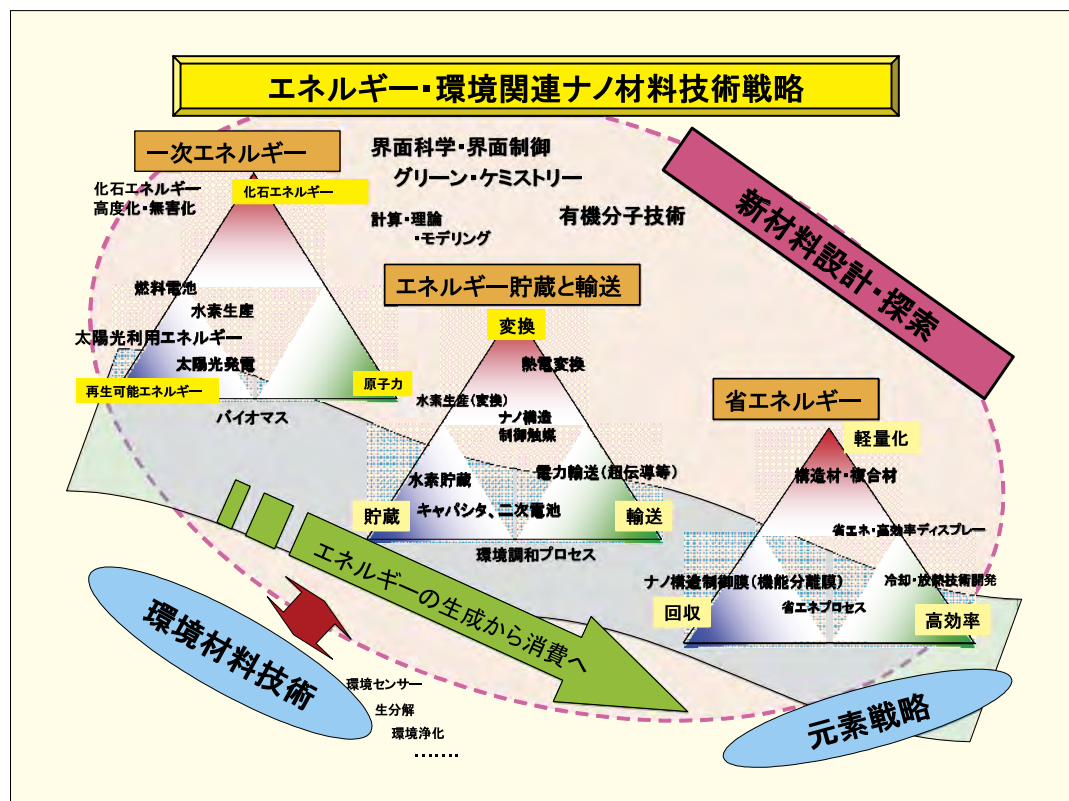


図 8-1 エネルギー・環境関連ナノ材料技術戦略

これら要求される技術課題の中で、エネルギーと環境に深く関係する分野としてバイオマスによるエネルギー生成や脱石油の流れを重視し、将来的には「微細藻類によるバイオ燃料生成」が重要になると判断した。

次に、環境系産業群からの要求に絞った技術俯瞰図（図 8-2）を示す。環境系産業群は各種の環境問題の解決と密接に関係しており、関連する技術課題を抽出するために、まず 4 つの大きな環境課題を挙げた。より地域的な（身近な）ミクロの課題から地球的なマクロの課題までを考え、①生態系保全、②資源循環、③環境汚染対策、④温暖化抑制の 4 課題である。それぞれの課題について、代表的な 3 分野の小課題を抽出し、更に具体的な技術課題について検討した。

「生態系保全」では、身近な環境に関連する、「環境再生」、「生物多様性」及び近年深刻に考えられ始めた「生物感染症対策」が重要であり、それぞれ技術課題を抽出した。しかしこれらの課題は、生物や医学、環境学関連のものが多く、必ずしも材料開発に密着したものではない。

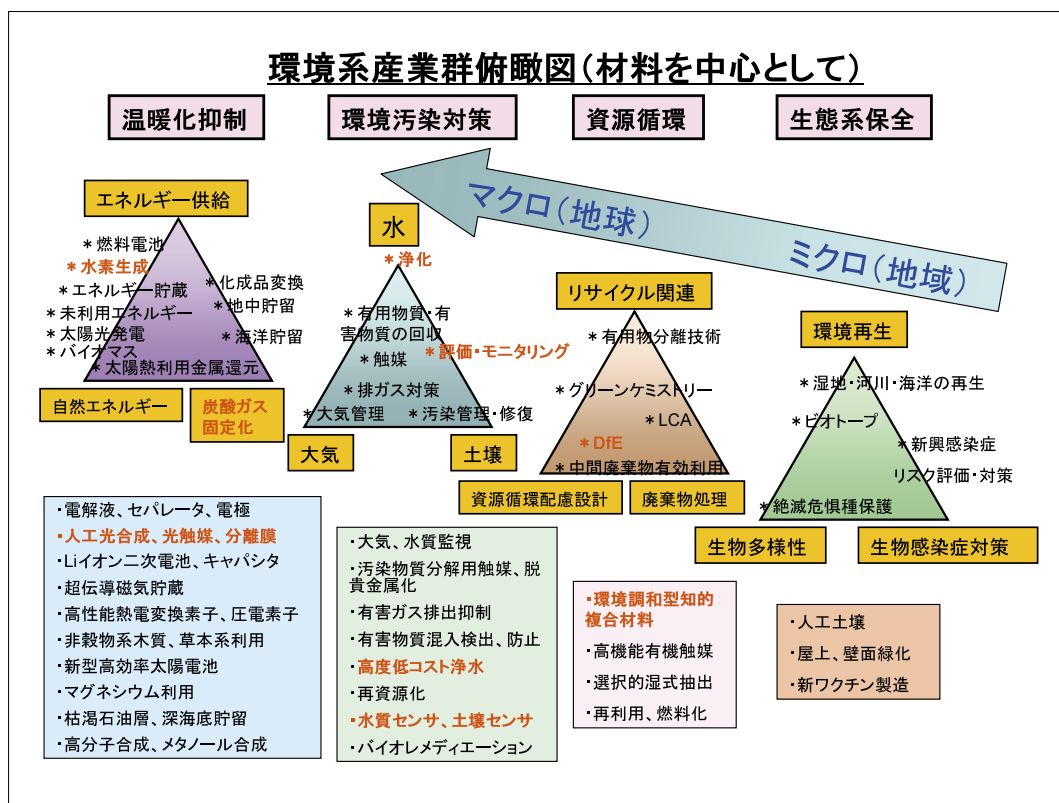


図 8-2 環境系産業群の技術俯瞰図

「資源循環」では、廃棄物問題の解決と資源再利用の重要性を考え、「リサイクル関連」、「資源循環配慮設計」及び「廃棄物処理」の3技術を重視した。これらの内、リサイクルの本質である「環境配慮設計(DfE: Design for Environment)」にフォーカスを絞り、材料研究の視点から重要課題を抽出した。

「環境汚染対策」では、汚染対象ごとに「水」、「大気」及び「土壌」の3区分に分類し、それぞれ対象に対して重要と意見の一致した課題を抽出した。これらの中では、今後の水ビジネスの拡大を意識し、水関連の技術課題(浄化とモニタリング)を注視することにした。

「温暖化抑制」では、温暖化の主要因である炭酸ガスを重視する流れであり、炭酸ガス発生を抑えるエネルギー生成と、発生している炭酸ガスを効率良く固定化する技術に分け、「エネルギー供給」、「自然エネルギー」及び「炭酸ガス固定化」の3技術課題を選択した。これらの中で、家庭

などでの小規模発電で本命の一つと考えられる燃料電池の原料である水素の生成と炭酸ガス固定化に多くの材料技術が関わっている。

以上のように、将来的に材料開発がより重要であると思われる技術課題を以下の3つに絞った。

- 1) 水素生成と炭酸ガス固定化
- 2) 持続的な水の獲得と評価・モニタリング
- 3) 環境配慮設計（DfE：Design for Environment）

次世代システム1：水素生成と炭酸ガス固定化

地球温暖化を抑制するための方策として、温暖化の一大要因である炭酸ガスの発生を抑制する手法と、既に発生してしまった炭酸ガスを別な形に固定化する手法がある。前者では、エネルギーを得る際に炭酸ガスを（極力）発生しない手法が検討されており、その一つが水素エネルギーの利用である。

現在世界全体では、年間 5000 億 Nm^3 の水素が製造されているが、その殆どが化石資源を原料としており、かつ化学合成や石油精製に利用されており、エネルギー源としては用いられていない。これは、水素の生成コストが他のエネルギーと比較して数倍以上になってしまうからである（エネルギー等価のガソリンに換算して 2.7 倍）。しかし将来を考えると、地球温暖化抑制のために、全く炭酸ガスを発生しない電気エネルギー獲得システムとしての燃料電池への期待は大きく、特に家庭などの小規模定置分散型の発電システムでの水素利用が著しく増大すると考えられている（水素社会の到来）。現在実施あるいは研究されている主な水素生成法を表 8-1 に示す。

表 8-1 水素生成法の分類

	方法	水素源	エネルギー源	技術開発レベル
化石資源利用	水蒸気改質	天然ガス、LPG、ナフサ	熱	実用化（分散型燃料電池用は実証）
	部分酸化	LPG、ナフサ、原油、石炭	熱	実用化
	石炭ガス化	石炭	熱	実用化
	電気分解	水	電気（火力）	実用化
非化石資源利用	電気分解	水	電気（原子力、水力、風力など）	実用化
	熱化学分解	水	原子力、太陽熱	実証
	バイオマス転換	バイオマス	熱、微生物	実証
	光分解	水	太陽光、微生物	基礎・実証

化石資源を利用する水素生成法では、いずれも炭酸ガスの発生を伴い、地球温暖化に対する環境負荷が高い。また技術は、いずれも実用化レベル

にあり、材料を含め産業側に開発を任せておける段階である。ただし低コスト化は、近未来においては避けて通れない課題であり、そのためのプロセス性能の向上は必須となる。この際に有効なのは、反応効率向上を目指した新規触媒開発である。ナノテクノロジーを応用した触媒設計技術、ナノ構造・空間制御技術が必要とされる。

将来的（10年後程度）には、環境負荷の低い非化石資源を用いる水素生成法に移行せざるを得ないと考えられているが、こちらは水の電気分解を除けば、残念ながら実用化レベルに達しているものはない。発電量の大きさを考えると、原子力発電の適用が最も妥当であるが、上述のように小規模定置分散型の燃料電池への適用であれば、風力発電や太陽電池なども有望な発電源であると言える。更に遠い将来（15年後以降）を考慮すると、太陽光を使って、直接水を分解し水素を得るという方法も重要になる。すなわち、有機あるいは無機の光触媒による水からの水素生成や藻類を使った水素生成である。いずれも、現状の変換効率は数%レベルであり、採算が取れるようなシステムは構築できない。しかしナノテクノロジーを応用して触媒空間のナノレベルでの制御を行ったり、人工光合成的な新しい有機分子を設計・合成したりすることにより、10%以上の変換効率を達成することも夢ではなくなってきた。こうした基礎・基盤レベルの研究開発を地道に継続することで、革新的な触媒が創成される可能性が出てくる。

一方、水素を使う段階で問題になるものは、水素漏出による発火・爆発の脅威である。水素ガス自体は無色・無臭であるため、仮に現場で漏出しても周りの人には分からない。高度な漏出防止の手段を検討することは勿論、高精度・高感度な水素センサを開発し、水素漏出自体を自動検出することが重要である。一般に水素センサでは白金と水素との特異的反応を使っているが、白金の枯渇が懸念される中、白金を使わない高感度水素センサの開発が重要である。

以上を簡単にまとめると、図 8-3 のようになる。開発スケジュールを図 8-4 に示す。

一方、後者の炭酸ガス固定化については、植物などを使うバイオ系と非バイオ系に分類され、更に非バイオ系に関しては貯留と有効利用にわけられる。バイオ系は、文字通り植物や藻類などを積極的に育てることで炭酸ガスを吸収させ、植物体（バイオマス）を増産させる。炭酸ガス固定化能力が高い植物あるいは成長速度の速い植物を作り出すことが必要であり、最先端のバイオテクノロジーを適用することになるが、いわゆるバイオリテラシーの問題が常について回ることに注意が必要である。欧米では、藻類などによるバイオディーゼル生産やバイオマスによるエタノール生産などのプロジェクトが積極的に推進されている。日本ではバイオエタノール

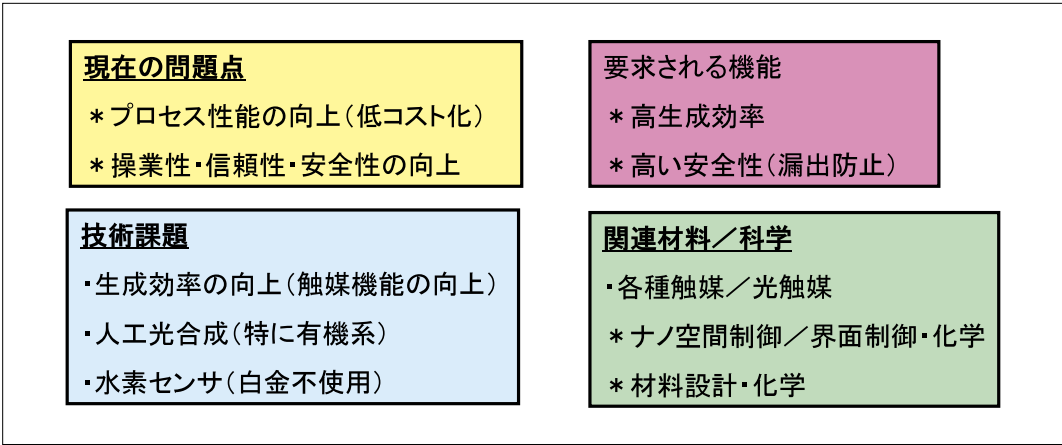


図 8-3 水素生成の問題点と技術課題など

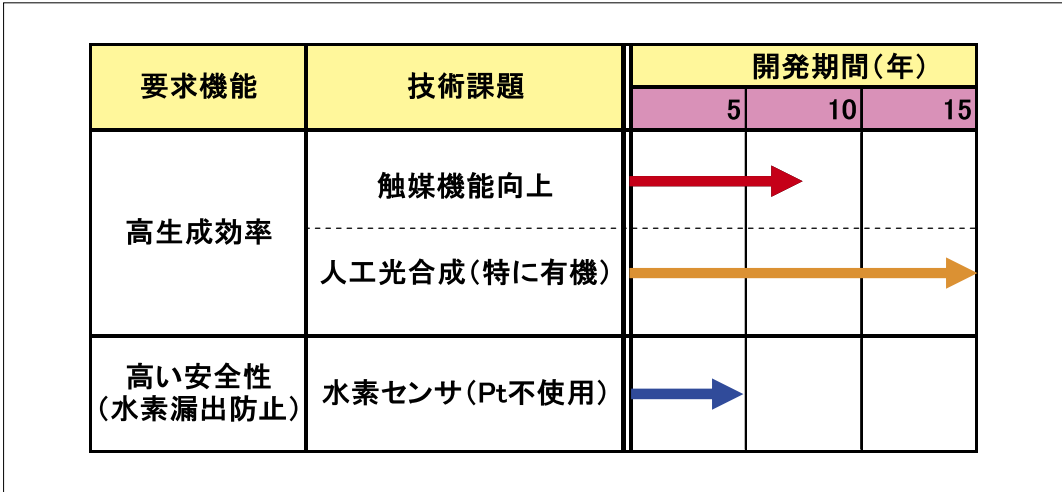


図 8-4 開発スケジュール

のプロジェクトに NEDO を中心にファンディングがなされているが、バイオディーゼル生産関連ではあまり投資されておらず、産業として推進の期待がある。

非バイオ系については、まず炭酸ガス発生源（高炉や化学プラント、火力発電所など）から発生する炭酸ガスを分離・回収する操作が必要である。炭酸カリウムなどの化学薬品を使って選択的に吸収できるが、再生させるために加熱する必要があるが、エネルギー的にはあまり効率が良くない。これに対し、高分子膜などの分子篩効果を利用して、炭酸ガスのみを透過させる膜分離方式が近年注目されている。この手法の場合には、再生回収する必要がなく、炭酸ガスは分離されると同時に回収されてしまう。連続的に操作が可能であるため、省エネ型の炭酸ガス分離方法であると言える。また、無機系の多孔質膜も様々なものが開発され、高分子膜よりも高圧力が付加できるため作業効率が向上している。これら膜分離に共通な課題は、

正確に設計されたナノ空間・構造の実現であり、分子設計や合成化学・有機化学などの学問が重要となる。

回収された炭酸ガスは、地中あるいは深海底などに貯留（CCS：CO₂ Capture & Storage）することが計画されている。一般的に石油や天然ガスの採掘場所は安定した地層であることが多く、更に炭酸ガスが溶解した原油の粘度が低下することで、採掘不可能であった高粘度原油の回収を可能にしている。米国では、DOE を中心として CCS に大きな資金を投入している。欧州でもノルウェーや英国を中心に実用化研究が実施されている。我が国では、新潟県長岡市で RITE により実施された帯水層貯留の実証試験が有名であり、CCS の有効性は証明された。なお、貯留に関しては材料関連の技術課題は殆どなく、システムや土木関連の課題のみである。鉄鋼会社等の大規模に CO₂ を発生している企業による先回りの研究も行われている。

こうした貯留だけではなく、回収された炭酸ガスそのものを化学製品の原料として有効利用しようという考え方もある。例えば、炭酸ガスに水素を反応させてメタノールを生成させ、各種有機物合成の原料にする。更に人工光合成により炭酸ガスと水から有機物を生成しようという試みもある。こうした化成品変換については、まだまだ基礎研究段階であるものが多く、国内外でのファンディングも必ずしも十分であるとは言えない。現状では、いずれも実用レベルの変換効率は達成されていないが、今後の触媒化学のブレークスルーで 1 桁程度の効率向上も不可能ではないと期待されている。DOE で関連分野に一部投資されている。特に化学系産業は、これらの基礎的な研究開発を求めている。

