

内閣府ナノテクノロジー・材料PT 材料TF中間報告書

2008年12月18日

材料TF委員

射場英紀（トヨタ自動車株式会社 電池研究部 部長）

馬越佑吉（物質・材料研究機構 理事）◎、PT

岡田益男（東北大学 副学長）○、PT

河内哲（住友化学株式会社 最高顧問）PT

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）

中村崇（東北大学多元物質科学研究所 教授）

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部 部長）

細野秀雄（東京工業大学フロンティア創造共同センター 教授）PT

宮山勝（東京大学先端科学技術研究センター 教授）

村上正紀（立命館大学 副総長）PT

◎：主査、○：副主査、PT：ナノテクノロジー・材料PT委員

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 第3期科学技術基本計画の研究成果

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。これら研究成果の中で特に重要と思われる材料領域の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 重要な研究開発課題別第3期の顕著な成果

研究開発課題	第3期の顕著な成果
【エネルギー問題の克服】	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
	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】	光触媒（防汚、抗菌、超親水）
	透明酸化物導電体
	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）
	二次元ナノ構造制御したナノシート材料の創製

いくつかの成果について、実用化との時間的な距離に差がある事例を選び、その状況をまとめておく。

1. 1. 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

「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MgB₂の発見は重要だが、周囲に高い臨界温度 T_c の物質が存在しない特異点）。今年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 T_c が短期間に MgB₂ 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 CuO₂ 面は必要であるといういわば「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。

1. 1. 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

「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 12CaO7Al₂O₃(C12A7)が、電子がドーピングでき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。ただし、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。

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プ酸化チタンである。抵抗率やエッチング性に高いハードルがあるが、TiO₂ の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。

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 (ZnO) が筆頭である。歴史的には ZnO は性能で 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、国際比較では優れている。

1. 1. 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

「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) を利用しての冷却システム開発、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。

「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。

1. 2 第3期科学技術基本計画にかかわる状況変化

第3期に入ってからの主な状況変化としては、以下の3点を特筆すべき変化として挙げる事ができる。

■エネルギー問題

■資源問題

■近隣諸国の追撃と、競争の激化

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。

また、急激な経済環境の悪化は、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するなど、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るが、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。

このような状況の変化を踏まえ、今後加速すべき研究課題を考える。

2. 第3期科学技術基本計画促進のための課題

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、別添2にまとめた。加速して推進するべきと判断した研究課題についても、成果と同様の基準が当てはまる。

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として下記が挙げられる。（表2）

表2 今後特に加速すべき課題

今後特に加速すべき課題	実施時期、国際比較、領域融合・分野展開、推進方法等
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。	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。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、エネルギー分野(先端科学、実用化研究)との分野連携が必要と考えられるが、新規材料は材料分野主導が良い。
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	革新的応用に繋がる可能性があり、将来の物質科学・材料分野を担う人材育成にもつながる。我が国発で優位にあるが、世界中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。基盤解析技

る原理解明と新物質創製	術・ナノサイエンスとの領域融合、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。
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	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が期待される。ナノサイエンスとの領域融合、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。
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	日本が先行しているが、新材料研究では競合状態で、現在～10 年後の重点化が必要。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の他、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。新材料研究は材料分野主導でよい。
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	触媒機構の基礎的解明と体系化およびその展開、貴金属フリーに向けたナノ材料開発等、触媒機能の本質を明確にする理論的なアプローチを重視した基礎研究に当面 10 年程度は注力すべき。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。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。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。学協会主導、集中拠点化等、推進方法にも多様な提案がある。

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つながっている。

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、基礎研究重視の方針に合致している。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を望ましい姿としている。材料のブレイ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。

3. 推進方法の提案

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し、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。

