

材料タスクフォース  
最終報告書

タスクフォース主査

馬越 佑吉

平成 2 1 年 3 月

## 1. 第3期科学技術基本計画における進捗と状況変化

### 1.1 国際比較を含む材料領域の進捗状況

材料タスクフォース（TF）では第3期科学技術基本計画におけるナノテクノロジー・材料分野のうち、材料領域の主な成果を別添1にまとめた。さらに、これらの研究成果の中で特に重要と思われる成果を研究開発課題別に表1に抽出した。これらの選択された成果は、次の基準に合致する。

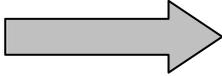
- ◆鉄鋼・自動車・電子産業等、国家の生計に大きく寄与する産業群を牽引できる
- ◆技術・研究レベルが高度で、中国・欧米等に差をつけ得る
- ◆企業が個別に行うべきものでなく、国が支援すべきである
- ◆拡張性あるサイエンスを基礎にしている

表1 材料領域における重要な研究開発課題別の顕著な成果

研究開発課題	概要
エネルギー問題の克服	<b>新系統（鉄イオンを含む層状化合物）の高温超伝導物質の発見</b>
	高効率高温水素分離膜の開発
	燃料電池用
	・高比表面積白金や燃料改質触媒箔などの触媒材料、
	・新型ポリイミド系及びポリエーテル系電解質膜、
	・高窒素鋼セパレータなど要素材料の開発、
・水素割れ等諸問題解決が進み、耐久・実用性能試験開始へ	
	界面ナノ構造設計で新規軽量耐熱金属間化合物材料 $Ti_3Al$ 開発
	大面積 Si 太陽電池：22.3%の効率を達成
	色素増感型太陽電池：実用サブモジュール約7%の効率を達成
環境と調和する循環型社会の実現	<b>光触媒（防汚、抗菌、超親水）</b>
	<b>透明酸化物導電体</b>
	超白金・非白金系触媒の開発
	金触媒活用。ナノテクによる環境調和型アルコール酸化反応開発
	水（機能性反応媒体）を活用した高効率有機合成技術
	内壁が疎水性で、大きさを変えたナノ細孔物質をデザイン
安全・安心社会の構築	土木建築用超高力ボルト
	衝撃に強い1500メガパスカル級低合金鋼の開発に成功
産業競争力の維持・強化	ダイヤモンド半導体で高効率の紫外線発光に成功
	低コスト製造法による高効率純緑色発光ダイオードの開発
	自動車用熱延高強度鋼板（ナノハイテン）
	<b>二次元ナノ構造制御したナノシート材料の創製</b>

材料研究における研究課題の進捗とその成果の事業化を議論する上で、次項に示したように研究のフェーズ（基礎研究→応用研究→実用化への展開）を踏まえることが重要である。実用化との時間的な距離に差がある事例を表1から選び、その状況を表2にまとめた。

①実用化への展開に距離があるが研究の芽となる長期的かつ挑戦的な研究成果



②長期的な基礎研究から実用化に向けた応用研究までを含む研究成果



③実用化材料の機能性向上や実用化に向けた応用研究成果



基礎研究

応用研究

実用化

表2 材料研究における研究成果とその実用化への展開について

	具体的な事例
①実用化への展開に距離があるが研究の芽となる長期的かつ挑戦的な研究成果	<p>「新系統（鉄イオンを含む層状化合物）の高温超伝導物質の発見」は、1986年の銅酸化物系の発見の後、大きな広がり期待される新物質は発見されていなかった（2001年の <math>MgB_2</math> の発見は重要だが、周囲に高い臨界温度 <math>T_c</math> の物質が存在しない特異点）状況を打破した。2008年2月に報告された鉄系超伝導体は、これまで超伝導とは最も相性が悪いと信じられていた鉄というありふれた安価な元素の化合物であり、しかも <math>T_c</math> が短期間に <math>MgB_2</math> を抜いて銅系に次ぐ高い値に至っている。20年以上に亘って高温超伝導のためには <math>CuO_2</math> 面が必要であるとの認識の「銅の独占状態」が打ち破られ、ある意味では「鉄の時代」になったともいわれている。「候補物質にタブーが無くなった」といえる点で、実用を直ぐに考えるフェーズではないが、画期的な研究の芽となる成果である。なお、「鉄系超伝導物質」は、まさに再度高温超伝導の研究を熱くしたことに大きな貢献をしたが、現在ヒ素、セレン、テルルという毒性のある元素が含まれている。もし、本質的にこれらの元素が必要ならば、それを用いた場合の対応も考えるべきである。</p>
②長期的な基礎研究から実用化に向けた応用研究までを含む研究成果	<p>「透明酸化物導電体」では、石灰とアルミナという典型的絶縁体から構成される <math>12CaO \cdot 7Al_2O_3</math> (<math>C12A7</math>) にもかかわらず、電子がドーピングで金属化するという発見は、これまでの元素のイメージを覆す革新的な研究成果である。ナノ構造の威力（ナノ構造により元の素材からは想像できないような特性が実現する）を示す好例の一つとして、第3期のわかりやすい成果でもある。ただ、現状の特性では、インジウム系透明電極材料（ITO）の9割以上の用途となっている液晶用 ITO の代替は困難であり、初期の基礎研究段階にある。むしろ、これまでの金属では不可能であった低仕事関数と化学的安定性を合わせもつ特徴を生かす展開が期待できる。</p> <p>液晶用 ITO の代替として中長期的な位置付けにあるのが、日本のグループが提案したニオブドーピング酸化チタンである。抵抗率やエッチング性に高いハードルがあるが、<math>TiO_2</math> が有する他の機能性液晶以外の分野にも適合する応用が期待でき、研究として国際的に広がりつつある。</p> <p>更に近未来の代替可能材料、つまり実用化に近く短期的といえる「透明酸化物導電体」としては酸化亜鉛（<math>ZnO</math>）が筆頭である。歴史的には <math>ZnO</math> は</p>