全体的な概念図を図 8-5 に示す。

次世代システム 2：微細藻類によるバイオ燃料生成

まず微細藻類を含む微小生物によるバイオ燃料生成研究を俯瞰し、状況を把握した（図 8-6 参照）。

微小生物を大きく「陸生微小生物」と「水生・海洋微小生物（微細藻類）」にわけた。陸生微小生物は、生産プロセスの重要項目ごとに、「前処理」、「糖化」、「糖化後処理」、「エタノール発酵」、「濃縮脱水」にわけた。また水生・海洋微小生物（微細藻類）は、「培養」、「分離技術」、「残渣処理」に分類した。さらに、縦軸には陸生微小生物と水生微小生物（微細藻類）に共通の項目として、「システム」、「プロセス技術」、「基礎」、そして汎用技術を「共通基盤技術」として設定し、俯瞰的に課題を列挙した。

代表的な陸生バイオ燃料生産系であるエタノール発酵システムについては、多くの要素技術について、例えば平成 20 年度に委託された NEDO の

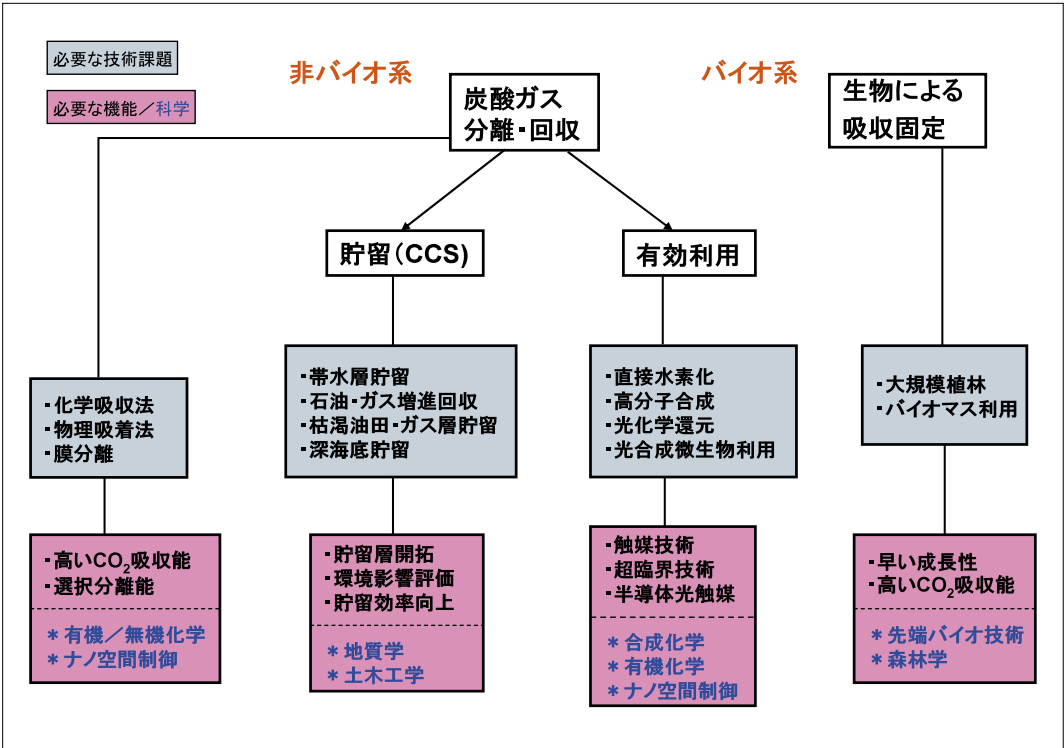


図 8-5 炭酸ガス固定化と有効利用

	陸生微小生物					水生・海生微小生物		
	前処理	糖化	糖化後処理	エタノール発酵	濃縮・脱水	育種・培養	分離技術	残渣処理・利用
システム	・前処理システム	・酵素反応リアクター		・固体発酵リアクター	・膜による選択的分離、脱水	・大型培養システムの設計（開放形、閉鎖系）	・連続処理システムの設計	・糖有効利用、およびN・P・ミネラル再利用システムの設計
プロセス技術	・リグニン、ヘミセルロースの分解・溶出 ・ヘミセルロースの低分子化（酸触媒） ・セルロース結晶型の変換（アンモニア処理）	・セルラーゼ成分量の最適化 ・酵素生産性の向上 ・SSF（併行複発酵）処理条件の最適化	・酵素の回収・再利用 ・発酵阻害物の除去 ・糖化液の濃縮	・連続発酵 ・高密度充填プロセス ・残渣・副産物の処理・利用	・省エネ濃縮法	・太陽光を有効利用する閉鎖型フォトバイオリアクター	・連続処理（乾燥・抽出・分離）	・ヘミセルロースの低分子化（酸触媒） ・セルロース結晶型の変換（アンモニア処理） ・省エネ型破砕法
基礎	・バイオマス構造状態の解析 ・発酵阻害物生成機構の解明 ・リグニン等利用技術	・高活性酵素のスクリーニング ・セルラーゼ成分量の最適化による糖化効率向上 ・酵素生産性の向上（低コスト、大量、オンサイト）		・資化性の拡大（5炭糖、種々の有機物） ・高温発酵微生物の開発 ・阻害物耐性微生物の開発 ・対糖収率向上	・脱水用膜素材の探索	・増殖及び生産能に優れた培養株の育種 ・アルカリ耐性藻類の開発 ・燃料代謝経路の解析	・環境調和型抽出剤の開発 ・含有N化合物除去 ・リン脂質の改質（バイオディーゼ化等）	・残渣成分の分析と構造状態の解析
共通基盤技術	新規遺伝子源探索（メタゲノム、メタトランスクリプトーム） ゲノム情報活用（バイオインフォマティクス） 酵素の改変・強化（タンパク質工学、進化分子工学的手法） 微生物の改変・強化（ゲノム工学、ミニマムゲノム手法）							

既に投資が行われている

今後の投資が必要

図 8-6 微小生物によるバイオ燃料生成研究の俯瞰

「加速的先導研究」や「中長期的先導研究」で既に投資が始まり、基礎研究から技術・システム開発に至るあらゆるフェーズで研究開発が進行中で

あるが、一方、今後進展が予測される DNA の人工合成を中核技術とした合成生物学的なアプローチについては、これまでにない新しい微生物の構築が理論上可能であることが証明されているものの、ゲノム情報の基本的な設計技術や組換え技術など、未着手の課題が多いことから、重要領域として今後の投資が必要である。これらの領域は、米国でも研究が着手された段階であり、我が国が早急に取り組みば十分にキャッチアップできる。

また、藻類の燃料生成研究については、大型藻類のみならず、これまで軽油や重油を蓄積する微細藻類の発見を契機にいくつかの研究開発が実施されており、このうちのいくつかについては、既に実証実験が行われコストを下げる技術開発のフェーズにある。しかしながら、これら微細藻類を活用した新規バイオ燃料（ガソリン、水素等）研究に関しては、ほとんどの課題が手付かずとなっており、今後の国の投資により、より多くの成果が創出される可能性がある。

以上から具体的な研究課題として、以下の3つを挙げる。

(1) バイオ燃料産生微生物の人工合成技術の開発

（具体的な研究課題例）

- ・微生物代謝物のプロファイリング解析
- ・細胞における代謝変動予測システムの開発
- ・人工代謝経路のインシリコデザイン技術の開発
- ・細胞の耐性強化技術の開発

(2) 天然微細藻類の燃料産生機構の解明

（具体的な研究課題例）

- ・炭化水素産生藻類の比較ゲノム解析
- ・藻類における燃料代謝経路の解析
- ・光合成藻類における光受容および炭酸固定機構の解明

(3) バイオ燃料産生多機能藻類の創製

（具体的な研究課題例）

- ・人工代謝経路の藻類への導入技術の開発
- ・バイオ燃料の高濃度蓄積藻類の創製
- ・燃料生産および炭酸ガス固定能を向上させた多機能藻類の創製

なお、燃料生成に止まらず、有害物質の処理能力を微細藻類に付与することも可能であるため、環境修復を沿岸で実施しながら燃料生成することもある。

次世代システム3：持続的な水の獲得と評価・モニタリング

世界的に水不足が叫ばれて久しい。我が国は水の豊かな国という印象が強いが、近年四国や九州地方を中心とした冬場の渇水問題が深刻化して来

ている。こうした背景の下、確実に水を得るための方策が地方自治体レベルで取られている。海外に目を向けて見ると、いわゆる水メジャーと呼ばれる企業（フランスのスエズ、ヴェオリア、米国のGE、ドイツのシーメンス）が上下水道事業（水ビジネス）を牛耳っているのが現状である（図8-7 参照）。我が国の水関連企業では、浄水や清水あるいは排水処理に必要な部材（特に、高性能膜の技術力は高い）と処理装置の開発を中心にビジネス展開をして来ており、上下水道全体を制御することは地方自治体の仕事になっている。しかし今後は水道事業も民営化され、水ビジネスとして発展していくものと期待されており、地方自治体が持っているシステム運営のノウハウをいかに民間企業へ移転するかが大きな課題である（図8-8 参照）。

<欧米>

- ・水事業は民営化。しかし、国家戦略として位置付けられている。GEやジーメンスなどの巨大会社が総合的にビジネスを展開。
- ・サイエンスが関係する分野は殆どない。システム開発中心。

<日本>

- ・水事業は国営（地方自治体）のまま。海外展開は全くなし。水処理会社、膜メーカーは存在するが小規模。水メジャー（民間水事業会社）を目指した展開を開始。
- ・学術会議から、水の有効利用のための先進材料研究に関する提言が出されている（2005年）。
- ・従来の膜技術などの延長線上にある処理技術で勝負できる。
- ・制度・システムの課題が重要。
- ・シミュレーションを中心にしたCRESTで実施済み。

図 8-7 国内外の動向のまとめ

「持続的な水の獲得」に向けて、我が国の環境系企業は技術戦略をそれぞれ持っている。きれいな水を得るためには、(汚い)水をきれいにするか、海水から真水を作るかしなければならない。一般的な水道水は、河川水や地下水を浄化し滅菌した上で各家庭に配送されている。また海水から真水を得るには、逆浸透膜を用いて処理すれば良い。いずれにしても、何らかの膜（フィルタ）を用いた処理が現在の主流であり、必要に応じて凝集剤やイオン交換樹脂及び活性炭などの部材が用いられ、これらは将来もあまり大きくは変わらないと予想される。図8-9に、持続的な水の獲得に向けた必要材料などを示す。

将来的な研究課題を考えると、水処理自体が変化する可能性もある。すなわち、膜技術を組み合わせるだけで前処理から後処理まで全ての処理を

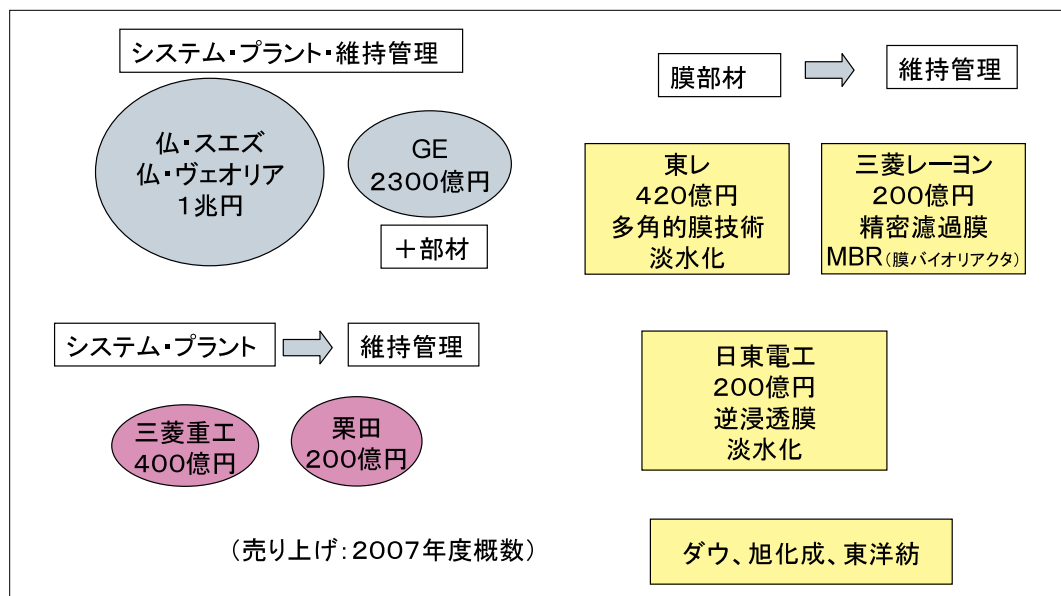


図 8-8 国内外の水ビジネスの現状

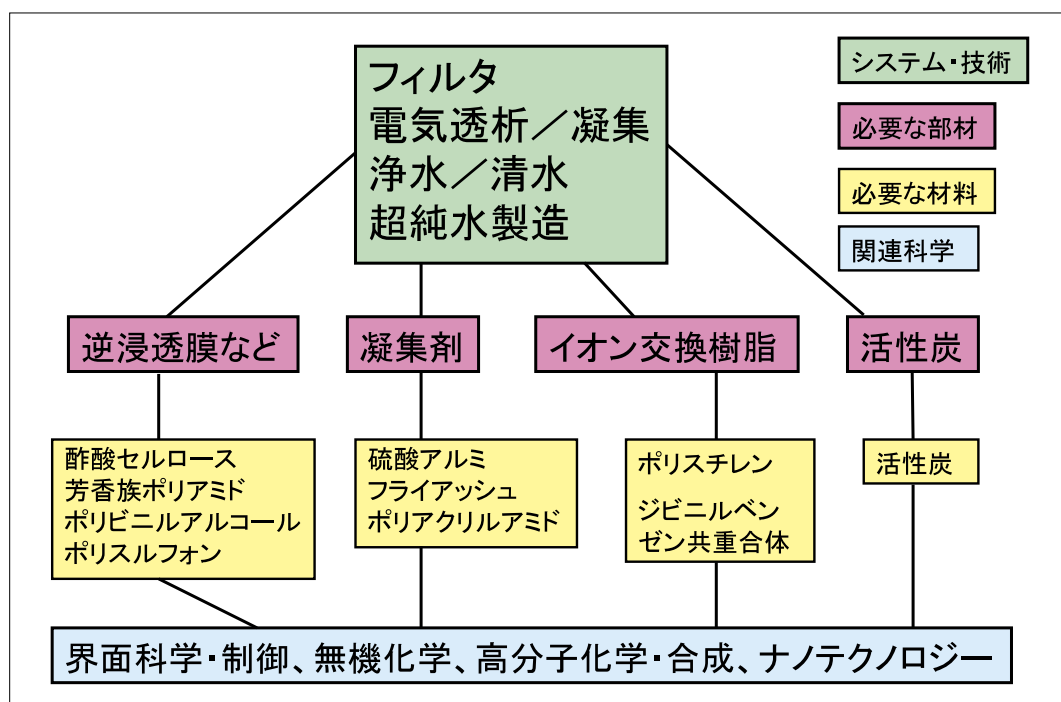


図 8-9 持続的な水の獲得

実施してしまうような膜処理システムである。これを実現するためには、高機能のフィルタの開発が必須となり、ナノ構造制御や界面状態制御などの研究課題が浮かび上がって来る。高機能フィルタ材料のコストダウンと相俟って、フィルタシステムによる水処理が可能となり、持続的な水の獲得へ向けた実用解の一つになるとと思われる。

一方水質管理の立場から、将来的にも水質評価・モニタリング技術が重

要な位置付けにあると思われる。特にバイオ・ケミカルテロに対して、現在の浄水システムはあまりにも無防備である。法規制により定期的な水質評価は義務付けられているが、連続的な評価、すなわちモニタリングの項目が限られているのが現状である。例えば、pH や温度などについては、既に優秀なセンサが開発されているのでモニタリングすることは容易である。これに対し、トリクロロエチレンやダイオキシンなどの環境汚染物質については適当なセンサがないため、モニタリングは不可能である。そこで、環境汚染物質や毒性物質（農薬や重金属などに加え、サリンなどのケミカルテロ物質も含む）を短時間のうちに評価・定量できるセンサの開発が望まれる。

こうしたセンサを実現するためには、環境汚染物質や毒性物質に対する新たな選択性物質の開発が必須となる。しかも、予めどのような毒性物質が混入するか不明である場合も多いため、厳密な意味での高選択性であってはならない。むしろ、一つ一つの選択性物質については幅広い応答性が求められる。これらの選択性物質を多種類・同時に用いて評価・分析することにより、総合的に環境汚染物質・毒性物質の存在が特定される。この際、必ずしも単一の物質だけではなく、複合的な汚染に対しても対応できるようなセンサであることが望ましい。従って、半定量的な解析結果であっても、警報センサのような位置付けで使える可能性がある。このような性質を有する物質の候補として、例えば脂質、糖質、糖タンパク、核酸複合体（アプタマー）などの生体由来物質を挙げることができる。また、個々のセンサを微小なものにし、多数のセンサからの出力が同時に取得できるようなセンサチップのアイデアも大いに参考になる。

センサは、特異性が信条であるが、上記水質モニタリングに用いられる毒性センサにおいては、広い特異性（低い選択性）が選択物質に要求される仕様である。分子設計により一連の選択物質を有機材料から作り出すことも可能である。

次世代システム 4：環境配慮設計（DfE；Design for Environment）

環境配慮設計（DfE；Design for Environment）とは、製品のライフサイクル全体に渡り、省エネや環境負荷低減を意識した製品設計をしようという概念であり、究極のリサイクル技術であると言える。一般的には、製造や輸送・解体などの各段階で LCA 的解析を仮想的に実施して製品設計に反映させる。しかし現実と大きく異なるのは、製品の解体工程である。例えば、現在パソコンはリサイクルが義務付けられており、処理業者において殆ど手作業で分解されている。各部品レベルまで厳密に分解することは難しく、基板上の金などの希少金属は十分に回収できていないのが現状

