

3. 平成 21 年度におけるナノテクノロジー・材料分野における進捗状況

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）、1128 億円（平成 22 年度）と年々増額され、5 年間の累計額は、4422 億円となっている。本分野で戦略重点科学技術として位置付けられた施策に対する予算額については、初年度に 134 億円（平成 18 年度）であった予算は、次年度に大幅に増額され、314 億円（平成 19 年度）となり、以降、356 億円（平成 20 年度）、315 億円（平成 21 年度）、229 億円（平成 22 年度）となっている。累計額は 1348 億円であり、選択と集中による予算配分比率は 5 年間合計で約 30%である。

本分野では、重要な研究開発課題として、5 領域 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 期基本計画開始 4 年度目までの大きな成果として、

- これまで想定されていなかった磁性元素を含有する新規超伝導体の発見
- 新概念の透明アモルファス酸化物半導体 (TAOS) の開発
- 第三世代の太陽電池技術として応用が期待されている量子ドット研究の進展
- 白金を使わない燃料電池用無機系及び有機系触媒開発
- 従来の 5 倍以上の記録密度を達成可能とする次世代 HDD ヘッドの基本構造と製造プロセスの確立

等が挙げられる。

平成 21 年度の成果としては、

- 定置用燃料電池（エネファーム）の高性能化・高耐久化による商品化への寄与
- 可視光応答型光触媒における高効率材料の開発
- 再生医療に応用可能な細胞シート作成技術の確立
- 電圧をかけて超伝導化する技術の多様な材料への適用性の実証

等がある。また、国家基幹技術である「X線自由電子レーザー」の開発が、当初の計画通り着実に推進され、本格稼働に向けて最終段階に入った。さらに、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）が打ち出され、取り組みが開始されるとともに、温室効果ガス削減に向け、ナノテクノロジーを活用して革新的な環境・エネルギー技術の実用化を加速することを目的として、「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」が開始された。

以下、(1) に平成 21 年度の各領域の進捗状況を、(2) に中間フォローアップ（平成 21 年 5 月）において進捗が遅れているとされた研究課題に対するその後の取り組みについて取り纏める。

(1) 平成 21 年度の進捗状況

(i) ナノエレクトロニクス領域

本領域では、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いる。

本領域では、6つの重要な研究開発課題として、『従来のシリコン半導体を超越する次世代シリコンベースナノエレクトロニクス技術』、『電子・光制御ナノエレクトロニクス技術』、『ナノスケールに対応したエレクトロニクス製造技術』、『ナノエレクトロニクス部材の低価格化技術』、『環境と経済を両立する省エネルギー・環境調和ナノエレクトロニクス技術』、『セキュリティエレクトロニクス技術』が設定されており、以下に主要な施策の進捗をまとめる。

平成21年度に、本領域と特に強い関わりのある「つくばイノベーションアリーナ(TIA nano)構想」が産学官共同で宣言された。TIA nanoは、共通基盤インフラを利用した世界的な新事業の創出、産学官の組織の壁を越えた結集・融合、国内外の連携力の強化、次世代人材育成などを目的としたナノテク研究拠点である。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)などから形成されており、平成22年度内に本格始動する予定である。

「次世代低消費電力半導体基盤技術開発(MIRAI)」では、半導体の低消費電力化、高性能化に必要な技術として最も有力視されている極端紫外(EUV)光を用いたリソグラフィ技術の実現を目指している。EUVリソグラフィは、EUV光を用いて、非常に微細な回路イメージを半導体ウェハ上に回路パターンとして焼き付ける次世代技術であり、そこでは、微細化に対応した欠陥検出技術が必要とされる。本研究では、EUVマスクの欠陥(位相欠陥)検出試験において、検出確率100%を達成し、またパターン欠陥検出感度の実証等も行った。今後の課題としては、許容される欠陥指標の策定、マスクの保管・保護技術、光学系の長寿命化が挙げられる。現在、位相欠陥検査技術は世界に先行しており、EUVマスクキャリアはSEMI標準(業界自主基準)E-152として認定されている。

「スピントロニクス不揮発性機能技術開発」では、超高集積で高速な不揮発性メモリであるスピンメモリの開発をはじめ、不揮発性スピン光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能デバイスの実現を目指している。平成21年度は、スピンRAMにおける世界最高の書き込み電流の低電流化と、10年以上の素子寿命が得られるメモリ特性安定化の両立を実現した。今後は、早期の実用化に向け、メガビット容量のメモリアレイ(メモリ素子の配列)におけるばらつき低減、大口径ウェハ上のCMOSデバイスとの集積化などに取り組む。また、スピン新機能素子である磁壁移動メモリでは、基本セルの高速動作を実証することに成功した。現在は、実用化の形態である半導体LSIと集積化したアレイ構造での特性検証に向けた技術開発を行なっている。

