

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  
＜中間取りまとめ＞  
(抜粋)

平成23年7月

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

# 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（概要）

## 現状認識

- ◆ ナノテクノロジー・材料科学技術は、科学技術の新たな可能性を切り拓き、先導する役割を担うとともに、複数の領域に横断的に用いられ、広範かつ多様な技術分野を支える基盤的な役割を果たす「**先導的基盤技術**」
- ◆ 資源、エネルギーの制約等の問題を克服し、東日本大震災からの復興、再生を成し遂げるために必要な革新的技術の創出の鍵を握る
- ◆ 近年、各国は、研究開発拠点や共同利用施設へ戦略的な資金投入

## 今後の推進方策

- ◆ 研究者の自由な発想に基づくボトムアップ型の研究、出口志向で基礎から応用、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
- ◆ 「課題解決」を起点とした研究開発課題の戦略的重点化
- ◆ 重要課題の達成に向け、基礎から応用、開発の各段階間で緊密に連携した「循環研究」を総合的かつ計画的に推進

## 「課題解決」に向けたナノテクノロジー・材料科学技術の重点研究開発課題

### <課題領域「環境・エネルギー」>

- ◆ **安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現**
  - ・電気エネルギー生成、変換、貯蔵技術
  - ・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
  - ・太陽エネルギーを化学エネルギーに変換する技術
  - ・未利用エネルギーを電気エネルギーに変換する技術
  - ・高感度、高選択な環境用センサー
- ◆ **エネルギー利用の高効率化及びスマート化**
  - ・電気エネルギー生成、変換、貯蔵技術（再掲）
  - ・省エネルギー材料
  - ・バイオマス燃料及び化成品原料の創成（バイオリファイナリー）
  - ・画期的な触媒材料
  - ・環境浄化技術
  - ・省エネルギー、低環境負荷の製造プロセス（グリーンプロセス）の実現
  - ・エレクトロニクスの省エネルギー化、多機能化
- ◆ **社会インフラのグリーン化**
  - ・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（再掲）
  - ・高感度、高選択な環境用センサー（再掲）
  - ・エレクトロニクスの省エネルギー化、多機能化（再掲）
  - ・元素戦略・希少元素代替材料 等

### <課題領域「医療・健康・介護」>

- ◆ **革新的な予防法の開発**
  - ・化学と生命科学の融合（ケミカルバイオロジー）
- ◆ **新しい早期診断法の開発**
  - ・体内埋込型診断・治療機器
- ◆ **安全で有効性の高い治療の実現**
  - ・体内埋込型診断・治療機器（再掲）
  - ・高度な薬物送達（ドラッグデリバリーシステム）
  - ・細胞内治療
  - ・再生医療材料 等

### <課題領域「科学技術基盤」>

- ・3次元計測、瞬時その場計測、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
- ・物質材料設計及び制御技術 等

### <課題領域「震災からの復興、再生及び安全性の向上」>

- ・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
- ・未利用エネルギーを電気エネルギーに変換するデバイス
- ・放射性物質の分離回収技術及び移行低減技術
- ・原子炉の健全性を高める構造材料 等

## ナノテクノロジー・材料科学技術の発展を支える施策

- ◆ 「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、「ナノテクノロジープラットフォーム」を整備
- ◆ ナノテクノロジー・材料科学技術を核として、異分野との連携・融合、人材育成のための機能等を有する研究開発拠点の形成を拡充
- ◆ 先端研究設備のネットワークや国際的に開かれた研究開発拠点の活動に、若手研究者や学生を積極的に組み込み、計画的に人材育成
- ◆ 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との協力、連携を拡大
- ◆ 新規物質の有用性を強調するだけでなく、その安全性・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

## 1. 現状認識

ナノテクノロジー・材料科学技術は、科学技術の新たな可能性を切り拓き、先導する役割を担うとともに、複数の領域に横断的に用いられ、広範かつ多様な技術分野を支える基盤的な役割を果たすことから、「先導的基盤技術」と言うべきものである。 また、ナノテクノロジー・材料科学技術は、我が国が抱える資源、エネルギーの制約等の問題を克服し、東日本大震災からの復興、再生を成し遂げるために必要な革新的技術の創出の鍵を握っている。

