

2. 俯瞰対象分野の全体像

2.1 分野の範囲と構造

2.1.1 ナノテクノロジー・材料の定義と特徴

■ナノテクノロジーの定義と特徴

ナノメートルは、1メートルの10億分の1で、物質中の最小構成単位の原子が数個並んだ程度の長さである。一般的にナノサイエンスあるいはナノテクノロジーでは、1ナノメートルから100ナノメートル程度の範囲の世界を対象としている。したがって、三次元の世界で考えれば、原子が数個から数百万個集まった分子はこの領域に入る。ナノテクノロジーの特徴を明確に表現するため、ナノテクノロジーを以下のように定義する。

[ナノテクノロジー]

1ナノメートルから100ナノメートルの領域において、物質を成長させ、加工し、そしてそのサイズのバルク・表面・界面の構造や、そこで生ずる諸現象を原子・分子レベルで観測し、理解し、制御し、それら諸要素を組み合わせることで応用することにより、あるいは他の知識・技術と組み合わせることにより、新しい知と機能を創出しようとする学術的・技術的領域。

上記の定義にかかわる学術領域はすべてナノテクノロジーとして融合の対象となることから、異分野の融合はナノテクノロジーの最も大きな特徴であり、融合によって新しい技術領域が生まれる。正確には、学術的領域をナノサイエンス、技術的領域をナノテクノロジーと呼ぶべきであるが、一般的に両方をあわせてナノテクノロジーと称することが多く、本報告書でもこの考え方を採用する。

ナノテクノロジーに特徴的な概念と具体例を示す。ナノテクノロジーには、代表的な二つのプロセスがある。一つは、超LSI（大規模集積回路）などの基本的な微細加工技術であり、バルク材料や薄膜材料を削り込んで所望のナノ構造を得る「トップダウン・ナノ加工」、もう一つは、原子や分子あるいはカーボンナノチューブや微粒子などのナノ材料から出発して所望のナノ構造を自己組織的に形成する「ボトムアップ・ナノ形成」である。後者が実現できれば、ナノテクノロジーの究極の形成・加工プロセスとなり得る。自己組織化は、前者の限界を克服、あるいは前者を補完する後者の鍵となる概念である。そして、二つのプロセスの融合も重要となる。

これらによって形成・加工される「ナノ構造」の具体例としては、金属や半導体の超微粒子、ロタキサンなどの超分子、ゼオライトなどナノ空間・空隙を利用した材料、そして、零次元、一次元、二次元のカーボンナノ構造体としてのそれぞれC₆₀（フラーレン）、CNT（カーボンナノチューブ）、グラフェンがある。ロタキサンは、2016年ノーベル化学賞の受賞対象となった「分子機械」を構成する物質として記憶に新しい。また、バイオの世界に目を向ければ、生体物質は様々な「ナノ構造」で構成され、その機能はナノ構造自体やナノ構造間の複雑な相互作用を介して発現している。

ナノスケールの物質構造の最大の特徴は、①サイズ効果としての量子効果、②原子より

10 ～ 100 倍程度大きいナノ単位格子の繰り返しから生じる量子波効果、③表面・界面の原子の数が物質内部の原子の数に比較して無視できないほどに相対的に増えることから生じるナノ界面・表面効果などにあり、これらが通常に見られる物性とは全く異なる「ナノ物性」を生み出す。たとえば、多様な触媒効果や、物質定数から解放されて自在に変化する電子的・磁氣的・光学的・機械的・熱的特性である。今後、注目されるのは、物質内にデザインして作りこむナノ空間・空隙内を利用した電子、光子、スピン、フォノン、イオン、分子の多様な輸送現象であり、その制御法や実現法は、IoT に代表される第 4 次産業革命や、エネルギー分野、ライフサイエンス・医療分野において必須の技術と期待される。

■材料の定義と特徴

材料とは何らかの有用な機能を有する物質であり、材料技術は、物質科学をベースに工学的応用を図る技術である。工業で用いられる材料は、元の原料によって大きく次の 4 つに分けられる。

1. 「金属材料」：鉄鋼やアルミニウムなどの金属、ステンレスやチタンなどの合金、アモルファス合金、あるいは、金属ガラスなど
2. 「無機材料」：セラミックスやガラス、非金属元素単体または金属元素と非金属元素の化合物など
3. 「有機・高分子材料」：炭素を主要元素として、酸素、水素、窒素原子などで構成される物質の総称。これはプラスチックのような高分子化合物による樹脂、繊維や有機 EL などの電子材料、自己組織化を利用した超分子集合体やゲル等を含む。
4. 「生物材料」：生物に由来する材料。主にタンパク質や核酸、糖鎖など

広義には有機材料（生物材料を含む）と無機材料（金属材料を含む）の 2 つに分類することもできる。近年は、目的とする機能や特性を得るために上記材料を組み合わせた、炭素繊維強化プラスチックなどのハイブリッド材料や複合材料が多数登場している。

また、重視される性質によって、力学特性（強度・靱性・延性）が主に要求される「構造材料」と、力学特性以外の機能を持つ「機能材料」に分類することもできる。機能材料については、導電性に注目して、超伝導体、導体、半導体、絶縁体という分類や、磁性に注目して、強磁性体、常磁性体、反磁性体という分類などがある。

今日において材料技術は、ナノメートルの領域にまで踏み込んだ組織制御技術、高分解能電子顕微鏡・走査型プローブ顕微鏡などのサブナノメートルにおよぶ高精度計測、第一原理電子状態計算による構造および機能の予測、シミュレーションによる解析技術を柱として、さらに進化し続けている。

よってナノテクノロジーと材料との関係は、ナノテクノロジーはトップダウンあるいはボトムアップでナノスケールの構造を形成することにより新機能を発現する技術であり、様々な新材料を開発するための横断のコアテクノロジーと見ることもできる。

2.1.2 ナノテクノロジー・材料への社会的期待と実現への課題

ナノテクノロジー・材料は、IoT/AI 時代を担う情報通信・エレクトロニクス、ものづくり、環境・エネルギー、健康・医療、などの広範な応用に対し、基盤的な技術を提供する役割

を果たしており、それらの分野との融合によって技術的なイノベーションを引き起こす。以下では、上記の各応用分野がどのような将来展望を持っており、またそれに対してどのような技術的課題を抱えているかを述べる。これらの将来展望を実現する、またそのための技術的な課題を解決するうえで、ナノテクノロジー・材料に対する社会の期待は大きい。ナノテクノロジー・材料がこれらの期待に対してどのような技術を具体的に提供しようとしているかは、本章の最期にある 2.2.2.1 の節「ナノテクノロジー・材料の今後の方向性と挑戦課題」で述べる。

■ IoT/AI 時代を拓く情報通信・エレクトロニクス

情報通信技術（ICT）の急激な進歩により、Internet of Things（IoT）や人工知能（AI）などの科学技術が社会・経済に大きな影響を与え始めている。ユーザーへのサービス提供に必要な多様な情報が、IoT を介して収集され、収集された膨大な情報（ビッグデータ）がネットワークを介してクラウド側に送られる。クラウド側ではAI も駆使してビッグデータの解析がなされ、そこで生まれる新たな知見は多様なビジネスが展開される実世界に高い付加価値を提供する。この結果、図 2-1 に象徴的に示されるように、自動車、家電製品、健康・医療機器、工場、金融、エネルギーネットワーク分野などで、物理的世界とサイバー世界との一体化が進展しつつあり、超スマート社会（Society5.0）の到来とも呼ぶべき時代を迎えようとしている。

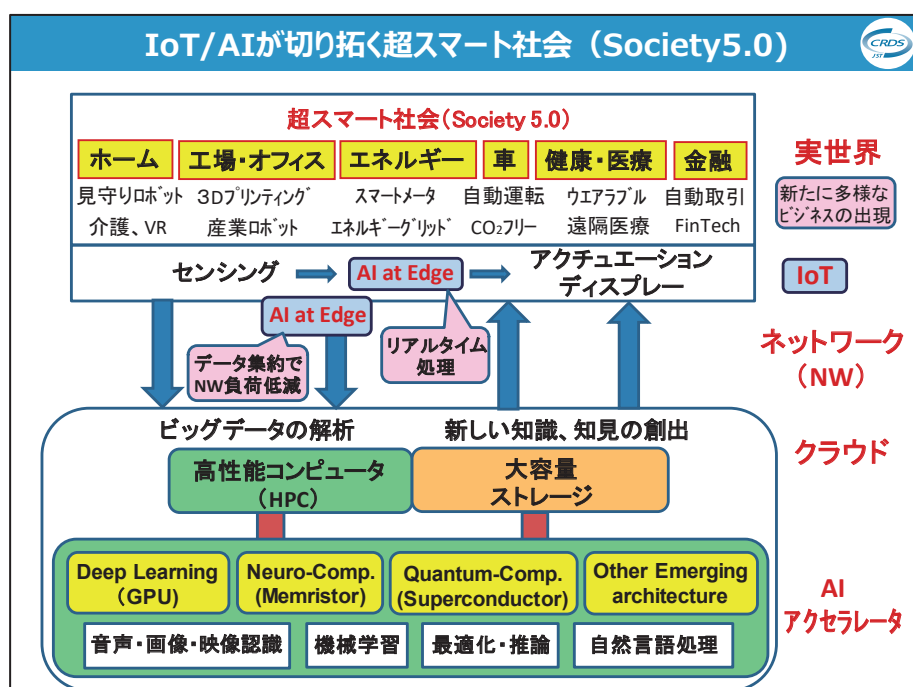


図 2-1 IoT/AI が切り拓く超スマート社会

我々の身の回りの機器に埋め込まれた IoT は多様なセンシング機能と情報をクラウド側に送信するためのネットワーク機能、また使われる場面によっては、自らを動作させるのに必要な電力をその場で生み出すエネルギーハーベスト機能を具備している。ロボットや自動車などは実時間での情報処理やアクションが必要である。また、ネットワークの負荷低減のために大量のデータ情報の事前処理が必要な場合もある。このようなときは IoT 自身に AI をも含む高度のコンピューティング機能が搭載されるであろう。AI は通常のコンピュータでは難しい大量の画像、音声、動画での処理、自然言語処理、最適化・推論などの領域で力を発揮することが期待されており、通常のコンピュータの能力を補完するアクセラレータとして機能する。既に Google 社の開発した Alpha Go に見られるように、世界トップクラスの囲碁棋士を破る能力に到達している AI であるが、そこでは大量の GPU（Graphic Processing Unit）からの情報を基に深層学習、強化学習といったアルゴリズムにより高度な演算がなされている。これらの領域における AI の能力に対する要求はとどまる所を知らず、これまでのフォン・ノイマン型のコンピューティングを超える新たなアルゴリズム、それを実行するハードウェアへの期待が高まっている。生物が行う著しく低エネルギーでの情報処理の仕組みを取り込もうとするニューロモルフィックコンピューティング、量子力学の原理に則り基本素子を動作させ、現状のコンピュータでは実質的に解く事が難しい最適化問題に解を与える量子コンピューティングなどをその候補に挙げる事ができよう。

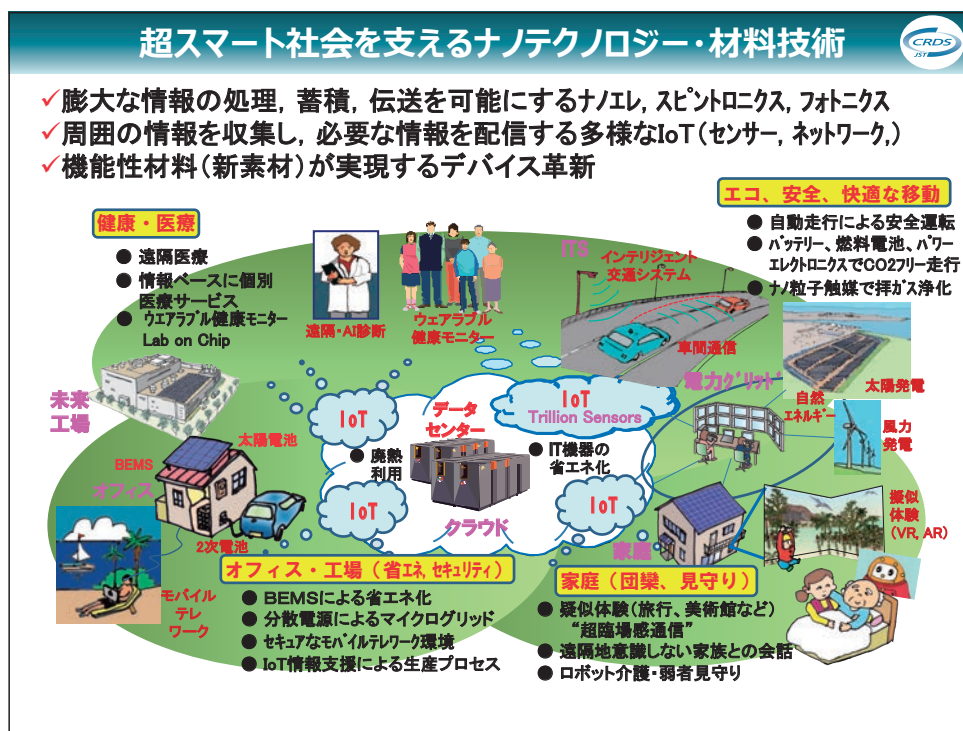


図 2-2 超スマート社会を支えるナノテクノロジー・材料技術

図 2-2 はナノテクノロジー・材料技術が支える将来の超スマート社会像を描いたものである。そこでは、IoT がいたる所に配置され、そこからの大量情報がクラウド側で処理され、我々に必要な情報が必要なタイミングで送られ、我々の生活を支援してくれる。特に高齢者を抱える家庭においては、この恩恵は大きく、仮想体験（Virtual Reality）によって、

移動することなく、世界中を旅行したり、美術館を訪問したり、他の家族と離れて住んでも、同じ場所にいるかのような会話やふれあいを家族と楽しめる。またロボットが常時、当人の安全を見守り、何か異常があれば適切な人に通報してくれたりする事が可能になる。車での移動では、安全で環境にやさしく、快適な環境が提供される。そこでは自動運転によって安全が担保され、電気自動車（EV）や燃料電池自動車によってCO₂を排出しない移動が可能になる。個々人の健康はウェアラブルな健康モニターによって常時モニターされ、そこで得られる情報は医療機関に無線、有線のネットワークを介して伝達される。医療機関に保有されている当人の健康に関するデータと合わせることで、当人の健康状態が診断され、異常があれば当人に通報される。また必要な時には、担当の医師から遠隔での指示を受けることができる。オフィスや工場など働く場の環境も大きく変わってくると予想される。再生エネルギーと情報技術を活用したビルのエネルギー・マネジメント・システム（BEMS）により、徹底的な省エネルギー化が図られる。安全が担保された情報通信技術により、どの場にも移動してもオフィスと同様の情報セキュリティが担保された仕事環境が提供される。工場においては製造過程全体が情報管理され、状況に応じて柔軟に対処できる効率的で歩留まりの高い製造が可能となる。以上の超スマート社会を支える重要な技術はセンシング、ネットワークング、コンピューティングであり、それらを実現するナノエレクトロニクスを中心とするナノテクノロジー・材料への期待は大きい。

■情報技術が変革する材料開発とものづくり

一方で、ビッグデータを活用した情報技術の進展は、ナノテクノロジー・材料分野の技術開発にも大きな影響を与えると予想される。日々、更新され、新規に追加される大量の材料データが蓄積されることで、そこから新たな材料に関する知識発見が可能となり、所望の特性を持つ材料の効率的な探索、開発が可能になる。このためには材料技術と最先端の情報技術の融合が必要であり、データ駆動型材料設計（マテリアルズ・インフォマティクス）と呼ばれる材料開発の新しいアプローチへの取り組みが、内閣府、文科省、経産省（*）などで始まっており、今後の進展への期待は大きい。最近のコンピュータの能力向上は、材料、部品、さらには複合システム品の設計開発を行うシミュレーション技術の可能性を大きく広げている。量子力学が支配するナノスケールの構造から始まって、最終製品に近いマクロスケールの複合システム品までを一貫して設計するマルチスケールシミュレーションが可能になっている。さらにはこれらのデジタル化された設計データを基に、目的の構造物を自在に作成可能な3Dプリンティング技術の進歩も著しく、情報技術の進展がナノ構造体の製造技術を含むものづくり技術全般の革新をもたらすと期待されている。

（*）内閣府：SIPプログラム「革新的構造材料」のマテリアル・インテグレーション

文科省：JSTイノベーションハブ構築支援事業「NIMS情報統合型物質・材料開発イニシアティブ」

経産省：超先端材料超高速開発基盤技術プログラム

■複雑化、深刻化する環境・エネルギー問題と科学技術への期待

2010年前後を境に世界のエネルギー供給環境は大きく変化しつつある。その要因のひとつが、米国から始まったシェールガス革命である。これまで利用することができなかった地中に眠る大量のシェールガスを掘削する技術が開発され、商業ベースでの生産が可能

になってきた。これにより、天然ガスの可採年数が数百年に伸びると予想されており、埋蔵量も多く、技術で先行する米国の天然ガス生産量は世界最大となり、世界における天然ガスの供給環境が大きく変わりつつある。中東地域を中心とする在来型の石油生産状況との関係で、エネルギー価格の変動要因の一つとなっている。同時にシェールガスの掘削手法は水質・土壌汚染や地震の誘発につながるなどの懸念も指摘されており、解決すべき課題は多く、今後の展開は予断を許さない。

2011 年の福島第一原子力発電所事故を契機として、原子力発電への見直しが世界的に進んでいる。事故により、原子力発電の安全性への疑問が投げかけられ、従来以上に再生可能エネルギー導入を計画するに至っている。日本においても 50 基近く稼働していた原子炉全ての運転が原発事故後止められた。2017 年現在は、原子力規制委員会の審査を経て再稼働に至るものも出始めている状況にあるが、かつて日本の総エネルギー量の 3 分の 1 を産出していた原子力発電に多くを依存することは、現時点ではもはや不可能になっている。

一方で、石油、石炭、天然ガスといった化石燃料をエネルギー源として大量に消費することから生ずる温室効果ガスは増大する一方であり、地球温暖化は確実に進んでいる。この状況を放置すると、すでに兆候が見えるように、地球の気候変動、自然災害の頻発、食糧・水供給の壊滅的な危機を招来することになる。これは、先進国のみならず、BRICs 等新興国や途上国も加わり、例外なく経済発展と市場拡大を目指してアクセルを踏み続けている現状を外挿すると明らかである。温室効果ガス削減は、地球全体に及ぶ課題として猶予のない対応を必要としており、今後は、生物多様性の保全というグローバルな課題も関連して控え、人類の活動への影響は重大である。

化石資源の乏しい日本は過去、原子力発電への依存率を高めることで電力自給率の向上を図り、それを基盤として安定した経済発展を遂げてきた。要求される温室効果ガスの削減においても原子力発電への期待は大きかった。事故により日本のエネルギー政策は見直しを迫られ、エネルギー関連技術の進展に合わせて最適のエネルギーミックスを追い求めていかなければならない。

■超高齢化社会への突入と増大する国民医療費の中で求められる健康・医療技術

健康で安全・安心な生活を送りたいとする人類共通の QOL（Quality of Life）への願いは、高齢化・少子化によって加速された超高齢化社会にとって切実な課題であることはいうまでもない。現在、日本は世界の先頭をきって超高齢化社会へ突入しようとしている。2015 年には全人口に対する 65 歳以上の人の割合が 4 人に 1 人を超え、これが 20 年後の 2035 年になると 3 人に 1 人の割合になると予想されている。これに伴い、国民医療費が増大する。2015 年に国民医療費が 42 兆円、その内、後期高齢者医療費が 15 兆円であったものが、2020 年には国民医療費で 47 兆円、その内、後期高齢者医療費が 20 兆円にまで増大するとの予想が出ている（平成 23 年度厚生労働白書 厚生労働省「医療費等の将来見通し及び財政影響試算」）。また、介護費も年々増加し、2015 年には 10 兆円近くに上っている。

健康維持には身体の異常を早期に発見・予測する技術や、感染症の流行を未然に防止する技術が必要であり、これらの技術は医療費・介護費の最適化にも不可欠である。病気の診断・治療では、患者固有の遺伝的背景等に即して適正な規模で患者を層別化し、最適な

医療を提供する層別化医療、診断と治療の一体化など、医療介入の効果および医療経済性をより高めていくための研究開発が進められている。しかし、これらを広く臨床現場に導入するには、広範な技術分野の連携と統合が必要である。また、患者のQOL向上には診断・治療の低侵襲化、非侵襲化に向けた技術開発も必要となる。

2.1.3 ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰図

ナノテクノロジー・材料分野は、物質科学、量子科学、光科学、生命科学、情報科学、数理科学といった基礎科学をベースに、ナノスケールで生ずる現象を取り扱う科学として発展してきたナノサイエンスを土台に置いている。ナノサイエンスという土台の上に、共通基盤技術が構築され、それが具体的に物質・機能へと適用される。そして、デバイス・部素材が開発され、最終的に環境、エネルギー、ライフ・ヘルスケア、社会インフラ、情報通信（ICT）・エレクトロニクスなどの分野に対し、横断的に革新をもたらすイノベーション・エンジンとして機能している。これらの全体像を俯瞰図として図2-3に示す。



図2-3 ナノテクノロジー・材料分野の研究開発俯瞰図（2017年）

ナノサイエンスという土台の上に展開される共通基盤は、製造・加工・合成、計測・解析・評価からなる技術群、さらには理論・計算から構成されている。その上位レイヤーとして物質と機能の設計・制御があり、物質設計・制御として元素戦略や分子技術、インフォマティクス、機能設計・制御として界面・空間制御、ナノ熱制御などのナノテクノロジー・材料全体に関与する特有の概念を位置付けている。

これら物質・機能を組み合わせることで部素材、あるいはデバイスが構築される。また、

多様な部素材・デバイスは応用目的に応じて、エネルギー・環境分野、ライフ・ヘルスケア分野、社会インフラ分野、ICT・エレクトロニクス分野に分類される。個々の部素材・デバイスの中には、複数の分野で役割を果たすものも多く存在するが、ここでは代表分野に集約して記載する。

これら部素材・デバイスは最終的にはシステムとして組み上げられ、製品性能、量産性、コスト競争力、信頼性、安全性はもとより、環境負荷、省エネ、リサイクルといった特性も視野にいれ、市場あるいは社会によって受容できるかの判断がなされ、社会実装へと繋がっていく。

なお、俯瞰図には、研究・技術開発を進める上で施策として重要となる、融合連携促進策やインフラ整備、人材育成策、知財・標準化戦略、EHS（環境・健康・安全）および ELSI（倫理的・法的・社会的課題）などの共通課題を、図面右の欄に「共通支援策」としてまとめて記述してある。特に、ナノ物質においては同一分子式・重量であっても、形状や表面状態などにより機能活性や有害性が大きく変化するため、健康・環境への影響やリスク評価・管理の検討が重要であり、近年国際的にもナノテクノロジーの ELSI/EHS が大きな課題として取り扱われている。

本報告書では、本文中に記載した国内外の研究開発動向、環境動向などを全体的に把握したうえで、ナノテクノロジー・材料分野において少なくとも今後 10 年間定常的に注視すべき研究開発領域として、37 の領域を抽出した（図 2-4）。これら個別領域の現状や国際比較については第 3 章に記載する。

37 の主要研究開発領域（報告書第3章に詳細動向を掲載）

俯瞰区分	研究開発領域
環境・エネルギー 応用	太陽電池
	人工光合成
	燃料電池
	熱電変換
	蓄電デバイス
	パワー半導体
	グリーン触媒
	分離技術
ライフ・ヘルスケア 応用	生体材料(バイオマテリアル)
	再生医療材料
	ナノ薬物送達システム(DDS)
	計測・診断デバイス
	脳・神経計測
	バイオイメーjing

俯瞰区分	研究開発領域
機能と物質の設計・ 制御	空間空隙設計制御
	バイオメテックス
	分子技術
	元素戦略・希少元素代替
	マテリアルズ・インフォマティクス
	フォノンエンジニアリング

俯瞰区分	研究開発領域
ICT・エレクトロニクス 応用	超低消費電力(ナノエレクトロニクスデバイス)
	スピントロニクス
	二次元機能性原子薄膜
	フォトニクス
	有機エレクトロニクス
	MEMS・センシングデバイス
	エネルギーハーベスティング
	三次元ヘテロ集積
社会インフラ 応用	量子コンピューティング
	ロボット基盤技術
	構造材料(金属、複合材料)
	非破壊検査・劣化予測
	接合・接着・コーティング

俯瞰区分	研究開発領域
共通基盤 科学技術	加工・プロセス 加工・プロセス技術
	計測・分析 ナノ・オベラント計測技術 (SPM、TEM、放射光・X線、分光、etc)
	理論・計算 物質・材料シミュレーション
共通支援 策	ELSI・EHS ナノテクノロジーのELSI/EHS、国際標準

図 2-4 37 の主要研究開発領域

2.2 分野の歴史、現状と今後の方向性

2.2.1 分野の変遷～国際動向と日本～

2.2.1.1 ナノテクノロジー・材料の進化

(1) 材料の進化

金属、プラスチック、セラミックス、半導体など、多様な材料が新たに出現することにより社会の変革がもたらされてきた。鉄鋼を中心とする構造材料が 18 世紀の産業革命を支え、ジュラルミンなど軽量合金が航空機時代をもたらした。ナイロンの発明は日常生活とりわけ衣料・服飾界に革命を招来し、半導体を始めとする電子材料は情報通信の飛躍的発達をもたらした。「材料科学技術」が新しい機能を持つ材料や飛躍的な性能向上をもたらす材料を生み出し、時代を切り拓いてきたと言えよう。幸い、日本はこれまで、物質・材料研究を積極的に進め、新材料技術の開発では世界に先行する場面が多く、部素材の基幹産業を支え、新しい産業を生み出してきた。以下、これまでも振り返り、材料の発展に対する日本の貢献についていくつかの例を挙げる。

1968 年の本多健一と藤嶋昭（当時、東京大学）による酸化チタンを用いた光電気化学（ホーnderフジシマ効果）の発見は、その後、応用開発に引き継がれ、数十年を経て、耐候性に長けた汚れのつかないセルフクリーニング（光触媒コーティング）技術として 1000 億円の産業を生み出すに至っており、また人工光合成という究極のクリーンエネルギー技術に挑戦する基礎研究に発展している。

1980 年に J.B.Goodenough と水島公一（当時、Oxford 大学）により、リチウムイオンを吸蔵するリチウム遷移金属酸化物を電池の正極に使用する電池が提案された。1980 年代には、負極に炭素、正極に LiCoO_2 という正負極材料を組合せた現在のリチウムイオン電池の原型にあたる基本構造が吉野彰（当時、旭化成）により考案され、1986 年に実用的なプロトタイプが完成した。1991 年に実用化され、その後ノートパソコンや携帯電話のようなポータブル電子機器に広く使用できるようになった。その後、リチウムイオン電池の大型化が進み、ハイブリッド自動車や電気自動車の電源、定置型や非常用電源としても研究開発が加速している。

1917 年に本多光太郎が初めて人工的に合金で構成される永久磁石 KS 鋼を開発したが、永久磁石のうちでは最も強力とされているネオジム磁石は、1984 年に住友特殊金属（現：日立金属）の佐川真人によって発明された。その後改良が重ねられ、現在、ネオジム磁石はハイブリッド自動車、風力発電、ハードディスクや MRI など様々な分野で利用されている。その生産量は年々上昇を続け、焼結製品だけでも世界で既に年 8 万トンに達しようとしている。

1986 年には、赤崎勇と天野浩（当時、名古屋大学）により窒化ガリウムの高品質な単結晶膜形成等の研究成果が生まれ、1993 年に中村修二（当時、日亜化学工業）らにより InGaN （窒化インジウムガリウム）を用いた高輝度の青色 LED が開発され実用化に至った。その後 1996 年には、量子井戸構造を用いた青色 LED および青色レーザーが世界で初めて実用化された。この青色 LED の出現により、蛍光体と組み合わせての白色 LED が実用化された。白色 LED の実現により、液晶ディスプレイのバックライト光源、高効率な一般照明、車両のヘッドランプなどに応用が広がっている。高輝度で省エネルギーの

白色光源を可能とする青色 LED の発明に対して、赤崎・天野・中村の三氏は 2014 年にノーベル物理学賞を受賞した。

ハードディスクに情報を高密度に書き込み、その記録を高速に読み取る磁気ヘッドに関して、1995 年、宮崎照宣（東北大学）らが、室温で有為な大きさ（20%）の磁気抵抗比をもつトンネル磁気抵抗素子（トンネル障壁材料は AlOx ）を開発した。その後、2004 年に湯浅新治（産業技術総合研究所）らは、トンネル磁気抵抗素子のトンネル障壁材料を酸化マグネシウムにすることにより、高集積化の鍵を握る磁気抵抗比の大幅向上を達成した。2007 年に本技術が実用化され、現在の大容量ハードディスクの磁気ヘッドとして世界中で使用されている。

1994 年、細野秀雄（東京工業大学）らによって発見された、TAOS（透明アモルファス酸化物半導体）は、アモルファス相でも高い電子移動度を有する透明な酸化物半導体である。この一種である IGZO（ In-Ga-Zn-O ）を半導体材料として用いると、低消費電力を実現する薄膜トランジスタ（TFT）として動作することを 2004 年に実証した。現在スマートフォンやタブレット端末をはじめとした製品にディスプレイとして組み込まれている。

ナノスケールの特徴的な構造を持つカーボンナノ材料においても日本の貢献は大きい。その代表例の一つであるフラーレン（ C_{60} ）は、1984 年にクロトー（英）、スモーリー（米）、カール（米）によって発見されたが、炭素の 6 員環と 5 員環からなるサッカーボール構造については、1970 年、大澤映二（当時、北海道大学）が構造モデルを発表している。同じく、代表的なカーボンナノ材料であるカーボンナノチューブ（CNT）は、1991 年、飯島澄男（当時、NEC）によって発見され、炭素 6 員環ネットワークが筒状になった構造モデルが発表されている。1970 年代から炭素繊維を研究していた遠藤守信（信州大学）は、その後、気相法による CNT の成長技術を開発し、量産化技術へと発展させた。このように日本が主導してきたカーボンナノ材料は、2004 年に新しく登場したグラフェンを含め、特異な電氣的、機械的、化学的性質を有している。電子デバイス、スーパーキャパシタ、ディスプレイ、強靱な複合材料、医療・バイオ応用などの工学的応用への期待が高まっている。

図 2-5 には、日本が誇る材料研究による社会的・経済的なインパクトとして主要な事例をあげておく。

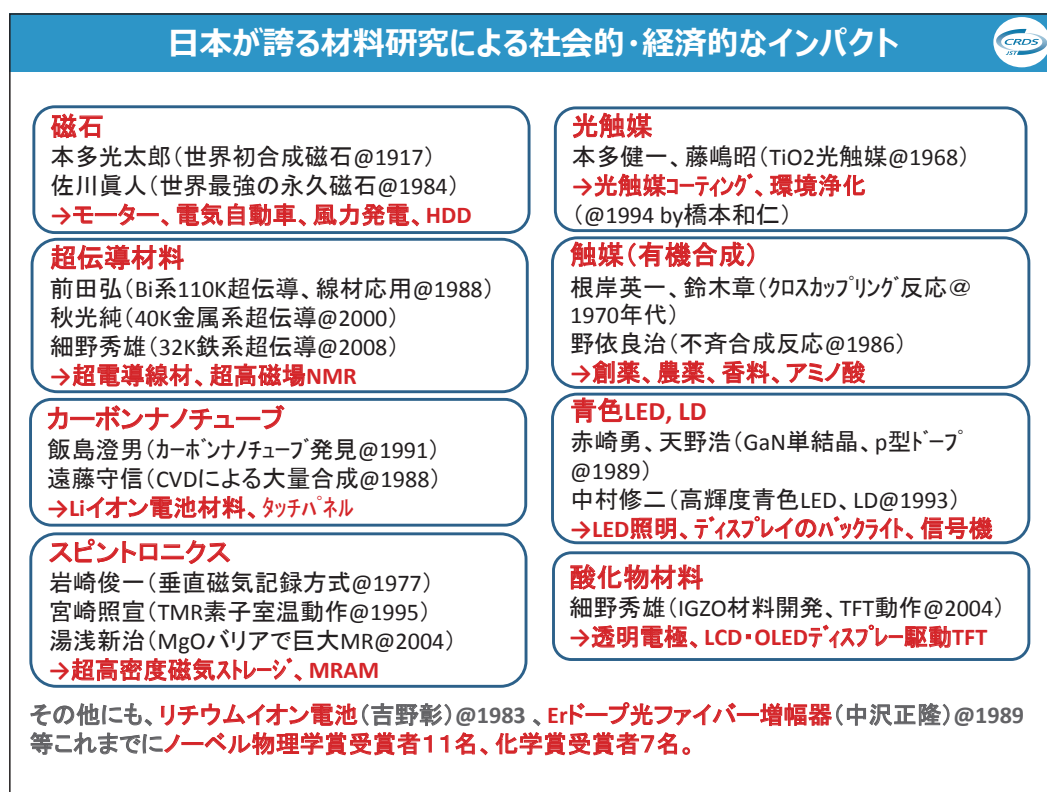


図 2-5 日本が誇る材料研究による社会的・経済的なインパクト

ここまで挙げた例も含め、物質・材料の発見から、応用技術が開発され、試作品の完成、信頼性の確保、量産化技術の開発を経て世に出るまでは通常、15・30年といった長い年月を要する。さらに最近この分野のグローバルな開発競争が厳しくなっており、研究開発のスピードが要求され、これまで同様、日本が先導的な役割を果たせるか、不透明になっている。その意味で、進展著しい計算科学や情報科学を駆使することで物質・材料に関する未知の知識発見を行おうとするマテリアルズ・インフォマティクスと呼ばれる新しい材料開発のアプローチが、重要になってくるであろう。

今、地球規模での持続性に関わる課題解決に向け、材料技術によるイノベーションへの期待は高い。そのため、それを牽引するキーテクノロジーとしてナノテクノロジーの果たすべき役割は大きい。物質中のナノスケールでの現象の理解、制御をベースにメソ、マクロのスケールへと発展させる技術開発、ナノスケールでの要素機能を複合化し、新たな機能を生み出す複合材料の技術開発が求められている。

(2) ナノテクノロジーの進化

科学技術の進歩により、20世紀後半は驚異的な経済発展が遂げられた世紀である。その先駆けとなったのが量子力学という物理学上の新概念の登場であろう。量子力学をベースに物理や化学といった学問分野に大きな発展があり、特に第2次世界大戦後はそれらの学問を基盤にした工学が発展し、新技術が生まれ、多くの産業が開花することになる。とりわけ、半導体産業は、1947年のBardeen、Brattain、Shockleyらによるトランジスタの発明を起点に興り、後にMooreの法則と呼ばれる半導体技術の微細化ロードマップに従う形で集積回路チップ上の素子の微細化と高集積化が進み、電子機器の飛躍的な性能向

上と普及につながっていった。

このような先端技術の流れの中で、ナノレベルのサイズを意識した先見性のある言葉としてノーベル物理学賞を受賞した米国の Feynman のコメントが良く引用される： "There's a plenty of room at the bottom". 1959 年、米国物理学会の講演で原子分子レベルの現象を扱う科学の可能性を予告したものである。その 3 年後の 1962 年、久保亮五（当時、東京大学）は金属微粒子における量子サイズ効果を理論的に計算し、ナノサイズになると通常のバルク（体積の大きな）金属とは異なる性質が現れることを示した。これは、ナノ効果の最初の具体的な理論予測といえる。他にも 1960 年代には、日本の大きな貢献として、トンネルダイオードでノーベル物理学賞を受賞した江崎玲於奈の半導体超格子の提案と実験（当時、米国 IBM 研究所、1969 年）がある。1974 年の生産技術国際会議において、谷口紀男（当時、東京理科大学）が初めて「ナノテクノロジー」という言葉を用いて、技術の概念提唱を行っている。

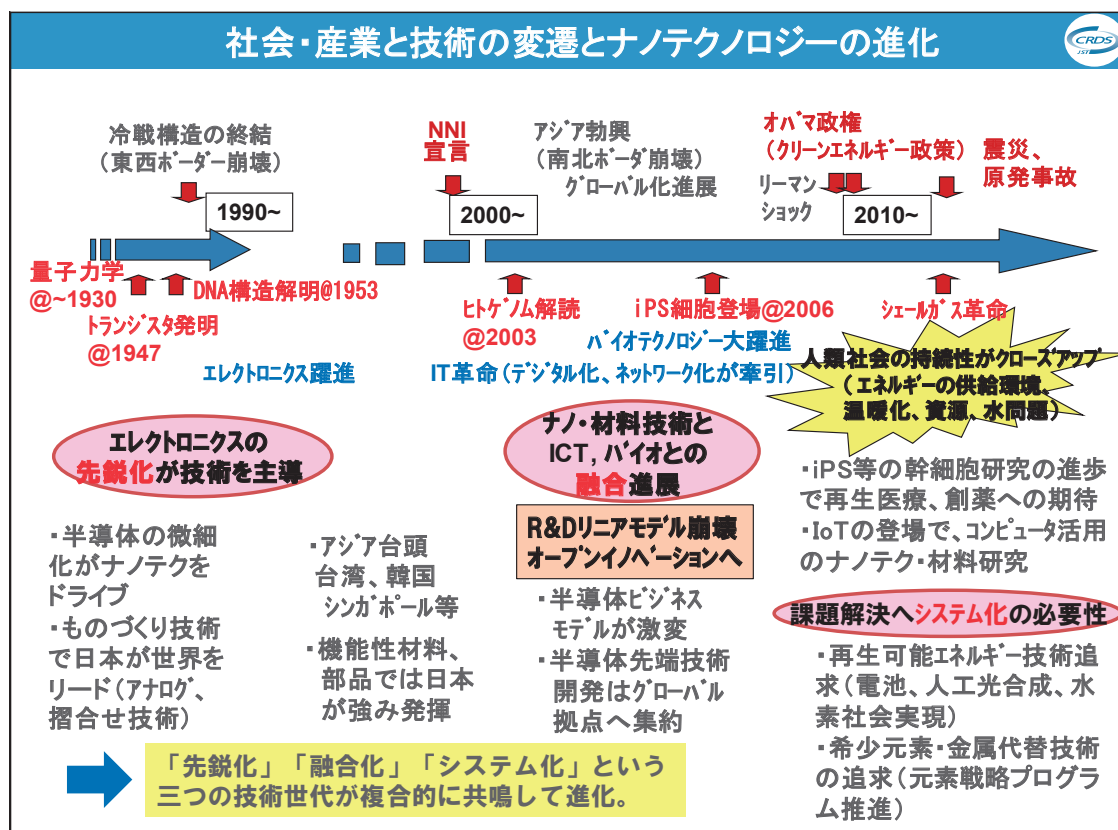


図 2-6 社会・産業と技術の変遷とナノテクノロジーの進化

図 2-6 に示すように、1990 年代になると、半導体の LSI がコンピュータや通信機器をはじめ多くの電子機器に広く使われるようになり、電子機器のデジタル化が急速に進んだ。一方、冷戦構造が終結すると、米国において軍の中に閉じ込められていた多くの先端技術が民間に開放され、Dual Use として積極的に民用展開が図られていく。GPS や ARPANET（Advanced Research Projects Agency Network）などの通信ネットワーク技術がその代表例であろう。やがて、ARPANET はインターネットに進化して人々の生活に大きな影響を与えるようになる。先に述べた半導体の微細化技術の進展により、電子機器のデジタル化が進んでいくが、これとインターネットを中心に進展する情報のネット

ワーク化が、その後の IT 革命の牽引役を務めた。

1990 年代後半以降、半導体の微細化限界が顕在化するにつれ、それを突破する技術革新が求められるようになる。同様にハードディスクなどのストレージの世界でも半導体の Moore の法則を上回るスピードで、記憶セル領域の微細化、記憶容量の大規模化が進み、技術革新が常に求められた。これらがナノテクノロジーの研究開発をドライブしており、IT 革命を支えるナノエレクトロニクスの研究がこの時代の中心的テーマでもあった。

2000 年になると米国クリントン大統領が「国家ナノテクノロジーイニシアチブ (National Nanotechnology Initiative : NNI)」宣言を発する。米国は当時の IT 革命を支える情報通信技術やソフトウェア技術で、またバイオテクノロジーの分野で、他国の追随を許さず、それらの技術が生み出す産業分野で独走状態にあった。一方で、21 世紀の先端技術産業を展望すると、物質科学に裏打ちされたナノスケールのものづくり技術の重要性がクローズアップされつつあった。当時、既に物質科学をベースとする新しい技術として、CNT や GaN 青色発光素子などが日本で生まれており、21 世紀も米国が経済的、軍事的な覇権を握るためには物質科学をベースとするナノテクノロジー分野の技術開発競争で世界をリードすべきとの強い危機意識が、NNI につながったと見られる。

2000 年頃から、バイオ分野でも科学技術の大きな躍進が見られるようになってくる。大きなきっかけはヒトゲノムの解読であろう。この生命科学の進展に対して情報科学、物質科学の研究者達が関心を持ち始め、多くの研究者がバイオ分野における研究開発に参加するようになる。その後の生命科学分野の進歩は著しく、iPS 細胞の創出を始め、教科書を書き換えるような新しい発見や新しい技術の獲得が次々と起こっており、まさに 100 年前の量子力学の創生期を彷彿とさせる。現在の先端技術産業を支える物質科学の源に量子力学のベースがあることを考えると、この生命科学分野の膨大な知の蓄積が人類にもたらす恩恵は計り知れない。量子力学という新しい学問分野の出現からそれを産業として現在まで発展させるのに人類は 100 年余を要した。しかしこれまでに物質科学をベースに発展してきた分子・原子レベルの計測技術、シミュレーション技術、ナノスケール微細加工や物質合成技術といったナノテクノロジーが強力な研究開発支援ツールとして機能することになり、はるかに短い時間スケールで、生命科学における知の蓄積が、医療・診断・健康といった社会・産業技術として開花するものと期待される。事実、遺伝子、RNA、タンパク質、代謝産物等から得られる生体情報を数値化・定量化するための技術やデバイス・装置のほとんどが、ナノテクノロジーや材料技術の寄与なくしては実現不可能なものである。ナノ粒子をキャリアとした薬物送達システム（ナノ DDS）は、患部へ効率的に薬物を到達させ、薬効を高めるとともに副作用の低減を可能にした。温度感受性ポリマーは細胞培養基材に応用され、生体に移植可能なシート状の細胞集合体形成を可能としている。