3. 2 人材育成

現状認識としては、

- ・日本の理科離れを食い止めなければ、日本の将来は発展性がない。
- ・理科離れは、初等・中等教育時から始まり、高等教育では手遅れである。
- ・理科離れの一因は、国内での高等教育を受けた理工系学生の将来性が必ずしも明るくないことに起因する。
- ・特に、高等教育の最終過程を受けたドクターの存在価値が全く無いことに問題である。（欧米だけでなく、中国でのドクターの優遇状況は最近大いに改善）

等、従前から強く言われているように、大学・大学院教育の前後における対応策も必要である。

前) 初等・中等教育での理科離れ抑制

後) 高等教育終了者の優遇

人材の育成には終わりではなく、常に10年以上の長期的・継続的な対策が必要である。

一方、大学・大学院教育に対しては、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く、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。また、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

ため効果に乏しい。

期待される博士後期課程の教育には 2 つの道があるが、大学院教育プログラムでは、下記②がほとんど考えられていない。このため、博士後期課程修了者よりも、3 年企業でもまれた前期修了者の方が、企業ではより有用となり、後期課程修了者の就職が比較的困難な現状を招いていると考えられる。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。

① 高度な研究者として貢献できる人材になること

②（特に企業に入社する場合）研究者として力量とともに、薄まったとはいえ年功序列社会に入ったときに学歴にふさわしい総合力（マネージメント力）を備えていること

このようなテーマ（プロジェクト）推進の訓練は、企業との小さなプロジェクトでも良いし、文科省や経産省資金のプロジェクトでも良い。プロジェクトの推進者になる場合には、プロジェクト費用から労務費が支払われる制度があっても良い。

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。

最近、東大化学システム工学専攻で大学院教育改革が組織的に行われている事例は、組織的・体系的教育の一例といえ、他学科、他大学の事情に合わせた形での展開を期待する。

JST の新興分野人材育成プログラムにおいて、ナノ高度学際教育訓練プログラム、社会人再教育プログラムが実施され、ナノに特化したプログラムとして評価できるが、助成修了後の展開が注目される。

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

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る、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組むべきである。

以上

ナノテクノロジー・材料分野中間報告（ナノバイオ領域）

① 第3期科学技術基本計画における進捗と状況変化

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（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産省「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（経産省）」に「異業種・異分野連携枠」が設けられるなど、実用化にウェ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（文科省）」では、北大、東北大、女子医大、名大、京大、阪大、岡大のナノバイオ関連テーマが採択され、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（文科省）」）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。

② 事業化の状況と促進のための課題

厚労省-経産省の連携により、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、また文科省-厚労省-経産省による「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。

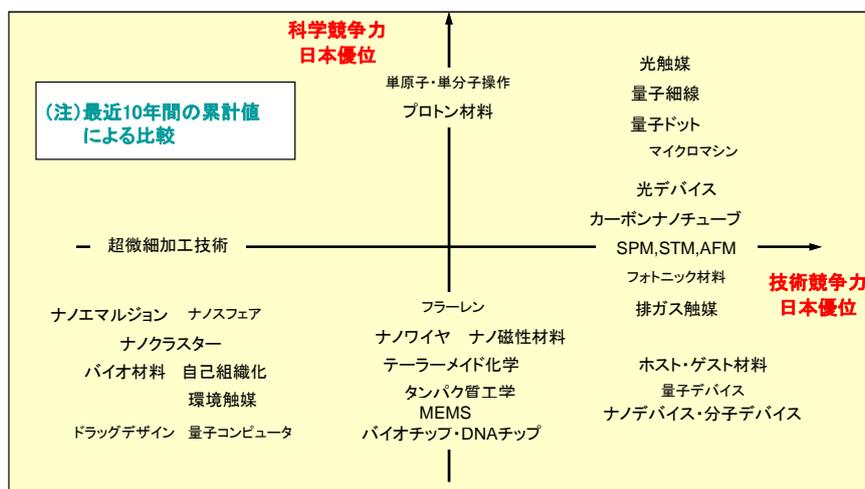
今後、先端医療開発特区を活用した実用化事例の早期実現とそのため各省連携強化、医療機器審査人員の充実・育成等の施策により、一層の事業化促進を図る必要がある。