である。これを解決するためには、例えば、ある刺激を与えた時に、簡単に自分で分解されるような材料（部品）が存在すれば良い。このような機能を持つ材料を「環境調和型知的複合材料」と名付けたが、これは換言すれば、「インテリジェント自己解体材料」とも言える。解体時に、ある刺激を製品に与えると勝手にバラバラになってくれる材料（部品）である。超音波のような機械的な刺激から、電磁氣的、熱的、更には光や化学的なものでも良い。これらの刺激により、材料の物性や部品の形などが変化して、結果として勝手に壊れることを事前に織り込む。これを実現するためには、当然単一の材料では実現できないので、いくつかの異なる特性を持つ材料を組み合わせた複合材料が必要となる。高分子やエラストマー、液晶などが組み合わされた、いわゆる「ソフトマテリアル」と呼ばれる材料が、その候補であると言える。このような材料研究の歴史は比較的浅く、海外でも D f E を輸入製品に義務付ける考え方はあるが、まだ本格研究が実施される段階ではない。国内では、東大・東工大・NIMSなどで検討されている。シーズとしては材料科学であるが、当然ナノテクノロジーを使わなければ実用化は不可能である。また、応用分野としては家電や自動車、IT分野に止まらず、住宅や医療などの分野にも適用可能な材料になる。

環境調和型知的複合材料のイメージを図 8-10 に示す。

現状を考えると、製品レベルで出来上がったものから、何かの刺激を受

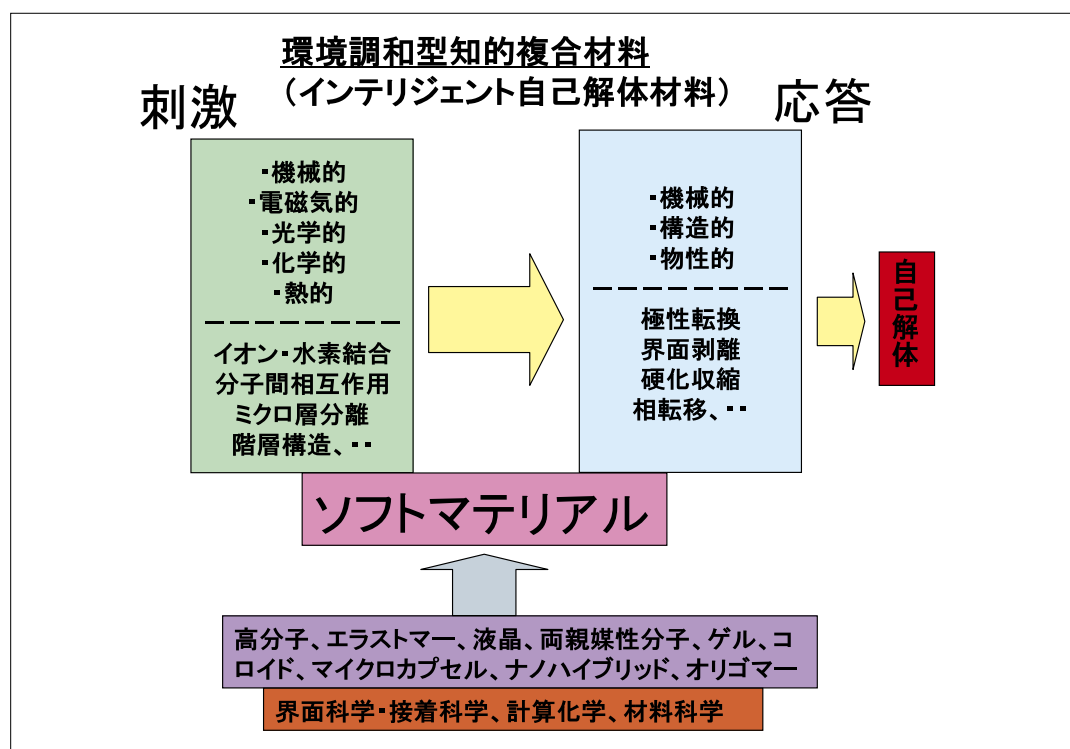


図 8-10 環境調和型知的複合材料のイメージ

けていきなりバラバラになってしまうような材料はまだ存在しない。しかし機能性高分子の中には、生体由来原料を使った生分解性プラスチック（使用後、地中に埋めることにより土壌微生物の働きで自然分解する）、アミノイミド化合物による刺激応答性増粘剤（光や熱の刺激により粘着性が低下し、簡単に剥離する）、ポリペリオキシド（加熱、UV 照射、レドックス、酵素などの作用により、自発的に分解する）などの材料例はある。産業界から製品のリサイクル性を高める意味で強い関心が寄せられている。

自己組織化材料の研究は触媒化学などの分野で強く推進され、高分子材料に止まらず、各種の材料を含む複合材料として展開を始めた。ここで取り上げた環境調和型知的複合材料は、自己組織化の対極にある材料である。環境保全を考えると、今後重要性が増して行く可能性が高い。

②資源開発系産業群

資源には鉱物資源、水資源、植物資源、水産資源など他にも様々なものがあるが、産業からの要求として、ここでは材料科学・材料技術に対する要請が端的に現れている鉱物資源（含む化石資源）開発に関する二つの次世代システムを提案する。まず、エネルギー源としてだけでなく化学工業の主原料でもある化石資源に関し、原料を多様化し化石資源からの脱却を目指す「工業基幹原料の多様化」に必要な研究開発を取り上げる。次に、昨今の BRIC's 諸国の産業発展などに伴う大量消費によって、採掘・安定供給の懸念が拡大している鉱石（金属・無機）資源利用に必要な「低品位・二次資源からの金属・無機原料研究開発」を取り上げる。

次世代システム 1：工業基幹原料の多様化

現代社会において我々が使用・消費する製品には、化石資源を原料とするものが数多くあり、特に化学工業における石油化学製品は、原油（ナフサ）を分解・加工したエチレンやフェノール類を原料とすることに始まる。しかし原油は将来の枯渇可能性や生産量・価格の変動によって、安定的な供給に常に懸念がある。そこで原料を化石資源以外の他の資源へ多様化し、原油の生産・価格変動が起きた際にも影響を最小化し、二次・三次産業が左右されないように備えることが望まれている。原油以外の他の主要炭素資源としては、(1) 植物体であるバイオマスを変換して利用する、(2) 大気中や工業的に大量排出される二酸化炭素を変換して利用する、(3) 二次製品を再資源化して利用する、の3種が考えられる。

(1) 植物体（バイオマス）の変換利用

植物体を構成する主成分は細胞壁であり、「セルロース」、「ヘミセルロース」、「リグニン」の三種からなる。これらは地球上に最も多量に存在する有機物であり、太陽が存在する限り再生産される物質である。この三種を分離・分解して利用することが注目され、すでにバイオ燃料（エタノール）に分解する技術は産業界でも相当に取り組まれている。しかしながら化学工業の基礎原料として、即ち原油を代替する化学工業原料としての利用にも燃料に劣らない規模の極めて大きなニーズがあるが、そのための分離・分解技術は未だ実現していない。そこで、セルロース、ヘミセルロース、リグニンの構造中に存在する炭素間結合を、エチレンやフェノールなど目的の炭素数・基本構造に自由に切断し精製する技術が開発されれば、化石資源を代替する工業基幹原料になり得る。植物から分離・精製されたセルロース自体も、洗剤やパルプ製造への応用、新繊維の開発など、新たな利用分野への展開が期待でき、これら三種を容易に分離・分解・精製する技

術の開発が期待されている。

セルロース、ヘミセルロース、リグニンの三種は複雑に絡み合う構造で存在しており、セルロースの酵素による分解は、セルロースがヘミセルロースやリグニンに覆われているため、大量の酵素が必要となり工業的にはまだ成り立っていない。現在、酸による分解技術の開発が先行しているが、反応制御が困難であり、将来的には酵素や超臨界ガス化、固体酸触媒等による分解技術の実用化が望まれる。また、単糖生成能が極めて高い酵素や、アルカリ領域で活性を示す酵素など数種の有望な菌が見つかり、分解機構の解明が進んでいる。これら分解酵素の遺伝子を取得し、分子レベルでの触媒機構や遺伝子発現制御機構などの研究、細胞壁詳細構造の解明、直接アルコール発酵を可能にする酵母の育種などが重要課題である。また、分離・精製過程においてグリセリン等の副生成物が多量に生じるため、副生成物を有効利用又は出さない技術の開発も望まれる。このような研究を通じ、化学製品の出発原料としての最適な中間体を得る「脂肪・芳香族バイオリファインリーの構築」が求められる。以上から、具体的な研究開発課題は以下に整理される。

具体的な研究開発課題：

- ・分子レベルでの触媒機構解明と新触媒開発（従来の酸触媒法代替）
- ・分解酵素遺伝子発現制御機構の解明
- ・植物細胞壁詳細構造解明
- ・直接アルコール発酵を可能にする酵母の育種・開発
- ・グリセリン等の副生成物有効利用または副生成物を出さない技術開発
- ・化学製品出発原料としての最適中間体を得る「脂肪・芳香族バイオリファインリー」構築

(2) 大気中や工業的に大量排出される二酸化炭素からの変換

バイオマス以外で有用と考えられる二酸化炭素については、大気中の二酸化炭素の他、鉄鋼業に代表される重工業の生産現場で多量に排出される二酸化炭素を回収し、化学的プロセスにより変換する試みが挙げられる。回収した二酸化炭素を高濃度に濃縮し、低エネルギーの化学反応プロセスによって水素化および炭素間結合を構築していくことが課題である。そのためには変換を実現するための反応触媒の開発や、高効率・低エネルギーの最適な反応プロセスを探索し一つ一つ実現していく必要がある。

具体的な研究開発課題：

- ・二酸化炭素回収・高濃縮技術開発
- ・水素化・炭素間結合構築反応開発（新触媒・新反応機構）

- ・反応プロセス最適化（高効率・低エネルギー）

（3）二次製品の再資源化・利用

二次製品からの再資源化・利用については、製品の回収・分離プロセスを考慮した物質循環システムの構築と、再資源化にあたってどのレベルの状態まで分離し構造を変換するのかについての検討が必要である。これは特に低エネルギー且つ将来的な低コスト化の道を拓くための最適化が重要となる。

具体的な研究開発課題：

- ・循環（回収・分離）システムの構築
- ・分離・変換手法（物理分離、化学分離・変換）の開発
- ・物理的分離と化学的分離・変換レベルの目的別最適化

以上を総合的に捉え、技術課題を目的毎に整理し関係を表したものが図8-11である。

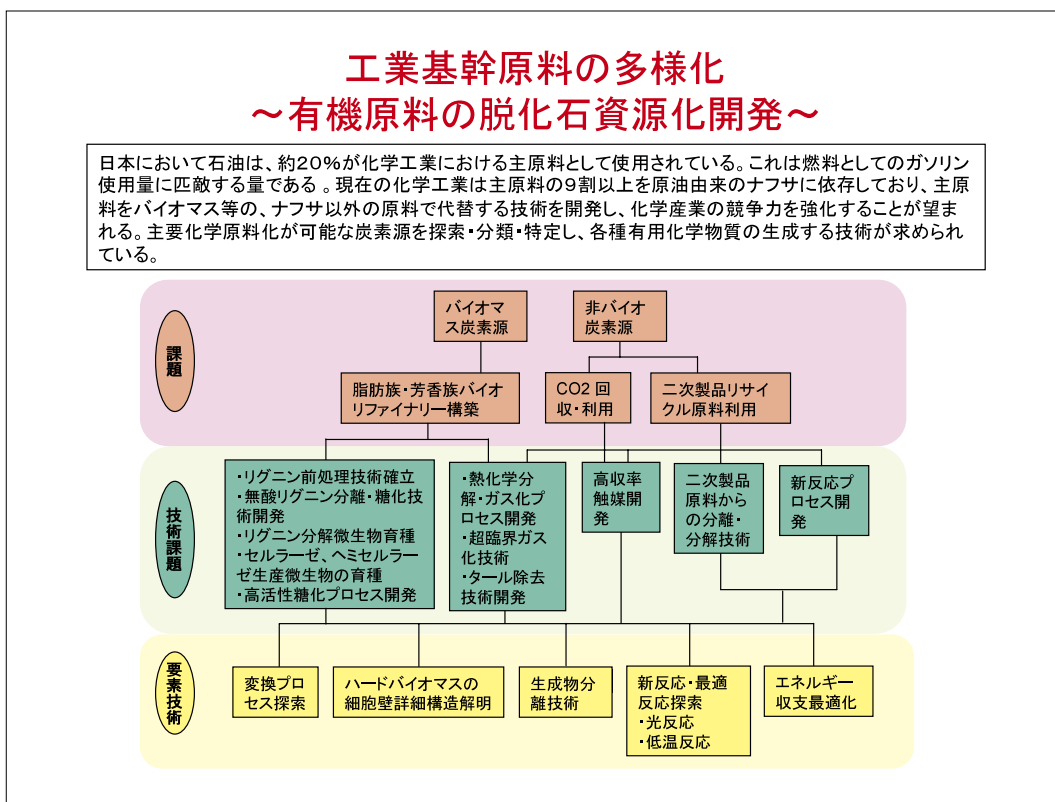


図 8-11 工業基幹原料の多様化 —有機原料の脱化石資源化開発—

次世代システム2：低品位・二次資源からの金属・無機原料研究開発

上記の次世代システム1で挙げたものは、新たな有機資源を得ることを主な目的としているが、金属・無機資源に関しても、低品位・二次資源を新たな原料として取り出して利用するための研究開発が挙げられる。

その背景として、現在の地球上における各種金属資源の埋蔵量とその将来消費について（独）物質・材料研究機構（原田幸明 材料ラボ長）が発表している予測によれば、消費量が2050年までに現有埋蔵量の数倍を超えてしまう金属が多数あることが指摘されている。これまでの金属の使用量と経済成長の関連の解析を基に、これから大幅な使用が予想されるBRIC's 諸国を中心に、2050年までの累積金属使用量の予測が行われているが、その結果、特に埋蔵量の数倍の使用量が予想されるのは、銅、鉛、亜鉛、金、銀、スズ、ニッケル、マンガン、アンチモン、リチウム、インジウム、ガリウムである。いずれも生活の各場面で多量に使用されている製品や、先端電子機器、太陽電池など幅広い範囲で使われている資源ばかりである。資源には「埋蔵量ベース」と呼ばれるものがあり、技術的には採掘可能だが、経済的理由などで採掘対象とされていない資源のことを指している。銅、鉛、亜鉛、金、銀、錫、ニッケル、アンチモン、インジウムに関してはこの埋蔵量ベースさえも超過してしまうことが指摘されている。また、金、銀、鉛、スズは2020年の時点で現有埋蔵量を超えることが予測されており、鉄や白金についても2050年には現有埋蔵量を超過するか、またはそれに匹敵する消費が予測されている。

このように全世界的な資源制約は、これまで予想されていた以上に深刻である。物質・材料研究機構の計算では、埋蔵量の数倍の消費量が予測されており、鉱山の探索や開発技術が飛躍的に拡大されない限り、現用の材料技術を基礎とした資源利用の方法では地球規模の経済発展を賄うことが難しくなり、資源の国際的な分配の問題に転化しかねないことが指摘されている。これらの問題の解決策として三つのポイントが提示されており、(i) 利用方法を徹底的に効率的なものにしていく「減量」、(ii) リサイクルを極限まで行う「循環」、(iii) アルミニウム、シリコン、鉄など、普遍的に存在する資源を用いることによる、他の資源の代替材料技術の開発、である。これらに必要な技術開発を急速に進めることの重要性が警告されている。

また、上記(ii)のリサイクルに関しては、法規制の課題とセットで検討することが重要である。各種リサイクル法と産業廃棄物処理法の運用、用語の定義、廃棄物の認定制度や有価物としての取り扱い方法、費用負担・税制など、物質循環を環境と経済のバランスを取りながら如何にして実現していくかについて、並行して取り組まなければならない。

このような状況を踏まえ現在の資源開発系産業に目を向ければ、近年の鉱山開発では、過去の開発の結果、高純度・高品位な利用しやすい形態で産出される資源は徐々に減少しており、低純度で不純物を多く含んでいる鉱石や、目的とする資源が他の鉱石と複雑な形態を形成したままの鉱物資源、いわゆる複雑鉱石などの低品位な鉱石の重要性が注目視されている。このような低品位鉱石は、従来の精製・分離・精錬プロセスでは利用することができないため、新たな精製・分離・精錬を実現するための基礎的な科学・技術開発が望まれている。その他にも、これまでほとんど目を向けられてこなかった未利用の資源、例えば、重質油の残渣に含まれている有用金属を回収することや、海水・火山性地下水に含まれている希少金属を回収し利用する新たな科学・技術の開発が期待されている。また、情報・通信・エレクトロニクス産業において大量に廃棄される製品を回収し、それを分解・分離することによって有用元素を取り出し、再び新たな工業製品として利用するといった、いわゆる「都市鉱山」の有効利用が注目視されている。

わが国は資源を持たない資源小国であるが、上記に挙げたような低品位鉱物資源や未利用資源、二次製品を有効利用するために必要となる基礎的なサイエンスとプロセス技術には国際的な強みを持ち、また、わが国における機械産業や情報・通信・エレクトロニクス産業の発展の結果として、日本国内に既に存在している資源、いわゆる都市鉱山に含まれる資源量は、世界有数の資源国に匹敵するといわれている。以上から、これまでは利用することができなかった低品位・二次資源から金属・無機原料を新たに利用するための研究開発戦略を提案する。

取り組まなくてはならない課題として、(1) 低濃度鉱石・複雑鉱石などの低品位鉱石、鉱山廃材からの選択的相互分離技術の確立、(2) 未利用資源からのレアメタルを含む金属の分離・回収技術の開発、(3) 二次資源・製品廃棄物等に含まれる有価金属の回収技術と高効率分離プロセスの開発、が挙げられる。以下に各具体的な研究開発課題を挙げる。

(1) 低濃度鉱石・複雑鉱石などの低品位鉱石、鉱山廃材からの選択的相互分離技術の確立

- ・ 精製・分離プロセスの高度化（鉱石からの硫黄・ヒ素分離技術、浮遊選鉱技術）
- ・ ベースメタル（鉄、銅、アルミニウム、鉛、亜鉛等）に付随するレアメタルの回収技術開発

(2) 未利用資源からのレアメタルを含む金属の分離・回収技術の開発

- ・ 重質油残渣・廃触媒、海水等からの有用金属回収技術

- ・スクラップ、ダスト、スラグの有効利用（製鋼スラグからのリン・マンガン分離・回収技術、電気炉ダストからの亜鉛分離回収技術、鉄鋼スクラップからのレアメタル回収技術）
 - ・海水汚泥、下水からのリン回収技術および肥料化技術
- (3) 二次資源・製品廃棄物等に含まれる有価金属の回収技術と高効率分離プロセスの開発
- ・情報・通信・エレクトロニクス産業における化合物半導体などに代表される「異種元素が結合した金属間化合物」や「異物質が界面結合した複合材料」の分離・回収技術開発
 - ・分離・回収・再利用プロセス最適化（選択的分離・濃縮技術、希釈型 / 抽出型、物理・機械的分離・化学的分離段階の最適化指針構築）