	性能で ITO に置き換えられた経緯がある。実用的な成膜法では ITO よりも伝導度が未だに一桁低く、100nm 以下の厚みでは抵抗が増加するといった問題点を解決する必要があるが、実用化に向けた研究活動が着実に展開されている。ZnO 導電膜の研究でも日本が強く、国際比較でも優位性を保っている。
③実用化材料の機能性向上や実用化に向けた応用研究成果	<p>「光触媒（防汚、抗菌、超親水）」は、酸化チタン等の光触媒反応（紫外線照射により生成した正孔の強い酸化力）を用いての細菌・臭気物質・汚染物質等の分解による抗菌・脱臭・防汚材料として開発され、抗菌タイル、空気清浄機などで既に実用化されている。また、酸化チタン光触媒の光誘起親水性（超親水・超撥水可逆制御）を利用した冷却システム開発、揮発性有機化合物土壌汚染除去、光触媒フィルターを用いて畜産臭気の防臭システムの開発等、様々な用途展開が進められている。市場拡大に向け、可視光で高活性な新規光触媒の開発等、機能性を高めた材料開発成果も出ていて、日本の独壇場といえる。実用化に非常に近い場面で、材料の革新的な機能向上により、更なる新しい実用化を生み出す可能性が高い。</p> <p>「二次元ナノ構造制御したナノシート材料の創製」は、ナノサイズの威力を示す好例といえ、層状化合物（酸化チタン、酸化マンガン等）を化学反応により単層剥離・積層することによって創製される機能性ナノシートの特性を利用した実用化研究と、用途に適した新規ナノシート物質の創製が大きな成果といえる。各種の機能性ナノシートの中でも、光触媒作用を利用した防汚性コーティングへの展開が期待され、実用化に向けた研究開発が精力的に進められている。</p>

## 1.2 第3期策定時以降の状況変化

原油価格の高騰から、エネルギー問題への関心が高まり、太陽電池、水素等の新たなエネルギー源の開発要求が高まっている。また、特定鉱物資源の埋蔵量減少、偏在と価格高騰により戦略物質としての希少金属への国家戦略が問われ、「元素戦略」の名のもとに学術的な対応が迫られ、希少資源・不足資源代替並びに効率的利用技術を意識した研究開発が拡充されつつある。

1986年の銅酸化物系の発見当時と比べ、「新系統（鉄イオンを含む層状化合物）の高温超伝導物質の発見」の状況は大きく異なり、最大のライバルは中国である。中国の若手研究者と大学院生の意欲は極めて旺盛で、20年前の日本の状況を髣髴させる。臨界温度  $T_c$  が短期間に  $MgB_2$  を抜いて銅系に次ぐ高い値に至り、この半年間に既に 500 報に近い膨大な論文が発表され、毎月一回を超えるペースで国際会議が開催されるという状況を材料面で牽引しているのは中国・日本・台湾など東アジアの研究者である。

また、インド、シンガポール、台湾、韓国等のアジア近隣諸国も国家戦略としてナノテク・材料分野に投資し、その効果は発表論文数の増加等に顕著に現れている。これら諸国の経済発展は目覚ましく、製品の価格競争力といった面でも我が国は厳しい状況にある。このような製品開発、価格競争は本来企業レベルでやるべき課題であるが、学術的な活動における競争の激化という観点で、この変化をとらえる必要がある。

第3期に入ってからの主な状況変化としては、以下の3点を特筆することができる。

- エネルギー問題
- 資源問題
- 近隣諸国の追撃と、競争の激化

さらに、ここ数ヶ月の世界レベルでの急激な経済環境の悪化は、企業の商品開発や研究課題の変化・見直しが必須となる。当面の課題の変化に柔軟に追従し、競争するのは企業の責務であり、例えば米国の自動車業界が電気自動車の開発に重点をシフトしている一方、状況の変化に流されることなく、**長期的な研究課題や基礎研究を含めたリスクの高い研究への国の集中的な投資の必要性**も浮き彫りになってきている。

別添1にまとめた材料領域の主な成果に加え、本タスクフォースが加速して推進するべきと判断した研究課題について、実用化との時間的な距離感（実用化状況）、国際的な位置づけ（国際比較）、ナノテクノロジー・材料分野内での領域融合の必要性、他7分野への展開・連携について、課題毎に別添2にまとめた。これらの基礎データを元に、第3期策定時以降の状況変化を踏まえ、今後加速すべき研究課題について材料TFにおいて議論した。

## 2. 第3期に加速するべき研究課題とその現状について

### 2.1 加速するべき研究課題

材料領域では、長期的で基礎研究を含めたリスクの高い挑戦的研究課題だけでなく、ロードマップに対してのアプローチやコスト削減等の産業競争力強化のための研究も重要とされるが、これらの中で、近年の状況変化（エネルギー、環境問題、近隣諸国の追い上げ）を踏まえ、挑戦的課題といった観点から**今後特に加速すべき課題**を下記の表3にまとめた。