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、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から、「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でいるものの、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。

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、これがどのように変化してきたのかについて、客観的データに基づき検証したい。



さらに、タスクフォースの目標である「世界の中でナノテクノロジー・材料分野の研究および事業化をリードするために国は何をなすべきか」に関しては、例えば、国際的な日本主導のプロジェクトを創る（研究）ことを指すのか、世界的なリーディングカンパニーを創る（事業化）のか、といった定義づけを含めての検討が必要と考える。

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

・研究→医療への壁、臨床研究

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事前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。

今後、以下のキーワードを中心に検討予定。

- ・拠点化（分野融合、コスト配分）
- ・分野融合領域輩出人材の進路
- ・付加すべき施策

以上

内閣府ナノテクノロジー・材料P T ナノサイエンスT F 中間報告書

2008. 12. 16 ナノサイエンスT F

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 進捗

第3期科学技術基本計画では、『True Nano』の推進がうたわれている。その目指すところは、1. 従来の延長線上ではない、不連続な進歩（ジャンプアップ）が期待される創造的な研究開発そして、2. 大きな産業応用が見通せる研究開発である。

ナノサイエンスT Fでは、サイエンスとして価値のある成果で、ナノテク・材料分野に限らずより広範な分野における研究技術開発の基盤として有用な技術開発として推進すべき課題と、統合ナノ科学技術として実用化に向けての新展開を目指すべき課題との仕分けに留意しつつ、第3期科学技術基本計画期間中の顕著な研究成果および今後さらに推進すべき研究課題を検討した。

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、ナノサイエンス領域で推進すべき9つの項目について、主な成果を表1にまとめた。これらの選択された成果は、『True Nano』の研究推進に当たるかどうかを基準とした。

表1 重要な研究開発課題別第3期の顕著な成果

項目	第3期の顕著な成果
量子計算技術	量子暗号・通信分野：ファイバー通信伝送に有利な1.5ミクロン帯単一量子光源、多者量子テレポーテーション、4光子量子操作の実現
	固体量子計算：量子ドット、超伝導系で2量子ビットとゲート操作の実現、多ビット化と量子ゲート操作へ向けた研究に着手
	通信の媒体（光）と計算の媒体（原子、電荷、スピン）の融合、原子や超伝導系と単一光子状態の結合に成功
	量子情報理論（安全性の高い量子暗号理論など）の開発、基礎物理（デコヒーレンス問題と多体量子相関）の研究の進展
	固体量子コンピュータ素子の基本的な性能指数であるデコヒーレンス時間の直接観測に成功－量子コンピュータ素子の性能評価
	量子アルゴリズム実行が可能な回路技術を開発
	光ナノ共振器を大規模に連結させ光信号を遅延することに成功
界面の機能解明・制御	酸化物などイオン性の強い物質系異種界面での化学ポテンシャルの違いを利用した2D電子ガスの実現
	SrTiO ₃ の極薄（厚さ0.4ナノメートル）層に局在化した電子が巨大な熱起電力を発生することを発見
	ZnOなどを用いた積層薄膜で量子ホール効果を初観測－透明な酸化物半導体でも従来の半導体並みの電気特性をもつことが可能、透明エレクトロニクス実現の可能性
	ヘテロエピタキシャル成長により作製した界面での分極不連続を利用したモット絶縁体へのキャリア注入
	2次元正孔量子ホール系でストライプ相を観測
	分子1個の電場応答現象－分子ナノデバイスの実現へ
	分子1個の振動分光－単分子デバイスの分子種確認へ
	固液界面の表面力測定に成功
燃料電池触媒の開発に成功（山梨大渡辺）	
生体ナノシステムの機能解明	リン原子の立体が厳密に制御されたホスホロチオエートRNAの合成技術を開発した。この技術によって得られる人工RNAは、生体内で安定に存在し、核酸医薬として優れた性質を有するため、RNA干渉薬としての応用が期待
	薬物移送システム－ナノ粒子用いたDDS技術開発