(ii) 材料領域

本領域では、材料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重要な研究課題が選定されている。

本領域では、9つの重要な研究開発課題として、『未普及なエネルギー利用を具現化する材料技術』、『高効率なエネルギー利用のための革新的材料技術』、『有害物質・材料対策に資する材料技術』、『希少資源・不足資源代替並びに効率的利用技術』、『環境改善・保全のための材料技術』、『安全・安心社会を実現する材料・利用技術』、『世界をリードする電子機器のための材料技術』、『国際競争力のある輸送機器のための材料技術』、『次世代を担う革新的材料・部材の創製技術』が選定されている。

平成20年度に、本領域において発見された新規超伝導体(鉄系超伝導体)は、従来想定さ

れていなかった磁性元素を含有し、超伝導材料探索に新しい領域を拓いた。現在、極めて多くの候補物質が挙げられており、今後の基礎科学の研究進展および産業応用への期待により、本物質をテーマとした研究が、「最先端研究開発支援プログラム」（平成 21 年度）に選ばれた。

文部科学省の「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)」と経済産業省の「希少金属代替材料開発プロジェクト」では、基礎から応用、実用化にわたる研究開発が連携して推進されている。平成21年度は、鉛フリー圧電材料（チタン酸バリウム－ニオブ酸マグネシウム酸ビスマス化合物）の開発が進み、圧電定数は目標値（850pm/V以上）に達していないものの、動作温度では目標（250℃以上）を達成しており、高温動作が可能な材料が得られている。また、大型液晶テレビやFPDの需要に向けた、脱インジウム透明導電体の開発では、ニオブ添加二酸化チタン(TNO)透明電極で、 $6 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$ の抵抗率を得ており、目標値（ $2 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$ 以下）に向けて、研究開発は順調に進捗している。また、このTNOは、青色LED材料のガリウムナイトライドとほぼ同じ屈折率を有していることから、TNOを電極として使用することにより、光取り出し効率がITO使用の場合より優れた青色発光LEDが得られることが考えられ、LED構造を試作して電極全面で青色発光を確認した。

「固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発」（平成 21 年度終了）では、セル劣化加速試験法の開発による寿命予測手法の確立、セル内における水分分布の可視化手法の確立等と同時に、触媒・電解質膜の劣化主要因を特定する劣化メカニズムの解明や不純物影響度のデータベース化などを行った。また燃料電池システムの周辺機器やスタック主要部材の高性能化・高耐久化を図り、定置用燃料電池（エネファーム）の商品化に寄与した。

「環境・エネルギー材料の高度化のための研究開発」では、有害物を分解・除去できる環境ナノ触媒として、可視光応答型の高効率光触媒材料 Ag_2GeO_3 の開発に成功した。この材料は太陽光のみならず、室内照明灯の大部分（蛍光灯の 88.5%）を吸収することができる特性を有している。工業廃水の浄化への応用が期待されており、今後は、微粒子作製技術を活用することによる高機能化研究を進め、長期安定性・安全性の確認実験を行う。また、発電ガスタービンやジェットエンジンの高効率化に必要な超耐熱材料技術(実用 1060℃以上)を目指した研究により、これまでに耐用温度で世界最高の 1120℃を達成した。ジェットエンジン用の超耐熱材料を産業界に提供し商用飛行機への搭載を目指している。

(iii) ナノバイオテクノロジー・生体材料領域

本領域では、我が国が得意とするナノテクノロジー・材料分野のシーズを活用し、ライフサイエンス、医療、食料、環境の各分野のニーズを実現することを目的とした、8 つの重要な研究開発課題として、『生体の構造・機能などを解明する分子イメージング技術』、『生体内の分子を操作する技術』、『DDS・イメージング技術を核とした診断・治療法』、『超微細加工技術を利用した機器』、『極微量物質を検出する技術』、『生体に優しい高安全・高機能性生体デバイス』、『再生誘導材料』、『ナノバイオテクノロジーを応用した食品』が選定されている。

