

### 3. 4 ナノテクノロジー・材料分野

ナノテクノロジー・材料分野における研究開発予算は、第3期科学技術基本計画（第3期基本計画）の初年度（平成18年度）には762億円であった。その後、786億円（平成19年度）、865億円（平成20年度）、881億円（平成21年度）、759億円（平成22年度）と推移し、5年間の累計額は、4053億円となっている。

本分野では、重要な研究開発課題として、「ナノエレクトロニクス領域」「ナノバイオテクノロジー・生体材料領域」「材料領域」「ナノテクノロジー・材料分野推進基盤領域」「ナノサイエンス・物質科学領域」の5領域に全部で29課題が掲げられており、その研究開発目標は150以上にのぼる。第3期基本計画期間における本分野全体をとおしての大きな動きとしては、国家基幹技術である「X線自由電子レーザー」、「ナノテクノロジー・ネットワーク」等のインフラの整備、「つくばイノベーションアリーナ」による産学官連携の強化や、昨年世界に衝撃を与えた中国レアメタル・レアアース輸出制限問題への対策を先取りした形となった府省連携プロジェクト：『元素戦略プロジェクト』（文部科学省）と『希少金属代替材料プロジェクト』（経済産業省）の着実な進捗があげられる。

以下、（1）に各領域別の第3期（H18～22）の主要施策に係る成果と今後の課題、および第4期での取組、（2）に第4期に向けての総括的コメント（評価、対応方針）について取りまとめる。

#### （1） 第3期の研究開発の成果等

##### ①ナノエレクトロニクス領域

ナノテクノロジー・材料分野の基盤技術を生かし、将来にわたって国際競争力をもつエレクトロニクス技術を実現することを目指して、ナノ領域特有の物理現象・化学現象を積極的に活用するための更なる微細化技術や、デバイスレベルでの高機能化・省電力化を図る技術、電子・光の量子特性の基礎技術の高度化、従来の動作原理を打破する新デバイス技術の開発等について目標を設定し、研究開発を行った。

#### <主な施策の成果と課題>

（成果目標）

造形・加工における新しいナノテクノロジー技術を展開させ、2010年までの45nmレベルの微細化等を始めとして、ナノスケールに対応したエレクトロニクス製造技術および装置を2015年頃までに開発することにより、半導体分野での32nm以降の製造技術および各種エレクトロニクス製品製造分野での優位性を確保する。【文部科学省、経済産業省】

#### 成果と課題：

『次世代低消費電力半導体基盤技術開発（MIRAI）』（経済産業省）では、我が国のデバイスメーカー、材料メーカー、関連装置メーカーの強力な連携体制の下、研究成果や中間評価結果を受けた目標の再設定などをおして、32nmレ

ベルの微細化技術に対応した極端紫外線 (EUV) 露光システムで用いられるマスク関連技術 (欠陥検査、修正技術、マスクハンドリング技術) を確立した。また、EUV 光源の高信頼化に関しては、露光機へ流出する汚染物質の測定技術を確立し、汚染防止用シールド装置の開発により、高出力光源下 (100W) における集光光学系の寿命を 1 年程度まで伸ばす技術に目処をつけた。

今後の課題は、22nm レベルでのマスク無欠陥化、高出力時の光源の信頼性向上であり、本技術の活用により半導体デバイスの微細化・高集積化を進め、半導体チップの高機能化、低消費電力化、コスト低減等を実現することである。

(成果目標)

2015 年頃までに、ナノ領域特有の物理現象・化学現象を積極的に利用した他技術との融合や 45nm レベルのプロセス・設計技術をマイルストーン (2010 年) とした更なる微細化技術によって、現在の最先端シリコンエレクトロニクスに更なる高機能化や低消費電力化を図るデバイス技術を開発する。これらにより、デバイス性能を飛躍的に高め、世界を魅了するユビキタスネット社会を実現させるとともに、日本の強い情報家電等の具体的アプリケーションに特化して行うことで、日本のこの分野における国際競争力をさらに高め、世界においてリーダーシップを発揮する。【文部科学省、経済産業省】

#### **成果と課題：**

『スピントロクス不揮発性機能技術プロジェクト』 (経済産業省) において、垂直磁化材料を利用したトンネル磁気抵抗 (TMR) 素子の開発では、中間評価結果を反映し、スピン RAM を先行して実用化するためのスピン RAM 開発体制の重点化をさらに進めた。この重点化と加速資金の活用により、垂直磁化 TMR 膜で世界最高の 202% の高 TMR を実現し、64Mb MRAM について発表することで、ギガビット級スピン RAM の実現可能性を世界に広く認識させるまでの成果を得た (2007 年度朝日賞、IBM 科学賞受賞、2010 11th Joint MMM-Intermag Conference、2010 ISSCC での発表)。また、メモリデバイス設計技術に関して、垂直磁化 TMR 膜を用いた 3nsec の書き込み速度の達成や集積アレイによる新機能メモリ動作を実証し、スピン能動素子設計技術に関しては、三端子構造での電力増幅作用を確認し、スピン新機能素子実現のための基盤技術を確立した。

今後の課題は、スピン RAM のような不揮発性デバイスの活用技術 (アーキテクチャ、制御用ソフトウェア等) 開発である。

(成果目標)

ナノ領域特有の物理現象・化学現象を積極的に利用した認証・通信技術を 2015 年頃までに開発することにより、インターネット社会における情報セキュリティを堅固なものにする。【文部科学省、経済産業省】

#### **成果と課題：**

『ナノテク活用情報通信材料の開発』 (文部科学省) では、次世代集積回路

で求められる high-k (高誘電率) 材料の Si (シリコン) への直接接合に関する材料設計指針や、微細化に対応するための仕事関数制御が可能なメタルゲートの提唱を行い、さらに、それらを実証する新たな high-k 材料 (CeHfAlO<sub>x</sub> 系) や非晶質金属材料 (Ru-Mo 系、Ta<sub>n</sub>-Y 系) において基本特性を確認した。

今後は、ナノスケールに対応したエレクトロニクス製造技術の実用化に向けて、安定した high-k/Si 界面の作製や耐酸化還元性能をもつゲートスタック構造の開発、リーク特性改善等が必要である。

(成果目標)

2015 年頃までに、ナノ領域特有の物理現象・化学現象を積極的に利用したナノデバイス技術を開発することにより、デバイスレベルでの消費電力を徹底的に低減するとともに、システム・回路との連携による消費電力の無駄を省くことにより、電子機器およびその他の装置・システム等の消費電力を削減し、国家の省エネルギー政策にデバイスレベルから貢献する。【文部科学省、経済産業省】

#### **成果と課題：**

『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 (非シリコン系材料を基盤とした演算デバイス)』 (文部科学省) においては、高速度・低消費電力デバイスを実現する Si-LSI (シリコン大規模集積回路) と混載が可能な金属酸化物系 3 端子型原子スイッチ素子や、その集積に必要なプロセス技術の開発に成功し、さらに低駆動電圧 (2V 程度) の実現が可能であることも確認した。今後の課題は、実用化への展開に向けた性能の安定化である。

また、『ナノスケール新物質創製・組織制御』 (文部科学省) においては、無機材料を有機材料に置換した原子スイッチ、光応答型原子スイッチ等の新たな原子・光デバイス技術の開発を進めるに当たり、成果利用に関心を持つ企業と基礎段階から連携を強化するコンフィデンシャルな二者間セミナー等を開催し、両者の合意によって様々な形態の共同研究体制を構築すること等を行った。今後の課題は、素子構造と材料の最適化による素子単体の動作特性向上等、実用化に必要な要素技術を確立することである。

(成果目標)

電子・光の量子特性の基礎技術を 2015 年度までに高度化するなど、ナノ領域で顕著になる電子・光特性の新機能発現・原理解明とともに、その制御・利用した新たな動作原理の技術を創出する。【文部科学省】

2015 年頃までに、従来のシリコンエレクトロニクスで利用されていない材料もしくは機能に対して、ナノ領域特有の物理現象・化学現象を積極的に活用して、現在の半導体技術をさらに発展させるデバイス技術を実現するとともに、従来の半導体の動作原理を打破する新デバイス技術開発を目指す。これらにより、デバイス性能を飛躍的に高め、世界を魅了するユビキタスネット社会を実現させるとともに、日本の強い情報家電等の具体的アプリケーションに特化して行うことで、日本のこの分野における国際競争力をさらに高め、世界においてリーダーシッ

プを發揮する。 【総務省、文部科学省、経済産業省】

### 成果と課題：

『ナノスケール新物質創製・組織制御（次世代白色 LED のための発光材料の開発）』（文部科学省）において、白色 LED（発光ダイオード）照明用に、ナノ構造制御による演色性、色純度、耐久性を兼ね備えた優れたサイアロン蛍光材料を開発し、その一部が実用化された。今後は、蛍光体の発光効率向上に向けて、粒子の欠陥構造を明らかにするとともに、粒子表面の欠陥を低減する高温ガス反応プロセスを開発することが課題である。