表3 今後特に加速すべき課題

研究課題名	概要
(1)燃料電池	材料（電解質膜、電極、触媒、水素貯蔵等）による画期的なコスト低減・信頼性の向上を実現する。
(2)新規超伝導体	物性物理・固体化学の融合、電子・電気工学を加えた展開による原理解明と新物質創製
(3)二次電池	固体電解質、有資源元素を用いた新規電極材料、新機構・新構造の原理解明と高容量・高出力化
(4)太陽電池	超高効率（量子ドット等）Si系・非Si系・色素増感型・有機系の高効率・低コスト化、材料・プロセス
(5)高機能触媒	可視光応答光触媒、脱白金族系・非貴金属系、光エネルギー変換、ナノシート

状況変化に対応して、環境・エネルギー・資源問題解決を出口とする材料研究の比重が高い。いずれの研究課題も、**今加速しつつも10年程度先を見据えた長期的な加速・強化策が必要**とされ、地道に継続することが実を結ぶ材料研究の特徴といえる。**長期的で挑戦的な課題**であるため、世界的に優位にある日本企業といえどもが手を出せない**リスクの高い基礎研究**に集中した課題設定となる。企業の優位さに比較し、原理解明や解析技術などの基礎研究の部分では手薄で競合状態にあり、加速するべきとの認識につながっている。

### 2.2 事業化の状況と促進のための課題

加速するべき5課題について、事業化の状況を整理した。ナノテクノロジー・材料研究におけ

る事業化とは、実用化ステージにつながる材料を創出できたかということの意味する。

(1) 燃料電池：企業での実証試験段階にあり、実用化に近い段階である。しかし、機構解明などの基礎研究が十分なされていないため、基礎研究をさらに加速し強化すべき。

(2) 新規超伝導体：2008年2月に発見されたもので、その発現機構解明や新規物質探索等の基礎研究段階にある。

(3) 二次電池：ハイブリッド自動車はNi-MH電池からLiイオン電池へ移行する段階にあり、企業での実用化研究もされている。固体電解質、有資源元素を用いた新規電極材料、新機構・新構造の原理解明については、基礎研究段階にある。

(4) 太陽電池：第1世代(Si系)は住宅用・工場用等に実用化されている。第2世代(非Si系・色素増感型・有機系)は基礎研究から実用化準備と言える研究段階まで幅広い。第3世代(量子ドット等)は基礎研究段階にある。

(5) 高機能触媒：貴金属削減は応用研究が主体で、実用化されつつある。脱貴金属化は基礎研究段階といえる。

### 2.3 国際比較(競争力比較)

(1) 燃料電池：実証試験で先行しているが、新材料研究では競合状態にあり、現在～10年後にかけての重点化が望まれる。

(2) 新規超伝導体：我が国発で優位にあるが、世界とりわけ中国で急速に研究投資が強化されており、優位性の堅持が必要。

(3) 二次電池：容量10倍・低価格化を実現し、自動車への展開や自然エネルギー平準化利用に向け、先行する日本のオリジナル技術。

(4) 太陽電池：我が国の優位は保たれているが、世界の競争は激化している。材料研究では競合している部分も多く、重点化が必要。

(5) 高機能触媒：触媒全般では世界的に優位にあるが、基礎研究では競合関係にありながら研究人材は手薄。

### 2.4 ナノテクノロジー・材料分野内での領域融合

領域融合に関しては、材料の研究に不可欠な基盤解析技術(TF1)、物理学・化学等のナノサイエンス(TF5)との連携・融合は、すべての課題に不可欠な要素であり、基礎研究を重視すべきである。

(1) 燃料電池：水素可視化・放射光分析等基盤解析技術やナノサイエンスとの領域融合。

(2) 新規超伝導体：基盤解析技術・ナノサイエンス(物性物理や固体化学)との領域融合。

(3) 二次電池：電気化学以外からも広く領域の融合が必要。特に、ナノサイエンスとの領域融合。

(4) 太陽電池：原理解明での基盤解析技術・ナノサイエンスとの領域融合

(5) 高機能触媒：基盤解析技術・ナノサイエンス・ナノエレクトロニクスとの領域融合が重要。

## 2.5 成果の他7分野への展開（分野間連携・融合と具体的方策）

他分野との関係について言えば、大半が**エネルギー分野との連携が必要**で、一部環境分野との連携も重要である。連携の形態としては、システムの実用化研究を推進する他分野から材料特性のニーズを提供し、ナノテク・材料分野が独自に新規な高性能材料を創製し提供するという役割分担を基本とし、元素戦略的な出口側との垂直連携が望ましい姿である。材料のブレークスルーがもたらしうる新たな展開の可能性について、ロードマップを通じて共有化することで、連携を強化するべきとの考え方もある。出口としてのデバイス等の性能・特性を決定的に支配するのは材料自体の特性であり、その意味でも材料研究の更なる強化が必要である。**短期的で実用化に近い技術開発を中心に施策を組み立てている経済産業省と基礎研究を重視する文部科学省との垂直連携を前提に、具体的な方策の検討と早急な材料の基礎研究強化策の反映が、表3の5分野で特に急務となっている。**（別添3）