IT 革命の恩恵を受けて、この 20 年間に我々の生活は驚くほど豊かになった一方で、人類社会の持続性に関わる重大で根源的な課題に我々は直面している。それらは化石燃料から発せられる CO₂ をはじめとした温室効果ガスに起因する地球温暖化問題、地球全体のスケールでの人口増大や経済活動のグローバル化に起因するエネルギー、水、食糧、資源の枯渇問題、環境汚染問題などである。この解決には科学技術の総力をあげた取組みが不可欠であり、中でも物質科学をベースに情報科学、生命科学を融合して技術的なイノベーションを引き起こそうとするナノテクノロジーの役割がとりわけ大きい。

以上、ナノテクノロジーを取り巻く環境の歴史的変遷を述べたが、時代の要請、技術の進展に伴って、ナノテクノロジーの役割は進化していった。その進化の過程は技術の先鋭化→融合化→システム化と辿っていくが、新しい技術の登場、新しい社会的課題の顕在化によって、上記の過程が繰り返され、それらは重層的、階層的に世代推移をしていく。

ナノテクノロジー進化の第一は、「ナノの先鋭化」であり、各要素技術のナノスケールの極限性能への追求である。計測技術であれば、結晶を対象とする電子顕微鏡から個別原子・分子を対象とする走査型プローブ顕微鏡や単分子分光技術への進化であり、バイオ分野においては、単一分子、単一細胞の観測・計測技術がそれに相当する。半導体においては 10nm 以下の領域へ突入する素子の微細化技術であり、リソグラフィ技術を始め、製造に関わる全ての要素技術の革新が求められている。この先鋭化の過程は、新しい概念も登場させながら、不断に研究開発を継続していく必要がある。

第二は、「ナノの融合化」で、極限にまで先鋭化された要素技術同士の学際的な研究を通して異分野融合が惹起され、他の技術と結合して新機能を有する新しい融合ナノテクノロジーに進化する段階である。半導体技術を例にとると、素子の微細化が進むにつれ、ゲート絶縁膜の薄膜化が要求され、既存の SiO_2 膜では素子性能の向上は期待できず、高誘電体材料の開発、さらには新規ゲート電極材料の開発が不可欠になってきた。微細化技術の追求とそれに伴う新材料の導入・開発を合体させた融合技術の登場がなければ LSI の性能向上は期待できない。環境・エネルギーの分野でも、深刻化する地球温暖化問題、エネルギー問題を解決するキーデバイスとして太陽電池、燃料電池、蓄電池、さらには人工光合成などが期待されている。そこでは素材のイノベーションが要求されるが、デバイスを構成する電極材料、電解質材料など個々の材料の性能追求ではなく、デバイス、あるいはシステム全体の性能向上に向けた構成要素材料群の最適化が必要であり、融合化技術が不可欠となっている。

第三の「ナノのシステム化」は、先鋭化した諸々の要素技術やそれらが融合して新しく生まれた融合ナノ技術をシステムへと統合的に構成していく進化の段階である。まさに、IoT/AI 時代を先導するのが、先鋭化・融合化されたナノテクノロジーのシステムである。「ナノシステム」は、ナノテクノロジー・材料分野の要素概念・要素技術と他分野の概念・技術とを集積（統合・融合）し、全体として重要課題の解決に資する高度な機能を提供する部品・装置・システムとして定義される。これは、ナノテクノロジーの要素概念ではなく、要素が集積されてひとつのシステムとしての機能を生み出す概念である。ナノエレクトロニクス領域では、記憶、論理演算、通信、センシング、イメージング、エネルギー供給といった多様な機能を複数のチップで実現、それらを 3 次元的にヘテロ集積したインテリジェントチップへの期待が高まっている。これにより、自動車の自動運転システムや、小型の人工知能を持ったロボット、あるいは我々の活動を支援してくれるナビゲータのようなシステムが可能になる。健康・医療の領域でもナノシステムは大きなイノベーションを引き起こす可能性を有している。DNA や細胞などの生物由来の物質を半導体チップ上に搭載し、生命科学の膨大な知の集積と最先端の半導体技術、電子・光技術との融合から生まれるイノベーションへの期待は大きい。このため、マイクロ流路などの人工的なナノ構造体上に、生物由来の物質を持ち込み、DNA、単一細胞、単一分子の検出・同定を行うおうとする研究、ナノ粒子を DDS の輸送物質として活用しようとする研究、さらには足場材料を導入する事で iPS 細胞を固定し、所望の組織に分化誘導しようとする研究など

がなされており、これらは診断・医療・創薬の革新を目指している。

図 2-7 には、例として未来の自動車に統合・システム化されていくナノテクノロジー・デバイスの構成要素群を示す。

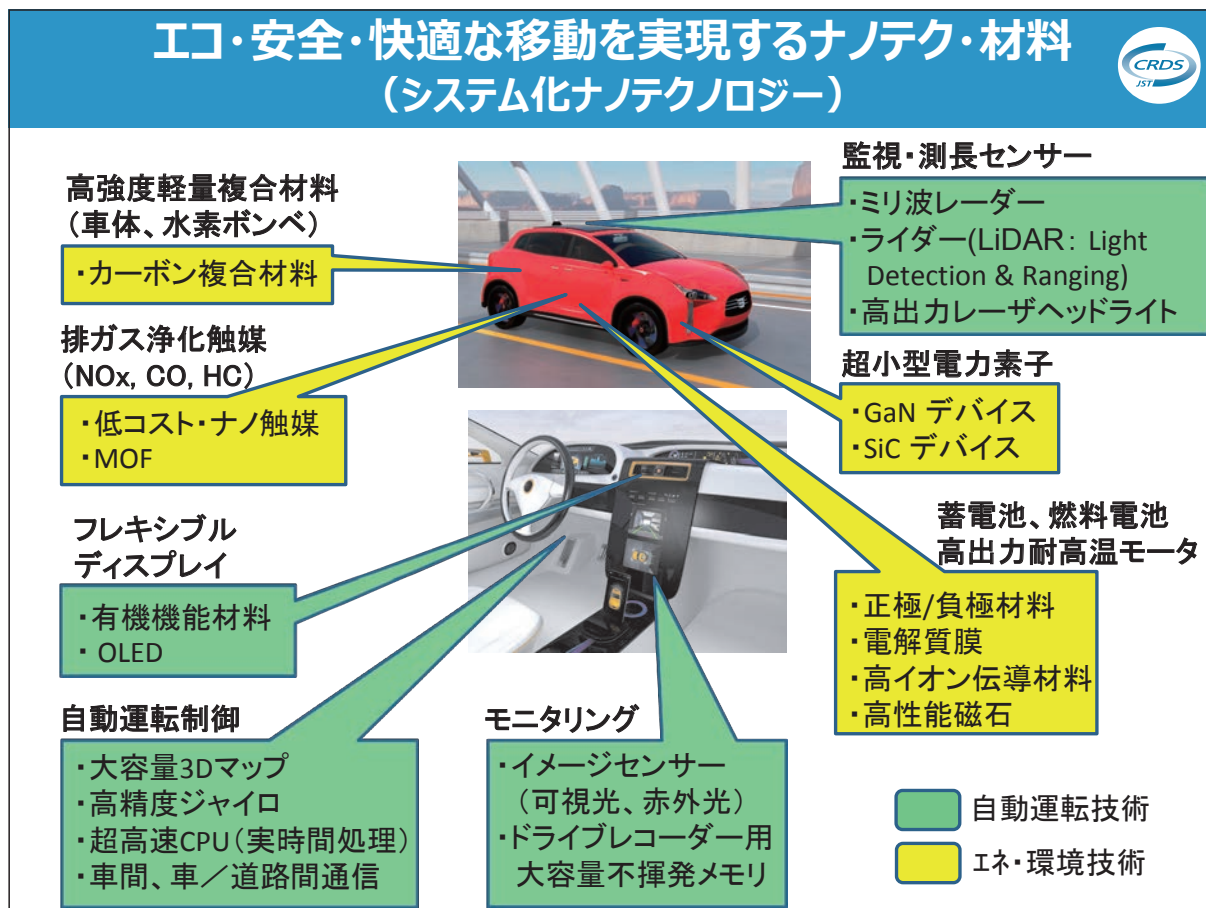


図 2-7 エコ・安全・快適な移動を実現するナノテク・材料（システム化ナノテクノロジー）

2.2.1.2 主要国の基本政策と代表的な研究開発プログラム・プロジェクト

総説と予算

2001 年以降、世界各国で進められてきたナノテクノロジー・材料に関する各種取組の推移を概括的にまとめておく。図 2-8 に、世界主要国の近年のナノテクノロジー・材料に関する国家計画をまとめた。

主要国のナノテク・材料基本政策・国家戦略

日本	◆第5期基本計画では、Society5.0 の実現へ向けた11のシステムの一つとして「統合型材料開発システム」を特定。「素材・ナノテクノロジー」は新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術の一つ。
米国	◆National Nanotechnology Initiative (2001-) -第6次NNI戦略プラン(2016-) 省庁横断テーマ NSI (Nanotechnology Signature Initiative) を更新 -National Strategic Computing Initiative やBRAIN Initiativeと連携し、新コンピューティング開発 ◆Materials Genome Initiative (2011-) -実験ツール、計算機、データの連携により、研究室での新材料の発見から製造までの時間を半減
EU	◆Horizon 2020 (2014-) -Key Enabling Technologies (KETs) として、ナノテクノロジー、先進材料、マイクロ・ナノエレクトロニクス、フォトニクス、バイオテクノロジー、先進製造を選定。 -FET (Future and Emerging Technologies) プロジェクトの一つ、Graphene Flagshipを開始
独	◆Action Plan Nanotechnology 2020 を開始(2016-) -新ハイテク戦略の一環としてBMBFを中心に7省が連携して策定
英	◆UK Nanotechnologies Strategy (2010-) -ビジネス・イノベーション・技能省 (BIS) が中心となった省庁横断の国家ナノテクノロジー戦略 ◆UK COMPOSITES STRATEGY (2009-) -BISを中心に航空機、自動車向けの耐久性が高く軽量かつ高性能な複合材料の開発
仏	◆France Europe 2020 (2013-) -先進材料、ナノエレ、ナノマテリアル、マイクロ・ナノ流体工学が優先領域
中国	◆国家中長期科学技術発展計画綱要 (2006-2020) -先端技術8分野の一つに「新材料技術」、重大科学研究4分野の一つに「ナノ研究」 -第13次5か年計画 2030年を見据えた15の重大科学技術プロジェクトに「重点的新材料」「量子通信・量子コンピュータ」「スマート製造・ロボット」「航空エンジン・ガスタービン」等を指定
韓国	◆第三次科学技術基本計画 (2013-2017) -30重点国家戦略技術の一つに「先端素材技術（無機、有機、炭素等）」 ◆Korea Nanotechnology Initiative (2001-) は第4期目に (2016-2025) -製造業のリーディング技術開発、ナノテク産業のグローバルリーダー

図 2-8 主要国のナノテク・材料基本政策・国家戦略

2001 年に、米国、日本、韓国、次いで台湾、中国、EU がそれぞれ独自のナノテクノロジー国家計画を立ち上げた。米国ではナノテクノロジーをイノベーションのエンジンとして位置付けた。2006 年以降、アジア諸国、BRICs など、多くの新興国が同様にナノテクノロジー国家計画を策定し、イノベーションを目指して先端科学技術に国家投資を開始した。マレーシア、ベトナム、タイ、イランもナノテクノロジー国家計画を策定し、現在は数十か国に達している。一方で、各国における科学技術政策あるいは産業政策の、基本構造やデータ集計方法の違いから、「ナノテクノロジー政策・R&D 投資」として切り出して比較をおこなうことが難しくなっている。

LuxReserch 社によると、世界のナノテクノロジーへの官民 R&D 投資は、米国が最大であり、米国では企業による投資が増加している。その一方、投資家による投資は減少傾向にある。国家投資額の規模は米国が約 17 億ドル（2014 年）で、その後はやや減少しているが 2016 年度は 15 億ドル規模を堅持しており、ナノテク R&D 政策としては現在も世界最大である。2 位は日本の 15 億ドル（2014 年）としている。ただし日本は、ナノ

テクノロジー・材料分野の科学技術予算を広く計上しているため、他国と事情が異なることに留意が必要である。EU は加盟各国分も合わせると全体のナノテク公的投資は約 25 億ドル（2014 年）にのぼり、この 2 年間で 9.8% 増加している。また、世界におけるナノテクによって実現された製品（nano-enabled products）は、この 2 年間で 8,500 億ドル／年から 1.6 兆ドル／年に急成長したとしている。

以下に、各国個別にナノテクノロジー・材料分野の政策、研究開発・産業化の動向、現状を概括する。

(1) 日本

■基本政策

2000 年以降、世界の主要国でナノテクノロジーへの大規模な国家投資戦略がスタートしたが、それに先立ち日本は、1980 年代から科学技術庁と通商産業省が重層的にナノテクノロジーの国家プロジェクトを推進してきた。具体的には、科学技術庁所管の新技術事業団（現在の科学技術振興機構）が 1981 年から創造科学技術推進事業（後に戦略的創造研究推進事業 ERATO）として始めた林超微粒子プロジェクトと他 10 件以上のプロジェクト、通商産業省所管の新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が大型プロジェクトとして 1992 年に発進させた「原子分子極限操作技術」（アトムテクノロジープロジェクト）がある。これらはいずれも、日本が科学技術戦略を本格的に構築し始めた第 1 期科学技術基本計画策定（1996 年）以前にスタートしたプロジェクトである。日本では上記の経緯があったため、米国ナノテクノロジーイニシアティブ（NNI）の発進とほぼ同時期にナノテクノロジー・材料の国家計画が比較的順調にスタートした。第 2 期（2001 ～ 2005 年度）と第 3 期（2006 ～ 2010 年度）においては、重点推進 4 分野および推進 4 分野が選定され、「ナノテクノロジー・材料」は重点推進 4 分野の一つとして、ライフサイエンス、情報通信、環境とともに、10 年間にわたって重点的な資源配分がおこなわれた。

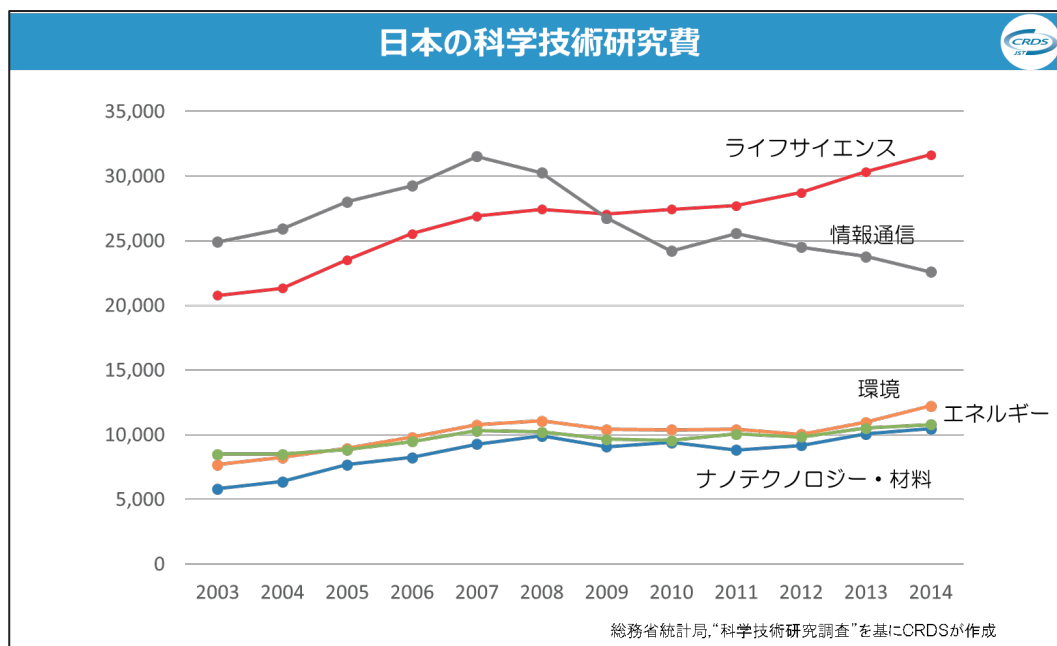


図 2-9 日本の科学技術研究費（縦軸／千円、横軸／年）

第 3 期（2006-2010 年度）は、5 領域「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」で重要な研究開発課題が設定・推進された。そこでの主な成果・取組は以下のとおりである¹。

- ・国家基幹技術「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
- ・日本初のオープンイノベーション拠点「つくばイノベーションアリーナ」（TIA - nano）による産学官連携の強化
- ・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）の着実な進捗等

以上、日本が連綿として継続してきたナノテクノロジーへの投資効果がようやく諸所に顔を見せ始めたことを示している。

第 4 期（2011-2015 年度）においては、科学技術の重点領域型から社会的期待に応える課題解決型（トップダウン型）の政策へと舵が切られ、その中でナノテクノロジー・材料領域は、政策課題三本柱の横串的横断領域と位置付けられた。しかし、このような横断領域は独立したイニシアティブとして設定されなかったため、国際的にも「日本では基本政策においてナノテクノロジーが重点化されなくなった」と諸外国が認識する事態が一時期あった。その後、科学技術イノベーション総合戦略 2014 では、ナノテクノロジーは産業競争力を強化し政策課題を解決するための分野横断的技術として重要な役割を果たすという旨が明記された。また、同総合戦略 2015 では、「重点的に取り組むべき課題」の一つである超スマート社会の実現に向けた共通基盤技術や人材の強化、において、センサ、ロボット、先端計測、光・量子技術、素材、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー等の共通基盤的な技術として、改めて位置付けが明確化された。

第 5 期（2016-2020 年度）では、過去 20 年間の科学技術基本計画の実績と課題として、研究開発環境の着実な整備、ノーベル賞受賞に象徴されるような成果が上げられた一方で、科学技術における「基盤的な力」の弱体化、政府研究開発投資の伸びの停滞などが指摘された。この中で、ナノテクノロジーは「新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術」の一つに位置づけられた。超スマート社会「Society5.0」への展開を考慮しつつ 10 年程度先を見据えた中長期的視野から、高い達成目標を設定し、その目標の実現に向けて基盤技術の強化に取り組むべきとしている。さらに、基礎研究から社会実装に向けた開発をリニアモデルで進めるのではなく、スパイラル的な産学連携を進めることで、新たな科学の創出、革新的技術の実現、実用化および事業化を同時並行的に進めることができる環境整備が重視された。Society5.0 の実現に貢献する 11 のシステムが特定され、その一つとして「統合型材料開発システム」がある。計算科学・データ科学を駆使した革新的な機能性材料、構造材料等の創製を進めるとともに、その開発期間の大幅な短縮を実現することを目標としている。そこで注目される施策が、「統合型材料開発システム」に関する 3

1 【参考文献】総合科学技術会議「分野別推進戦略総括的フォローアップ（平成 18～22 年度）」平成 23 年 3 月より

府省連携施策である。内閣府 SIP「革新的構造材料」（2014年度-）における「マテリアルズインテグレーション」、文部科学省・JST「イノベーションハブ構築支援事業」の一つのとして NIMS に発足した「情報統合型物質・材料開発イニシアティブ（MI²I）」および JST のさががけ「理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズ・インフォマティクス」領域（いずれも 2015 年度-）、経済産業省・NEDO・産業技術総合研究所を中心とする「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト」（2016 年度-）である。これら 3 府省のプロジェクトが補完的に研究開発を実施していく体制が、総合科学技術イノベーション会議 ナノテクノロジー・材料基盤技術分科会を通じて構築された。

■研究開発プロジェクト

現在の日本の研究開発政策のトレンドを把握するために、日本における主な研究開発プログラム・プロジェクトを俯瞰する。図 2-10 から 2-16 に、ナノテクノロジー・材料分野に関連するプロジェクトを抜粋している。各図では、本報告書の分野分類にしたがって、各プロジェクトについての分野分類を付している（複数の分野にまたがるものについては、主となる分野に分類している）ことに留意いただきたい。

内閣府に設置された総合科学技術・イノベーション会議では、府省・分野の枠を超えて基礎研究から出口（実用化・事業化）までを見据えて図 2-10 のような研究開発プロジェクトを実施している。我が国の産業にとって将来的に有望な市場を創造し、日本経済の再生を果たしていくという趣旨で、平成 26 年度より、「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」を開始した。同じく平成 26 年度より、実現すれば産業や社会のあり方に大きな変革をもたらすハイリスク・ハイインパクトな挑戦的研究開発を推進する「革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）」を開始している。

日本の大型研究開発プロジェクト（総合科学技術・イノベーション会議） ※ナノテク・材料関連を抜粋					
戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）（平成26年度～）			革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）（平成26年度～）		
環境・エネルギー	革新的燃焼技術	杉山（トヨタ自動車）	ライフ・ヘルスケア	進化を超える極微量物質の超迅速多項目センシングシステム	宮田（名大）
	次世代パワーエレクトロニクス	大森（三菱電機）		豊かで安全な社会と新しいバイオものづくりを実現する人工細胞リアクタ	野地（東大）
社会インフラ	インフラ維持管理・更新・マネジメント技術	藤野（横国大）	社会インフラ	核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化	藤田（東芝）
	革新的構造材料	岸（ISMA）		無充電で長期間使用できる究極のエコIT機器の実現	佐橋（東芝）
共通基盤	革新的設計生産技術	佐々木（日立製作所）	情報通信・エレクトロニクス	量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現	山本（NI）
				超高機能構造タンパク質による素材産業革命	鈴木（小島プレス）
			共通基盤	超薄膜化・強化「しなやかなタフポリマー」の実現	伊藤（東大）
				ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現	佐野（東芝）
				イノベティブな可視化技術による新成長産業の創出	八木（キヤノン）

図 2-10 日本の大型研究開発プロジェクト（SIP、ImPACT）

文部科学省では、世界トップレベルの研究推進や産学連携促進・イノベーションの創出といった観点から研究拠点を整備している（図 2-11）。先端的な融合領域において、大きな社会・経済的インパクトのある成果を創出する拠点の形成を支援することを目的として、平成 18 年度から「先端融合領域イノベーション創出拠点形成プログラム」を開始した。また、世界トップレベルの研究拠点形成を目指すとして、平成 19 年度から「世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）」を実施している。WPI 拠点のうち、京都大学 iCeMS、物質・材料研究機構 MANA、東北大学 AIMR は平成 28 年度で補助金が終了するが、平成 28 年 11 月に開催された第 3 回研究力強化に向けた研究拠点の在り方に関する懇談会（主査：平野眞一・上海交通大学講席教授）において WPI の長期計画や補助金終了後の措置等について議論がなされている。また平成 25 年度より、将来社会のニーズから導き出されるあるべき社会の姿、暮らしの在り方を設定し既存分野・組織の壁を取り払い、企業だけでは実現できない革新的なイノベーションを産学連携で実現することを目的とした「革新的イノベーション創出プログラム（COI STREAM）」を開始している。

日本の主な研究拠点型プロジェクト（文部科学省） ※ナノテク・材料関連を抜粋					
革新的イノベーション創出プログラム(COI) （平成25年度～）			世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI) (平成19年度～)		
ライフ・ヘルスケア	さりげないセンシングと日常人間ドックで実現する理想自己と家族の絆が導くモチベーション向上社会創生拠点	東芝、東北大学	環境・エネルギー	カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 (I2CNER)	ソフロニス(九大)
	スマートライフケア社会への変革を先導するものづくりオープンイノベーション拠点	川崎市産業振興財団	ライフ・ヘルスケア	物質・細胞統合システム拠点 (iCeMS)	北川 (京大)
	自分で守る健康社会拠点	東京大学		トランスフォーメティブ生命分子研究所 (ITbM)	伊丹 (名大)
		人間力活性化によるスーパー日本人の育成拠点	パナソニック、大阪大学	共通基盤	国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (MANA)
社会インフラ	革新材料による次世代インフラシステムの構築	大和ハウス工業、金沢工業大学		東北大学原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR)	小谷 (東北大)
	世界の豊かな生活環境と地球規模の持続可能性に貢献するアクア・イノベーション拠点	日立製作所・インフラシステム社、信州大学			
情報通信・エレクトロニクス	活力ある生涯のためのLast 5Xイノベーション拠点	パナソニックプロダクションエンジニアリング、京都大学	情報通信・エレクトロニクス	先端融合領域イノベーション創出拠点形成プログラム (平成18年度～)	
	「以心電心」ハビネス共創社会構築拠点	東京工業大学		フォトニクス先端融合研究拠点	河田 (阪大)
共通基盤	共進化社会システム創成拠点	九州大学			マイクロシステム融合研究開発拠点
	コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点	東京大学		光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点	並木 (産総研)

図 2-11 日本の大型研究開発プロジェクト（COI、WPI、等）

その他、文部科学省、経済産業省では、国が支援すべき特定のテーマについて拠点形成やネットワーク化、産学連携、産業化などを促進する様々な観点からプログラムを推進している（図 2-12）。このなかで注目されるのは、特定国立研究開発法人に指定された物質・材料研究機構を中核に平成 29 年度から開始する、革新的材料開発力強化プログラムである。

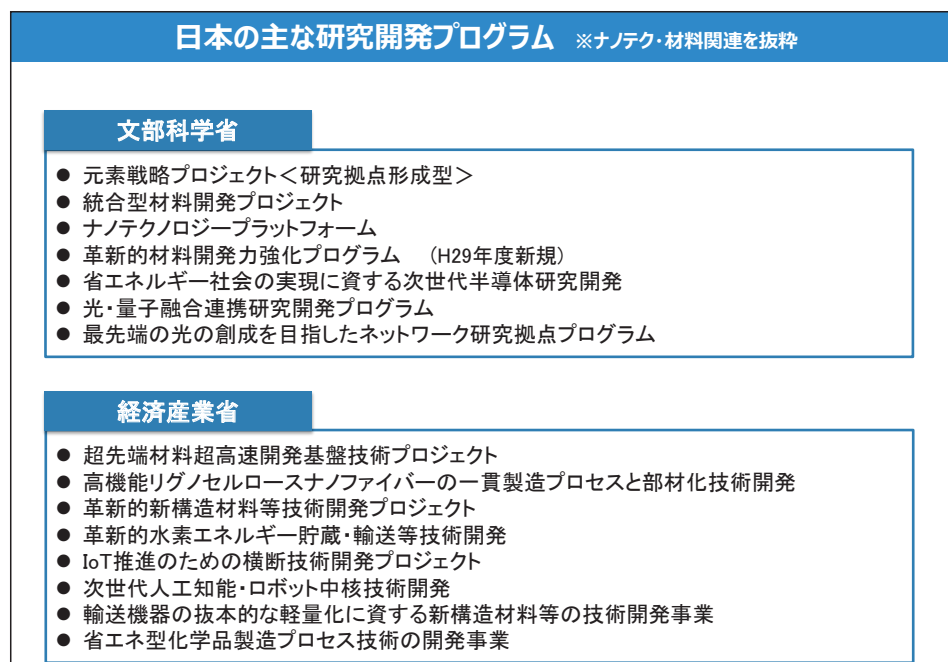


図 2-12 日本の主な研究開発プログラム（文部科学省、経済産業省）

JST の戦略的創造研究推進事業は、日本が直面する重要な課題の達成に向けた基礎研究を推進し、科学技術イノベーションを生み出す創造的な新技術を創出することを目的にしたトップダウン型の競争的資金である。その中で「CREST」では科学技術イノベーションを生み出す革新的技術シーズを創出するためのチーム型研究を推進し、「ERATO」では卓越したリーダーの下、独創性に富んだ課題達成型基礎研究を推進し、新しい科学技術の源流を創出することを目的としている。いずれのプログラムも高い能力と大きな可能性をもった研究者が、挑戦すべきと考える研究テーマに自由に没頭できる体制を提供している。

近年のJST戦略的創造研究推進事業（CREST）プロジェクト ※ナノテク・材料関連を抜粋														
H21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
■ 太陽光を利用した独創的グリーンエネルギー生成技術の創出 研究総括：山口 真史（豊田工業大学）														
■ 元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出 研究総括：玉尾 皓平（理化学研究所）														
■ エネルギー高効率利用のための相界面科学 研究総括：花村 克悟（東京工業大学）														
■ 新機能創出を目指した分子技術の構築 研究総括：山本 尚（中部大学）														
■ 超空間制御に基づく高度な特性を有する革新的機能素材等の創製 研究総括：瀬戸山 亨（三菱化学）														
■ 素材・デバイス・デバイス融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成 研究総括：桜井 貴康（東京大学）														
■ 再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出 研究総括：江口 浩一（京都大学）														
■ 二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出 研究総括：黒部 篤（東芝）														
■ 統合1細胞解析のための革新的技術基盤 研究総括：菅野 純夫（東京大学）														
■ 多様な天然炭素資源の活用による革新的触媒と創出技術 研究総括：上田 渉（神奈川大学）														
■ 新たな光機能や光物性の発見・利活用を基軸とする次世代フォトニクスの基盤技術 研究総括：北山 研一（光産業創成大学院大学）														
■ 微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出 研究総括：谷口 研二（大阪大学）														
■ 量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出 研究総括：荒川 泰彦（東京大学）														
■ 計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測・解析手法の開発と応用 研究総括：雨宮 慶幸（東京大学）														

図 2-13 近年の JST 戦略的創造研究推進事業（CREST）プロジェクト

近年のJST戦略的創造研究推進事業（ERATO）プロジェクト ※ナノテク・材料関連を抜粋										
H23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
■ 秋吉バイオナノトランスポーター 研究総括：秋吉 一成（京都大学）										
■ 金井触媒分子生命 研究総括：金井 求（東京大学）										
■ 染谷生体調和エレクトロニクス 研究総括：染谷 隆夫（東京大学）										
■ 浅野酵素活性分子 研究総括：浅野 泰久（富山県立大学）										
■ 安達分子エキシトン工学 研究総括：安達 千波矢（九州大学）										
■ 磯部縮退π集積 研究総括：磯部 寛之（東京大学／東北大学）										
■ 伊丹分子ナノカーボン 研究総括：伊丹 健一郎（名古屋大学）										
■ 美濃島知的光シンセサイザ 研究総括：美濃島 薫（電気通信大学）										
■ 齊藤スピン量子整流 研究総括：齊藤 英治（東北大学）										
■ 百生量子ビーム位相イメージング 研究総括：百生 敦（東北大学）										
■ 山元アトムハイブリッド 研究総括：山元 公寿（東京工業大学）										
■ 中村巨視的量子機械 研究総括：中村 泰信（東京大学）										

図 2-14 近年の JST 戦略的創造研究推進事業（ERATO）プロジェクト

JST では、戦略的創造研究推進事業以外にもイノベーションの創出に向け、特色のある産学連携プログラムを推進している（図 2-15）。「S・イノベ」は JST の基礎研究事業等の成果を基にテーマを設定し、そのテーマのもとで産業創出の礎となりうる技術を実用化に向けて長期一貫してシームレスに研究開発を推進するもの、「産学共創基礎基盤研究プログラム」は産業界で共通する技術的課題（技術テーマ）の解決に資する大学等による基盤研究を推進するもの、「ALCA」は新たな科学的・技術的知見に基づいて温室効果ガス削減に大きな可能性を有する技術を創出するための研究開発を推進するもの、「ACCEL」はイノベーション指向の研究マネジメントにより、技術的可能性の証明・提示及び適切な権利化まで推進するものである。さらに平成 29 年度からは新規事業として、経済・社会的にインパクトのあるターゲット（出口）を見据えて技術的にチャレンジングな目標を目指した研究開発をおこなう「未来社会創造事業」が開始される。

近年のJST諸事業		※ナノテク・材料関連を抜粋	
S・イノベ（戦略的イノベーション創出推進プログラム）テーマ		産学共創基礎基盤研究プログラム テーマ	
有機材料を基礎とした新規エレクトロニクス技術の開発		革新的次世代高性能磁石創製の指針構築	
フォトリソグラフィによる先進情報通信技術の開発		革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築	
超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出		テラヘルツ波新時代を切り拓く革新的基盤技術の創出	
スピン流を用いた新機能デバイス実現に向けた技術開発			
ALCA テーマ		ACCEL テーマ	
太陽電池および太陽エネルギー利用システム		スローライト構造体を利用した非機械式ハイレゾ光レーダーの開発	馬場（横国大）
超伝導システム		元素間融合を基軸とする物質開発と応用展開	北川宏（京大）
蓄電デバイス		近接場結合集積技術による革新的情報処理システムの実現と応用展開	黒田（慶応大）
耐熱材料・鉄鋼リサイクル高性能材料		濃厚ポリマーブラシのレジリエンス強化とトライボロジー応用	辻井（京大）
バイオテクノロジー		超活性固定化触媒開発に立脚した基幹化学プロセスの徹底効率化	魚住（分子研）
革新的省・創エネルギー化学プロセス		ダイヤモンド電極の物質科学と応用展開	栄長（慶應大）
革新的省・創エネルギーシステム・デバイス		PSD法によるフレキシブル窒化半導体デバイスの開発	藤岡（東大）
ACT-C（低エネルギー、低環境負荷で持続可能なものづくりのための先導的な物質変換技術の創出）		縦型BC-MOSFETによる三次元集積工学と応用展開	遠藤（東北大）
		PCPナノ空間による分子制御科学と応用展開	北川進（京大）
		フォトリソグラフィの高輝度・高出力化	野田（京大）
		自己組織化技術に立脚した革新的分子構造解析	藤田（東大）
		エレクトライドの物質科学と応用展開	細野（東工大）

図 2-15 近年の JST 諸事業

NEDOの主要プロジェクト ※ナノテク・材料関連を抜粋						
太陽光発電	太陽光発電多用途実証プロジェクト	25-28	エレクトロニクス	次世代プリントエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発	22-30	
	太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト	26-30		超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発	25-29	
	太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト	26-30		次世代スマートデバイス開発プロジェクト	25-29	
	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発	27-31		クリーンデバイス社会実装推進事業	26-28	
燃料電池・水素	水素利用技術研究開発事業	25-29	社会インフラ	IoT技術開発加速のためのオープンイノベーション推進事業	28-29	
	固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発	25-29		IoT推進のための横断技術開発プロジェクト	28-32	
	水素利用等先端研究開発事業	26-29		インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト	26-30	
	水素社会構築技術開発事業	26-32		航空機用先進システム実用化プロジェクト	27-31	
蓄電池	固体高分子形燃料電池利用高度化技術開発事業	27-31		ロボット活用型市場化適用技術開発プロジェクト	27-31	
	リチウムイオン電池応用・実用化先端技術開発事業	24-28		次世代人工知能・ロボット中核技術開発	27-31	
	先進・革新蓄電池材料評価技術開発	25-29		低炭素社会を実現するナノ炭素材料実用化プロジェクト	22-28	
パワーエレクトロニクス	革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発(RISINGII)	28-32		次世代材料評価基盤技術開発	22-29	
	低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト	21-31		非可食性植物由来化学品製造プロセス技術開発	25-31	
触媒	二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発	26-33		基盤	革新的新構造材料等研究開発	26-34
	有機ケイ素機能性化学品製造プロセス技術開発	26-33			次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発	26-33
		次世代構造部材創製・加工技術開発			27-31	
		高輝度・高効率次世代レーザー技術開発			28-32	
		植物等の生物を用いた高機能品生産技術開発	28-32			
		超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト	28-33			
		次世代型産業用3Dプリンタの造形技術開発・実用化事業	26-30			
		高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業	29-34			

図 2-16 NEDO の主要プロジェクト

日本が国として推進している上記のプログラム・プロジェクトを包括的に見ると、特に重点的に投資している研究開発領域例として、蓄電デバイス、パワーエレクトロニクス、触媒（化成品合成用触媒、人工光合成・光触媒、燃料電池など）、構造材料、センサデバイス（ヘルスケア、環境、インフラなど）、元素戦略などのキーワードが浮かびあがってくる。このうちいくつかを次の項で概説する。

●データ駆動型物質・材料開発（マテリアルズ・インフォマティクス）

2015 年 7 月、JST は「国立研究開発法人を中核としたイノベーションハブの構築支援事業」として、物質・材料研究機構（NIMS）を拠点とした「情報統合型物質・材料開発イニシアティブ（MI²I）」を採択した。さらに同年 10 月には JST 戦略的創造研究推進事業（さきがけ）において「理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズインフォマティクス」研究領域がスタートしている。前者では NIMS は、新しい物質・材料研究を進めるオープンイノベーションのハブとして、データプラットフォームの構築を進め、計算科学、データ科学のツールを整備、公開していくとともに、ユーザとなる産業界を中心にコンソーシアムを立ち上げた。コンソーシアムの活動に参加する会員は、情報統合型の研究手法を確立するためにデータやツールを使い、研究手法を早期に実現するためのフィードバックを行うこととなっている。後者は、若手・中堅の研究者が、個人の発想で研究を進めるもので、物性物理や化学・材料分野の理論、計算、実験家の他、情報科学、数理科学の研究テーマもいくつか進められている。

これらのプロジェクトは、内閣府 SIP「革新的構造材料」（2014～2018 年度）の中の研究開発項目の一つ「マテリアルズインテグレーション」、経済産業省・産業技術総合

研究所を中心に実施している「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト」（2016 ～ 2021 年度）との間で実務者を加えた 3 府省連絡会議等を適宜開催し、各事業の進捗や成果の共有をすることで補完的に研究開発を実施することとしている。

●蓄電池

現行リチウムイオン電池の高性能化における開発競争に加え、次世代の革新的な蓄電池を目指した研究が進められている。既存の蓄電池が到達できないエネルギー密度を有する電池を、設計・製造するための基盤技術体系を構築することが目標になっている。

NEDO・RISING II（革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発）では、京都大学と産業技術総合研究所に研究拠点を置き、大学・独法・企業の産官学連携による基礎から応用に至るまでの革新電池開発プロジェクトが進行中である。SPRING-8、J-PARC などの最先端大型研究施設の共同利用などを通じて、基礎研究と次世代電池のイノベーションを All Japan 体制で推進している。また、JST の ALCA・SPRING（先端的低炭素化技術開発 一次世代蓄電池特別重点技術領域）でも、物質・材料研究機構（NIMS）に共同研究拠点を置き国内大学・独法の研究者を集結し 4 つの重点課題にグループ編成した大規模な組織的研究開発が平成 25 年度からスタートしている。このような国内の大多数の電池関連研究者が参画した産学連携研究開発は、国際的に見ても最大規模の取り組みである。

●パワーエレクトロニクス

現在普及しているパワー半導体は半導体にシリコン（Si）を用いたものであり、微細化技術の進展、ウェハ品質の向上、低温化など新しい作製プロセスの導入やデバイス構造改良（スーパージャンクション MOSFET、IGBT の世代向上など）により、性能を向上させている。一方で、Si の材料定数による限界からデバイス性能の限界が広く指摘されており、原理的に高耐圧化と低オン抵抗の両立が可能な炭化シリコン（SiC）や窒化ガリウム（GaN）など Si よりも禁止帯幅（バンドギャップ）の広い半導体を用いたパワー半導体の早期実用化が望まれている。これらの実用化のためには、結晶品質向上、ウェハの大口径化、物性制御、デバイス構造、作製プロセス、高精度の熱設計・パワーマネージメント、モジュール・回路技術、周辺部材・受動部品などの研究開発課題が必要となっている。

ワイドギャップパワー半導体の研究開発拠点としては、つくばイノベーションアリーナ（TIA）があり、産業技術総合研究所の蓄積してきた SiC の基盤技術や試作ラインを活用した民活型オープンイノベーション共同研究体「つくばパワーエレクトロニクス・コンステレーションズ（TPEC）」による開発が進められている。また、JST のスーパークラスタープログラムの中で、京都地区および愛知地区をコアクラスターとして SiC および GaN の結晶・デバイス研究の地域を越えた連携が図られている。さらに、2016 年には文部科学省の「省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発」事業による結晶創製拠点（名古屋大学）や、名古屋大学と産総研との窒化物半導体先進デバイスオープンイノベーションラボラトリ（GaN-OIL）が発足し、GaN デバイスの研究加速が行われている。

パワー半導体に関する大型のプロジェクトとしては、内閣府の FIRST プログラム「低炭素社会創成へ向けた炭化珪素（SiC）革新パワーエレクトロニクスの研究開発」が 2013 年度で終了したが、2014 年度から戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）に基づく「次世代パワーエレクトロニクス」が開始された。ここでは、SiC、GaN、酸化ガ

リウム (Ga_2O_3)、ダイヤモンドについて、基板育成、エピタキシャル成長、デバイス、回路モジュール、パッケージ、熱設計などの広範囲な技術開発に関する産学連携プロジェクトが進められている。このプログラムは、主に SiC のウェハ・パワーデバイス・モジュールの開発を目的にしている経済産業省の「次世代パワーエレクトロニクス技術開発プロジェクト」（2009～2019 年）と連携して進められる。

●構造材料

金属材料に関しては、次世代金属構造材料開発への道筋を作る JST 産学共創基礎基盤研究「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」（平成 22 年度～）、主に発電・輸送機器用蒸気・ガスタービン等のための耐熱材料・コーティング技術開発を推進する JST 先端的低炭素化技術開発（ALCA）「耐熱材料・鉄鋼リサイクル高性能材料」（平成 23 年度～）、構造材料に関して拠点型で希少元素を用いない材料開発を目指す文部科学省「元素戦略プロジェクト（研究拠点形成型）」（平成 23 年度～）が進められている。

平成 26 年度からの準備期間を経て、NIMS に構造材料研究拠点が平成 28 年度に正式組織として発足した。対象材料は、鉄鋼、非鉄、セラミックス、炭素繊維複合材料（CFRP）など、また、それらを接合する技術として溶接、接着剤、さらには長期損傷評価技術、ナノスケール組織・力学解析技術の開発を行っている。平成 28 年度から開始した運営費交付金プロジェクトでは、粒界、異相界面などのキャラクタリゼーションとマクロ特性との関係に関する基盤研究を 7 年間の予定で展開中である。

CFRP に関しては、新たな炭素繊維製造プロセスに必要な基盤技術を確立する経済産業省「革新炭素繊維基盤技術開発」（平成 23 年度～）、航空機用 CFRP 構造ヘルスマonitoring 技術の実用化や製造プロセスモニタリング技術の開発を進める経済産業省「次世代構造部材創製・加工技術開発（複合材構造）」（平成 25 年度～）が進められている。また文部科学省の革新的イノベーション創出プログラム（COI STREAM）では、金沢工業大学を中核機関として「革新材料による次世代インフラシステムの構築」が開始された。