「再生医療評価研究開発事業」（平成 21 年度終了）では、患者自身の細胞を採取し、培養から組織形成・治療法の確立を目指した。本研究により、細胞シートと大網組織を組み合わせることで、厚さ 5 mm 以上の組織体を作製することが可能になった。角膜の再生医療プロセスの計測・評価技術については JIS に標準報告書(TR)として提案し、公表された。今後、間葉系幹細胞、軟骨についても実用化に向けた評価基準を JIS 及び ISO に提案し、三次元複合臓器構造体については、安全性・有効性評価試験を行う。

「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）」（平成 21 年度終了）では、微細加工技術により、DDS キャリアの開発や、超微細内視鏡治療システムを構築することを目的とし、医工連携拠点のもとで研究を行っている。平成 21 年度は、早期発見が困難で難治性である膵臓ガンのモデルマウス実験において、ミセルの治療効果を、in-vivo MRI で観察し、陰性の造影効果を得ることに成功した。世界のナノバイオ分野におけるモデルケースともなっている本研究拠点から創出された多様な独創的成果の一部は、すでに産業界に技術移転されている。特に、生体親和性と超低摩擦性を有する人工細胞膜ナノ表面（人工関節）、高分子ミセル型 DDS、インクジェットプリンターによるバイオマテリアル 3 次元ナノ造形技術（人工骨）については、臨床治験を行っており、ナノ診断、ナノ医療への実用化が着実に進められている。今後は、ナノ DDS キャリアの臨床試験等を継続し、成果の確認とさらなる技術の向上を目指す。

「萌芽的先端医療技術推進研究事業（ナノメディシン分野）・ナノメディシン研究事業」や「分子イメージング研究」では、1mm 程度のがん等の超早期疾患診断法と治療法の確立及びナノ薬物送達システム（DDS）を実現することを目指している。平成 21 年度は、癌微小病変検出、糖尿病等の超早期診断を可能とする新規プローブ、および画像診断技術を開発した。また、DDS による脳腫瘍への薬剤の送達効率を高める新規治療法等の開発も実施している。今後は、開発された要素技術等の臨床応用による実証を進める。

「先端光科学研究」では、生きた細胞内部の中の一機能分子の動きを追跡する技術を開発することを目的として、アト(10^{-18})秒パルスやテラ(10^{12})ヘルツ光等の光源の研究を行っている。平成 21 年度は、高効率・広帯域なテラヘルツ光発生、および、光と電波の技術を融合した新しいテラヘルツ波ビーム走査方法を実現した。今後は、イメージングのための高速なビーム走査技術・高感度な 2 次元検出器の開発をすすめる。

(iv) ナノテクノロジー・材料分野推進基盤領域

ナノテクノロジー・材料分野において、推進の技術基盤として、加工・計測、シミュレーション、総合的な推進基盤として、ナノテクノロジーの責任ある研究開発や、ナノテクノロジー・材料分野の人材育成や研究開発の環境整備を推進している。5 つの重要な研究開発課題として、『革新的ナノ計測・加工技術』、『量子ビーム高度利用計測・加工・創成技術』、『物性・機能発現指向のシミュレーション・デザイン技術』、『ナノテクノロジーの責任ある研究』、『ナノテクノロジー・材料分野の人材育成と研究開発の環境整備』が設定されている。

「X 線自由電子レーザーの開発・応用（国家基幹技術）」では、本施設を、物質・生体における新しい現象の発見やその原理の解明に利用すること、および産業分野の高度化・競争力強化に寄与することを目的としている。放射光とレーザーの特徴を併せ持つ XFEL は、我が国のナノテク・材料技術、ものづくり技術が結集された最先端装置であり、世界最高水準の科学技術の発展基盤として、国家基幹技術に位置付けられている。世界最短波長のレーザーを用いて、原子レベルの超微細構造、化学反応の超高速動態・変化等の計測・分析を実現することを目指し、平成 18 年度に入射器、加速器、線型加速器収納部建屋の整備に着手して以来、実験施設や研究棟の整備まで含めて、これまで XFEL の開発は極めて順調に進捗している。併せて、XFEL のプロトタイプ機である SCSS 試験加速器等を利用した研究を進め、XFEL 完成後の利用研究を見据えた解析と装置等の開発も行っている。現在、平成 23 年度中の供用開始を目指して、整備・運営を着実に推進するとともに、利用促進業務を行う体制を整える予定となっている。

科学技術連携施策群「ナノテクノロジーの研究開発推進と社会受容に関する基盤開発」は、関係府省連携の下で推進され、ナノ粒子の特性を明らかにすると共に、ナノ材料に関するリスクガバナンス活動の連携体制の確立を目指した。「ナノ粒子の特性評価法開発」では、工業ナノ材料に関するリスク評価書の中間報告書を作成し、フラーレン、多層及び単層カーボンナノチューブに関して、得られた知見を 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へ提供した。