（1）燃料電池：エネルギー分野（先端科学、実用化研究）との分野連携、一部ものづくり分野との連携が必要と考えられるが、新規材料の研究開発は材料分野主導が良い。

（2）新規超伝導体：情報通信・エネルギー分野との連携が必要で、当面10年後に向けた加速策が必要。

（3）二次電池：エネルギー分野との連携を図り、課題実現のための材料要求特性値へのブレイクダウン、新材料の高機能性データと新用途展開のロードマップ（10～20年後まで）の作成・共有化が重要。

（4）太陽電池：エネルギー分野（発電システム）との連携が必須で、材料の要求特性分解、高機能新材料の新用途展開ロードマップの作成・共有化をするべき。

（5）高機能触媒：ナノテク・材料分野単独が可能な研究から、環境・エネルギー分野との連携が必要な研究まで幅広い。

## 3. 推進方策の提案

### 3.1 研究課題

状況の変化に示したように、エネルギー問題と資源問題の解決につながる研究課題の重要性・緊急性がより一層高まっている。第3期の計画段階では、未普及のエネルギー利用などに重点を置いたが、現在の状況変化を考慮すると、「未普及」以上に、「未利用」に着眼するべきである。すなわち「**未利用エネルギー**」「**未利用資源（都市鉱山等）**」をキーワードとして、将来戦略を考えるべきである。「使われてこそ材料」の認識は、材料研究の基本であり、情報・通信、医療、環境等の出口に対する研究の位置づけを絶えず意識する必要がある。

最近の高度な機能性向上の要求に応えるためには、真に材料によるブレークスルーが必要とされる。他の領域や分野との連携も当然重要であるが、基礎科学としての材料研究を大切に、強化していくことも不可欠である。連携する場合の**材料の軸足は、「基礎科学・基礎研究」**であり、他省庁や企業との連携も、軸足をしっかりと据え付けておくことが前提となる。

近隣諸国との学術的な活動における競争激化への対応であるが、**発想・視点の転換**もひとつの打開策につながる可能性がある。これまで、大規模化や高効率化を前提とした視点だけで研究課題が議論されてきた。例えば、エネルギー問題解決にしても、小規模なエネルギー発生・貯蔵といったマイクロエネルギー開発といった新たな視点からの研究のアプローチが必要とされる。

(1) 燃料電池：エネルギー分野とは、適切な役割分担を明確にし、エネルギー分野が主導している実証試験で得られた課題を材料の基礎研究へフィードバックする流れを構築する必要がある。一方、材料は基盤解析技術を駆使した基礎研究と新規材料の研究開発を担う。新規材料の研究開発は材料分野主導が良い。

(2) 新規超伝導体：物性物理や固体化学との融合、それに電子・電気工学の加わった展開が必要。材料の基礎研究は、材料分野主導でよい。

(3) 二次電池：エネルギー領域とナノテク材料領域の連携を図り、課題実現のためには材料特性値として何が必要かをブレイクダウンする。材料のブレイクスルーがあって、新しい材料特性のチャンピオンデータができれば、こういう新しいアプリケーションができるというようなロードマップを作成し、大学・研究機関と民間で共有することが重要。

(4) 太陽電池：材料の基礎研究は「材料」主導で進めるのが良いが、太陽電池システムではエネルギー分野との連携が必要。(二次電池と同様)

(5) 高機能触媒：化学の分野だけでなく物理、ナノサイエンスの融合が必要となる。環境・エネルギー分野との連携も必要で、効率的触媒研究の体系的な取り組みが出来るような体制作りのため、学協会主導での推進が良いとの側面もある。その他、集中拠点化等、推進方法にも多様な提案がある。

### 3.2 人材育成 (TF1 と関係)

初等・中等教育での理科離れ抑制、高等教育終了者、とりわけ博士後期課程修了者に対する優遇策導入が早急に必要とされる。

人材の育成には終わりはなく、常に10年以上の長期的・継続的な対策が必要である。最近、大学・大学院教育に対して導入された21世紀COE、グローバルCOEは博士後期課程の人材育成・研究の高度化に貢献しているが、特にナノテクノロジー・材料に焦点を絞っているわけではない。また、限定された大学の特定専攻の発展には寄与しているが、全国的な展開はない。教育中心のプログラムとして、大学院教育改革支援プログラム、魅力ある大学院教育イニシアティブ、質の高い大学院教育推進プログラムが実施されているが、これらは当該大学、特定専攻の教育コンテンツの開発にとどまり、しかも短期間であるためその効果に乏しい。

大学院教育プログラムでは、学歴にふさわしい総合力(マネージメント力)の育成がほとんど考えられていない。この問題を解決するためには、研究力の向上と共に、テーマを(できればプロジェクトを)推進する訓練、すなわち複数の人と有効なコミュニケーションを繰り返し、成果にまで高める訓練、言い換えるとそれが可能となる環境を整備することが必要である。具体的な方策として、企業・大学間プロジェクト、文科省や経産省資金のプロジェクトにおいて、博士後

期課程学生をプロジェクト推進者として企画・研究遂行に責任を負わせる制度の導入が有効である。

以上のように、大学・大学院での組織的・体系的教育が不足しており、単発的な従来の取り組みを越えた包括的・抜本的な改革への支援が必要である。例えば、教育は大学、公的研究機関は研究中心といった従来の意識を改め、先端的な研究分野に関して言えば、研究設備の充実した研究機関と大学が連携し、研究機関に大学院を併設し、講義等は大学で、研究プログラムは研究機関で行うといった大胆な制度改革が必要とされる。