構造材料を包括的に扱うプロジェクトとしては次の二つを挙げる。一つ目は、経済産業省未来開拓研究「革新的新構造材料等技術開発」（平成 25 年度～）である。これは自動車を中心とする輸送機器の抜本的な軽量化を目的として、鉄鋼、非鉄金属（アルミ、チタン、マグネシウム）、CFRP およびこれらの接合技術を開発している。その推進のために、「新構造材料技術研究組合」（ISMA）が設立され、37 企業、1 大学、1 国研、計 39 機関（2016 年度末時点）が会員として参画している。鋼板開発は強度 1.5GPa、伸び 20%を目標とし、非鉄金属についてもおのおの合金設計、プロセス技術開発により高性能化と低コスト化の両立を目指している。CFRP については、量産車の超軽量化のために、熱可塑性樹脂を用いた CFRTP（Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastics）を主に開発している。また、接合技術として各種溶接に加え、摩擦拡散接合（FSW）に取り組み、さらに接着技術にも着手した。

二つ目は、平成 26 年度に開始された内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「革新的構造材料」である。これは、航空機・エネルギー機器（特に前者）の高効率化のための、耐熱・高比強度材料およびそのプロセスの技術開発を目的とし、31 企業、37 大学、10 国研・公的機関、計 78 機関（2016 年 10 月末時点）が参画している。プロジェクトを

構成する 4 つの領域および主な開発対象は次の通りである。A 領域（樹脂・FRP）：航空機エンジンファン・ファンケース用 CFRTP、機体用 CFRP の脱オートクレーブ成形技術、高生産性強靱材など。B 領域（耐熱合金・金属間化合物）：航空機エンジン用部材（圧縮機、タービンのディスク、ブレード等）用のチタン合金、ニッケル基合金、チタンアルミの鍛造、鋳造、粉末冶金、合金設計など。C 領域（セラミックスコーティング）：次世代タービンブレード用材料として期待されるセラミックス基複合材料（CMC）への耐環境性セラミックスコーティング（EBC）など。D 領域（マテリアルズインテグレーション（MI））：数値シミュレーション、理論・経験、実験、データベース、データ科学を融合的に活用し、計算機上でプロセス・組織・特性・性能をつなぐことで材料開発にかかる時間を大幅に短縮する統合型材料開発システム。

●元素戦略

JST 研究開発戦略センターが発行した戦略イニシアティブ「元素戦略」（2007 年 10 月）をきっかけに、同年に初の府省連携施策である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）が開始された。その後、2010 年度には文部科学省において戦略目標「レアメタルフリー材料の実用化及び超高保磁力・超高靱性等の新規目的機能を目指した原子配列制御等のナノスケール物質構造制御技術による物質・材料の革新的機能の創出」が設定された。これをもとに JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出」研究領域（研究総括：玉尾皓平、理化学研究所・研究顧問）およびさがけ「新物質科学と元素戦略」研究領域（研究総括：細野秀雄、東京工業大学・教授）が発足した。2012 年度には、文部科学省の元素戦略プロジェクト〈研究拠点形成型〉が 10 年事業としてスタートし、経済産業省や NEDO の関連プロジェクトとの間で、ガバニング・ボードが設置され、両省が連携して研究開発を進めていくこととなっている。これらの一連の取り組みの顕著な成果として、2016 年 7 月に大同特殊製鋼と本田技研工業が、重希土類元素を使わないネオジム磁石の開発に成功したことを共同発表し、同年発売のハイブリッド自動車に既に採用している。さらに、同年 11 月には東芝と東芝マテリアルが、重希土類フリー高鉄濃度サマリウムコバルト磁石の開発に成功し、サンプル出荷を開始したことを共同発表した。また、2011 年より日米欧の 3 極による Trilateral Conference on Critical Materials が開催され、希少金属の代替・低減技術やリサイクル技術に関する議論が継続して行われている。特に欧州においては、Horizon 2020 の支援の下、原材料資源に関する技術先進国もしくは鉱物資源保有国である米国、カナダ、オーストラリア、南アフリカ、日本との国際協力の促進も含め、欧州の原材料資源戦略策定や政策提言、ファンディングを実施する国際機関設立を目指した活動（International Raw Materials Observatory : INTRAW）が活発化している。

●人工光合成、CO₂ 資源化

NEDO「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」プロジェクト（平成 26 年度～平成 33 年度）においては、太陽光と水から得られた水素と CO₂ からプラスチック原料等の基幹化学品を製造するという植物の光合成プロセスの一部を模した、化石資源に頼らない革新的な化学品製造プロセスの実用化を目指して、東京大学の堂免らが人工光合

成化学プロセス技術研究組合に参画する企業とともに太陽エネルギーにより水から水素を製造するためのエネルギー変換効率の高い光触媒の研究を行っている。平成 28 年度に行われたプロジェクトの中間報告において、太陽エネルギー変換効率 3%を超えたことを報告しており、最終的には 10%を超える効率を目指している。また、プロジェクトでは Z スキーム型粉末光触媒をシート状に製膜したものを用い、水を水素と酸素に分解することにも成功している。これは水素発生光触媒粉末と酸素発生光触媒粉末をシートに塗布しただけで、外部回路を用いず、光によって水を水素と酸素に分解するものであり、光電気化学的な電極や、太陽電池を組み込んだ光電極とは大きく異なるものである。

(2) 米国

■基本政策

● National Nanotechnology Initiative : NNI²

20 省庁が参加する省庁横断の国家イニシアティブであり、大統領府に存在する OSTP (Office of Science and Technology Policy) に設置された「NSET (Nanoscale Science, Engineering, and Technology Subcommittee)」で、OMB (行政管理予算局) も参加の下、企画・推進されている。2001～2005 年度の第 1 次 NNI 戦略プランに始まり、2016 年度から第 6 次の新たな NNI 戦略プランが発進している。戦略目標は一貫して、①世界トップの知識・技術創出、②社会・産業への技術移転支援、③教育、将来の熟練労働力の確保、R&D インフラ整備、④ EHS・ELSI 対策による責任あるナノテクノロジー開発、である。

NNI では、2001 年から 2016 年予算までの累計で、230 億ドル以上が投じられてきた。2017 年度予算は約 14 億ドル（要求額）であり前年から微減である（図 2-17）。

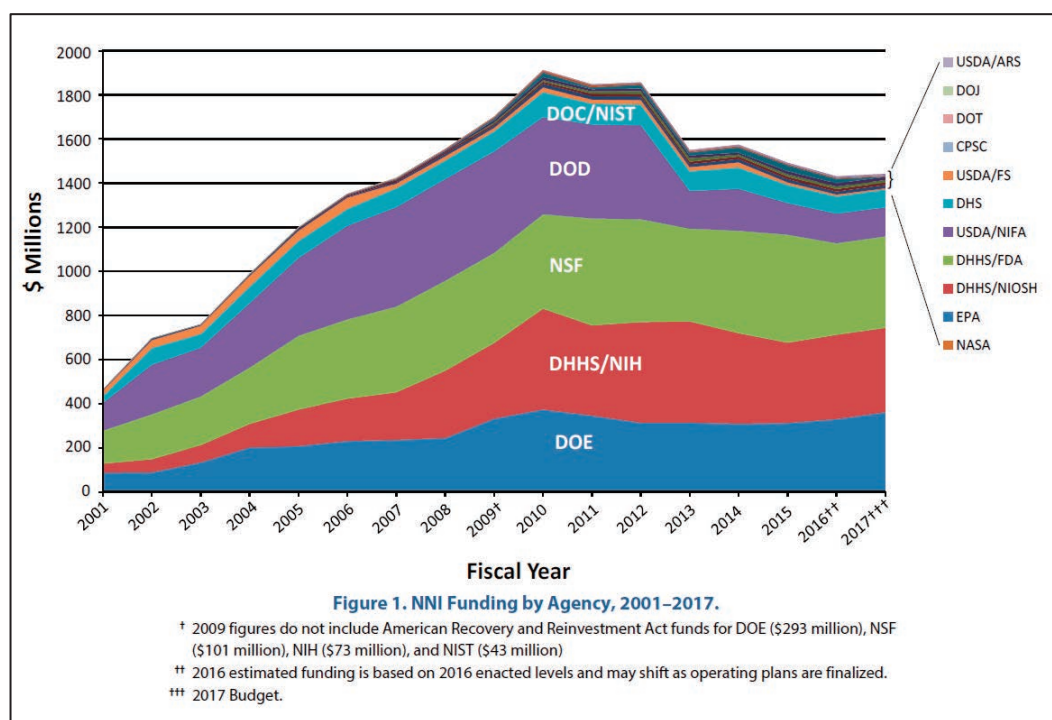


図 2-17 米国 NNI の省庁別予算推移

2 【参考文献】

- ◇ NSTC NSET “NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE STRATEGIC PLAN” February 2016
- ◇ OSTP “THE NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE Supplement to the President’s 2017 Budget”
- ◇ PCAST “Nanotechnology: Anniversary of PCAST Report, and A Grand Challenge is Born”
- ◇ A Federal Vision for Future Computing: A Nanotechnology-Inspired Grand Challenge

NNI の投資はプログラム構成エリア（PCA: Program Component Areas）への戦略的な配分比率に従って実施されてきた。NNI の戦略面での変化は、当初 7 項目であった PCA の中で EHS（環境、健康、安全）を 2009 年から独立させて 8 項目にし、さらに 2015 年度からは図 2-18 のように NSI（Nanotechnology Signature Initiative）を強化する項目として定めた。これは 2014 年に策定した NNI 戦略プランにもとづく変更である。

Program Component Areas in the NNI	
1. Nanotechnology Signature Initiatives (NSIs)	
(1) Nanotechnology for Solar Energy Collection and Conversion	
(2) Sustainable Nanomanufacturing	
(3) Nanoelectronics for 2020 and Beyond	
(4) Nanotechnology Knowledge Infrastructure(NKI)	
(5) Nanotechnology for Sensors and Sensors for Nanotechnology	
(new) Water Sustainability through Nanotechnology	
2. Foundational Research	
3. Nanotechnology-Enabled Applications, Devices, and Systems	
4. Research Infrastructure and Instrumentation	
5. Environment, Health, and Safety	

図 2-18 NNI における PCA

NNI 予算の省庁別内訳は、保健福祉省（HHS、大部分が NIH）が 31%で最大で、次に全米科学財団（NSF）とエネルギー省（DOE）が続く。この 3 機関で全体の 80%を占めている。残りが国防総省（DOD）、米国標準技術研究所（NIST）と続き、これら 5 つの省庁・機関で全体の 96%を占めている。2017 年の PCA 別の予算配分は以下のように計画されている。

- Foundational Research (42%)
- Applications, Devices, and Systems (24%)
- Signature Initiatives (11%)
- Infrastructure & Instrument (16%)
- EHS: Environment, Health and Safety (7%)

当初、設定された NSI では、図 2-18 に示す 5 つの戦略を掲げたが、「太陽光エネルギーの収集と変換のためのナノテクノロジー」に関する戦略は、研究開発成果が民間に転用され「投資は成功した」と判断され、NSI としては 2015 年度で終了、替わって新たに「ナノテクノロジーによる持続可能な水」を立てることとしている。水処理・淡水化等の精製技術や、モニタリング技術が候補として挙げられている。NSI は、特に省庁を横断して取組むべきものとされており、NNI におけるこうした省庁横断型施策の連携・調整機能を、NNCO（National Nanotechnology Coordination Office）が担っている。

過去 15 年間にわたり実行されてきた NNI に対し、OSTP の Lloyd Whitman 博士が PCAST（大統領科学技術諮問会議）において総括報告を行った（2015 年 11 月）。そこでは、研究開発によって生み出した知見や技術を商業化していくために、NNI を取り巻く環境を再び活気あるものにしていくことが課題であるとした。そのため、あらゆる分野の団結が必要で、国民への周知と参画、教育、研究開発、環境問題、ナノ関連物質が使用された商品の健康や安全に対するリスク、倫理的、法的、社会的課題を広く知らせ、商業化を促進し、それにより国民が経済的な恩恵を得ることができるとした。これまでも NNI では教育やアウトリーチに積極的に施策展開を図ってきており、これをさらに重視するよう指摘している。

また NNI は、"A Federal Vision for Future Computing: A Nanotechnology-Inspired Grand Challenge" のホワイトペーパーを発行し、非フォン・ノイマン型コンピューティングを見据えた R&D フォーカス領域として、以下の 7 つを掲げている。1. Materials, 2. Devices and Interconnects, 3. Computing Architectures, 4. Brain-Inspired Approaches, 5. Fabrication/Manufacturing, 6. Software, Modeling, and Simulation, 7. Applications。例えば、1. Materials では新規二次元材料や、sub-10nano エレクトロニクスのための熱ダイナミクス制御用無欠陥材料、などを掲げている。これらは、National Strategic Computing Initiative（NSCI）や BRAIN Initiative とも連携し、データから学習し、学習によって不慣れな問題も解き、人間の脳と同等のエネルギー効率で作動する新しいタイプのコンピュータを創造するために、ナノスケールのシステム・コンピュータ構造の飛躍的な進歩を狙っている。

NSF では、ナノテクノロジー研究インフラ共用ネットワークプログラム（NNIN）が 2015 年に終了し、後継プログラムとして National Nanotechnology Coordinated Infrastructure（NNCI）が開始された。5 年間で 8,100 万ドル以上の予算が計画されている（年間約 1,600 万ドル）。15 州にまたがる 27 機関から成る 16 拠点（内、9 拠点にはパートナーとして 1 つ以上の地方大学が参画する形態）で構成される。日本の文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業（H24-33）に相当するプログラムであり、規模的にも概ね同程度と考えられる。NNCI に採択された拠点は、産官学の研究者に対し微細加工や解析・計測装置などのナノテク最先端研究設備をオープンな共用施設として提供する。また、専門技術スタッフにより装置利用や技術習得、専門知見の面でのサービスを充実させる。前身の NNIN で培ったフレームワークを活かして、科学技術上の新発見やイノベーション創出、教育、商業化社会的利益に貢献することを目的としている。NSF ではこれ

まで40年間の長期にわたりナノテク研究インフラ・サービスの充実に投資を続けてきたが、次世代へ向けてNNCIではこれをさらに拡張・促進させるとしている。NNCIの各拠点は、エレクトロニクス、フォトンクス、マイクロ機械、マイクロ流体、など、それぞれに特徴・専門性を有する。なかには地球科学やライフサイエンスに専門性を有する拠点も含まれており、新分野を促進させることも重視している。NNCIの設備群は、学生・専門家を問わずアクセスが可能であり、国内だけでなく世界中にオープンである。

● Materials Genome Initiative : MGI³

材料・ゲノム・イニシアチブMGIは、NSTC（国家科学技術会議）／OSTP（科学技術政策局）に向けてジョン・ホルドレン科学技術担当大統領補佐官から提案された（2011年）。国際競争力強化のための新しい材料戦略であり、DOE、NSF、DOD、NIST、NASAが参加している。材料の基礎研究から社会への実装および普及にいたるまでの開発期間を二分の一に短縮し、低コスト化することを目的としている。そのための研究開発インフラとトレーニングの機会を提供しようとするものである。初年度2012年度予算では1億ドルが手当てされ、2015年度までに5億ドル以上の研究開発投資がおこなわれた。国家の安全保障、生活の向上、クリーンエネルギー、人材育成のために、Computationalなツールや実験装置、さらに、非常に重要になってきているデジタルデータを駆使して、材料の研究開発をスピードアップし、低コスト化を実現しようとする野心的な計画となっている。

本イニシアティブの下、NSFが2012年から、Designing Materials to Revolutionize and Engineer our Future (DMREF) programを開始し、2014年、NISTが、Center for Hierarchical Materials Design (CHiMaD) (Northwestern大学, Chicago大学, Argonne国立研究所)の支援を開始、また同年には、DARPAが“Materials Development for Platforms (MDP)”の公募を開始している。

2014年6月には、以下に示す2014～2017年度のMGI戦略プランが公表された。材料戦略全体の中に、データを位置づける形となっている。

- 物質・材料研究において、計算、データ、実験の各手法を連携させた統合アプローチを主流にするための研究者意識の醸成
- 実験、計算、理論の各研究者の統合
- データへの容易なアクセス環境の整備
- 世界水準の人材育成

また、統合計算材料工学 (Integrated Computational Materials Engineering) というコンセプトの実現を目指して、構造材料を中心に、結晶構造（第一原理計算）から材料組織までのマルチスケールをプロセス、材料組織との関係も含め、データから相関を統合する目的で、2014年にNIST、ノースウェスタン大学、シカゴ大学を中心とした“CHiMaD”を立ち上げた。熱力学・状態図計算など、個別のニーズに合わせて速度論のシミュレーションを行い材料特性の予測、材料開発の支援を実施している。また、国立スーパーコンピュータ応用研究所 (NCSA) とアルゴンヌ国立研究所が連携して“Materials Data Facility”

3 【参考文献】

- ◇ “Materials Genome Initiative (MGI) STRATEGIC PLAN”
- ◇ “FACT SHEET: The Materials Genome Initiative – Three Years of Progress”

の運営を開始している。

■研究開発プロジェクト

●クリーンエネルギー⁴

戦略を推進する仕組みとして 3 つのイニシアティブ（エネルギーイノベーション・ハブ、エネルギー高等研究計画局、エネルギーフロンティア研究センター）を立ち上げ、これらのイニシアティブを中心に精力的研究を展開している。

エネルギーイノベーション・ハブは、「基礎研究や応用研究に加え、商業化に必要な工学開発までカバーした一連の活動を“アンダー・ワン・ループ”で行う」ための枠組みとなっている。一つのハブに対し、5 年間で 1 億 2200 万ドルの研究資金を投ずる。ハブは、人工光合成、軽水炉の先進的シミュレーション、省エネルギービル、バッテリー・エネルギー貯蔵、クリティカルマテリアルの 5 つある。

バッテリー・エネルギー貯蔵では、自動車というよりも、再生エネルギーで生まれたエネルギーをどう蓄積するか、それをエネルギーグリッドとしてどう展開するかに重点が置かれている。クリティカルマテリアルは、日本が元素戦略という形で先行した取組みをフォローするような形となっている。

エネルギー高等研究計画局は、「ハイリスク・ハイペイオフ型の応用研究を支援する」ための枠組みとなっている。2013 年 9 月時点で 332 プロジェクトが採択されており、これらのプロジェクトに 8 億 956 万ドル（採択段階の金額、変動する場合がある）の資金が充当されている。

テーマは、エネルギー貯蔵、バイオエネルギー、エネルギー伝送、エネルギーの戦略材料、化石エネルギー、建物のエネルギー効率、太陽エネルギーである。

基礎研究を支援する枠組みとして「エネルギーフロンティア研究センター」が導入されている。本イニシアティブでは、優先すべき研究課題として以下に示す「10 の重点領域」が設定されている。この実行にあたり、2009 年に 46 センターが設立されており、これらのセンターに 5 年間で 7 億 7700 万ドルの研究資金を投ずる。

①固体素子照明（Solid-State Lighting）②太陽エネルギーの利用（Solar Energy Utilization）③超伝導（Superconductivity）④電気エネルギーの貯蔵（Electrical Energy Storage）⑤水素の製造・貯蔵・利用（Hydrogen Economy）⑥先端原子力システム（Advanced Nuclear Energy Systems）⑦運輸燃料の無公害・高効率燃焼（Clean and Efficient Combustion of 21st Century Transportation Fuels）⑧エネルギーのための地球科学（Geosciences – Facilitating 21st Century Energy Systems）⑨エネルギーのための触媒（Catalysis for Energy）⑩極限環境下の材料（Materials under Extreme Environments）

4 【参考文献】G・TeC 報告書「持続可能なエネルギーの未来；米英独仏のエネルギービジョンと研究戦略」（CRDS-FY2013-CR-01）

●半導体・ナノエレクトロニクス

大学を中心とする 3 つの NRI (Nanoelectronics Research Initiative) 研究センター (CNFD、INDEX、SWAN) と 3 つの STARnet (Semiconductor Technology Advanced Research network) 研究センター (FAME、C-SPIN、LEAST) がナノエレクトロニクスの中心的研究組織である。このうち STARnet が米国 DARPA と協力して運営されている。これらの研究センターでは、エネルギー効率の高い原理としてナノ磁性のスイッチング素子、サブスレッショールドスロープの急峻な素子として III-V のトンネルトランジスタ (TFET) などのデバイスを研究開発している。Beyond CMOS として、スピントロニクス・ロジック回路の研究も開始した。スピントルクやスピン波を用いた多数決ゲート構成のほか、磁壁移動により、ロジック、メモリ双方の機能を発現する機構も提案されている。

不揮発性メモリ開発に関しては、米国が他地域と比べて群を抜いている。他地域の研究機関との共同研究も多く、大学が中心であるが質の高い論文が多く、独創的提案も目を引く。

基礎的な研究に関しては、AFOSR (Air Force Office of Scientific Research) が Funding Agency として支援する基礎科学研究 10 課題の 1 つとして “2D Materials and Devices beyond Graphene” (代表ライス大学 Ajayan 教授) を 1,000 万ドル規模で推進中である。MoS₂ 等遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) 半導体二次元製膜技術とそのトランジスタ応用、グラフェン/h-BN/グラフェンナノキャパシタを中心とする二次元原子膜ヘテロ接合形成でも最先端を走っている。TMD をチャンネル材料とする FET デバイス応用研究が加速しており、ポスト Si-CMOS テクノロジーとしての議論が活発化している。研究動向としては、単体デバイスから集積デバイスへの展開が広がりを見せている。

(3) EU

■基本政策

欧州はデジタル化、スマート化を強く進める大きな政策目標を掲げ、マイクロエレクトロニクス・ナノエレクトロニクスの分野の強化を図っている。政策的には、「Digital Single Market」としてデジタル化の活動の最大化や EU でのデジタルバリューチェーンの構築を目指し、R&D 投資を GDP の 3% とすることや米国との生産性のギャップを埋めることなどを目標にしている。また、全体的には 2014 年から始まった Horizon2020 の枠組みの中で、ナノエレクトロニクス/ナノテクノロジー分野の強化策が計られている。2014 年から 2020 年までの 7 年間に 770 億ユーロ (110 億ユーロ/年) の予算で、教育、研究、イノベーションを一つのプログラムの中で一体的に進めている (図 2-19)。三つの優先領域の予算としては、① Excellent science : 170 億ユーロ、② Industrial leadership : 244 億ユーロ、③ Societal challenges : 297 億ユーロ、となっている。



図 2-19 Horizon2020 の予算構造

①に関しては、FP7 の終盤に開始されたグラフエンフラッグシッププロジェクトは注目に値する（後述）。また、ナノテクノロジー・材料や ICT が含まれる②「Leadership in enabling and industrial technologies (LEITs)」に 135 億ユーロが予算化されている。LEITs のなかで、競争力強化や成長の機会を与え、社会的課題の解決に貢献する戦略的技術分野として Key Enabling Technology (KET) が設定され、ナノテクノロジー、先端材料、マイクロ・ナノエレクトロニクス、フォトニクス、バイオテクノロジー、先端製造の 6 つ技術分野が選ばれている。

2016 年度の予算は、全体：172.5 億ユーロ、① Excellent science：64.6 億ユーロ、② Industrial leadership：36.5 億ユーロ、③ Societal challenges：62.1 億ユーロになっており、Excellent science が最も大きな額となっている。また、ナノテクノロジー・材料分野との関係が深い、Industrial leadership の中の“Nanotechnologies, Advanced Materials and Production”は 2.86 億ユーロ、“Advanced materials”は 2.57 億ユーロとなっている。

欧州では、企業間連携、産学連携、研究拠点間連携など、組織間の連携を強力に進めており、いくつかの例を示す。研究とイノベーションのエコシステムのための研究技術組合 (RTO：Research and Technology Organization) 間の連携（人材交流、研究開発、雇用など）を進め、全てのステークホルダーの利便性の向上を図るための EARTO (European Association of Research and Technology Organization) という団体が組織され、現在は 23 カ国で 350 の RTO が加盟している。ここでは政策提言や技術に関するワーキンググループを作って活動している。

KET の一つである電子コンポーネントとシステムにおける欧州の優位性を高めるため

に、産業界がリードするパブリック・プライベート・パートナーシップ（PPP）のモデルとして、ECSEL（Electronic Components and System for European Leadership）プログラムが2014年から始まっている。総額は約50億ユーロ（EU：12億ユーロ、参加国：12億ユーロ、企業：>26億ユーロ）の予算で進められている。ここでは、ナノエレクトロニクスの研究開発と、応用までのバリューチェーンとを結びつけ、パイロットラインの構築までを視野に入れた高いTRL（Technology Readiness Level）を狙っている。また、ナノエレクトロニクス強化のためのENIAC（European Nanoelectronics Initiative Advisory Council）、組み込みコンピュータシステムやCPS（Cyber Physical System）の強化のためのARTEMIS（Advanced Research & Technology for EMbedded Intelligent Systems）、スマートシステムの集積強化のためのEPoSS（European Technology Platform on Smart Systems Integration）などとのシナジー効果も狙っている。ECSELに関連して、半導体デバイスシステムのロードマップ作成活動も行われている。ENI2（European Nanoelectronics Infrastructure for Innovation）およびNEREID（Nanoelectronics Roadmap for Europe: Identification and Dissemination）において、デバイス技術とデザインを含めたものを検討している。

欧州のバリューチェーンを強化する研究クラスターおよびクラスター間の連携の仕組みについては、フランダースとオランダ南部のクラスターであるDSP（Designing Smart Products）Valleyの例がある。DSP Valleyはスマートなエレクトロニクスシステム（Smart Health, Smart Vehicle, Smart bikeなど）実現を目指したバリューチェーンが構築されている。また、DSP Valley、SILICON SAXSONY、MINALOGICなど12の半導体関係のクラスターがSILICON EUROPEというアライアンスを形成して、バリューチェーンの構築、知識や技術の移転などの強化を図っている。さらに、学術分野を越えたバリューチェーンの構築として、FlandersBio、Biosaxonyなどのバイオ領域やその他の技術領域との連携も図っている。

産業界の組織であるAENEASにより、エレクトロニクスのバリューチェーン強化の新たなクラスター（PENTA：Pan-european partnership in micro and nanoelectronic technologies and applications）が構築されている。これは、ナノエレクトロニクスが可能とするコンポーネントやシステムに関するEUREKA（欧州先端技術共同研究計画）の新たなクラスターのプログラムとして発足し、中小企業の参加を促し全てのエレクトロニクスのバリューチェーンを対象にしている。他のEUREKAプログラムとの連携や、これまでのサポートプログラムとの差別化を行う。

ナノエレクトロニクスのデザインやデバイス作製を行うインフラとしてASCENT（Access to European Nanoelectronics Network）がある。これはLETI、IMEC、Tyndall National Institute（Ireland）の連携で2015年に作られた。14nm以降のバルクおよびSOIのCMOSデバイス、ナノワイヤ、2次元材料、FINFETなどが扱える。現在、32カ国から117のユーザーが利用している。

Horizon2020の3本柱の一つ、Excellent scienceの一環として、FET（Future and Emerging Technologies）の野心的な研究プロジェクトが作られている。10年間で10億ユーロという巨額のプロジェクトであり、現在は“Graphene Flagship”と、“Human

Brain Project” の 2 つのプロジェクトが進められている。また、次のプロジェクトとして量子コンピュータなどの量子情報・量子技術に関する” Quantum Technology Flagship” が、やはり 10 億ユーロ規模で検討が進められている。

■研究開発プロジェクト

欧州が重点的に取り組んでいる例として、グラフェンと炭素繊維複合材料（CFRP）を紹介する。

● Graphene Flagship

16 のワーク・パッケージ（11 の科学技術的、5 の事業運営的側面）からなり、その中の 1 つが beyond graphene を含む基礎科学、5 つがデバイス（高周波／光電子／スピントロニクス／センサ／フレキシブルエレクトロニクス／エネルギーデバイス）に関連している。デバイス研究では、Beyond graphene ヘテロ接合デバイス応用のマンチェスター大、オプトエレクトロニックデバイス応用のケンブリッジ大等が先導している。計画では 2013 ～ 2016 年が立ち上げ、2016 ～ 2018 年がコア 1 プロジェクト、2018 ～ 2020 年がコア 2、2020 ～ 2022 年がコア 3 とし、ロードマップを作成している。23 カ国（米国、韓国、日本も含む）から 152 のパートナーが参加している。また、ノキアや ST マイクロエレクトロニクス、BASF、エアバスなどの企業も参加している。これまでの成果としては、論文数：1200 件、特許：39 件など、目標値（論文数：329、特許：38 など）を越えている。Dr. Andre Geim と Dr. Konstantin Novoselov のグラフェン発見によるノーベル物理学賞受賞（2010 年）を契機に、同じく BIS（Department for Business, Innovation and Skills）がグラフェン・グローバル研究技術拠点（Graphene Global Research and Technology Hub）を設立した（2012 ～、マンチェスター大）。さらに、Print Graphene Technology（2014 ～、ケンブリッジ大）ではフレキシブルエレクトロニクス、バッテリー、キャパシタ、高速通信デバイスなどの応用技術開発を進めている。

●炭素繊維複合材料⁵

英国ビジネス・イノベーション・技能省（BIS; Department for Business, Innovation and Skills）では 2009 年 11 月に、「THE UK COMPOSITES STRATEGY」を発表している。複合材料は将来の英国の製造業の繁栄における重要な要素であると位置づけられており、航空機産業から小規模事業まで広範囲にその利用が拡大していくと見込んでいる。英国政府は、通称「Catapult（カタパルト）」とよぶ技術イノベーションセンターの設立を進めており、その一つとして 2011 年から「高付加価値製造カタパルト（High Value Manufacturing Catapult）」を推進している。7 つの拠点のうちの 하나가、National Composite Center（ブリストル地区）であり、航空機、風車等の複合材料の設計・製造の自動化等を推進している。地域開発公社の支援を受けて、ブリストル大学内に設置されているが、インペリアル・カレッジ、マンチェスター大学、シェフィールド大学、クランフィールド大学とも共同研究を行っている。GKN 社やロールス・ロイス社も参加している。民間も出資し、年間 20 億円程度の非常に大規模な研究拠点となっている。

ドイツでは、今後 5 年間にわたり 2 つの複合材料グループを発展させるために資金を

5 【参考文献】俯瞰ワークショップ報告書ものづくり基盤技術分科会（CRDS-FY2014-WR-03）

割り当てている。一つはハンブルグ近郊の CFK-Valley Stade で、エアバス社複合材センターと、複合材に特化した大学との組合せで、CFRP 製造工程のオートメーション化にも重点的に取り組むとともに複合材料のエンジニアの育成にも力を入れている。二つ目は炭素繊維複合材料の技術に特化する Augsburg センターである。

フランスでは、ナントにおけるクラスターで Airbus と EADS の支援を受けて複合材料の研究開発を行っている。政府資金だけでなく、民間資金も入って年間 25 億円程度で運営しており、船、風車、飛行機、自動車の 4 つの戦略分野に投資を行っている。その他、Aquitaine の航空宇宙センターなど、モーゼル地方には新しい団体も設立され始めている。

スペインは、航空宇宙産業に焦点を当てており、主に 4 箇所の拠点を置いている。最も大きいのは 17,000 人の従業員を擁するマドリッド近郊の拠点である。また、スペインは風力エネルギーでも世界をリードしており、2009 年には風力タービンメーカーの Gamesa はスペインの機械メーカー M Torres と、風力タービン翼に関する複合材料構想に取り組むべく共同の研究開発プロジェクトを発表している。

(4) ドイツ⁶

ドイツ連邦政府は 2006 年 8 月に、研究開発およびイノベーションのための包括的な戦略である「ハイテク戦略 (High-Tech Strategy)」を発表した。これは省庁横断型の戦略であり、幅広い施策や戦略が網羅されている。さらに、2010 年には、このハイテク戦略を更新するものとして、「ハイテク戦略 2020 (High-Tech Strategy 2020)」を発表した。ドイツが今後どの分野に力を入れていくかを社会的な課題から導き出して明示しており、気候、エネルギー、健康・栄養、交通・輸送、安全・コミュニケーション技術の重点 5 分野を特定した。さらに 2014 年秋に、第三期となる「新ハイテク戦略 (New High-Tech Strategy)」を発表、前戦略を踏襲する形で、経済成長が見込まれる以下の 6 分野を特定しており、これが現行戦略である。

- 1 The digital economy and society 消費デジタル化と社会
- 2 The sustainable economy and energy 持続可能な経済とエネルギー
- 3 The innovative workplace イノベティブな職場
- 4 Healthy living 健康的な生活
- 5 Intelligent Mobility インテリジェントな交通、輸送
- 6 Civil security 市民安全の確保

ナノテクノロジーは材料とともに横断のキーテクノロジーの一つとして位置づけられており、この一環として「ナノテクノロジー行動計画 2020 (Action Plan Nanotechnology 2020)」(対象期間 2016 ~ 2020 年) が発表されている。ナノテクノロジーは、将来の市場に重要な影響を及ぼす分野と位置付けているが、ナノテクノロジーの横断的性質のため、ドイツでの研究資金は連邦政府の様々な専門プログラムに定着しており、省庁間の支援の枠組みの一部として推進されている。さらに、連邦省庁による共同予備的資金援助が機関研究資金の活動と相乗して行われている。連邦教育研究省 (BMBF) としては、以下の

6 【参考文献】 Action Plan Nanotechnology 2020

幅広いテーマでイノベーション活動を計画している。

- **Bioeconomy** バイオエコノミーのためのナノ技術

国家研究戦略「バイオエコノミー 2030」は未来の原材料として天然資源を利用する原油由来から生物由来への原料の構造的転換である。ナノ触媒コンバータ、機能性コーティング、ナノ膜等がナノテクの技術要素となる。

- **Electromobility** 電気自動車のバッテリー研究

電気自動車のための国家開発計画の中でマテリアルリサーチプログラムを通じてバッテリー研究に関わる。ナノテクでは、軽量車両コンセプト、モバイルストレージ技術、新しい駆動装置の開発計画を支援する。

- **Energy research** エネルギー研究へのナノテク利用

政府のエネルギー研究プログラムを通じて、エネルギー効率と再生可能エネルギーに関する基礎研究に関わる。ナノテクは、エネルギーの生成、保管、使用に適用される。

- **Human-technology interaction** 人と高機能ナノ材料の相互作用

人々は、コミュニケーション、医療診断、輸送手段の使用を通じて、生活の中でますます技術環境と相互作用が増えており、人間と技術の相互作用の研究を行う。

- **Health** 医療技術へのナノテク利用

連邦政府の健康研究プログラムの優先事項は、広範な疾病、治療提供と予防、個別化された治療法と健康経済の研究であり、ナノテクは、長期インプラント、イメージング、センシティブな診断、新活性物質およびキャリアなど技術アプローチを提供する。

- **Information and communication technologies** IT技術へのナノテク利用

電子回路や自動車エレクトロニクスの製造のためのナノテクノロジー。新しい連邦政府のプログラム「ドイツのマイクロエレクトロニクス・デジタル経済のイノベーションのドライバー」では複雑な電子システムの生産にナノテクノロジーを活用する。

- **Materials research** 材料研究とナノテクとの統合推進

材料研究分野のイノベーションは、物質の原子・分子構造の理解と機能的な相互作用と密接に関連し、構成要素を用いるターゲット設計によって材料を作成する。材料研究推進のためのフレームワークプログラムは、ナノテクノロジーに密接に関連するものであり、初めてナノマテリアル固有要素が材料研究プログラムに統合される。

- **Sustainable development** サステナブル原材料開発へのナノテク利用

気候研究と資源保護のプログラム「持続可能な発展のための研究」が開始され、インテリジェントで効率的な原材料の使用、および持続可能かつ確実な原材料の供給に貢献するため、化学原材料としての CO_2 の利用等が含まれる。

- **Photonics research** フォトニクス研究へのナノテク利用

Agenda Photonics 2020 では、フォトニクス研究と照明、ディスプレイ、光学、センサなどの応用市場との連携に焦点を当てる。フォトニックプロセスチェーンは、革新的な製造プロセスと調節可能な光学特性を持つ材料の入手可能性で決まる。

- **Production research** インダストリー 4.0 生産技術でのナノ材料利用

プログラム「明日の生産、サービス、作業のためのイノベーション」では、顧客に応じた、資源問題のない新技術とシステムの開発を支援する。インダストリー 4.0 の枠組みでのイノベーションがナノスケールの粒子、繊維、コーティングからの製造に使われる。

- **Security research** 食品安全性研究でのナノテク
プログラム「民間安全のための研究」は人々を守るための技術的解決策を追求するが、ナノテクノロジーも基本であり、食品分野における物質革新の安全性に関する研究。
- **Risk research** ナノマテリアルの健康・環境リスク研究
ナノマテリアルの健康および環境リスクに関する具体的な疑問を追求する。結果は、欧州および国際機関の議論と活動に含まれる。BMBF 材料研究プログラムには、ナノ材料の使用に関連する潜在リスクに関する基礎研究結果も組み込まれている。

なお、ナノテクノロジー 2020 においては、国際共同研究を対象とした取り組みを検討している。この候補としてドイツが長年にわたり科学技術分野での集中的な協力に携わっている特定の対象国である、イスラエル、中国、インド、日本、韓国を挙げている。

(5) 英国

英国は、近代科学の基礎を築いてきたナノサイエンスの先進国である。ビジネス・イノベーション・技能省（BIS: Department for Business, Innovation and Skills）からの「英国ナノテクノロジー戦略」（2010 年）が英国のナノテクノロジー戦略の基盤になっている。国民、産業界、学界のニーズを反映しながら、新興技術（emerging technology）・実現技術（enabling technology）であるナノテクノロジー分野で政府が安全で信頼できる持続可能な方法でイノベーションを支援し、利用を促進することにより、英国の経済および消費者はナノテクノロジー開発から便益を受けるとしている。上記目標を達成するため、政府は、ビジネス・産業・イノベーション、環境・衛生・安全（EHS）研究、規制、及びより広いステークホルダー間の連携促進の 4 セクションに分けてアクションを特定した。そのうちビジネス・産業・イノベーションの行動計画の概要として次のように記載されている。

- ナノテクノロジー産業に戦略的リーダーシップを提供し、この分野のビジネスの成長を妨げる障害に対処するため、ナノテクノロジー・リーダーシップ・グループを設置する。同グループは、BIS 大臣が委員長を務める。
- ナノテクノロジーの革新的応用の開発を支援するため、技術戦略審議会（TSB）および英国研究会議（RCUK）のグランド・チャレンジ（公募）を活用するよう、企業および学界に奨励する。
- 英国のナノテクノロジー能力に対する認知を国内外で高め、必要な基礎的スキルを向上するための整備を行う。

この戦略の対象には、医療技術、製造技術、設計技術、機器・機械技術、構造材料などが広範に含まれている。また、2014 年の科学技術イノベーションに関する戦略“*Our Plan for Growth: Science and Innovation*”では、英国が研究開発で世界をリードする重要な技術として、8 つの技術を設定しており、その中の一つがナノテクノロジーと先端材料となっている。

環境・衛生・安全（EHS）研究および規制に関しては、王立協会および王立工学アカデミーの「ナノサイエンス・ナノテクノロジー：機会と不確実」（2004 年）、それに応える形で科学技術会議（CST）の「ナノサイエンス・ナノテクノロジー：政策公約に関する政府の進捗状況の評価」（2007 年）報告が、革新的な技術が持つ便益とリスクを科学技術コミュ

ニティとして冷静かつ合理的に判断しようとする姿勢の具体的な表象であり、その後の社会受容に関する世界各国の活動に一つの方向を与えた。

BIS は 2009 年に、複合材料開発を推進するための戦略である「英国複合材料戦略」(THE UK COMPOSITES STRATEGY) を発表している。同戦略は、英国が目指す低炭素社会の構築に向けて、より耐久性が高く軽量かつ高性能な複合材料を開発し、加えて同分野の産業を競争力の高いものに確立していこうとするものである。英国は通称「カタパルト」とよぶ技術イノベーションセンターの一つとして、「高付加価値製造カタパルト (High Value Manufacturing Catapult)」を推進しており、その中でこの複合材料戦略に沿った、国立複合材料センター (National Composite Centre) をブリストル地区に設立した。このセンターはブリストル大学内に設置されているが、インペリアル・カレッジ、マンチェスター大学、シェフィールド大学、クランフィールド大学とも共同研究を行っている。また、GKN 社やロールス・ロイス社も参加して、年間 1,400 万ポンド程度の大規模な研究拠点となっている。

政府による大学での研究成果の実用化への特筆すべき取り組みとして、2010 年にノーベル物理学賞を受賞した、マンチェスター大学の Dr. Andre Geim と Dr. Konstantin Novoselov のグラフェン研究がある。政府は、両氏によるノーベル賞受賞を受け、その商業的利用方法のための開発競争に勝利を収めるべく、5,000 万ポンドを投じてグラフェン・グローバル研究技術拠点 (Graphene Global Research and Technology Hub) を設立することを決定した (2011 年 10 月)。2013 年から国立グラフェン研究所 (National Graphene Institute) が作られ、異分野融合の研究が進められている。2014 年度には、グラフェン技術応用イノベーションセンター (Graphen Engineering Innovation Centre) の設立 (総額 6,000 万ポンド) の計画も明らかになった。これらの政府投資により、大学や公的機関の研究者と産業界が協力して商業化の可能性を検討することが促されることになる。これは経済成長に資するばかりでなく、将来的にはハイテク分野における雇用の創出という面でも大きな期待を担っている。

(6) フランス

フランスでは、2008 年、当時の Valérie Pécresse 高等教育・研究省大臣の提唱に基づきイノベーションに関する統一的な国家戦略の策定や優先分野についての検討が開始され、2009 年に「国家研究・イノベーション戦略 (SNRI)」として取りまとめられた。同戦略は 2009 年から 2012 年までの 4 年間にわたる国としての研究・イノベーションの方向性を規定するもので、共通原則に加え、三つの優先分野（「保健・福祉・食糧・バイオテクノロジー」、「環境への緊急対策とエコテクノロジー」、「情報・通信・ナノテクノロジー」）が定められた。関連して、2009 年、ナノテクノロジーによるイノベーションを推進するため、「Nano-INNOV」イニシアチブが策定・実施された。ナノテクノロジーの産業化を加速するため、グルノーブル、サクレ、トゥルーズにナノテクノロジーの統合センターを設立し、2009 年に 7000 万ユーロが配算されている。

