

## ナノテクノロジー・材料科学技術の研究開発方策について (案)

平成 23 年 月 日  
科学技術・学術審議会  
研究計画・評価分科会  
ナノテクノロジー・材料科学技術委員会

### 1. 現状認識

ナノテクノロジー・材料科学技術は、新たな時代を切り拓く先導性を有するとともに、融合と連携を通じて多様な技術分野に波及し、支えるプラットフォーム的な役割を果たすことから、「先導的基盤技術」というべきものである。東日本大震災からの復興を、エネルギー供給構造を抜本的に変革しつつ成し遂げるといふ国家的課題の解決に必要な革新的技術の創出の鍵を握る。

ナノテクノロジーは、ナノ(10億分の1)メートルのオーダーで原子・分子を操作・制御すること等により、ナノサイズ特有の物質特性等を利用して全く新しい機能を発現させる技術<sup>1</sup>であり、ナノテクノロジーの活用により、情報通信、環境・エネルギー、バイオテクノロジー、医療等に貢献する新しい材料、デバイス、革新的システム等を提供することが可能となっている。現代社会においては“Nano Tech Inside”(外側からは全く見えないが、製品内部の機器、製品を構成する材料等の開発にナノテクノロジーが活用されている)の言葉に表されるように、ナノテクノロジーが、高機能化、高信頼性化などの面で、身の回りの多く製品の価値を高めており、産業への貢献度も高い。また、最近の液晶テレビの例のように、ナノテクノロジーにより創出された材料・機能が既存のシステムとは全く異なる新たなシステムを生み出し、その新たなシステムの急速な発展・普及により産業の競争優位の関係が塗り替わってしまうこともある。歴史的に見ても、トランジスタ、レーザー、光ファイバー等のような新たな時代のドアを開いたイノベーションは、材料の機能がシステムのあり方を変えたことにより創出されている。このように物質の特性を解明し新たな材料を創出して、有用な機能を発現させる科学技術が、ナノテクノロジー・材料科学技術であり、新たな時代を切り拓く先導性を有するとともに、融合と連携を通じて多様な技術分野に波及し、支えるプラットフォーム的な役割を果たすことから、「先導的基盤技術」というべきものである。

「ナノテクノロジー・材料分野」は、第2期科学技術基本計画(平成13年3月30日閣議決定)において、「ライフサイエンス分野」、「情報通信分野」、「環境分野」とともに、重点4分野の1つに位置付けられ、その後の第3期科学技術基本計画(平成18年3月28日閣議決定)においても重点推進分野として推進されてきた。このような政策的位置付けに基づく公的支援の結果、鉄系超伝導体の発見やスピントロニクス、量子ドット研究に代表されるような多くの学術的成果や産業的価値の高い成果が創出されている。また、ナノテクノロジー・材料分野にお

<sup>1</sup>第2期科学技術基本計画の定義

ける基礎基盤研究の進展により、材料関連のものづくりと大学等におけるサイエンスの距離が縮まり、基礎基盤研究が応用に貢献する道筋が出来たことも、第2期、第3期科学技術基本計画における重点化の一つの成果と言える。

一方で、ナノテクノロジー・材料科学技術により、優れた研究成果が得られているものの、バイオテクノロジー、情報通信技術に比べると、世の中に対するアピール度が低い印象があり、目に見える価値の創出につながるような技術的成果が不十分であるという指摘もある。

平成23年度からの新たな第4期科学技術基本計画の策定に向けた答申(平成22年12月24日総合科学技術会議)では、諸外国において、科学技術政策を国家戦略の根幹に位置付け、産業、経済、外交政策等との有機的、統合的連携の下、積極的な展開を図っている状況を踏まえ、我が国においても、科学技術政策とイノベーション政策とを一体的に捉え、産業政策や経済政策、教育政策、外交政策等の重要政策と密接に連携させつつ、国の総力をあげて強力かつ戦略的に推進していく必要性が高まっているとされている。このような認識に基づき、環境・エネルギーを対象とする「グリーンイノベーション」と、医療・介護・健康を対象とする「ライフイノベーション」を2つの大きな成長の柱として位置付け、科学技術イノベーション政策を戦略的に展開することとされている。特に、ナノテクノロジー・材料科学技術に関連する方針としては、先端材料や部材の開発及び活用に必要な基盤技術を革新的な共通基盤技術の柱の一つとして、また、先端計測及び解析技術等の発展につながるナノテクノロジーを複数領域に横断的に活用することが可能な科学技術や融合領域の科学技術の柱の一つとしてとらえ、産業競争力や科学技術の共通基盤の強化の観点から重点的に推進することとしている。

ナノテクノロジー・材料分野の国際動向に目を向ければ、欧米・アジア諸国はこの分野の研究拠点や共同研究ファシリティへ戦略的な資金投入を行い、予算は高い伸び率を示している。例えば、米国NNI(National Nanotechnology Initiative)は、2011年2月に前回2007年のNNI戦略プランを更新した新戦略プランを発表した。2012年度の大統領予算教書において、全体が緊縮予算であるにもかかわらず、NNIには2010年度比10.4%増の21.32億ドルが措置されている。また、グリーン・ニューディール政策の柱として46のエネルギーフロンティア研究センター(EFRC)が創設され、5年間で7億7700万ドルの投資が計画されているが、そこで行われる研究課題の80%以上がナノサイエンス・ナノテクノロジー分野のものである。欧州では、第7次欧州研究開発フレームワークプログラム/FP7(2007~2013年)において、FP6(2001~2006年)の2倍近い年間予算5億ユーロを今後7年間に投入することが計画されている。中国では、50以上のマイクロナノ科学技術センターが設立されるなど、積極的な投資が行われ、購買力平価換算では2006年時点で日本のナノテクノロジー予算を既に抜いている。

一方で、我が国の状況を見れば、第3期科学技術基本計画においてナノテクノロジー・材料分野の国家基幹技術として位置付けられたX線自由電子レーザーについては、着実に整備が進められる一方で、その他のナノテクノロジー・材料分野へ投資の伸び率は極めて低いレベルに留まっている。

我が国のナノテクノロジー・材料科学技術の水準は、論文被引用度を用いた解析によれば、国際的に高い学術ポテンシャルを有しているといえるが、第2期、第3期科学技術基本計画期間の重点投資により創出された基礎研究の優れた成果が欧米・アジアで先に実用化されてしまうことを危惧する声や、日本企業が海外の魅力的な研究拠点(例えば、Albany(米国ニ

ューヨーク州)、MINATEC(マイクロ・ナノテクノロジーセンター／フランス)、IMEC(大学間マイクロエレクトロニクスセンター／ベルギー)等)において研究開発を行うことによる、技術の空洞化、成果の流出等を懸念する声が年々強まっている。

さらに、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災により、我が国のエレクトロニクス、自動車等の基幹産業を支える東北の先端材料メーカーの多くが一時的に生産を停止したが、その中には深刻な被害を受けたものもあり、また、代替調達先の一部が海外企業に流れるなど、我が国の産業に大きな影響を及ぼしつつある。また、電力供給能力が低下し、産業活動や日常生活への影響は避けられない状況であるとともに、レアアースを代表例とする希少資源の供給の不安定化などの懸念材料も依然として存在している。このような危機的状況において、過去、石油輸入を減少させながら経済成長するという極めて困難な目標を技術力の向上により達成した我が国が、電力使用量を増やさずに経済成長を実現することにより、持続可能な発展が可能であることを世界に向けて示すことが極めて重要となる。

そのために資源の乏しい我が国がなすべきことは、常に最先端技術を開発・実用化して競争力を確保することであり、ナノテクノロジー・材料科学技術はそのような営みの中で極めて重要な役割を担うものである。

このような、ナノテクノロジー・材料分野に係る現状認識と東日本大震災からの速やかな復興や地球規模の環境・エネルギー問題の解決に向けた、ナノテクノロジー・材料科学技術によるブレイクスルーの期待を考慮すれば、今後、ナノテクノロジー・材料分野が進むべき方向は、第2期、第3期科学技術基本計画の単なる延長上にはないことは明らかである。

## 2. ナノテクノロジー・材料科学技術の今後の推進方策

### (1) 今後の基本的方向性

ナノテクノロジー・材料科学技術を、研究者の自由な発想に基づくボトムアップ型の研究、出口指向で基礎から応用・開発段階まで一貫して進めるトップダウン型の研究開発の両方の発展を支える「先導的基盤技術」として戦略的に強化していく必要がある。