さらに、これらに共通する基礎的な要素技術として以下が挙げられる。

- ・表面科学、流体力学等を利用した選択活性や抑制、吸着・凝集・分散制御技術（新吸着材料開発、超臨界流体利用）
- ・新分離機構、反応場操作（微粒子と粗粒子、ミネラル粒子の分離効率化、液相からの相互分離）
- ・湿式精錬・抽出材料開発、バイオリッチング（有用微生物種の探索・開発）
- ・磁場・電場利用分離技術
- ・粉碎、衝撃波、超音波分離
- ・回収鉱物の資源としての質の評価
- ・マテリアルフロー解析、資源開発シナリオ評価

また、上記に取り組む上で常に考慮しなくてはならない課題が、精製・分離・選鉱等に伴う廃水処理技術や有害物質の無害化技術などの、低環境汚染技術開発である。

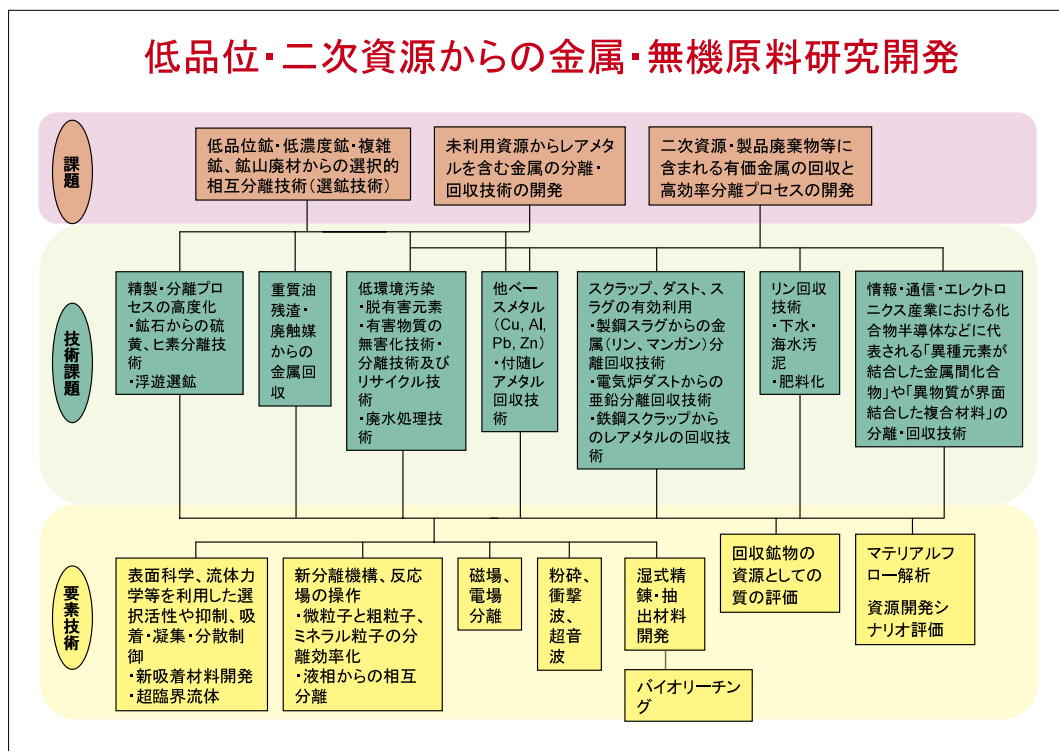


図 8-12 低品位・二次資源からの金属・無機原料研究開発

参考文献

- ・[物質・材料研究機構 発表資料] 2050 年までに世界的な資源制約の壁
平成 19 年 2 月 原田幸明
- ・[日本学術会議 総合工学委員会 提言] 鉱物資源の安定確保に関する課題とわが国が取り組むべき総合的対策 平成 20 年 7 月
- ・[第 2 次循環型社会形成推進基本計画] 平成 20 年 3 月 閣議決定
- ・[JST-CRDS 戦略プロポーザル] 戦略イニシアティブ「元素戦略」(CRDS-FY2007-SP-04) 平成 19 年 10 月

③情報通信系産業群

情報通信機器が処理する情報量は、特にその処理速度および情報の蓄積量において年々指数関数的に増大し続けている。またその使用される環境は社会基盤としての国や基幹産業の幹線系統としてだけでなく、ユビキタスという言葉に代表されるように、車をはじめ個人の生活基盤にまで深く浸透していく。総デジタル化社会の構築へ向けて、国や産業界の幹線系統およびユビキタスとして機能する端末情報機器の情報処理量および処理速度は更に指数関数的に増大していく。それを可能とする一方において超低消費電力化デバイスの開発と、特にユビキタスにおいてはその高度情報処理機器を長時間に渡って稼働させるための電源開発は絶対に避けておれない。

これらの問題を解決するため、情報の伝送、処理、記憶、電源開発の全てに関わり、関連するデバイスの高機能化が社会から要請されている。これらの要請に応えるには現状のデバイスの改良や改善あるいはアルゴリズムの新開発では応えることはできず、用いる材料のイノベーションがなくてはじめてブレークできるものである。

Si-CMOS を中心とするエレクトロニクス分野では、微細化、集積化に向けて様々な技術が開発されてきた。しかし現状の CMOS 微細化をこのまま推し進めると、数原子層レベルの構造を制御しなくてはならないことになり、特性ばらつきの増大など微細化の物理限界が顕在化してくる。また集積化に伴う消費電力の増大も大きな問題となっている。次世代エレクトロニクスシステムでは新概念や新材料を含む新しい技術の導入が必須であり、そのための研究開発は今から進めておかなければならない。

次世代エレクトロニクス材料は多くがナノエレクトロニクスと称され、要求される機能としては、デバイスの切り口からは、「記憶機能」、「論理機能」、「情報伝達機能」の3つに分類できる。一方、プロセスの側面からは、「エネルギー変換・貯蔵機能」および応用（適用）を意識した要素技術として、「リソグラフィ技術・実装技術」が上げられる。

以上の機能・適用に対して、材料面からは、低次元材料、機能性高分子材料、自己組織化材料、スピン機能材料、複合金属酸化物材料などが考えられ、さらに今後、様々な異種材料を組み合わせる場合、その界面構造の制御が重要になる。

これらの機能と材料に対応する具体的なデバイス、プロセス技術を上げると、表 8-2 のようにまとめられる。

表 8-2 ナノエレクトロニクス材料に要求される機能と材料および応用（適用）

	記憶機能	論理機能	情報伝達機能	エネルギー変換・ 貯蔵機能／ 熱制御機能	その他(要素技術の例) リソグラフィ 技術適用機能 実装技術適用機能
低次元 材料	ナノメカニカルメモ リ	半導体ナノワイヤ FET CNTFET グラフェンFET グラフェンリボン FET	CNT配線(含ビア) グラフェン配線 金属ナノワイヤ	量子細線、量子ドッ ト構造熱電変換材 料 CNTキャパシタ	高屈折率液浸用液体 のナノ粒子(コンポ ジット材料) 金属ナノコンポジット 粒子 ナノソルダ合金、 CNT
機能性高分子 材料	高分子メモリ	高分子論理素子	超低誘電率絶縁膜	高熱伝導性高分子 材料 有機ラジカル電池 材料	超高解像レジスト、 新種分子レジスト ナノインプリント用 高分子 ポリマの電氣的・機 械的特性制御
自己組織化 材料	カーボン系低次元 材料		選択的成膜技術 選択的エッチング 技術 選択的洗浄技術		従来のリソグラフィ を超える超微細パ ターン形成 寸法制御性の向上 高性能キャパシタ
スピン機能 材料	スピン注入 MRAM	半導体スピン輸送 強磁性半導体 強磁性金属 ハーフメタル マルチフェロイッ ク材料 希薄磁性半導体 (DMS)		低次元量子スピン 系熱伝導材料	
複合金属 酸化物材料	強誘電体材料(PZT) 高誘電体材料(BST) 1Tr FeRAM ヒューズ・アンチ ヒューズメモリ	マルチフェロイッ ク材料 強相関電子材料 (ペロブスカイト型 マンガン酸化物) 新規相変化材料		酸化物熱電変換材 料	高性能キャパシタ
異種材料 界面	電子とスピン間の 界面およびコンタ クト制御 誘電体界面	電子とスピン間の 界面 およびコンタクト 制御			

実用化時期（予想）

短期（5年～10年）

中期（10年～15年）

長期（15年～）

次世代システム1：超微細化・超集積化・超低消費電力化ナノエレクトロニクス --- デバイス技術

将来のエレクトロニクスに要求されるデバイス技術を機能別に分けると、「記憶機能」、「論理機能」、「情報伝達機能」の3つに分類できる。一方、これらを実現する、新規材料候補としては、低次元材料、機能性高分子材料、スピン機能材料、複合金属酸化物材料、自己組織化材料などが考えられる。また様々な異なる材料を組み合わせる際には、異種材料界面の制御が重要となる。ここでは以上のうち、低次元材料、機能性高分子材料、スピン機能材料について、今後の具体的な研究開発課題を考える。

(1) 低次元材料

低次元材料の代表的なものは、ナノ微粒子（ゼロ次元）、カーボンナノチューブ：CNT（一次元）、グラフェン（二次元）などである。低次元材料の記憶機能や論理機能への適用には、例えば CNT が持つバリスティック伝導性を利用した高速論理素子や、ナノワイヤが持つ性質を利用したサウンディングゲート型デバイス、新規ヘテロ構造デバイスなどが考えられる。また情報伝達機能への適用には、CNT の持つ高電流密度耐性、高熱伝導性、高機械強度性を利用したデバイスの配線やビア埋め込みなどが考えられる。

CNT を高性能素子に適用する場合の具体的な研究開発課題としては以下のものがある。

- ・半導体バンドギャップの精密な制御
- ・導電型（n 型と p 型）とキャリア濃度の制御
- ・位置と方向の制御
- ・接触抵抗の制御

このうち、バンドギャップの制御には、CNT の直径の制御及びカイリティ（原子配列）の制御が必要になる。通常バンドギャップは CNT の直径に反比例するため、直径の細いものが望ましい。キャリア濃度の制御には、ドーピングに関するメカニズムの理解が不可欠である。所望の位置への配向成長は最も難しい課題であるが、CNT を電界中や結晶方位に沿って成長させることで、ある程度の配向性が得られるという結果も報告されている。デバイスへの応用では、CNT と金属電極間の接触抵抗低減のために、ショットキー障壁の低い金属を開発するか、CNT 側を高濃度にドーピングする必要がある。CNT を FET に応用する場合、以上に加えて表面、界面の課題が残っている。CNT は単位量あたりの表面積が大きい材料であるので、伝導特性は表面状態の変化に非常に敏感で、デバイスのノイズの原因になる。また、CNT の側壁は化学的に安定なはずだが、現実には表面に欠陥があり、伝導特性に影響を及ぼす。

グラフェンについては、トランジスタのチャネル部に使うことで二次元の高移動度が期待されるが、CNT のような配向性の問題はないものの、グラフェン特有のエッジ保護の問題、絶縁膜との界面制御の問題などが残っている。

(2) 機能性高分子材料

機能性高分子材料は、将来の分子メモリや分子ロジック素子に適用され

る可能性に加えて、ナノエレクトロニクス素子作製に不可欠な超微細リソグラフィプロセスやエッチングプロセスへの適用可能性も高い極めて重要な材料である。

機能性高分子材料をデバイスに適用する場合、有機分子系であることから、ある程度自由な設計が可能になる。また、無機半導体に比べてサイズが小さいことから、より高密度の集積化も期待される。一方、問題点としては、有機系であることから、劣化による信頼性の問題が存在する。しかし最大の問題は、特性のばらつきが大きいことであり、その主な原因は分子レベルの良好なコンタクトが実現できないこと、つまり分子末端と外部の電極とを配線することが難しいことである。

以上から具体的な研究課題としては以下のものがある。

- ・より低エネルギーの電子でスイッチングを可能とする外部電極とのコンタクト形成技術
- ・その実現のための原子レベルのコンタクトに対する理解

(3) スピン機能材料

スピン機能材料は、電子が持つ電荷に加えて、スピンの有する機能・自由度を素子の記憶や演算に用いる材料である。すでにスピン注入 MRAM などの記憶素子で実用化を目指した研究が進んでいるが、ロジックデバイスへの適用には多くの課題が残っている。

通常使われるシリコンなどの非磁性半導体では、キャリアが持つスピンの向きがそろっていないため、その影響は見えにくく、半導体中のスピンについてはあまり取り上げられなかった。しかし、最近、半導体と磁性体の複合構造や希薄磁性半導体など、スピンの影響が現れる新材料が作製されるようになり、スピントロニクスの分野が注目されるようになった。

スピン機能材料は数多く知られているが、主なものとしては、金属強磁性体 (Co、Ni、Fe など)、ハーフメタル (CrO_2 、ホイスラー合金など)、マルチフェロイック材料 (BiFeO_3 、PZT/ NiFe_2O_4 など)、希薄磁性半導体 (CdMnTe など) などがある。

金属強磁性体の研究課題としては、界面の安定性、ショットキー障壁の制御などが上げられる。

ハーフメタルに関しては、再現性ある材料作製方法とともに、半導体材料と整合性の良い材料、特に界面の制御技術の開発が必要になる。

マルチフェロイック材料に関しては、マルチフェロイック性の完全な理解、特に薄膜微細化した際の理解が不可欠である。もしマルチフェロイック材料を用いて電界書き換えが可能な記憶素子が可能になれば、多値化のみならず、スピン注入磁化反転技術を超える低消費電力化が期待できる。

希薄磁性半導体では、エレクトロニクス材料と整合性のよい材料のキュリー温度 (T_c) を室温以上に上げることが求められる。

以上の他にスピン機能材料の共通の研究課題としては、長いスピン緩和時間を持つ半導体材料の開発、効率的なスピン注入を可能にする材料特性と界面の形成技術などが上げられる。

いずれにしても、この分野では、原子操作により欠陥密度を限りなく減らした完全結晶に近いスピン機能材料の開発を可能にする結晶成長法の実現が鍵になるであろう。それが実現した暁には、究極の自己修復機能を持つ材料や希少元素を用いない高透磁率材料の開発が実現することが期待される。

次世代システム2：超微細化・超集積化・超低消費電力化ナノエレクトロニクス --- プロセス・実装技術

超微細化・超集積化・超低消費電力化ナノエレクトロニクスデバイス実現のためには、それを作製するためのプロセス技術や実装技術、さらに電源、放熱を含むエネルギー変換、蓄積技術が極めて重要であり、そのための材料の研究開発が必要である。

作製プロセスとして微細化の限界に直接関わるのはリソグラフィ技術である。作製できる最小パターン寸法は、リソグラフィにおける投影光学系の解像度で決まる。解像度向上に直接効果のあるのは、露光波長の短波長化、および光学系の高NA（開口数）化であるが、これ以外にも、近接効果補正や位相マスクによる超解像などの技術が導入されている。また投影光学系を用いる方法以外に、近接場露光やインプリントリソグラフィ等がある。これらのリソグラフィに関連する材料として、今後の研究開発が重要となるものは、液浸液体材料、レジスト材料、インプリントリソグラフィ用材料等である。

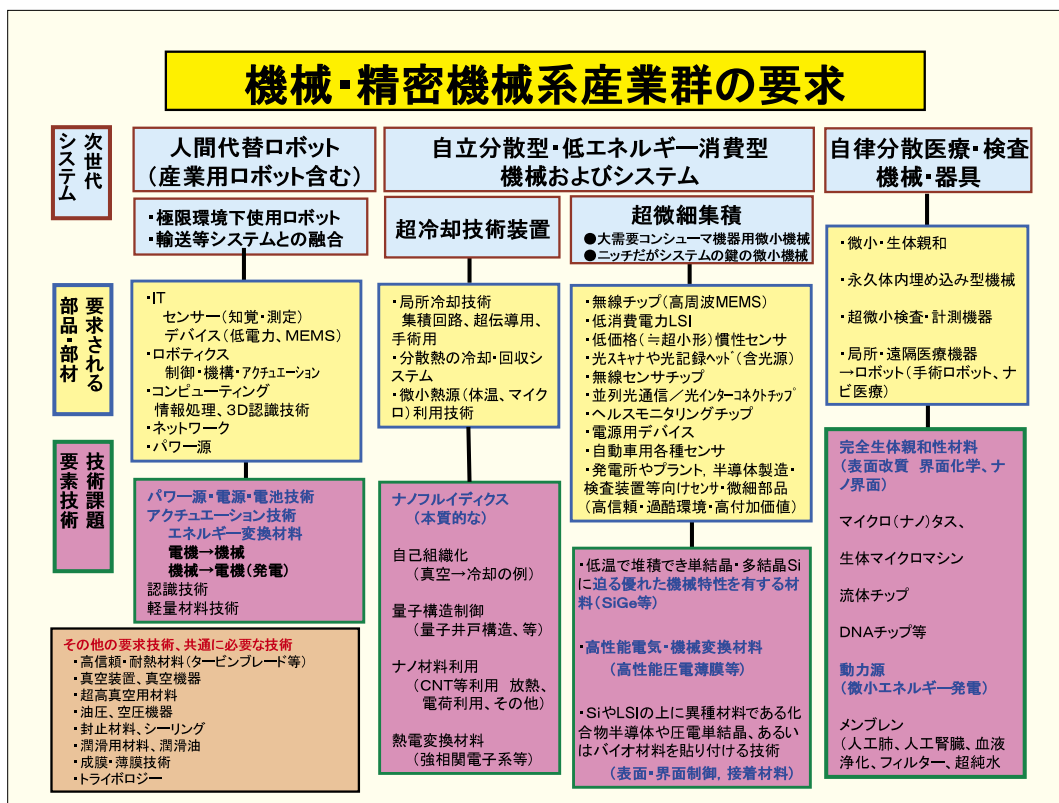
高NA化の手段の一つとして液浸リソグラフィがある。ここで用いられる液体の屈折率は高い程よいが、通常の液体では高屈折率に限界がある。また当然のことながら、使用波長に対して透明であることが必要であるが、短波長領域で高屈折率かつ透明の液体は実現が難しい。ナノ粒子液体、あるいはナノコンポジット材料により、これらの要求を満たす高屈折率液浸液体を実現できる可能性があるが、液体の供給や回収（粘性と関連）、非腐食性、レジストとの相性（濡れ性）等多くの課題がある。