『先端 ICT デバイス技術』（総務省）では、マイクロボロメータ素子中の吸収膜のナノ構造を最適化することにより、常温動作検出器として世界最高性能を有する高速動画取得も可能なテラヘルツカメラを開発した。またこのカメラと化合物半導体をナノメートル単位で積層した量子井戸構造を持つ高精度テラヘルツ光源からなる可搬な実時間テラヘルツイメージングシステムを構築し、遠隔イメージングや生体物質検知システムを実証した。『ナノテクノロジー共通基盤技術の開発』（文部科学省）においては、誘電体多層膜の選択的エッチング技術によって、スペクトル設計や偏光制御可能な新赤外光源となるプラズモン共振器アレイを実現した。

今後の課題は、ナノスケールに対応したエレクトロニクス製造技術の更なる高度化により、高速大容量情報通信技術・セキュリティ技術開発に資する高効率な新光源技術や、理論限界に迫る超高感度光検出技術の実現である。

### <領域全体の成果と課題>

スピントロニクス技術や、原子スイッチなどの新技術で、世界レベルの成果をあげているが、これらの新デバイス技術に関しては早急な展開が望まれる。エレクトロニクス技術に関しては、デバイスの微細化技術は着実な進展が見られた。今後は信頼性向上や低消費電力化、コスト低減等の実用化に向けた取組が必要である。

本領域(ナノエレクトロニクス領域)は、この10年において、基礎研究の面では、非常に高いレベルの成果をあげているものの、産業競争力の面からは伸びが見られない分野になっているとの指摘がある。

こういった課題を克服し、ナノエレクトロニクスの世界的優位を保つためには、産学官一体となった知の集結を、「つくばイノベーションアリーナ」(TIA-nano)のような共用施設を有する研究拠点などを活用することにより図ることが重要である。しかし、現状において、TIA-nanoは整備途上の拠点であるため、欧米のIMEC、MINATECといったナノテクノロジー拠点に比して、規模や運用の点で遅れをとっていることが否めない。今後は、研究拠点や共用施設ネットワークのさらなる充実、そして運用実績を早急にあげていく必要がある。

### <今後 (H23～) の取組>

平成 23 年度より、『立体構造新機能集積回路（ドリームチップ）技術開発』（経済産業省）、『ナノスケール材料領域』（文部科学省）等の施策により、引き続き本領域での課題の解決、ひいては社会の持続的発展とともに膨張するニーズを満たすことを目標とした取組を行う予定である。

本領域の技術においては、新たなナノデバイスの実用化に向けたプロトタイプ試作や出口企業との連携が非常に重要であり、研究開発の実施体制においては、世界的なナノテクノロジー集中型オープンイノベーション拠点を目指した TIA-nano の積極的な活用などを検討していく予定である。

## ②ナノバイオテクノロジー・生体材料領域

ナノレベルで生体の構造と機能を正確・精密に理解するための分子イメージング技術の開発や、ナノ技術を用いた低侵襲診断・治療機器、再生医療用材料の開発等を行った。このほか、ナノテクノロジーを活用した技術開発により、環境リスクの予防的な管理体制構築、及び消費者ニーズの高い安全で高品質な食料の安定供給に向けた取組みが行われた。

### <主な施策の成果と課題>

(成果目標)

2015 年頃までに、生体分子イメージング技術などを併用して、細胞内生体分子などの捕捉や移動技術、細胞表層分子の操作技術を確立することにより、生体の構造や機能を含む生命現象のメカニズムを分子レベルで解明し、生命現象のメカニズムを活用・制御する基本技術開発において世界をリードする。【文部科学省】

#### 成果と課題：

『先端光科学研究』（文部科学省）においては、基礎寄りの研究が展開され、軟 X 線アト秒パルスレーザー、近接場ナノ光源及びテラヘルツ光源等の理研が独自に開発をしてきた光源を用いて、タンパク質の観察域を広げ、より自然な状態で生体深部の観測を可能とするなど、生体イメージングを進化させた。

今後の課題は、革新的成果をもたらし得る基礎研究を幅広く推進すると共に、そこから生まれたシーズを多様な応用分野に橋渡しするための基盤的な研究開発を推進することである。

(成果目標)

再生医療用材料等の開発により、2011 年までに角膜、皮膚、骨、軟骨等の、2015 年頃までに心筋、血管等の、2025 年頃までに肝臓等の臓器・器官の再建と機能回復を図る。【文部科学省】【経済産業省】

#### 成果と課題：

再生医療の分野では、再生技術の有効性、安全性の評価手法の開発を通じた基盤整備をすすめるとともに、医工連携・融合体制によって、三次元造形による骨再生、超低摩擦界面創製による生涯型人工関節、多くの組織の再生医療に使える本人由来の細胞シートの作製等に成功した。

『再生医療評価研究開発事業』（経済産業省）においては、新規製造技術による人工骨の前臨床試験を進めるとともに、培養細胞の計測、評価技術を開発して標準化を進めるなど培養細胞の実用化に向けた環境整備を促進した。

『戦略的創造研究推進事業（CREST）「医療に向けた化学・生物系分子を利用したバイオ素子・システムの創製」』（文部科学省）においては、本人由来の細胞シート作製技術を開発し、角膜、心筋については、国内で臨床応用を開始し、フランスでは角膜再生上皮シートの治験が終了し、薬事許認可取得へ向けて準備がなされている。

『繊維配向性を制御した革新的生体組織再生材料』（文部科学省）では、強磁場を用いて生体組織と類似した線繊維配向構造体を創出した。『ナノテク活用バイオ材料の開発』（文部科学省）では、歯の再生誘導材料としてアメロゲニンとハイドロキシアパタイトが有用であることを見出した。

今後は、自身の機能を最大限に生かした再生医療の実現に向けて、生体内で自己組織の再生を促す再生デバイス等の開発を通じ、有効性・安全性の高い次世代再生医療技術を早期に社会への普及をめざす。また、これらの技術の早期実用化に向け、高品質・量産化に資する技術開発も併せて実施する必要がある。

#### （成果目標）

2011年までに、DDS技術、イメージング技術を核として、国民を悩ます重要疾患（がん、循環器疾患、糖尿病、認知症等）の超早期診断と副作用が少なく、治療効果の高い医療技術を開発する。【文部科学省】【厚生労働省】【経済産業省】

ナノ技術やMEMS技術を駆使した、低侵襲診断・治療機器や遺伝情報を高感度・高効率に計測する機器を2011年までに開発する。これにより、副作用が少なく個人に最適化した治療効果の高い医療を実現し、国民を悩ます重要疾患（がん、循環器疾患、糖尿病、認知症等）の克服に貢献する。【文部科学省】【厚生労働省】【経済産業省】

#### 成果と課題：

高分子ミセル型 DDS の開発や新機能ステントの開発を通じ、低侵襲性かつ高選択性をもつ治療技術が開発された。

『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（ナノバイオ・インテグレーション研究拠点の形成）』（文部科学省）では、医薬理工連携の集中型拠点を活用し、高分子ミセル型 DDS による難治性固形がんの造影・増殖抑制や、3次元ナノ造形技術を用いた人工骨の形成、生体適合化表面処理技術による長寿命人工股関節の開発を行った。また、東大病院や国内外の臨床治験施設との積極的な連携により、これらの治療技術、治療デバイ

スの実用化に向けた臨床治験を進めた。さらに、本プロジェクトで構築された医工連携の集中型拠点は、世界のナノバイオ拠点と連携したグローバルナノバイオネットワークを創設するなど、ナノバイオ領域におけるグローバルな拠点としての評価が確立された。

『分子イメージング研究事業』（文部科学省）では、幅広い研究が行われ、分子イメージング研究の設備と人材をそろえた拠点の整備から、ヒトの病態のモデル動物における再現、複数同時イメージングの原理実証成功、更には臨床に用いる新規 PET 装置や MRI 診断技術の開発などを通じ、新薬の開発における成功率の上昇及び創薬プロセスの迅速化・低コスト化や、がん・認知症・精神疾患等の疾患メカニズムの解明及び診断の高度化等の実現に向けた基盤技術を開発した。

『低侵襲・非侵襲医療機器研究事業（ナノメディシン）』（厚生労働省）では、『分子イメージング機器研究開発事業』（経済産業省）との省庁間連携プロジェクト体制を実施し、神経細胞ネットワークを制御する経路の同定及び同定箇所の分子イメージングの成功、生体吸収性合金かつ血管保護作用を有する新規ステント創出など、医療機器開発が行われた。

今後、より一層の産学官の連携により、非侵襲・低侵襲を目指した医療機器等の研究・開発を推進し、実用化を促進する必要がある。

(成果目標)

2015 年頃までに、化学物質有害性評価チップ等を開発することにより、環境中極微量化学物質などの検出と評価を行い、安心・快適な暮らしにつなげる。【環境省】

2015 年頃までに、ナノテクノロジーを活用した環境技術を開発する。これにより環境リスクの予防的な管理体制を構築する。【環境省】

### **成果と課題：**

『ナノテクノロジーを活用した環境技術開発推進事業』（環境省）において、動物実験系を一部代替し、既存・新規化学物質の安全性評価及び医薬品としての性能評価を迅速・高効率に実現する手法を確立することを目的として、大気中粒子状物質のヒトへの呼吸器影響に係る検知チップを開発し、人工組織とナノセンサとが一体化したバイオナノ協調体を複数種創製した。また、環境汚染物質と分子の形や性質が似ている物質を用いて分子鋳型を作ることに成功し、分子鋳型機能を持った均一粒子を開発し、環境汚染物質分析の前処理材として実用化した。