ナノテクノロジー・材料科学技術は、上述したように、環境・エネルギー問題をはじめとした社会的課題を解決する鍵となるとともに、我が国の産業発展を牽引する革新的技術の創出の元となるものである。また、先端研究の発展や基盤技術の高度化を進める中で、イノベーションのエンブリオ(embryo: 胚)が創生され、それが更なる発展を遂げ、多様な課題の解決に貢献してきた例は多いが、ナノテクノロジー・材料分野の研究には、セレンディピティ(serendipity)<sup>2</sup>の働く余地が特に多いため、そのようなエンブリオを生み出し、世の中を大きく変え、次代を切り拓く可能性を秘めている。このようなナノテクノロジー・材料科学技術の特徴を考慮すれば、その重要性は第2期、第3期科学技術基本計画に引き続き極めて高いと言える。

現在はこの分野において、我が国には国際的な優位性があると言えるが、急速に強化されている諸外国の研究開発投資、拠点整備、グローバル人材育成等の状況を踏まえると、今後、国として体系的に施策を講じなければ、近い将来諸外国の後塵を拝する状況に陥ることが懸念される。

今後、ナノテクノロジー・材料技術については、他の分野と並列に位置づけるのではなく、研究者の自由な発想に基づくボトムアップ型の研究と、国が定める明確な方針に基づき、出口指向で基礎から応用・開発段階まで一貫して進めるトップダウン型の研究開発の両方の発展を支える「先導的基盤技術」としての位置づけを明確にして、他の分野との関係性を十分整理しつつ融合と連携を加速する施策を講じていくことが重要である。

---

<sup>2</sup> 「セレンディピティ(serendipity)」とは、偶然に思いがけない幸運な発見をする才能を意味する言葉で、研究者の間では、実験室等における予期しなかった偶然ともいえる現象から新たなものを発見する能力又はその発見の事例としてよく知られている。

## (2) 課題解決を起点とした戦略的重点化について

ナノテクノロジー・材料科学技術への社会的期待を踏まえ、課題解決を起点とした戦略的重点化を行う必要がある。その際、研究開発課題が具体的に階層化されたトータルのシナリオの下で、研究フェーズ間でシームレスな「循環研究」が実現されるような推進方策が重視されるべきである。

第4期科学技術基本計画の策定に向けた答申において、「グリーンイノベーション」が成長戦略の大きな柱として位置付けられたが、米国の EFRC の例でも示されているように、ナノテクノロジー・材料科学技術は地球規模の環境・エネルギー問題の解決に大きく貢献することが期待されていることから、今後の方向性としては、特に、グリーンイノベーションによる成長とそれを支える資源確保に焦点を置いて、課題解決を起点とした戦略的重点化を行うことが求められる。また、東日本大震災からの復興・再生の実現に向け、次世代のリーディング産業の創出等による我が国の国際的優位性の強化、真に安全・安心で質の高い社会の実現への貢献という観点に基づいた重点化も必要である。なお、このようにして重点化された研究開発においては、最終的な出口としてのシステムを実現する上で重要となる課題をしっかりと特定するとともに、その課題を解決するために、新規の技術を開発するだけでなく、有用な既存技術の組み合わせを含めて、最適なナノテクノロジー・材料科学技術を選択することが重要となる。

課題解決を起点とすることは、決して基礎研究より応用研究を重視するというのではなく、基礎研究側も、社会的課題あるいは産業界からのニーズを踏まえ、出口を意識して現象解明などの研究を進めていくことが求められるということである。また、課題解決に向けて高度な応用を目指す程、基礎を支えるサイエンスあるいは基盤技術が重要となり、基礎研究と応用研究をあわせて進めていく必要がある。このため、基礎研究から社会への実装の段階までの幅広いフェーズにおいて、基礎から応用への一方向ではなく、問題の本質への理解の深化等を通じ応用研究の課題が基礎研究の課題へと翻訳され、応用から基礎へ立ち戻るような「循環研究」がなされることが課題解決とサイエンスの発展の双方にとって有益であると考えられる。

言いかえれば、課題解決を起点とし、研究開発課題が具体的に階層化されたトータルのシナリオの下で、研究フェーズ間でシームレスな「循環研究」が実現されるような推進方策が重視されるべきである。さらに、そのシナリオの下で異分野の研究者等が結集することとなるため、重要な基盤技術を高度化しつつ共通に活用するという観点が極めて重要となる。そのような共通に活用される重要な基盤技術(物理、化学、生物学、工学を包含する幅広い共通の言語、知識、ツール)がナノテクノロジー・材料科学技術であると言える。なお、このような形で進められる異分野融合研究の結果として、想定外の成果が生み出される可能性は大きく、そのような成果の多様な展開を許容するようなプロジェクトの設計も求められる。

さらに、第2期、第3期科学技術基本計画においては、ナノテクノロジー・材料分野の研究者や先端共用設備等のネットワーク構築が進展し、異分野連携・協力が促進されて研究水準は急速に向上したが、今後もこの基盤技術を研ぎ澄まし、常に高い水準を維持していくために、ネットワークの維持、発展を図るとともに、そこで生み出された優れた成果を組み合わせ、

活用を図ることにより、社会が要求する課題に挑戦する姿勢をナノテクノロジー・材料分野の研究者側から明確に打ち出していくことも必要である。国はこのような組織化と協働によって研究者が新たな課題に取り組もうとする努力を後押しすべきである。

なお、課題解決を起点とした戦略的重点化を推進していく上で、万一極端に課題達成型の研究開発に傾斜した場合、以下のような問題が生じることが懸念されることから、これらに十分注意を払いつつ、課題解決に必要な知識やツールが統合される形で上述の「循環研究」を実現する政策的、制度的な工夫することが重要である。

○長期間継続的に維持・強化していくべき重要な共通基盤技術(例えば、ナノ構造制御・新規物質材料の創製技術、ナノ計測・分析・加工技術等)のための公的支援が不足し、その弱体化が懸念される。このような問題は、ライフサイエンス、環境分野のような、社会的課題とのつながりが明確な分野にはそれ程大きな影響を及ぼさないとも考えられるが、共通基盤的な側面が強いナノテクノロジー・材料分野においては大きな影響をもたらす可能性がある。

○出口を性急に求めるあまり、限られた研究領域で活動が進められる結果、縦割りの傾向が強まり、共通基盤技術の他領域への水平展開が遅れる恐れがある。目標達成に向けて取り組むべき課題は、多様な技術分野にまたがることが多いことから、課題解決を起点とした重点化を分野融合の好機と捉え、それを実現する体制づくりを行うべきである。

○社会的課題の設定時に把握可能な技術への重点化に偏り、見えている技術の使い回しレベルの研究開発が多くなると、潜在的可能性をもつ研究の中長期的な育成が弱体化することが懸念される。見えている技術の使い回しレベルの研究開発では、国際的優位性の獲得は困難である。

また、特にボトムアップ型の取組みや技術的に飛躍的な進歩が必要な課題については、研究対象によっては非常に長期のサポートを要する場合もあるため、目に見える成果につながるまでに長期間を要することを社会に理解してもらうとともに、長期的・多面的な評価を行うことも重要となる。

### (3) 今後重点化すべき研究領域・課題について

ナノテクノロジー・材料科学技術において今後重要と考えられる研究領域は、3つに大別される。即ちグリーンイノベーションに対応する「環境・エネルギー」の領域、ライフイノベーションに対応する「医療・健康・介護」の領域、さらにこの両者を支えながら常に新しい発見や技術シーズを生み出すことによって、両者の最先端研究を牽引する「科学技術基盤」の領域である。それぞれの研究領域は社会的課題の解決へと繋がっていくが、特に、低炭素社会の構築をはじめとする環境問題を解決するためには、ナノテクノロジー・材料科学技術の貢献が強く期待されている。また、バイオテクノロジーが、高度医療に加えて環境問題の解決のためにも極めて重要である。さらに、科学技術基盤については、ナノテクノロジーの様々な基盤技術及びそれを活用した物質材料の制御技術、そしてナノサイエンスが含まれるが、継続的な知の蓄積と高度化及び幅広い応用分野での活用を進めていくために慎重に設計された施策を講じることが必要不可欠である。