	シリコンの発光現象利用で生体内で薬剤などが移動する様子を可視化できる技術を開発
	光るNT開発ー薬効研究に応用期待
	極微細加工技術とバイオ技術との融合
	生体分子マニピュレーション
	有機ナノチューブで(内径50nm)ナノピペット作製ー単一の細胞(容量は約1,000フェムトリットル)内への超極微量の有用物質注入による医療応用、あるいは超極微量の成分吸引による単一細胞分析などへの活用が期待
	生体を生きたままで微細観測が可能な「水の窓」のX線を発生
材料・エレクトロニクス	グラフェンシートの研究の進展
	室温で動作する強磁性半導体材料の開発: 電流と電子のスピンを自在に制御、スピントロニクスで高速低消費電力コンピュータの実現に期待
	金の室温巨大スピンホール効果の観測に成功ースピントロニクス素子
	巨大ナノ膜(30nm)の作製
	熱膨脹ゼロセラミックスの開発に成功-精密プロセス分野での利用に期待
	カーボンナノチューブを用いた伸縮自在な高導電性物質: 単層カーボンナノチューブを用いて、化学的に安定なエラストマー(ゴム状の弾性体)としては世界最高の導電率(57ジーメンズ/センチメートル)を示す、新しい伸縮性導体の開発に成功
	ナノギャップ不揮発性メモリーの集積化に成功: 抵抗変化のOn/Off比が $10^4 \sim 10^7$ と高く、10万回以上の状態変化が可能、10ナノ秒の短いパルス電圧でも抵抗値の切り替えが可能のほか、記憶状態の保持期間が半年を経過しても殆ど変化しないなど良好な素子性能を示した
	分子ワイヤを使った多値レベルトランジスタを開発; ペンタセン分子に置換基を取り付けたものを真空中で蒸着し、自己組織的に一次元状のワイヤ結晶となることを発見。単結晶構造で、抵抗率が約 $10^4 \Omega m$ 程度
	ナノシートの光触媒・磁性など機能材料への展開
	チタニアナノシートの発見
	ナノチューブ(カーボン、酸化物等)の研究の進展
ナノ領域最先端計測	先端開発 電子顕微鏡, 各種プローブ顕微鏡, 各種分光法, 質量分析, 各種共鳴法など, 全般的に積極的な研究開発が継続。
	10兆分の1秒で形を変えていく分子の瞬間の構造を観測
	マルチ探針走査型トンネル顕微鏡の開発
	1個の金ナノ微粒子の1個の電子を力で計測
	光を感じる分子1個の動き電子顕微鏡で観察
	大面積ナノ構造加工技術、ナノ成膜技術: 1. 光ディスク技術からナノ構造光学デバイス産業の創出を目指して 2. ナノめっき法により微細電極を接続
大型放射光・XFEL	ナノ多孔体MOF(Metal Organic Framework)の発見
	光誘起相転移現象のDVDなどの光記録材料の高速相変化現象への応用
	XFEL(2006年度から2010年度にわたりSPring-8サイトにおいて建設が進められている。利用運転は2011年から開始される予定)
	「XFEL」の「色」を瞬時にとらえる装置を世界で初めて開発ーX線自由電子レーザー(XFEL)におけるサイエンスの展開へ重要なステップ

	X線自由電子レーザー (XFEL) 試験加速器からレーザー光の発振に成功 – XFEL のための電子ビーム生成技術の完成
シミュレーション	次世代スーパーコンピュータ
	マルチスケール・マルチフィジックス現象の統合シミュレーション
	電子相関効果の精密計算
	複雑な構造や相転移現象のシミュレーション手法
	大規模系の第一原理計算
	ナノテクノロジーを支える材料物性シミュレーション 1. 材料の力学物性の古典力学シミュレーション 2. 材料の光物性の量子力学シミュレーション 3. 材料の電気物性の量子力学シミュレーション
ナノ支援体制	ナノテクノロジー総合支援プロジェクト
	ナノテクノロジー先端研究拠点ネットワーク