(略)

## 2. 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。

(略)

### (2) 課題解決を起点とした研究開発課題の戦略的重点化

ナノテクノロジー・材料科学技術に対する、社会からの期待を踏まえ、課題解決を起点として、研究開発課題を戦略的に重点化する必要がある。その際、重要課題の 達成に向け、基礎から応用、開発の各段階間で緊密に連携した「循環研究」を総合的かつ計画的に推進していくべきである。

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、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。このため、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て、研究開発課題を戦略的に重点化することが求められる。また、東日本大震災からの復興、再生の実現に向け、次世代の主要産業の創出等による我が国の国際的優位性の強化、安全で豊かで質の高い国民生活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、研究開発課題を重点化するには、最終的な出口を見据えて、重要となる研究開発課題を特定することが必要である。また、課題を解決するためには、新規の技術を開発するだけでなく、有用な既存技術の組合せを含めて、最適なナノテクノロジー・材料科学技術を選択することも重要となる。

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ことではなく、基礎研究の段階でも、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ほど、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併せて進めていく必要がある。このため、基礎から応用、開発、さらに事業化、実用化の各段階へ一方向にのみ進むのではなく、問題の本質への理解の深化等を通じ、各段階での課題が基礎研究の課題へと翻訳され、基礎研究へ立ち戻るような「循環研究」が行われることが、課題の解決とサイエンスの発展の双方にとって重要である。すなわち、重要課題の達成に向け、各段階での活動を相互に連携させ、研究開発等の取組を総合的かつ計画的に推進していく必要がある。

(以下略)

### **(3) 課題解決に向けたナノテクノロジー・材料科学技術の重点研究開発課題**

第4期科学技術基本計画の策定に向けた答申を踏まえ、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課題領域は、4つに大別される。すなわち、グリーンイノベーションに対応する「環境・エネルギー」の課題領域、ライフイノベーションに対応する「医療・健康・介護」の課題領域、そして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」の課題領域、さらに東日本大震災を受けた「震災からの復興、再生及び安全性の向上」の課題領域である。

それぞれの課題領域は社会的な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。同時に、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。そして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は、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。さらに東日本大震災は、ライフラインの寸断や情報通信網の途絶という社会基盤の脆弱性を露呈させたが、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、震災からの復興、再生及び安全性の向上等の諸課題に対して、ナノテクノロジー・材料科学技術が果たし得る役割は重要であり、本質的である。

このようにナノテクノロジー・材料科学技術が貢献できる課題領域は広範囲に及ぶが、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、社会的な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水準を高度化し、常に世界最高水準を維持していくことが求められる。

このような状況を踏まえ、上記の4つの課題領域に関して、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課題領域「環境・エネルギー」**

第4期科学技術基本計画の策定に向けた答申において、本課題領域における重要課題として設定されているものは、「安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現」、「エネルギー利用の高効率化

及びスマート化」及び「社会インフラのグリーン化」である。

特に、我が国にとって重要な資源問題については、「元素戦略」や希少元素を代替する材料の開発を、新材料設計・探索の思想を基礎として、今後も中長期にわたって着実に開発していかねばならない。なお、「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組であり、欧米においても同様の取組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、一箇所に集中した社会基盤の脆弱性が露呈し、分散型の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、本課題領域の主な研究開発課題を以下に挙げる。

### <重要課題「安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現」>

#### 【電気エネルギー生成、変換、貯蔵技術】

本課題については、太陽電池、燃料電池、二次電池、熱電変換素子等の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、家庭や企業での太陽光発電、あるいは夜間電力利用と蓄電システムの組合せなどによる分散型のシステムの開発が重要である。なお、本課題の推進に当たり、蓄電する単位は家庭ごと、またはより大きな単位が良いかなど、社会システムの研究との連携が必要である。また、使用後の廃棄やリサイクルも考慮に入れた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、新規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。必要十分な安全性を担保しつつ、高電圧化及び高容量化を実現する新規材料を開発し、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、電解質等の各材料の組合せが重要となる。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、電池反応の基礎的な理解、解明が必要である。