第3期の成果で取り上げた「新高温超伝導物質の研究」の意義で忘れてならないのは、人材育成への効果である。銅系超伝導体の研究には多くの気鋭の研究者が参入し、その中から現在、物質科学・材料科学の世界的リーダが数多く育っていることは特筆に価する。優秀で野心のある若手は、こういう魅力的で何が出てくるわからない挑戦的テーマに取り組むことで鍛えられ、大きく成長すると判断される。(人材育成のための施策以外に、先駆者(研究者)として後進のものが魅力を感じるよう研究成果を出すこと、そのための継続的な研究支援も必要。)

### 3.3 拠点形成 (TF1と関連)

ナノテクノロジー・ネットワーク、先端研究施設共用イノベーション創出事業、ナノテク総合支援センターにより全国のナノテク関連施設のネットワーク、共用化が一定の進展を見た。

しかし、大型共用設備の整備、装置管理者の配置等が不十分であり、充分機能しているとは言い難い。

最新の設備と装置の高いレベルでの稼働を可能にする維持・管理人件費を含めての資金面の継続的な対策が必要である。

既存の学問分野(有機、無機セラミックス、高分子、金属 他)の個々の範囲を越えて、分野横断的な新しい材料科学としての拠点形成に重点的に取り組むべきである。

以上

## 材料タスクフォース

### 主査

馬越佑吉 独立行政法人 物質・材料研究機構理事

### 副査

岡田益男 東北大学副学長

### 構成員

村上正紀 立命館大学副総長

細野秀雄 東京工業大学フロンティア研究センター 教授

河内哲 住友化学株式会社最高顧問

中村崇 東北大学多元物質科学研究所教授

宮山勝 東京大学先端科学技術研究センター教授

澤本光男 京都大学大学院工学研究科高分子化学専攻教授

射場英紀 トヨタ自動車株式会社電池研究部長

西山昭雄 三菱マテリアル株式会社加工事業カンパニー  
ダイヤモンド工具事業部部長

ナノバイオタスクフォース  
最終報告書

タスクフォース主査

梶谷 文彦

平成 2 1 年 3 月

### ① 第3期科学技術基本計画における進捗と状況変化

ナノバイオテクノロジー領域の関係各省の研究施策においては、厚生労働省「医療機器開発推進研究事業・ナノメディシン研究プロジェクト」と経済産業省「分子イメージング機器研究開発プロジェクト」において、製品開発（産業）と臨床研究（医学）とのシームレスな連携を図るため、同一の研究計画に対し「産」に対しては経済産業省（（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構）から、「医」に対しては厚生労働省からの研究費補助（マッチングファンド）が行われ、医学・薬学の高度な専門知識と民間企業の先端的な工学技術を融合し、大学や医療機関の先進的技術と民間企業との医薬工連携による先導研究が実施されてきた。現在までに、この取組に加えて、ナノメディシン研究プロジェクトとライフサイエンス分野の戦略重点施策である経済産業省「インテリジェント手術機器研究開発プロジェクト」との連携も進み、マッチングファンドの取組が拡大している。

また平成19年度から「ナノテク・先端部材実用化開発（経済産業省）」に「異業種・異分野連携枠」が設けられるなど、実用化にウエイトを置いた施策が着実に推進されている。

一方で、「先端融合イノベーション創出拠点の形成（文部科学省）」では、北海道大、東北大、東京女子医大、名古屋大、京都大、大阪大、岡山大などのナノバイオ関連テーマが採択され順調な進展が見られたことに加え、これまでの東大のナノバイオ・インテグレーション拠点（「ナノテクノロジー・材料を中心とした融合振興分野研究開発（文部科学省）」）に加えた教育・研究拠点の形成が進み、医学・工学融合領域での研究及び教育体制の整備が進んだ。

加えて、ナノバイオテクノロジーに関する研究開発は、診断、治療といった医療関連分野のみならず、食品の開発や生体に各種の影響を及ぼす毒物、病因・環境物質の測定など関連する研究も多岐にわたっており、農林水産物のナノ粒子加工技術並びにナノスケール評価技術を開発や食品ナノ粒子の新機能や安全性・加工適性等を明らかにするための施策「食品素材のナノスケール加工及び評価技術の開発（農林水産省：平成19年度開始）」等が実施されている。

こうした中で、研究成果も着実に得られてきており、例えば、がんの超早期診断を対象とした分子イメージング研究において、がんを短時間で撮像する手法の開発や、がんへの高集積性の確認、微小がんの診断に繋がる撮像装置の検出感度の向上等が図られ、がんの超早期診断の実現に近づいている。この他にも、分子イメージング研究においては、アルツハイマー病の早期診断技術等が進展してきている。

また、研究拠点の形成により、医学・工学融合領域での研究・教育体制の整備が進展し、DDS、イメージング、ナノデバイスの各分野において、拠点発のベンチャー企業の創出等、期待のできる成果が着実に得られてきている他、ナノバイオテクノロジー領域の将来を担う若手人材の育成も進んでいる。

## ② 事業化の状況と促進のための課題

厚生労働省・経済産業省の連携により、DNA チップ他の医療機器開発・評価ガイドラインが策定され、また文部科学省・厚生労働省・経済産業省による「革新的医薬品・医療機器創出のための5か年戦略」では、ベンチャー企業の育成、臨床研究・治験環境の整備、審査の迅速化等が謳われ、先端医療開発特区の導入、ベンチャー企業を対象とした研究開発事業が開始するなど、事業化を促進する施策が進展した。