・ナノ支援体制

ナノテクノロジー総合支援プロジェクト、ナノテクノロジー先端研究拠点ネットワークを通じて、ナノファウンダリ、電子顕微鏡、大型放射光、分子合成などの共用施設の開放が進んだ。ナノテクノロジー研究のすそ野を広げた功績は大きい。

①-2 状況変化

第3期に入ってからの変化としては、エネルギー・環境問題、資源問題、近隣諸国の迫撃などが上げられる。特に、今年度に入ってから国際経済の不安定な状況は、原油価格の大きな変動などの社会不安を引き起こしている。こういう時代にこそ、基盤技術を育て、根本からの技術革新を目指す研究開発を推進すべきであろう。ナノサイエンスの役割は、基礎科学や基盤技術の開発を通じて、社会的関心が高い、太陽電池や燃料電池などの効率的なエネルギー変換装置(システム)の開発、根本的な技術革新による省エネルギーデバイスなどの実現へ向けての基盤を築くことにある。

②事業化の状況と促進のための課題

“日本のナノテクは強い”という形式化された事実は、次節の国際比較を考慮するとある程度確認することができる。我が国は“ナノテクノロジーの個別要素科学技術”に強いため、我が国のナノテクノロジーは大きなポテンシャルを有している。炭素繊維や逆浸透膜の開発などは、40年近くの研究開発に近年ナノテクノロジー技術を導入することにより、我が国において事業化が成功した良い例である。このような一部の例を除くと大部分のナノテクノロジーの技術シーズはこれから事業化を進めるフェーズにある。

ナノテクノロジーの技術的挑戦は、トップダウン技術からナノシステム材料開発を見据えたボトムアップ技術へと変化しようとしている。ボトムアップ技術は、機能性材料としてシステム化されなければ産業上大きな意味はない。両技術とも True Nano の性質を包含するが、ボトムアップ技術の方が、その革新性・不連続性から、飛躍的な発展や新産業の創出への期待は高い。

今後ナノテクノロジー研究がボトムアップ技術へシフトしていくと、我が国の科学技術競争力が相対的に弱まる懸念される。

現在、トップダウン技術で強みを発揮している日本は将来、その国際競争力を維持するためには、ボトムアップ技術を発展させ、最終的にナノシステム化技術を実現させるサイエンスベースでの研究開発が不可欠となる。

今後の真のナノテク競争力は、共通の要素であるナノスケール構造体の分子レベルでの組立て・ナノシステム化を基に発展する可能性が高いため、我が国はボトムアップ技術を推進すべきである。

最先端計測装置の事業化という観点では、我が国では産学官の協力が積極的に進められている分野が多いという特徴がある。他国に比べて積極的に進められている。しかし、ドイツなどのヨーロッパ諸国に見られる小中規模のベンチャーは日本では育たず、既存の企業との連携が多いこ

と特徴であるが、両者とも一長一短はある。大学発のベンチャーのような欧米的なやり方が必ずしも良いわけではないが、我が国ではそれがあまりにも少ないのは、構造的な問題として検討すべきである。

また、これらの最先端計測手法の多くは「匠の技」として特定の限られた研究グループだけにとどまり、周辺分野や異分野にまで広く普及しているとはいえない場合が見られる。その計測手法を「非専門家」が利用するまでに普及していないのが現状。計測手法が、「専門家」から「解放」されて「非専門家」も使えるようになれば大きな展開は望めない。それは、田中耕一さんの質量分析法が、質量分析の非専門家である医療関係者に「解放」され、広く利用されて初めてその有用性・重要性が「開花」したことからわかるように、周辺分野への普及が本質的に重要である。ナノ領域最先端計測では、まだそのような段階にまで到っていないものが多いという側面があるので、継続的な改良研究と積極的な周辺分野・異分野への普及策が必要である。そのためには企業化は重要。