広範囲に及ぶナノテクノロジー・材料科学技術については、人材、研究資源等の無計画な分散投資によって技術水準の低下を引き起こすことのないよう、社会的課題の解決の切り札となる技術領域として戦略的かつ継続的に技術レベルを高度化し、常に世界トップレベルを維持していくという意識を重視する必要がある。特に、東日本大震災は、ライフライン、情報通信網の途絶という社会インフラの脆弱性を露呈させた。甚大な被害と、今後長期にわたる社会的・経済的な影響を前に、復興対策や災害対応・予防策の諸課題に対してナノテクノロジー・材料が果たし得る役割は重要であり、本質的である。そして、世界のモデルとなる新しい社会構造構築において大いなる貢献を行うべきである。

このような状況を踏まえ、上記の3つの研究領域及び震災からの復興対策や災害対応・予防策に関して、特に重点化して取り組むべき研究開発課題を以下に記載する。

#### ①研究領域「環境・エネルギー」

本領域において取り組むべき技術は、エネルギー創成・貯蔵・輸送、省エネルギー、元素戦略・希少元素代替材料、環境の浄化・修復・保全・計測・モニタリング、グリーンプロセス、等の環境・エネルギー問題の解決に直接的に貢献するものである。

我が国にとって最重要課題の一つである資源問題については、元素戦略・希少元素代替材料を、新材料設計・探索の思想をベースに今後も中長期にわたって着実に開発していかなければならない。元素戦略は、我が国が諸外国に先駆けて着手した施策であり、材料設計・探索技術における日本の強みを生かした極めて特徴的かつ効果的な取り組みである。欧米においても同様の取り組みが近年重点的に実施され、その重要性は国際的にも一層高まっている。また、エネルギー問題については、今回の震災において、集中型インフラストラクチャーの脆弱性が露呈し、分散型システムへの展開が急務となっている。その中でナノテクノロジー・材料科学技術が果たす役割は非常に大きい。

上記の認識の下、本領域の主な研究開発課題を以下に挙げる。

【太陽電池・燃料電池・二次電池、熱電変換素子等の電気エネルギー生成・貯蔵技術開発】

本課題については、高効率化と高容量化とともに、低コスト化・小型化が大きな問題であり、



それに向けた材料・デバイス・プロセス技術の開発が必須である。また、用途に対応した材料、システム開発が求められる(例えば、自動車用と定置用の蓄電池では、要求性能が全く異なる)。さらに、家庭・オフィスレベルでの太陽光発電あるいは夜間電力利用と蓄電システムの組み合わせなどによる分散システムの開発が重要である。蓄電単位は家庭レベルまたはより大きな単位が良いかなどのシステム研究との連携が必要であるとともに、使用後の廃棄やリサイクルも考慮に入れた、エネルギーのコスト評価を高い精度で実施する事が求められる。

特に、自動車などの基幹産業を支える技術として重要な二次電池については、新材料開発と材料界面近傍のナノレベルの3次元構造の最適設計・制御が課題である。安全性と高電圧・高容量化のバランスを実現する新材料を開発し、電池を総合技術・総合システムとして最適化することが求められる。その際、正極、負極、電解質、セパレータ、接着剤等の各材料の組み合わせが重要となる。また、これらを実現するためには、反応の直接観察や劣化機構の解明をはじめとした、電池反応の基礎的理解・解明が必要である。

#### 【電力システム開発】

高温超伝導材料を利用する送電技術や数種類の発電・貯蔵システムを有機的に連携することにより、低損失で安定な電力供給を実現するための技術及びシステム開発が重要である。また、鉄系の新規超伝導材料が発見されたことを受け、ナノ構造解析及び理論的解析に基づく新規の超伝導材料の探索が求められるが、並行して、それらの材料の特性を活かしたデバイスの開発も重要である。

#### 【太陽エネルギーを化学エネルギーに変換する技術】

光合成反応を人工的に模倣することによる水の分解からの水素生成等が注目され、徹底した基礎研究と同時に、将来の**実用化のための課題**(例えば、材料の耐久性、可視光領域での**変換効率向上、水素と酸素の高効率分離等**)を視野に入れた研究開発が求められる。なお、この場合は各技術開発に留まらず、最終システムを強く認識した研究開発が必要である

#### 【省エネルギー材料開発】

電子デバイスの超低消費電力化や化学プラントの低温動作化のための触媒を含めて、省エネルギーに関わる材料開発を幅広く進めていくべきである。特に、極限まで摩擦抵抗を減少できる超潤滑材料の開発や機能分子材料の適用、ナノ構造の制御による構造材料の軽量化等の研究開発が重要である。また、より高度な断熱、遮熱材料が求められている。例えば、本州で用いる遮熱ガラスは光を大きくカットするため冬の太陽光取り込みができないことから、夏と冬、昼と夜で機能の制御が可能なガラスの開発などが期待される。

#### 【エネルギーハーベスト技術】

廃エネルギー等の未利用エネルギーを電気エネルギーに変換する技術として、熱電変換、光電変換、力学的エネルギーの電気エネルギーへの変換等の各技術の革新が課題。個別素子のエネルギー変換効率を追及する研究に加え、各素子を、エネルギーシステム全体の中でエネルギー流制御要素と位置付け、システム全体のエネルギー損失を最小化する最適設計を行うことが必要である。そのための素子開発及びシステム構成研究が求められる。

#### 【バイオマスリファイナリー】

セルロースを中心としたバイオマス燃料及び化石資源を代替する化成品原料の創成を目指している。特に、生物学的知見(植物細胞壁の詳細構造と酵素の機能等)と、化学的知見(触媒の機能等)を融合させ、生体由来の材料から化成品原料を創成する新たな技術の確立



に積極的に取り組むことが必要。その際、将来の実用化のための課題(原料の回収、分解の高効率化等)を視野に入れ、バイオマスを環境負荷の少ない条件で用途に適した物質に変換できる新規ナノ触媒を開発すること等が求められる。

#### 【触媒材料開発】

触媒は、排ガス浄化やセルフクリーニング材料、廃棄物処理といった環境浄化技術としての重要性と、物質生産プロセスにおける重要性の両方を併せ持つ。特に物質生産プロセスでは、ナノ構造制御や化学反応制御による、選択性の高い触媒の開発が重要であり、反応温度の低下や副生成物・共生成物の生成減少によって、反応や精製にかかるエネルギー消費や環境負荷を低減できる画期的な触媒の開発によって物質生産プロセスに革新をもたらすことが求められている。

#### 【環境浄化技術】

廃水や汚染水、大気の浄化を低圧でおこなえる高強度分離膜の開発、その他、微生物・細菌による環境浄化メカニズムを模倣した新しい環境浄化法の開発が期待される。

#### 【高感度・高選択性環境モニタリング】

安全・安心な社会生活を実現するために、環境中の放射能及び様々な物質をモニタリングできる、小型・低コストの環境用センサ開発が重要となる。特に、超小型・簡易線量計の開発は、国民一般が日常的に線量確認を行うことを可能とし、風評被害の防止にも有効と考えられる。センサ数が飛躍的に増え、よりきめ細やかな環境管理システムに発展させていくことが求められる。

#### 【グリーンプロセス】

省エネ・低環境負荷の製造プロセスを実現することが目標。低温・低圧での反応、廃棄物の削減、有害物質の不使用等に考慮したプロセスの開発が求められる。

#### 【元素戦略・希少元素代替材料】

我が国の基幹産業に必要な希少元素の将来の需給見通しと、研究開発力の強みを考え合わせ、基盤科学技術としての元素戦略との一体的な展開を含めて、最適な戦略を立案し、開発を推進する必要がある。白金やパラジウム等の希少元素を使わずに、比較的豊富に存在する元素や有機材料によって目的機能を備えた材料の開発を加速することが求められる。植物の光合成や動物の呼吸を担う蛋白質は鉄、銅、亜鉛、マグネシウム、マンガンなどを使っており、生体の仕組みに学ぶ材料技術開発も重要である。さらに、希少元素を循環的に利用するシステムの確立に向けた技術開発も必要である。