2013 年 7 月、それまで別々に制定されていた高等教育の基本法と研究の基本法とが統合され、高等教育・研究法が制定された。この法律を踏まえ、研究開発の分野では、「(研究・技術移転・イノベーションのための戦略的アジェンダ) France Europe 2020」という基本戦略が策定された。この戦略的アジェンダでは、9 つの社会的課題に基づいた研究の方

向性が示されるとともに、研究戦略会議の設置、新たな高等教育・研究評価機関（HCERES）の設置、研究拠点の強化、などの制度改革の方向性も示された。ここでは、ナノエレクトロニクス、ナノマテリアル、マイクロ・ナノ流体工学といった領域が優先領域として挙げられている。また、Horizon 2020 における優先領域である、先進材料も優先項目に挙げられている。さらに、一連の制度改革が進んだ 2015 年 3 月には、現行の戦略である「SNR（国の研究戦略）France Europe 2020」が公表された。SNR France Europe 2020 は France Europe 2020 を洗練したもので、2020 年までを視野に入れた研究戦略であり、10 の社会的課題と 5 つの横断的課題に沿った優先事項を掲げる構成になっている。

フランス初の独立したファンディング・エージェンシーとして 2005 年に設立されたフランス国立研究機構（ANR）は競争的研究資金の配分を主たる役割としているが、そのプログラムの中に、「MatetPro / 高品質製品のための材料とプロセス」、「P2N：ナノテクノロジーとナノシステム」などが含まれている。

（7）オランダ

2005 年にスタートしたナノテクノロジー研究開発イニシアチブ “NanoNed” の後継の国家計画として “NanoNextNL” が 2011 年に産学官のコンソーシアムとして立ち上がり、2 億 5000 万ユーロが配算される。50% が政府負担であり、残りの 50% は企業 100 社、各大学、知識研究所、大学医療センターなどが負担する。2016 年度までに達成すべき目標として、(1) マイクロ・ナノテクノロジー技術分野での基礎・応用を含めた質の高いイノベーション力を維持する、(2) マイクロ・ナノ製品のイノベーションで世界のリーダーになる、(3) 社会からの支持を得つつ社会的要請に対してハイテクで応えるリーダーになる、(4) マイクロ・ナノテクノロジー技術領域で、持続性ある知のリーダーになること、が挙げられている。インフラの共用施設としては、“NanoLabNL” が充実していて、MESA+NanoLab Twente、KavliNanoLab Delft、Zernike NanoLab Groningen、NanoLab@TU/e、TNO NanoLab Delft、Philips Innovation Services が参加している。

また、オランダ政府は既に 2014 年 11 月、2025 年に向けた「科学ビジョン 2025：未来の選択肢」において、オランダの科学の将来にとって「論文のオープンアクセスと研究データのオープン化は最も重要な要素である」と述べているが、2015 年 11 月にはオランダ科学研究機構（NWO）が 2015 年 12 月 1 日以降、NWO の公募に由来する全ての学術論文は、公表の瞬間からただちに全ての人々に対してアクセス可能とする助成条件を厳格化した。さらに NOW は 2016 年 3 月にグローバル・リサーチ・カウンシル（GRC）と共同でオープンアクセスに関する国際ワークショップ「バリアの撤去：オープンアクセス学術出版に向けた世界的実施計画」を開催し、各国のリサーチカウンシルや大学、出版社から集まった代表者や専門家 50 名以上がオープンアクセスについて意見交換を行った。その後、2016 年 7 月のニュースにおいて、2016 年 10 月 1 日以降に発表する全ての公募において、研究データの管理手順が含まれることになった。この手順は、資金提供を申請する研究者に対し、自分たちの研究から生じるとされる関連データ、これらのデータを他の研究者と共有する方法について、事前に検討を求めるものであり、研究データの保存と再利用に関する具体的な計画の提出を今後求めていくとしている。

(8) 中国

中国の科学技術・イノベーション政策の基本方針は、2006 年に国務院から発表された「国家中長期科学技術発展計画綱要（2006－2020）」に記載されている（以下、中長期計画）。これに沿って、直近の計画は、国全体の 5 か年計画によって与えられる。第 11 次 5 か年計画（2006～2010 年）では、科学技術投資額を GDP 比で 2% に、第 12 次 5 か年計画（2011～2015 年）では科学技術投資額を GDP 比で 2.2% に、昨年 3 月に採択された第 13 次 5 か年計画（2016～2020 年）では科学技術投資額を GDP 比で 2.5% に上げることを目指している。この計画は、中国を 2020 年までに世界トップレベルの科学技術力を持つイノベーション型国家とすることを目標としている。

中長期計画における、中国の科学技術行政の特徴は、欧米に後れを取っているサイエンスに重点を置いていることで、「世界の工場」から「自主イノベーション」に国家科学技術戦略を転換しつつある。特に、先端科学技術インフラの建設が計画的に進められ、重イオン加速器（蘭州 CAS）、シンクロトロン放射光施設（上海）、スーパーコンピュータ「天河 2 号」（2013 年 6 月～2015 年 11 月までスパコンランキング TOP500 で 1 位を獲得）および「神威・太湖之光」（2016 年 6 月 TOP500 で 1 位を獲得）、次世代 DNA シーケンサー（北京他、日本を凌駕）、核融合施設（ITER にも参加）など、急速に充実してきている。これらは、ナノサイエンスの研究の質を押し上げる上で大きな効果をもつと予測される。ナノテクノロジー・材料分野に直接関係するものとして、次世代のハイテク及び新興産業発展の重要な基盤を構成し、ハイテクイノベーション能力を総合的に体現する先端技術 8 分野の 1 つとして「新材料技術」がある。具体的には、ナノテクノロジーの研究を基礎として、ナノ材料とナノ素子を研究するとともに、超伝導材料やインテリジェント材料、エネルギー材料等のほか、きわめて優れた特殊機能性材料や新世代の光通信材料を開発するという目標を掲げている。また基礎研究分野の重大科学研究のテーマとして「ナノテクノロジー研究」が盛り込まれている。

第 12 次 5 か年計画では、戦略的新興産業の核心的な競争力を強化する分野として「新材料」をとりあげている。具体的には、新型機能・スマート材料、先進構造・複合材料、新型電子機能性材料、高温合金材料等の基幹となる基礎材料を大きく発展させるとしたうえで、高性能繊維や複合材料、先進レアアース材料等の科学技術産業化プロジェクトを実施する方針を示した。また、新材料の設計や調合加工、高効率利用、安全な使用、低コスト循環再利用等の核心となる技術を開発するとともに、基幹材料の供給能力を引き上げ、新材料の利用技術とハイエンド製造の水準を引き上げるとした。

一方で、第 13 次 5 か年計画においては、世界の状況は激動の中にあり、中国国内経済の発展は新常态（ニューノーマル）に入ったとし、2020 年までに中国の科学技術はキャッチアップ段階から「キャッチアップ・併走・先導」併存の段階へ邁進するとしている。基本方針として、

- ・国家戦略と社会・経済ニーズに応えることをミッションとする
- ・キャッチアップを加速し、特定領域を先導することに重心を置く
- ・社会のための科学技術を根本的な出発点とする
- ・イノベーション創出に向けて、改革を深化する
- ・イノベーション創出人材の育成を最優先に取り組む

- ・グローバルな視野で常に社会課題を把握し、その解決に向けてイノベーションを創出することを掲げている。

また、目標としては、国家イノベーション能力ランキングを世界 15 位（2015 年は世界 18 位）に、知識集約型サービス業の対 GDP 比を 20%（2015 年は 15.6%）に、国際科学論文被引用回数ランキングを世界 2 位（2015 年は世界第 4 位）に引き上げ、PCT 特許出願数を 2015 年より倍増させる、等を設定。2030 年を見据えた 15 の重大科学技術プロジェクトに「重点的新材料」「量子通信・量子コンピュータ」「スマート製造・ロボット」「航空エンジン・ガスタービン」等を指定している。また、効果的な国家イノベーションシステムを構築するために、①活気に溢れるイノベーターの育成、②ハイレベルなイノベーション拠点の設置、③ハイレベルなイノベーション成長の先頭集団の形成、④オープンで共同的なイノベーションネットワークの構築、⑤現代的なイノベーションガバナンスメカニズムの確立、⑥イノベーションに適した好環境の創設、が必要であるとしている。

12 次と 13 次を比較すると、12 次五ヵ年計画において中国政府はまだ科学技術を産業や経済には直結しない要素であると認識していたが、第 13 次五ヵ年計画においては、中国政府は科学技術イノベーションを経済・社会発展の原動力と位置づけている。これまでは「科学技術第〇次五ヵ年計画」という名称が、初めて「科学技術イノベーション第 13 次五ヵ年計画」になったことから、中国政府が科学技術と経済、科学技術とイノベーションを直結させ、研究・開発から産業化までのイノベーション創出の全過程を視野に入れ計画したことが窺える。

中国では、国家レベルで複数のナノ科学技術拠点が構築されている。具体的には、国家ナノ科学技術センター（NCSNT）（北京）、国家ナノテクノロジー・工程研究院（天津）、ナノテクノロジー・応用国家工程研究センター（上海）、国家ナノテクノロジー国際イノベーションパーク（蘇州）が設立されており、ナノ科学技術産業化の役割を担っている。

2003 年、北京に設立された NCSNT の理事長として、中国のナノテクノロジー政策をけん引してきた白春礼が、2011 年 3 月に中国科学院（CAS）の院長に就任した。NCSNT は米国 NSF と共同ワークショップ開催などで関係を深め、また、英国 Royal Society of Chemistry とは共同で“Nanoscale”という国際学術誌を発刊した。同誌では、白春礼がアジアの regional editor になり、最初の公式インパクト・ファクターは 4.11 という高い数字を記録している。北京はアジアのナノ科学国際拠点になりつつある。

毎年北京で開催されるナノ科学・技術国際会議（通称 China NANO）は NCNST が実質的に主催しており、2015 年 9 月の第 6 回会議では世界 40 か国からトップクラスの招待講演者 100 名以上を揃え、1300 人を超える参加者（うち海外が約 300 人）を集めた。中国からの参加者の大半が大学院生である。

このように、北京が基礎科学、大学の企業モデル構築などの中国全体戦略の知の中心とすれば、上海や蘇州は技術開発や起業拠点の中心と言える。特に、1994 年に建設がスタートした蘇州工業園区（Suzhou Industrial Park: SIP）はシンガポール政府との共同による都市開発を進め、ナノテクノロジー（Nanopolis）やバイオテクノロジー（Biobay）を中心とする 70 万～80 万人規模のハイテク都市に成長した。各大学の技術センターや CAS 傘下のナノテクノロジー・ナノバイオ蘇州研究所（SINANO）が産学ナノ拠点として工業園区を中心にあり、蘇州市、江蘇省、国の各レベルで、世界各国から誘致された企

業集団や起業家のイノベーションを目指す活動に効率的なサービスを提供している。フィンランドは、ナノテクノロジーの新しいバリューチェーンを模索して、100 社規模の企業オフィスを SIP にオープンしている。

(9) 韓国

韓国の科学技術・イノベーション政策は、2013 年に NSTC (National Science and Technology Council) において承認された「第 3 次科学技術基本計画 (2013-2017)」を主軸に推進されており、具体的な研究開発投資分野としては、IT 融合新産業の創出をはじめとする「5 大推進分野」を掲げ、120 の国家戦略技術及び 30 の重点技術の研究開発を推進する方針を掲げている

ナノテクノロジーについては、「ナノ技術開発促進法 (2003 年制定)」に基づき、「第 4 期ナノ技術総合発展計画 (2016 ~ 2025 年)」(注: 10 年間を見据えた 5 年計画) に入り、計画を更新している。ナノテクノロジーの競争力について、製造業のリーディング技術開発を掲げ、米国の技術レベルを 100% としたときに、92% のレベルに到達するとしている。その過程で、12,000 人の高度ナノテク人材を育成することを計画している。また、ナノテク産業でグローバルリーダーとなることを掲げ、ナノテクベース製品のマーケットシェアを 12% にすることを目標値と設定、ナノテク関連ベンチャーを 1000 社設立するとした。

韓国におけるナノテクへの公的研究開発投資は、2013 年以降、2012 年以前までと比較して倍増しており、2014 年の実績値は 5.3 億ドルである。その内訳は研究開発 86%、研究共用インフラ 10%、人材育成 4% の配分となっている。2014 年時点で、大学におけるナノテクノロジー関連学科の創設は 234 に上り、学部学生 29,500 人、大学院生 4,600 人を擁している。特に、Pusan 大学が単独のナノテクノロジー学部として College of Nanoscience を設立したことは注目に値する。また、巨額の投資でナノテクノロジー共用施設 (ナノ・ファブ・センター) が 6 か所設置されている。ナノテクの ELSI/EHS については国として予算を重点化し、省庁横断の 1st Comprehensive Plan for Nano-Safety Management を 2011 年に発表した。

ナノテク政策を支援する政府組織として、2000 人のナノテク研究者を会員に擁する韓国ナノ科学技術協会 (KoNTRS) が、ナノテク科学・ネットワーク・教育の促進に貢献してきた。さらに 2010 年からは国立ナノテクノロジー政策センター (NNPC) が設立され、戦略面で政策立案に貢献している。

注目される研究開発プログラムとして、ナノ統合 2020 プログラム (Nanoconvergence 2020 Program / 2012-2020 年) があり、Nanoconvergence Foundation を設立し、IT、ET と NT との統合 (convergence) によるナノ統合技術と商品化を促進して新しい産業の創出を狙い、9 年間で 5 億ドルの投資が計画されている。

(10) その他の国・地域

ロシア

ロシアは、国家予算を重点的に配分することを目的に選定した 8 つの優先的科学技術分野の 1 つに「ナノシステムと材料産業」を掲げており、2007 年に承認された「ナノ産業発展戦略」によって、ナノテク重視の方向性を明確に打ち出してきた。これを受けて、ナノテクノロジーの産業化のための投資会社「RUSNANO」が国の 100 % 出資によ

り誕生し、2015 年までにロシア国内のナノテク産業の市場規模を 9,000 億ルーブル、そのうち RUSNANO が投資した企業による売上高を 3,000 億ルーブルにするとの計画を示した。この売上目標 3,000 億ルーブルは既に達成されたことが報告されている。今後 RUSNANO は 2020 年までに 1,500 億ルーブルの投資を行い、ロシアのナノテク産業の市場規模を 1 兆 3,000 億ルーブル、うち RUSNANO 投資企業による売上高を 6,000 億ルーブルにするとの計画である。

ロシアは他国との共同研究に熱心であり、欧州（EU）のプロジェクトにも積極的に資金を投入している。たとえば、X線自由電子レーザーのような巨額の予算を必要とするプロジェクト（独ハンブルグの DESY）に対して、RUSNANO がドイツと同等規模の資金を拠出したことが知られている。また、2016 年にインドネシアの企業と共同で航空宇宙関連のファンドを立ち上げるなど、最近ではアジア太平洋地域との協力にも関心が高い。

台湾

台湾は、第 1 期台湾ナノテクノロジー国家計画（2003 ～ 2008 年／ 5.55 億ドル）で、ナノ産業化 63%、インフラ・コア施設 15%、先端学術研究 20%、教育 2%の配分で戦略投資を実施し、第 2 期 6 年計画（2009 ～ 2014 年）に 5.74 億ドルを計上している。産業化振興策を含め、インフラへの計画投資（全国 10 箇所）、将来の人材育成のための小中高一貫教育（米国の K-12 相当）用教科書作り、教師の育成など、バランスの取れた計画を着実に進めている。特に、ナノテクノロジー産業の振興のために導入したナノテクノロジー利用製品の公的認定制度「ナノマーク（NanoMark）」システムが社会に浸透して、2014 年時点で、38 社、1488 製品がその認定を受けている。認定基準は、(1) 利用している技術が 100 ナノメートル以下のスケールであること、(2) 機能が明確であること、の二点である。

ナノマークシステムが産業の振興に有効に働くことが証明されたため、類似のシステムがイランやタイのナノテクノロジー政策の中に取り入れられ始めている。また、マレーシアのナノ製品認証プログラム NANOVerify と NanoMark の間で相互認証を行う取組みを開始している。

ナノテク標準化について、ISO / TC229、IEC / TC113 に、リエゾンメンバーであるアジアナノフォーラム（ANF）の代表（議決権はないが、積極的にコメントを提出できる）として国際標準化活動に積極的に参加し、また、OECD / WPMN、WPN での活動にも参加している。

低炭素エネルギー技術に関連する材料研究を推進する EU の M-ERA.NET に 2012 年から加入している。また、毎年、ナノテクノロジーの国際展示会 Nano Taiwan を開催している。

シンガポール

シンガポール貿易産業省（MTI）は、2020 年に向けての 5 年計画「2020 年研究革新起業計画」を策定し 19B-SGD の投資を計画している。バイオメディカル・サイエンス、双方向デジタルメディア、フィジカル・サイエンス&エンジニアリング 3 分野を今後 5 年間の政府の新たな重点研究分野とした。フィジカル・サイエンス&エンジニアリングのなかに、先進的素材・製造業、先進的システム・エンジニアリングが含まれている。この

ような科学技術産業化政策への積極投資のもと、A*STAR が運営するナノインプリントファウンドリー（NIF）や、大学を中心として英語環境の下で国際的なナノ研究開発拠点が築かれている。シンガポール国立大学に設置されている主なセンターを以下に挙げる。

NUS Nanoscience and Nanotechnology Initiative (NUSNNI)

Centre for Advanced 2D Materials (CA2DM)

Centre for Quantum Technologies

Singapore Synchrotron Light Source (SSLS)

Centre for Ion Beam Applications (CIBA)

Solar Energy Research Institute of Singapore

タイ

タイは、サイエンスパーク（TSP）内に各科学技術分野のセンターを集積した国家科学技術開発庁（NSTDA）を持つ。その中に国立ナノテクノロジー・センター（NANOTEC／研究者 100 余名）があり、政府のナノテクノロジー施策の責任を負う。国家科学技術計画（2004－2013）において、NANOTEC マスター計画が 2007－2011 年に実施され、同計画は 2012－2016 年にわたって継続されている。産業政策は、農業重視から先端技術によるイノベーションを目指す政府方針に切り替わり、国家科学技術イノベーション政策（2012-2021）において今後 10 年で科学技術投資を GDP 比 0.2% から 2% にまで増やすとしている。NANOTEC の巨大な新研究棟（産官共用）が完成している。2016 年に設置された国家ナノキャラクター化センター（NANC）やナノコスメシューティカルラボは注目に値する。また、ナノ安全に関しては積極的に取り組んでおり、2012 年から 5 カ年のフレームワーク計画を運用、2016 年にはナノ製品ガイドラインを公表している。台湾と連携し、Nano Q というナノ製品認証制度を開始している。

中東

中東では、UAE とイランがナノテクノロジーの政府計画を持つ。特に、イランは量・質ともに充実したナノテクノロジー国家計画と組織（Iran Nanotechnology Initiative Council (INIC)）を有し、多様な研究開発プロジェクトだけでなく、共用研究開発インフラ・ネットワークの運営、国際標準化の推進、ナノテク教育・人材育成政策など、非常に充実している。過去数年で、ナノテクノロジー分野の論文数・増加率とも世界のトップクラスに躍進している。

【コラム】 アジア・ナノ・フォーラム

2004 年に産業技術総合研究所（AIST）／経済産業省／新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）／物質・材料研究機構（NIMS）が起案して創立されたアジア・ナノ・フォーラム ANF（Asia Nano Forum／asia-anf.org）では、アジア圏のナノテクノロジー推進に関するネットワーク・コミュニティ形成、情報交換、人材育成等を目的とした活動がおこなわれている。ANF は 2007 年に NPO として独立し、現在、シンガポールの材料研究・工学研究所（IMRE）内にオフィスを構えている。

ANF のメンバーは、アジア・太平洋地域の 16 経済圏の各主要研究機関から構成され、日本、中国、韓国、台湾、香港、インド、インドネシア、タイ、ベトナム、マレーシア、シンガポール、オーストラリア、ニュージーランド、イラン、UAE を含む（※アジア地域ではないが欧州からオーストリア政府機関が参画している）。日本からは産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、科学技術振興機構がメンバーとなっている。

ANF の主な活動内容は、毎年サミット会議（ANFoS）開催による各国の情報交換、テーマ別の 5 つのワーキンググループ活動（ナノテクノロジー標準化、ナノテクノロジー教育、研究インフラ、ナノ安全・リスクマネジメント、ナノ商業化）である。教育 WG では、各メンバー機関から募った優秀な大学院学生を対象とした教育交流プログラム「Asia Nano Camp（ANC）」（2008 ～）を毎年開催している。また、2013 年にナノ安全の定例シンポジウム「Asia Nano Safe（ANS）」がスタートした。

2.2.1.3 研究コミュニティと研究者の動向

日本における最大の問題の一つは、小中高生の理科離れ、理学部・工学部志望学生の減少、若手研究者の国内志向など、ナノテクノロジー・材料の発展の上でも大きな障害になる教育・人材育成上の諸課題に対して、長期的視野に立った対応策を有していないことである。人材育成に関するプログラムは、そのほとんどが一過性で短期的なプログラムであり、有効な打開策を打つことができていない。これは、異分野間を横断して俯瞰的な視野を持つ人材を必要とするナノテクノロジー・材料分野にとっては、長期的に見て最大の問題といえる。

■学会の動向

図 2-20 は、日本と米国のナノテクノロジーや材料に関連する主要学会について、近年の全会員数の増減について示したものである。日本では、応用物理学会、日本化学会、日本物理学会とも会員数を減らしている（日本化学会は13年で約7,500人減、日本物理学会と応用物理学会は約3,000人減）。特に企業会員数が減っているとの認識である。また、米国の学会会員数は、American Chemical Society（ACS）でやや減少、Materials Research Society（MRS）では横ばい、American Physical Society（APS）は会員数を増やしている。

研究者コミュニティ（主な学会動向）			
・日本の学会員数は減少傾向 ・昨年度の主要5学会の参加者数は延べ2.2万人程度（重複あり）			
学会名	会員数（最新）	年会参加者（27年度）	会員数（過去）
応用物理学会	19,937名（2015年12月末）	約6,200名	23,109名（2002年12月末）
日本物理学会	16,332名（2015年12月末）	約3,900名 ※	19,396名（2002年12月末）
日本化学会	28,653名（2016年2月末）	約8,300名	36,062名（2002年12月末）
高分子学会	10,505名（2015年3月末）	約2,600名	12,148名（2003年度末）
日本金属学会	5,148名（2016年2月末）	約1,400名	7,421名（2006年2月末）
※ 物性関係のみ			
学会名	会員数（最新）	会員数（過去）	
American Physical Society (APS)	53,099名（2015）	46,269名（2008）	
Materials Research Society (MRS)	16,000名（2016）	16,000名（2008）	
American Chemical Society (ACS)	157,000名（2015）	158,422名（2005）	

図 2-20 研究者コミュニティ（主な学会動向）

また、自国以外の（外国人）会員数の割合については、日本の学会が1%前後であるのに対して、米国は40%前後であり、日本は比較にならないほど国際化の面で遅れをとっている。特に、ナノテクノロジー・材料分野の政府の投資は、今、欧米よりもアジアが増えている。アジアに重心が移っているにも関わらず、先端科学でリードしてきた日本が国際化に遅れ、アジアの研究者を吸収できないのは、政府だけでなく、アカデミアにも課題

があるといわざるを得ない。経済がグローバル化するはるか以前に、科学の世界ではグローバル化が進むはずであるが、日本に流出入する科学技術人材の移動は伴っていない。

■論文から見る研究コミュニティの動向

日本のナノテクノロジー・材料分野の論文執筆研究者数（図 2-21）は、2014 年に約 2.5 万人で、中国、米国に次ぐ第 3 位となっている。しかし、2005 年からの変化に注目すると、世界的にナノテクノロジー・材料分野で論文を執筆している研究者数は欧米諸国が約 2 倍、中国は約 6 倍、韓国が約 3.3 倍の伸びを見せる中、日本は約 1.3 倍の伸びに留まっている。なお、データベースへの収録誌自体も増加しているため、上述の増加率がそのまま研究者人口の増加率に比例しているわけではないことには留意が必要である。

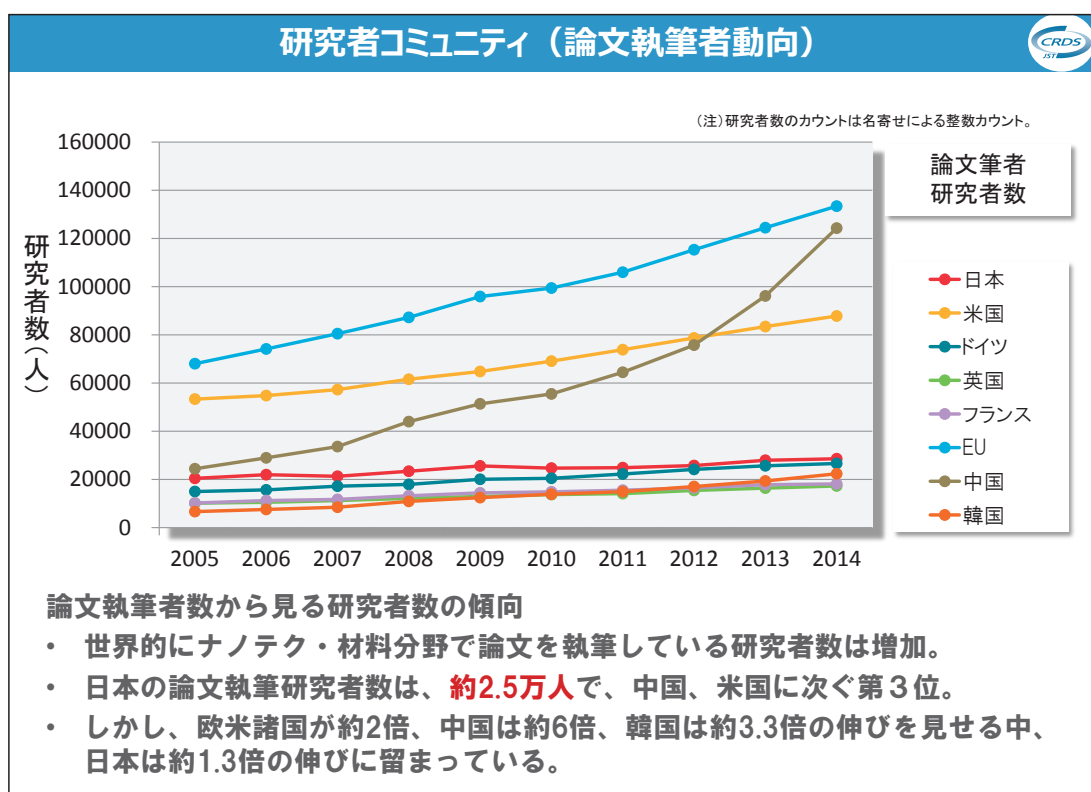


図 2-21 ナノテク・材料分野の論文執筆研究者数の国別推移

参考として各国の統計による主要国の研究者数は、過去 20 年以上に亘って、米、欧、日を中心にして増加傾向にあり、21 世紀に入ってから、中国と韓国の伸び率が目立っている。文部科学省が毎年発行している科学技術要覧の平成 28 年度版によると、各国の研究者数は、米国（125.3 万人／2011 年）、中国（152.4 万人／2014 年）、日本（86.7 万人／2015 年）、ロシア（44.5 万人／2014 年）、ドイツ（36.0 万人／2014 年）、韓国（34.5 万人／2014 年）、英国（27.4 万人／2014 年）の順となっている。各国の研究者の中での企業研究者の割合は、米国（81.6％／1999 年）、韓国（78.7％／2013 年）、日本（74.1％／2015 年、専従換算）、中国（62.1％／2014 年）、フランス（60.4％／2014 年）の順となっており、欧州の主要国である英国（38.2％／2014 年）、ドイツ（56.8％／2014 年）では低くなっている。

■国家プロジェクトの事例から見る若手・専門人材動向事例）元素戦略プロジェクト〈研究拠点形成型〉（H24-33）

[概要]

2007 年に始まった「元素戦略プロジェクト〈産学官連携型〉」を強化するため、卓越した洞察力とマネジメント能力を備えた代表研究者が、(i) 電子論、(ii) 材料創製、(iii) 解析評価の 3 つのグループの若手研究者を結集した異分野協働研究拠点とそれを支える研究ネットワークを形成し、国際競争の激しい物質・材料研究において強力な巻き返しを図ろうとしている。我が国の産業競争力に直結する①磁石材料、②触媒・電池材料、③電子材料、④構造材料の 4 つの材料領域において、希少元素を用いない全く新しい材料の開発を目指し、最先端の物理・化学理論を駆使して機能設計から部材試作までを一貫して実施する。各学会及び産業界の有識者からなる「元素戦略プログラム運営委員会」が事業全体の運営を監督し、経済産業省とも緊密に連携する。2017 年現在、約 440 名規模の研究者が参画しており、その内の半数は若手研究者である。

[公募時に求められた研究環境整備に関する留意点]

- 研究者から研究以外の職務を減免するとともに、企画部門における種々の手続き等管理事務をサポートするためのスタッフ機能を充実させる。
- 主任研究者や若手研究者については、努めて広い学問分野から有望な人材を集結させるとともに、一定の流動性を確保する。若手研究者に対しては、任期終了後のテニユアポスト（安定的な職）を用意することにより、テニユアトラック制に準ずる措置を講じるなど、拠点設置期間内でキャリアパスの整備に努めるとともに、他の大学や企業等での活躍も可能となるようキャリア形成支援を積極的に行う。
- 当該材料領域において我が国を代表する研究拠点としてふさわしい研究室、居室等の施設・設備環境を整備する。
- 当該材料領域に関係する研究者を集めた学際的な研究集会を定期的で開催する（少なくとも年に 1 回以上）。また関連する学会が開催する元素戦略に関わるシンポジウム等の企画・運営に参加する。

[想定されるメリット・デメリット]

- 10 年間のプロジェクトであるため、PD が研究に専念する期間を長く確保することができる。
- その一方で、10 年間という長期間であるために、プロジェクト終了後のキャリアパスについては十二分に検討しておく必要がある。
- 4 拠点が連携して研究を推進しているため、拠点間の人材交流が比較的可能であり、学際的な人材育成が期待される。

事例）ナノテクノロジープラットフォーム事業（H24-33）

[概要]

全国 26 法人 40 機関のネットワークにより外部ユーザへ先端設備・技術の外部共用を進める。2016 年 12 月時点で約 500 名の教員・研究者が参画、約 200 名の技術専門人材を雇用。約 1,000 台の装置を開放し地域大学や民間企業を含め、利用件数は年間 3,000 件にのぼる。事業前半期を経て、産・学の多様な研究ニーズに対応する、研究開発インフラとして大きく成長している。

〔課題〕

- 施設・設備の運転や技術の高度化に携わる人材の不足と、彼らのキャリアパス整備の必要性が課題になっている（文部科学省先端研究基盤部会報告書でも指摘 H24.8）
- 高度技術人材に求められる主要知識やスキルが必ずしも明確化・共有されていない。電子顕微鏡操作や測定データの解析など、高度なスキルと経験が要求され、日進月歩の設備、技術に対応するためのスキルアップを定常的に行う機会は必須。
- 産学いずれにおいても、技術専門人材を長期的・安定的に確保する方策が未だ見出せていない。
- 機関に雇用されている多くは任期制。ごく稀にパーマネントの技術職ポストへ移行するケースもあるが、大学・研究開発法人の人件費・財源の問題もあり、教員数と競合。
- 各機関で雇用される技術専門人材の全国的なネットワーク化や流動化を進める方策が必要。

一方、優秀な技術専門人材育成のための新しいキャリアパス設計や若手研究員の企業におけるインターン制度などが一部の国立研究開発法人を中心に自主的に施行され始めている。文部科学省の平成 26 年度科学技術人材育成のコンソーシアム構築事業において、「ナノテクキャリアアップアライアンス (Nanotech CUPAL)」がある。Nanotech CUPAL は、TIA と京都大学を中心に全国の 15 の大学・研究機関が参画し、ナノテクノロジー研究人材のキャリアアップと流動性向上を図ることを目的としている。参画機関間で研究開発人材が中長期または短期的に移動して研鑽を積むことによって、①民間企業の研究職として求められるような研究プロフェッショナル人材の育成、②高度な専門知識・先端機器等のノウハウ・蓄積を備えた、ものづくりを担うスペシャリスト人材の育成、のそれぞれを目指して開始された。イノベーション創出を担う人材が輩出するプログラムとして発展していくことが期待されている。

■教育政策の動向

ナノテクノロジーは、異分野融合と組織連携を促進させて新しい領域や産業技術を生み出すことが期待されている分野で、米国や台湾ではそのための小中高一貫教育システム (K-12) の構築に向けて諸施策が講じられている。

米国は、ナノテクノロジーを科学技術の K-12 教育の軸に据える計画で、カリキュラムや教科書の作成、教員の養成プログラムを NNIN などの共用施設を優先的に使用して実施している。この K-12 を米国よりも早く進めているのが台湾で、すでに教科書（中国語版、英語版）が作成されている。韓国でも大学院学生・若手研究者向けのナノサイエンスをベースとした物理 (Introduction to Physics of Nano-Science)、化学 (Nanochemistry)、電子デバイス (Nanoelectronic Devices) などの英文版の教科書が作成されている。

日本は、人材育成プログラムは総じて一過性で、教育についてはほとんど長期的・体系的なプログラムは存在しない。そのようななか、大阪大学ナノサイエンスデザイン教育研究センターは、文部科学省の科学技術振興調整費の新興分野人材養成プログラムによって 2004 年に設立され、2009 年からは別のプログラム（文部科学省特別教育研究経費）で「ナノサイエンス・ナノテクノロジー総合デザイン力育成事業」（-2013.3）、更には、「社会に開かれたものづくり理工学の国際人材育成モデル事業」（-2016.3）として順次拡充発展が

図られた。2014 年度末までの 11 年間の実績は、博士前期課程受講者数 914 名、博士後期課程受講者数 114 名、社会人教育受講者数 920 名、合計受講者数 1948 名を数え、多数のナノテクノロジー教育訓練を施した。しかしこれらは現場の自主努力によるところが大きく、日本全体のナノテク教育をカバーすることは難しい。今後は、産業界のサポートや、マッチングファンドなど、教育機関としての自主努力にインセンティブを付与する政策が必要であろう。

2.2.1.4 世界の研究開発の動向

(1) 研究開発領域（3章）のサマリー

■国際比較まとめ

3章の37の研究開発領域について、7つの区分ごとに国際比較結果を記す。終わりに国際比較表のまとめを掲載する。あわせて参照されたい。

環境・エネルギー分野に関わるナノテクノロジー・材料

太陽電池、人工光合成、燃料電池、熱電変換、蓄電デバイス、パワー半導体、グリーン触媒、分離材料・分離工学といった領域においては、再生可能エネルギー利用、効率的なエネルギー蓄積・変換、CO₂削減、水の浄化などに密接に関わるため世界的な関心が高く、研究活動が上昇傾向にあるものが多い。特に蓄電デバイスやパワー半導体は世界的に研究が強化傾向にある。

国別に見ると、日本は8つの研究開発領域全てにおいて基礎研究から産業化まで強く、特に人工光合成、熱電変換、蓄電デバイス、パワー半導体は国のプロジェクトも充実し、上昇傾向にある。ただし、太陽電池およびグリーン触媒の産業は中韓との競争により状況が停滞傾向にあり、今後の研究開発強化が課題である。

米国は熱電変換、パワー半導体、分離技術は強く、太陽電池、熱電変換、蓄電デバイスでは基礎研究から応用開発まで上昇傾向にある。ただし、太陽電池、燃料電池、2次電池といった電池に関しては日欧に比べ応用開発が弱い。

欧州は太陽電池、熱電変換、パワー半導体、グリーン触媒が強く、蓄電デバイス、パワー半導体が基礎研究から応用開発まで上昇傾向にある。特に、パワー半導体においては極めて高い基礎研究力、産業界を中心とした産学連携での開発力、パワー半導体をキーコンポーネントとした電力・エネルギーシステムで世界的な競争力を有しており、勢いがある。

中国は全体的に日米欧に比べて劣勢ではあるが、熱電変換および分離材料・分離工学の製錬・都市鉱山関係の基礎研究と応用開発が強く上昇傾向にある。燃料電池、蓄電デバイスおよびグリーン触媒についてはまだ顕著な活動・成果は認識されていないが、活動は上昇傾向にある。

韓国は全体的に日米欧に比べて基礎研究で差があるとされるが、蓄電デバイスの応用開発については強く、電池開発強化を国策としていることから上昇傾向にある。また、熱電変換は基礎研究と応用開発に力を入れており、上昇傾向にある。

ライフ・ヘルスケア分野に関わるナノテクノロジー・材料

バイオイメーキングが基礎研究から産業化のフェーズまで「上昇傾向」にある。また、脳・神経計測は世界的に大型の研究プロジェクトが開始し、バイオイメーキング関連技術の進展とも相まって「上昇傾向」にあるといえる。

国別にみると、日本は基礎研究で高いレベルを維持している。しかし、バイオイメーキングの領域を除くと、その他の領域では基礎研究の強みが産業化フェーズの競争力に確実につなげられていない。とくに生体材料（バイオマテリアル）では、中国、韓国にも遅れをとりつつある。大企業の参入が進まないことや、ベンチャー企業を支える環境の不足、安全性評価・承認に係る法整備の遅れなどが共通の要因として挙げられる。

米国は基礎研究から産業化のフェーズに至るまで強い競争力を維持している。応用研究・開発フェーズではベンチャー企業を中心に多様なプレイヤーがおり層も厚い。NIH、FDAの支援体制も整備されており、基礎研究から産業化へのスピードが速い。

欧州は基礎研究で高いレベルを維持するとともに、応用研究・開発フェーズで異分野連携、産学連携を積極的に進めており、産業化フェーズでは米国に次ぐ競争力を維持している。

中国は基礎研究で欧米、日本のキャッチアップを着実に進めている。ナノ DDS では主要雑誌において論文数、被引用回数ともに米国とトップを争うレベルに到達している。自国内の大きな市場や臨床研究の容易さを背景に産業化も加速している。

韓国はインフラ整備や人材獲得に積極的に取り組んでおり、再生医療材料、バイオデバイス、ナノ DDS で競争力を増している。生体イメージングでは欧米からの帰国者を中心に基礎研究が活発に進められている。

情報通信・エレクトロニクス分野に関わるナノテクノロジー・材料

従来から取り組まれてきた技術（例えば超低消費電力ナノエレクトロニクスや MEMS など）のトレンドは現状維持が多いものの、新規技術（例えば二次元原子薄膜）は「上昇傾向」にある。ナノエレクトロニクスでは、全般的にロジック関連技術の目立った進捗は少ないが、メモリ関係では不揮発性メモリを中心に世界的に研究開発活動が活発化している。これは今後の人工知能や IoT 時代に使われる基盤デバイスは「メモリ素子」との認識から来ていると考えられる。新しい兆候としては、ロボット基盤技術などがあげられる。

国別に見ると、日本は伝統的にスピントロニクスや有機エレクトロニクスに強いが、フォトリソグラフィやナノエレの分野では「現状維持」の傾向が強い。また二次元機能性原子薄膜、特にグラフェンの研究開発では欧米の着手が先行したが、2014 年開始の CREST・さがけ等による巻き返し・新基軸が期待される。新しい材料として注目されているトポロジカル絶縁体に関しては、日本からもいくつか成果が出ており、今後の進展が期待される。

米国は不揮発性メモリ、量子情報、二次元原子薄膜、フォトリソグラフィ、MEMS/NEMS、三次元集積チップと全般に亘って満遍なく強みを発揮している。基礎研究や応用研究に止まらず、産業化フェーズでも高いレベルを維持しているのは、ファブレスやベンチャー企業のビジネスモデルがうまく機能しているからと思われる。

欧州は EU Flagship が開始されたこともあり、グラフェンなどの二次元原子薄膜は強いが、一般的に「産業化フェーズ」での活動が日米韓に比して劣勢である。ただし、MEMS/NEMS に関しては、フラウンホーファーや ST マイクロ、BOSCH などが精力的に開発・製品化を行っているので多くの成果が出ている。また EU は今後急速に進展が期待される自動運転技術に関しては、いくつかの重要技術を有している。

中国は現状分析では、他の地域に比して全般的に劣勢とされるが、トレンドは「上昇傾向」が多く、今後の進展が予想される。

韓国は基礎研究フェーズでは日米欧に比して劣勢であるが、応用研究フェーズでは強みを発揮している。特に、Samsung を中心に、スピントロニクス（STT-MRAM）、有機エレクトロニクス（ディスプレイ）など、エレクトロニクスへの応用展開では日米欧を凌ぐレベルにある。

社会インフラ分野に関わるナノテクノロジー・材料

ここ数年来の動向としては、理論計算や数値計算モデルを活用したマテリアルズ・インフォマティクス（マテリアルズ・インテグレーション:MI）と呼ばれる新しい特性予測・組織設計の技術開発が進められている。米国では、Materials Genome Initiative として実部材の製造を目指した展開が開始され、新材料の設計で進展が見られる。国際的にホットな技術としてはハイエントロピーアロイや Additive Manufacturing が挙げられる。ハイエントロピーアロイは、複数の元素で構成される固溶体を基本とする多元系合金で、原子半径比や化学ポテンシャルの差を巧みに活用して組織制御を行うもので、強度－靱性・延性バランスの高い材料などが開発され、その機構解明も盛んに行われている。Additive Manufacturing は、ボトムアップ型の組織制御プロセスで、これまで主に外形制御が目的であったが、その精度が向上するにともない金属材料が得意とする組織制御にターゲットが移行しつつある。複合材料の主役である炭素繊維については、日本はその生産では世界市場で圧倒的な強さを維持しているが、成形技術においては、米国、ドイツが日本と同等以上と見られる。主に、米国は航空、ドイツは自動車を対象としてその技術を磨いている。また、英国も、航空機向けに特化して、産学官コンソーシアムを形成している。一方、アジアでは中国、韓国が近年、世界の炭素繊維市場に進出しつつある。ドイツでは、自動車のマルチマテリアル化研究開発が、自動車メーカーが主な実施者となって、国家プロジェクトとして進められ、マルチマテリアルによる軽量化で世界をリードしている。これに対し日本ではマルチマテリアルの実用化の面で欧州の後塵を拝していたが、平成 25 年に「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトが発足、複合材料も含めた広範な材料の開発とこれらの接合技術の確立を目指している。マルチマテリアル化に伴い、異種材料接合機構、強度発現機構の解明、接合界面の微視的構造と局所的接合強度を厳密に対応づけるための実験手法の確立が必要である。同時に、異種材料接合部の強度、破壊挙動の解明とそれに基づくマルチスケールでのシミュレーション手法の確立も求められる。異種材料の接着についてもドイツにはフラウンホーファ研究機構の下に接着技術の研究開発拠点があるが、日本では個別企業が独自に開発しており、拠点形成が求められる。