#### 【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】

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、鉄系高温超伝導体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、最終的なシステムを強く意識した研究開発が必要である。

### 【未利用エネルギーを電気エネルギーに変換する（エネルギーハーベスト）技術】

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である。また、個別の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の流れを制御する要素と位置付け、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の研究が求められる。

### 【高感度、高選択な環境用センサー】

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測定できる、小型、安価な環境測定用の計測機器の開発が重要となる。特に、超小型、簡易な線量計の開発は、日常的に線量確認を行うことを可能とし、風評被害の防止や環境管理システムの発展にも有効と考えられる。また、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、高感度で高選択なセンサーや、システム化に向けた技術の開発が重要である。

## <重要課題「エネルギー利用の高効率化及びスマート化」>

### 【電気エネルギー生成、変換、貯蔵技術（再掲）】

#### 【省エネルギー材料】

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、遮熱ガラスは光を大きくカットするため、冬の太陽光の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。

#### 【バイオマスによる燃料及び化成品原料の創成（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による燃料及び化石資源を代替する化成品原料の創成が期待される。特に、生物学的知見（植物細胞壁の詳細構造や酵素の機能等）と、化学的知見（合成プロセスや触媒の機能等）を融合させ、生物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である。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触媒や酵素を開発することなどが求められる。

#### 【画期的な触媒材料】

触媒は、排ガス浄化や自浄性（セルフクリーニング機能）、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。特に物質生産過程では、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及び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、物質生産過程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行える高強度分離膜の開発、その他、微生物及び細菌による環境浄化の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。

### 【省エネルギー、低環境負荷の製造工程（グリーンプロセス）の実現】

省エネルギー、低環境負荷の製造過程を実現するため、低温・低圧での反応、廃棄物の削減、有害物質の不利用等に考慮した製造過程の開発が求められる。

### 【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及び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項目が挙げられる。

- 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）
- 新不揮発性メモリ及びCPU
- 多機能化を指向したナノCMOSとMEMS/NEMSや、光配線、スピントロニクス、バイオテクノロジーとの融合技術
- 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（実用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）
- 通信等他分野への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な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）

### <重要課題「社会インフラのグリーン化」>

#### 【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（再掲）】

#### 【高感度、高選択な環境用センサー（再掲）】

#### 【エレクトロニクスの省エネルギー化、多機能化（再掲）】

### 【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慮した上で、最適な戦略を立案し、開発を推進する必要がある。特に、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、目的とする機能を備えた材料の開発を加速することが求められる。また、資源の有効活用の観点から、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。なお、研究開発の推進に当たっては、植物の光合成や動物の呼吸を担う蛋白質が鉄、銅、亜鉛、マグネシウム、マンガンなどを使用していることから、生体の仕組みに学ぶことも重要である。

### ②課題領域「医療・健康・介護」(略)

### ③課題領域「科学技術基盤」(略)

### ④課題領域「震災からの復興、再生及び安全性の向上」(略)

## (4) ナノテクノロジー・材料科学技術の発展を支える施策

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、優れた人材の育成、新たな研究開発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。

(中略)

### ①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年度から平成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年度に開始された「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及び設備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、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及び運用状況も踏まえ、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組を確実に継続することが求められる。

(以下略)

### ②新たな研究開発モデルを提示する拠点形成

第2期及び第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、産学が連携して国内外の一流研究者を結集し、環境技術の基礎基盤的な研究開発を推進する拠点構築を目指す「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。

このような取組は進捗したもの、海外の研究開発拠点と比較すると、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及び基盤等を有する研究開発拠点の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。

(以下略)

**③人材の育成（略）**

**④国際戦略（略）**

**⑤リスクガバナンス、リスクコミュニケーション（略）**

**3. まとめ(略)**