これらの着実な推進のためには、産学官のコンソーシアムが有力な手段となり得る。医療技術産業戦略コンソーシアム(METIS)の活動はその好例であろう。

今後、先端医療開発特区を活用した実用化事例の早期実現とそのため各省連携強化、医療機器審査人員の拡充・育成等の施策により、一層の事業化促進を図る必要がある。

## ③ 国際比較

例えば「科学技術・研究開発の国際比較 2008年版(ナノテクノロジー・材料分野)」((独)科学技術振興機構研究開発戦略センター)によれば、DDS、医療用ナノ粒子材料、分子イメージング、再生医療用材料・生体適合材料、医療用チップを対象とした科学技術・研究開発の国際比較が行われており、ナノバイオテクノロジー領域全体としては、「研究水準、技術開発水準、産業技術力ともに米国が依然として優位を占める。日本は研究水準は高いものの、産業技術力は欧米の後塵を排している状況にある。」「日本はDDS用材料、再生医療材料分野の基礎研究で一步先んじているものの、他の分野では圧倒的優位を誇るものが無い。」との分析がなされている。また、それぞれの研究領域についての現状は、当該国際比較においては、以下の旨が示されている。

### ○DDS

…従来からの経口製剤から体内標的治療やPEG化タンパク医薬など、より先端分野への展開が著しい。生体適合性や標的指向性に優れたキャリア開発の重要性が増加。

### ○医療用ナノ粒子材料

…材料及びアプリケーションの開発が急速に進められている。ドラッグデリバリー、イメージングなどの近い将来に実用化が期待されるアプリケーションに向けた材料の研究開発が盛ん。欧米ではこれらに特化したベンチャーが多く存在するが、日本を含むアジアでは企業レベルの取組はあまり多くない。しかしながら、大学をはじめとする公的機関の研究開発が盛んであり、今後の発展が期待される。

### ○分子イメージング

…日米欧が拮抗しながら、熾烈な国際競争を行っている。日本は、顕微鏡・カメラなどのハードウェアについては、高い国際競争力を有す。イメージング試薬においても一部高い競争力を有するが、量子ドットなどの半導体イメージング材料の分野は米国が先行。ソフトウェア開発も欧米が先行。

### ○再生医療用材料・生体適合材料

…細胞移植による再生誘導治療については、細胞の取扱に関する科学技術と細胞の許認可に問題があり、必ずしも臨床応用が進んでいないのが世界的な流れ。

生体材料を利用した再生誘導治療は企業が商品化しやすい領域であるが、細胞移植による再生誘導治療に比べ遅れている。日本においては医療機器の許認可の厳しさや特許戦略の欧米に比べた遅れから、科学技術が企業化にうまく生かされていないのが現状。日本では、基礎研究から生まれた潜在的価値の高いシーズを産業化まで持って行くシステムがうまく働いていない。

### ○医療用チップ

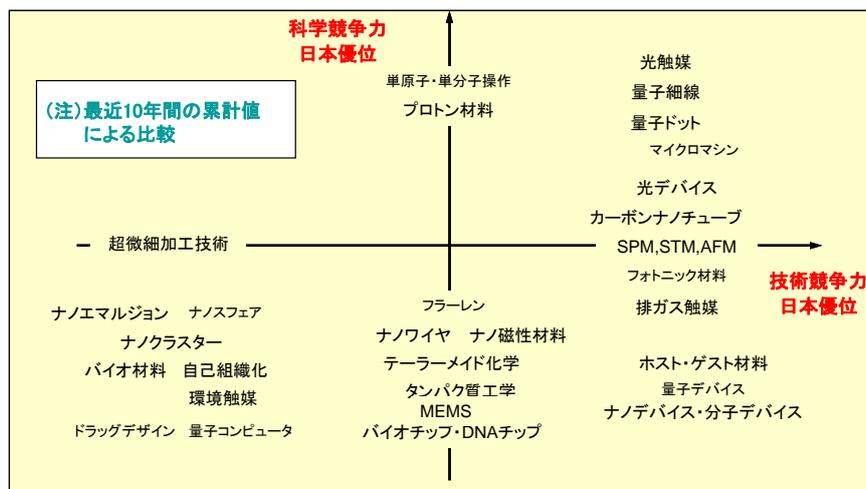
…バイオチップμTASなどの分野は米国・欧州で始まり問題点(コスト、市場性)が指摘されるようになってから、約7、8年遅れ日本でも流行。日本では現在小康状態であり同様な問題を抱え、韓国・中国などのアジアが積極的に研究を拡大。

日本でも欧州でも技術開発力は高く、製品化を推進するポテンシャルは十分にあると考えられる。日本における課題は、本分野の技術的特長を生かし、新しい市場を社会的要請に沿った形でいかにして創出するかであり、技術開

発とインフラ整備を合わせて社会技術として開発する必要がある。

欧米で盛んだった DNA シーケンサーをチップ化する初期の研究フェーズが衰退した後、より一般的に応用できる日本の研究がここ5年間世界をリードした。しかし、世界から追われる立場になったにもかかわらず、ここ2年くらい国内研究助成も奮わず、日本は失速傾向にある。

また、下図は、第二期科学技術基本計画策定時の1990年代のデータを用いた競争力評価（「ナノテクノロジーの21世紀展望」応用物理）であるが、基本的には変化がないと判断される。この傾向はナノバイオテクノロジー領域においても、全体としては同様の傾向であると考えられる。