今後は、水・大気等の環境媒体中の工業用ナノ材料の管理手法の整備に向け、ナノ材料の環境媒体中での測定手法開発及び挙動解明を目指す。また、工業用ナノ材料が人の健康や生態系に及ぼす影響についても試験方法の検討及び情報の収集を行う必要がある。

(成果目標)

ナノバイオテクノロジーを活用した機能性成分を向上した食品を開発することで、国民が生涯健康な生活を送ることができるようになると共に、食品物性制御技術やナノテクノロジーを活用して、消費者ニーズの高い食品や食品栄養成分の長期安定保存システムを開発することにより、国際競争力が高く、安全で高品質な食料を安定して供給するための体制を確立する。これらにより、2015年頃までに食料自給率を45%まで向上させることに資する。【農林水産省】

### **成果と課題：**

『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）においては、食感や機能性の向上等新食品の開発による新需要の創出に向けて、食品素材のナノスケール加工技術の開発に取り組んだ。有効成分の吸収性向上に資するナノサイズの均一な懸濁液作製技術や、魚肉の微細化により食塩を低減した練り食品の作成技術を開発した。

今後は、消費者ニーズの高い新規食品等の実用化に向けて、主要食品素材の微細化による特性変化を調べ、有用な特性を見出すことが必要である。

### **<領域全体の成果と課題>**

本領域における代表的な研究成果として、イメージング技術や再生医療用材料技術の進展がある。様々なバイオマーカーに対するイメージングプローブは国際的に見ても優れた開発が進められている。しかし、イメージングの要素技術のレベルは極めて高いものの、イメージングシステムとしてみた場合、欧米の後塵を拝することが多々あることは否めない。プローブの国際競争も激しいので、産業界のニーズに応えるプローブラリーの整備や、プローブとイメージング機器の並行した開発を、産学官連携及び医工連携により推進する必要がある。また、再生医療用材料等に関しては、日本オリジナルである優れた細胞シート技術を有しており、国内外における技術開発は高く評価され、機能的インテグレーションが行われるなど様々な展開をみせており、iPSを始めとする我が国の強い細胞バイオロジー技術との融合でさらなる発展が期待される。

拠点やコンソーシアムといった環境整備面での取組も進捗をみせている。“ナノバイオ・インテグレーション研究拠点”では、がんなどのターゲッティング機能を向上した高分子ミセル型 DDS とイメージング、新機能ステント、3次元ナノ造影による人工骨の形成、表面適合化長寿命人工股関節などの先進的開発が多面的かつ精力的に進められ、その成果は国内外で高く評価されている。同拠点は 1) 医工連携拠点として二つの共用施設を構築、2) 融合の仕組み作りにリーダーが裁量権を発揮、3) 大学側が融合拠点構築を強力に支援、の3点により世界でも有数の成功を収め、拠点研究体制の好例と考えられる。拠点整備に加え、活性化がみられるレギュラトリーサイエンス、開発ガイドラインや評価指標の作成など、省庁を横断した取組によるサポートも本分野にとって不可欠である。このためには、産官学のコンソーシアムが有力な手段と考えられる。2001年に発足した医療技術産業戦略コンソーシアム(METIS)では、昨年度から医療機

器の適正評価戦略会議を立ち上げておりその成果が期待される。

上記に示した研究面での成果、拠点整備の進捗を活かすためには、規制面や知的財産管理などの制度面での取組は必要不可欠である。研究成果を実用化につなげるにあたり、規制がネックとなり、実用化に至る各段階のスムーズな移行ができず、折角得た研究成果が海外で展開される、という事例も見られる。実用化に向けた各段階の移行を円滑にするために、法律整備など許認可制度の見直しを進めるなど、20年単位での長い先を見据えての取り組みをする必要がある。同時に、日本発の研究成果を外国に逃さないように、知的財産管理や許認可申請に必要なデータを得るための治験を支援する研究施設と病院との連携体制など、研究環境づくりのための基盤整備が必要である。

### <今後（H23～）の取組>

平成23年度からは、引き続き、『分子イメージング研究』『最先端光科学研究』において、連携拠点構築、研究基盤の整備・高度化を実施することにより早期診断技術開発に取り組む予定。

再生医療においても、『次世代機能代替技術の研究開発』により、生体内で自己組織の再生を促す再生デバイスなど、自身の機能を最大限に生かした有効性・安全性の高い次世代再生医療技術の早期普及を目指す。

環境リスク評価・管理技術については、『環境研究総合推進費』により引き続き取り組む予定。

## ③材料領域

本領域では、材料科学技術が科学技術全般を支えるキーテクノロジーとして、エネルギー問題の克服、環境と調和する循環型社会の実現、安全・安心社会の構築、日本の経済・産業の国際競争力の維持・強化等に重要な役割を担うことに着目して、希少・不足資源元素、有害元素の代替技術や、高効率なエネルギー利用のための革新的材料の開発、構造部材の軽量化、ミクロからマクロスケール領域でのプロセス技術・最適構造化加工技術、人体と環境に対する化学物質のリスクを最小化する技術、大震災に耐える高強度材料や災害・事故から身体等の安全を確保する材料等について目標を設定し、研究開発を行った。

### <主な施策の成果と課題>

(成果目標)

燃料電池用の貴金属触媒、透明電極用のインジウムや高保磁力磁石のディスプレイなど、産業応用で重要な材料機能を担う希少・不足資源元素を、豊富に存在する（クラーク数が大きい）元素で環境低負荷な毒性の問題ない元素を用いて代替（・省使用に）する材料の開発や、これらの元素に対して、2005年水準よりも50%程度高い効率の製造・リサイクルプロセス技術を2015年頃までに開発することにより、希少資源・不足資源の枯渇の影響のない持続可能な社会の確立に貢献する。【文部科学省、経済産業省】

豊富に存在する（クラーク数が大きい）元素で環境低負荷な物質を用いた高効率の環境浄化材料の開発、新しいリサイクル可能な材料開発、および新しいリサイクル方法となる革新的プロセス技術の開発を 2015 年頃までに行うことにより、環境の改善や保全に貢献する。【文部科学省】

### **成果と課題：**

『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（元素戦略プロジェクト）』（文部科学省）と『希少金属代替材料開発プロジェクト』（経済産業省）の府省連携によって、2010 年に起きた中国のレアメタル・レアアース輸出制限問題のリスクの軽減に貢献する下記の成果があげられた。

#### ・透明電極用のインジウム代替材料の開発

大型液晶ディスプレイ等に使用される透明電極用のインジウム使用量を 50%低減する開発最終目標を上回る約 75%を低減する代替材料として、酸化亜鉛を用いた革新的材料、成膜技術等を開発し、20 インチパネルの少量試作に成功した。本技術を用いることにより酸化亜鉛ならではの色彩再現性に優れた液晶ディスプレイ パネルを作製することが可能となった。また、ITO フリー透明電極用材料として、スパッタダメージが少ない改良スパッタ法を用いた大粒径のニオブ添加二酸化チタン（TNO）を開発するとともに、熱硫酸及びフッ素系溶液がアモルファス系 TNO の良好なエッチング液であることを確認した。また、G12A7 エレクトライドの応用開拓も推進され、インジウム代替の透明電極のほか、消費電力が大きく低減可能な蛍光灯電極への適用検討などが進んでいる。

#### ・超硬工具向けタングステン使用量低減技術・代替材料の開発

超硬工具（切削工具）の刃先部のみを超合金にした複合構造化手法を用いてタングステンの使用量を削減する技術を開発し、超合金とセラミックスからなる「ハイブリッド切削工具」の試作に成功した（タングステン削減量 20%以上に相当）。本技術を用いることにより、従来の工具と同じ複雑形状の切削工具をタングステン量を減らして作ることが可能となった。

#### ・高保磁力磁石のジスプロシウム使用量低減技術の開発

従来の粉碎工程における保磁力低下の要因を理論および実験で明らかにし、表面酸化を抑制しつつ微細化するための新たな製造方法を確立した。この製造方法を用いることによりラボレベルでジスプロシウムを約 40%削減しつつ保磁力を維持することに成功した。（30%低減する開発最終目標を上回る約 40%低減する技術を 1 年前倒しで確立。）その一方で、3 次元アトムプローブによる原子レベルの解析法を駆使した保磁力発現機構（ネオジム磁石の保磁力は結晶粒間の磁気的な結合を切ることにより強化可能）に基づき、Nd と合金化することによって融点を大きく低下させる元素と Nd の合金粉末を HDDR 磁粉と混合熱処理した粒界修飾型の

ジスプロシウムフリー磁石において高保磁力 (1.6MA/m) を達成した。

・研磨剤用セリウム使用量低減技術開発

ガラス研磨時に研磨砥粒 (酸化セリウム等) を効率的に研磨面に保持する多孔質エポキシ樹脂研磨パッドを開発し、2倍以上のガラス研磨能率が達成されることをラボレベルで確認し、本研磨パッドのサンプル品の性能評価に着手。本成果により、酸化セリウム使用量の半減が見込まれる。