超微細化に伴い、レジストパターンの形状と寸法の制御性が問題となってくる。誘導自己組織化（Directed Self Assembly; DSA）により、位置、寸法、形状を制御する方法が検討されている。自己組織化により、リソグラフィより微細なパターンサイズと優れた制御性を実現できる可能性がある。

一方、微細構造を転写する技術としてナノインプリント・リソグラフィがある。数ナノメートルレベルの転写が可能のため、超微細パターン形成技術の一つとして注目されている。この技術では、パターンを転写する光硬化樹脂材料の開発が課題である。

以上から、リソグラフィ関連材料の研究開発課題として以下が挙げられる。

- ・液浸リソグラフィ用高屈折率ナノ粒子液体の開発
- ・超微細パターン形成用自己組織化材料の開発
- ・ナノインプリント・リソグラフィ用高分子材料の開発



集積化に伴う消費電力の増大と熱発生は、今後大きな問題となることが予想される。これに対する対策は、一つは低消費電力化による熱発生低減と、もう一つは発生した熱を効率的に逃がすまたは再利用する方法である。後者に対しては、熱伝導率の高い材料の開発が必要であり、特に熱設計の観点からはナノ領域での熱制御が必要となる。カーボンナノチューブやグラフェンは高い熱伝導率を持っており、これらを配線やインターフェイス材料として用いることにより、熱特性を改善できる可能性がある。またパッケージ材料としては、絶縁体でかつ熱伝導率が高い必要がある。電気伝導と熱伝導の関係からは、これは相反する特性であるが、低次元構造の利用等により実現できる可能性がある。一方、熱電変換により、パッケージレベルでの熱回収システムもあり得る。この場合には極めて高い熱電変換効率（ゼーベック係数）を持つ材料の開発が必要である。この場合は上記とは逆で、熱伝導率が低く、電気伝導率の高い材料が必要である。以上から研究開発課題として以下が挙げられる。

- ・ ナノ構造制御による高熱伝導率材料の開発
- ・ ナノ構造制御による高効率熱電変換材料の開発

④機械・精密機械系産業群

機械・精密機械系産業群は、電気機械、輸送機械、精密機械、一般機械等を含み、ハードウェア、ソフトウェアの双方を必要とし、マイクロスケールの制御からナノスケールに至るまで、広範なスケール、広範な産業に亘り、ありとあらゆる材料群に支えられている。その中から注目すべき次世代システムとして、人間代替ロボット、自律分散・低エネルギー消費型機械およびシステム、自律分散型医療器械・検査機械・器具の3つが抽出された。3つのシステムとも、分散型、種々の環境下、自律型という共通点がある。機械・ロボットの進む主要な道の一つであると考えられる。

次世代システム1：人間代替ロボット

最近の目覚ましいヒューマノイド型ロボットの進展により、人間の思考、行動や物理的な力を強化・支援することが可能となった。ロボットの用途は産業等の合理性の追求が主であり、その基幹技術として、エネルギー源、構造材料、アクチュエータ、制御、センサ等の研究開発が行われている。ここでさらに将来へ向けて、これまで限定的にしか展開がなされていない極限環境下での積極使用や、医療・介護等の現場での人間の役割の代替、輸送等のシステムとの融合まで、広範な用途のシステムが求められる。

産業からの具体的な要求として、①これまでにない（あるいは限定的であった）用途へのロボットの展開、②現状からの飛躍と輸送等のシステムとの融合の2点が挙げられる。

①これまでにない（あるいは限定的であった）用途への展開

特に極限環境下でのシステムにおいて、人間の作業を代替する機械技術やロボット技術は必須である。現在でももちろん行われているが、特に、原子炉、宇宙、劣悪環境、資源開発、砂漠、地中、深海、体内等の対象へのさらなる積極的な展開のための研究開発が必要である。それらに貫く主な要点は極限環境下で利用できる材料技術と電源技術である。ロボット技術の主流は認識、感覚、制御、機構であるが、それらとは別の問題点も多い。

②現状からの飛躍と輸送等のシステムとの融合

現状の機械・ロボット開発からの飛躍の一つとして、輸送との一体化や家庭でのロボットの使用が挙げられる。自動車は機械技術の結晶ではあるが、将来はロボットと自動車や輸送機器との区別がなくなっていくであろう。そのために先回りして研究開発しておくべき要点は、パワー源・電源・電池技術、エネルギー変換材料（電気→機械、機械→電気）、軽量化技術、立体（3D）認識技術等である。

上記の中で焦点となる技術として、パワー源となる電池・電源技術、エネルギー変換材料技術、軽量材料技術等が挙げられる。

次世代システム2：自律分散型・低エネルギー消費型機械システム

機械・精密機械を必要な場所・用途に応じて分散して使用する流れは確実に加速する。そのような中、超微細集積技術の必要性は益々高まる。また、各種機械やコンピューター等を分散使用する際には、効率的な冷却技術や装置が必須となる。

超微細集積技術は、産業ニーズと技術的必然性のある方向に向かう流れがより強まることが予想される。機械、MEMS、LSI、ナノエレと区別してやっても発展はない。エレクトロニクスを駆使して、高度な機能を実現する方向に技術が発展する。近い将来、LSI 技術の発展により、非常に複雑なことがワンチップでできるようになる。よって、マイクロの領域では電気・機械変換材料が性能や機能を律速する。プロセス適合性のある高性能圧電薄膜などの実現が切望されている。

最も大きい産業からの要求は、大需要コンシューマ機器用の微小端末である。携帯情報機器等の巨大な市場の将来へ向け、基礎基盤からの技術構築が必要である。要求される部品・部材は、無線チップ（主に携帯情報機器用）、超低消費電力 LSI（不要部分の電源完全遮断）、超小型慣性センサ等である。最先端 LSI と MEMS をモノリシックに集積化する技術や、低温で堆積でき単結晶・多結晶 Si に迫る優れた機械特性を有する材料（SiGe 等）が必要である。

また、ニッチだがシステムの鍵として重要な微小機械も集中的な研究開発に値する。要求される部品・部材はエンジン・燃料電池・モータのための各種センサ、発電所やプラント、半導体製造・検査装置等のセンサや微細部品（高信頼性・過酷環境・高付加価値）であり、要素技術として、SiC、サファイア、ステンレス鋼ベースの MEMS、さらにはそれらを SiC や GaN ベースの IC と集積化する技術、高信頼パッケージング技術等が挙げられる。自動車、発電プラントなどに使われ、細やかな制御で省エネルギーや CO₂ 削減に貢献する。自動車の燃費向上では、実際にはセンサ・エレクトロニクスによる貢献が大きいと思われる。

さらに、大需要コンシューマ機器用の微小端末と、ニッチだがシステムの鍵として重要な微小機械に共通して要求される部品・材料として、光スキャナや光記録ヘッド・光源まで集積、並列光通信／光インターコネクトチップ、無線センサチップ（センサネットワーク用、使い捨て医療検査用）、ヘルスマニタリングチップ、電源用デバイス（超小型燃料電池、発電チップ等）がある。要素技術として、シリコンや LSI の上に異種材料である化合物半導体や圧電単結晶、あるいはバイオ材料を貼り付ける技術（表面・界面制御技術、接着材料）、高性能電気・機械変換材料（高性能圧電薄膜等）が重要である。



図 8-15 超微細集積

微小機械は今後、LSIと集積化せざるを得ないため研究開発のリスクとハードルが高い。産業界からは、「欧州で半官半民の研究拠点が取り組んでいるようなことに投資すべき」との意見が多い。上述の内容である。

自律分散型・低エネルギー消費型機械システムの要点のもう一つとして、効率的な冷却技術や装置がある。

産業から必要とされる自律分散・低エネルギー消費型システム 冷却装置・機械

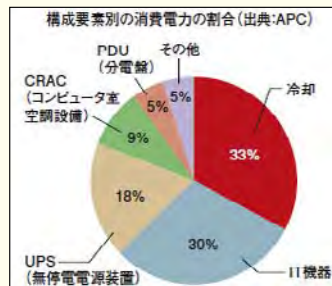
・ITの課題 → 高速化、発熱量の増加、消費電力 → 省電力(チップ、筐体、ソフトウェア)
→ 省電力のためにも、さらなる高速化のためにも、**熱処理と冷却技術がキーテクノロジー**。
・医療応用(外科手術等)、発電用(集光型発電の高効率化、各種発電の超高効率化)等からも求められている。

ナノ的(量子効果やナノ材料)冷却

・太陽光発電の冷却による超高効率化(IBM) → ここでは薄膜型
・量子トンネリング冷却
・(断熱)高伝導率インターフェース技術(IBM) LowK材料 自己組織化真空技術
・スピンと熱伝導

ナノフルイデックス系

ナノフルイデックスやナノ流体を応用した冷却システムの研究開発
液体冷却に勝るものは(たぶん)無く、ナノフルイデックス(ナノ流体の制御)が鍵
・ナノ流体(ナノ粒子浮遊液体)での高伝導率、冷却技術(リーズ大学・英国)
・ナノフルイデックスの応用 (コロンビア大学、アルゴンヌ研究所、インテル)
・マイクロ水冷技術



検討中

・マイクロヒートポンプ
・エントロピーの逆行
・熱を光に変えればすごい冷却になる。
究極のペルチェ素子 発光再結合 等々

磁気冷却

固体の磁性体に磁場をかけたり切ったりして動作する磁気冷凍法。環境汚染の心配なく、材料によって、常温から極低温域までカバーが可能。磁場に対して大きな磁気熱量効果の得られる新規物質が望まれる。
・磁性体ナノ粒子、熱伝導解析

種々の冷却システム開発

・多孔質体を用いた熱除去
・統合冷却システム
・熱輸送デバイス開発
・二酸化炭素冷媒、
・冷熱蓄積
・光触媒による建物の冷却
・熱音響
・レーザー冷却
・将来の量子コンピューター向け冷却 候補は多い

図 8-16 冷却装置・機械

ITの課題として、高速化・発熱増加・大消費電力を省電力化することが急務である。さらなる高速化のためにも熱処理と冷却技術が鍵となる。多くの次世代冷却技術が提案されてきているが、用途や市場は膨大であり、広く研究開発がなされるべきである。また、医療応用(外科手術等)、発電用(集光型発電の高効率化、各種発電の超高効率化)等からも求められている。

次世代システム3：生体適応・自律分散型医療デバイス・システム

医療・検査の将来において、機械・デバイスが果たす役割は非常に大きい。中でも医療・検査がオーダーメイド化、分散化していく中での、自律分散型医療デバイス及びシステムは、この分野の将来を支える技術である。遠い将来には、iPS細胞などを用いて自分の細胞から必要とされる臓器・器官・組織を作製することが可能になると思われる。しかしこの10年間を考えると、やはり人工的な材料や部品を用いたデバイス・システムが必要になる。産業から要求されるデバイス・システムは、永久体内埋め込み型デバイス(人工臓器・器官・組織)、超微小検査・計測機器・医療チップ、微小体内動作系システム、局所・遠隔医療器械(手術ロボット、ナビ医療)、などである。

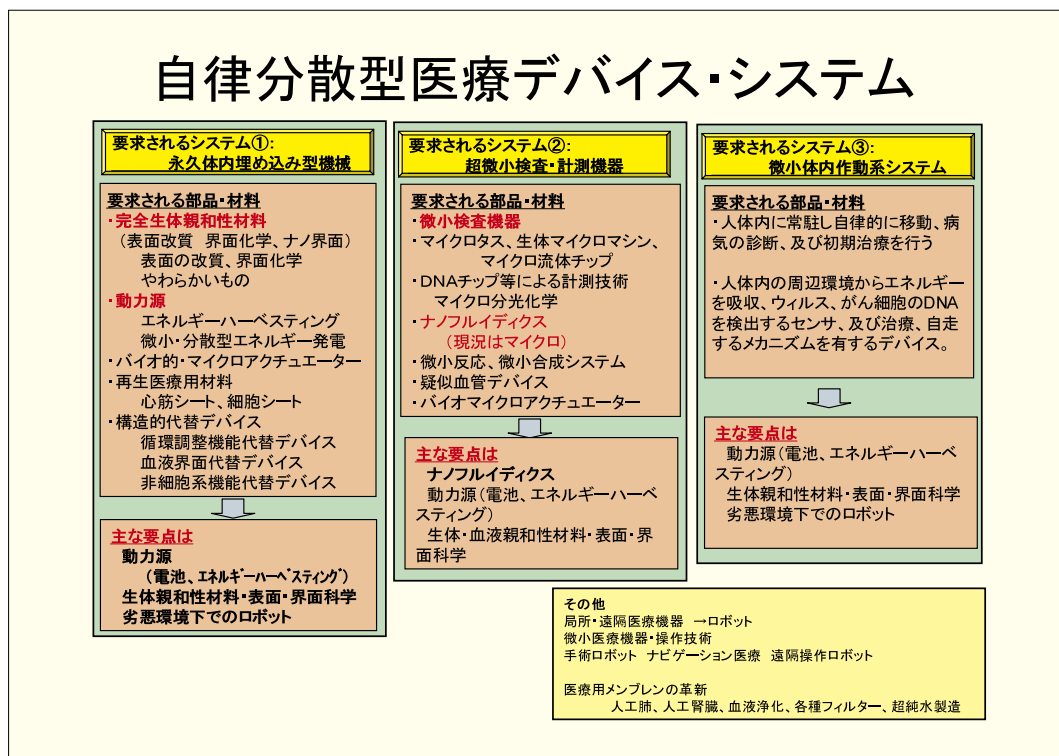


図 8-17 自律分散型医療デバイス・システム

既存の体内埋め込み型機械は、人工心臓や人工肺程度であり、手術中や移植臓器が提供されるまでの緊ぎ的な使われ方しかされていない。一方、長期間埋め込まれているものは、人工関節や人工骨、人工歯根などの金属・セラミックスをそのまま使ったものであり、複雑な機能や作用を具備した機械は実現していない。そこで、永久体内埋め込み型機械を実現するために要求される部品・材料として、完全生体親和性材料（表面改質・界面化学・ナノ界面）、動力源（エネルギーハーベスティング、微小・分散型エネルギー発電）、バイオ的マイクロアクチュエーター、再生医療用バイオ材料（心筋シート・細胞シート）、生体機能代替医療材料、構造的代替デバイス（循環調整機能代替デバイス・血液界面代替デバイス・非細胞系機能代替デバイス）などが挙げられ、主要要素技術および要点は動力源、生体親和性材料・表面・界面科学、材料工学、高分子化学、免疫学、ナノテクノロジー、劣悪環境下でのロボット技術、などとなる。

ベッドサイドや家庭内での医療・検査を考えると、より小さな装置が要求される。小型化が低コスト化にも繋がり、生体検査そのものがより身近な存在へと変貌することになる。超微小検査・計測機器・医療チップに要求される部品・材料として、微小検査機器、マイクロタス・生体マイクロマシン、DNA チップ、マイクロ／ナノセンサ等による計測技術（マイク

ロ分光化学)、微小反応、微小合成システム、疑似血管デバイス、バイオマイクロアクチュエーター、DDS 等が挙げられる。主要要素技術および要点はナノフルイディクス、MEMS、動力源(電池、エネルギーハーベスティング)、生体・血液親和性材料・表面・界面科学である。

微小体内動作系システムに要求される部品・材料として、人体内に常駐し自律的に移動、病気の診断、及び初期治療を行うチップや機器、人体内の周辺環境からエネルギーを吸収し、ウィルス、がん細胞の DNA を検出するセンサ、及び治療、自走するメカニズムを有するデバイスが挙げられる。主要要素技術および要点は動力源(電池、エネルギーハーベスティング)、マイクロ/ケミカルアクチュエータ、生体親和性材料・表面・界面科学、劣悪環境下でのロボット技術が挙げられる。

共通で重要な要素技術として、完全生体親和性材料、動力源(微小エネルギー発電等)、マイクロフルイディクス、表面界面科学が浮かび上がる。

なお、デバイスではなく、材料として高機能な医療材料も将来重要である。例えば、組織や臓器の再生を促す人工細胞骨格材料や生体適合性の高い接着材料(瞬間接着剤; 縫合や骨・歯の接合、止血など)、効果の高い増毛剤などの複合材料である。より患者に負担の掛からない医療を目指すべきである。

⑤輸送系産業群

輸送系産業群は、現在、日本の産業の国際競争力を牽引する代表的な産業である。輸送系産業群の中には、航空機、船舶、鉄道および自動車などが含まれる。中でも、最終製品の自動車と自動車部品を併せた自動車関連製品が輸出額および貿易収支の黒字において占める割合は大きく、現在の日本の産業の国際競争力を牽引している代表的産業は、自動車産業である。将来において日本の国際競争力を維持、強化するためには、現在強い自動車産業の国際競争力を決して衰えさせることなく、更に強くする戦略を遂行することが不可欠である。

ところで、世界の二酸化炭素排出量のうち約 20%を運輸部門が占めている。国際競争力の強化および国際貢献のために、自動車に今後優先的に求められる機能は、環境負荷低減である。このような状況を踏まえ、「2020 年までに新車販売のうち 50%を次世代自動車」とすることが、「低炭素社会づくり行動計画」として 2008 年 7 月に閣議決定されている。

上記計画における次世代自動車とは、ハイブリッド自動車、電気自動車、プラグインハイブリッド自動車、燃料電池自動車、クリーンディーゼル車、CNG（Compressed Natural Gas）自動車等を指しているが、これらの中には、比較的低環境負荷ではあるものの走行時に二酸化炭素を排出する自動車も含まれている。そこで本検討では、内燃機関を持たず走行時に二酸化炭素を全く排出しない次世代システムとして、「燃料電池自動車」および「新型電池を用いた電気自動車」の 2 つを取り上げ検討した。更にこれら 2 つの次世代システムと連携し、エネルギー効率を向上させ、より一層環境負荷を低減する自動車を実現するために重要な「軽量カー」についても、次世代システムとして検討した。