「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、全国の大学や独法等が所有するナノテクノロジー研究設備の利用機会を、高度な専門技術・知識と共に提供し、分野横断的な研究開発を戦略的かつ効率的に推進することを目的としている。これまでに、例えば、本事業で提供する微細加工技術支援の活用により作成された微細樹脂バネ構造が、環境中の低周波振動エネルギーを利用する発電機のプロトタイプの開発につながるなどの成果を挙げている。平成 21 年度は、全国 13 拠点 (26 機関) の研究施設で、約 1300 件の共用利用実績をあげた。今後は、諸外国の類似施設の状況と比較しながら、より持続的なシステムの構築に向けた検討が重要である。また、産業界の共用利用件数を増加させるために、施設の利用環境の整備、共用化を推進する仕組みの検討を行うとともに、若手研究者・技術者の養成に資する交流の在り方も検討する必要がある。

「先端光科学研究」において、新しい単一アト秒パルスの発生法を提案し、単一アト秒パルスの発生を示唆する連続スペクトルを得ることに成功するとともに、アト秒パルス列による水素分子の解離過程の解明を行い、世界をリードする成果を得ている。今後の課題は、アト秒軟 X 線パルスの波長域の拡大である。

「ナノテクノロジー・共通基盤技術の開発」では、新機能探索シミュレーション手法の実現を目指し、第一原理オーダー N 法 (計算時間の大幅な短縮を可能とする方法) を用いて、無機ナノ構造から生体物質系 (水和 DNA、膜蛋白質など) まで、その応用範囲を着実に広げている。平成 21 年度は、ナノバイオ系に対して数万原子規模に及ぶ世界最高レベルの大規模高精度第一原理計算解析を実現した。

(v) ナノサイエンス・物質科学領域

本領域は、ナノテクノロジー・材料分野の中でも基礎研究に近い部分に位置しており、研究者の自由な発想に基づく基礎研究と、将来の応用を明確に意図した基礎研究を包含している。重要な研究開発課題は『「量子計算技術」、「界面の機能解明・制御」、「生体ナノシステムの機構解明」、「強相関エレクトロニクス」の戦略的推進』である。

「ナノ界面技術の基盤構築」では、平成 21 年度に、電圧をかけて超伝導化する技術を新しい材料に適用し、超伝導転移温度を従来の 0.4K から 15K まで上昇させることに成功した。本研究では、従来の超伝導体でみられる化学的なキャリアドーピングではなく、有機物 (イオン液体) と無機物 (塩化窒化物) を接合した材料に、電圧を印加することでキャリア濃度を制御して超伝導を得ている。本手法の確立により、数多くの材料で超伝導を引き起こせる可能性が拓かれた。「環境・エネルギー材料の高度化のための研究開発」では、エレクトロニクス・生体・エネルギー・環境デバイスの特性の大幅な向上に資する界面の機能性・制御性を解明することを目的とした研究において、色素吸着状態、添加物による影響を明確化し、色素増感太陽電池の世界最高レベルの変換効率を達成している。「交差相関物性科学研究」では、エレクトロニクスデバイスや、生体デバイス、エネルギー・環境デバイスの特性を大幅に向上する界面の機能

性・制御性の解明を目的とした研究を行っている。平成 21 年度は、 $GdFeO_3$ が基底状態で強誘電性を示すことを発見し、電場・磁場による磁化・分極の交差制御を成功させた。

(2) 中間フォローアップ（平成 21 年 5 月）への対応

中間フォローアップ（平成 21 年 5 月）において、進捗が遅れているとされた研究開発目標について、その後の取り組みは下記のとおりである。

- (i) 研究開発目標「平成 20 年までに、定置用燃料電池（1 kW 級システム）製造コスト 120 万円を実現する」については、平成 20 年度までの取り組みにより、システム価格は従来の半分以下へ低減されていたものの、さらなる低コスト化に引き続き取り組んでいくことが要請された。平成 21 年度に、セル劣化加速試験法の開発による寿命予測手法の確立、セル内における水分分布の可視化手法の確立、XFAS 解析法などの実用的な解析評価技術の開発等を通して、数多くの技術的知見を得た。製造コストについては、平均 329 万円と事業実施期間内には目標を達成できなかったが、燃料電池システムの周辺機器やスタック主要部材の高性能化・高耐久化を図ったことで、定置用燃料電池（エネファーム）の世界に先駆けた商品化に貢献した（平成 21 年度終了）。