・自動車排ガス触媒用白金族使用量低減技術・代替材料の開発

自動車の排ガス触媒に使用される白金族削減に触媒反応解析技術などをベースとした基盤研究から、コーティングなどの触媒部材化技術や排ガス浄化システム設計などを組み合わせ、プロトタイプ触媒製造に必要な技術を開発し、白金族使用量を50%以上低減することを目標とし、複数のテーマで、10%の使用量低減技術 (研究室レベル) を確立した。一方で、耐熱性オキソ酸塩 (AlPO<sub>4</sub>) に白金族元素を担持・固定化することにより、高耐熱性の金属触媒が得られ、従来型のAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>担持触媒の10分の1以下の担持量で同等の触媒活性を発揮することを確認した。

・蛍光灯向けテルビウム・ユウロピウム使用量低減技術の開発

蛍光灯の蛍光体に使用されるテルビウム・ユウロピウムを蛍光体の組成改良、ガラス部材、製造プロセス等の研究テーマを組み合わせることによって、80%以上低減することを目標とし、複数のテーマで10-20%の使用量低減技術 (研究室レベル) を確立した。

上述のように、昨今の希少金属をとりまく世界情勢の急激な変化以前から、希少金属の使用量低減技術・代替材料開発を着実に実施しており、我が国の産業競争力の向上のための実用化へ向けた研究開発の足がかりを創ってきた。その成果は、希少資源・不足資源の枯渇の影響のない持続可能な社会の確立に貢献している。

今後は、希少金属におけるカントリーリスクをいち早く低減させるため、更なる代替技術・使用量低減技術の研究開発を着実に進めるとともに、知的財産の保護、特許取得などの戦略も含め、実用化へのより迅速な対応が必要である。

(成果目標)

高効率燃料電池、超電導技術を利用した機器、廃熱利用のための熱電発電技術等のエネルギーの利用を具現化する材料技術を2015年頃までに開発する。これにより、クリーンなエネルギー利用の実現を図り、我が国のエネルギー自給に向けて貢献する。【文部科学省、経済産業省】

**成果と課題：**

『戦略的創造研究推進事業 (SORST) 「透明酸化物のナノ構造を活用した機能開拓と応用展開」、(TRiP) 「新規材料による高温超伝導基盤技術』 (文部

科学省)において、「2008年のブレークスルーの一つ」(米国サイエンス誌)、「2008年に最も引用された論文」(トムソン・ロイター社)と評された、従来想定されていなかった鉄系超伝導物質(転移温度26K)の発見がなされる等、基礎研究の成果が論文・特許の形においても結実した。今後も、新奇な現象の発見とその成果の有効活用に向けた研究を継続して進める必要がある。また、『高温超電導ケーブル実証プロジェクト』(経済産業省)においては、要素技術開発フェーズと実システムでの実証フェーズで、産官連携の研究実施体制を柔軟に変更しながら、ビスマス系高温超電導線材を用いた3相一括型の低損失でコンパクトな高温超電導ケーブルについて中間接続部を含む30mケーブルや冷却システムの検証試験などを実施し、実システム(200mケーブル)への接続実証試験実施に向けての事前検証を終えた。今後の課題としては、超電導ケーブルの実用化に向けたコスト削減や、送電ロスのさらなる低減に向けた冷却システムの効率・能力の向上があげられる。

(成果目標) >

我が国の産業全般への影響力が最も大きい自動車をはじめとする輸送用機器開発において、構造部材の高機能化・軽量化や、周辺機器に高付加価値を与える革新的な材料・プロセス技術を2015年頃までに開発することにより、世界一の国際競争力の持続を支えることに貢献する。【文部科学省、経済産業省】

粒界、構造、界面、接合などの制御により、材料物性を飛躍的に向上させる革新的材料およびその創成・加工技術の開発、および、ミクロ～マクロスケール領域での最適構造化が可能な加工技術を2015年頃までに開発することにより、他国が追従できない先端ものづくり技術を進化させ、世界で勝ち抜く産業競争力を形成してゆく。【文部科学省、経済産業省】

### 成果と課題：

『低炭素社会を実現する超軽量・高強度革新的融合材料プロジェクト』(経済産業省)、『カーボンナノチューブキャパシタ開発プロジェクト』(経済産業省)において、日本発のカーボンナノチューブ(CNT)を用いた新規材料の開発・実用化や、それに向けた量産化技術に産学官連携体制で取り組み、軽さと丈夫さを兼ね備え、広い温度範囲(-140℃~600℃)でシリコンゴムのような粘弾性をもつCNTの開発や、CNT金属複合材の開発、CNTキャパシタの試作等を行うとともに、世界最高の単層カーボンナノチューブ合成・分離・成形加工技術に取り組み、課題を抽出した。また、実用化のための共通基盤技術の開発と並行して、ナノ材料の実用化に不可欠な安全評価技術開発も実施し、さらには、世界的なナノテク研究拠点であるTIA-nanoとの有機的連携も行い、世界有数のCNT研究開発拠点の構築を進めている。多層CNTでは欧米、国内企業を含め、100トン規模の生産が始まっており、また、韓国、中国でもCNT特許出願が急増しており、国際的な競争が激化している。今後の課題は、共通基盤研究と実用化研究の相互の成果をフィードバックす

ることで、技術のブラッシュアップを進め、その後、出口企業との連携強化を行いつつ、実用化を促進し、多くの成果をいち早く創出すること、及び、実証試験までつなげることである。

『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（組織制御構造体の開発）』（文部科学省）においては、自動車に適用可能な軽量で高強度高延性の複層鋼板を製造技術の基盤シーズを確立した。今後は、ナノ界面を制御することで期待される以上の延性が得られた成果などの有効活用を目指し、その機構の解明を行うことが課題である。

（成果目標）

太陽電池材料や発電における高効率化を図るための構造部材や、発電もしくは動力源となるモーター関連材料など、材料の革新や飛躍的な高性能化を2015年頃までに進めることにより、高効率なエネルギー利用の実現を図り、資源の消費を最小限に抑えることに貢献する。【文部科学省、経済産業省】

#### **成果と課題：**

『環境エネルギー材料の高度化のための研究開発』（文部科学省）では、国内外の企業と共同で、ジェットエンジンの燃費改善や火力発電用タービンの高効率化に資する世界最高耐用温度（1120℃）を達成する超耐熱材料の開発に成功した。今後は、実用化条件下での耐久性確認と量産品質の安定性確保が課題である。有機有害物を高効率で分解できる新規光触媒として、太陽光のみならず、室内照明等の大部分（88.5%）を吸収・利用できる新規材料（ $\text{Ag}_2\text{GeO}_3$ 系）を見出した。今後は、微粒子作成技術等を活用しながら、更なる高効率化、高機能化研究を行いつつ、長期安定性・安全性の確保に向けた基礎研究を行う。

（成果目標）

将来の電子産業を担う、高性能なディスプレイ、半導体、メモリ、ストレージ、センサーネットワーク機器に対して、物質科学やナノサイエンスの最近の進歩を取り入れた、新規の革新的材料・部材およびプロセス技術を2011年までに開発し、情報通信分野でのわが国の先進性を確固たるものにする。【文部科学省、経済産業省】

#### **成果と課題：**

『ナノ物質・材料の創製・計測のための量子ビーム基盤技術の開発』（文部科学省）では、ナノレベルパターンニング技術としてのステンシルマスクイオン注入法の開発、応力場やフォトン照射との組み合わせによるナノ構造作製制御等に成功するとともに、単分子膜リソグラフィーに適した熱原子線技術を開発した。今後は、耐照射性・大面積ステンシルマスクの製造技術向上及びイオンビーム縮小投影技術への展開を図ることが必要である。また、単分子リソグラフィーはナノヘスケールダウンする技術の構築が課題である。

『ナノスケール新物質創製・組織制御』（文部科学省）においては、新しいナノ素材であるチタンやニオブをベースとする酸化ナノシートを液相プロセスにより累積するという全く新しいアプローチによって、厚さ 10 ナノメートル前後で高比誘電率（200）・極低リーク電流特性（ $10^{-7}$  以下）を有する酸化ナノ極薄膜を形成する技術を開発した。本シーズ技術をさらに発展させ実用化に近づけるため、求められる各特性（安定性、温度特性など）を安定して得られるデバイス化技術を確立することが課題である。また、平成 22 年度より事業が開始された『低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト』（経済産業省）では、オールジャパン体制で研究開発を進める「SiC アライアンス」を設置し、高品質・低コストな大口径 SiC（シリコンカーバイド；炭化ケイ素）ウエハ製造技術及び SiC 高耐圧スイッチングデバイス製造技術開発を実施すべく、課題抽出・条件出し等を行った。

今後は抽出された課題を解決するとともに、次世代自動車等へ搭載する SiC パワーデバイスの実用化、量産化に資する技術開発を行うことが必要である。

（成果目標）

2015 年頃までに、有毒物質の使用量を劇的に低減できる材料の開発、および健康への影響が指摘されている微量物質のセンシング技術と対策の確立により、化学物質が人体と環境へ与えるリスクを最小化する。【文部科学省、経済産業省、環境省】

### 成果と課題：

『気体分子センシングのためのナノ分子材料』（文部科学省）では、気相中に漂う化学物質のうち、多硝ロ化化合物、有機溶剤に対して敏感に色および蛍光応答を示す化合物の合成に成功し、粒子状の発光性物質がタンパク質のセンシングに有効であることを確認した。