燃料電池自動車および従来の電池を用いた電気自動車は、現在、各企業によって当面の中・小規模な販売やリース販売を目指して、開発や実証実験が実施されている。産業の国際競争力の強化のためには、現在現れつつある小規模導入でなく、国際市場に大規模に投入し、世界の自動車産業に対して優位な次世代システムとして製品を完成させられる研究開発が必須である。CRDS では、そのために解決すべき課題のうち、企業ではなく、大学および公立研究機関が中心となって取り組むべき基礎的な研究開発につながる課題に焦点を絞り、検討を行った。

なお、燃料電池自動車および電気自動車の概要については一般的に普及しているため、ここではこれらについて詳述しない。

以下、「燃料電池自動車」、「新型電池を用いた電気自動車」および「軽量カー」の 3 つの次世代システムについて、それぞれ、重要な構成要素である部品・材料とそれらに要求される機能、およびそれを実現するため

に解決すべき研究開発課題について述べる。

次世代システム 1：燃料電池自動車

燃料電池自動車を実現するために重要な構成要素は、白金を使用しないすなわち白金レスの燃料電池、広い温度範囲、特に低温で安定作動する燃料電池、水素安定供給システム、および希少資源不使用・高性能モーターである。燃料電池自動車において、特に基礎科学に立ち戻って研究開発する重要性が残っていると考えられる構成要素、それらに要求される機能、およびその機能を実現するための研究開発課題を図 8-18 に示す。

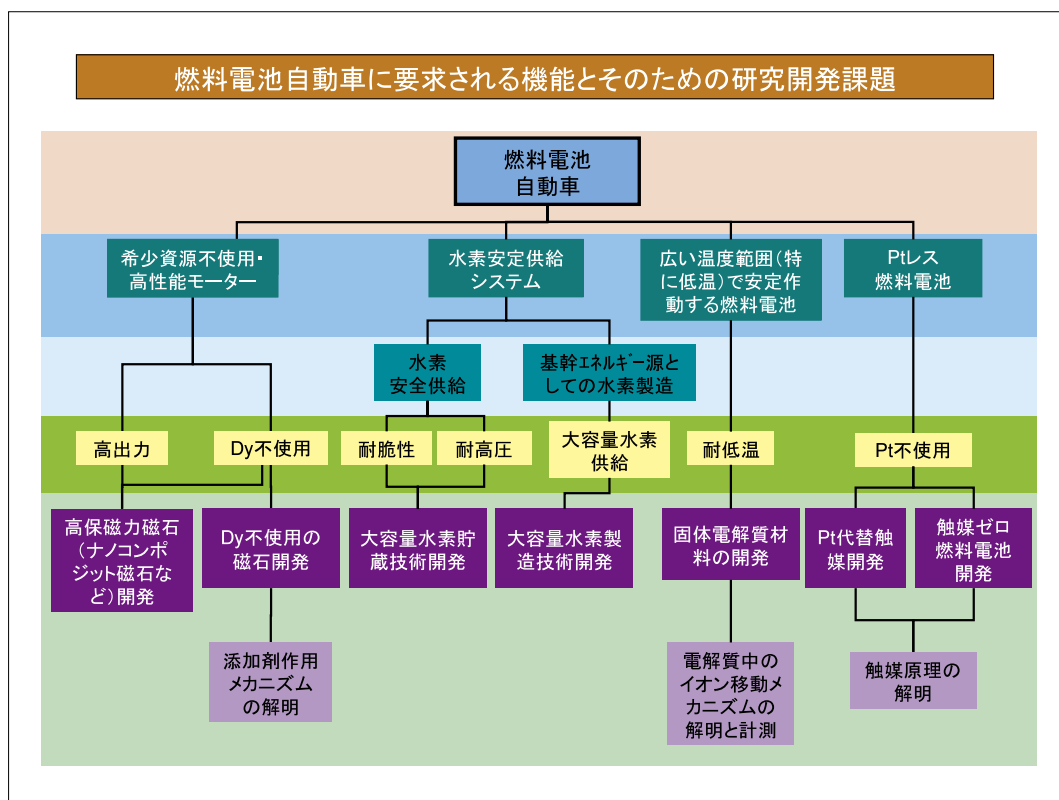


図 8-18 燃料電池自動車の機能と研究開発課題

(1) 白金レス燃料電池

白金レスすなわち白金を全く使用しない燃料電池が必要である。現在の燃料電池では、電極触媒として白金もしくは白金系合金が利用されている。白金は 2050 年までに現有埋蔵量をほぼ使い切ると推計されているが、経済状況の変化による埋蔵量の増大や完全リサイクルの実現によって白金の需要と供給は均衡を維持できると推計されている。しかし、世界中の白金の完全リサイクルの難易度や白金の安定供給の確実性を考慮すると、産業の国際競争力の強化のためには、燃料電池に使用する白金の使用量を大幅に低減させること、さらに最終的にはゼロにすることが求められる。触媒

としての白金を不使用にするためには、白金触媒の代替として有機分子などを用いた新規触媒を開発すること、あるいは触媒を必要としない燃料電池を開発することが求められる。そのためには、現在十分に明らかにされていない触媒原理を解明することが重要である。以上から、具体的な研究開発課題は以下である。

具体的な研究開発課題：

- ・白金を使用しない新規触媒の開発
- ・触媒原理の解明

(2) 広い温度範囲（特に低温）で安定作動する燃料電池

外部環境の温度に制限されることなく、安定走行できる燃料電池自動車が必要である。燃料電池は電解質の種類によって作動温度が異なる。広い温度範囲において、特に極寒環境においてもハイパワーで安定作動する燃料電池が求められる。これを実現するには、耐低温の固体電解質開発が必要であり、そのためには、電解質に用いられる物質の結晶構造や微細構造に着目することによって電解質中をイオンが移動するメカニズムを解明し、さらにそれを計測する技術を開発することが重要である。以上から、具体的な研究開発課題は以下である。

具体的な研究開発課題：

- ・耐低温の固体電解質の開発
- ・電解質中をイオンが移動するメカニズムの解明およびその計測技術の開発

(3) 水素安定供給システム

燃料電池のエネルギー源である水素を、安定して供給するシステムが必要である。燃料電池自動車が広く普及するためには、水素を基幹エネルギー源とするための製造、すなわち大容量の水素を製造する技術が必要である。このとき、将来的には温暖化ガスを排出しない製造方法でなくてはならない。また、製造された水素は大容量で安全に、供給および貯蔵されなくてはならない。そのためには、耐脆性および耐高圧性を備えた水素貯蔵材料を用いた貯蔵技術を開発することが求められる。以上から、具体的な研究開発課題は以下である。

具体的な研究開発課題：

- ・温暖化ガスを排出しない大容量の水素製造技術の開発
- ・耐脆性および耐高圧性な水素貯蔵材料の開発

(4) 希少資源不使用・高性能モーター

希少資源を使用しない高性能モーターが必要である。現在モーターに用いられている永久磁石であるネオジム磁石には、保磁力を高めるためには希少金属であるディスプロシウムが添加物として使用されている。この使用量を減らすプロジェクトは既にあるが、将来的には、ディスプロシウムを全く使用せずに保磁力が高い永久磁石を開発することが求められる。そのためには、磁性元素の存在形態や微細構造などを明らかにすることによって添加剤の作用メカニズムを解明することや、現在のネオジム磁石に代わる、例えばナノコンポジット磁石のような新規の高保磁力磁石を開発することが重要である。以上から、具体的な研究開発課題は以下である。

具体的な研究開発課題：

- ・ ディスプロシウムを使用しない高保磁力の永久磁石の開発
- ・ 添加剤の作用メカニズムの解明
- ・ 新規の高保磁力磁石の開発

次世代システム2：電気自動車（新型電池）

新型電池を用いた電気自動車を実現するために重要な構成要素は、ハイパワー・高信頼電池、高性能電子制御部品、および希少資源不使用・高性能モーターである。新型電池を用いた電気自動車において、特に基礎科学に立ち戻って研究開発する重要性が残っていると考えられる構成要素、それらに要求される機能、およびその機能を実現するための研究開発課題を図8-19に示す。

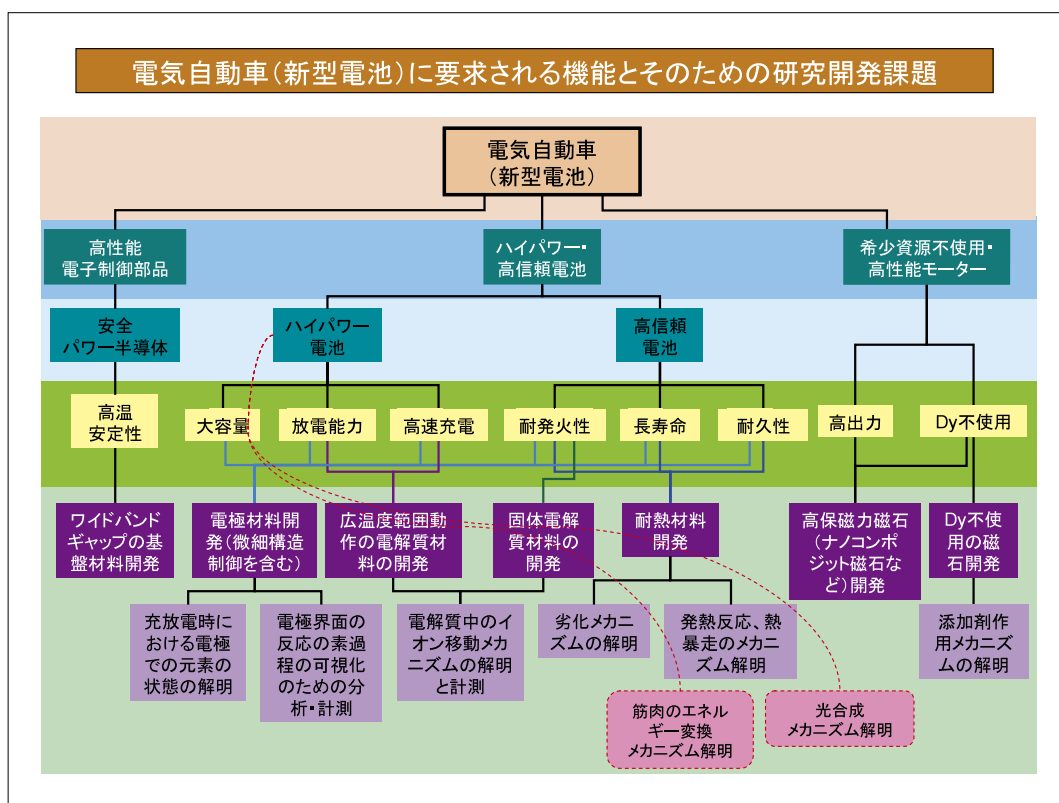


図8-19 電気自動車の機能と研究開発課題

(1) ハイパワー・高信頼電池

ハイパワーであり信頼性の高い電池が必要である。

ハイパワー電池に要求される機能は、大容量であること、高い放電能力を有すること、および高速充電が可能であることである。高信頼電池に要求される機能は、対発火性に優れており安全であること、長寿命であること、耐久性に優れていることである。

ハイパワー電池および長寿命電池に要求される全ての機能を実現するためには、微細構造制御を含む技術を用いた電極材料開発が必要である。そのためには、充放電時における電極での元素の存在状態の解明、および電極界面の反応の素過程の可視化のための分析・計測が重要である。

ハイパワー電池に要求される機能である、高い放電能力と高速充電を実

現するためには、広い温度範囲で動作する電解質材料を開発しなくてはならない。また、高信頼電池に要求される機能である耐発火性を実現するためには、既存の液体電解質で生じる液漏れ、それによる発火を完全になくすることができる、固体電解質材料を開発しなくてはならない。これらに共通して重要な研究開発課題は、電解質中のイオン移動メカニズムを解明し計測することである。

高信頼電池に要求される耐発火性、長寿命、および耐久性を実現するためには、耐熱材料を開発しなくてはならない。そのためには、発熱反応および熱暴走のメカニズムおよび劣化のメカニズムを解明することが重要である。

既存のエネルギー変換効率を上回る新型のハイパワー電池を開発するためには、新しいエネルギー変換方法を発見・発明する必要がある。そのために取り組むべき研究開発課題としては、例えば、筋肉のエネルギー変換メカニズムや光合成メカニズムを解明し、生体を模倣した新型電池の可能性を探るというものが挙げられる。

以上から、具体的な研究開発課題は以下である。

具体的な研究開発課題：

- ・電極材料の開発
- ・充放電時における電極での元素の存在状態の解明
- ・電極界面の反応の素過程の可視化のための計測技術の開発
- ・広い温度範囲で動作する電解質材料の開発
- ・固体電解質材料の開発
- ・電解質中のイオン移動メカニズムの解明とその計測技術の開発
- ・発熱反応および熱暴走のメカニズムの解明
- ・電池材料の劣化のメカニズムの解明
- ・生体を模倣した新型電池の開発を目指した筋肉のエネルギー変換メカニズムや光合成メカニズムの解明

(2) 高性能電子制御部品

高性能電子制御部品、すなわち高温環境においても安定に動作する安全なパワー半導体が必要である。そのためには、ワイドバンドギャップの基盤材料を開発することが重要である。以上から、具体的な研究開発課題は以下である。

具体的な研究開発課題：

- ・ワイドバンドギャップの基盤材料の開発

(3) 希少資源不使用・高性能モーター

燃料電池自動車と同様、希少資源を使用しない高性能モーターが必要である。詳細は燃料電池自動車で述べた通りである。

次世代システム 3：軽量カー

軽量カーを実現するために重要な構成要素は、軽量の構造材料および透明材料である。軽量カーにおいて、特に基礎科学に立ち戻って研究開発する重要性が残っていると考えられる構成要素、それらに要求される機能、およびその機能を実現するための研究開発課題を図 8-20 に示す。

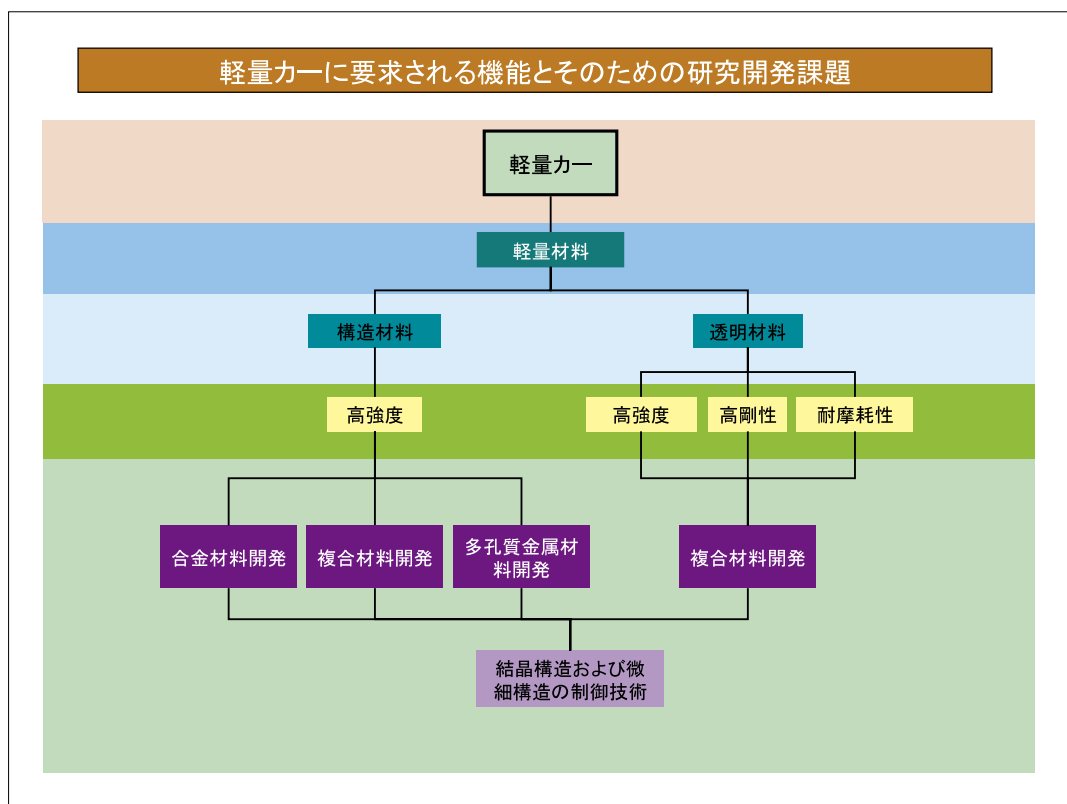


図 8-20 軽量カーの機能と研究開発課題

(1) 構造材料

軽量の構造材料に要求される機能は、高強度である。このような材料を実現するためには、現在の材料を代替する例えばマグネシウムを利用した新たな合金材料の開発や、結晶構造制御技術や微細構造制御技術および複合化技術による複合材料の開発や多孔質金属材料の開発が必要である。以上から、具体的な研究開発課題は以下である。

具体的な研究開発課題：

- ・合金材料の開発

- ・結晶構造制御技術や微細構造制御技術および複合化技術による複合材料の開発および多孔質金属材料の開発

(2) 透明材料

軽量の透明材料に要求される機能は、高強度、高剛性に加え、自動車の使用環境によって透明機能が損なわれない耐磨耗性が挙げられる。このような材料を実現するためには、構造材料と同様、結晶構造制御技術や微細構造制御技術および複合化技術による複合材料の開発が重要である。以上から、具体的な研究開発課題は以下である。

具体的な研究開発課題：

- ・結晶構造制御技術や微細構造制御技術および複合化技術による複合材料の開発

【B】横断的に抽出された重要要素材料技術

①空間空隙制御・利用材料技術

微細スペースの次元、形状、サイズ、界面特性等を制御し、それらミクロ～ナノに設計された空孔材料の開発や利用を行うことは、環境・省エネルギーなど今後の重要な研究開発課題や産業からの要求を括る重要な横串として存在する。微細空間の制御は機能発現の一つの本質であり、各種検討の随所に現れ大きな括りに成り得る。さらに縦割り研究領域を融合して相互に知見を融通することによる大きな飛躍が有り得る。