個々の技術領域の状況については、以下の通りである。

イメージング機器の中でも、PET、MRI といった分子イメージングにおいて活用される機器については、約20年前は国内メーカーも海外メーカーに伍していたが、この10年間は海外に押されている傾向にあるといえる。その要因として、海外メーカーが医療を中核事業として捉え、M&Aを含めた積極的な投資を行ってきたのに対して、国内メーカー各社は医療への投資が少なかったことやソフトウェア開発の遅れ等が要因として考えられる。

また、内視鏡による診断や手術技術の開発に関しては、精密機器や電気機器を小型化する日本の得意分野が生かされ、国際的に見ても高い競争力、製品シェアを有している。

分子イメージングはライフサイエンス、バイオテクノロジーの基盤技術であり、この分野が衰退することは基盤技術の衰退を意味し、今後、大きなハンディとなると考えられることから、医療機器分野での事業化の遅れを解消するため、研究開発の強化の他、②に示した課題の解決にも国として取組んでいく必要がある。

DDS 分野においては、日本の研究者によって EPR 効果 (Enhanced Permeation and Retention effect) が提唱されて以降、特に固形がんに対するターゲティング研究は活発に行われてきており、近年においても新規 DDS 材料の開発も活発に行われており、国際的

に見てもこの分野の研究開発水準は高いと言える。

また、フォトンクスに関連する産業分野では、日本は強いが、学問分野の融合を進めていく上で大学組織や学会等における縦割りの壁が指摘されており、イノベーション創出の効率で見た場合、現時点では、日本は高い水準にあるとは言い難い。壁を超えた組織として大阪大学のフォトンクスセンター等があるが、こうした組織において、長期的に継続してプロジェクトを実施していくことが重要である

さらに、シミュレーションの分野も研究者人口という意味においては、欧米諸国の後塵を拝する状況にある一方、バイオ関連でない材料開発の分野では、シミュレーションとの連携が産学ともに適切になされ、高い競争力を持っているケースも見られる。この要因としては、日本が科学として十分に確立された分野をさらに進展させることには優れているが、バイオに関わるような未成熟な分野を開拓していくリスクを取ることが少ない傾向にあることが一因であると考えられる。また、工学分野以外の学問領域との異分野融合が、その高い障壁のために日本では必ずしも容易でないことがあげられる。

#### ④ 分野内での領域融合

ナノテクノロジー・材料分野の中では、材料領域・推進基盤領域・ナノサイエンス領域と特に関連が深い。現在ナノサイエンス領域にて取り扱われている生体ナノシステム機構の解明や推進基盤領域にて取り扱われているシミュレーション技術とは、今後とも融合を進めるべきと考える。

#### ⑤ 成果の他7分野への展開

ナノバイオの中でも、ナノメディシンの範疇に入る領域はライフサイエンス分野と切り離して考えることはできない。

特に臨床研究推進のための体制整備、医療における IT の活用、医理工連携等の促進、バイオ産業等における標準化の推進、バイオベンチャーの育成・支援などのライフサイエンス分野における推進方策は、ナノメディシンにとっても、重要な課題である。

また、前述の通り、ナノメディシン研究プロジェクトとライフサイエンス分野の戦略重点施策である経済産業省「インテリジェント手術機器研究開発プロジェクト」との連携も行われるなど、他分野との融合が進んでいる。

また、情報通信分野のスーパーコンピュータ開発における次世代生命体統合シミュレーションソフトウェアの開発（グランドチャレンジアプリケーション）からは、生体のナノスケールシミュレーション面での貢献が期待されている。

#### ⑥ 推進方策の提案

ナノバイオテクノロジー領域の研究推進に当たっては、医療という一つの出口を見据え

た場合、研究段階から実用化段階までの間に、大学等研究機関内での異分野融合連携の他に、大学等の研究機関の成果を事業化する企業に上手く移行していく産学連携、そして成果の国際化を進めていく上での国際連携といった種々の連携の推進が重要である。さらに、これらに加え、研究開発投資面、規制面等における政策的な支援を組み合わせることをポイントと考え、これらについて、以下の方向性を提案する。

#### ・研究体制

ナノバイオテクノロジーは融合・学際的な研究分野であり、学問分野の融合を進めていく上では、異分野融合により大学組織や学会等における縦割りの課題を解消し、産官学連携、学際研究が行える体制での研究推進を引き続き実施していくことが重要である。また、このような新興分野では人材の育成が重要であるが、産官学、学際研究を通じて人材が輩出される仕組みが必要である。

また、オールジャパンでの体制づくりとして、全国に広がってきているナノバイオ研究のポテンシャルの結集を図る目的で、ナノバイオ科学技術を強力に推進している研究機関を中核とした、ナノバイオ科学技術に取り組んでいる研究者や技術者、さらには産業界等も取り込んだネットワーク型の研究拠点の構築が臨まれる。このネットワークの活用により、特に次世代を担う若手人材の育成を効率的に進める必要がある。

計算科学では、スーパーコンピュータの周辺に、その利用者である多様な分野の計算科学を集約して、分野間の密接な連携を図るといった構想があり、そこにどのようにナノバイオテクノロジー分野の実験研究を組み入れることができるかが課題であろう。さらに、国際的な動向として、エネルギー・環境対策への取り組みが本格化する中、質の高い目的志向的基礎研究を推進すること等により、こうした研究開発にナノバイオテクノロジーの技術を活用していくこともまた期待される。また、デバイスの分野では、ナノ材料から、マイクロメカトロニクス、マクロ機械へとボトムアップしていくための研究開発体制の実現が待たれるところである。