『ナノテクノロジーを活用した環境技術開発推進事業』（環境省）では、大型で高価なモニタリング機器を補完し、設置場所、通信線、電源等のインフラを意識せずに設置することにより、きめ細かなモニタリングが可能となるセンサの開発とそのデータを低価格で無線伝送できるネットワークシステムを開発した。また、従来の海水淡水化用 逆浸透 (RO) 膜の改良にも取り組み、人体に有害な物質とされるホウ素の除去率向上を達成した。

今後は、低濃度化学物質検出に対する高感度化に関する新たなコンセプトの更なる創出とともに、有機化学物質でなく生体由来の飛散物質に対するセンサ材料の整備、ネットワークの整備を行うことも必要である。

（成果目標）

大震災に耐えうる建築物のための高強度鋼等の革新的構造材料や、突発的なテロ、災害や事故から身体等の安全を確保するための材料を 2015 年頃までに開発し、あわせて、それらの検査・評価・利用技術の飛躍的な向上を目指すことにより、国民の社会生活における安心・安全に貢献する。【総務省（消防庁）、文部科学省、経済産業省、国土交通省】

### 成果と課題：

『ナノテク消防防護服の要素開発及び評価手法の開発に関する研究』（総務省）では、突発的なテロ、災害、火災や事故が発生した時に、その現場で活動する消防隊員の安全を確保するための消防防護服を、ナノテクノロジーを用いて高性能化するために、「ナノテクを用いた先進消防服の開発」グループ(NEDO)との委託関係の構築を行い、民間企業（繊維メーカー、粉体製造メーカー）と連携し、共同研究を実施することで、高性能な防護服を開発することに成功した。今後は、この防護服の早期の実用化を目指すとともに、隊員の安全確保の観点から、ヘルメット、手袋、靴などの装備品の高性能化に資する研究開発も必要である。

『鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発』（経済産業省）では、建築、造船、社会インフラ等々の鋼構造物に対し、これまで適用が困難であった高強度鋼材（980MPa 級）を高品質に溶接する技術開発に関して、開発目標とする低酸素、高強度、高靱性及び低温割れ防止（予後熱処理無しで溶接部の割れ無し）を達成した。また、高効率の超々臨界火力発電用に高耐熱性を有す材料（700℃級耐熱鋼）とその継手の開発に関して、新開発材料の長時間クリープ強度が 3 万時間を達成するとともに、長時間クリープ強度予測の組織診断技術基盤を構築した。さらに、輸送機器の燃費性能を向上させるため、その部品である鍛造品を高強度・傾斜機能付与により軽量化する制御鍛造技術に関しては、降伏強度 1000MPa 以上、強度差 500MPa を造り分ける鍛造技術を小型試験片にて達成した。軸受鋼の転動疲労メカニズム解明（き裂発生・伝播）と寿命予測に関しては、き裂発生・進展評価観察方法の確立、及びき裂発生に関するシミュレーション技術を構築した。今後は大型模擬溶接構造体による検証、10 万時間クリープ予測強度の評価・検証、及び強度予測法の高精度化、強度差を造り分ける鍛造技術のプロトタイプ部品による実用化検証、き裂発生・伝播のメカニズムの解明と破壊モデルを一般化、転動疲労の寿命予測式を構築することが課題である。

『高信頼性・高安全材料の研究開発』（文部科学省）では、鉄鋼等の構造材料の実用環境中におけるクリープ・疲労・応力腐食等の試験データ蓄積により、寿命評価法の基礎を確立した。また、超音波等による非接触内部摩擦計測により、高温下での耐熱鋼のクリープ損傷評価を、非破壊で可能であることを示した。今後は、構造材料のクリープ・疲労・応力腐食等の時間依存型損傷を評価し寿命を評価するために、損傷機構を解明し、実部材の余寿命評価へ適用可能な技術の構築と信頼性の向上が課題である。

府省連携プロジェクト：『高強度鋼等の革新的構造材料を用いた新構造建築物の性能評価手法の開発』（国土交通省）、『革新的構造材料を用いた新構造システム建築物研究開発』（経済産業省）では、素材の開発から実大規模実証試験の実施、新構造システムの提案までが総合的に進められた。前者においては、大地震に対しても高度に機能を維持できる建築物の性能評価法

(大地震に対する評価用地震動の設定方法や大地震に対しする実用的な地震応答予測法等を導入した耐震性能評価指針)を策定し、後者では、開発した高強度鋼材により震度 7 クラスの地震に対して構造物が損傷することなく、速やかに機能復旧できる構造システム等を実大実証試験による性能確認をとおして開発することができた。今後は、成果の普及促進を図るために、ライフサイクルコストを含むコスト評価が重要であり、また、税制等の別の視点からの検討も必要である。現在、鋼材の基準強度の設定等については、建築基準法上の検討が行われている段階であり、当該検討が終了し課題が解決されれば、本格的な普及活動が展開される見込みである。

### <領域全体の成果と課題>

ナノテクノロジーを活用して材料をつくりあげる技術は、本来より日本の強い領域である。基礎から応用までの幅広い材料研究においてほぼ目標が達成されており、特に、強い社会ニーズの下、物質・材料の設計に関する先端科学技術を府省連携で行った新たな試み『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(元素戦略プロジェクト)』(文部科学省)と『希少金属代替材料開発プロジェクト』(経済産業省)の連携、『高強度鋼等の革新的構造材料を用いた新構造建築物の性能評価手法の開発』(国土交通省)と『革新的構造材料を用いた新構造システム建築物研究開発』(経済産業省)の連携等は、国の政策的、戦略的取組に貢献する施策として高く評価できる。

21世紀のサステナブル社会においては、エネルギーの高効率利用のための材料技術や、レアアース等を豊富で無害な元素で代替する高特性の材料開発技術が鍵となる。このような材料開発にはナノテクノロジーの更なる活用が不可欠であり、我が国の産業競争力を維持するには、希少金属代替材料開発を含め、我が国の強みである材料・素材分野での継続的開発を産学官連携の強化などにより推進する必要がある。

また、大震災や突発的なテロ、事故から人命や重要施設などの安全を確保するために、建築構造物、自動車、航空機等で利用される高強度材料や、電力供給プラント等の高温・高圧条件下で使用される高耐熱材料、およびそれらに関連した評価技術等の開発は、府省連携で日本全体として継続して推進することが重要である。

府省連携、産学官連携などを行う際には、個々のテーマが孤立しないように、省庁を横断したプロジェクト間の情報交換を充分に行う必要がある。特に、基礎研究の産業応用に関しては、基礎研究の成果の受け渡し迅速に行えるような連携強化に取り組むことが必要である。

### <今後(H23～)の取組>

平成23年度から、『元素戦略プロジェクト』(文部科学省)、『希少金属代替材料プロジェクト』(経済産業省)、『環境・エネルギー・資源材料領域』(文部科学省)、『低炭素社会を実現する超軽量・高強度革新的融合材料プロジェクト』

ト』（経済産業省）、『低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト』（経済産業省）、『環境研究総合推進費』（環境省）、『鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発』（経済産業省）等において、産業の国際競争力強化、グリーンイノベーションの材料にかかわるボトルネック解決、資源の安定確保に向けた取組を行う予定である。

グリーンイノベーション関係では、環境先進都市の構築に向け、自動車等の輸送用機器及び情報通信機器等の素材・部材に対し、高機能化・軽量化や、周辺機器に高付加価値を与える革新的な先端材料やプロセス技術を開発する。太陽電池材料、燃料電池用の貴金属触媒等の産業競争力をもつ先端材料開発を推進する予定である。

#### ④ナノテクノロジー・材料分野推進基盤領域

ナノ物質のリスクの評価・管理手法の確立や、ナノテクノロジーのアウトリーチ活動の促進、新しい計測原理に基づく技術シーズの創出やナノ集積化技術の確立、さらには、産業展開への研究開発をシームレスに実行するための社会基盤整備等を行った。

#### <主要な施策の成果と課題>

(成果目標)

2011年までに、ナノ粒子の特性やリスクの評価手法、管理手法を確立する。これに加え、リスク管理に必要な制度的課題、標準化やリスクガバナンスのような産業的課題、および倫理や教育のような社会的課題を解決することにより、新しい科学技術であるナノテクノロジーの社会受容を促進する。【文部科学省、厚生労働省、農林水産省、経済産業省、環境省】

#### 成果と課題：

科学技術連携施策群として、『ナノ粒子の特性評価手法開発』（経済産業省）、『ナノマテリアルのヒト健康影響の評価手法に関する総合研究』（厚生労働省）、『ナノマテリアルの社会受容のための基盤技術の開発（NIMS）』（文部科学省）の施策では、ナノ材料の有害性試験の実施や、計測技術の開発など、ナノリスク評価に関する研究成果を国内外に発信した。特に、『ナノ粒子の特性評価手法開発』では、カーボンナノチューブ、フラーレン、及び二酸化チタンのナノマテリアルについて、分散調製技術／各種計測技術（キャラクタリゼーション技術）の開発、in vivo 試験、in vitro 試験を組み合わせた総合的な有害性評価を実施し、作業環境での許容曝露濃度の目安値の提案等を盛り込んだ工業ナノ材料に関する詳細リスク評価の中間報告書を作成・公表するとともに、OECD 工業ナノ材料作業部会(WPMN)スポンサーシッププログラムに提供した。『中核研究プロジェクト「環境中におけるナノ粒子等の体内動態と健康影響評価」』（環境省）での環境中ナノ粒子の吸入毒性についての研究結果は、環境基準の告示にも反映されている。