③国際比較

ナノテクノロジー・材料分野に関連した、全論文シェア、材料科学の被引用トップ 10%論文シェア共に我が国はトップを走るアメリカに次ぐレベルにあり、年々その差は縮まりつつある。また、材料科学や物理学の他に、化学においても我が国は世界トップレベルにある。

特許においては、米国が約 6,700 件と最も多く、日本は約 4,200 件で第 2 位となり、この 2 ヶ国が他国を大きく引き離している。経年変化で見ても、日本のナノテク関連特許は米国と並び大幅な増加傾向となっている。

科学技術政策研究所が 2004 年に実施したデルファイ調査の中では、日本のナノテク・材料の研究開発水準は米国に対してはやや優位あるいは同等程度、EU 諸国に対してはやや優位と判断されている。

ナノ領域最先端計測技術の事業化に関しては、日欧が世界をリードし、米国はあまり熱心ではない。米国の大学の研究室レベルでは世界一流の最先端計測技術をもっている、それを広めようとする駆動力が感じられないし、政府からのサポートも消極的なように見える。計測技術のような地味な研究より、材料開発やバイオ応用など出口の見える研究にばかり先走っているように思える。その点、日欧のほうが状況は良いように思える。この雰囲気の違いは、10 年後ぐらいには米国の深刻な底力不足を招くかもしれない。翻って、日本では、出口のすぐみえる材料開発や環境・医療の研究だけではなく、基盤的な計測技術の開発・応用普及のため評価を行った上で一定のサポートを継続して行う必要がある。計測技術は、一度途絶えると回復不可能になるものが多いのは事実。

④成果の他 7 分野への展開

ナノサイエンスは、ナノテクノロジー・材料分野に留まらず、ライフサイエンス、情報通信、環境、エネルギー、ものづくり技術、社会基盤技術、フロンティアの他分野の基盤をなし、また重要な要素技術開発を担っているため、その重要性を十分認識すべきである。具体的なくつかの成果について True Nano の 2 つの観点、すなわち 1. 従来の延長線上ではない、不連続な進歩（ジャンプアップ）が期待される創造的な研究開発、2. 大きな産業応用が見通せる研究開発に基づいて以下にまとめる。

1. 従来の延長線上ではない、不連続な進歩（ジャンプアップ）が期待される創造的な研究開発

セメントの透明金属化

グラフェンに関する発表件数の急増

量子力学的な重ね合わせ状態の観測”

ミュオンによる水素吸蔵材料の吸収放出メカニズムの解明

新系統の高温超伝導物質の発見

磁場で大きな力を発生する磁性形状記憶合金

量子ドット超格子を用いた太陽電池研究の進展

クモの糸と生物由来シリカを融合させたナノ材料
脳神経の信号を検出するシリコンのナノワイヤー電界効果トランジスタ
高い水素吸蔵量を有して廉価で量産できるナノ多孔質ポリマー
高強度で伸縮性に富むナノクレイ複合ポリウレタン
高速不揮発性スピン RAM の進展”
ポリロタキサゲルの化粧品としての実用化検討

2. 大きな産業応用が見通せる研究開発

ナノシートの光触媒・磁性など機能材料への展開
グラフェンが均一に分散した導電性ナノ複合材料
配向した酸化亜鉛ナノワイヤーによる発電
セラミックス中の添加原子の強度向上メカニズムを解明
量子暗号システムの実用化への動き
配向したカーボンナノチューブによる気体及び液体分離膜
水素親和性ナノ粒子を分散させた高効率の水素分離膜
発電効率 45%を有する化合物半導体太陽電池
CMOS 技術による 160 ギガビット/秒の光チップセット
ナノスケールで世界最高の光閉じ込め効率をもつ光共振器を実現
ナノ結晶化を応用した多孔質シリコン分離膜の特性向上
白金触媒を用いないヒドラジン燃料電池で高出力密度を達成
赤外線エネルギーを吸収するナノアンテナ電磁波集電装置
電子デバイス中の歪み分布をナノメートルの空間分解能で計測
わずかな繊維の振動を電気エネルギーに換えるナノ発電システム
クラックの自己治癒機能を有するコンクリート材料の開発