#### 【エレクトロニクスの省エネルギー化・多機能化】

情報通信社会の基盤をなす情報通信機器やシステム構成機器の一層の省エネルギー化・多機能化が求められているが、現状のCMOSデバイスには、微細化の物理的限界、特性ばらつき増大、素子の消費電力増大等の問題が迫っている。これらの制約を突破する方策として、近年世界的に進展の著しいナノエレクトロニクス技術を駆使して、従来のCMOS技術に加えて、新たな機能を持った材料・デバイスを開発しようとする方向と、従来のCMOSを超える新しい動作原理に基づくデバイス及びシステムの実現を目指す方向とが模索されている。国際的に前者はMore than Mooreと呼ばれ、EUを中心に活発な研究開発が行われており、後者はBeyond CMOSと呼ばれ、米国の大学を中心に研究が進められている。これら両方の技術の方向性について、省エネルギー性能の向上やグローバルな競争環境を注視しながら研究開

発を加速することが重要である。具体的な課題としては以下の通りである。

- カーボンナノチューブ、グラフェン等のカーボンナノエレクトロニクス(自在制御など実用化に向けた課題の克服が必要)
- 新不揮発性メモリ・CPU
- 多機能化を指向したナノCMOSとMEMS/NEMSの融合、光配線との融合、スピントロニクスとの融合、バイオ技術との融合
- フレキシブルエレクトロニクスやスマートセンサ、ロボット等のスマートインターフェース
- 超高速演算を実現するための量子コンピュータ(デバイス化には多くの課題が残されており、長期的な視野に立った継続的な取組が必要)
- 通信等他分野応用へ向けたナノフォトニクス・プラズモニクス・メタマテリアル
- パワーデバイスの低損失化と高耐圧、高温動作、スイッチング速度の向上(SiC、GaN、ダイヤモンドなどのワイドギャップ半導体を用いた革新的パワーデバイスによる省エネルギー化・エネルギー高効率利用が必要)
- 安全・安心かつロバストな社会インフラ構築のためのデバイス/システム技術

## ②研究領域「医療・健康」

従来のライフサイエンスやバイオテクノロジーと、ナノテクノロジー・材料科学技術を融合して新しく生まれた研究分野は、国際的に「ナノバイオ(テクノロジー)」と呼ばれている。これはナノテクノロジー・材料科学技術の最大の特徴である異分野との親和性の高さが発揮され、融合分野が生まれた典型例と言える。例えば、社会からの強い期待がある再生医療において必要とされる生体と人工物との融合は、両者の原子や分子を直接観察し、制御できるナノレベルの領域で初めて可能となる。ライフサイエンスのセントラルドグマのベースとされているDNAはまさにナノレベルのサイズであり、ナノテクノロジーとライフサイエンスの融合領域においては、分子の自己組織化、表面修飾等を活用した研究開発が積極的に進められている。

今後、再生医療のためのバイオマテリアル・デバイスや薬物送達(DDS: Drug Delivery System)、細胞レベルの診断・治療(セラノスティクス)のためのDDSやイメージング技術、単一細胞・単一分子の分析技術、健康に影響を及ぼす因子を検知するセンサ、アグリ・食品科学技術への展開等により、ナノテクノロジー・材料科学技術は安全・安心な社会の基盤となる医療・健康の様々な課題解決に寄与すべきである。さらに、生体機能と情報通信技術の融合により介護の高度化、省力化など、新しい産業創出の核となる技術を生み出すことも期待される。

上記の認識の下、本領域の主な研究開発課題を以下に挙げる。

### 【高度薬物送達】

国民の死亡原因第1位である癌を始めとする重要疾患について、疾患部位を選択的に認識し、患部周辺でのみ薬剤を放出できる高度な薬物送達(DDS)法の開発が重要である。そのために、センサ機能や徐放機能を具備した分子集合体を設計・創出する必要がある。また、標的まで治療分子をデリバリーし、その分子を細胞内で効率的に機能発現させることのできるシステムの開発が求められる。これらは細胞への遺伝子導入、細胞の増殖分化促進等の治療の他、予防、診断技術としての応用の期待も高い。

#### 【ケミカルバイオロジー】

化学と生命科学の融合による新しい研究領域として国際的に注目されており、化合物ライブラリーなど研究基盤の整備が重要である。臨床治療薬などの有用な化合物開発に直結する産業政策上の重要領域である。

#### 【細胞内治療】

上記高度DDSの一つの発展形として、特定の細胞内に薬物を注入して、特異的にその細胞を治療しようという次世代技術であり、イメージング技術、単一細胞・単一分子の分析技術と一体的に開発を進めていくことが必要である。なお、細胞の機能においては組織としての振る舞いが重要となることから、単一細胞の分析技術については、組織レベルの機能と整合性があるかどうかについての検証を行う必要がある。

#### 【再生医療材料】

組織や臓器の再生に必要な医療材料の開発によって、将来の医療が大きく変わる可能性がある。組織工学や臓器工学に必要な機能性材料(三次元構造化を含む)の開発、生体内での免疫拒絶反応を極力抑制した生体適合性材料の開発が必要である。ES細胞及びiPS細胞を用いる再生医療については、がん化のリスクのない化学物質の設計・活用による、リプログラミングの科学技術の発展が不可欠である。

#### 【インプラント型診断治療デバイス】

DDS機能や計測機能を具備したマイクロデバイスの開発が重要である。

#### 【生体材料による環境安全モニタリング】

環境中の汚染物質や毒性物質の選択的計測のために、酵素や抗体、核酸、脂質、糖タンパク質等の生体材料を使用し、高感度で高選択性なセンサ及びシステム化技術開発が重要である。

### ③研究領域「科学技術基盤」

上記の各研究領域の最先端を牽引する「知」の集積を担うのが「科学技術基盤」であるが、その中心的な課題は二つある。第一に、この基盤を用いて行われる研究開発によって生み出された「知」と「技術」が継続的に蓄積され、コミュニティに共有されていく必要がある。次に、科学技術創造立国を国是とする我が国において、災害時等においても科学技術基盤がロバスタな社会インフラでありつづけるためには、大型から中型、小型にわたる研究設備及び技術の利用に関して、セーフティネットが形成・維持されなければならない。

上記の科学技術基盤としては、まず、3次元計測、動的・リアルタイム計測、界面及び内部計測、ナノ加工プロセス、ナノ・マイクロ印刷技術、三次元ナノ製造技術、物質材料設計・制御技術が挙げられる。それぞれの基盤に関わる主な研究開発課題は以下の通りである。

#### 【3次元計測、動的・リアルタイム計測、界面及び内部計測】

(※次の項目「プロセスが実際に進行している環境下でのその場計測技術」と統合)

プロセスが実際に進行している環境下でのその場計測技術が今後の大きな課題である。複雑な使用環境下や多成分の物質などをその場計測する技術である。半導体デバイスを作製に際し、ガス雰囲気下での動作状態の計測、生体の細胞表面や細胞内部の3次元計測、触媒反応や電池の内部反応状態の解明などで、その場計測が求められている。これらの計測には、解像度を極限まで高め、超短時間で計測する技術が必要となる。

#### 【プロセスが実際に進行している環境下でのその場計測技術】

その場観察技術は、例えば、細胞表面や究極的には細胞内部の3次元観察、あるいは触媒、電池の内部反応状態の解明などに不可欠である。プロセスの微視的機構解明のためには、高温、ガス環境、電場、磁場、応力等の「環境下」での実時間観察が必要である。これらの環境下におけるその場計測のためには、解像度を極限まで高め、しかも超短時間で計測するためのナノ計測技術が不可欠である。

#### 【ナノ加工プロセス】

トップダウン・プロセスの典型として超LSI微細加工技術が挙げられるが、それに対応するボトムアップ・プロセスとして、原子・分子から出発して材料やデバイスを逐次積み上げていく自己組織化技術が、特にスループットの視点から極めて重要である。生体は、DNA(分子)→蛋白質→細胞→組織→個体へと自律的かつ階層的に構造形成が進む点で、「階層的自己組織化」を実現している具体例である。今後の重要課題としては、実用化に近い多孔性配位高分子、メソポーラス材料の開発に加えて新規材料として、 dendリマー、有機ナノチューブ等新しいナノ・マクロの空間をデザインした超分子材料、金属-有機骨格体、カーボンナノチューブ、スライディングゲルやフォトニックゲル等の機能性ゲル、またバイオとナノの融合としても蛋白質や核酸などを使った半導体微細加工プロセスへの自己組織化の応用などが挙げられる。過去10年間のナノテクノロジー・材料科学技術の進展において、自己組織化技術の応用分野への展開は未熟であり、今後は自己組織化の階層的発展の理論、非平衡開放系における時間・空間上の散逸構造の解明、平衡論と速度論の使い分け、ゆらぎの効果等、基礎学理を巻きこんだ基本課題についても取り組みを強化しなくてはならない。その上でトップダウン・プロセスとボトムアップ・プロセスの融合が実現されていくと考えられる。後者の完成は、ナノテクノロジーのシステム化を可能とするために本質的に重要となる