今後の課題は、多様なナノ材料製品全体のリスク評価及びリスク管理する

ための技術の確立、国際標準化へ向けた取り組みである。

(成果目標)

2011年までに、研究開発基盤を提供するユーザーファシリティーファウンダリー機能の整備や、研究拠点の形成、オープンアクセス型の拠点施設や、データベースの構築、産業化支援策の拡充を図ることにより、国全体としての研究開発の効率を高め、研究レベルの高度化と裾野の拡大を目指す。【文部科学省、経済産業省】

### **成果と課題：**

『ナノテクノロジー・ネットワーク』では、多様なナノテクノロジー関連機器を備えた全国の13拠点(26機関)の研究施設を共用化、3955件を支援し、若手人材の育成や異分野融合、実用化を積極的に促進して産学連携へ貢献した。同時にナノテクポータルサイトを立ち上げ、日本の産学官ナノテク情報の収集・発信を促進している。また、産学官連携によるナノテク研究拠点と人材育成を目指した“つくばイノベーションアリーナ(TIA nano)構想”(産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、筑波大学、企業などで構成)が2009年6月に打ち出され、取組が開始された(2011年2月に中期計画発表)。

『異分野異業種融合ナノテクチャレンジ』では、研究開発ステージに応じ研究者側の負担率を二段階(委託→補助)として適切な受益者負担とし、かつ、二段階目に入る研究事業を絞り込みすることにより資源を集中投資するスキームの中で、78テーマを実施した。ナノテクノロジーを活用した材料・部材のデバイス化研究開発を、川上と川下の垂直連携体制を敷いて実施し、ナノインプリントやRRAMのような革新的な技術やものづくり技術の基盤となるプロトタイプ装置を開発することで、新産業分野の創出に貢献した。また、先進消防服技術や、微細な構造体を大面積で高速に形成でき、燃料電池や細胞培養シート等に応用可能なナノインプリント技術、電力機器に使用される地球温暖化ガス(六フッ化硫黄)を代替するナノコンポジット絶縁材料の製造・量産技術や、低い転がり抵抗と高い耐摩耗性を同時に備える超低燃費タイヤ用ゴム材料などを開発した。

4期にも引き続き共通基盤プラットフォームは整備されていく予定であり、今後も、ネットワークの使用による研究推進への寄与の評価の仕組みを構築しつつ、国際的競争を視野にいれた設備・装置の拡充など利用環境の整備が必要である。

(成果目標)

物性・機能発現指向のシミュレーション・デザイン技術として、第一原理と分子動力学計算などを複合してマクロな系までをカバーする日本発の標準理論として2011年までに、開発を行う。これにより、創薬、デバイス設計や素材の加工等への応用を通して、日本のものづくり技術の強化に貢献する。【文部科学省】

2011年までに、ナノ計測技術ではナノサイエンスに基礎を置いた新しい計測原理に基づく

技術シーズの創出を、ナノ加工技術ではフォトリソグラフィ技術の高度化の補完とともに新たな独自の発展が可能なナノ集積化技術の確立を、特にナノエレクトロニクスやナノバイオテクノロジーにつながる技術を重点的に行う。あわせて、先端計測・加工技術による国際標準取得・提案に向けた積極的な取組やデータベースの構築を行う。これらにより、ナノテクノロジー・材料分野の基盤技術としての底上げがなされ、マテリアル革命の源泉となり、日本のものづくり技術や産業競争力の強化に貢献する。【文部科学省】【経済産業省】

### 成果と課題：

『ナノテクノロジー共通基盤技術の開発』では、電子伝導、電子移動、誘電応答、磁気応答、超伝導等に関する第一原理解析手法を開発し、ナノ構造、表界面、分子系等のナノ物質の示す物性・機能の高精度な解析を実施するとともに、2万原子以上の大規模系に対する高精度な第一原理計算方法(オーダーN法)を実現し、ナノ構造やバイオ系への適用が可能であることを実証した。また、化学組成や結晶構造を迅速(30msec~3sec)かつ広範囲(1cm<sup>2</sup>程度)に画像化が可能な新しいX線顕微鏡の開発、世界で唯一蛍光X線による元素分布の動画撮像可能な環境を放射光ビームライン(KEK PFAR)に整備した。これにより迅速性・高効率性を活かしたコンビナトリアル材料スクリーニング等を実現した。

『ナノ計測・加工技術の実用化開発(次世代電子顕微鏡の要素技術開発)』では、電子顕微鏡システムの制振解析を行い、振動をアクティブに制御するシステムを開発するとともに、日本独自の収差補正系を搭載した収束イオンビーム装置の開発に向けて、収差補正系の簡易構造化技術、高精度アライメント技術、及び電界電離型希ガスイオン源エミッタ作製技術を確立した。

『先端光科学研究』においては、強力なX線レーザービームを発生させる方法の一つである高次高調波発生方法を独自に改良し、従来に比べて100倍以上の強度を実現した。また、極端紫外レーザー光によって引き起こされる非線形光学現象を用いて、アト秒という非常に短い時間構造を作り出すことに成功するなど、先端計測及び解析技術の発展に寄与した。

### (成果目標)

放射光施設や高強度中性子源などの大型施設の利用の仕組みを2011年までに、整備し、材料・部材・デバイス開発の高度化を通して、日本のものづくり技術の強化および産業の競争力の強化に貢献する。【文部科学省】

日本の強みである電子顕微鏡技術、放射光施設、高強度中性子線源、イオンビームなどの量子ビーム技術を生かして、新しい技術および観察領域対応の電子顕微鏡技術やX線自由電子レーザー(XFEL)などの新しい分析・計測技術を2011年までに開発することにより、材料やデバイスの内部ナノ構造や反応のメカニズムなどの精密な分析・計測が可能となり、新しい知見を得るとともに、マテリアル革命に貢献する。【文部科学省】【経済産業省】

## 成果と課題：

『ナノ計測・加工技術の実用化開発（次世代電子顕微鏡の要素技術開発）』では、制振解析により振動をアクティブに制御する電子顕微鏡システムの最適構造設計を行った。

国家基幹技術であり、新しい光源として期待される『X線自由電子レーザー（XFEL）施設の整備・共用』では、世界で最も短い発振波長(0.06nm)のレーザー発振を可能にするための本体整備、技術開発が完了し、平成24年3月に広く研究者等の利用に供することを目指している。

『光・量子科学研究拠点の形成に向けた基盤技術開発』では、次世代の原子時計の有力候補として注目される光格子時計の研究開発や、小型高輝度X線源の開発、X線偏光制御やイオンビームによるナノ加工技術などで世界トップレベルの成果を創出した(開始2年間における学会等発表数は1093回、論文等掲載数473本、特許出願数10件、博士号取得者数52名)。

『大強度陽子加速器施設（J-PARC）の整備・共用』においては、平成21年4月から全施設が稼働し、パルス中性子・ミュオン・ニュートリノ等、多彩な二次粒子ビームを世界最高水準の強度で発生することに成功しており、核融合実験炉用超伝導コイル導体の内部歪評価や、有機物結晶体の構造解析等に成功し、ナノテクノロジー・材料分野をはじめとして産業応用にも有用な研究成果が創出され始めている(利用者数：55,283人(平成20年12月～平成22年12月)、論文発表数：520件(平成18年4月～平成22年3月発行分))。

『大型放射光施設（SPring-8）の共用』では、施設の着実な共用により、安全で高性能な個体型充電機の実現を加速する固体電解質の開発、さらにはプラスチック（ポリプロピレン）の結晶化のメカニズムを解明し、鉄鋼に匹敵する強度の実現の成功に資するなど、ナノテクノロジー・材料分野をはじめとして革新的な研究成果を多数創出した(利用者数：58,109人(平成18年4月～平成22年9月)、論文発表数：3,425件(平成18年4月～平成22年9月))。

XFEL施設、SPring-8、J-PARCともに、第4期以降も整備・共用を推進すべきである。今後は特に、XFEL施設に関して、XFEL施設の利用でしか行えないような研究課題を選択して早期に有効性をアピールしていくことが必要である。また、SPring-8やJ-PARCなどの共用施設は、すでに産業界での利用も進んでいることから(例えばリチウム電池開発等に大きく寄与している)、今後引き続き、国際水準で検討・計画した設備・装置の拡充を推進するとともに、利用支援の充実を図るべきである。これらの大型施設においては、当該施設での研究成果を最大化する研究課題の選定と産業利用の拡大が課題である。

## <領域全体の成果と課題>

計測・分析・理論的予測など、共通的に必要となる技術の水準を世界トップレベルに高めていく必要がある。

XFEL施設のような大型先端研究基盤施設については、日本全体としてかなり充

実しつつある。しかし、XFEL 施設のような巨額予算を必要とするものについても、日米欧に一台ずつ整備が進むとともに、韓国においても、日本類似の XFEL 施設建設（450 億円）を検討している。利用者の確保方策や、運営方法について国際的な視点で検討することが特に重要である。