「空間空隙制御の科学」と、「空間空隙利用による新材料技術創出」を同時並行的に行うことが肝要であり、明確に出口を意識した研究開発戦略が求められる。

空間空隙制御・利用材料技術 課題例と考え方			
	価値	用途	材料例
企業・産業からの要求 (材料を知らない) テクノロジーの部分	工業化 産業化	電池、キャパシタ、太陽電池 触媒、分離膜 バイオセンサー、バイオリアクター 物質の貯蔵と変換 DDS等の治療用材料 ガスセンサー、有害物の検知、除去 環境プロセス (土壌改良、空気清浄化、水質制御) 建材、構造材 高集積化、超マイクロデバイス モーター	
物質・材料研究 (用途を知らない。 熟していない。) サイエンスの部分	興味深い構造 興味深い機能発現 新規の知見 機構の解明 今新しいモノ	(触媒、電極) (電線) (電磁変換) (超伝導材料) (触媒) (構造材) (磁性材料)	デンドリマー 無機有機複合ゼオライト ナノ複合材料 有機分子集合体 無機メソ空間材料 無機多孔体 層状化合物 ナノカーボン材料等

図 8-21 空間空隙制御・利用材料技術の課題例と考え方

物質材料研究において、新奇な空間空隙構造をもつ材料や、ナノテク研究の進化により構造を設計できるようになった既存の空間材料は多く挙げられる。例として、デンドリマー、無機複合ゼオライト、ナノ複合材料、有機分子集合体、無機メソ空間材料、無機多孔体、層状化合物、ナノカーボン材料等である。これらの多くは、産業からの要求と密接な連携をとっておらず、興味深い構造や新奇の知見の段階から抜け出していない場合が多い。

それに対して、産業側からは、空間空隙材料に多くの期待がある。例として、電池、キャパシタ、太陽電池、触媒、分離膜、バイオセンサー、バイオリアクター、物質の貯蔵と変換、DDS 等の治療用材料、ガスセンサー、有害物の検知、除去、環境プロセス（土壌改良、空気清浄化、水質制御）、軽量材料、建材、構造材、高集積化、超マイクロデバイス、モーター等、数多く挙げられる。産業別に見ても、自動車産業では触媒材料や軽量材料、モーターや熱電変換材料、圧電変換材料等、空間空隙材料を利用して解決できる可能性のある技術が多く存在する。機械産業に置いても、冷却やフルイディクス制御、軽量材料や医療器械、超小型計測機器や MEMS 等から、幅広く要求されている。

②軽量化技術

産業の国際競争力の強化および国際貢献の観点から、地球規模課題である温暖化ガス排出量およびエネルギー・工業資源使用量の削減は、全ての産業において必ず実現しなくてはならないものである。世界情勢を勘案すると、産業の種類を問わず、これらの条件を満たさない産業は成立し得ない時代になりつつある。これらの課題を産業横断的に解決するために鍵となるのは、あらゆる部品・材料の軽量化技術である。

製品の使用時、製造時、および輸送時に消費するエネルギーあるいは工業資源の消費効率を軽量化技術によって削減することを狙うとき、その対象となる産業は、輸送産業、機械産業、情報通信（ICT）機器産業、建設産業などあらゆる製造業と、その製品を使用するサービス業まで及ぶ。

さらに、軽量化技術によって、例えば、生体内に使用する装置・機器など医療用装置・機器など、使用環境によって重量に対する制限が大きい製品を軽量化することができれば、これら製品の付加価値が向上し、産業の国際競争力を強化することができる。

部品・材料の軽量化技術は、ある特定の産業を対象に取り組んだ場合でも、産業間の境界線を越えて他の産業に波及効果を及ぼすことが期待できる技術である。輸送産業を例に挙げて説明する。輸送機械を構成する、構造材料、透明機能材料、電子部品、内装材料、動力機械部品など多岐に渡る部品・材料の軽量化を実現できれば、輸送機械の製造時・輸送時の工業資源やエネルギーの消費効率に加えて、輸送機械を使用する際のエネルギーの消費効率が大幅に削減される。同時に、ここで開発された電子部品の軽量化技術は、情報通信機器産業の軽量化技術へ展開することができる。

現在、軽量化を実現するために取り組まれている研究開発は、素材そのものを軽元素で代替する軽量化技術開発と、結晶構造・微細構造の制御および複合化技術による軽量化技術開発の、大きく 2 つに分けられる。前

者については、マグネシウム合金の開発が例として挙げられる。後者については、繊維強化された透明セラミックスの開発、ナノ材料との複合化による透明プラスチックの開発、および界面制御による複層型鋼板の開発などが例として挙げられる（図 8-22 参照）。

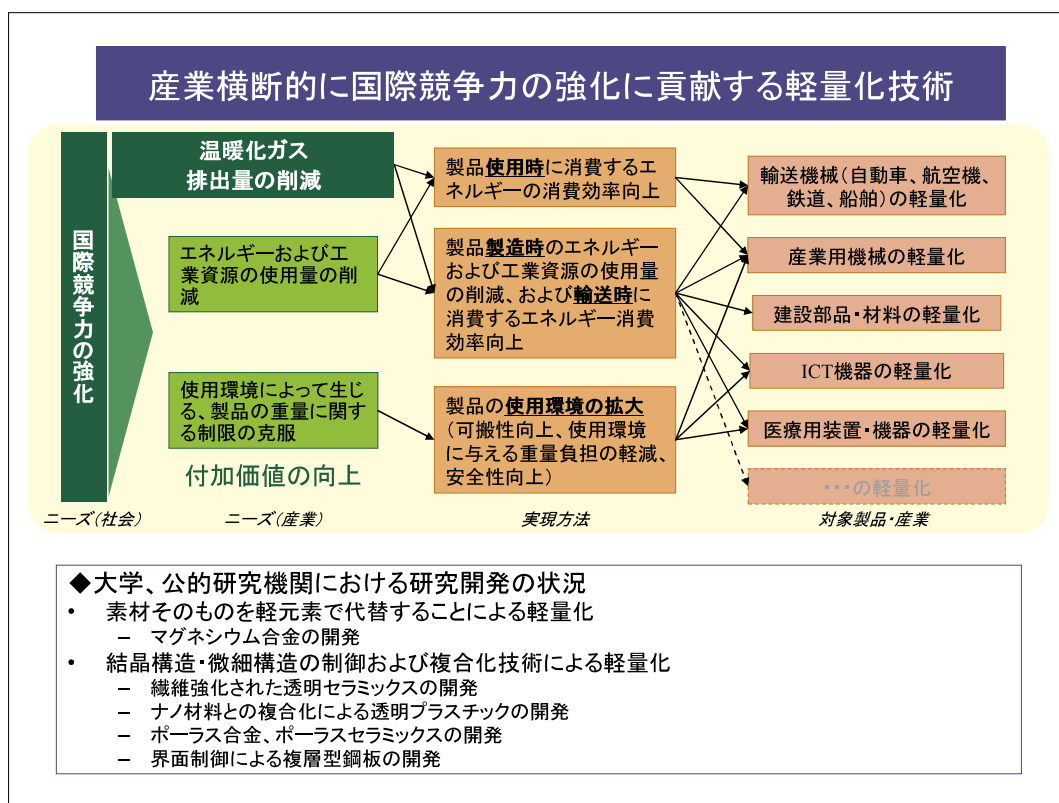


図 8-22 軽量化技術

③融合分子材料技術

有機材料の特徴として、構造や機能を自在に設計できるという点を挙げることができる。産業界から材料開発に寄せられる様々な要望に応える一つの解決策が、有機材料・分子材料の適用である。ここで言う融合分子材料技術とは、分子科学と分子技術とを融合することで実現する新しい技術分野である。その主役は有機材料であり、環境・エネルギー・IT・生活・医療などと幅広い産業分野で要望されている重要技術である（図 8-23 参照）。

本技術では、まず出口となる材料の特性（機能・仕様）が産業界から決められ、その特性を実現するための材料設計が実施される。既存の材料の代替にとどまらず、全く新しい機能を持つ材料の開発にも挑戦することになる。例えば、強度的には鋼鉄と同等であるが、有機材料だけでできているために非常に比重が小さく、軽量の製品が実現でき、軽量化などに適

用される材料が挙げられる。また、高度な柔軟性を持った電子材料により、多種類のウェアラブル電子機器の開発に繋がる。生分解性を付与できれば、産業廃棄物の処理負担も大幅に軽減される事になるだろう。このように、融合分子材料技術は多くの産業群から要求されており、横串的に捉えることができ、重要な技術である。

		特徴	期待される アウトプット	応用
分子材料技術	分子科学	・構造・機能の自在設計 ・2000万分子程が既知 ・望む化学構造を入手可 ・非存在物質を創出可能 ・他研究への応用が容易 ・産業の真の要求を知らない（特に他分野の）	高効率発光 包摂構造 強磁性 耐熱・耐光性 電荷分離機能 両極伝導 生体環境応答性	EL素子 軽量高強度 生体適応材料 人工筋肉・骨 高度DDS
	分子技術	・産業技術、産業材料 ・新機能・新材料が必要 ・基礎研究が少ない ・大学研究を知らない（特に他分野の）	代替材料 性能向上 新機能材料 選択枝多様化 次世代資源	エンプラ 太陽電池 飛行機 自動車

図 8-23 分子材料技術の概念

④界面・表面の制御・形成

多くの応用分野の技術的なボトルネックとなっている界面・表面の制御・形成は、多くの産業からの要求の横串の横断的な分野として存在する。

ここでの目的は、

- ・異種接合界面の飛躍的な高機能化技術を創出すること。
- ・医療用材料技術、エレクトロニクス技術、発電・蓄電エネルギー技術にそれぞれ関連した、生体材料と人工物との接合界面、ソフト材料とハード材料との接合界面（有機物と金属・絶縁体を含む）、エネルギー変換と物質移動を伴う異種材料・異種物質状態間の接合界面の高機能化。
- ・界面や表面機能の積極的な追求により、新規反応場や新規プロセス、新機能の創製を行うこと。異種材料の接合の結果生じる分子反応場としての界面の機能を積極的に活かすこと。

等が挙げられるが、総じて、異種材料間のハイブリッド化による、革新的

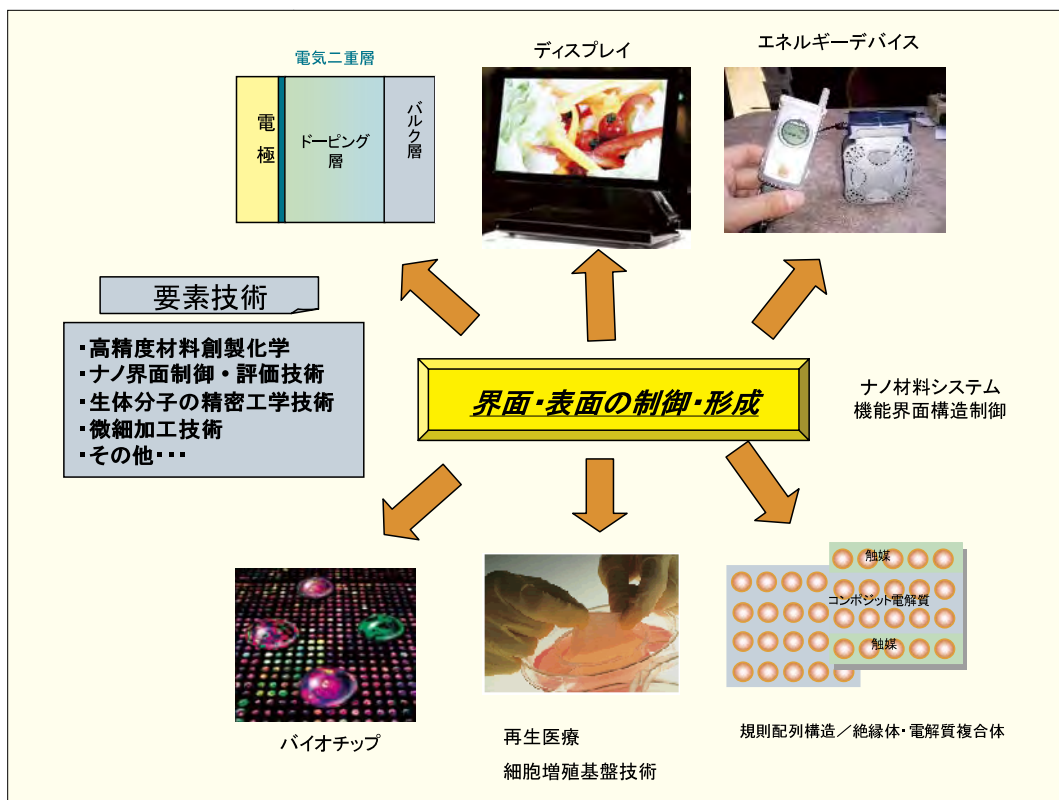


図 8-24 界面・表面の制御・形成

電体等の異種材料界面が存在していたが、微細化・集積化のための high-k ゲート絶縁膜や low-k 材料の開発進展に伴い、界面制御が益々重要となっている。前者では、半導体/high-k 材料界面でのフェルミ準位のピンギングの問題が特性に大きく影響する。また low-k 材料 / 配線材料の界面ではエレクトロマイグレーションが深刻な問題となる。これらは微細化が進む程、その影響が顕著となるため、界面の制御は極めて重要となる。また同じ理由で、パッケージの熱抵抗低減のための熱接触界面の制御も重要である。

一方、同じくエレクトロニクス分野においては、有機デバイスの実用化への期待が高まりを見せている。しかし、動作安定性や寿命などの問題点が存在する。それらの課題を克服するためには、有機デバイスの中で起こる物理現象をミクロな素過程に立ち戻り明らかにする必要がある。特に、ソフト材料である有機材料とハード材料である金属電極界面のナノ構造制御による電子素過程の理解は、得られた知見を精密に制御した界面に適用することにより、高性能化・高安定性が達成され、有機 EL ディスプレイの性能や信頼性向上につながると期待される。

エネルギーや環境の分野においても、ナノ機能界面は重要な役目を果たす。例えば、エネルギー変換材料（燃料電池、リチウム電池、キャパシタ

用材料等)では、さらなる空間構造と集積度の高度化が多くに関連分野との独創的な着想に基づく融合研究が必要である。ナノ領域からミクロ領域に及ぶ材料の構造、形状、物質に関する制御を行うことで、エネルギー変換効率、耐久性、安全性、エネルギー密度、出力密度、設計の自由度を向上させた新規エネルギー変換デバイスを構築することができる。また電気化学反応に必要な不可欠な液体と接合した触媒電極・電解質機能界面を構築するナノ構造制御が重要となる。環境浄化用の触媒や、機能制御膜等も重要研究として含まれる。

ナノ粒子と生体界面の関係に関する研究は、まだ緒に就いたばかりの分野である。ナノ粒子と細胞膜や、界面上でのナノ粒子の制御を考察することにより、ナノ粒子の安全性の考察はもとより、DDS や再生医療等にも幅広く応用できる結果が期待される。

⑤サーマルマネジメント

産業材料技術に資する研究開発において、熱の制御やそれを実現する技術は、各材料や部材の熱物性ととともに、横断的な研究開発課題として非常に重要である。これら全体を「サーマルマネジメント」とここでは称することにする。物理学における物性から、熱のコントロール、さらには熱をマネジメントするための材料まで考えを発展させ、ナノテクノロジーや先端的な物質材料技術を結集した新たな技術開発の必要性を述べる。冷却、放熱、電熱、熱伝導、ヒートシンク材料、超冷却技術等々において、目的に応じた制御、たとえば熱膨張率の制御や、高放熱特性のためのナノ複合材料の開発などを視野に入れる。

全体をミクロな視点とマクロな視点にわけて考えると、ミクロにはナノ構造における熱伝導の機構解明や制御などが重要になり、マクロな点からは、材料の放熱、耐熱性のマネジメントなどが対象となる。まず、ミクロな視点から考えてみる。

ナノテクノロジーは、単に物を小さくすることに止まらず、色々な分野の発展に寄与している。サーマルマネジメントに対しても例外ではない。例えば熱電変換材料は、新材料の開発が長期間停滞していたが、ナノテクノロジーによる超格子構造形成やナノサイズの異相粒子導入が熱電変換効率向上に寄与することが分かったのをきっかけに多くの新材料が開発された。つまり、ナノテクノロジーを使って、従来は不変と考えられていた熱伝導率や熱輻射などの物質特有の性質が制御可能になった。熱伝導は物質内を流れる熱の輸送であり、温度差に比例して熱が流れる。その比例係数が熱伝導率である。ナノテクノロジーで数原子層レベルの異なる種類の原子を積層すると熱伝導率は大きく低減する。熱輻射は赤外領域の波長を持

つので、ミクロンオーダーの周期をもつナノ構造体を作製すると制御可能になる。

以上のように、今後ナノ構造における熱伝導機構をより詳細に解明することにより、従来のバルクとは異なる、飛躍的な高効率を有する熱電材料の開発や新しい機能を持った素子の開発に繋がる可能性がある。

ナノ構造熱制御の具体的な研究開発課題としては、下記のようなものが考えられる。

- ・微細構造における黒体輻射制御

これは、構造による輻射場制御の考え方を熱輻射に適用するものである。

- ・不規則構造を使ったフォノンの制御技術の開発

新規酸化物熱電材料を創製し、電子系とフォノン系を独立に制御するものである。フォノン伝達と散乱機構の独立制御につながる。

- ・低次元構造（低次元スピン系物質など）における熱伝導機構の解明

分子動力学法やフォノン解析の手法を利用したエネルギー輸送課程の研究を通して、CNT やスピン物質などの低次元物質の熱伝導機構を解明するものである。

- ・近接場光を用いたナノスケール熱物性値測定手法の開発

ナノスケールでは、物質の熱的特性は量子効果が支配的になる。しかし従来の光学的測定では、光の回折限界のため、測定分解能が上がらない。しかし、近接場を用いると、ナノスケールでの熱伝導率、温度伝導率などの測定が可能になる。

- ・原子と熱放射の相互作用の解析

例えば、ナノ分子場中の原子と熱放射の相互作用の解析などが考えられる。

- ・熱伝導率と電気伝導率の独立制御

超格子化合物材料などを用いることで、電子伝導と熱伝導を異なるナノブロックで独立制御することにより、高い電気伝導率と低い熱伝導率を同時に達成し、高い熱電発電効率を達成する。