#### 【ナノ・マイクロ印刷技術、三次元ナノ製造技術】

近年の省エネルギー・環境低負荷の観点から、産業界の要請が特に高い技術である。太陽電池やディスプレイ、または各種のコーティングにおいて、液体材料を用いた印刷技術によってデバイスを製造するための基盤技術開発が重要となっている。さらに、上述のエレクトロニクスにおけるMore than Mooreの観点で、これまでは平面であった電子デバイスを縦方向に別の機能を積み上げて多機能を実現するために、三次元ナノ製造技術の基礎技術開発が求められている。

#### 【物質材料設計・制御技術】

量子力学、固体物理、量子化学等を学術的に横断して構造化された形式知、豊富な経験と鋭い物質観に裏打ちされた暗黙知、データベースや理論モデリングと計算機による最先端のシミュレーション技術、これらを総合的に駆使して、グローバル課題に対応した材料機能を探索し、設計・制御していく必要がある。日本が国際的にも高い優位性を保っているのはこの領域の科学技術であり、その一つとして「元素戦略」は実施されてきた。新材料設計・探索技術は、与えられた元素組成や構造から物質の性質を計算で求めるという正攻法の手順とは異なり、ニーズ側から突きつけられた特定機能を有する材料を設計あるいは探索する技術を総称しており、これはいわゆる「逆問題」への挑戦である。そのために上記のような総合的なアプローチが不可欠であり、既存の組織を超えて活動を統合するような新たな枠組みが必要である。設計や制御に関わる研究開発課題としては以下の項目が挙げられる。



- 結晶格子や分子・配向の制御(格子の設計や固溶・欠陥導入による局在性・周期性の実現、圧電素子の欠陥制御、超分子電荷移動体のエントロピー制御、磁性材料のアモルファス構造の制御)
- 表面構造の制御(表面加工、イオンビーム照射、表面アルケミーによる機能性表面の実現)
- 空間・空隙構造の制御(ナノ、マイクロ、ミリのマルチスケールのポラス構造等で、高比強度、高靱性、選択透過性・反応性等を実現)
- 幅広い分子・有機材料及び複合材料を目的に応じて自在に制御するための分子技術(環境エネルギー材料や電子材料、医療・健康・介護への応用に求められる人と親和性の高い生体関連材料等、分子技術の応用は広範にわたる。機能分子材料を設計するために、機能と分子のデータベース構築や設計支援ソフトの開発等も大きな課題である。)

さらに、上記の形態制御や構造制御技術の開発により、新機能の発現や、劣化機構の解明による材料の長寿命化、希少元素の代替機能を発揮する革新的材料の実現を目指すには、二つのツールが必要である。一つは、網羅性と運用性を兼ね備えた物質・材料データベースであり、もう一つは計算科学である。目的とする機能を持つ新たな材料を創成するために必要となる動的過程のシミュレーションなどにおいて、これらのツールは不可欠である。今後は、理論モデルと計算を合わせたハイブリッドな方法で現実の複雑な系を追及していくこと、特に非平衡開放系の現象をどう表現するかなど、シミュレーションを機能の予測にまで高度化することが重要な課題となる。10ペタフロップスという“京”速コンピュータの出現は、材料技術の世界に革新をもたらす可能性をはらんでいる。

ナノサイエンス及びナノテクノロジーとシステム科学の協働によってグローバル課題に対応する科学技術基盤の枠組みが構成されていると考えると、計算科学はその両方にとって極めて重要な武器とみなすことができる。

次に、科学技術基盤全体としては、放射光などの大型施設、超高压電子顕微鏡などの中型設備、ナノ加工ラボなどの小型施設、などの関連設備・施設を共用施設としてグループ化し、全国及び国際的にもオープンなネットワークとして構築しておくこと、並びに災害時等においてもそれら機能が維持されるロバスト性とセーフティネット性を確保しておくことが肝要である。また、研究開発成果から将来の事業化へ結び付けるためには、例えばナノテクノロジーの環境・健康・安全(EHS: Environment, Health and Safety)、倫理的・法的・社会的問題(ELSI: Ethical, Legal and Social Issues)についても一定割合のリソースを投入して取り組む必要がある。リスク評価・管理手法の確立における科学的再現性の担保や医学的評価、社会受容・コミュニケーション推進に関連する幅広い情報発信等の取り組みが必要である。

#### ④研究領域「震災からの復興対策や災害対応・予防策」

東日本大震災は、科学技術を通じて獲得した人智に限りがあることを見せつけた。我々は改めて、安全・安心を念頭に置いた研究開発を進める必要があることを認識しなくてはならない。そのような取り組みにおいて、例えば、突然の停電や十分な電力源のない場所でも、必

要最低限の電力確保を可能とするための蓄電システムやエネルギーハーベスティングデバイスを開発する、あるいは福島第一原子力発電所事故の関係では、サイト内で大量に発生している汚染水から放射性物質を分離・回収する技術(例えば、膜材料、吸着材料の開発)や、土壌の除染や植物への放射性物質の移行低減を効果的、効率的に行うための技術、原子炉の健全性を飛躍的に高める構造材料などを開発するに当たり、ナノテクノロジー・材料科学技術は、異分野との連携・融合により飛躍的な発展をもたらす可能性がある。

この他にも、ナノテクノロジー・材料科学技術の貢献が期待される研究開発課題としては、以下の項目が挙げられる。

- 建築構造物ヘルスマonitoring・センサネットワークの開発・整備(建築構造物の劣化診断・計測デバイス、加速試験手法の精度向上、及びこれらを集積したセンサネットワーク)
- 自然災害の予兆と情報伝達を迅速におこなうための、ユビキタスセンサネットワークシステムの広範囲な設置と充実、警報システムの開発・整備(津波検知、地震初期微動検知デバイス)
- 身につけていることがわからないほどの、人にフレンドリーな小型・軽量・送受信システムの開発・配備
- 作業ロボット等に搭載する耐放射線デバイスのためのナノエレクトロニクス研究開発
- 簡便・携帯可能な放射線線量計の開発(水・空気・食品・土壌の迅速簡易検査デバイス、CCD活用等)
- 建築構造物(橋梁等社会インフラ)の、低コスト・短期間での補修・補強を可能とする耐震技術開発
- 震災被害を最小限にするために必要となる劣化抑制技術や信頼性予測技術の開発
- 構造体の安全性維持、長寿命化に貢献する材料技術の総合工学的検討



#### (4) ナノテクノロジー・材料科学技術の発展を支える施策について

ナノテクノロジー・材料科学技術を継続的に強化する具体策として、先端研究設備の整備・共用化及びネットワーク形成の促進、新たな研究モデルを提示する拠点形成等に国として取り組む必要がある。

研究基盤の高度化及び幅広い活用やグローバルな人材層の形成によって、ナノテクノロジー・材料科学技術を継続的に強化するために、先端研究設備の整備・共用化及びネットワーク形成の促進、人材育成支援、新たな研究モデルを提示する拠点形成に国は積極的に取り組む必要がある。さらに、経済社会のグローバル化、様々な地球規模の課題の顕在化を受け、ナノテクノロジー・材料科学技術に係る国際戦略の明確化も重要となる。

加えて、技術の進歩に伴って、ナノテクノロジーが製品や部材の中で使用される傾向(Nano Tech Inside)が強まるにつれてリスクガバナンスの問題、及びリスクを踏まえた社会とのコミュニケーションの問題は、国際的にも関心が高まってきているため、引き続き取組を検討していく必要がある。

具体的には、第4期科学技術基本計画期間において、以下の施策を講じることが重要である。

##### 【先端研究設備の整備・共用化及びネットワーク形成の促進】

平成14年度から18年度までの5年間で推進した「ナノテクノロジー総合支援プロジェクト」の成果を引き継ぎ、平成19年に開始された「先端研究施設共用イノベーション創出事業(ナノテクノロジー・ネットワーク)」は、全国の大学、独立行政法人等の13拠点(26機関)が有する先端的な研究施設・機器の共用化を進めるとともに分野融合に向けた協力・交流活動を促進しており、ナノテクノロジー・材料科学技術の裾野を広げた功績は大きい。