また、産学官の連携体制、異分野融合と同時に人材育成を進め、産業技術上の課題解決を図り、実用化を促進していくことが必要である。その際、共通施設の使用による研究推進への寄与の評価の仕組みや、国際的競争を視野にいたした設備・装置の拡充、及び施設の特徴を十分に利用した無駄のない運営、さらには国際的にオープンにしていくなど利用環境の整備を通じて最高性能の共通基盤技術の構築・ネットワーク化を着実に推進する必要がある。

ナノテクノロジーネットワークは、研究分野の融合を推進し、イノベーションにつながる研究成果の創出加速に不可欠なインフラであり、効率的な課題解決手段を提供し、より戦略的な人材育成を行うために、機能や運営基盤をより強めていく必要がある。

#### <今後（H23～）の取組>

平成 23 年からも引き続き共通基盤プラットフォームやインフラは『X 線自由電子レーザー（XFEL）施設の整備・共用』『大強度陽子加速器施設（J-PARC）の整備・共用』『大型放射光施設（SPring-8）の共用』『ナノテクノロジーネットワーク』『光・量子科学研究拠点の形成に向けた基盤技術開発』『先端的共通技術領域』等によりさらなる整備・共用が予定されている。

### ⑤ナノサイエンス・物質科学領域

大きなインパクトをもつ課題、研究開発で横断的に重要とされる課題等に対して、多様なアプローチで取り組み、新しい原理・現象の発見・解明を図ることを目的とした研究を行った。

#### <主な施策の成果と課題>

（成果目標）

現在は基礎研究段階にあるが、実現すれば出口としての社会へのインパクトが大きい「量子計算技術」や、あるいは、ナノテクノロジー・材料分野の研究開発現場において横断的に非常に重要視されている「界面の機能解明」等に対して、多様なアプローチを用いた戦略的な取組を行い、新しい原理・現象の発見・解明とともに非連続な革新を図り、将来の情報通信、医療やものづくり国家としての国際競争力等の様々な分野に貢献することを目指す。【文部科学省】

#### 成果と課題：

『戦略的創造研究推進事業（CREST）研究領域「ナノ界面技術の基盤構築」』（文部科学省）では、化学ドーピングではなく、有機電解質と無機絶縁体とを接

合した電圧印加による新しい超伝導誘起法や、Ge 半導体と鉛膜接合による巨大 Rashba（ラシュバ）効果（表面や界面において伝導する電子のスピンの磁場をかけなくても特定の方向に揃う効果）の発現、有機電子デバイスの特性では、結晶粒界を極力減らすことにより世界最高の移動度が得られたなど、界面を利用した将来のエレクトロニクスやスピントロニクスの発展に資する成果や、精密に設計された内面や空隙を利用し様々な機能を付加可能な金属錯体の自己組織化による新しい3次元構造体の創出がなされた。

『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（元素戦略プロジェクト）』（文部科学省）、『ナノスケール新物質創製・組織制御』（文部科学省）においては、透明酸化物導電体 C12A7 の蛍光灯やトランジスタ材料としての応用とともに、主鎖に金属イオンを含む可溶性の有機高分子塗布法により薄膜化し、電位によって色調が瞬時に変化する表示素子の開発に成功した。開発された表示素子は省エネ化が可能なことから、次世代電子ペーパーの有力な候補の一つになっている。

『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（ナノバイオ・インテグレーション研究拠点の形成）』（文部科学省）では、医工連携の集中型拠点体制により、分子アッセムブリと NEMS 技術の統合による「光駆動分子ペンチ」、世界最小の「分子ボールベアリング」などの種々のナノマシンの基盤技術の創製などの成果を挙げた。

今後も、応用に向けて大きなブレークスルーが必要な目的基礎研究や、知の蓄積に貢献するインパクトの極めて高い基礎研究を戦略的に推進することが重要である。

### <領域全体の成果と課題>

領域全体の研究成果は十分であり、拠点構築による施設の共用、リーダーの裁量権発揮をつうじ、世界レベルの成果を上げている。例えば、世界最高の移動度を得た有機電子デバイスの実現や、電圧印加による新しい超伝導誘起法の確立では、相界面のナノレベルでの制御がデバイス性能や材料特性を決める本質的な要素であるという新しい知見を得ている。

これらをはじめとする本領域の研究成果は、エレクトロニクス分野の基本構造に対する考え方に大きなインパクトを与えると同時に、新しい学問領域の創出の可能性も持つ、世界トップのものである。研究者の自由な発想に基づく基礎研究は、今後のイノベーション政策の成否に大きくかかわる部分であるため、研究目標を明確にして他分野との関連性を深めつつ、継続的かつ効率的な研究推進が必要である。

### <今後（H23～）の取組>

ナノテクノロジー・材料技術は、新たな領域を切り開く先導的技術であるとともに、融合と連携を通して様々な技術分野に波及し、支える技術である。この革新的成果をもたらし得る基礎研究を幅広く推進すると共に、そこから生まれたシ

一ズを多様な応用分野に橋渡しするための基盤的な研究開発を推進する予定である。具体的には『ナノスケール材料領域』（文部科学省）、『元素戦略プロジェクト』（文部科学省）、『科学研究費補助金』等によって、引き続きこれらの基礎研究を推進する予定である。

## （２）第４期に向けて：総括的コメント

ナノテクノロジーは、物質や材料にかかわるすべての学術あるいは技術分野にまたがる先端的な横断領域であり、将来のイノベーションを生み出すために不可欠な「エンジン」である。米国では、党派に関係なく国家ナノテク・イニシアティブ（NNI）が支持し続けられており、科学技術先進国を目指す各国においても、ナノテクノロジーをキーテクノロジーとして位置付けている。

日本の第２期、及び第３期科学技術基本計画において、ナノテクノロジー・材料分野は重点推進４分野の一つとされたが、横断的基盤技術として他の推進分野を融合し、イノベーションのスピードを上げるため、異分野融合や府省連携を促進するいくつかの新しい仕組みに挑戦した。「ナノバイオ融合拠点」における医薬理工連携の推進、「元素戦略」と「希少金属代替技術」の文部科学省・経済産業省・内閣府による継続した府省連携体制は、ともに、ベストプラクティスとの評価に値するものである。

第４期科学技術基本計画においては、課題解決に主眼を置いているため、異分野の学術分野あるいは技術分野を融合・連携していく仕組みが特に必要である。この観点から、第２期、第３期にわたりナノテクノロジー・材料分野で展開した府省連携などの効果的な仕組みは、第４期科学技術基本計画においても継続推進される必要がある。

### （i）イノベーション創出と重要課題解決のキーテクノロジー

現在、地球温暖化問題、環境・エネルギー問題、水、食料、元素、化石資源などの資源問題について、全世界的に関心が高まっている。国内においても、政府が「温室効果ガス 25%削減」による地球温暖化課題への取組を世界に宣言し、「新成長戦略」における「グリーンイノベーション」政策では、環境・エネルギー問題、「ライフイノベーション」政策では、医療、健康、QOL 向上等の課題を取り上げている。これらの課題を解決する具体的な手段として、太陽電池等の再生可能エネルギー技術、希少資源の節約・代替技術、省エネルギーのための輸送機器部材の軽量化や高効率発光素子技術、高機能触媒材料技術などにむけた取組が本格化している。

第４期には、これまでの分野推進型から課題解決型へ戦略が転換される。これを受け、これまで蓄積されてきた本分野の技術を高めながら、応用可能なものは他分野の技術と連携・融合させ、現在直面している問題解決に活かしていくことが重要である。これらを実現するためのキーテクノロジーとして横断的基盤技術であるナノテクノロジー・材料技術への期待が大きくなっている。

日本は、これまで米国、韓国、ドイツと並び、ナノテクノロジー・材料技術では

卓越した実績を挙げた国と位置付けられており（Lux Research 社による調査結果）、世界から高く評価されている[1]。また、第3期科学技術基本計画における重点4分野の中で、ナノテクノロジー・材料分野は、政府予算額に対する上位1%論文数と特許出願数がトップであり、費用対効果の優れた分野であった[1]。しかし、（独）科学技術振興機構研究開発戦略センターの調査によれば、2001年以降、国際特許のシェアが下落傾向にあり、2007年は首位を維持しているものの、そのシェアは40%を下回っている。また、上位1%の論文シェアも中国が急速に伸びているのに対して、日本は低下傾向にあり、懸念される材料が増えつつある。

第3期においては、『スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト』によるスピントロニクス技術の急進展、『元素戦略プロジェクト』及び『希少金属代替材料開発プロジェクト』による希少金属代替/削減技術の着実な進捗、『高強度鋼等の革新的構造材料を用いた新構造建築物の性能評価手法の開発』と『革新的構造材料を用いた新構造システム建築物研究開発』による安全・安心に資する材料技術の向上、TIA-nano やナノテクノロジー・ネットワークによる拠点・ネットワーク形成など、府省連携により優れた成果が得られている。今後とも、府省を横断し、連携を強めながら、さらに優れた成果を生み出すために、横断的基盤技術であるナノテクノロジーを継続して推進することが必要である。