⑤第4期科学技術基本計画に向けた方針案

ナノテクノロジー・材料の分野におけるナノサイエンスの役割は、その基盤となる共通する基礎研究や基盤観測技術の開発を行い、引き続き我が国の強みの源泉を維持する重要なものである。基礎研究の担い手としては大学や公的研究機関に期待するところが大きく、産業界は大学および公的研究機関においてナノサイエンス分野をより強力に推進することを以前にも増して期待している。トップダウン的研究開発の代表的な分野である半導体分野を中心としてこれまで発展してきた技術ロードマップは、投資の方向性を明確にするとともに、社会経済的な波及効果まで見据えることによって事前の投資の合理性を担保する役割を担ってきた。ナノサイエンス分野では、ロードマップを描けないような不連続な進歩を促す研究領域を包含することから、技術ロードマップを用いた研究開発戦略の策定方法の枠を超えた施策が重要である。すなわち、基礎研究の成果が実用に結びつくまでには長期間を要するため、適切な評価を行った上で継続的に研究資金を研究者が得られるような競争的研究資金制度のあり方と併せて、長期的視点に立った研究開発投資のしくみに対する工夫が必要である。

これらの研究領域を進める上で、今後のナノテクノロジー・材料研究開発においては4つの要素：

- (1) 尊敬されるナノサイエンス、
- (2) 役に立つナノテクノロジー、それらを結び融合する、
- (3) 統合ナノ科学技術 (Converging Nano-Science & Technology)、そして
- (4) ナノ支援体制

を信念を持って推進することが極めて重要である。

4. 1 研究課題

世界に対抗するための具体的研究課題例を表2に示す。

表2：第4期科学技術基本計画で推進すべき課題（案）

項目	更に促進すべき重要な課題、
量子計算技術	量子ドット、超伝導系、光、分子スピンをを用いた量子計算技術
	量子暗号・通信：高性能の単一/もつれ光子対の光源と検出器、多者間量子テレポーテーション、長距離量子鍵配送の技術開発
	量子通信-計算融合に向けた、単一光子から原子、スピン、電荷などへの量子状態転写・保存・再生と、それを基にした量子ネットワーク技術の開発
	少数量子ビットを用いた機能的量子アルゴリズムの開発と量子ビットの各物理系におけるデコヒーレンス問題の解決
	日本は固体系で健闘、米国は量子暗号、欧米はイオントラップを用いた量子計算が進行
界面の機能解明・制御	固体/液体、分子、などのソフト界面、under operation での時空間高分解能測定法など
	界面制御によるナノ構造形成
	日本発のナノバイオ科学技術の創出と世界各国への輸出
生体ナノシステムの機能解明	生命現象の分子論的解明という難問への挑戦
	戦略的なナノバイオ技術として、“グリーンナノバイオテクノロジー”の推進
	統合科学としてのバイオナノ拠点
材料・エレクトロニクス	豊富な元素を使ってナノ構造を工夫することにより新機能を実現する方法論（科学）の確立（元素戦略）
ナノ領域最先端計測 （大型放射光・XFELを含む）	「匠の技」としての最先端計測手法の「非専門家」への解放
	既存手法の高度化・先鋭化の推進。特に under operation 計測の開発は重要。
	ナノビーム・ピコ/フェムト秒時間分解の超高度計測技術の基盤化によるナノスケールダイナミクス研究の推進
	電子波動関数やスピンのナノスケール自己組織化の直接観測
	XFELと大型放射光の、「相補的活用の戦略」を構築
	既存の放射光光源性能にジャンプをもたらす、「融合的活用の構築」
シミュレーション	次世代スーパーコンピュータを有効に利用するためのソフトウェア開発
	計算科学と計算機科学の連携による高度なシミュレーションソフトウェアの開発
	マルチスケール・マルチフィジックス現象のシミュレーション
	オリジナリティーが高く、使いやすいソフトウェアの開発及び維持・管理体制の強化
	上記を目的とする拠点形成（次世代スーパーコンピュータにおける「戦略拠点」など、米国 SciDAC がモチーフ。異分野共同研究が条件）
ナノ支援体制	次期ナノテクノロジーネットワーク