また、平成21年度末よりナノテクノロジーを環境・エネルギー技術に適用・融合させた「グリーン・ナノテクノロジー」に関する研究成果・知見を結集し、環境技術の実用化を加速する研究基盤ネットワークの整備を行うことを目的として、「低炭素社会構築に向けた研究基盤ネットワーク整備事業」が開始され、設備の共用が開始されつつある。

ナノテクノロジー・ネットワークは5年計画とされていたが、国は、上記の低炭素社会構築に向けた研究基盤ネットワークの整備・運用状況も踏まえ、最先端の計測、分析、加工設備の利用機会を若手研究者を含めて幅広く研究者に提供するための取り組みを確実に継続することが求められる。

ナノテクノロジー・ネットワークを継続する際の見直しについては、ナノテクノロジー・ネットワークで蓄積された設備・経験・ノウハウを効果的に活用しつつ、以下のような方針の下に、「ナノテクノロジー・プラットフォーム」事業を行っていくべきと考えられる。

##### ① 基本となる機能分野

ナノテクノロジーは広範な技術領域を含むことから、「ナノテクノロジー・プラットフォーム」事業についても、微細構造解析、微細加工、分子物質合成・解析の3機能分野をマネジメントの基本単位とする。

## ② 機能分野内の緊密な連携確保

先端設備の共用をイノベーション創出に結びつけることを目指し、ユーザー支援活動について、その共通性、関連性に着目して効果的な改善を図っていくことを可能とするために、まず機能分野毎に強いリーダーシップを確立して支援活動を組織化することが適切である。この基本となるネットワーク(以降、機能分野別ネットワークと呼称する)を統括的に管理するリーダー機関は、ユーザーの視点を基本とした機能分野別ネットワークの運営原則を確立し、それを参画機関と共有するとともに、その実施状況を把握してネットワーク全体に徹底させる責任を有する。また、ネットワーク内における技術連携、支援状況を適宜把握し、必要に応じて支援手法の変更や人材の移動等を指示することができる。さらに、異なる機能分野別ネットワークとの連携に関しても一括した対応を行っていく。

## ③ 異なる機能分野の連携促進

異なる機能分野間をより強固に連携させていくための仕掛けとして、機能分野別 ネットワークを横断する機関・ユーザー間の協力を企画、調整するコーディネーターを設定する(この機能分野を横断して連携する機関・ユーザーのまとまりを「クラスター」と呼ぶ)。機能分野を超えた研究ニーズへの対応をスムーズに行い、新しい技術シーズの創出や異分野融合研究の促進を図るためには、強いコーディネート機能が必要である。例えば、材料分野(シリコン、化合物半導体、有機半導体、磁性材料、誘電体材料、ナノ構造材料、バイオ材料等)を共通言語としてコーディネーターが活動(情報集約、コンサルテーション、交流促進)することで、機能間の有機的連携・協働が行われる場が形成され、場における知識融合、技術統合を原動力として産学連携活動、新領域の研究構想が生み出されて行くことが期待される。このようなコーディネート活動を行う人材を材料分野毎に配置する(材料分野毎に形成されるクラスターを「材料クラスター」、その形成のためのコーディネート活動を行う人材を「材料コーディネーター」と呼ぶ)。

## ④ プラットフォーム全体のマネジメント構造と総合調整機能

機能分野別ネットワークと材料クラスターを軸に運営されるプラットフォーム全体を円滑に運営するために、機能分野別ネットワークの運営に責任を負うリーダー機関に加えて、プラットフォーム運営全体の総合調整に責任を負うセンター拠点を設置する。このセンター拠点到、各機関の活動状況、人材情報などを一括管理し、全体を円滑に運営するための調整を行うことができるよう情報集約、調整機能を付与する。

## ⑤ ガバナンス

機能分野別ネットワークの運営、材料クラスターのコーディネート活動を含めた事業全体の進捗について、産業界を含めた外部有識者を中心としたガバニングボードによる評価を行い、資源配分へ反映するなどガバナンス機能を確立する。

## ⑥ 産業界との連携の強化

民間企業によるナノネットの利用に関しては、一度接点ができたところでは協力関係の進展が期待できるが、そもそも接点を作ることが難しいことが指摘されている。そのため、材料コーディネーターは、材料クラスター形成を通じて蓄積した研究活動、技術シーズを活用し、プラットフォーム利用に関心を有する企業に対して案内窓口の機能を果たす。さらに、資金調達を含めて技術シーズ実用化のために産業界側が独自に実施しているコーディネート活動と連携して、民間企業の技術開発におけるプラットフォームの有効活用を図る。

#### 【新たな研究モデルを提示する拠点形成】

第2期、第3期科学技術基本計画期間中には、「ナノテクノロジー・材料を中心とした融合新興分野研究開発」事業において、平成17年度よりナノバイオインテグレーション研究拠点の整備が開始され、世界最高水準のナノバイオ研究拠点の形成が推進された。また、平成18年度より開始された科学技術振興調整費「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成」プログラムでは、ナノテクノロジーをはじめとする多様な先端的な融合領域において、産学官の協働による研究開発、人材育成が進められ、平成21年度には、我が国の優れたナノテクノロジーの研究ポテンシャルを環境技術のブレイクスルーに活用するための拠点形成を目的とした「ナノテクノロジーを活用した環境技術開発プログラム」も開始されている。

このような取組みは進捗したものの、海外の研究拠点と比較すると、十分な規模、拠点数に達しているとは言い難いため、ナノテクノロジー・材料科学技術を核として、異分野の連携や融合、人材育成のための機能・インフラ等を有する研究拠点形成をさらに拡充することが重要である。その際には、以下のような観点を踏まえて、制度設計を行っていくべきと考えられる。

- ・分野やセクターを超えた連携が促進されるよう組織構成や装置の配置、運営システム等を工夫する。
- ・基礎研究側にいる優秀な人材を、出口を意識した研究分野に誘導するような、出口指向で基礎から応用・開発段階まで一貫して推進可能となる運営体制を構築する。
- ・研究のフェーズによって、支援すべき対象、必要な予算額あるいは実用化に至る時間軸が違うことへ柔軟に対応し、ファンディング制度等を構築する。特に、先端的な装置が共用されるオープンなハブを研究拠点に整備し、ハブを中心とした研究機関等のネットワーク化を進める。

#### 【人材育成】

第2期、第3期科学技術基本計画期間において発展してきたナノテクノロジー・材料科学技術を研ぎ澄まし、さらに高い水準を目指していくためには、継続的・長期的に人材育成を推進することが重要である。そこで育成される人材は、ナノテクノロジー・材料科学技術に係る基盤技術を理解、活用できるとともに、幅広い分野、フェーズの研究開発に対応できる能力を備える必要がある。

そのためには、上述の先端研究設備ネットワークや国際的に開かれた研究拠点の活動に学生を積極的に組み込み、自立した研究を行うことができる人材として計画的に育成を進めていくことが重要である。人材育成に際しては、ある程度の規模の人材が集結し相互に切磋琢磨することが有効であるため、異分野の人材が集結するネットワークや研究拠点において、先端的な共用装置等を活用しつつ、研究と教育を一体として人材育成を進めることが重要である。加えて、ナノテクノロジー・材料科学技術に係る先端的研究の発展に向けては、若手研究者が、物質の機能がシステム全体を変革するというようなダイナミックな発想をすることができる環境の整備等が重要となる。

また、課題解決を起点とした研究開発を進めていくためには、多様な科学的知見、社会的課題を俯瞰的に見渡し、さらに国際的視野も併せ持って活動するプロデューサーあるいはプ

プロジェクトリーダーが必要とされており、このような職種に人材を誘導するための施策が必要である。例えば、現在の評価基準(論文数、インパクトファクター、サイテーション等)の下では、研究者が課題解決に向けたプロデューサー等として活躍したとしても評価の向上にはつながらない。従って、プロデューサー等としての実績、成果などを評価する新たな評価軸を設定することにより、プロデューサー等として活躍することが、研究者としての評価を高め、次のキャリアパスにつながるようにする仕組みが重要となる。なお、このような施策の立案に当たっては、求められる人材が、課題解決に強い関心を抱いているだけでなく、基礎側の豊富な専門的知見に裏打ちされ、出口側の課題を基礎研究の課題へと翻訳する能力を備える必要があることに十分留意する必要がある。