次に、社会インフラの維持管理技術について述べる。米国では、1967 年、2007 年の道路橋落下事故を受けて、継続的に道路橋の腐食調査を実施、道路橋の維持管理のための橋梁点検とそのマネジメントのガイドラインを作成しているほか、資格制度を設けている。欧州では ISO 規格 TC156（金属および合金の腐食）において社会インフラ関係の規格化を推進して、欧州規格を世界規格にしつつある。また、この規格の中で社会インフラの腐食のデータベースを保有している。また、自動車分野で腐食の基礎研究が進んでいる。

橋梁や化学、エネルギープラント（原子力発電、火力発電、核融合、再生可能エネルギーなど）などの大型構造物は溶接構造であり、劣化や破損の多くは溶接部で生じる危険性が高いため、溶接部の寿命予測、補修・保全技術が必要とされている。

社会インフラの維持にはセンシング技術が重要であり、信号解析、状態監視が必要である。センシングデータのワイヤレスネットワークによる収集は、米国 DARPA の Smart Dust プロジェクト、総務省のユビキタスネットワークなどで進められている。また、ディープラーニングを含めた機械学習の技術は、これから重要になってくる。

ナノテクノロジー・材料の機能設計・制御

この区分には、ナノテクノロジー・材料分野の核をなす研究領域が含まれ、近年は特に、2011 年の米国 Materials Genome Initiative の発表以降、データ駆動型物質・材料開発が世界的に最もホットな領域となっている。国別に見ると、日本は新学術領域研究や戦略的創造研究推進事業などのファンディング制度が充実しているため、基礎研究フェーズで活発な研究が行われている。また、応用研究・開発フェーズにおいても上昇傾向のトレンドを示す研究開発領域が多いが、現状では欧米と比較するとやや劣勢にあるといえる。特に、データ駆動型物質・材料開発においては、基礎研究フェーズ、応用研究・開発フェーズとも米国の取り組みがリードしており、日本は MI²I を中心に精力的に研究が進められている。

米国においては、DOE や NSF の支援により、現状では基礎研究フェーズで強みを発揮しているものの、工学的側面を重視した研究が多く、特に分子技術に関しては分子レベルにまで掘り下げた研究がほとんど無い。応用研究・開発フェーズにおいては、ベンチャー企業が充実している等の理由からほとんどの研究開発領域に関して他国と比較して優位性を保っている。

欧州においては、Horizon2020 による支援を中心にイギリス、ドイツ、フランスなどで活発に研究開発が展開され、基礎研究フェーズでは強みを有する研究開発領域が多い。応用研究・開発フェーズにおいては、空間・空隙制御材料、バイオミメティクスでは他国と比べ優位性を保っているが、その他の研究開発領域においては米国あるいは日本と比較するとやや劣勢にある。今後、イギリスの EU 脱退がどのような影響を及ぼすか注視が必要である。

中国においては、日欧米での留学経験のある若手研究者の登用や欧米の有力大学から有能な研究者を招聘すること等により、日欧米との差は縮まるばかりか、一部の研究開発領域では凌いでいる。既に空間空隙材料やバイオミメティクスにおいては基礎研究フェーズ、応用研究・開発フェーズとも世界トップクラスであると言える。特に磁石研究においては、希土類元素が豊富に存在することや日本の最先端技術を利用できる力を有するようになっていることから、世界の生産量を誇っている。データ駆動型物質・材料開発においては中国版 MGI を立ち上げるなど基礎研究フェーズでは活発な動きが見られるが、応用研究・開発フェーズにおける動きはまだ顕在化していない。

韓国においては、バイオミメティクスに関する国際会議を定期的開催するなどソウル大学、KAIST、浦項工科大学などを中心に基礎研究フェーズ、応用研究・開発フェーズとも精力的な基礎研究が行われているが、その他の研究開発領域においては世界に伍する代表的な成果や動きはそれほど顕著ではない。

ナノテクノロジー・材料の共通基盤科学技術

基礎および応用の科学技術の支える「共通基盤技術」には、「加工・プロセス」、「計測・解析」、および「理論・計算科学」が含まれる。

まず、「加工・プロセス」であるが、半導体デバイス領域で発展した微細加工技術は、半導体分野にとどまらず、ナノメカニクス、スピントロニクス、バイオナノテクノロジーなどへの波及が進んでいる。半導体ロードマップによると、2021 年以降トランジスタのゲート寸法は 10nm で微細化が止まるとされている。デバイス微細化の限界に挑戦する

技術として、EUV 露光光学系の高度化でシングルナノメートル領域を実現しようという技術開発が進んでいる。この他、ナノインプリント技術、自己組織化技術、電子ビーム直描などのマスクレスリソグラフィも注目される。半導体集積回路の高集積化を担う先端半導体メーカーが全世界でも限られるようになり、先端リソグラフィ技術の開発は米国の Intel、韓国の Samsung、台湾の TSMC が 3 強として先導し、米国の Global Foundries や Micron、日本の東芝や韓国の Hynix がこれを追う状況にある。SEMATECH がその技術開発の先導としての役割を終え、技術開発の中心は民間コンソーシアムや、IMEC、LETI など公的コンソーシアムに移っている。このような中で、日本としてどのようにして微細加工の技術開発をしているのか、難しい状況にある。民間コンソーシアムの先端ナノプロセス基盤開発センター（EIDEC）が、ナノレベル欠陥の改善・制御や次世代デバイスの研究開発を進めているが、国としてどのようなナノエレクトロニクスデバイスに注目し、それに関わる計測評価技術や微細加工技術、作製プロセス技術開発の施策を作るのか、難しい課題となっている。

「計測・解析」については、世界的な傾向として、オペランド計測技術の進展がある。これは、デバイスの動作状態で、さまざまな物性量の時間変化を観測する技術で、特に電池、触媒、トライボロジーなどの産業技術分野において重要性を増している。これについては、欧米が一步進んでいるが、日本においても、SPM、電子顕微鏡、放射光において急速に進展しており、肩を並べるに至っている。放射光オペランド計測は、今後ともリチウムイオン電池や燃料電池開発分野での利活用が継続すると予想される。モデル試料における基礎的な観点での計測から、パッケージ製品の直接観察の重要性が増すとすれば、より高エネルギーの X 線を利用した分光（コンプトン散乱等）や X 線 CT、さらには、コヒーレント X 線回折によるナノ構造の可視化などが急速に発展すると予想される。

「理論・計算科学」は、物質・材料科学の基礎を支える重要な科学技術で、量子力学や統計力学の諸知見を活かし、物質の構造、物性、材料組織、化学反応機構などを高精度に解析・予測する技術の確立を目指す。

米国では 2011 年に発表された「Materials Genome Initiative (MGI)」をきっかけに、物質・材料分野へ巨額な公的資金が投入され、民間からも物質デザインの分野への積極的投資が行われている。「自己組織化バイオマテリアル」、「有機太陽電池」、「セラミクス」、「構造材料としての新奇高分子や合金」などの研究のため、公的研究費の増額など様々な物質科学分野への支援がなされており、それに比例してシミュレーション分野にも研究費がついている。また今後も NIST 主導で、大規模大容量の物質データ処理分野への資金投入が予定されている。欧州では、2009 年に MatSEEC を組織し、欧州各国において物質材料科学分野に集中的な支援を行ってきた。さらに 2012 年に PRACE が組織され、2020 年までの 9 年間にわたって、計算科学の諸分野への支援がなされる計画である。重点課題として「強相関電子系」、「ソフトマター」、「量子化学」、「光化学（励起状態）」、「第一原理に基づくデバイス設計」、「ナノ構造形成」を挙げている。中国においては、計算物質科学研究に関する論文が格段に増加しており、質の高さでも日本を凌駕している。超並列計算機環境も、世界の Top を占めており、応用計算に多くの資源が供給されているが、プログラム開発に関してはまだまだ途上にある。

環境・エネルギー応用

国名	用途	太陽電池		人工光合成		燃料電池		熱電変換		蓄電デバイス		パワー半導体		グリーン触媒		分離材料・分離工学	
		現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	基礎	◎	→	◎	↑	○	→	◎	→	◎	↑	◎	↑	◎	↑	◎	→
	応用・開発	◎	↑	◎	↑	◎	↑	◎	→	◎	→	◎	↑	◎	↑	◎	→
米国	基礎	○	↑	◎	→	○	→	◎	→	◎	↑	◎	→	○	→	○	→
	応用・開発	○	↑	○	→	○	→	◎	↑	◎	↑	◎	→	○	→	◎	→
欧州	基礎	◎	→	◎	→	◎	→	◎	↑	◎	↑	◎	↑	◎	→	◎	↑
	応用・開発	◎	→	○	↑	○	→	◎	↑	◎	↑	◎	↑	◎	→	○	↑
中国	基礎	△	↑	△	→	○	↑	◎	↑	◎	↑	◎	→	○	↑	○	→
	応用・開発	○	↑	×	→	○	↑	◎	↑	◎	↑	△	↑	○	↑	○	→
韓国	基礎	△	→	△	→	△	→	○	↑	○	→	△	→	△	→	△	→
	応用・開発	○	↑	×	→	△	↑	○	↑	◎	↑	△	→	△	→	△	→

国・地域	生体材料 （バイオ マテリアル）	再生医療材料	ナノ薬物送達シ ステム （DDS）	計測・診断デバ イス	脳・神経計測	バイオ メクス			
						ロボット		ヘルスケア	
						ロボット （作業用）	ヘルスケア （介護用）	ヘルスケア （介護用）	ヘルスケア （介護用）
日本	基礎 応用・ 開発	◎ ○ →	◎ 〃	◎ 〃	◎ →	◎ →	◎ →	◎ 〃	◎ 〃
米国	基礎 応用・ 開発	◎ →	◎ →	◎ 〃	◎ →	◎ 〃	◎ 〃	◎ 〃	◎ 〃
欧州	基礎 応用・ 開発	◎ →	◎ →	◎ 〃	◎ →	◎ 〃	◎ 〃	◎ 〃	◎ 〃
中国	基礎 応用・ 開発	◎ 〃	◎ 〃	◎ 〃	◎ 〃	△ →	△ →	△ →	△ →
韓国	基礎 応用・ 開発	◎ →	◎ 〃	◎ 〃	◎ 〃	△ →	△ →	△ →	△ →

[illegible]

		構 料 造 材		非 破 壊 予 検 査 ・ 劣 化	接 合 ・ テ ィ ン グ ィ ン						
		属 料 構 系 ・ 金 材	料 材 構 合 ・ 複 材		接 合 ・ 接 着		接 合 ・ 接 着		接 合 ・ 接 着		
					接 合 ・ 接 着	接 合 ・ 接 着	接 合 ・ 接 着	接 合 ・ 接 着			
国	フェーズ	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	基礎	◎	△	○	→	◎	→	◎	△	◎	△
	応用・ 開発	◎	△	○	→	◎	→	◎	△	◎	△
米国	基礎	◎	△	○	→	◎	→	◎	→	○	△
	応用・ 開発	◎	○	→	◎	△	○	→	◎	→	△
欧州	基礎	◎	△	○	→	◎	△	◎	→	◎	△
	応用・ 開発	◎	△	○	→	◎	△	◎	→	◎	△
中国	基礎	△	→	○	→	△	△	○	△	△	→
	応用・ 開発	○	→	◎	△	○	△	◎	△	○	→
韓国	基礎	◎	△	○	△	△	→	△	△	○	△
	応用・ 開発	○	△	○	→	△	△	△	△	◎	△

		制空 間・ 空 間 設 計	バ イ オ ミ メ テ ィ	分 子 技 術		元 素 代 替 技 術 ・ 希 少 元 素 戦 略		ナ ノ イ ン ジ ン グ ・ イ ン テ グ ラ シ ョ ン ・ フ ォ ト マ シ ン	ナ ノ イ ン ジ ン グ ・ イ ン テ グ ラ シ ョ ン ・ フ ォ ト マ シ ン	フ ォ ノ ン エ ン ジ ン グ	
				現 状	ト レ ン ド	現 状	ト レ ン ド			現 状	ト レ ン ド
国	フェーズ	現 状	ト レ ン ド	現 状	ト レ ン ド	現 状	ト レ ン ド	現 状	ト レ ン ド	現 状	ト レ ン ド
	基礎 応用・ 開 発	◎	→	◎	△	◎	△	○	△	◎	→
日本	基礎 応用・ 開 発	○	△	○	△	○	△	○	△	○	△
	基礎 応用・ 開 発	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△
米国	基礎 応用・ 開 発	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△
	基礎 応用・ 開 発	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△
欧州	基礎 応用・ 開 発	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△
	基礎 応用・ 開 発	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△
中国	基礎 応用・ 開 発	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△
	基礎 応用・ 開 発	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△
韓国	基礎 応用・ 開 発	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△
	基礎 応用・ 開 発	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△	◎	△

2007年10月20日		2007年10月20日		2007年10月20日		2007年10月20日	
国	フェーズ	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	基礎	○	△	◎	△	現状	△
	応用・開発	○	○	○	△	○	△
米国	基礎	○	→	○	→	◎	△
	応用・開発	◎	→	◎	→	◎	△
欧州	基礎	○	→	◎	△	◎	△
	応用・開発	◎	△	◎	△	◎	△
中国	基礎	△	→	○	→	△	△
	応用・開発	○	△	○	→	○	△
韓国	基礎	△	→	△	→	△	→
	応用・開発	◎	△	△	→	△	→
台湾	基礎	△	→	○	→	○	△
	応用・開発	◎	△	◎	△	◎	△

		E L S のナ テク ノロ ジ ー I N T E R N A T I O N A L S T A N D A R D	
国	フェーズ	現状	トレンド
日本	取組 実効性	○	→
	取組 実効性	×	→
米国	取組 実効性	○	↗
	取組 実効性	◎	→
欧州	取組 実効性	◎	→
	取組 実効性	◎	→
中国	取組 実効性	○	↗
	取組 実効性	△	↗
韓国	取組 実効性	△	↗
	取組 実効性	△	↗

■注目動向

前回の「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野（2015年）」からの変化や世界的なトピックス（図 2-22）について述べる。

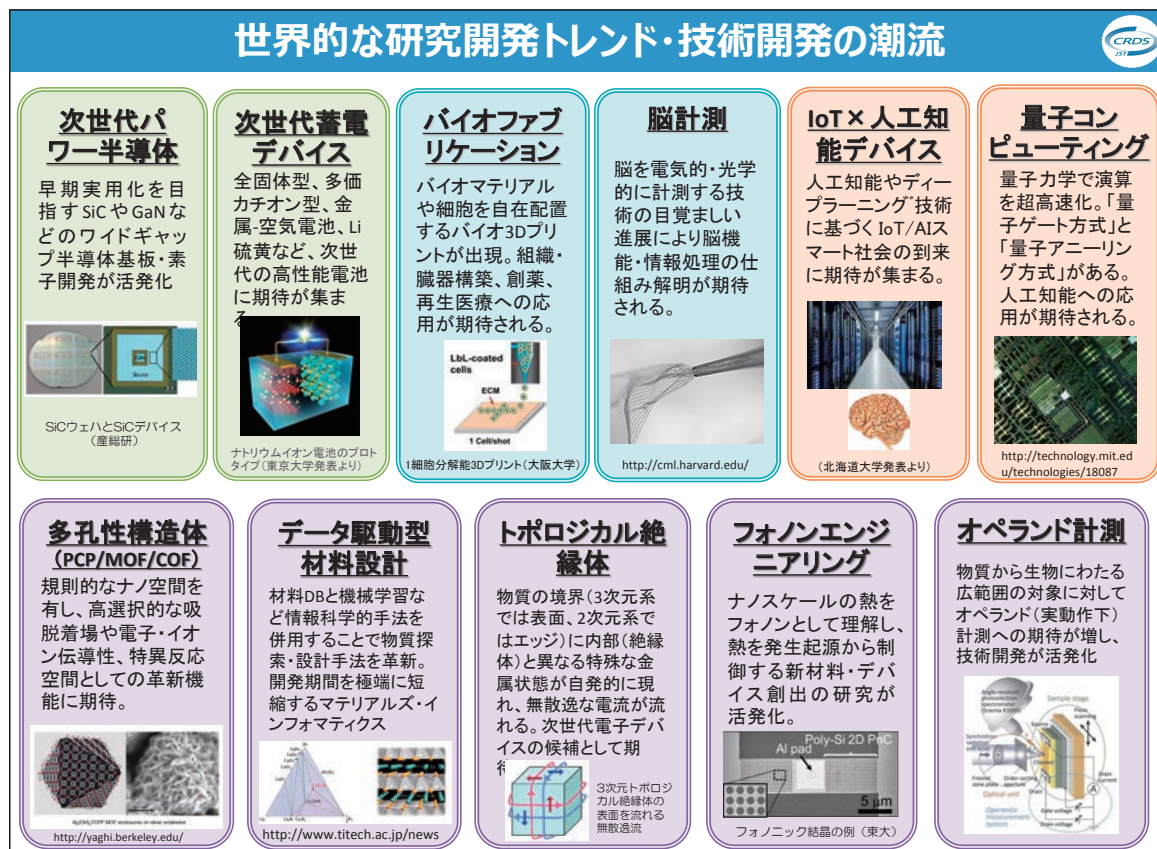


図 2-22 世界的な研究開発トレンド・技術開発の潮流

次世代パワー半導体

地球温暖化、異常気象、砂漠化などの環境問題を解決するためには、非効率なエネルギーの大量消費を根本的に見直すことや、従来の化石燃料エネルギーから自然エネルギーへの転換を促進して二酸化炭素の排出量を削減することが世界的に急務になっている。一方、全エネルギー消費に対する電気エネルギーの占める割合は年々増加しつつあり、電気エネルギーの輸送・変換・制御・供給に関わる広範囲のパワー関連機器において省電力化への期待が高まっている。このため、高効率の電力変換・スイッチ用パワー半導体デバイスの開発・普及が重要であり、パワー半導体デバイスにはより高い耐電圧、低損失（低オン抵抗）が求められている。

現在普及しているシリコン（Si）を用いたパワー半導体は、Siの材料定数によるデバイス性能の限界が指摘されており、原理的に高耐圧化と低オン抵抗の両立が可能な炭化シリコン（SiC）や窒化ガリウム（GaN）などSiよりも禁止帯幅（バンドギャップ）の広い半導体を用いたパワー半導体の早期実用化が望まれる。

SiCに関しては、各種パワーデバイスの製品化が進展しており、日米欧の複数のメーカーから市販され、すでにエアコンの省エネ型インバータに使用され、鉄道車両用インバータとして利用され始めており、車載用デバイスの研究も進展している。しかし、性能や信頼性の点ではまだ十分とは言えず、基板材料・プロセスからデバイス・回路・実装面にわた

る広範囲な研究開発を行う必要があり、日米欧を中心に研究開発が活発になっている。また、GaN においてもまだ基板の問題が多いが、高速な動作が期待されている。このため、Si 上の GaN 基板や自立の GaN 基板の研究開発や横型の HEMT 構造や、縦型デバイスの研究開発が活発になってきている。その他、SiC や GaN よりもバンドギャップの大きな酸化ガリウム (Ga_2O_3) やダイヤモンドの研究も盛んになっている。

次世代蓄電デバイス

蓄電デバイスはモバイルなどの民生用途のみならず、電気自動車用途にむけて市場が急速に拡大しつつあり、高信頼性、高耐久性、高入出力特性など要求される性能が上がり、技術開発競争が世界で激化している。また、再生可能エネルギーの最大限の活用に向け、変動の吸収緩和、出力が一定となる制御、あるいは需要側での変動緩和やピークシフトの目的から、大容量の定置用蓄電デバイスのニーズが顕在化してきている。

そのようななかで、現行のリチウムイオン電池の性能を凌駕する次世代型と目される電池系がいくつかあり、安全性の高い「全固体型電池」や、エネルギー密度や容量の大きい「金属・空気電池」、「リチウム・硫黄電池」などの研究が盛んである。また、「レドックスフロー電池」の研究が特に海外で活発化している。

全固体型電池は、過熱による変形や膨張、発火事故の解決手段として、電解液に匹敵するイオン伝導性をもつ固体電解質の開発が期待されている。固体電解質材料は、酸化物系、硫化物系、高分子系に大別される。硫化物系は有機電解液系で生ずる多硫化リチウムの溶解が起こらないため、Li-S 電池の有力電池系として検討されている。近年有機電解液とほぼ同等のイオン伝導特性を示す固体電解質 $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ (LGPS = リチウム・ゲルマニウム・リン・硫黄) が東工大、トヨタ自動車らによって発見された。

正極として空気中の酸素を使う金属リチウム・空気電池に関する研究は、エーテル系電解液が適用された 2012 年以降、空気極の特性が大きく改善し、世界的な広がりを見せている。学界のみならず、トヨタ、ホンダ、現代、BMW 等の世界の大手自動車メーカーも研究を進めている。リチウム・硫黄電池に関しては、硫黄は放電電位が Li 金属基準で約 2 V と層状酸化物系に比べると低いが、 1675 mAhg^{-1} の極めて高い比容量を持ち、ポストリチウムイオン電池の正極として検討されている。有機電解液を用いると硫黄の還元生成物の溶解が起こるため、無機固体電解質、ポリマー電解質を用いる研究が進められている。

レドックスフロー電池の主な形態は、電解液にバナジウムイオンを含む硫酸水溶液を利用したもので、正極と負極との間に隔膜を介在させた電池セルに、外部タンクから正極電解液及び負極電解液をそれぞれ供給して充放電を行う。この外部タンクに入った液体にエネルギーを貯蔵する二次電池である。日本では住友電工が主体となって開発している。主な特徴として、充放電サイクルの寿命が 1 万回以上と非常に長い、ミリ秒単位での瞬時応答性が可能で、短時間であれば設計の数倍の瞬時出力が可能である、常温動作で劣化が少ない、安全性が高いとされる。一方で、エネルギー密度が低く、電解液の循環のためにポンプが必要で、大型化せざるを得ないなどの課題もある。海外では、ここ数年で研究報告が著しく増加しており、特に、米国では 2009 年頃から複数の研究開発プロジェクトが立ち上がり、近年、その成果が表れてきている。

バイオフィabrication

バイオフィabricationは生体機能を有する組織体を主として生体外で構築する技術であり、かつてはバイオミネラリゼーションなどの生体プロセスを活用する研究が中心であった。近年、細胞研究の進展に加え、マイクロ・ナノ加工技術およびマイクロ・ナノ流体デバイス技術の発展によって、実際の生体組織に近い3次元の構造・機能をもつ組織体の構築が可能になり、再生医療材料分野における応用に期待が集まっている。特に、バイオマテリアルの原料と細胞を望みの位置に配置することが可能な3Dプリント法（バイオプリンティング）の出現によって、世界的に研究者人口が急増し、2010年にはバイオフィabricationの国際学会（International Society for Biofabrication）が設立された。

米国ではバイオフィabricationにより構築される組織体の製品化・産業化を目的に Manufacturing USA（National Network for Manufacturing Innovation、旧 NNMI）の下、2016年に Advanced Tissue Biofabrication Manufacturing Innovation Institute（ATB-MII）が設立された。日本では科学研究費新学術領域「超高速バイオアセンブラ」（平成23年度 - 平成27年度）において、in vitro環境で機能する3次元細胞システムを構築するための方法論創出を目指した研究が行われた。また、平成26年度に開始したAMEDの「立体造形による機能的な生体組織製造技術の開発」プロジェクトにおいて、3Dプリンタを用いた生体組織・臓器の製造技術の開発が進められている。大きな組織・臓器の構築には毛細血管網の構築が必要であるなど解決すべき技術的課題は多いが、バイオフィabricationは創薬研究や再生医療研究への応用、さらには移植治療が可能な組織・臓器構築の実現に向けて大いに期待される技術である。

脳計測

脳とそれを構成する神経細胞の計測に関する研究は、近年、世界的に大型の研究プロジェクトが開始し、盛り上がりを見せている。米国で2013年から始まった BRAIN initiative（Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies）は10年後にショウジョウバエ全脳、マウス海馬全体イメージング、15年後に覚醒マウスの大脳皮質全体イメージングを目標としている。欧州で2013年から開始した Human Brain Project は、脳計測技術と情報通信技術の融合、ICTインフラストラクチャーを確立し、脳構造・機能を模したニューロモルフィック工学やロボティクスを開発することによって、小型かつ低消費電力の情報処理装置を実現することを目指している。日本では革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト（革新脳、Brain/Minds）が2014年に開始され、MRI技術を中心に小型霊長類マーモセットの脳構造・機能マップを作製し、それと対応したヒト脳マッピングと臨床研究を通じてトランスレーショナルな脳マーカーを作製すること、脳マッピングに資する革新的技術を開発することを目指している。

日本は特にイメージング関連技術において高い研究レベルを維持しており、新しい蛍光プローブや組織透明化技術の開発、光学顕微鏡やMRIの優れた基礎技術などが脳計測研究を支えている。今後、全脳のイメージング・解析が進むとデータが膨大になることが予想され、大量のデータ処理が課題である。データ処理技術構築には情報科学・コンピュータ科学との融合を分野横断的に進める必要があり、府省連携、ファンディング制度の整備、人材育成が急がれる。データ解析方法の標準化も課題の1つである。

IoT × 人工知能デバイス

より低電力、高速化、小型化を実現するナノテク技術が基盤となり、人工知能、ディープラーニング、知的情報処理アクセラレータ、脳型コンピュータなどが実現し、それらを膨大なセンサネットワークで結んだ本格的な IoT 時代の到来が間近に迫っている。

人工知能はディープラーニングの登場と膨大な量のビッグデータによって、新たな可能性を切り開いて実用化へ大きく進展している。実際に自動運転やパーソナルアシスタントに適用される日も近いと言われている。米国では Google など企業の取組みも注目を集めており、2014 年には 5 億ドルという巨額の金額で DeepMind 社を買収した。同社は人工知能 AlphaGo の開発で大きな話題となった。いち早く人工知能の開発に取り組んできた IBM は、同社の人工知能 Watson を使って IoT を初め、医療、保険、金融など、様々なビジネスへと展開させている。人工知能のマーケットは今後 5 年から 10 年で大きく拡大することが予想されており、世界中で活発な研究開発が進められている。人工知能研究が進展した背景には、ディープラーニングの登場が大きく、この特長を活かして、画像認識、自然言語処理、自己学習ロボットなどの技術開発が大きく進展した。一方、IoT 時代に必須となるセンサ技術の進展も著しく、米国で 2013 年に Trillion Sensors プロジェクトがスタートし、10 年後の 2023 年に年間 1 兆個のセンサ使用を目指すとしている。年間 1 兆個は、現在のセンサ需要の 100 倍、世界の 70 億人が、年間 142 個ずつ使う規模である。医療・ヘルスケア／農業／社会インフラなどのあらゆる部分が、センサで覆われ、ビッグデータの適用範囲を拡大、社会や生活を大きく変える。IoT：(Internet of Things) や M2M (Machine to Machine) も同じ世界を描くが、これらが通信やネットワークが対象の中心であるのに対し、本取組みはセンサデバイスが中心となる。具体的な活動としては、“Trillion Sensors Universe” の実現に向けた産学官連携の取り組みを TSensors Summits™ によって推進する。参加メンバーは、米 Cisco Systems 社、米 HP Lab 社、米 Motorola Mobility 社などの大手 IT 企業、米 Intel 社、米 Texas Instruments 社、ドイツ Robert Bosch 社、伊仏 STMicroelectronics 社、韓 Samsung などの半導体・電子部品関連企業で、合わせて 30 社以上が参加した。また、米 Stanford 大学のほか、米 California Institute of Technology、米 University of California (UC) Berkeley、仏 CEA-LETI、ベルギー IMEC、Fraunhofer など 10 を超える大学・研究機関も参加している。10 の応用領域（教育、ヘルスケア（体内・外）、個人、コンピュータ、環境、社会インフラ、食糧、エネルギー、自動車、デジタルものづくり）と 4 つの基盤技術（エナジーハーベスト、無線給電、ネットワーク、分析）からなる。

量子コンピューティング

2013 年にカナダの D-Wave 社が超伝導の 512 量子ビットで構成された量子アニーリングに基づく量子コンピュータ 2 号機を Google、NASA および USRA に納入した。Google らはこれを核として量子人工知能研究所を設立して、主に機械学習などに関して研究を開始しており、量子コンピュータの研究開発が活発化するとともに、産業界の注目も集まっている。2015 年には 1000 個程度の量子ビットを搭載した量子コンピュータ D-Wave 2X で特定の最適化問題に対してだが、通常のコンピュータに比べ、1 億倍高速に解く事が出来たと Google 社合同チームから発表があった。この量子アニーリングは 1998 年に東工大の門脇正史と西森秀稔により発案されたものであり、最適化問題に適用でき、プログラ

ム不要でノイズに強く、古典的なシミュレーテッド・アニーリングより高速といった強みを持つ。しかし、万能（汎用）量子計算ではないことや劇的な高速化が保証された有用な問題が見つかっていないなどの弱みもある。

一方、汎用の量子コンピュータの基盤となる量子情報の技術においても進展が見られる。複数の量子ビットを組み合わせた回路で量子演算を行う場合、誤り耐性を持つ演算回路を実現することが必要である。2014 年に入り、誤り耐性量子計算コード（表面符号型）の実現に必要とされるような 99% 超の精度を持つ量子ゲート制御や量子ビット読み出しなどの報告がなされている。これらは、超伝導量子ビットのコヒーレンス時間の長時間化（100 μ s 超）が実現され、量子ビットの制御・観測の精度が飛躍的に高まったことによる。

上記の通り米国を中心に量子コンピュータが再び注目されているが、まだ萌芽的段階にあるといえる。米国では 2015 年から IARPA（The Intelligence Advanced Research Projects Activity）により QEA（量子アニーリング方式）と LogiQ（量子ゲート方式）の 5 年間プロジェクトがスタートした。日本においては、最先端研究開発支援プログラム（FIRST）「量子情報処理プロジェクト」などで、超伝導量子ビット、電子スピンを用いた量子ビットあるいはこれらのハイブリッド量子系の研究が行われ、2014 年からは革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）でも「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」として継続して研究開発が行われている。2016 年には文部科学省が設定した戦略目標「量子状態の高度制御による新たな物性・情報科学フロンティアの開拓」の下に、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」領域（研究総括：荒川泰彦・東京大学教授）、さきがけ「量子の状態制御と機能化」領域（研究総括：伊藤公平・慶應義塾大学教授）、ERATO「中村巨視的量子機械プロジェクト」（研究総括：中村泰信・東京大学教授）が発足している。これらの成果を確実な技術に結びつけるためには、研究チーム間・プロジェクト間の交流・連携を深め、長期的な視点で基礎物理の理解、材料・デバイス・回路・アーキテクチャ技術開発、拠点形成と人材育成などを継続的に行っていくことが望まれる。

多孔構造体（PCP/MOF/COF）

ポーラス性化合物はこれまで、金属イオンを含んでいる結晶性材料（ゼオライトなど）、あるいは有機物のみでできた非晶質であるもの（カーボン系）が中心であった。Dr. Omar Yaghi（UC-Berkeley）と北川進（京都大学）らによってコンセプトが確立された PCP（porous coordination polymer）、MOF（metal-organic framework）は、有機配位子を金属イオンによって配位結合を介して連結することで作られる（シンプルな化合物からシンプルな反応を経て得られる）無限骨格構造をもつ新たな多孔性材料であり、その後の多孔構造の設計に大きな指針を与えた。2008 年前ころから急激にその報告が増え、錯体化学者、高分子化学者、など様々な分野の研究者が参入している。MOF は構造に高い空隙率を有し、これらのポーラス性と電子伝導・イオン伝導特性を両立した成果がでてきている。また、いくつかの例は固体中におけるガス分子の輸送現象が新しいガス分離機能につながる成果として報告されている。最近ではその他の機能性として導電性、反応場、センサ、エネルギー捕集、医療応用などにも注目が集まってきており、応用範囲は拡大しつつある。MOF と同様の分子性多孔性結晶として共有結合性有機構造体（Covalent Organic Framework : COF）に関する研究開発も世界中で活発に行われている。COF

は MOF と異なり、骨格中に金属を含まず、有機元素のみから構築された結晶性ネットワーク型構造を有している。MOF と同様に高い設計性を有しているため、世界中で多くの研究者がこの材料の開発に参入しており、日本では北陸先端大の江東林らが積極的に研究を展開している。

米国では DOE や NSF を通じて、欧州では Horizon2020 を通じて、いずれも多数且つ多様なテーマ・切り口からの、多孔構造体関連のプログラム・プロジェクトが進行している。環境・エネルギー関連のテーマや計算科学を用いた材料設計を指向したものなど、多様な構成で実施されている。アジアでは、中国の研究規模が際立っている。米国や日本での研究・留学経験のある MOF/PCP 関連の研究者が多数活躍しており、政府によるプロジェクトも充実している。日本では、JST の CREST およびさがけの「超空間」領域、ACCEL の多孔性金属錯体を基盤とした二つの課題（PCP ナノ空間による分子制御科学と応用展開、自己組織化技術に立脚した革新的分子構造解析）が進行している。今後はナノからマクロへの「規模拡大」、統合して拡大しても全体調和が崩れない「結晶性制御」「高強度化」、現実的な時間と資源などのリソースに適応する「高速大量合成」「低コスト化」などが求められている。

データ駆動型材料設計

2011 年の米国「Materials Genome Initiative: MGI」をきっかけに、従来の実験・理論、計算科学に加えて、材料データベースと機械学習などの情報科学的手法を併用することで物質探索・設計手法に革新を起し、開発期間を短縮するデータ駆動型材料開発が世界中で精力的に実施されている。

材料科学においては、対象となる物質の組合せが膨大であり、かつ、組合せのわずかな違いで特性が大きく変化する特徴がある。これに対して米国の MGI は、研究者の長年の経験や勘に頼るのではなく、情報科学を駆使することで優れた性能を持つ新材料を生み出す速度を従来の 2 倍に高めることを目指したプロジェクトである。

一方、日本においては、2015 年に設立された物質・材料研究機構（NIMS）の情報統合型物質・材料研究拠点を中心に「マテリアルズ・インフォマティクス」の研究が実施されている。NIMS ではデータベースの開発・整備に加えて、物質・材料科学から情報・数理科学にわたる産学官の協働作業の体制を構築し、コンソーシアムを形成することでより広範な企業の参画を促し、オープンイノベーションに繋がるハブ拠点化を目指している。また、具体的課題として、蓄電池材料、磁性材料、伝熱制御材料を取り上げ、社会実装へつなげることもミッションとしている。この他、同じく 2015 年に発足した JST 戦略的創造研究推進事業（さがけ）「理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズ・インフォマティクスのための基盤技術の創出」領域（研究総括：常行真司・東京大学教授）においては、マテリアルズ・インフォマティクスの基盤技術の構築とそれを牽引する将来の世界レベルの若手研究リーダーの輩出を目指している。

世界では他に欧州の Computational materials Engineering、中国の China MGI、韓国の Creative materials Discovery Project などと同様のデータ駆動型材料開発の取り組みが精力的になされている。

トポロジカル絶縁体

従来の金属・半導体・絶縁体の固体の種類には分類されないトポロジカル絶縁体と呼ばれる物質が最近注目を集めている。トポロジカル絶縁体においては、物質の中身は絶縁体状態であるが、その境界（3次元系であれば表面、2次元系であれば端）に特殊な金属状態が実現している。その金属状態を流れる電子は質量がほぼゼロで、かつスピンの向きを揃えていること（スピン運動量ロッキング）が特徴である。また、通常物質とは異なり、トポロジカル絶縁体の境界の電子は、非磁性の欠陥や不純物に対して堅牢（ロバスト）な性質を持っているため、スピントロニクスや量子コンピューティングへの応用に大きな期待が寄せられている。

特に3次元トポロジカル絶縁体においては、その表面の電子状態がディラック電子系になるためグラフェンとの対比でよく議論がなされる。自発的に2次元薄膜状態が形成されること、スピン運動量ロッキングによってスピン制御が容易であること、物質の多様性等の理由から、グラフェンよりもトポロジカル絶縁体の方がデバイス化に優位な点が多いとも言われている。

日本では、内閣府最先端研究開発支援プログラム（FIRST）「強相関量子科学」（2009-2013年度、中心研究者：十倉好紀・東京大学教授（当時））および最先端・次世代研究開発支援プログラム（NEXT）「トポロジカル絶縁体による革新的デバイスの創出」（2010-2013年度、安藤陽一・大阪大学教授（当時））において、トポロジカル絶縁体や周辺のトポロジカル物質における世界を牽引する成果を挙げ、またJSPS 科研費新学術領域「対称性が破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」（2010-2014年度、領域代表：前野悦輝・京都大学教授）、同じく新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」（2015-2019年度、領域代表：川上則雄・京都大学教授）で着々と基礎学術基盤が築かれつつある。一方で米国では、Gordon and Betty Moore 財団の助成プログラム EPIQS（Emergent Phenomena in Quantum System）の中でトポロジカル物質の研究開発を支援している。さらに、Microsoft Research Station Q ではディレクターに数学者の Michael Freedman（1986年フィールズ賞授賞）を迎え、トポロジカル量子コンピューティングの研究に着手している。その他、カナダ CIFAR（Canadian Institute for Advanced Research）や中国の SCCP（Shanghai Center for Complex Physics）などにおいてもトポロジカル絶縁体などの研究が盛んに行われている。

フォノンエンジニアリング

今後の社会における情報爆発への対応やエネルギーの高効率利用などの課題に対し、情報の処理や蓄積、熱電変換などのデバイスの革新がもとめられ、そこではナノスケールの微小空間、微小時間での熱の振る舞いに対する理解と制御が不可欠になっている。特に、半導体集積回路ではナノスケールに微細化されたデバイスの発熱・放熱の問題が高性能化を阻害するようになっており、また、ハードディスクではナノスケールの微小な磁石の熱揺らぎの問題から大容量化の大きな壁に直面している。このため、ナノスケールの熱制御手法の開発によるこれらの問題の解決、あるいはナノスケールでの熱発生を積極的に活用した新たな動作原理のデバイスの開発が強く望まれる。

このような状況では、ナノスケールでの熱の振る舞いを理解し、その特性を制御し利用することが非常に重要になる。ナノスケールでは、物質中の熱の輸送を格子振動の量子で

あるフォノンの輸送という概念に基づき扱う必要がある。フォノンの概念は 20 世紀初めに発見されたが、従来のデバイス開発にはその深い理解や制御はほとんど必要ではなかったため、フォノンを基礎とするナノスケールの熱の理解や制御技術は電子物性や光学物性に比べ大きく遅れた。一方で、電子デバイス、光デバイス、磁気デバイスの微細化がナノスケールまで進むにつれ、電子、フォトン、スピンとフォノンとを別々に取り扱っては、デバイス動作を正しく理解し、設計する事は不可能になっている。このため、微小領域の「熱」に対してナノサイエンスの立場で理解を深め、新たな熱制御・利用技術を確立することで、新たな学術領域の構築と材料・デバイスの革新を図ることが必要になっている。

熱電変換の応用分野では、固体中の熱伝導（フォノン伝導）を粒子的に扱い、不純物や結晶構造、欠陥導入などでフォノンの散乱を増加させて熱伝導を抑制したりする研究が活発になっている。また、フォノンの波としての性質を利用して、電子や光のように干渉やバンド構造の形成により、特定のフォノンの伝導を遮断したり、速度を遅くしたりするような、フォノンニック結晶の研究も急激に増加している。また、基盤的なものとして、ナノスケール～マクロスケールまでの熱伝導を統合して扱えるシミュレーション技術や、電子とフォノンの伝導を同時にシミュレーションして高精度な半導体デバイスの特性予測をすることも行われるようになってきている。さらには、ナノワイヤなどのナノ材料を発熱させて、超低消費電力のガスセンサや高速な発光デバイスとして利用する新たなデバイス開発も活発化している。例えば、新しい熱電変換原理として日本で発見されたスピンゼーベック効果がある。熱伝導のパスと電流のパスが直交するため、新しい応用分野が期待される。

オペランド計測

エネルギー・環境用途の材料や生命科学においては、水中や大気中、表面ナノ形状や異種界面の接合、摩擦の状態など、多様な環境場における計測へのニーズが増している。とりわけ、触媒における化学反応の動的観察、電池における充放電下での動的観察、トライボロジーでの摩擦摩耗の観察、生体における *in vivo* 動的観察など、*in-situ*（その場）で動作状態、あるいは生存状態のまま観察・計測するオペランド計測が強く求められている。オペランドは、実用的な動作状態の計測を強く意識した用語であり、単に外場による物性変化を扱う従来の「*in-situ*」とは区別される。海外では、Miguel A. Bañares による触媒科学のオペランド計測の提案以来、多くの放射光計測施設において熱心に進められており、欧米では、いくつかの研究開発プロジェクトが行われている。今、物性科学から生命科学まで広範な分野において、プローブ顕微鏡、電子顕微鏡、放射光・X 線、粒子線、極短パルス光などを用いたオペランド計測の飛躍的進展を図るべき時期に来ていると考えられる。

プローブ顕微鏡によるオペランド計測としては、表面電位・電荷分布計測、不純物密度分布などを中心とする電位物性計測技術の産業応用が模索されている。従来超高真空 AFM の分野で極めて高度なレベルで基礎研究が進められてきた研究を、大気中・液中へと展開する研究が世界中で精力的に進められており、各種電池の電極反応、金属腐食反応、触媒反応、酵素反応などに応用されつつある。