- ・ナノ構造伝熱面の創成

ナノ構造伝熱面の表面状態解析や伝熱特性評価を通して、ナノ構造伝熱面創成技術確立する。

- ・量子ゼノン効果利用の温度制御

量子ゼノン効果を利用した、冷却状態を計測することで、温度やエントロピーを制御する技術である。

- ・分子動力学法によるナノ熱電材料の格子熱伝導シミュレーションの開発

例えば、界面のナノ構造間隔が熱抵抗に及ぼす影響などを調べて、新しいナノ熱電変換材料の創製を目指す。

一方、材料研究開発の観点からは、高効率エネルギー変換・蓄積ナノ材料の開発が重要になり、具体的な材料としては、酸化物熱電変換材料、ナノワイヤ・アレイ熱電材料、強相関電子系熱電変換材料などが上げられる。

いずれにしても、素子の集積化、微細化に伴い、ナノ構造における熱伝導制御は極めて重要な研究開発課題となっており、またエネルギーの高度利用の観点からも熱制御の必要性は今後益々高まると予想される。

次にマクロな視点からサーマルマネジメントを考えてみる。

あらゆるエレクトロニクス装置に使われている半導体 LSI の高集積化、高消費電力化に伴い、素子内部に発生する熱を効率的に放熱する方法の開発が急務となっている。ここで鍵となる材料が高熱伝導率接着材料（TIM: Thermal Interface Materials）である。特に、日本の中心産業である自動車には、様々な安全装置、省エネ制御、ナビゲーション等のエレクトロニクス装置が今後益々数多く搭載されるようになり、半導体素子には高温のエンジン周りでも安定して稼動する性能が求められてくる。従って、高温下で CPU などエレクトロニクス装置の放熱はますます重要となるばかりでなく、耐熱性や耐湿性等も、そこに使われる接着材に求められるようになってきている。また常時高温での動作が常態となる環境下での使用には現状マトリックス樹脂材の性能向上だけでは限界があり、新たな樹脂開発も必要となる。このような観点から高熱伝導接着材の研究は新ポリマー及びそのミクロ構造制御という新たな高分子化学材料開発にも大きなイノバクトを与える。

実際、高熱伝導接着材の実現により、CPU など半導体素子の高温極限環境下における放熱特性が飛躍的に向上し、半導体素子の安定な動作が可能となり、より高集積化、高速処理可能なデバイスの実用が可能となってきた。またこのような接着材は実装段階での放熱にも寄与し、製品の歩留まり向上にも貢献する。

現在使われている TIM には放熱シート、放熱グリース、熱伝導性接着剤、放熱ゲルなど、各種形態の製品がある。これらの大半は柔軟性が高く熱伝導率が大きい絶縁性素材から出来ており、接触抵抗を低減できる。液状のものは接触部分の空間を流体で満たすことで隙間の流体の熱伝導率を向上させる。

今後必要とされる TIM の技術課題としては、以下のことが考えられる。現状は、熱伝導性のフィラーのコンパウンディングで 10W/mK が実用化に近いが、高伝導率の無機フィラーとして注目されているアルミナ自体が約 35W/mK であり、単純なフィラーの高充てんだけでは限界に近づいている。

その先の目標としてはマトリックス樹脂側の原子配列、分子構造をも考慮した新たなネットワークポリマーの精密重合、ポリマー設計による熱伝導率の改善が重要である。このベース樹脂に対して、さらにコンパウンディング用媒体に対するナノテクノロジーをも考慮した新たな技術開発も必要である。以上、接着剤として 15W/mK 以上を達成するため、樹脂およびコンパウンディング技術開発が課題となる。

⑥コンポジット材料

コンポジット材料は、金属、セラミック、有機材料等の異種材料の複合化により、元の材料だけでは得られない新規機能を発現させるもので、ナノスケールで複合化したものがナノコンポジット材料と呼ばれている。複合化により、各構成材料の長所を併せ持つ特性、あるいは構成材料単体では実現できない新規な特性が得られる可能性があり、自動車、航空、エネルギー・環境、医療等、様々な産業分野から応用を期待されている。

表 8-3 ナノコンポジット材料の例とその応用、効果

ナノコンポジット材料例	構成材料	応用	効果
ナノコンポジット磁石	軟磁性相／硬質磁性相	ボンド磁石	保持力向上、成形性、多湿環境での安定性
CNT 複合ゴム	CNT／ゴム	油田掘削用シール材	高温・高圧下での耐久性
カーボン・シリカ合成ゴム	カーボン／シリカ／ゴム	補強タイヤ	ころがり抵抗低減
FPR	ファイバ／プラスチック	自動車、鉄道、建設、医療	対候性、耐熱性、耐薬品性、断熱性
構造制御セラミック	希土類添加 YAG／無添加 YAG	セラミックレーザ	破壊限界向上
ナノコンポジット磁性金属／セラミック	軟磁性金属／セラミック	電磁波吸収体	薄型化
ナノコンポジット塗料	シリカ／樹脂	外装、内装	環境低付加、耐候性、難燃性
ナノコンポジット光学材料	シリカ／ポリマー	レンズ	高強度、透明性

ナノコンポジット材料の例とその応用、効果を表 8-3 に示す。母体材料により、金属系コンポジット、セラミックス系コンポジット、ゴム系コンポジット、ポリマー系コンポジット等がある。複合化により発現する機能としては、高強度、耐久性等の機械的特性、耐熱性、断熱性等の熱的特性、導電性、絶縁性等の電気的特性、飽和磁束密度等の磁気的特性、屈折率、吸収係数等の光学的特性がある。

金属系コンポジット材料の例としては、ナノコンポジット磁石がある。ネオジウム（Nd）やディスプロシウム（Dy）を用いた永久磁石の特性向上が進められてきているが、現状では磁気保持力等の特性は飽和状態にある。ナノコンポジット材料によりこの特性を改善できる可能性があり、ま

た、省資源、耐環境性、製造コストの観点からも、自動車、航空機、医療等の広い分野から期待が寄せられている。

セラミックス系コンポジット材料では、セラミックレーザ用材料、高強度熱伝導基板、低熱膨張係数材料、超塑性材料、圧電材料、熱電材料等への応用が研究されている。これも、機械・精密機械、電子部品、医療等、様々な応用分野がある。

ゴム系コンポジット材料では、CNT 複合ゴムや、カーボン・シリカ補強タイヤ等がある。CNT 複合ゴムは高温・高圧下での耐久性向上により、油田掘削用シール材に適用できれば高深度掘削が可能となり、その経済効果は莫大である。カーボン・シリカ補強タイヤはころがり摩擦低減等により、CO₂ 削減等の効果が期待されている。

ポリマー系コンポジット材料では、補強プラスチック、ナノコンポジット塗料、ナノコンポジット光学材料等がある。耐候性、耐熱性、耐薬品性等に加え、光学部品応用では、屈折率等の物性を制御できる可能性もあるため、応用範囲は広い。

以上のようにコンポジット材料は様々な応用が期待できるが、所望の機能に対するコンポジット材料の設計指針は必ずしも確立しておらず、今後の研究開発課題は多い。ナノ界面設計、粒界寸法、分散状態等の制御等の他、評価・解析法の確立、製造プロセスの開発等の課題がある。

9. 国内外の状況

9-1. 欧州 EuMat の取り組み

欧州では、欧州テクノロジー・プラットフォーム（ETP：European Technology Platform）の一つとして、材料に関する研究開発を検討するプラットフォームが、EuMat という名称で 2004 年 11 月に発足している。EuMat は材料開発のためのロードマップとして、「EuMat Materials for Life Cycle」を 2006 年に発行した。以下、このロードマップに基づき、EuMat が描く材料開発の構想・ビジョンの概要について紹介する（図 9.1-1 参照）。

EuMat では次世代の材料として、多機能材料、極限環境で使用可能な材料およびハイブリッド・マルチ材料を主要な柱として優先的に対象とすべき材料としている。

2030 年の実現に向けて、あらゆる行動のターゲットを絞るべき構想としては、以下の 4 点を掲げている。

- ・ 高効率材料を開発し、製造装置とインフラにおけるライフサイクルコストを 30%、エネルギー消費を 50%削減する。
- ・ 信頼性の高い材料を開発し、ダウンタイムを 25%削減することによって、生産性を向上させる。
- ・ 例えば金属材料を 95%、その他の材料を平均 70%リサイクルすることによって、環境低負荷を実現する。
- ・ 既存の知識を獲得し、将来の人材を効率的に育成し、次世代の材料を開発する能力を育成する。

また、「ライフサイクルのための材料」をキーワードとしたビジョンでは、以下の 5 点を掲げている。

- ・ 材料技術における開発、供給、利用において、欧州はグローバルリーダーになる。
- ・ 材料技術におけるイノベーションによって、プロセス産業、機械産業、輸送産業、航空産業およびライフサイクル・マネージメントにおいて新規のオポチュニティを創出する。
- ・ 全ての ETP の SRA（Strategic Research Agenda）で必要とされた研究開発領域において、アカデミアおよび産業界における研究開発が世界に通用するレベルになる。
- ・ モデリングやシミュレーションなどのツールを活用した材料の科学・技術に基づく、ライフサイクルデザインツールが完成される。
- ・ 材料技術が持続的発展に寄与する。

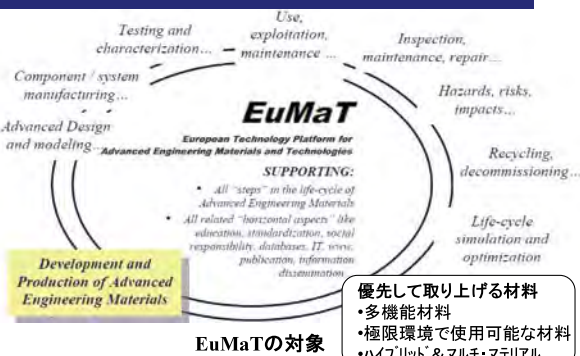
EuMaT (European Technology Platform for Advanced Materials and Technologies) の概要と構想・ビジョン

31のETPのうちの1つとして、2004年11月に発足

EUプロジェクトとの一貫性(coherence)を保ち、革新的変化と持続的発展の両方を実現することを目指す

(参考)コアメンバーになっている企業

アルストム(仏)、Aluminium Hydro(独)、アルセロール(仏)、
バイエル(独)、BESIX(ベルギー)、ボッシュ(独)、ENEA CRF
(伊)、ENI(伊)、Fischer Adv. Composite Comps AG、Centro
Ricerche FIAT(伊)、ハウザー(蘭)、Metso Powdermet Oy(フィン
ランド)、Patria Aviation(フィンランド)、Schunk Kohlenstofftechnik
(独)、ユミコア(ベルギー)



EuMaTの2030年の構想

- ・高効率材料を開発し、製造装置とインフラにおけるライフサイクルコストを30%、エネルギー消費を50%削減
- ・信頼性の高い材料を開発し、ダウンタイムを25%削減することによって、生産性を向上
- ・例えば金属材料を95%、その他の材料を平均70%リサイクルすることによって、環境低負荷を実現
- ・既存の知識を獲得し、将来の人材を効率的に育成し、次世代の材料を開発する能力を育成

EuMaTのビジョン—Materials for The Life Cycle—

- ・材料技術における開発、供給、利用においてグローバルリーダーになる
- ・材料技術におけるイノベーションによって、プロセス産業、機械産業、輸送産業、航空産業およびライフサイクル・マネージメントにおいて新規のオポチュニティを創出
- ・ETPのSRAで必要とされた全研究開発領域において、アカデミアおよび産業界での研究開発が世界に適用するレベルになる
- ・モデリングやシミュレーションなどのツールを活用した材料の科学・技術に基づく、ライフサイクルデザインツールが完成
- ・科学技術が持続的発展に寄与

図 9.1-1 EuMaT の概要と構想・ビジョン

以上のビジョンを実現するために、図 9.1-2 のような短期、中期、長期のロードマップを描いている。

ビジョンの実現のためのロードマップ

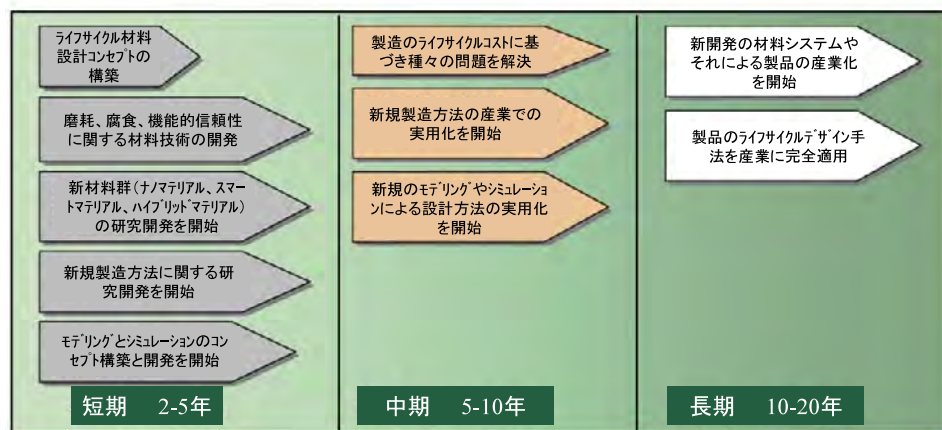


図 9.1-2 EuMaT のビジョン実現のためのロードマップ

全体を貫いているのは、社会的・経済的価値を生むために、欧州の産業競争力を強化し、産業全体を通して雇用を創出すること、および労働環境を整備するという最終目的である。これらに加え、環境負荷を最小限に抑え、リサイクルおよび環境効率を重視するといった、環境を観点とした持続可能性について強調している。

また、材料産業は機械産業、輸送産業などあらゆる産業に製品を提供する波及効果の大きい産業であることを認識し、材料産業のみではなく、材料の供給先の産業とのコヒーランス性を重視してあらゆる産業のライフサイクルを改善することによって、多くの産業の競争力を強化していくことを提案している。

9-2. 米国 MRSEC の取り組み

米国では、NSF により Materials Research Science and Engineering Centers (MRSEC) プログラムが推進されている。MRSEC は、材料分野における米国内大学を中心とする研究センター（拠点）プログラムであり、特に米国としての優先事項に貢献する材料研究分野の促進、他機関・セクター間の積極的なコラボレーションの促進、学際研究の推進等のために1994年より研究センターの設置を開始している。現在、31の研究センターが存在し、各研究センターでは一つ以上の学際研究グループ（IRGs:

米国 MRSECs の概要 (Materials Research Science and Engineering Centers / NSF)	
MRSECの特徴:	
* 材料開発に関する研究拠点の再構築を1994年に開始。分野を横断した研究グループ作りを進める * 大学をベースに他のセクター間の連携を高め、規模と学際性を狙う * 研究以外にも学際的な教育と人材開発を促進 * パートナ間の知の移転や産業界への技術移転を重視	
MRSECの予算支援規模:	
* 1センターあたり100万ドル～500万ドル(平均は190万ドル) * 総額5400万ドル(2006年)	
背景・経緯:	
* ARPAにより軍・産・学の強固な組織体である学際的研究所が誕生(1960年) * 軍の「暴走」を抑止すべく'69年「マンスフィールド修正条項」が成立。 以後、軍は直接の軍事目的以外の研究分野への資金提供を行うことができなくなる。軍にかかわる基礎研究分野への資金提供はNSFの主導へ。 * 上記の研究所は材料研究所(MRLs)としてNSFの管轄に(1971年) * MRLsは材料研究グループにより補完(1980年代) * MRLのプログラムはMRSECのプログラムに再編成(1994年) * 6年支援契約のセンターが31存在(現在)	

図 9.2-1 米国 MRSECs の概要

Interdisciplinary Research Groups) を有している。また、研究だけでなく、学際教育と人材開発にも取り組んでおり、各センターでは K-12 科学教育へ積極的に貢献するための独自プログラムを有している。

材料研究群を11に分類 (IRGs: Interdisciplinary research groups)

Biomaterials IRGs (12)
 Hard Condensed Matter Phenomena IRGs (10)
 Electronic Materials IRGs (16)
 Energy / Sustainability IRGs (6)
 Magnetism / Spintronics IRGs (14)
 Mechanics of Materials IRGs (8)
 Multiferroics IRGs (10)
 Nanotechnology IRGs (50)
 Materials IRGs (8)
 Polymers IRGs (15)
 Soft Condensed Matter / Materials IRGs (19)

MRSECのプログラム評価 (The National Academies; Nov. 2007)

評価委員: MRSEC成果評価委員20名、固体科学委員14名、物理・天文学委員19名

評価項目: 研究、施設、教育・アウトリーチ、企業連携、技術移転等の10年間の実績

評価結果: 目標に対し機能している。離散的なセンター間の協力が不十分。支援予算額はインフレ率を考慮すると、10年間で10%減少。

勧告: 今後10年間に予想される材料研究の質的な変化に対応するためにセンター機能の強化には、リソースのより効率的な利用とプログラムの再構築が必要。

図 9.2-2 MRSECs における IRGs とプログラム評価 2007

■戦略プロポーザル作成メンバー（所属・役職は 2009 年 3 月時点）■

中山 智弘	フェロー	（物質・材料ユニット）
安藤 健	シニアフェロー	（産業技術ユニット）
石森 義雄	フェロー	（ナノテクノロジーユニット）
河村誠一郎	フェロー	（ナノテクノロジーユニット）
嶋林ゆう子	フェロー	（産業技術ユニット）
永野 智己	フェロー	（ナノテクノロジーユニット）
波多腰玄一	フェロー	（ナノテクノロジーユニット）
木村 茂行	特任フェロー	（物質・材料ユニット）

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

戦略イニシアティブ

産業競争力強化のための材料研究開発戦略

CRDS-FY2009-SP-02

独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター

Center for Research and Development Strategy

Japan Science and Technology Agency

平成 21 年 7 月 / July 2009

物質・材料ユニット / Materials Unit

〒102-0084 東京都千代田区二番町3 番地

電話 03-5214-7483

ファックス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

©2009 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated
without written permission. Application should be sent to crds@jst.go.jp.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
CT CTCGCC AATTAATA
TAA TAATC
TTGCAATTGGA CCCC
AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC
ATAAGA CTCTAACT CTCGCC
AA TAATC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT
CTCGCC AATTAATA
ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
ATTAATC A AAGA CCT
GA C CTAAC T CTCAGACC
0011 1110 000
00 11 001010 1
0011 1110 000
0100 11100 11100 101010000111
001100 110010
0001 0011 11110 000101