#### 【国際戦略】

ナノテクノロジー・材料科学技術に係る国際動向と我が国の置かれている状況等を踏まえ、戦略的に国際協力・連携を推進していく必要がある。これまでの欧米諸国との協力・連携を引き続き充実させるとともに、中国、韓国、シンガポール等のアジア諸国についても、地理的・自然環境的な近接性はもとより、急速な経済発展、科学技術の水準の向上に鑑み、プロジェクトの共同実施、人材の相互交流を含めて協力・連携を拡大していくことが重要である。

協力・連携を進めるにあたり、国際的な人脈を拡大し、海外の研究動向等についてのグローバルな情報収集能力を高め、中長期の国際戦略立案能力を強化することが重要となる。このような取組みにより、例えば、海外で進められている研究成果の迅速な導入が可能となり、既に海外で完成された技術に多額の研究開発投資を行うような非効率な投資を避けることにもつながる。

また、研究拠点整備、研究者支援等に取り組む際には、海外からの優秀な人材を積極的に受け入れることにより研究の活性化を図るとともに、日本で育成した優秀な外国人研究者が日本で長期に活動できる受け皿をつくることも重要である。

#### 【リスクガバナンス・リスクコミュニケーション】

ナノテクノロジー・材料科学技術によって生み出される新規物質がどの程度の健康・環境への影響をもたらすかについては、これまでも評価が行われてきているが不明な点も多く残されている。(より高度なリスク評価を可能とするための研究開発については、上記(3)の今後重点化すべき研究領域・課題にも含まれているが、)国は、ナノテクノロジー・材料科学技術を推進するに当たって、その成果として生み出される新物質の有用性をアピールするだけでなく、その安全性や不確実性についても常に注意を払い、得られるリスク評価の結果を積極的に社会に提供することが重要である。さらに、その結果、社会から新規物質のリスクに関して重大な関心が示された場合には、そのリスクが制御あるいは受容の可能なものであることを示す取組を、主要課題として研究開発に組み込むことを促す必要がある。

### 3. まとめ

過去より、新たな時代のドアを開くイノベーションは革新的な材料・機能の発明によりもたらされており、これを可能とする強力なツールがナノテクノロジー・材料科学技術である。一つの革新的環境材料が製品に組み込まれ、グローバルに普及することにより、温室効果ガスの飛躍的な削減や、大幅な省エネルギーにつながり、時代を変革していく可能性がある。

我が国を取り巻く多様なリスクの克服、東日本大震災からの復興、発展に向け、経済・社会の構造の大きな変革が求められている局面だからこそ、「先導的基盤技術」としてのナノテクノロジー・材料科学技術の重要性はかつてない程高いと考えられる。このような現状を踏まえ、今後、国がナノテクノロジー・材料科学技術を重点的に強化することが、我が国が世界をリードし、国際社会における責任を果たす上で極めて重要と言える。

#### (謝辞)

この報告書の取りまとめに当たっては、第2章の「今後重点化すべき研究領域・課題について」に関して、独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センターに、これまでの同センターでの様々な検討の成果を集約して原案を作成して頂くなど、多大なるご協力を頂いた。ここに深く感謝申し上げます。

(参考) 研究開発投資及び論文発表に関する国際比較

(出典: 独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター)

各国の分野別の研究開発投資戦略

- 日本、米国、韓国では、「グリーン」をキーワードとして環境・エネルギー分野への投資が増加傾向。欧州は情報通信技術への投資を重視。日本以外は引き続きナノテクを重視。
- 中国はバイオ技術及びその産業化に主眼が置かれる見通し。

	日本	米国	欧州	中国	韓国
グリーンイノベーション (環境・エネルギー)	□グリーンイノベーションの推進。(第4期科学技術基本計画)	□2012年度予算案でエネルギー省(DOE)には130億ドル(19.9%増)が配分予定。 □2012年度予算は26.33億ドルで、対2010年度実績比で20.4%増加。(米国地球変動研究プログラム(USGSRP))	□「環境(気候変動含む)」への研究に18億ユーロが配分される予定で、間接的に環境技術と関係する「環境・エネルギー・運輸」分野の配分総額は82.8億ユーロ。(FP7)	□生態・環境問題はさらに長期を見据えた検討が必要との認識にたち、2009年に「中国2050年生態・環境科学発展ロードマップ」(「中国至2050年生態と環境科学発展路線図」)を公表	□2009年に「緑色成長戦略5年計画」を発表。
ライフイノベーション (ライフサイエンス)	□ライフイノベーションの推進。(第4期科学技術基本計画)	□国立衛生研究所(NIH)への研究開発予算として、2012年度予算案で318億ドル(対2010年度実績比で2.4%増)を計上。	□「健康」への研究に60.5億ユーロが配分される予定。(FP7) □「食料・農業・バイオテクノロジー」に19.35億ユーロが配分される予定。(FP7) □2007年に設立された「欧州研究会議(ERC)」によるフロンティア研究への助成のうち、拠出された74.6億ユーロ(7年間)のうち、40%程度がライフサイエンスに配分。	□「第12次5ヵ年計画」(2011~2015年)の科学技術戦略計画では、バイオ技術及びその産業化に主眼が置かれる見通し。	□韓国政府の研究開発予算(2009年)の内、ライフ分野への投資は約17%。
ナノテクノロジー・材料	□第4期科学技術基本計画では、重点分野として明示されていない。	□2012年度予算案で、対2010年度実績比10.4%増の21.32億ドルを要求。(国家ナノテクノロジー・イニシアティブ)	□「ナノサイエンス・ナノテクノロジー・材料・新製造技術」への研究にFP6の2倍近い35億ユーロが配分される予定。(FP7)	□国家中長期科学技術発展計画概要(2006~2020年)で、「新材料技術」分野を先端技術8分野の1つとして含む。	□Korea National Nanotechnology Initiativeの第1期マスタープラン(2001~2010年)では、ナノテクノロジー分野のR&Dプログラムに対して10年間で合計12.4億米ドルの投資を計画。
情報通信	□第4期科学技術基本計画では、重点分野として明示されていない。	□2012年度予算案において、対2010年度実績比2%増の38.68億ドルを要求。(ネットワーキング・情報技術研究開発(NITRD))	□「情報通信技術」への研究に91.1億ユーロが重点配分される予定。(FP7)	□2009年に国務院常務会議で「電子情報産業調整振興計画」(「電子信息产业調整振興規劃」)を採択。	□韓国政府の研究開発予算(2009年)の内、情報・電子分野への投資は約16%。