電子顕微鏡によるオペランド計測では、完全な利用環境下での実働計測が求められる。リチウムイオン電池の作動状況をオペランド計測する場合には、環境が完全に大気環境で

なければならない。この完全な大気環境を実現し、さらに種々の計測を行うという点については、技術開発をさらに大きく進展させていく必要があると考えられる。

放射光を用いたオペランド計測の目的は、素子や電池などのデバイスにおける物質や材料の動作中の結晶構造や電子状態の変化を可視化することにある。X線は観測対象とする動作状態に影響を及ぼさない点においてオペランド計測に適したプローブである。さらに、デバイスの機能を担う部位が表面に露出していることは稀であり、パッケージ内部の状態変化を捉える必要性からも、透過力の高いX線や中性子線による解析が有効である。さらに、観察対象とする部位が特徴的に含有する元素の化学的・磁気的变化に着目したオペランドX線分光解析の確立が課題である。

極短パルス光を用いたオペランド計測においては、デバイスの動作状態での電子および原子、分子の動的過程を追跡することができる。例えば、動作中の触媒反応においては、触媒表面における反応種の吸着・拡散・構造変化・脱離と一連の過程が連続して起きる。これらの動作過程を追跡するには、ナノオーダーの空間分解能とナノ秒からピコ秒にいたる時間分解能を両立させた計測技術の開発が今後の課題となる。

(2) 日本の代表的な成果（直近10年程度）

日本は、過去半世紀以上にわたり、ナノテクノロジー・材料に実体を与える学術研究、技術開発、産業活動を継続的に先進国の一員として主導し、科学的知見・技術を蓄積してきた。2000年以降を中心に見ても世界的に注目される科学技術成果が着実に出ており、実用化に向けた取り組みが実施されている。明らかに、日本は世界で有数のナノテクノロジー・材料分野の研究開発リーダー国の一つである。

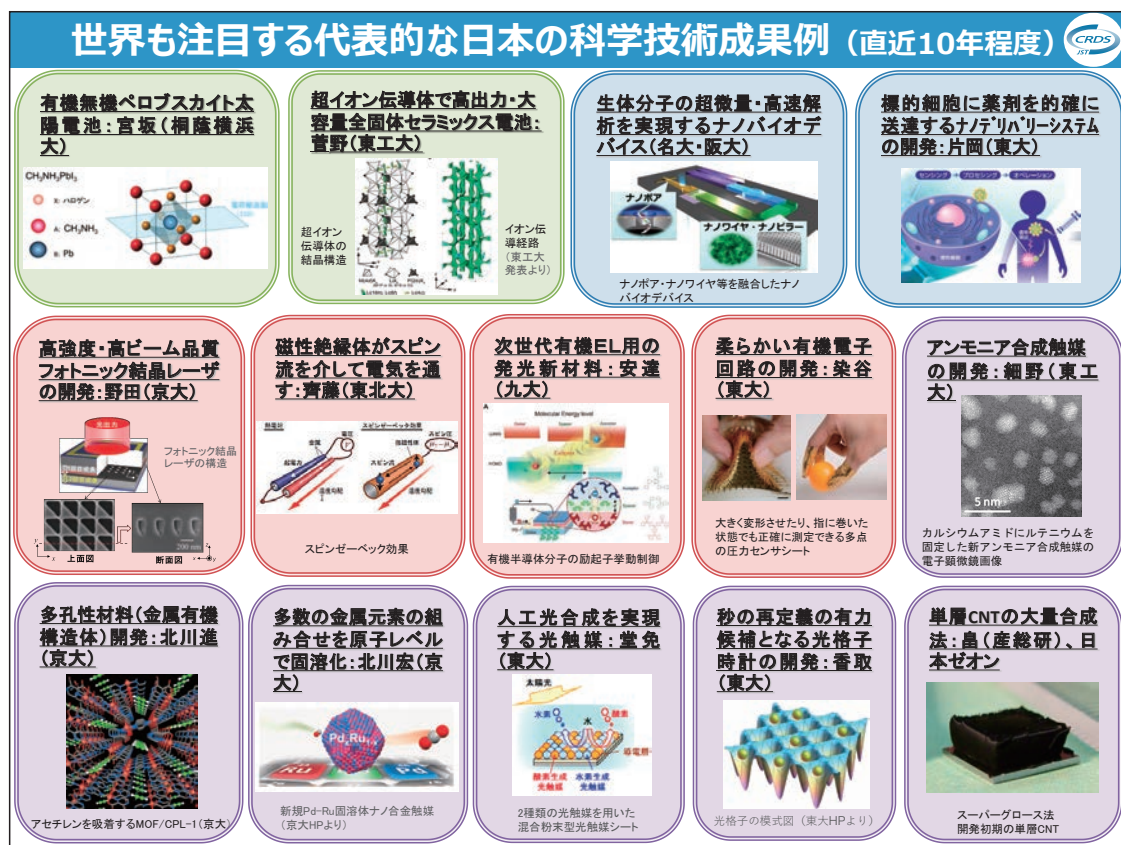


図 2-23 世界も注目する代表的な日本の科学技術成果例

図 2-23 では、一例として世界的に注目度の高い大学や公的研究機関発の科学技術の成果であり、今後実用が見込まれるものを取り上げた。図はあくまで例示であり、他にも多くの成果が出ていることはいうまでもない。

(3) 科学技術（研究開発）アウトプット（論文・特許）の国際比較

ナノテクノロジー・材料分野の研究成果を、論文と特許の観点から概括する。

〈論文〉

論文については、エルゼビア社の Scopus カスタムデータを基に JST/CRDS・情報分析室が作成した資料を用いる。本分野の論文動向の総論としては、この 10 年ほどで中国が大きく伸び、量的（論文数）に世界のトップに、また、質的（※ここでは被引用トップ 10%論文のことを指して「質」と表現する）にも 2014 年時点でほぼ 1 位の EU と並んでいる。日本は、論文の質・量ともに頭打ちの傾向が続く。

- ① 世界の総論文数を共著者の分数カウント（例えば A 国と B 国の共著の場合、それぞれの国に $1/2$ とカウントすること）で見ると（図 2-24）、2014 年には、中国、EU、米国、日本の順である。中国の勢いが群を抜いており、米国の 2 倍近い数字となっている。日本は 2009 年まで微増傾向にあったが、それ以降減少・横ばいである。

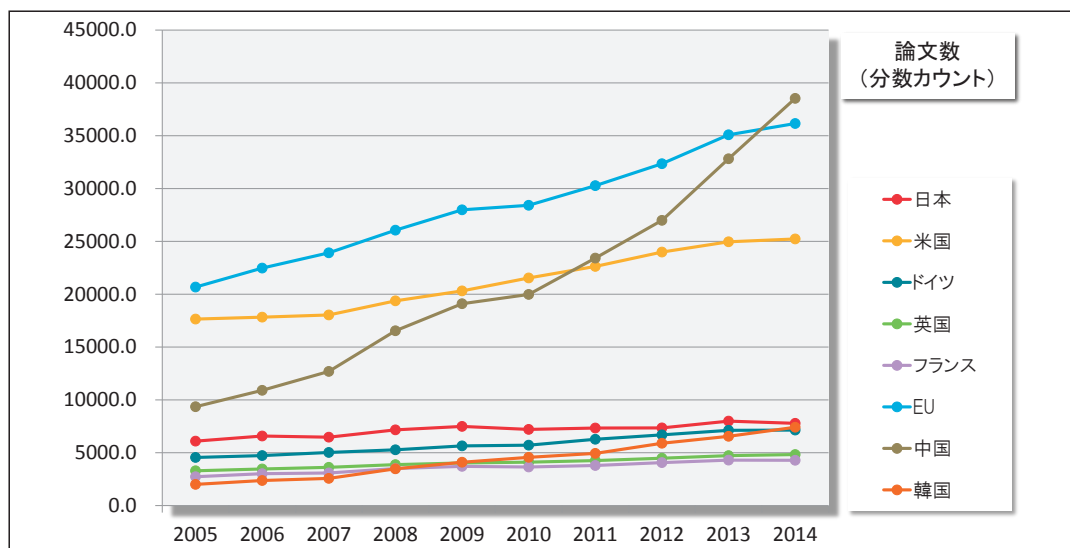


図 2-24 ナノテク・材料分野の論文数推移

- ② 被引用トップ 10%論文数を分数カウントで見ると（図 2-25）、2014 年には、EU と中国がほぼ並んでおり、米国、ドイツの順である。こちらも中国の勢いのある伸び率が特徴的である。日本は、2005 年には、EU に次いで 3 位であったが、現在では、中国、米国、ドイツ、韓国の後塵を拝している状況である。

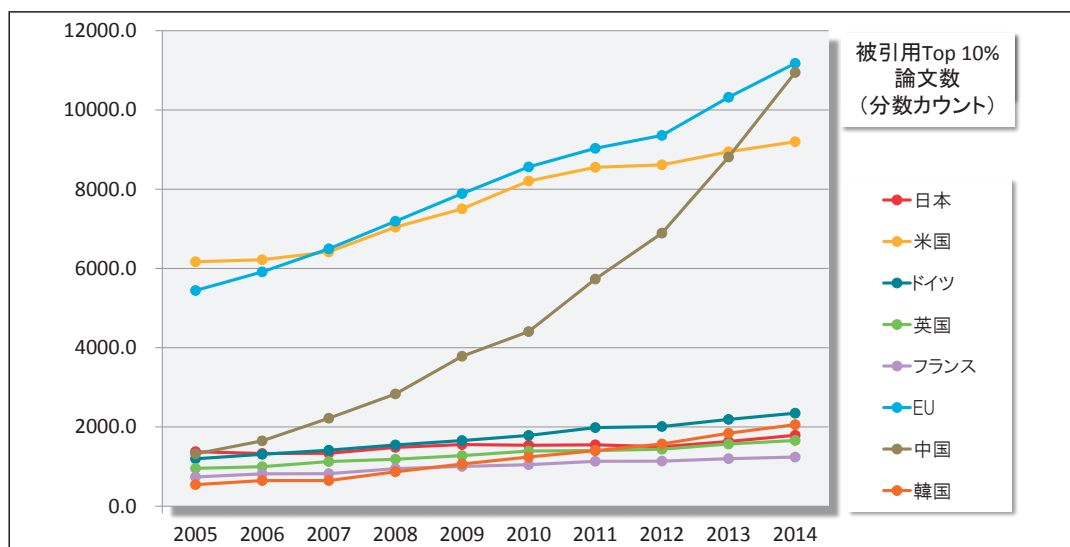


図 2-25 ナノテク・材料分野の被引用数トップ 10%論文数の推移

- ③ ナノテクノロジー・材料分野を分野別にブレークダウンした環境・エネルギー、ライフ・ヘルスケア、社会インフラ、ICT・エレクトロニクスと比較すると（図 2-26、27、28、29）、それぞれに特徴があることがわかる。

いずれの分野も中国の論文数および被引用トップ 10%論文数の伸び率が顕著である。環境・エネルギー分野が他の分野に比して最も勢いがあり、中国、韓国が相当な力を入れていることが窺える。また ICT・エレクトロニクス分野に関しては、2014 年の論文数では中国が EU を抜いて 1 位になり、被引用トップ 10%論文数は米国を抜き第 2 位になっている。

2014 年のデータを見ると、日本は論文数においては、いずれの分野でも米中に次いで、3 位もしくは 4 位辺り (EU 除く) に位置しているが、被引用トップ 10%論文数に関しては、ドイツ、韓国と同等、あるいは後塵を拝しており、全体的に停滞気味であることがわかる。

- 環境・エネルギーに関するナノテクノロジー・材料（左：論文数、右：被引用トップ 10%論文数）

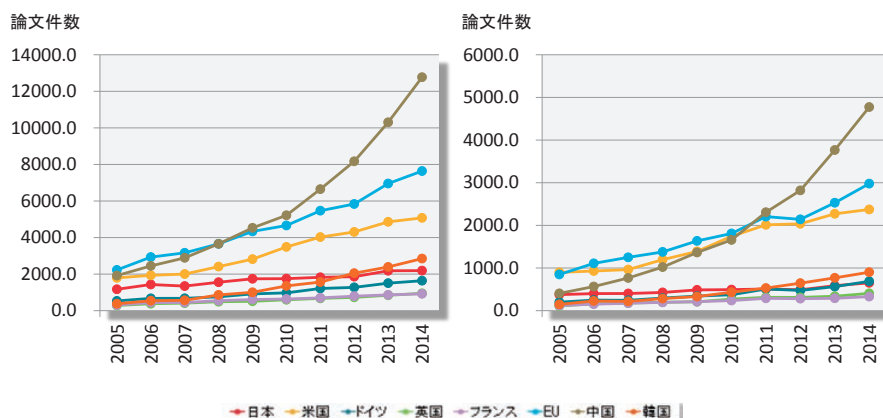


図 2-26 環境・エネルギーに関するナノテク・材料分野の論文動向

- ・ ライフ・ヘルスケアに関するナノテクノロジー・材料 (左：論文数、右：被引用トップ 10%論文数)

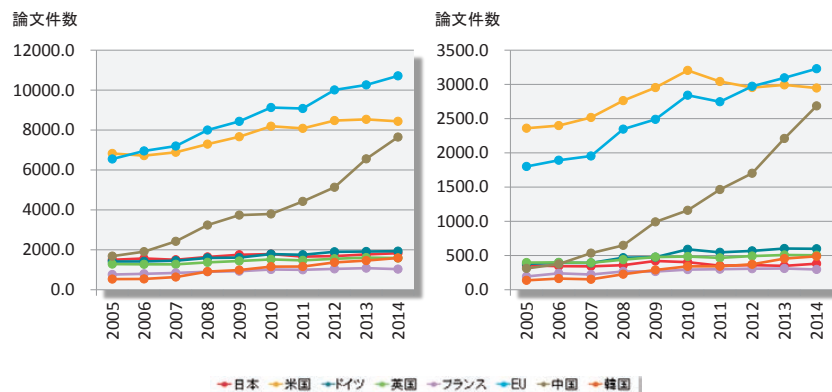


図 2-27 ライフ・ヘルスケアに関するナノテク・材料分野の論文動向

- ・ 社会インフラに関するナノテクノロジー・材料 (左：論文数、右：被引用トップ 10%論文数)

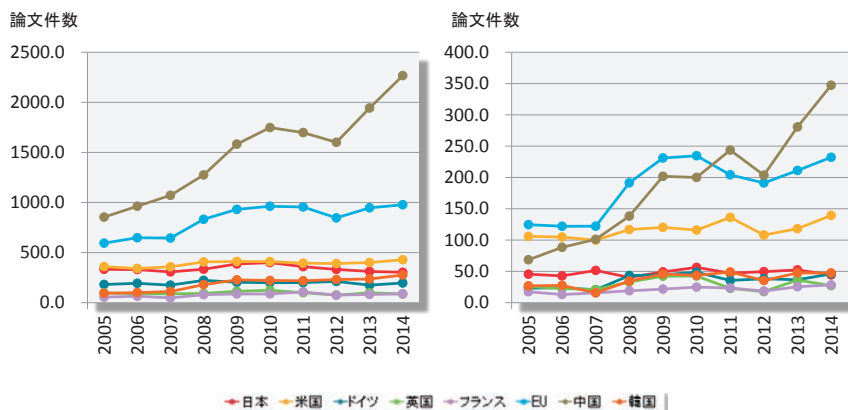


図 2-28 社会インフラに関するナノテク・材料分野の論文動向

- ・ ICT・エレクトロニクスに関するナノテクノロジー・材料 (左：論文数、右：被引用トップ 10%論文数)

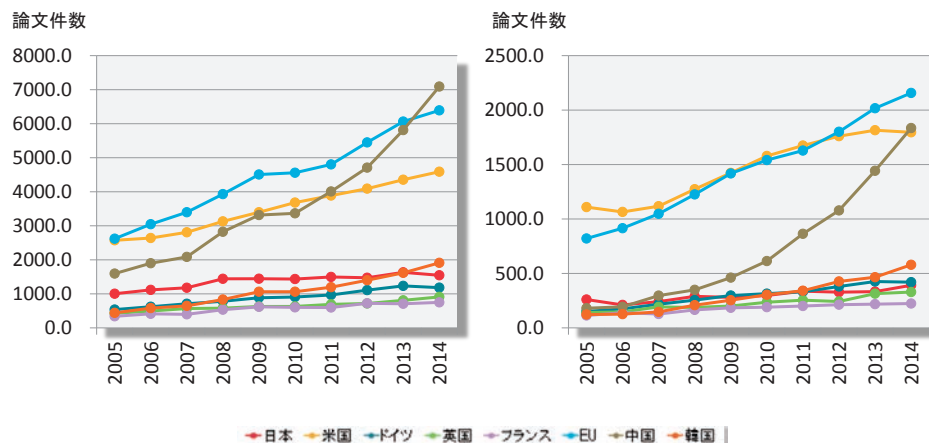


図 2-29 CIT・エレクトロニクスに関するナノテク・材料分野の論文動向

〈特許〉

ここでは CRDS が 2015 年に㈱三菱総合研究所に委託して実施した調査結果について述べる。利用したデータベース (Derwent World Patent Index) の「最先の優先権主張国」を出願人国籍とみなし、日本、米国、欧州、中国、韓国別にいくつかの領域について集計した結果を以下に掲載する。出願から公開まで 1 年半あること、および公開された後 DB への収録の時差があることから、相対的に直近 2 年程度の件数が少なくなっていることに留意が必要である。

■蓄電池

トレンドとして上昇傾向にあり、2009 年以降、日本の特許件数が急激に伸びており、中国が追随している。

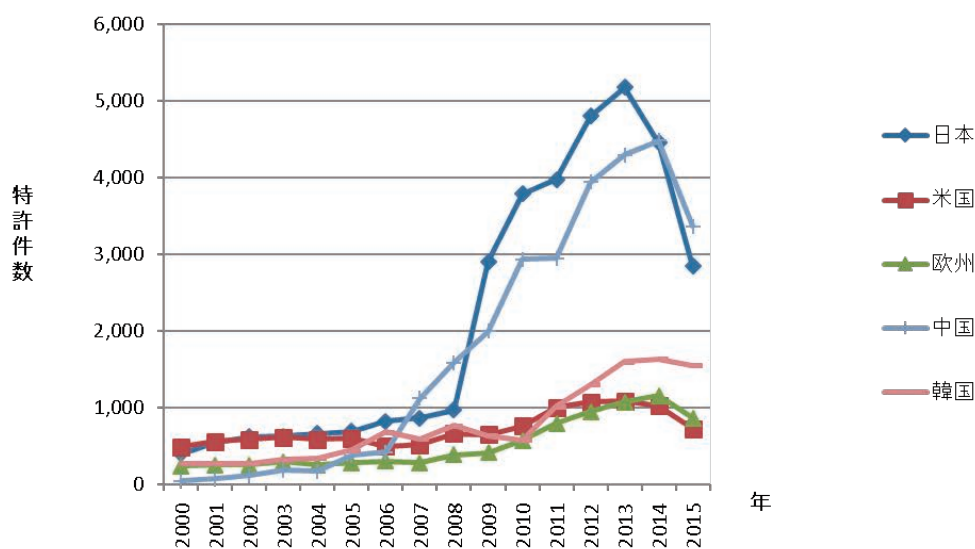


図 2-30 蓄電池の特許件数推移

■太陽電池

日本がトップであるが、2009 年あたりから韓国も力を入れている領域であることがわかる。

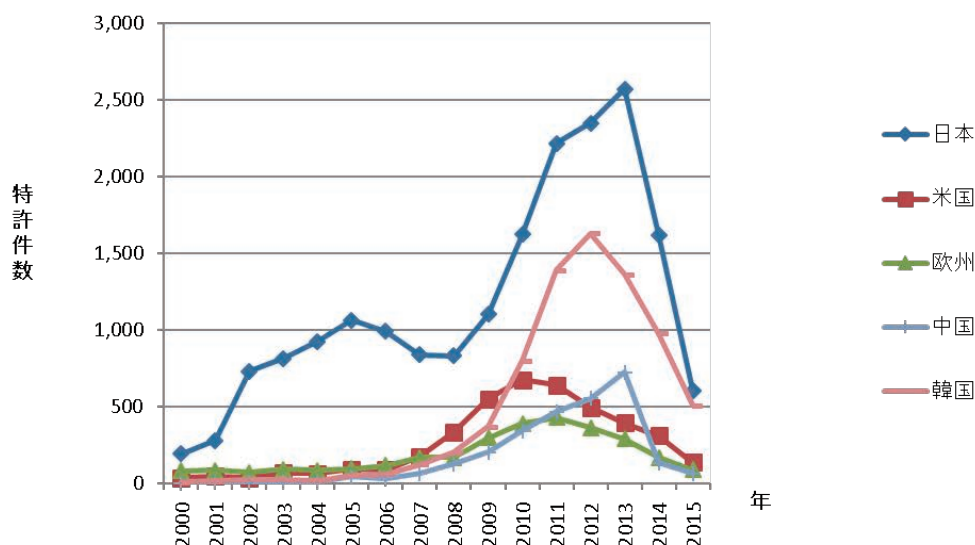


図 2-31 太陽電池の特許件数推移

■触媒

2006 年頃は日本が強かったが、2008 年頃から中国の件数が増えている。2011 年以降はどの国もほとんど件数は伸びていない。

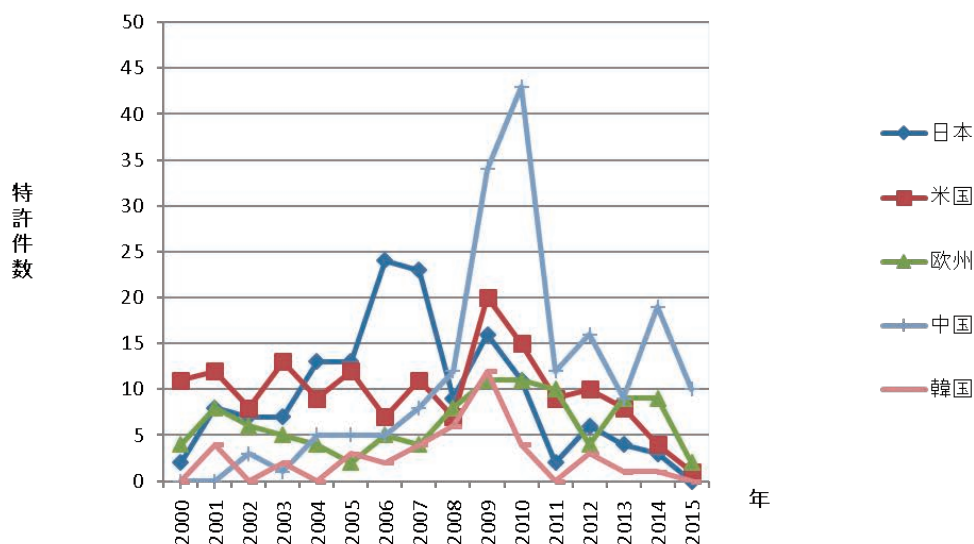


図 2-32 触媒の特許件数推移

■膜材料

2008 年頃までは日本が優位だったが、2009 年以降、中国の特許件数が上回り、それ以降も顕著に伸びている。

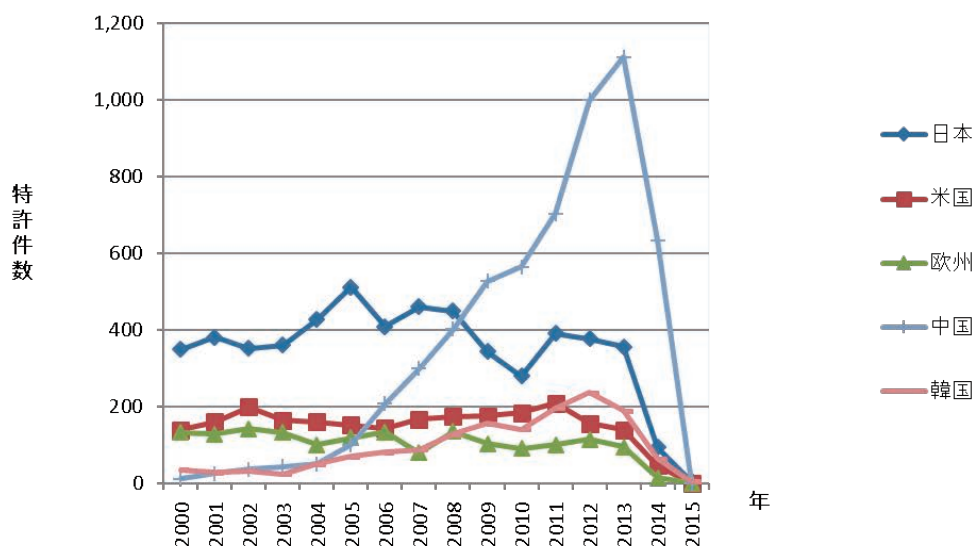


図 2-33 膜材料の特許件数推移

■ バイオマテリアル・DDS

トレンドは減少傾向であるが、米国が圧倒的に強い領域である。

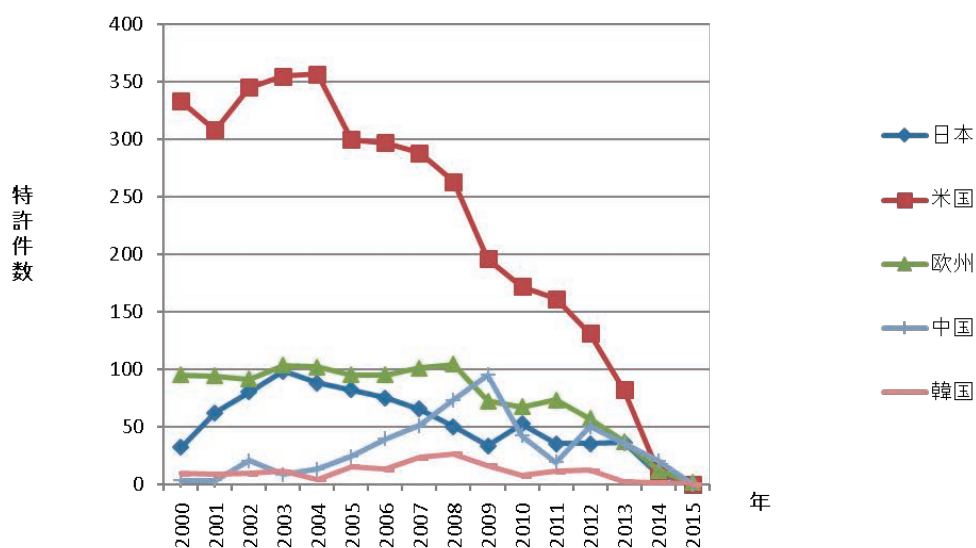


図 2-34 バイオマテリアル・DDS の特許件数推移

■ 構造材料

全体的に横ばいトレンドの中、中国だけが顕著な勢いで特許件数を伸ばしている。

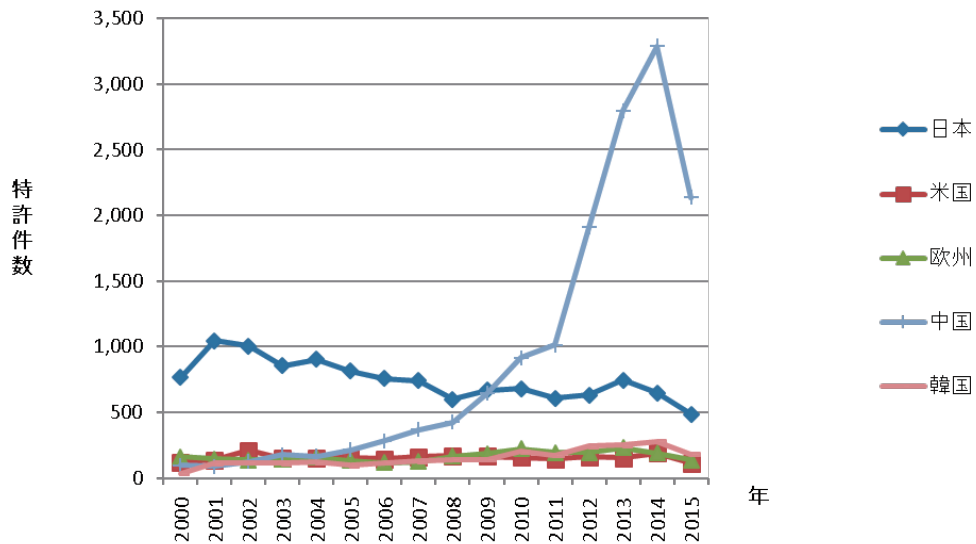


図 2-35 構造材料の特許件数推移

■半導体デバイス部材

全体的に横ばいトレンドの中、中国の特許件数が急増している。日本は下降・横ばい傾向にある。

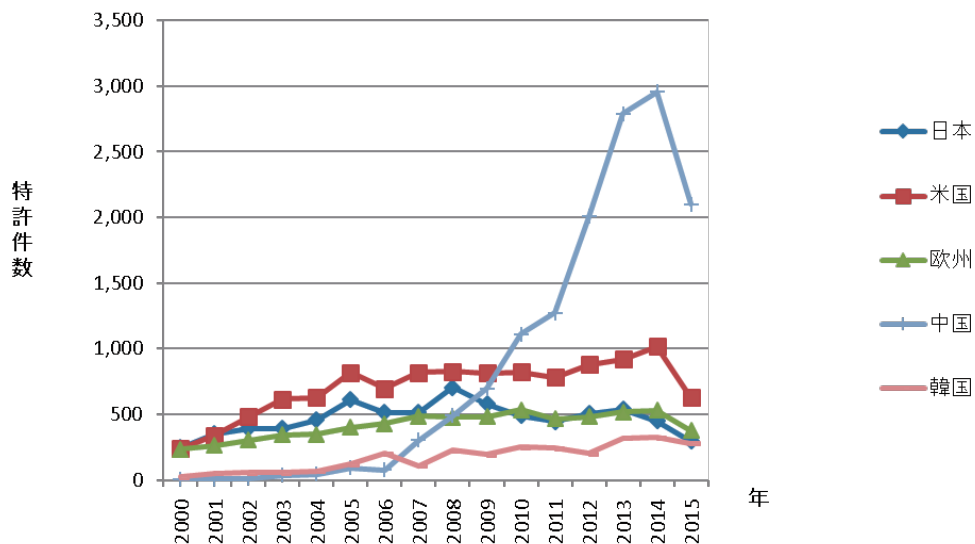


図 2-36 半導体デバイス部材の特許件数推移

■グラフェン・二次元材料

米国が圧倒しているが、近年はどの国も横ばい・下降トレンドである。

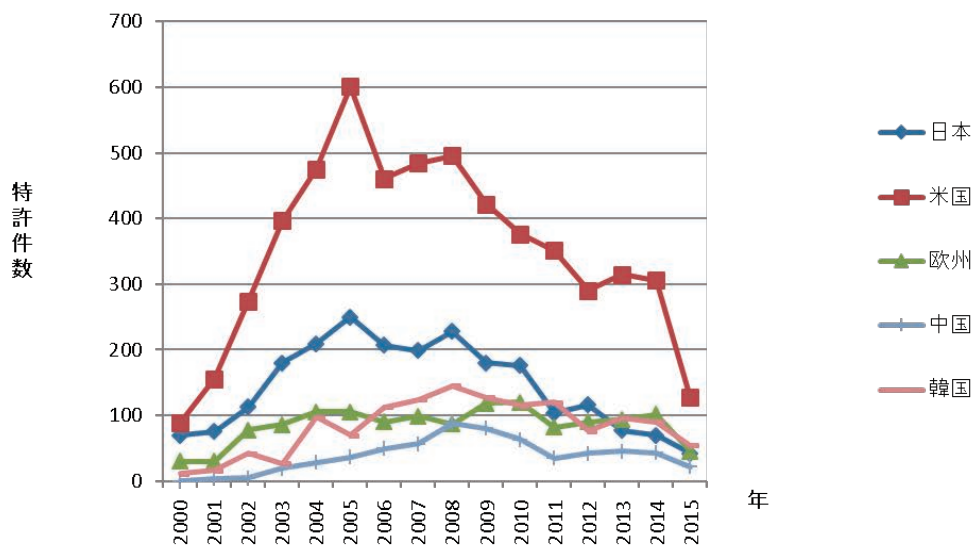


図 2-37 グラフェン・二次元材料の特許件数推移

■ MEMS・NEMS

2006 年頃までは米国が圧倒的に強かったが、2009 年になると日本の強さが見受けられる。近年はまた米国の勢いが戻ると同時に中国の特許件数が伸びている。

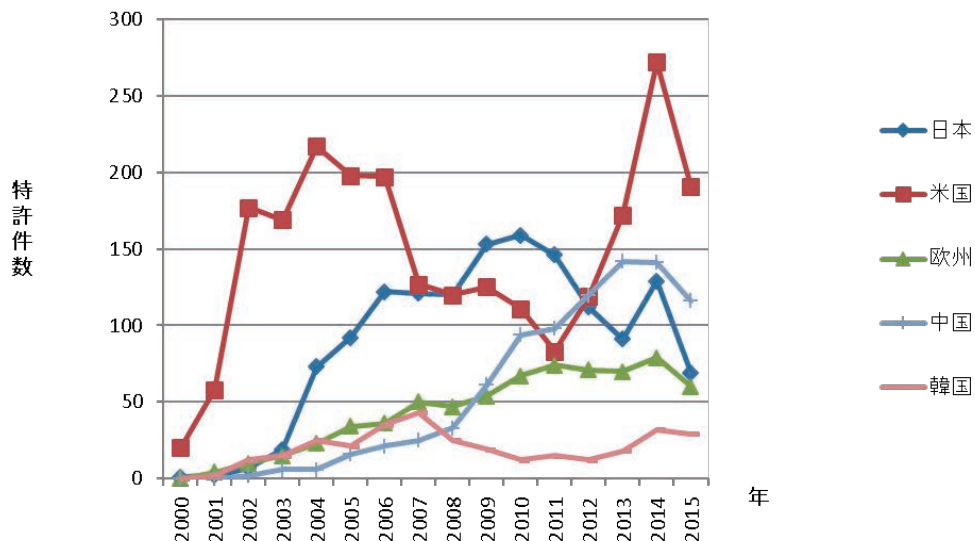


図 2-38 MEMS・NEMS の特許件数推移

■ 顕微鏡技術

2008 年頃まで日本の独壇場であったが、その後は件数が減少し、米国と併走していたが、2011 年に米国と中国に次ぐ第 3 位となった。近年では中国が件数ではトップを走っている。

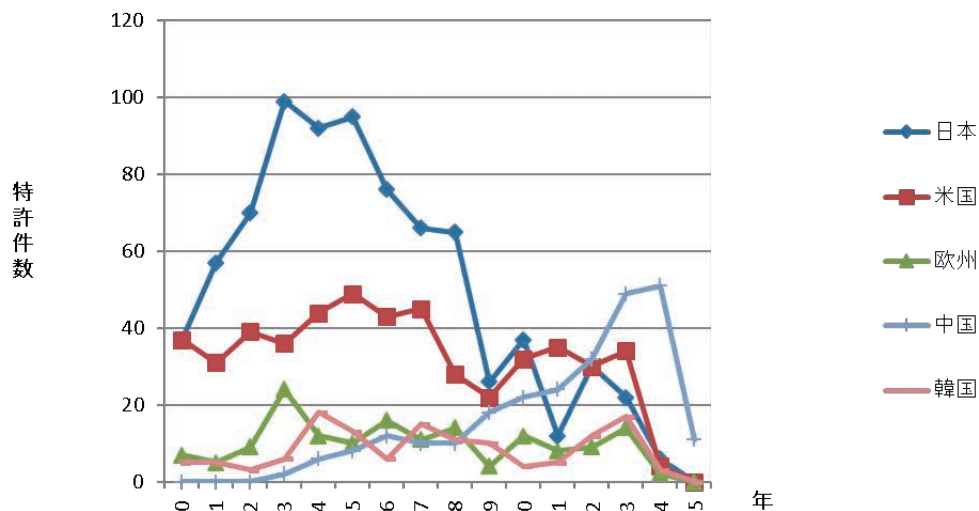


図 2-39 顕微鏡技術の特許件数推移

（4）分野別の俯瞰ワークショップのサマリー

2015 年版の報告書以降、国内外の社会情勢、科学・技術の動向を踏まえ、前回の俯瞰活動⁷からさらに充実が必要と考えられた次の 5 つ、材料設計・制御、ナノエレクトロニクス、バイオ・ライフサイエンスとナノテク・材料との融合領域、社会インフラ、ナノテクノロジーの ELSI/EHS を取り上げた。それぞれについて、識者へのインタビューを含む事前調査と俯瞰ワークショップを開催し、各領域における技術・産業の状況把握、注目される科学技術の潮流、今後求められる技術、研究開発の方向性などについてまとめた。また、科学技術政策全体や施策間・産学官の有効な連携を議論することを目的としたワークショップも開催した。

以下では、各ワークショップから得られた発見、注目動向、今後の方向性、制度・政策上の課題について要約を記載する。議論の詳細については各ワークショップの報告書（CRDS-web に公開）を参照されたい。

① 材料設計・制御

材料設計・制御は、ナノテクノロジー・材料分野全体の根幹をなすものであり、所望の機能を実現させるための構造の設計・制御手法を用いて、サイエンスの新局面を拓き、わが国の将来社会を支え、産業に貢献しうる技術領域である。今回の俯瞰調査においては、「物性物理」と「新物質・新機能創出」の 2 つの観点から、それぞれでワークショップをおこなった。物性物理のワークショップでは物理分野の研究者を軸に、新物質・新機能創出の俯瞰ワークショップでは化学分野の研究者を軸に、いずれも合宿形式のワークショップで議論を深めた。その結果、物性物理に関するワークショップからは、国として取り組むべき将来の研究目標や方向性に関して、以下のような方向性を取りまとめられた。

●今後の研究開発の方向性

- － 量子位相やトポロジーの観点から、既知の物質に新たな理解を与えると同時に、新物質設計や新デバイス開発へと有機的に結合した研究展開を図る。
- － 電子の「ほぼ均一」かつ「ほぼ平衡」な状態を扱っていたこれまでの物性物理から脱却し、電子の相互作用に由来する空間的に不均一な電子のテクスチャ（超構造）を作り出して、それを外場により制御する。さらに外場によって動的な電子相変化や過渡応答などの非平衡状態を作り出してそれを制御する。
- － 分光測定・時間分解測定・走査型プローブの近年の進展を基に、時間的・区間的な分解能を極限まで向上させた革新的なスペクトロスコーピー技術を開発する。

7 <http://www.jst.go.jp/crds/report/report02/CRDS-FY2015-FR-05.html>



図 2-40 材料設計・制御（物性物理）の俯瞰 WS 結果

新物質・新機能創出に関するワークショップからは以下のような方向性が取りまとめられた。

●今後の研究開発の方向性

- － 従来の常識を覆し、物質科学に革命をもたらす **Game-changing material**（未常識物質）を創成する。
- － 地球と生命・生態系を構成し、三態を相互変換しながら環境を循環する水の特異性と可能性を追求する。
- － 複雑なシステムやネットワークが介在している脳の精緻な働きに関与しているであろう特異な化学物質に対して、物質科学に立脚したアプローチにより脳科学イノベーションを興す。
- － 人工知能と計算科学の融合に基づき新化学概念を創出する。
- － 持続的な社会の発展を維持するために不可欠な主要元素（窒素、リンなど）の新しい化学的循環プロセスを創出する。
- － 分子レベルからマクロスケールまでの空間スケールで物質の動的力学挙動を解明するとともに、力学挙動が制御された新物質を創成する。
- － 生命現象、物質輸送、界面現象などの夾雑系・散逸系における時空間プロセスを理解し、制御することで熱力学的平衡から逸脱したシステムの構築・利用や生体機能を能動的に活用する技術を開発する。

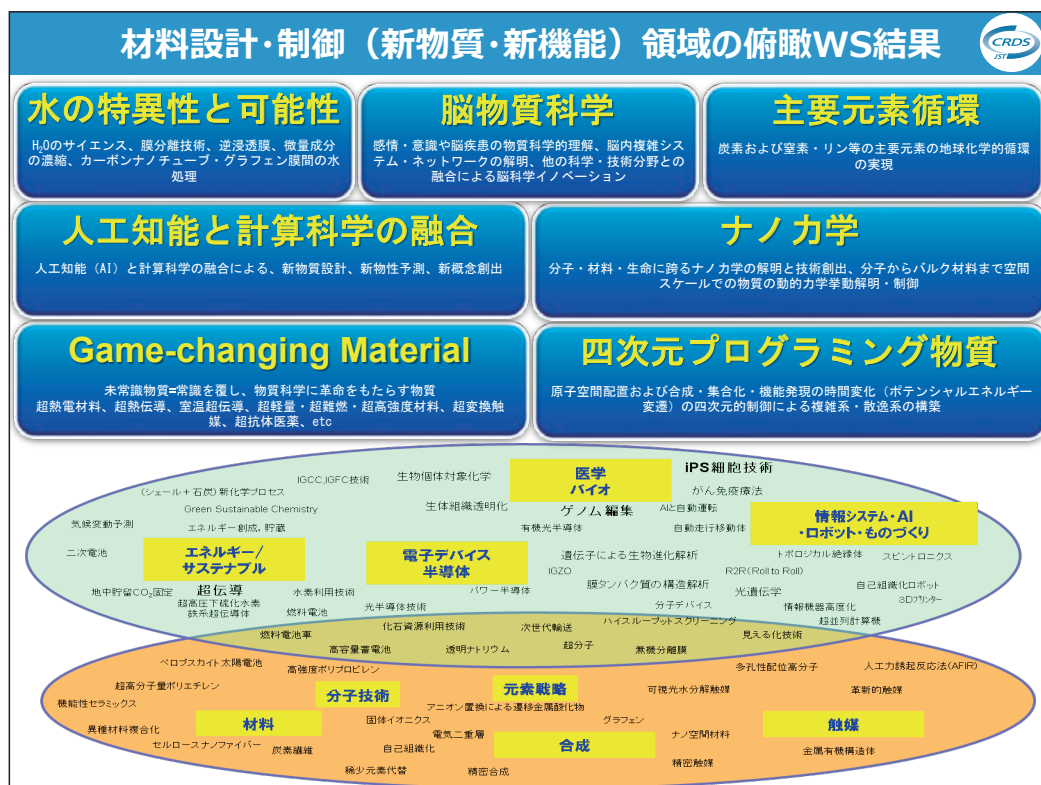


図 2-41 材料設計・制御（新物質・新機能）の俯瞰 WS 結果

両ワークショップから共通的に挙げた政策・制度上の課題は以下である。

●政策・制度上の課題

- － 理論・計算等による理論的解明、物質開発、計測・評価、さらにはデバイス開発までをシームレスに行える研究環境が必要。
- － 非平衡状態を正しく評価する指標の標準化が必要。
- － 化学と物理、生物を融合するためには、異分野間のコミュニケーションを刺激する仕組み作りが重要。
- － 化学・物理・生物・計算科学・情報科学の枠に捉われない学際的な人材育成が重要。
- － 日本の存在感を世界に示すためにもグローバルな人材交流の活性化が必要。