研究開発において世界をリードするためには、我が国で得られた研究成果を国際化の一層の推進により、実用化に繋げることにより、知の好循環を勝ち取ることが必要である。現時点で知の資産によって国の富を増すという「知の好循環」は達成されていないものの、潜在的な可能性、期待値はきわめて大きい。そのために国として、海外の知的人材の日本への受け入れや、官民交流等を一層推進し、「知の好循環」に向けた教育や研究開発投資を実施していく必要がある。具体的には、日本がリーダーシップをとるような国際的に開かれた体制整備や国際プロジェクトの実施を積極的に行うことが必要である。わが国だけで何とかしようという発想が、オールドファッションである点も理解しておく必要がある。

#### ・事業化の推進

ナノバイオテクノロジー領域で事業化まで結びつけるためには、リスクの高さ、小回りの効く事業化体制、組織的な事業化力（体力）という、相反する条件をクリアしなければならない。わが国には、米国のベンチャーの様な社会的な風土がまだ完全には形成されていない面もあることから、まずは産学連携を進め、基盤研究を大学等が担う仕組みを作っていくことが重要である。また、欧米ではベンチャーによる新規機器、あるいはプローブ開発がまずなされ、その中で商業化の目途がたったものを大手企業が買収するという仕組みができており、日本でのベンチャー育成も引き続き、重要な課題である。

また、これまでの産学連携のプロジェクトを振り返ってみると、大学等と企業がはじめから終わりまで密に連携してプロジェクトを同時進行的に推進した例はあまりなく、大学は大学、企業は企業と離散的になされてきたケースも多い。そして最終段階になって大学から企業（基礎から応用）へのバトンタッチということになり、このギャップが大きく（魔の川、或いは死の谷）バトンタッチがなかなかうまくいかない。加えて、研究から医療・臨床研究に移行する際の壁（後述）もあるように、課題としては、大学等の研究機関から企業への成果の移行をスムーズに進めていくことが重要である。

大学、企業間の縦の分野融合を本格的に実施することにより、その成功が大学の目的志向の基礎研究マインドを醸成することになり、加えて企業も大学に積極的に大型の研究委託を行う呼び水となる。これが大学の活性化とパフォーマンスを追求する質の高い研究者育成につながり、更に企業の再投資という好循環社会を生み出していくことが期待される。

#### ・研究から医療への壁

医工連携に当たっては、研究段階から医療（臨床研究）に移行する際に、工学分野と医学分野における臨床研究に対する認識の差が見られるとの指摘がある。医工連携に当たっては、両分野の認識の差を埋める必要があるとともに、最終的な出口である医薬品、医療機器等としての実用化に当たっては、臨床医のみで対応可能であるとは言い難く、製薬企業、医療機器企業等、製品開発を専門とする企業に、どのタイミングで研究成果を移転していくかがポイントになる。

医工連携の人材の育成を進める際には、臨床研究での有効性や安全性の評価について研究者自らが考えることを可能とする臨床開発を担う人材の育成に注力するなど、臨床研究移行時の研究者同士の認識、或いは製品化する際の研究者と企業間の認識のギャップを埋めていくことが重要である。

また、「革新的医薬品・医療機器創出のための5か年戦略」や、「科学技術の振興及び成果の社会への還元に向けた制度改革について」（2006年12月25日総合科学技術会議決定・意見具申）中の「臨床研究を推進するための制度的枠組みの整備」等に基づき、臨床研究の被験者保護や行政、医師・医療機関、被験者の適切なリスク・責任分担体制の整備といった臨床研究制度や、薬事審査体制の整備といった制度改革も進められており、産学官の

連携の下でこうした取組を引き続き進めていくこともまた重要である。

・安全性

ナノ粒子の安全性については、現在、各種の研究が実施されているところであるが、人への影響について十分には解明されたという状況にはなく、現在、各種検討が進められている。

ナノ粒子の安全性に関し、ナノバイオテクノロジー領域において特筆すべきこととして、医療分野においては、例えばナノ物質の体内への投与、埋め込み等、侵襲性の高い経路による曝露が想定されることが挙げられる。

このことから、研究段階から人に対する安全性の評価についても並行して検討しながら研究を進めていくことが非常に重要である。医療分野の出口製品である医薬品、医療機器等については、品目毎に市販前に有効性、安全性等が事前に審査されていることから、安全性や品質についても研究段階から検討しておくことが、迅速な実用化に繋げる上でも重要である。

以上

## ナノバイオタスクフォース

### 主査

梶谷 文彦 総合科学技術会議 専門委員/科学技術連携施策群  
ナノバイオテクノロジー連携群 コーディネーター

### 構成員

田中 一宜 (独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター  
上席フェロー/(独)産業技術総合研究所フェロー

亀井 信一 (株)三菱総合研究所 科学・安全政策研究本部  
副本部長

松村 光雄 元(独)科学技術振興機構研究開発戦略センター  
シニアフェロー

片岡 一則 東京大学 大学院工学系研究科 教授

平岡 真寛 京都大学 大学院医学研究科 教授

生田 幸士 名古屋大学 大学院工学研究科 教授

野地 博行 大阪大学 産業科学研究所 教授

木寺 詔紀 横浜市立大学 大学院総合理学研究科 教授

馬越 祐吉 (独)物質・材料研究機構 理事

安宅 龍明 ナノテクノロジービジネス推進協議会