上記課題を以下の4つに分類する

(1) 尊敬されるナノサイエンス

量子ドット、超伝導系、光、分子スピンをを用いた量子計算技術

量子通信-計算融合に向けた、単一光子から原子、スピン、電荷などへの量子状態転写・保存・再生と、それを基にした量子ネットワーク技術の開発

少数量子ビットを用いた機能的量子アルゴリズムの開発と量子ビットの各物理系におけるデコヒーレンス問題の解決

固体/液体、分子、などのソフト界面、under operation での時空間高分解能測定法など

生命現象の分子論的解明という難問への挑戦

戦略的なナノバイオ技術として、“グリーンナノバイオテクノロジー”の推進

豊富な元素を使ってナノ構造を工夫することにより新機能を実現する方法論（科学）の確立（元素戦略）

既存手法の高度化・先鋭化の推進。特に under operation 計測の開発は重要。

ナノビーム・ピコ/フェムト秒時間分解の超高度計測技術の基盤化によるナノスケールダイナミクス研究の推進

電子波動関数やスピンのナノスケール自己組織化の直接観測

既存の放射光光源性能にジャンプをもたらす、「融合的活用の構築」

（2）役に立つナノテクノロジー

日本発のナノバイオ科学技術の創出と世界各国への輸出

「匠の技」としての最先端計測手法の「非専門家」への解放

次世代スーパーコンピュータを有効に利用するためのソフトウェア開発

計算科学と計算機科学の連携による高度なシミュレーションソフトウェアの開発

（3）統合ナノ科学技術（Converging Nano-Science & Technology）

量子暗号・通信：高性能の単一/もつれ光子対の光源と検出器、多者間量子テレポーテーション、長距離量子鍵配送の技術開発

界面制御によるナノ構造形成

統合科学としてのバイオナノ拠点

マルチスケール・マルチフィジックス現象のシミュレーション

（4）ナノ支援体制

次期ナノテクノロジーネットワーク

4. 2 人材育成

ナノサイエンスは分野内外への波及効果が期待できることから、これら基礎科学分野における優秀な研究者の基礎体力をつける施策として研究資源を広く配分することと、芽が出そうになった時点での加速配布のバランスのよい施策を奨励したい（堆肥と追肥）。

20-30年の時間スケールで将来を担える人材を育成すべき。

研究系研究者と共に、技術系研究者を社会として積極的に評価するシステムを整えることが重要。

4. 3 拠点形成

第3期において推進されたナノテクノロジー総合支援プロジェクトや先端研究拠点ネットワークは、小さいながらも、ナノテクノロジー研究の共通基盤を広く科学技術社会に提供する役割を担い、ナノテクノロジーのすそ野を広げることに貢献してきた。このような共通基盤は評価を受けつつ継続的にサポートされるべきである。特に、サポート人材の確保、施設設備の維持と更新に留意し、先端的な基盤技術にも追従できる体制を整えるべきである。

一方、米国では、ナノスケール・サイエンス・リサーチセンターや Energy Frontier Research Centers など、長期的視野にたったリサーチセンター建設が活発である。我が国のナノテク分野においても、将来に向けて基本的な研究開発を担う拠点ネットワークや、中核拠点の設立についての抜本的な検討が必要な時期に来ている。

大型施設としては、XFEL と先端計算機だけがナノテク関連の施設と位置づけられているが、外の施策との比較を十分に施した上で、これら大型施設などに隣接したナノサイエンスセンター的拠点の整備なども検討に値するであろう。

以上