② ナノエレクトロニクス

ポストムーアに向けた次世代のナノエレクトロニクス領域の研究開発に関して現状の俯瞰を行い、重要課題の抽出を行った。前半のセッションで IoT 時代の新たなデバイス技術の展開と題して、IoT、IoE、データセントリック、ディープラーニング、人工知能（AI）、脳型コンピュータ、意味理解、群知能、エマージングアーキテクチャなどにフォーカスして議論を行った。後半のセッションでは、最近進展が著しい量子コンピューティング技術に焦点を当て、量子ドット、量子計算、量子情報、量子アニーリング、量子シミュレーションなどの内容を議論した。最後に総合討論を行い、基礎研究として推進すべきテーマ、社会的・産業的意義、日本の課題、今研究を始める必要性などを検討した。

●今後の研究開発の方向性

人工知能や脳型コンピュータに代表される IoT 時代の新たなデバイス技術の開発では、日本が培ってきたハード技術を、ディープラーニング処理等を加速するためのアクセラレータに適用していくことが重要になる。ここではアクセラレータと大容量メモリを高バンド幅で結合すること、アクセラレータのデータの流れを柔軟に再構成できること（リコンフィギュラブル）が必要になる。その際、材料、デバイス、回路、アーキテクチャの全てを統合した研究開発を構築する必要がある。立ち位置としてはクラウドに対してのエッジ、もしくはフォグくらいのところまでの使い方を想定するのが良い。また IoT 時代の一つの主役がセンサネットワークである。複数のデバイスが繋がって効果を出す「賢いセンサネットワーク」の構築が重要になる。一方、アーキテクチャの中心は「ニューロモルフィックアーキテクチャ」であり、要素研究としては神経細胞そのものを人工的に作る研究と、神経細胞同士をつなぐシナプスを人工的に作る研究が考えられる。最近ではメモリスタや ReRAM の進展によりニューロモルフィックデバイスの研究開発が活発化している。ただ、日本ではデバイス材料と回路アーキテクチャの間に大きな壁があり、人工知能開発はソフトが中心になっている。このままでは欧米のソフト・ハード一体型の人工知能研究の流れに乗り遅れることが懸念される。

一方、将来のコンピューティング技術の基盤となり得る量子コンピューティング技術の進展が最近著しくなっている。量子コンピューティングの大きな利点は省電力である。例えば D-Wave マシンの消費電力は主に冷凍機が消費する数 10 キロワットで、コンピューティングを行うチップの電力消費は極めて小さい。コンピューティングの回路規模が大きくなっても、この電力消費状況は大きくは変わらない。応用を考えると、社会的インパクトが最も高いのは機械学習への適用である。量子ゲート方式の万能型量子コンピュータを実現するには、量子誤り訂正技術の確立が重要になる。近年の技術の進歩により、誤り訂正技術の実装が現実味を帯びてきており、米国の大手 IT 企業を中心に競争が激化している。その中で日本が世界に伍していくには、独自のアイデアによるデバイス回路やアーキテクチャを生み出し、世界の中で存在感を示すことが重要である。量子コンピュータに関する世界的な研究ネットワークに参画し、グローバルな協業の中で、日本としての役割を果たしていくことが望まれる。量子コヒーレンスは人類が初めて手に入れた技術であり、使い方に関してまだ多くの研究の余地がある。規模は小さくても、これまでできなかったことを量子技術で実現する視点で考えると、十分に研究のテーマになり得る。

●政策・制度上の課題

この分野では、ハードやデバイスより、ソフト側の開発スピードで動いている。したがって、ソフトとハードのコンビネーション、融合だけではなく、いかにデバイスの研究開発を加速できるかに重点を置いた政策が重要になる。産業界ではアプリケーションのターゲットをどこに絞れば良いかに悩んでいる。システム LSI 事業の最大の問題点はデザインのオーバーヘッドが非常に大きいことである。その意味で、様々なものに対応できるフレキシブルデバイス、あるいはアーキテクチャそのものへの期待は大きい。日本にはシステムを担当する研究者やソフトを理解しているハード研究者が非常に少ない。デバイスや材料が得意なので、不得手なことを無理してやる必要はないという考え方もあるかも知れないが、それでは全体を見渡す力が失われてしまう。アプリケーションやソフト、システ

ムから発想して、世の中に求められているものが何であるかを考えた上で、それに必要なものを導き出す研究のやり方を目指すべきである。

従来の量子情報、量子コンピューティングに関する国家プロジェクトでは、それぞれの研究者が別々に研究をやっていた。今後はデバイス、材料から回路技術、制御技術、その上の物理の理論をやる人、ソフトの情報科学をやる人が分野をまたいで1つのチームをつくるプロジェクトが求められる。量子コンピューティングや量子技術の研究は、規模が大きくなり世界中で研究されている。特に米国ではIARPAが国の機関として量子アニーリングと量子ゲート方式の2つのプログラムを走らせており、研究者、またそれを支援するグループが大規模になっている。この状況下で競争するには日本で何ができるかを考えなければならない。インテルやGoogleなど、海外では企業と大学がパートナーシップを組んでやっている。企業と大学が手を組むスキームが日本でも生まれることが望まれる。

今回のWSのテーマである人工知能やディープラーニングは、この5年、10年が勝負の喫緊のテーマであるが、2050年くらいまでの時間軸を見据え、長期的視野に立って研究開発を進めることも含めた重層的な取り組みが必要である。

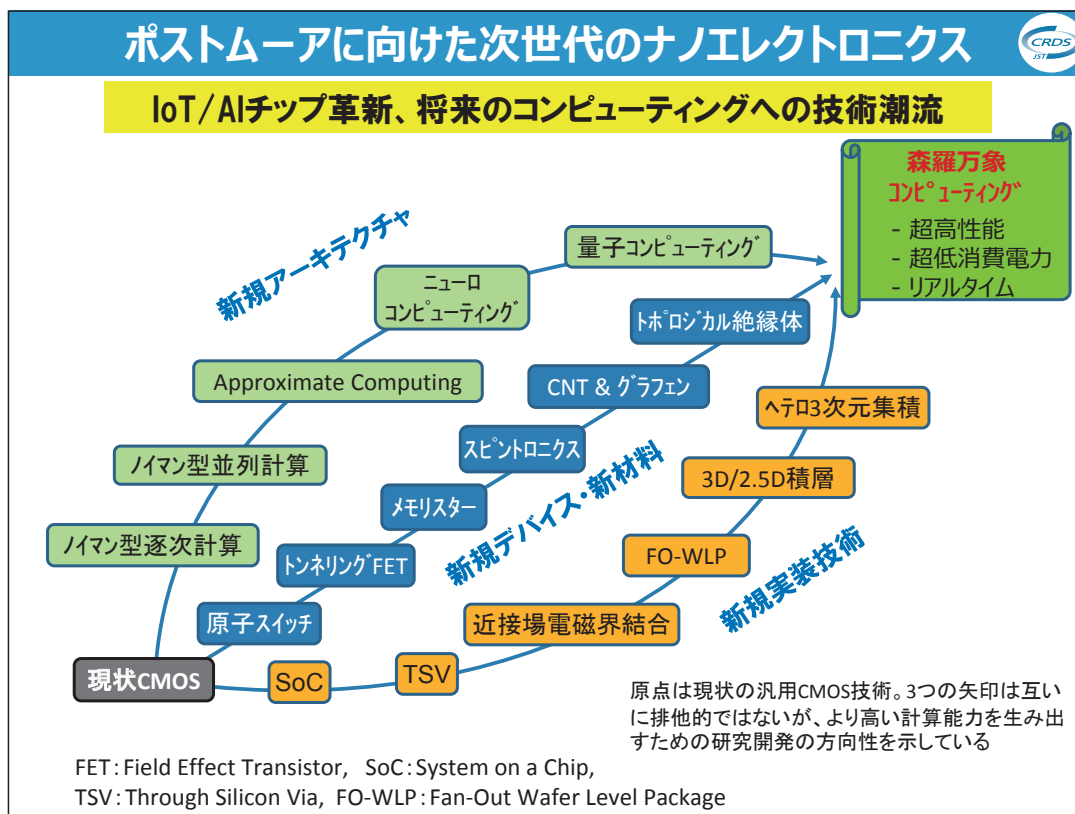


図 2-42 ポストムーアに向けた次世代のナノエレクトロニクス

③ バイオ・ライフサイエンスとナノテクノロジー・材料の融合領域

バイオ・ライフサイエンスとナノテクノロジー・材料の融合領域は、ナノテクノロジー・材料技術を基盤にバイオ・ライフサイエンス分野、健康・医療分野に革新をもたらす重要な技術分野である。分子ロボティクス、分子ナノシステム、合成生物学、人工細胞、ナノマイクロロボット、ナノマシン等、医療分野のみならず生命科学や他の分野にもイノベーションを起こしうる研究領域が含まれる（図 2-45）。

●今後の研究開発の方向性と技術的課題

- ペプチド、タンパク質、核酸といった生体分子について 1 分子の網羅的解析、あるいは定量解析を行う手法の開発が活発に進められている。今後は測定したい細胞を選別し、その細胞の中から望みの生体分子を抽出するための前処理技術の開発に加えて、解析における網羅性と定量性の両立や *in cell*, *in vivo* シークエンスの開発が特に重要である。
- バイオイメージング技術の進展には目覚ましいものがあるが、生きた細胞の動態を 1 分子レベルで計測・解析するところにはまだ到達していない。細胞中のタンパク質間相互作用やタンパク質とバイオマテリアルの相互作用、その結果として生じる細胞の応答をその場観察する技術（オンサイト（*in situ*, *intra vital*）イメージング）が求められている。生体機能を総合的に理解するため、マルチスケールでの観察技術も必要である。
- 三次元の生体組織をつくる研究が盛んに行われているが、内側の栄養・酸素が不足して組織が死ぬという問題が未だ解決できていない。組織内の血管網の構築および血液に代わる物質の開発が必要である。
- 細胞のもつセンシング能力などの優れた機能を活用するため、バイオマテリアル、バイオデバイスを細胞とハイブリッド化することで高度化するアプローチが求められる。
- バイオイメージング等で得られるデータは膨大であり、情報科学、情報技術と融合してデータ処理・解析を行う技術確立することが必要である。
- バイオナノデバイス、バイオマテリアル、バイオアクチュエータ、セラノスティクス等の研究開発においては、デバイス・材料のアクティブ化、プログラマブル化、システム化の実現とそのための設計論の構築が重要である。
- 材料をバイオデバイスへ応用する際には、生体分子との界面で生じる相互作用が必ず問題になる。界面の制御技術は非常に重要である。
- 分子レベルから生体組織・個体レベルまで、どの階層における研究でも生体とバイオマテリアルの相互作用の解明が求められている。新規のバイオマテリアルやバイオデバイスを創製する上でも重要である。
- 脳機能解明から精神機能摂動等の脳科学の発展のために、ナノバイオシステムの研究開発に加えて AI の融合技術の開発が重要である。
- 分子ロボティクス、分子ナノシステム、合成生物学、人工細胞、ナノマイクロロボット、ナノマシン等は、医療分野のみならず生命科学や他の分野にイノベーションを起こしうる極めて重要な技術であり、ライブラリの整備、システム化のための規格化が重要である。
- 生理機能光操作、ゲノム編集、細胞膜テクトニクスなどのバイオ分子技術とナノテクノロジーの融合システムの研究開発が重要である。

●政策・制度上の課題

- DDS やバイオセンサの研究開発は長期にわたって行われ、優れた研究成果も多く得られているが、注ぎ込まれたリソースに比して社会実装は現時点では十分とはいえない。実用化を阻む隘路がどこにあるのか検討する必要がある。

- 実用化、製品化には標準化の観点が必要である。バイオテクノロジーの標準化について米国は本腰を入れてきており、日本においても重要性が認識されるべきである。
- 研究開発を実用化につなげるためには、生産の規模を拡大するための試作環境の整備が必要である。
- AMED の発足後、バイオ・ライフとナノテク・材料の融合領域に位置づけられる基盤的な研究に対して、ファンディングが難しくなっているとの印象を受ける。バイオ・ライフ分野とナノテク・材料分野の共同プロジェクトを AMED と JST が共同で提案するなどして、基盤研究の広がりを持続すべきである。

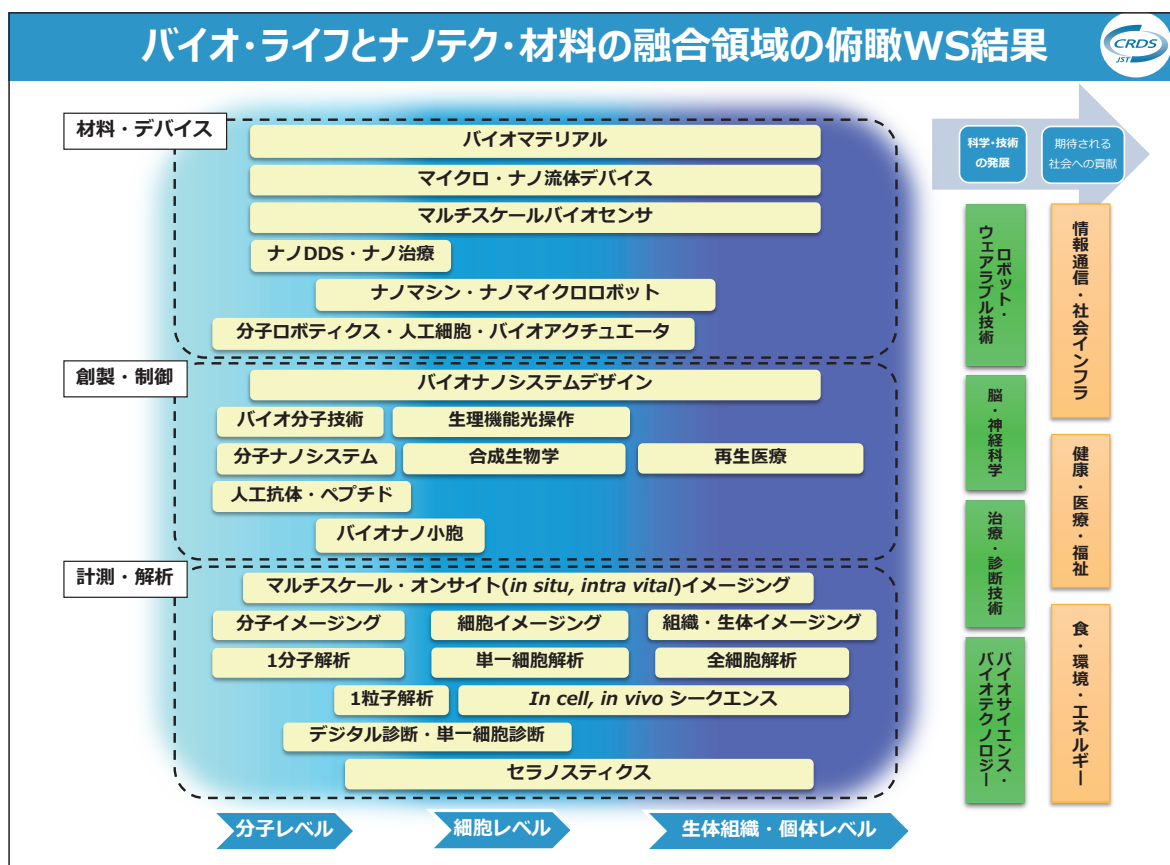


図 2-43 バイオ・ライフとナノテク・材料の融合領域の俯瞰 WS 結果

④ 社会インフラ

健全な社会インフラの維持管理を進めていく上では、システムとしての保守管理技術とともに、構造材料、接合・接着技術、コーティング・表面処理といった構造形成技術に関するものや、劣化・腐食の機構解明、計測・点検・分析評価、劣化予測・余寿命予測、補修技術などナノテクノロジー・材料技術の視点で取り組むべき課題がある。今後は、古いものと新しいものを一緒に扱うエンジニアリング、様々な腐食環境において数値モデルの作成、溶接部から入る疲労亀裂や腐食の予測技術、材料の履歴やデータベースの整備、リサイクルの視点などが求められる。

- 社会インフラの維持管理に関して、ナノテクノロジー・材料分野の重要な技術を図 2-44 に示した。

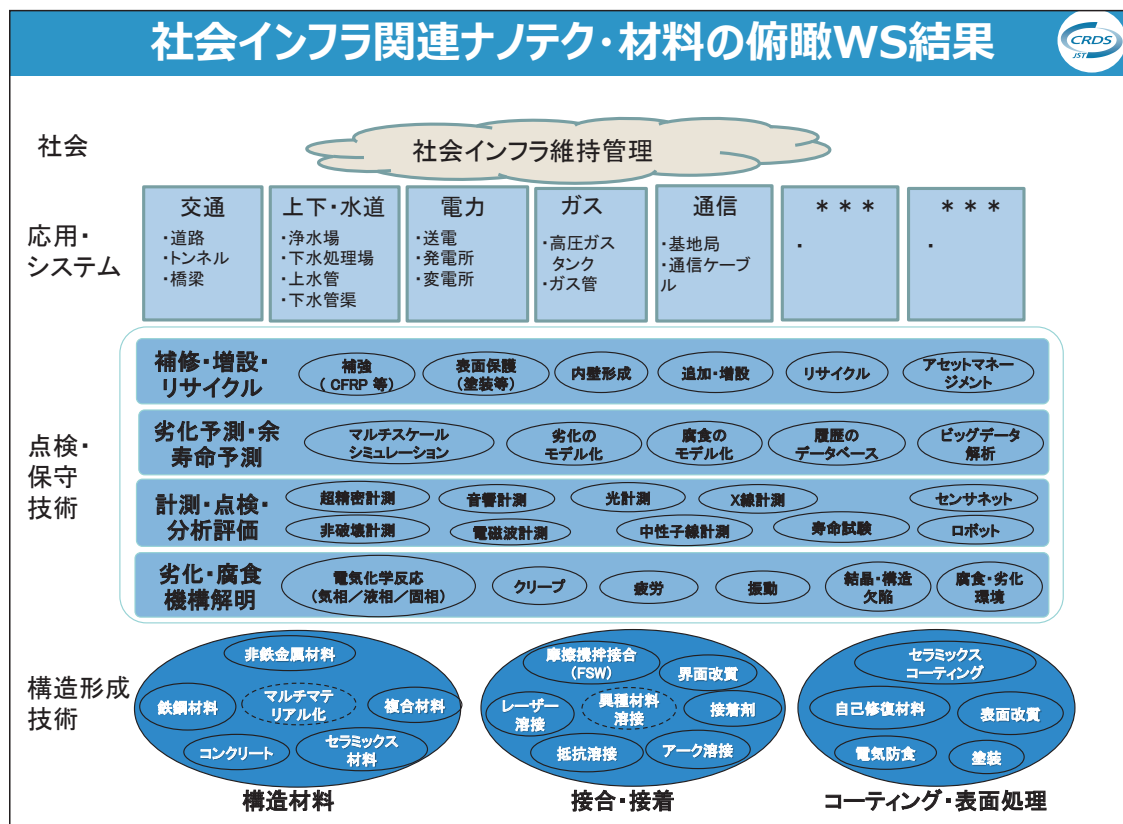


図 2-44 社会インフラ関連ナノテク・材料の俯瞰 WS 結果

●今後の研究開発の方向性

- － 古いものと新しいものを一緒に扱うエンジニアリングが重要。
- － コンクリートは鋼や他の補強材をうまく使う設計で対応可能。
- － 腐食は様々な腐食環境において数値モデルを作ることが重要。
- － 海洋構造物の鋼の防食には塗装と電気防食を併用することが有効。
- － 溶接部から入る疲労亀裂や腐食の予測技術が重要。
- － 経年劣化材の溶接技術が必要。

●政策・制度上の課題

- － 市町村ではインフラ維持の抜本的なシステムが必要。
- － 材料の履歴やデータベースの整備が重要。
- － 過積載など不確実なリスクへの対応が必要。
- － 社会インフラにとってもリサイクルの視点は非常に重要。

④ ナノテクノロジーの ELSI/EHS

ナノテクノロジー・材料科学技術はイノベーションを担うエンジンとして期待されるが、ナノ材料は健康や環境に対して未知の影響をもたらす可能性を含むため、そのリスクが適切に評価・管理される必要がある。社会の懸念を払拭し安寧を担保するため、環境・健康・

安全面（EHS：Environment, Health and Safety）あるいは、倫理的・法的・社会的問題（ELSI：Ethical, Legal and Social Issues）として、OECD や ISO 等の国際的な枠組みを中心にナノ材料のリスクについて各方面で検討されてきた。近年は、欧州や米国の規制当局から指針等が公開され、規制や管理がより具体化しつつあるが、日本では、未だ規制は開始されておらず課題がある（図 2-45）。

●今後の研究開発の方向性

ワークショップではナノテクノロジーの ELSI/EHS に関する背景・経緯、国際的な枠組みでの推進状況および日欧米の取り組み状況等を振り返り、各発表者からの毒性評価技術、リスク評価体制を中心とする課題について議論した。今後の方向性について以下に示す。

- － ナノマテリアルのスクリーニング評価法として気管内投与法が必要であり、OECD へ提案する。OECD 採用は試験法としての質確保、国内規制の前提条件として必要である。
- － ナノマテリアルの発がん性判定は in-vivo 試験が大前提であるが、in-vitro 試験は in-vivo の補助として重要である。
- － ナノマテリアルの審査は米国式の個別承認形式であれば技術上は可能ではあるが、日本の化審法審査に適合しにくく、審査負担が過大となるためうまくいかない懸念がある。
- － 欧州は動物試験そのものを不可とする逆風下にあるため、推進するためには企業の積極提案などの強い推進支援、連携が必要である。
- － 材料の同等性評価研究のために必要な基礎化学分野の知見は日欧ともに弱くなっているが、同等性評価は重要であり留意すべきである。
- － 日本は若手毒性病理学者が不足しており、この分野で次を担う世代がいらない。企業内の毒性研究室が減少しており、企業はアウトソーシングする傾向にある。毒性病理学に限定せず、薬理学等も含めてリスク評価人材供給源の確保を考慮する必要がある。

●政策・制度上の課題

欧米各国では国家計画レベルでのナノテク政策の役割を、将来の産業の要となる新市場の創出と雇用拡大と位置づけている。しかし、近年はナノテクからもたらされる利益を確実に社会へ還元するために、安全性に関連する国際標準化の体系を構築し、自国利益を戦略的に最大化することが意図されている。ワークショップではナノテクノロジーの ELSI/EHS に関する背景・経緯、国際的な枠組みでの推進状況および日欧米の取り組み状況等を振り返り、科学技術・産業新興および社会とのコミュニケーションを含めた責任ある研究・イノベーションとしての戦略的取り組みについて議論した。政策・制度面の課題について以下に示す。

- － リスクに関するコミュニケーションが重要だが不足しており、市民や人文科学者との対話の場が必要。研究初期の不確定時期は難しいが技術の意味するところや潜在的な可能性を伝える努力が必要。社会科学者と科学技術者との直接対話は難しいが、その間に市場を考えるマーケティングの人間を入れ会話を成立しやすくするなどの配慮が必要。

- アカデミアにおける化学物質安全・リスク評価研究人材の育成・強化。毒性・環境関係研究者がナノテク・材料研究者と共同で取組む体制の整備が必要。その上で、欧米亜各地域との国際共同・国際連携研究へ、戦略的参画が重要。
- 新規ナノ物質の合成から製造を見据えた研究開発においては、研究開発予算の一定割合を ELSI/EHS に配分する仕組みの検討が必要(米国では NNI 予算の 6-7% を維持)。
- 産官学のナノテクに関わる研究開発に対して ELSI/EHS 観点から支援し、先導するための横通しの一貫体制を産官学が協働で構築し、日本の産業振興とコミュニケーション推進をリードする必要がある。ナノテクは幅広い技術であり、特定の業界や省だけに任せることは難しく、関連業界や府省を横断する体制が求められる。

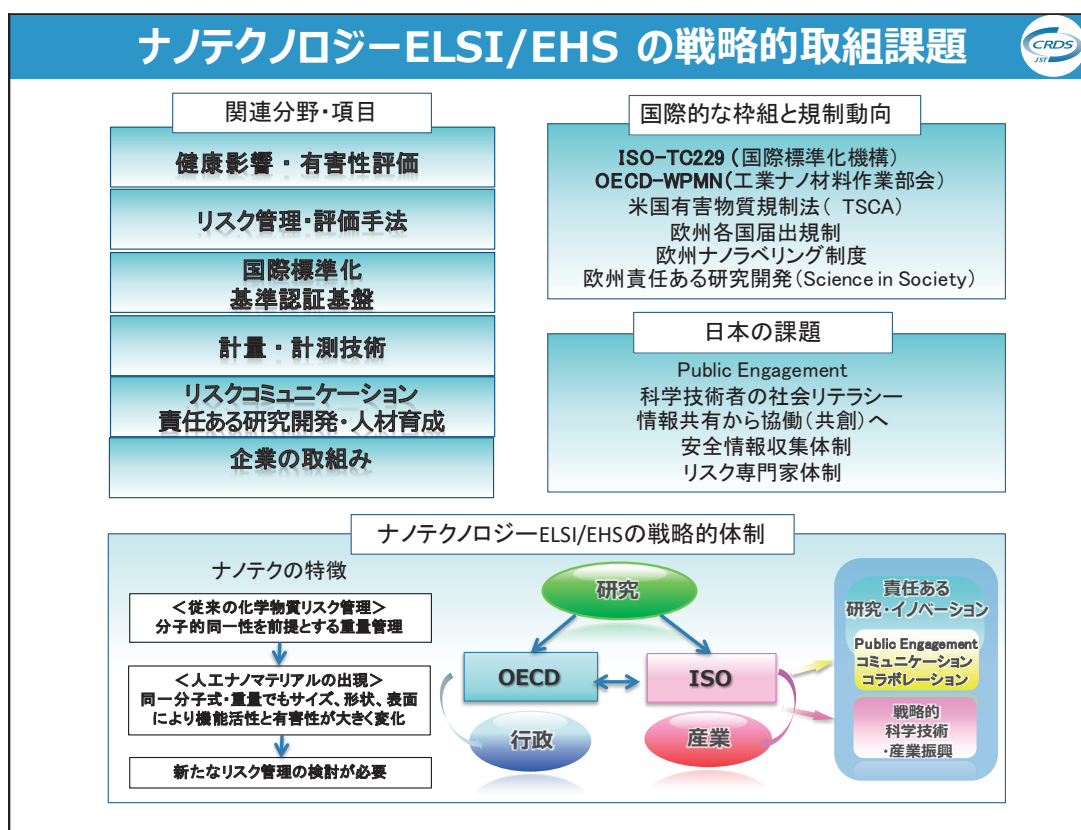


図 2-45 ナノテクノロジー ELSI/EHS の戦略的取組課題

⑥ 研究開発力強化に向けた施策間連携

ナノテクノロジー・材料研究の「イノベーションプラットフォームの確立」をすることが、ナノテクノロジー・材料基盤技術を常に世界最高レベルに保つことにつながる。日本全体でアカデミア、産業界が共にいつでも先端基盤技術にアクセス可能であり、そこから実用化・産業化につながるイノベーションを創出できる環境を日本全体にわたって構築することが重要と考えられる。これに向けて、計測・加工・合成、シミュレーション、データ活用の機能を有するそれぞれの施設や施策を密に結び、連携を強化するネットワークの構築をどのように行うか、現状の課題・強化策も含めて議論し、具体的な方策を導くことを目的として議論した。また、産学官連携、人材育成、リスク評価・管理・コミュニケーションなども含めた日本としての戦略策定や効果的・効率的な施策策定のための府省の連携などに関しても議論した。その結果、以下のような現状の課題に対して、課題の解決の

方向性が示された。

●施策間連携における課題

- ・先端研究開発用の共通インフラ・装置の長期的な視点での維持管理が難しい。
- ・多くの官僚は2年に1回替わっていくため、施策を最後まで見届けられない。
- ・人が替わる度に、予算獲得に有利な新しい施策に走り、施策の継続性を担保できていない。
- ・研究プロジェクトは失敗があることも考慮した仕組みになっていない。
- ・現場でも連携は良いと思っているが、自分一人でやる方が楽であり、インセンティブの無い状況では面倒と思うだけである。
- ・組織間連携をやるときに、制度上の違いをすり合わせるなど、研究ではないところのマネジメントが欠けている。また、組織間連携を先導する人材の育成もできていない。
- ・ナノテクノロジー・材料分野全体を俯瞰してこれから日本としてどこで闘っていけば良いか関係府省・機関で議論する場が欠けている。

●今後の方向性

- (1) 先端研究開発インフラの将来戦略、成長する研究開発施設・拠点の在り方
 - ・関係する様々な分野全体をきちんと俯瞰し、国としての狙うところを決めて戦略を練り、これに基づいて関係府省が施策を出すシステムティックな仕組みを作る。
 - ・内閣府、文科省、経産省など府省の人が入れ替わっても、俯瞰活動を基に先回りして戦略を考え、責任を持って施策・拠点を発展させる仕組みが必要である。
 - ・国の施策として施設・設備の整備やプロジェクトの立案をするときには、将来の施設・設備の更新や維持運営まで考えた一貫した戦略を考え、責任を持って施策・拠点を発展させる仕組みが必要である。
 - ・大型の研究施設や研究拠点の長期的な維持運営には、運営側と利用側だけの議論にならないように、日本としてどうすべきか上位の視点で考え、関係者で共有する必要がある。
- (2) 施策間連携、機関間連携、府省間連携、現場の連携
 - ・内閣府（CSTI）が司令塔となり、長期的な視点で、様々な事柄に対して意見交換・議論しながら、戦略を考えていく場を作り活動を継続していく必要がある。ここでは、ニーズや最先端の技術の把握、ベンチマークを行い、府省が腹を割って戦略を議論することが重要になる。
 - ・府省間の連携として形式的でなく実質的なものにするためには、大学、国研、企業の研究者がアンダーワンループの形で集まり、一体的にマネジメントできるようにする必要がある。
 - ・研究現場での実質的な連携を促進するためには、明確なゴールを設定し、連携のモチベーションやインセンティブを与えることが重要である。

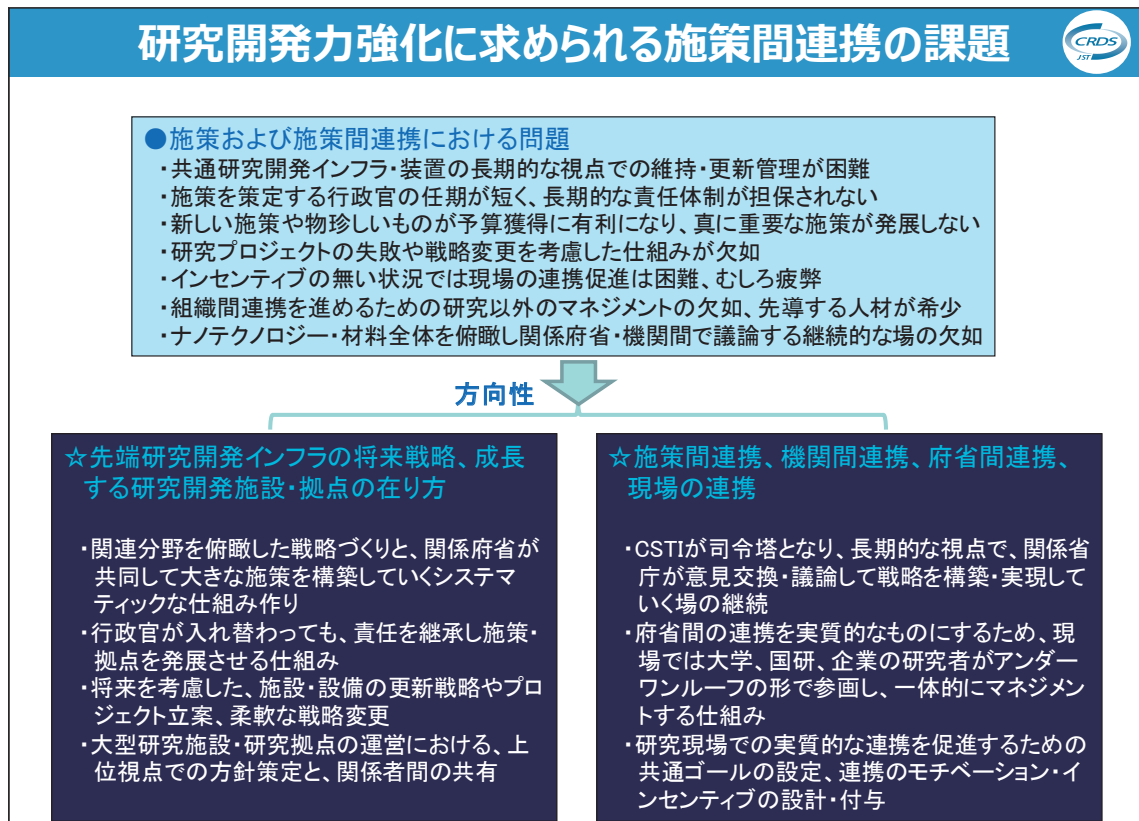


図 2-46 研究開発力強化に求められる施策間連携の課題

enabled products) は、2012-14 年の 2 年間で 8,500 億ドル／年から 1.6 兆ドル／年に急成長したとしている。以下では、産業で使われるナノテク素材の代表事例として自動車を例に記載する。

過去 10 年間でナノテク素材が大きく新規事業に貢献した事例の最大のものは、ハイブリッド自動車であろう。トヨタ、日産、ホンダ等日本企業は、ガソリン自動車の世界市場の中で存在感を示しているが、トヨタのプリウスに代表されるガソリン／電気の双方を動力源とするこの方式は、燃費の良さ、CO₂ 排出量の少なさにおいて画期的な仕組みであり、2016 年においては、国内市場では最も販売量の多い車種はガソリン車ではなくハイブリッド車となっている。また世界市場の中でも高いシェアを維持し、市場規模は拡大している。日本発の新技术を駆動力として新市場が創生できた稀有な例である。これを支える高効率モーター（高性能磁石）、二次電池（Ni- 水素電池、Li イオン電池）、パワーコントロールユニットに使用されるパワー半導体等（GaN、SiC）は、今世紀になって市場投入され始めた材料であり、ハイブリッド車は、まさにナノテク素材の集合体である。ハイブリッド車の延長線上にある電気自動車（EV）も、米テスラモーターズ、三菱自動車、日産等で事業化が進んでいるが、モーター、電池等についてはハイブリッド車とほぼ同様の機能素材を使用することから、HEV + EV を加えた自動車の市場は今後も拡大していくと考えられている。高性能磁石については、元素戦略的視点で、ネオジウム磁石の重希土類金属のフリー化が実現し、ホンダと大同特殊鋼が共同開発し、2016 年にハイブリッド車に搭載した。二次電池は Ni- 水素から、Li イオン電池への転換が進んでいるが、有機電解質を使用している Li イオン電池は、出力・容量に限界があり、上市されているハイブリッド車では大スペースを必要とし、重量も嵩張ることが課題である。性能向上の余地、また安全性の観点から、将来的には全固体電池、空気電池等の次世代電池の搭載が期待され、正極材、負極材、固体電解質のいずれにおいても新材料を用いた組み合わせが必要となり、自動車会社以外を含め企業でも精力的に検討されている。また、車の燃費向上については、車体の軽量化が重要であることはいままでのないが、これについては NEDO 革新的新構造材料等研究開発で産官学連携プロジェクト（平成 26 ～ 34 年度）が実施中である。車用材料だけでなく、広く輸送媒体、構造材料を対象としており、実用化が期待される。

自動車の排ガスに関しても、ディーゼル車排ガスの有害成分である NO_x 除去の環境規制が今後国際的に厳しくなると予想されている。安価で確実な除去法が必要となるため、自動車メーカー・触媒メーカー等で精力的に研究開発が進められている。市場は、VW 社の排ガス不正問題もあいまって、より確実な手法で高性能を実現できる選択還元触媒を待望している。今後、アジアにおけるモータリゼーション、化学触媒の性能的飽和、環境規制、温暖化抑制機運の高まりから、自動車排ガス触媒市場は今後も拡大基調にあると考えられており、ナノテク素材による革新が求められている。

2.2.1.6 世界の R&D イノベーション促進方策（研究開発のエコシステム）

先端科学は高度化、複合化、学際化が進展し、特にナノテクノロジー分野では原子・分子レベルの現象の観測、評価、制御が必須となっている。これらすべての専門領域をカバーする研究者集団、高額な実験装置と、装置をフル活用できる技術専門家を個々の研究機関や企業で確保するのは、どの国にとっても困難である。

一方で、研究開発はグローバルなスケールで競争が激化し、開発スピードへの要求は拡大し、世界的に以下のメリットを享受できる拠点型のオープンイノベーションへの取り組みが実践されている。

- ・複数企業や複数研究機関によるコスト・リスクシェア（技術開発コスト削減、リスク低減）
- ・拠点化による多様な専門家集団の集結
- ・共用研究開発インフラ、基礎基盤技術開発への公的投資・支援
- ・知的財産の相互利用

ナノテクノロジー・材料分野の国家プロジェクトにおいては、イノベーションを加速的に促進する仕組みとして、先端・高額機器の効率的な利用や異分野融合、産学連携のための研究拠点や共用施設ネットワークの構築が、中長期的にみて極めて重要となる。イノベーションの実現に向け、研究開発の投資対効果の中長期的に高めるためには、研究開発にのみ投資するのではなく、バリューチェーン全体における戦略の構造化を行い、適切なタイミングで（場合によっては研究開発施策の計画と同時に）、先端機器・装置群の更新戦略、知財戦略、標準化戦略、新技術の社会コミュニケーションに取り組まなくてはならない。

■世界のナノエレクトロニクス大型研究拠点

ナノエレクトロニクスの研究開発拠点は、ベルギーの IMEC、フランスの MINATEC、米国の Albany Nano Tech（ANT）など、限られた拠点到集中している（図 2-48）。これらの拠点には、デバイスメーカー、装置メーカー、材料メーカーなどが集まり次世代のデバイス、プロセス研究開発のエコシステムを構築し、先端半導体研究だけでなく、半導体を活用した研究、最先端の設備と研究開発プログラムを通じた人材育成が行われている。

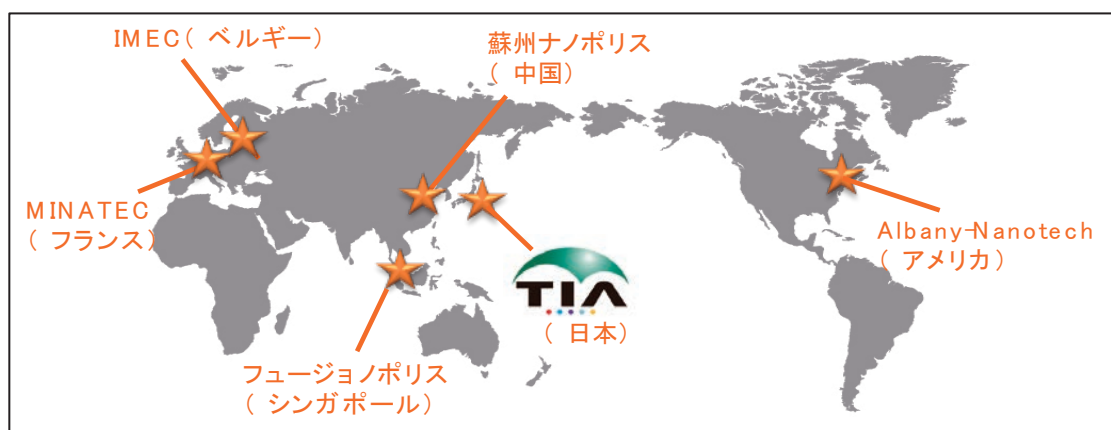


図 2-48 世界のナノエレクトロニクス大型研究拠点

IMEC は、ナノエレクトロニクスの国際的な研究請負機関に成長している。年間予算は約 3.2 億ユーロである。さらに 450mm の研究開発ラインの構築も進捗している。IMEC の計画では、2018 年ころ少量生産向けのラインを立ち上げる予定とのことである。

IMEC の 2013 年の人員は 2000 名を超え、そのうちの 1400 名がプロパー、400 名弱が外部からの研究員、300 名弱が PhD の学生である。IMEC は世界中にパートナーネットワークを張り巡らせており、サプライヤでは 60 社と提携、IDM& ファンドリでは 8 社（インテル、Samsung、TSMC、グローバルファンドリ、マイクロン、SKHynix、東芝、サンディスク）、ファブレスでは 7 社、応用・製品関係では 200 社以上と協力関係を築いている。

MINATEC もグルノーブルの産学独集積クラスターの中心として、多くの人材を育成しつつある。年間予算は約 3.5 億ユーロで、スタッフ規模は 4000 人を超えており、そのうち研究者が 2600 人、学生・ポスドクは 1800 人規模といわれている。MINATEC の 6 つのプラットフォームは、ナノエレ、ナノ計測、システムインテグレーション、フォトニクス、化学、生物医学であり、各種のセンサ技術の開発にも力をいれている。また EU のグラフエンプラッグシップとは別に、2 次元材料全般をカバーするプロジェクトも最近設立した。なお MINATEC の中で中心的な役割を担っている電子情報技術研究所（LETI）の 2013 年度年次報告書によると、Permanent 研究者 560 名、産業界からの研究者 180 名、PhD 学生 100 名、ポスドク 15 名とのことである。CMOS と MEMS の 200 mm、300 mm のプロセスラインを持ち、クリーンルームの総面積は 7500 m²、プロセス・計測装置は 500 台を超える。2013 年度に約 400 件の論文を発表し、特許も 120 件ほど出している。MINATEC では自己評価の指標として、① International visibility、② Ecosystem generation、③ Economic impact、の 3 つを重視しており、これらを高めていくための運営に集中している。