(注)青字は2008年以降の変化

各国の分野別の研究開発投資戦略

- 英国は「ライフサイエンス」重視を示す一方で、ドイツは「エネルギー」に注力。

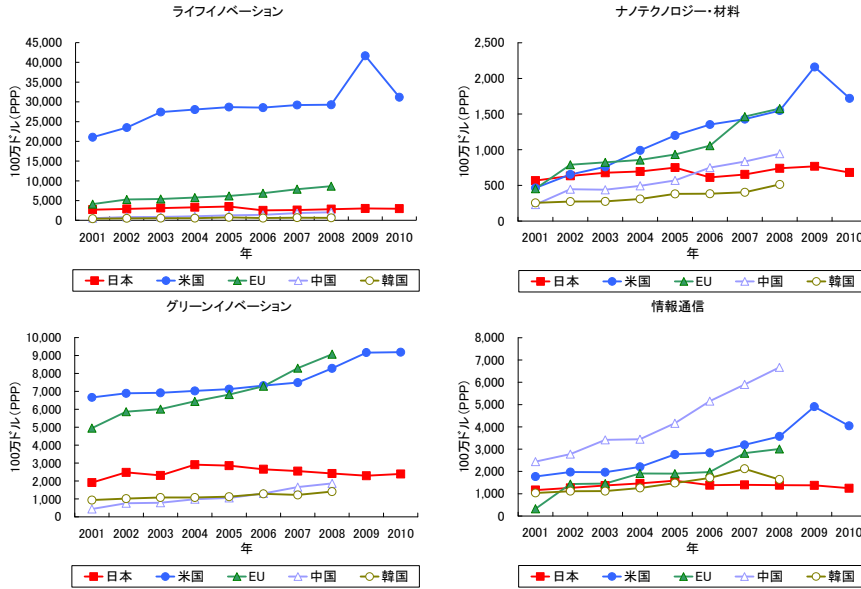
	英国	ドイツ	フランス
グリーンイノベーション (環境・エネルギー)	□研究会議横断型研究プログラム6分野の一つの「エネルギー」分野に対して、2011~2014年の4年間に5億4,000万ポンドが配分される予定。(科学・研究資金配分計画)	□「持続的発展のための研究プラットフォームプログラム」において、2005年から2010年までの5年間に1.6億ユーロの予算を投じて温暖化対策のための様々な研究を実施。 □連邦研究教育省(BMBF)は、2008年に「エネルギー基礎研究2020+」を発表し、エネルギー研究への予算増額を決定。	□「将来への投資(Investissements d'avenir)」(2010年)では、「研究・イノベーション国家戦略」の実践として、「再生エネルギーおよび脱炭素技術開発」について25億ユーロの研究開発投資を行うことを決定。
ライフイノベーション (ライフサイエンス)	□ライフサイエンス局(Office for Life Science)の設立(2009年) □研究会議横断型研究プログラム6分野の一つの「高齢化:生涯の健康と幸福」に対して2011~2014年の4年間で1億9,600万ポンドを配分。(科学・研究資金配分計画)	□連邦研究教育省(BMBF)は、医薬品開発計画「ファーマ・イニシアティブ」において、2007年から2011年までの5年間で総額8億ユーロ以上の資金を提供。	□「将来への投資(Investissements d'avenir)」(2010年)では、「研究・イノベーション国家戦略」の実践として医療・バイオテクノロジー分野の研究開発に対し15.5億ユーロの投資を、精選した研究を加速する大学病院研究所を創設するため、8.5億ユーロの投資を行うことを決定。
ナノテクノロジー・材料	□工学・物理科学研究会議(EPSC)のプログラム「ナノサイエンスの工学から応用まで」では、2008-09年度で総額1900万ポンドの研究投資。	□産業応用を主眼においた「ナノイニシアティブ・アクションプラン2015」を発表。	□「将来への投資(Investissements d'avenir)」(2010年)では、「Nano-INNOV計画」に対し7千万ユーロを充当することが決定。
情報通信	□工学・物理科学研究会議(EPSC)の「情報通信技術(ICT)」プログラムでは、研究に2009年度は7,500ポンド、2010年度は7,050万ポンドを配分。 □産業指向のプログラムとして「デジタルエコミープログラム」では、総額で1億2,000万ポンド(2008-2011年)が配分。 □研究会議横断型研究プログラム6分野の中にも「デジタルエコミー」が挙げられており、2011~2014年の4年間に1億2,900万ポンドが配分されることが明記。(科学・研究資金配分計画)	□連邦研究教育省(BMBF)では、「情報通信2020」で、2007年~2011年に14.8億ユーロを投資する予定。	□「将来への投資(Investissements d'avenir)」(2010年)では、「研究・イノベーション国家戦略」の実践として、超高速通信インフラ(全国光ファイバー網)整備のため、20億ユーロが充当される予定。

(注)青字は2008年以降の変化



## 各国における分野別の政府研究開発投資額(原子力除く)

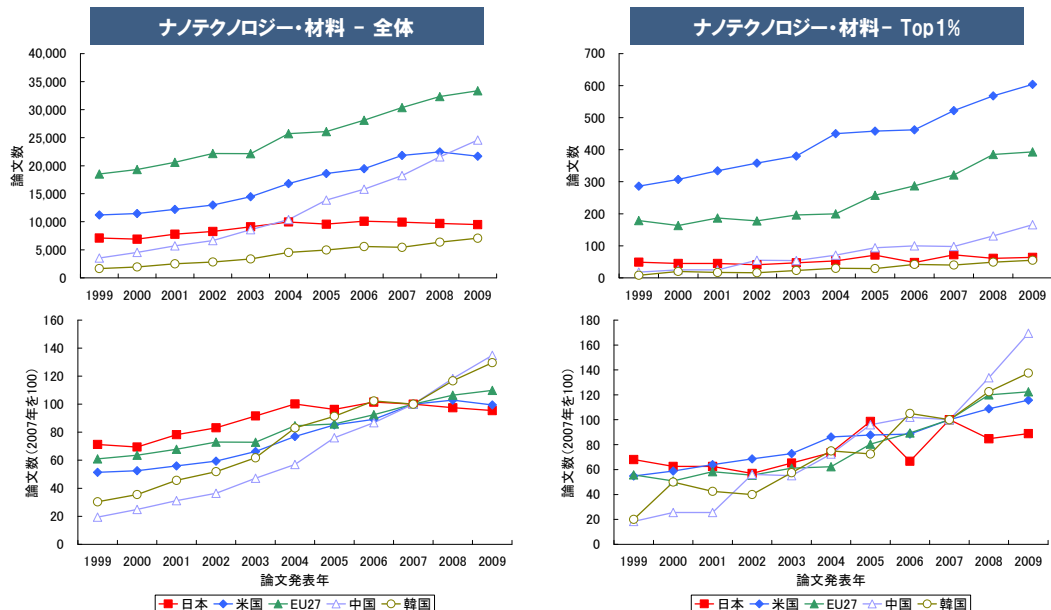
- 日米欧中韓の分野別(ライフイノベーション、グリーンイノベーション、ナノテクノロジー・材料、情報通信)への政府研究開発投資額の推移を推計し、プロットした(購買力平価でプロットした)。
- 日本は、ライフイノベーション、グリーンイノベーションでは、米国とEUに次ぐ投資額を維持しているが、ナノテクノロジー・材料や情報通信では、米国とEUに次ぐ投資額を維持できなくなっている。



**推計の基データ**  
 日本: 内閣府発表資料に基づく。  
 米国: OSTP発表資料に基づく。  
 EU: EUROSTATデータ並びにFP6・FP7のデータに基づき推計。  
 中国: JST中国の科学技術分野別活動の現状及び動向調査(2009)に基づき推計。  
 韓国: OECD STAT(2011年3月ダウンロード)、JST韓国の科学技術とイノベーション政策最新動向より推計。

## ナノテクノロジー・材料分野の学術論文数

- ナノテクノロジー・材料では、中国が急激な伸びを示しており、量的には米国をしのぐほどに成長している。
- 日本は2004年頃から論文の質・両共に頭打ちの状況が続いている。



出典: トムソン・ロイター社の「Web of Science」を基に集計。

## ナノテクノロジー・材料科学技術委員会における審議の経過

### ナノテクノロジー・材料科学技術委員会（第1回）

日時：平成23年4月26日（火） 14:00～16:30

関連議題：

- ・ ナノテクノロジー・材料科学技術の研究開発方策について
- ・ ナノテクノロジー共用基盤ネットワークの今後の展開について

### ナノテクノロジー・材料科学技術委員会（第2回）

日時：平成23年6月6日（月） 14:00～16:45

関連議題：

- ・ ナノテクノロジー共用基盤ネットワークの今後の展開について
- ・ ナノテクノロジー・材料科学技術の研究開発方策について

### ナノテクノロジー・材料科学技術委員会（第3回）

日時：平成23年6月27日（月） 14:00～17:00

関連議題：

- ・ ナノテクノロジー共用基盤ネットワークの今後の展開について
- ・ ナノテクノロジー・材料科学技術の研究開発方策について

## 第6期 ナノテクノロジー・材料科学技術委員会 委員名簿

平成23年4月

	伊丹 敬之	東京理科大学大学院イノベーション研究科教授
	射場 英紀	トヨタ自動車株式会社電池研究部長
	潮田 浩作	新日本製鐵株式会社技術開発本部フェロー
	大林 元太郎	東レ株式会社研究本部顧問
	岡野 光夫	東京女子医科大学先端生命医科学研究所長・教授
	長我部信行	株式会社日立製作所中央研究所長
	片岡 一則	東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻教授
主査	川合 知二	大阪大学産業科学研究所特任教授
	北川 進	京都大学物質-細胞統合システム拠点副拠点長
	栗原 和枝	東北大学原子分子材料科学高等研究機構教授
	小池 康博	慶應大学理工学部教授
	小長井 誠	東京工業大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻教授
	小林 昭子	日本大学文理学部化学科教授
	榊 裕之	豊田工業大学学長
	袖岡 幹子	独立行政法人理化学研究所基幹研究所主任研究員
	曾根 純一	独立行政法人物質・材料研究機構理事
	田中 一宜	独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター上席フェロー
	中村 栄一	東京大学大学院理学系研究科化学専攻教授
	橋本 和仁	東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻教授
	松下 祥子	東京工業大学大学院理工学研究科准教授