#### (ii) 産業競争力強化

日本の産業競争力強化にも、拠点やネットワークの利用が非常に有効である。米国のAlbany、欧州のIMEC（大学間マイクロエレクトロニクスセンター）のような世界的な拠点と比較して、日本の拠点は人材や規模が一桁近く低い状況にある。2009年6月に世界的なナノテク拠点形成を目指し、産学官で共同宣言した「つくばイノベーションアリーナ構想」により、日本初のオープンイノベーション拠点 TIA-nano の整備が進行中である（2011年2月に中期計画を発表）。TIA-nano は、“先端ものづくり国家としてのわが国の繁栄と世界的な課題解決に貢献する”ことを掲げており、研究独法（産業技術総合研究所、物質・材料研究機構）、大学（筑波大学等）、経団連（企業等）などから形成される。このような拠点に、企業や外部研究者を集め、得られた成果を、参画者に還元することで、さらに拠点に新たな企業や外部研究者が集まるような循環体制を作ることが重要である。そのためには、世界のナノテクノロジー拠点との協力・連携と同時に、差別化を図り、国内外の卓越した企業や研究者を惹きつけられるような環境の整備、すなわち、技術研究組合制度を活用した共同研究組織体の確立など、特徴のある運営体制の構築やプログラムの提供、異分野・産学独・内外の研究者が物理的空間を共有して融合・連携を加速する場の設置、異なるプロジェクト予算の一括管理体制等の構築などを行い、拠点全体として戦略的な運営を行うことが不可欠である。

産業の国際競争力を確保するためには、技術の迅速な国際標準化が重要であり、知的財産戦略本部においても、政府全体の成長戦略と連動した「知的財産推進計画2010」が策定されている。基礎研究、応用研究をとおして得られた新しいナノテクノロジー・材料技術や、それを利用して作られた新材料・新デバイスが、最

後の出口で国際基準とマッチせず、日本で使いにくい、または、海外で使われにくいという問題が、医療機器分野、情報通信分野などで、一部顕在化している。また、特に医薬・医療機器関連分野においては、研究成果を日本で展開・事業化しにくいという問題がある。国内企業の研究開発力維持・向上に向けて、日本の技術が世界標準を獲ることができるように、規制改革・制度改革まで含めた総合的な取組をする必要がある。

ナノテクノロジー・材料技術の研究課題の策定に関しては、内閣府が先導するアクション・プランや府省連携機能あるいは技術分野を横断してコーディネートする機能を担保する新たな仕組みの構築・活用などが重要である。そこでは、例えば主として基礎研究を担う文部科学省と応用重視の経済産業省などが関連テーマで協力できるようなインセンティブを与える工夫も検討すべきである。このような仕組みにより、基礎から応用、さらには普及・展開までの流れを加速し、産業競争力を強化することが重要である。

また、多くの研究資金の投入が有効に働くようにするために、提案テーマの評価、成果の評価システムを強化することが必要である。明確かつ厳格なPDCAサイクルの構築やテーマによって異なる評価軸等（短期または長期の時間軸など）を導入し、ブレークスルーのために必要な課題の抽出（目的基礎研究へのブレークダウン）、研究目標、研究計画の建設的な見直し等を徹底して実行する必要がある。

### (iii) 基礎・基盤研究強化

革新的な研究技術開発を行うためには、ロードマップ上に描くことの可能な出口志向の研究による成果だけでなく、想定されていなかったような研究成果や、原理探求型基礎研究の成果も利用することが重要である。特に、新しく創出されたこれまでにない物質や現象についての基礎研究は、弾力的な予算措置体制でサポートし、速やかに進展させるべきである。その一方で、出口志向の研究を同時に行っておくことも重要である。ニーズの視点で、基礎研究から創出される様々な研究成果を俯瞰して眺めておくことで、シーズとニーズのマッチングを迅速に行うことができる。シーズ指向の研究とニーズ指向の研究をバランスよく支援することが肝要である。日本では、基礎研究機関の研究成果を産業界の応用研究へとつなぐ橋渡しが必ずしも効率的にできていないため、独創的な要素技術や、材料・デバイスなどが産み出されても、効率良く次のステージにつなげられず、素早く産業化して新規市場を創出することができないとの指摘がある。基礎研究の成果を産業応用に素早く展開するためには、基礎研究を始める段階で目標の設定や展開シナリオの作成を産学官で行い、その成果がどのような形で急伸するか予測すること、そして、応用研究段階でマネジメント力を強化することが重要である。今後伸びる研究分野の調査や、そのためのインフラ整備が十分であるか等、いくつかの基準を決めてベンチマークをとることや、デルファイ調査等を利用し、必要とされる技術課題や、それをブレークダウンした目的基礎研究課題の設定などを行い、客観的に各要素技術・各目的基礎課題の達成時期と競争力を俯瞰することが重要である。同時に、研究成果の企業に向けた積極的な情報開示を行うことも不可欠である。

物質・材料や生体の構造と機能、界面現象の解明・制御、新しい現象の理解等を主たる対象とする基礎・基盤、フロンティア分野の研究においては、研究テーマの重複に注意する必要があるが、アイデアを持って複数のアプローチでチームを競わせることも視野にいれるべきである。特にアカデミアに期待されるものは、他の追随を許さない世界トップの成果であり、また全く新しい学問領域が生じるような、大きなインパクトを持つ成果である。課題解決に向けた基礎的課題に取り組む目的の基礎研究の成果のみならず研究者の自由な発想に基づく基礎研究も、セレンディピティや将来の基盤技術としての利活用の視点から今後のイノベーション政策の成否に大きく関わる部分であり、これらの基礎研究の継続的かつ効率的な研究推進は不可欠である。

#### (iv) 拠点・ネットワークと人材育成

米国、EU、韓国、台湾では、政府によるナノテクノロジー投資額の1割以上を共用施設ネットワーク・拠点形成に投資している[1]。日本においても、前述のTIA-nano拠点の他、世界トップレベルのナノテクノロジー基盤技術整備に向けて、XFEL施設、SPRING-8、J-PARC等への投資も継続されている。特にXFEL施設は国家基幹技術として位置づけられ、従来の方法では実現不可能な分析を可能にする放射光とレーザーの特徴を併せもつ光源を特徴とした世界最高の施設として稼働し、本施設でなければ実現できないような研究成果を産み出すことに大きな期待が寄せられている。2012年3月からXFEL施設を利用した本格的な研究が開始される予定となっている。一方、韓国政府は450億円を投じて独自にXFEL施設を建設する(Pohang)ことを検討している。

これまで、日本の拠点においては、独創的な成果を創出しているものの、諸外国に比べ、その規模が小さく(投資額で1桁程度低く)、拠点間のネットワークも弱いとの指摘がある[1]。とくに、規模の貧弱さに根ざして、自立運営が難しく、また、米、韓、台のように、国際的にオープンにされていないという弱点がある。今後は、ナノテクノロジー・ネットワークなどの既存研究基盤や、新たな拠点であるTIA-nanoが、世界をリードする研究領域・技術を有し、各領域間および異分野との連携や融合を加速できる国際的なインフラとして強化・成長し、主要企業・大学との連携、ナノテクノロジー・材料研究成果の産業化、次世代人材育成を推進することが期待される。

また、インフラの設備、運営体制、共用の強化と同時に、人材交流についても更に推進すべきである。世界に通用する人材を育成するという意味においては、基礎から応用まで広範にわたる研究を見渡すことのできる共用施設ネットワーク・拠点等を積極的に利用し、優秀な海外研究者との交流などを通して、俯瞰的視野、対応力、判断力、コミュニケーション力といった世界に通ずる力を養成していくことは大変有効である。研究の場を、大学のみならず研究開発拠点にも拡充することが重要であり、そのためには、求心力のある研究リーダーの存在、研究テーマの設定、研究環境・資金の整備が不可欠である。

大型計測器や大型計算機などの拠点、科学技術の基礎基盤となる共用施設やそれ

らのネットワークは、科学技術全体の底上げに資するものであるため、それらを運用する官学のみならず、産業界の利用も加味しながら、長期的な展望に立ち、国際的な競争を視野に入れつつ推進することが必要である。

#### (v) 社会受容

ナノ材料を安心して使えるようにするためには、ナノ材料の持つリスクを明確にすることが重要である。ナノテクノロジーの発展とともに、ナノ物質の環境や人体への影響も指摘されるようになってきており、産業化にむけて、社会の理解の促進は不可欠な要素であることから、社会受容活動の必要性が国際的に増大している。このため、OECD や ISO(国際標準化機構)等において、リスク評価、標準化の取組が行われており、日本も積極的に協力している。2009年10月にはカーボンナノチューブ、フラーレン及び二酸化チタンの作業環境での許容暴露濃度の目安値を世界で初めて公表している。ナノ材料の社会受容の取組は、国際的にも始まってから間もないことから、国内外の情報収集、及び国際的な関連組織との連携は非常に重要となっており、情報共有の効率性、重複排除の観点からも、関係府省での共通認識を持ち、前述のナノテク拠点の効率的な利用も行いながら、継続的に推進していく必要がある。

また、化学品管理のサプライチェーン上でリスク管理に必要な情報を共有化するための国際的な取組に合わせ、日本でも取り組む必要がある。

#### (参考文献)

[1] (独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター、「ナノテクノロジー」グランドデザイン～グローバル課題解決の鍵となる技術領域～, CRDS-FY2009-SP-07