ANT は、戦略的な提携関係にある企業や公的研究機関は 200 社近くにのぼる。その中で中心研究機関の一つである SEMATECH は 2013 年にニューヨーク州と 5 年間の研究協力契約を締結し、Phase 3 のステージに入った。ANT に勤務している企業人は約 3000 名である。ANT のある SUNY-CNSE（State University of New York - College of Nanoscale Science and Technology）は、2002 年の建設開始以降、総額 80 億 US ドル以上を投資して現在に至る。参画企業からの要請に応えるかたちで年々拡大した 13000 m² 規模のクリーンルームを筆頭に、雇用者の人件費を含めた年間の維持費は毎年 200 億円規模とされる。NY 州政府が約半分を支出し、企業が半分を拠出している。2013 年にできた 450 mm ライン “NanoFab X” を擁し、450 mm 技術を確立させるためのグローバルコンソーシアムを 2011 年から開始している。コンソーシアムへの投資 48 億 US ドルは主に民間資金からであり、NY 州政府も 4 億 US ドルを拠出している。ANT では、再生可能エネルギー技術研究開発にも力を入れており、2015 年には 1.9 億 US ドルを投じた、ZEN (Zero Energy Nanotechnology) 棟が開所している。CNSE の教員・アドミニストレータは約 150 名、大学院生 200 名が所属する。4 つの学科、ナノサイエンス、ナノエンジニアリング、ナノバイオ、ナノエコノミクスがある。なかでも特徴的なのはナノエコノミクス学科であり、ナノテクノロジー産業化へのエンパワメントに関する教育・人材育成をメインミッションとしている。CNSE では博士号を取得でき、また、SUNY のメインキャンパスと共同して MBA を取得できるようにもしている。

アジアでは中国蘇州において 1994 年から建設されてきた蘇州工業園區（SIP）がつくば研究学園都市の 10 倍の規模に成長し、シンガポールにはフュージョノポリスが国際拠点となっている。このように、韓国、中国、台湾に加え、南アジア、東南アジアではシンガポールを中心にハブ化が進みつつある。

日本での取り組みとしては、2010 年にスタートした TIA がある。産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、筑波大学、高エネルギー加速器研究機構、東京大学が中核となり、日本経済団体連合会（経団連）とも連携した取り組みである。先端ものづくり国家としてのわが国の繁栄とともに世界的に魅力あるナノテクノロジー研究拠点を造り上げようとしたものである。2016 年度から新たに東京大学が加わり、ナノバイオやデータ駆動科学などの新たな取り組みも進めていくことから、名称を TIA・nano から TIA に変更して活動を継続している。当初は、産業化に直結する 6 つの重点研究領域（ナノエレクトロニクス・パワーエレクトロニクス・N-MEMS・ナノグリーン・カーボンナノチューブ・ナノ材料安全性評価）をコア研究領域として定め、また、実証デバイスの試作・評価、ナノテクノロジー先端装置群の共用、人材育成の推進に関わる仕組みを、3 つのコアインフラとして整備した。2016 年度からは、これらを 3 つのプラットフォーム（システム化プラットフォーム、先進材料プラットフォーム、共通基盤プラットフォーム）に再編している。システム化プラットフォームには、ナノエレクトロニクス、パワーエレクトロニクス、MEMS の研究領域、先進材料プラットフォームにはカーボンナノチューブ、ナノグリーンの研究領域が含まれ、それぞれ企業と連携して関連するプロジェクトを推進している。共通基盤プラットフォームには、光・量子計測、人材育成、共用施設ネットワークがあり、計測技術の高度化、研究者の能力向上・キャリアアップ、研究の支援などを行っている。また、2016 年度より中核 5 機関の研究者が連携して将来のイノベーションに繋がる新たな研究領域の探索を行うために、TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」を開始している。興味深い新たな研究テーマが提案されており、今後これらの中から本格的な研究への移行が期待される。TIA 拠点を活用するプロジェクトとしては内閣府の FIRST、SIP、ImPACT や文部科学省、経済産業省、NEDO など様々な国のプロジェクト（2015 年度までに 34 プロジェクト）が進められ、成果が創出されている。2015 年度における TIA 活用企業は 145 社、外部から 600 名あまりの研究者が集まっていることから、イノベーションハブとしての機能は徐々に高まっている。オープンイノベーションを促進すべく、公的資金のみならず、企業会員からの資金も得ながら、持続・自立可能な拠点経営を実践している例が出始めている。ナノグリーン領域における NOIC（NIMS Open Innovation Center）や、パワーエレクトロニクス領域におけるつくばパワーエレクトロニクスコンステレーション（TPEC : Tsukuba Power-Electronics Constellations）がある。また、企業主体の新事業創出を促進するために、単層カーボンナノチューブや複合材料の提供やカーボンナノチューブプラントを企業へ貸与することも行っている。

一方で、IMEC、MINATEC、ANT に比べて教育・人材育成の面の弱さ、コア技術開発が日本企業だけで多様性が不足、海外からのユーザ・ニーズが少ない、産業界に対する PR が弱いといった指摘もある。

今後 TIA が、世界の強力な半導体開発拠点に伍してどこまで競争力を持ち得るのかは、国のエレクトロニクス研究開発政策の位置づけにも依存し、各セクターの意志と行動にかかわる問題である。拠点は国際的に開かれた組織とし、他国のネットワークと接続、もっとアジア諸国や世界からの人材の誘引を試みる必要がある。また、産業界の参加を誘導するため、特定国立研究開発法人の産業技術総合研究所および物質・材料研究機構は一層の努力を傾注し、内閣府、文部科学省、経済産業省の関連府省は支援体制を強化する必要があるだろう。

■世界のナノテクノロジー共用施設ネットワーク

米国、韓国、台湾は計画的に政府予算を投入（ナノテクノロジー国家投資額の 10%～15%を共用施設ネットワーク・拠点形成に充当）し、充実した先端研究インフラのネットワークを構築した。特に、米国の NNIN（現在の NNCI）や NCN（NSF）、韓国の 6 センターは共用インフラとして課金制や国際対応がほぼ完成している。欧州や台湾も、国・地域単位でナノテクノロジー研究インフラのネットワークが形成されている。

米国の充実した数十の拠点ネットワーク（NNCI / NSF：16 拠点によるナノテクノロジーコーディネーション拠点ネットワーク、NCN / NSF：7 つの計算機センターによるナノテクノロジーコンピュータネットワークなど）においては、共用センターの長年の経験を活かし、平均すると連邦政府からの資金は全体運営費の 3 割ほどで運営が成立している。

日本は、過去、文部科学省のナノ支援（2002-2006 年度）、ナノネット（2007-2011 年度）の両プログラムにおいて 10 年間、13 拠点が運営されたものの、投資額の不足と拠点機関側の意識の低さのため、全体的に見ると実施機関の施設運転費の補填の面が強く、産業界から頼られるネットワークは構築できなかった。投資に計画性が欠落していたため、課金制や国際対応についても他国に後れを取った。

しかし、平成 24 年度から 10 年間の計画でスタートした文部科学省のナノテクノロジープラットフォームではこれらの課題を制度面でかなりの部分克服しつつある。高価な先端装置類を地域単位で集中配備して共用化することで、公的資金による研究開発投資の効率を上げるばかりではなく、そこに集まった異分野の人材が知識やアイデアを交換し合うことで連携・融合を進め、新しい科学技術やビジネスが生まれるきっかけを生み出そうとしている。画期的な材料・デバイス開発に挑む産学官からの利用者に対して、プラットフォームでは 3 つの技術領域（微細構造解析、微細加工、分子・物質合成）を用意し、全国 26 法人 40 機関が参画している。それぞれ共用を担う実施機関及びその代表となる機関が緊密に連携し合いながら、利用者に対して最適な場所で高度な技術サービスを提供する体制を構築している。また、プラットフォーム全体の支援機能の高度化や利用促進を図るために、センター機関（NIMS、JST）を設置し、全国の若手研究者や地域の中小企業など潜在利用者と、プラットフォームとをつなぐコーディネート機能を担っている。

平成 27 年度には、プラットフォームの年間利用件数はおよそ 3000 件にまでに成長している。文部科学省の事業予算（17 億円 / H28 年度）とユーザからの利用料収入、そして実施機関による負担予算とが合わさり、プラットフォーム全体が運営されている。そのなかで、産業界に対する具体的な開発支援や、予算規模の小さい大学研究者に対する高額な設備の利用、専門技術者のスキルと知・ノウハウへのアクセスを可能としている。利用者の目的に対してレバレッジを効かせた具体成果を上げるなど、研究開発の新しいエコシステムが育ちつつある。こうしたネットワークの構築により、ユーザが課題を最初に持ち込んだ先の機関では対応できない課題も、プラットフォームを介して他の機関へと紹介され、そこに持ち込むことで解決できるケースが生まれている。これは海外にはない日本の特徴的な仕組みである。設備、技術などのサービス提供のみならず、技術の知識、事例、解決策などが蓄積されていること自体がプラットフォームの強みであり、価値創出の源泉となっている。特にワンストップの web サイトの充実など、バーチャルの部分で利用事

例等の知識や、設備情報のデータベース化、ICTの駆使がポイントになっている⁹。先端設備共用の仕組みが根付くためには、プラットフォーム機関側の自主性・自律性が特に重要である。今後より持続的な運営形態を目指して発展・成長させていくことが求められ、本格導入した利用課金システムの定着、高度技術専門人材の専属配置とその育成システム・キャリア開拓、国際化対応などが期待される。このようなネットワークは、ナノテクノロジー分野に限らず、今後あらゆる国家プロジェクトや産学連携を支え、融合や連携を促進する上で重要であり、研究開発の投資効率を上げるためにも不可欠なインフラである。

■ バイオナノ分野の基礎から産業への橋渡し

わが国は、大学等における基礎研究のレベルが高くとも、その成果が産業化に至らず、医療・社会への貢献が成立しないという矛盾を抱えている。バイオナノ分野における我が国の産業化の弱さの要因として、下記の課題が挙げられる。

- 1) 医療機器は少量多品種生産であり、一部の例を除き市場規模が小さく事業性が低いこと
- 2) 先進医療が有するハイリスクを受容可能、かつ開発力のある国内医療機器企業が限られていること
- 3) ベンチャー企業への投資による製品開発や、その後の大企業による買収・事業化展開が欧米のように活発ではないこと
- 4) 法制度の関係上、許認可取得にかかるコスト・期間が欧米に比べて大きいこと
- 5) 試作量産のための環境整備が十分でないこと
- 6) 研究者、臨床家、企業による情報共有が十分でなく、実用化を志向した適切な共同研究体制が構築されないこと

法制度に関しては、薬事法の改正、低リスク生体材料の第三者機関による審査、再生医療等先端医療技術・製品の承認基準に関するガイドラインの作成、審査の優先化、混合診療に伴う規制緩和などの取組みが開始しており、改善が期待されるが、他の課題の解決策は限定的である。近年、大学等の研究機関と中小企業が共同でシーズ技術を発展させ事業化を目指す制度や、大学発ベンチャーを支援する制度が実施されているが、このような直接的支援は市場性の高いシーズ技術でない限り効果が薄く、多くのシーズについては事業化にまで至ることは難しい。国産医療機器の事業化を促進するには、なにより医療機器の低事業性を改善することが肝要である。市場を国内に限らず、国際展開を図り市場を拡大するため、海外市場への参入障壁を下げる必要がある。また、事業化のコストとリスクを下げるため、承認申請用試験データの合理化及び取得支援、さらに国内外における申請相談の無料化などの支援策が必要である。

例えば、米国 National Cancer Institute ではがん治療関連の臨床応用を念頭に、無料で、ナノ粒子等の材料の *in vitro/in vivo* の基礎的な生体反応評価を実施している。医療への応用が可能かどうか、可能性を見極めるための初歩的な評価だけでも無料で実施できれば、我が国においても医療製品の実用化促進につながることを期待される。

さらに、医療機器の開発には最適化のための試作が必要であり、これまでナノテクノロジープラットフォームがその役割を果たしてきた面がある。しかし今後、製品化に向けて

9 参考：共用設備利用案内サイト <http://nanonet.mext.go.jp/yp/>

生産の規模を拡大するには、ある程度の量産が可能な共用施設の整備が必要である。また、こうした共用施設が基礎研究と実用化をつなぐ場を提供することが期待される。医療産業ビジネスの専門家や医療機器の承認に携わる専門家が研究開発の初期から連携することで、早い段階から製品化を睨んだ研究開発体制の整備が望まれる。

■大学等研究、および産学共同研究における知財戦略

大学等で優れた発見、発明がなされた場合、その技術を有効な形で出願するだけでなく、国内外の多数の研究機関が保有する権利を相互に利用できるような創造的かつ協調的な組織の構築が必要とされる。このために、それらを所有する国内外の研究機関と国際的な交渉を行う実務者の確保、また重要な特許を海外の多数の国に出願する経費の確保、さらには出願を維持、管理するための資金を確保することは、上記目的を達成するために必須である。

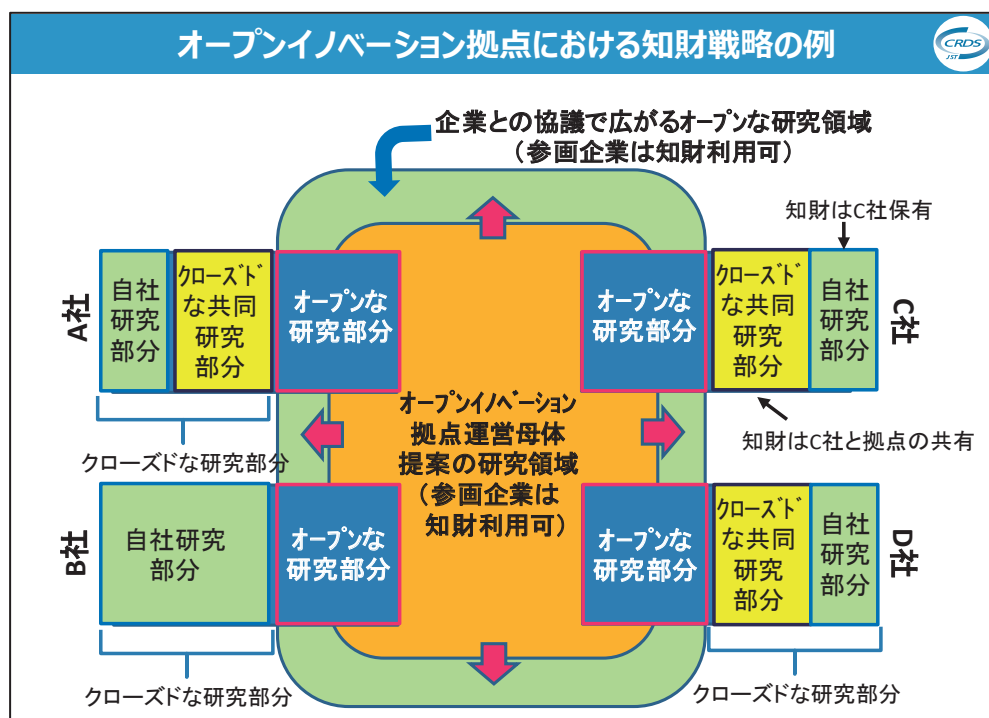
日本の大学からは、近年、ほぼ一定して年間 9,000 件前後の特許出願がなされ、ナノテクノロジー・材料分野はそのおよそ 1/4 を占めている。これらの特許権の実施等で日本の大学全体が受ける収入は、平成 26 年度で 20 億円弱となっている。一方で米国の大学全体が受ける特許収入は年間 25 億 US ドル近くに達しており、桁違いの差がある。米国ではバイドール法の制定以降、産学連携の推進、大学による特許取得、企業へのライセンスが急伸している。これが米国大学による巨額の特許実施収入に結びついている。一方、日本でも米国に遅れること 20 年の 1999 年に日本版バイドール法が制定され、国の方針として大学自らが特許のライセンス収入を稼ぐように方向付けられた。しかしながら、日本においてはそれ以降、産学連携が活発化するという兆候は見られず、大学所有特許の企業へのライセンス供与は低調のままで、実施料収入の日米差は依然として大きく開いている。

特許を出願、維持するためには、相応の費用が必要だが、日本の大学では上記のように保有特許によるライセンス収入が不調のため、特許の出願・維持に消極的になる傾向が見られる。特に事業の国際化が進む現況では、海外における特許権の確保は重要となるが、国内特許に比べ費用がかさむため抑制傾向にある。現状のままでは大学や独法への大規模な国費の投入の結果生まれた研究成果がなんら知財として守られなくなる可能性があり、もはや個々の機関での対応では困難になっている。今や、大学等の知財を一元的に管理する組織体制の構築等、抜本的な検討が必要と考えられる。

一方でオープンイノベーションの時代に入り、産学連携の在り方も大きく変わりつつある。産業化に大きな研究開発リソースの投入が必要な、長期的で重要な技術テーマについては、産業界を含む多くの研究機関が参画するオープンイノベーション拠点型の産学連携が必要になってくる。その成否はオープンな研究部分とクローズな研究部分をどう切り分け、そこで生まれる知財をどのように取り扱うかにかかってくる。巧みな知財戦略により、半導体分野における自らの研究開発活動を世界レベルで大きく発展させたのが欧州の IMEC であり、その知財戦略から学ぶべき事は多い。日本では、物質・材料研究機構 (NIMS) のオープンイノベーションセンターが独自の知財戦略を展開している。下記のコラムでは、IMEC や NIMS の知財戦略を参考に、オープンイノベーション拠点の知財戦略につき考察する。

【コラム】オープンイノベーション時代の知財戦略

オープンイノベーションを組織として実行する研究開発拠点は、通常、研究基盤を有する大学や国研、あるいはそれらの集団が運営母体となり、実施する研究内容と研究目標、保有する研究インフラ、人材、知財を提示し、企業に有償での参画を募る。そこで提示された知財はバックグラウンド特許として参加企業は有利な条件で利用できる。運営母体は参加を希望する企業と実施する研究内容につき個別に議論、オープンイノベーション拠点で実施すべき研究部分とそれ以外のクローズドな部分とに切り分ける。オープンイノベーション拠点で生まれた成果は参画企業全体で共有され、生まれた知財は運営母体単独、あるいは創出に関わった企業との共有となり、参画企業は有利な条件で使用が許可される。運営母体はその成果、知財をベースにさらなる参加機関の呼び込みを図り、組織の拡大を図る。新たに加わった企業は有償でそれまでの知財の使用が許可される。オープンな研究部分を超え、クローズドな部分に関して運営母体との共同研究を希望する企業がある場合は守秘義務を徹底し、オープンイノベーション拠点で生まれた成果の企業による市場化を積極的に支援する。図 2-49 は以上の内容を図にまとめたものである。実際には、参加企業の規模、技術の成熟度、市場化との距離、運営母体の保有する研究基盤の競争力、さらには国プロジェクトによる支援の有無等で、状況は変わってくるであろうが、日本にオープンイノベーション型の産学連携体制を根付かせるには知財の取り扱いを含め、研究体制や運営方法の試行錯誤が必要となっている。



■ナノテクノロジーの標準化戦略と安全性評価研究（EHS / ELSI）

ナノテクノロジー・材料科学技術の進展と、その工業化に伴って生み出される新規物質や新製品の健康・環境への影響、新規性に伴うリスクの評価・管理は、国際的課題として取り扱われている。ナノ材料に関する安全性研究は、ナノサイズ化に伴い発現する物理・化学特性が従来のバルク材料や分子と異なるため、その生物的、環境的な影響が従来知見では判断ができないことに由来するもので、大きなリソースを要するため、必然的に国家の枠組みの下に適切に実施する必要がある。リスク評価研究は公共福祉政策（環境・健康・安全面 / EHS : Environment, Health and Safety）、倫理的・法的・社会的問題（ELSI : Ethical, Legal and Social Issues）としての面が強かったが、近年は産業を意識した、より戦略的な取り組みが重視されている。研究開発項目そのものとしては、リスク評価手法およびリスク管理手法の確立に関する科学的再現性の担保や医学的な評価、リスク評価結果の知識基盤整備、社会への情報提供とコミュニケーションを行う仕組みの構築が求められている。また、それらの活用システムが重要となる。多くの国では国家計画レベルでのナノテク政策の役割を、将来の産業の要となる新市場の創出と雇用拡大と位置づけており、安全性評価・管理は社会の懸念を払拭し安寧を担保するための公共福祉政策の面があった。これが近年、欧米ではナノテクからもたらされる利益を確実に社会へ還元するために、ナノ安全性の国際標準を図り、自国利益を戦略的に最大化することが企図されている。以下に概略を述べるが、より詳細な内容については第三章の記載を参照されたい。

欧米では、ナノテク安全性評価を通商政策において戦略的に利用する方針を掲げていると見られる。このような動きは、欧州化学品規制 REACH（化学物質の登録、評価、認可及び制限に関する規則、欧州化学品規制）や RoHS 指令（特定有害物質使用制限）を発展させたものと考えられ、各国の化学物質の登録制度の中でナノ材料の規制に関する事例が増えてきている。2014 年ごろまでは、規制対象を明確にするために「ナノ材料」の定義の議論が先行した。これは、製造・輸入・販売される材料を「ナノ材料」として判断する基準を定めるもので、2010 年に ISO（国際標準化機構）ナノテクノロジーの技術委員会（TC229）で策定された規定をベースとしている。これに加えて、EU 独自の定義、ISO/TC229 に基づいた米国の考察など、各国、地域で独自の解釈を定める傾向にある。欧州委員会は 2011 年に、ナノを「粒子（1 つ以上の次元の外寸が 1nm から 100nm の粒子が、個数として 50% 以上あるもの）を、遊離した状態あるいは凝集体として含むような、天然の材料、付随してできた材料、製造された材料である。」とする定義を示した。さらに、ナノ材料の定義を踏まえ、具体的な法規制の動きも出てきている。例えば、フランスでは、2013 年から製造、輸入、流通量、用途を毎年申告することが義務化され、既に最初の結果が報告された。ベルギーでは、2016 年から登録制度を施行している。また、REACH でもナノ材料の取り扱いについての議論が活発化している。EU では、全てのナノ材料は REACH に見合うものでなければならないとしている。

米国では、TSCA（Toxic Substances Control Act）で、ナノ材料に対して、PMN（新規物質の製造前届出）を課したり、SNUR（重要新規用途ルール）を制定したりする運用を行なっている。ここでは、ナノ材料を新規物質として扱うかどうかは、分子アイデンティティ（化学的な構造）に依拠することを原則としつつ、特にカーボンナノチューブ（CNT）については、ケースバイケースながらも、異なる製造業者やプロセスで製造されたものは異なる CNT であると思なすとされている。2015 年には TSCA SNUR として基準となる

ナノ材料評価項目を製造と流通の許認可基準とする案が示された。国連の GHS（化学品の分類および表示に関する世界調和システム）においても、ナノ材料への適用可能性の議論が開始された。

OECD WPMN（ナノ材料作業部会）で 2007 年より実施されてきた工業ナノ材料の試験プログラム（スポンサーシッププログラム）は、ほぼ終了している。このプログラムは、13 種のナノ材料を対象として、各国がスポンサーとなり、それぞれの材料の基本情報、物理化学特性、環境動態、環境生物への毒性、ほ乳類への毒性、安全性といった情報を取得するもので、日本は、単層 CNT、多層 CNT、C₆₀ の主スポンサーである。試験結果は、ドシエと呼ばれる報告書とその要約としてまとめられており、2016 年夏時点で 11 ナノ材料のドシエと、そのうち 4 ナノ材料の要約が公開されている。

わが国でも、ナノ材料のリスクや社会受容に関する研究・検討が行われてきた。2005 年度には、科学技術振興調整費「ナノテクノロジーの社会需要促進に関する調査研究」において、経済産業省、文部科学省、環境省、厚生労働省傘下の研究機関の連携により、幅広い分野にわたる検討が行われ、政策提言という形の報告書が出された。また、2007 年度から 2010 年度まで、内閣府の連携施策群「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」が省庁連携施策の枠組みで実施された。ナノ材料のヒト健康影響に関する厚生労働科学研究は 2003 年度に開始され、現在まで複数の研究班により研究が進められている。2015 年に厚生労働省労働基準局の「化学物質のリスク評価検討会（有害性評価小検討会）」は、複層カーボンナノチューブ（MWCNT-7）について日本バイオアッセイ研究センターが行ったラットによる 2 年間吸入曝露試験と遺伝毒性試験の結果を検討し、発がん性及び遺伝毒性ありと認め、労働安全衛生法に基づいた指針の策定と検討会によるリスク評価を行うべきであると結論している。また、NEDO により、ナノ材料の試料調製・計測技術開発およびリスク評価の実施を目的とした「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」が、2006 年から 2011 年まで実施された。引き続き、「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／ナノ材料の安全・安心確保のための国際先導的安全性評価技術の開発」および「低炭素化社会を実現するナノ炭素実用化プロジェクト／ナノ炭素材料の応用基盤技術開発」で研究が進められた。

米国 NNI2014 や欧州 Nanosafety Cluster は産業と規制組織の協調による新産業基盤の育成を提案するなど戦略的に官民の連携を促している。OECD からナノに対する考え方の報告が発表されている。日本では、毒性学を含めた安全性研究の体制は欧米に比較して脆弱であり、特に材料研究との協力体制が不十分である。先進国と新興国が将来の発展の基礎として戦略的に位置付けるナノテクで競争優位性を維持するには、安全性研究の学術的基盤の整備が必要と考えられる。日本における安全性評価研究は、各省庁個別のプロジェクトで部分的に実施してきた状況であるが、行政的な活動では 2011 年に初期的な有害性および暴露調査が行われたのみで、リスク評価的な取り組みは殆ど行われていない。このような国内外の安全管理に対する行政的な取り組みの違いは、国内外での市場を想定したナノ材料・ナノ製品の開発およびその競争力に影響を及ぼすことが想定される。工業標準化についても、関連省庁間の調整機構が弱いために、規格や規制の戦略的な推進になかなか繋がらないのがわが国の現状である。特定機関、特定企業、特定個人による自発的な活動に頼っているところがあり、今後、公的機関、産業界、学会が一体となって、戦略的な仕組みを構築する必要がある。

ナノ材料のリスク評価に関する研究開発は、個々のナノ材料のリスクを明らかにするための研究と、効率的な評価枠組みを構築するための研究に大別されるようになってきた。我が国では、個々のナノ材料について、たとえば、複層カーボンナノチューブ MWNT-7 をがん原性指針に追加するなどの対応は行われているが、ナノ材料に対する全体的な規制が存在していないこともあり、効率的な評価枠組み検討の方向性が明確になっていない。一方、欧米各国の規制当局は、それぞれの国や地域の化学物質管理枠組みやナノ材料の産業化の状況を前提に、届け出の際に要求するデータ項目を決定するとともに、カテゴリー化等の考え方を構築しつつある。我が国のナノテク産業・ナノ材料産業が諸外国の規制により不利益を被らないためには、単に諸外国の規制制度の状況を踏まえるだけでなく、自国の産業の状況に即したリスク評価技術の研究開発を、産学官連携の体制により進める必要がある。

日本には、化学・物理、生物学、医学に加えて倫理、法律、経済、社会学、政策を含めた包括的教育を行う学術講座や分野が存在しない。米国毒性学会のように安全性を他の科学技術の基盤とすることを共通認識として醸成し、米国の University of West Virginia、University of Montana、University of Rochester のような材料安全性に関する学科の創設が望ましい。特に Rochester は世界最大の、毒性、安全性学の学部を持ち重要な研究者を多数輩出している。基礎科学の分野では世界的に優位である我が国ナノテクノロジー科学技術からのベネフィットを国民が享受するためにもナノテク応用製品の産業化戦略は重要である。しかし、材料産業としてみた場合は初期の市場規模が自動車などの最終製品と比べて非常に小さく安全性評価費用の捻出がビジネス合理性の喪失につながりかねない。一方で、ナノの安全性評価とその標準化を全面的に欧米に委ねることは、科学技術・政策的課題として欧米と対等に交渉する条件と手段を放棄することになる。安全性評価の基盤整備を行うことは必要であるが、特に人的リソースを考慮すると数年で質量ともに欧米の水準に達することは容易ではない。今後、ナノテクノロジーは総ての産業分野に重要な影響を及ぼすことは確実なので、欧米に対抗していくためにもナノテク材料の恩恵にあずかる産業及び社会全体へのベネフィットの観点から政策的検討が必要である。

2.2.2 今後の展望と日本の課題

2.2.2.1 ナノテクノロジー・材料の今後の方向性と挑戦課題

本節では、ナノテクノロジー・材料分野に対する社会的期待を背景に、現状の日本が抱える社会的課題の解決に向けて、ナノテクノロジー・材料技術がどのような役割を果たせるのか述べる。

■環境・エネルギー、社会インフラ

2011 年の福島第一原子力発電所事故により、安全性に不安を抱える原子力に、今後エネルギー供給の多くを望む事は難しい面がある。また一方では化石燃料のエネルギー供給に起因する地球温暖化の問題は深刻さを増している。このような状況にあつては、長期的には太陽光や風力などの再生可能エネルギーが重要な位置を占め、太陽光発電に対しては高効率太陽電池や次々世代蓄電池の開発が、また風力発電に対しては高強度軽量の複合材料の開発が必要となろう。短中期的にはコンバインドサイクル運転やより高温での燃焼運転などによる火力発電の徹底的な高効率化に期待せざるを得ない。高効率火力発電においては、燃焼温度の高温化を目指して、高温耐熱材料やコーティング材料の開発が重要である。

電気エネルギー生成量が気候条件に依存する再生可能エネルギーの利用が進んでくると、余剰に生まれたエネルギーを用いて水素を生成することが経済的に意味を持ってくる。また将来的には人工光合成技術により水から、水素、酸素を直接、高効率に生成することも夢でなくなってくるかもしれない。燃料電池の開発とあいまって、長期的には究極のクリーンエネルギーである水素燃料の利用が次第に進んでくると予想される。

一方でエネルギーの利用側面では、省エネルギーの技術開発、具体的には固体照明、低消費電力のエレクトロニクスシステム、高効率パワーエレクトロニクス製品、断熱材料、低摩擦材料、軽量・高強度の複合材料、さらには廃熱から電気エネルギーを生み出す熱電素子などの開発が必要となってくるだろう。これらの先端技術の導入を前提に我々の生活を見直し、ICT を駆使した省エネルギー型の生活様式に切り変えていくことが何にも増して重要となるだろう。

環境を守るという視点では各種環境センシングシステムの開発と、身の回りへの設置が必要である。世界に目を転じてみれば、飲料に用いることのできる水は限られており、海水からの飲料水生成、またシェールガス産出の際に大量に発生する放射性物質や毒性物質を含んだ汚染水の浄化は喫緊の課題であり、低コストで量産可能な吸着剤や浄化膜の開発は急務となっている。

以上、ここに挙げた環境やエネルギーに関わる社会的あるいは技術的な課題は、ある特定の学術領域や技術分野のみで解決する事は難しく、必然的に学際的なアプローチや複数の技術分野の連携が必要となっている。それら技術分野の中でも重要な位置を占めるナノテクノロジーや素材の研究開発でリードする日本への期待は大きく、上記のグローバルな課題に対し、積極的に役割を果たしていくべきと考える。

社会インフラの老朽化も日本が抱える大きな社会的課題の一つである。高度成長期に作られた橋梁、トンネル、道路等のインフラは建設から 50 年以上経過したものもあり、こ

れら老朽化したインフラの効率的な点検・検査、および計画的な補修や更新によるインフラの長寿命化が不可欠になっている。このような社会課題に対しても、ナノテクノロジー・材料技術の視点で研究開発を行うことが重要になっている。

社会インフラの効率的な点検・検査においては、センサシステムによる重要な箇所のモニタリングや、材料の環境における変化（構造変化、腐食など）をミクロなレベルで理解しモデル化して余寿命予測を行うことが重要になる。その際、構造物の内部を調べる小型の超音波センサ、表面の状態を調べる腐食センサなどが有用になる。また、構造物の材料そのものや接合界面の劣化や表面の腐食に関しては、放射光の利用などで原子やナノスケールでの現象を観測してそのメカニズムの理解を深め、モデル化およびそれを用いたシミュレーション手法を開発することで、劣化予測や余寿命予測に活用できる。

インフラの補修や更新においては、溶接・接合、接着、防食、塗装・コーティングなどが重要になるが、ここでもナノスケールで材料や表面、接合界面を制御することが必要である。例えば、古い鉄鋼材料のインフラに新しい鉄鋼材料を溶接で接続するような場合には、古い鉄鋼材料の組成や表面状態をよく知っておくことが不可欠であり、新しい鉄鋼材料との溶接条件を適切にしないと、大きな組成変化や構造欠陥の導入などに繋がる可能性がある。古い鉄鋼材料の評価技術、組成変化や応力変化なども考慮した溶接のシミュレーション技術などが必要になる。また、防食をおこなうにも、インフラの置かれた使用環境や構造材料の組成や劣化の程度を把握できれば、その状態に合わせて適切な材料やプロセスによる塗装・コーティング手法を適用することが可能になる。材料の分析技術、強固なコーティング技術、腐食のシミュレーション技術などが重要になってくる。

以上のような社会インフラの維持管理に関する技術は、今後必要性が高まる飛行機や自動車の軽量化にも密接に繋がる技術であり、特に鋼板、アルミ、マグネシウム、チタン、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）など多様な材料を組み合わせる使うマルチマテリアル化の流れの中で、ナノテクノロジー・材料技術の視点で技術開発を行っていくことが重要になる。

■ ライフ・ヘルスケア

ヒトゲノムの解読、iPS細胞の創出、ゲノム編集技術の登場に見られるように近年のライフサイエンスの進展は著しく、DNAやタンパク質、細胞などの生体由来物質を半導体チップ上に搭載し、精密な計測、正確な操作を行うことで、ライフサイエンスの膨大な知識の集積と最先端の半導体技術、電子・光技術との融合が可能となり、そこから生まれるイノベーションへの期待は大きい。

個々人にとっては、本格的な医療が必要になる前に、病気の兆候を検知し、早期に予防的な措置を施すことが望まれる。健康管理の観点からも、検体の採取が容易な呼吸などを対象としたセンシングデバイスや、身体異常の早期発見、早期診断には尿や血液などの体液に含まれる生体由来物質をより迅速かつ高感度に検出できるデバイスの開発が望まれる。その意味で、半導体チップにより、特定の疾患につながるバイオマーカーの高感度検出を実現する期待は高い。高感度検出が可能な半導体チップを身体に装着可能な超小型のウェアラブル機器に組み込むことで、日常的な健康診断が可能になり、予防医学の進展にもつながる。検出対象をウィルスなど病原体に拡大できれば、環境中の病原体を常時監視するシステムの構築が可能になり、感染症の流行防止に貢献できる。

医療の現場で活用されるには、検体の前処理、物質検出を一体化した集積化デバイスの開発が必要になる。最近では、微細加工技術によって形成されたマイクロ流路などの人工的なマイクロさらにはナノ構造体上に、DNA やエクソソーム、単一細胞、単一分子などを持ち込み、それらの検出や同定を通じて医療・診断応用に供しようとの研究も進んでおり、これらは半導体チップに新たな付加価値を提供するとの意味で、半導体ビジネスとしても大きなチャンスを生み出すであろう。

ナノ粒子を Drug Delivery System (DDS) の輸送物質として活用し、患部へ効率的に薬物を到達させ、医療を施そうとの研究も進展している。ナノ DDS は核酸医薬の実用化に不可欠であるとされ、体内動態や細胞内挙動を制御できるナノ粒子の材料設計に向けた研究開発が重要である。生体イメージングに必要な増感剤を治療薬とともに搭載したナノ DDS は、診断と治療の一体化を具現化するセラノスティクスとして臨床応用に進むことが期待される。また、光、超音波、中性子線等の物理エネルギーとナノ DDS の組み合わせは低侵襲治療を可能にする。

iPS 細胞の出現以来、個別化医療にもつながる創薬スクリーニングや再生医療への期待が高まっているが、iPS 細胞を所望の組織に分化誘導し、成長させていくには、それを実現させる足場材料が必要である。細胞と接する材料の力学的性状や微細な形状などが、細胞の増殖や分化に影響を及ぼすことが明らかになっており、細胞の培養・加工技術に新たな方法を提供するものと期待される。複雑な構造と機能をもった細胞の 3 次元集合体の形成技術は、再生医療だけでなく創薬にも大きな意味をもつものであり、そこで必要とされる材料やデバイスに関する研究開発が必要になる。ここでも生命科学とナノテクノロジー・材料の融合が求められており、これを診断、医療、創薬の革新に結び付けていく事はこの分野の重要な挑戦課題である。

現在使用されている医用材料においても、患者の QOL の観点から改善が必要なものは多い。医用材料の用途に応じた高い生体適合性をもつ材料の開発やナノテクノロジーを活用した加工技術の開発も継続していく必要がある。

■情報通信・エレクトロニクス

ポストムーア（ポストスケーリング）時代の到来で、従来とは異なる視点、発想でエレクトロニクスの可能性を論ずることが必要になっている。その中心となるのが、今後の情報社会の中核となる IoT (Internet of Things) と AI 関連の技術であり、最近では人工知能・ディープラーニングや量子コンピュータ技術、ロボット基盤技術、センサ技術などの進展が著しい。我々の身の回りに大量に配置される IoT においては、大量のデータを高速かつ低エネルギーで処理することが求められる。これを実現するのがナノエレクトロニクス技術であり、半導体チップの超低消費電力化のみならず、情報を蓄積するスピントロニクス技術、情報を伝送するワイヤレスやフォトリソ技術、さらには MEMS 技術に基づく各種センサデバイスや有機エレクトロニクスを基盤としたディスプレイ技術などの集積化、システム化が必要となる。

IoT/AI 時代のスマート社会を実現するうえで、ナノエレクトロニクスの果たすべき役割は大きく、素子の微細化極限の追及（ナノの先鋭化）から、新材料導入による光・スピン・バイオ・MEMS との結合による多機能化（ナノの融合化）、さらには高精細ディスプレイやウェアラブル情報端末、IoT 応用（ナノのシステム化）へと進化していくと予想される。

この中でナノエレクトロニクス技術が果たす重要な役割の例として2点述べておく。

一つは、ナノスケール熱制御の重要性である。ナノスケールの領域で重要な役割を果たしているのは、電子、スピン、フォトン（光子）、フォノンといった量子力学的な物理量である。電子、スピン、フォトンは様々な物理現象で主役を演ずるため、理論的取扱い、あるいは計測、シミュレーション技術などの研究が精力的に進められてきた。一方、ナノスケールの熱現象と関係するフォノンは、広範な物理現象に関与するが、どちらかという下支え的な役割のため、その理論的、あるいは計測上の統一的な取扱いは遅れている。デバイス応用に目を転じてみれば、微細CMOSデバイスに見られるように、チャンネル中を走行する電子が発生する熱により、デバイス性能は大きく制約を受ける。デバイス構造上も多くの異種材料が半導体の微細構造中に持ち込まれ、フォノンの複雑な伝搬を誘起し、局所的に高い温度のホットスポットが形成される危険性もある。このように、ナノスケールでの熱（フォノン）の制御は今後応用上、ますます重要になってくると思われ、電子、スピン、フォトンに、フォノンも含めた総合的なナノスケール構造体の設計手法の確立が求められている。

もう一つは、最先端製造技術によりシステムLSIに搭載される回路規模が増大を続け、その情報処理能力が向上するに従い生じているデータの入出力ボトルネックの解消技術である。より高いデータ転送帯域を実現する3次元集積化技術として、多層化されたSi半導体チップの内部を垂直に貫通する電極により入出力を実現しようとするTSV(Through-Si Via)技術や磁界結合によりチップ間の入出力を図ろうとする近接場電磁界結合方式が注目されている。従来技術に比べて通信電力を1/1000にできることも示され、これらの技術をシステムLSIとメモリ間のチップ通信に用いることで、入出力ボトルネックの解消が可能になり、コンピュータの低電力化と高性能化につながると期待される。

■物質と機能の設計・制御

2016年度より開始された第5期科学技術基本計画において、ナノテクノロジー・材料技術は「新たな価値創出のコアとなる強みを有する技術」と位置づけられている。その中でも「元素戦略」や「分子技術」、「空間空隙制御技術」などの物質と機能の設計・制御に関わる基本概念は、幅広い社会・産業ニーズに応える物質・材料開発にブレークスルーを起こし、破壊的イノベーションにも繋がる源泉ともいえる。化学、物理、材料科学などの既存の学問領域が単独で取り組むのではなく、異分野の力を結集することが不可欠である。そのためには、学問領域の縦割りの風潮を取り払い、国主導で異分野融合・連携を強く促進する仕組みが必要である。近年、ようやく新学術領域や戦略的創造研究推進事業などの大型プロジェクト内では少しずつ融合・連携が進みつつある。しかし、産学連携についてはまだ不十分な状況であり、内閣府、文部科学省、経済産業省を中心にナノテクノロジー・材料分野全体の融合・連携を強力に後押しすることが必要である。また、それに合わせて、将来世界的なリーダーとなるべきマルチディシプリナリーな人材を育成することも重要な課題である。

近年の情報通信技術の進展によりナノテクノロジー・材料技術に関する研究開発の方法が大きく変わりつつある。その背景には、デバイスの性能、信頼性追及の中で、それを支える材料はより一層、複合化、多元素化の方向に進むと同時に必要な機能を自然界に豊富

に存在する元素の組合せで実現することが求められている状況がある。対象となる物質の組合せは膨大であり、従来の実験的あるいは理論的手法による材料探索、材料開発は困難になりつつある。一方で、ここ数年の間にコンピュータの飛躍的な能力と情報技術の進展により、ビッグデータと呼ぶにふさわしい大規模な材料データの中から、材料の性能、機能に関する系統的な法則を発見し、材料の開発を短時間で効率的に行うアプローチが世界中で精力的に行われるようになってきている。これを推し進めるためには、膨大な材料データを整理、検索し、新たな知識を発見する最先端の情報技術、さらにはそれらを新材料の開発につなげる研究者集団、それぞれの存在が必要である。マテリアルズ・インフォマティクスと呼ぶこのような取り組みは、日本の産業競争力の源泉である材料開発力の維持・強化のために必須であるとの考えから、2015年に物質・材料研究機構（NIMS）内に情報統合型物質・材料研究拠点が設立された。今後、これを積極的に活用し、また府省連携、産学連携をより活性化させて国全体として一体感を持って取り組むことが望まれる。

■ナノテクノロジー・材料分野における挑戦課題の例

以上、2.2.2.2節で述べてきたことから浮き上がってくる、ナノテクノロジー・材料分野における代表的な挑戦課題につき述べる。

(1) 分離技術

化学プロセス分離工程の省エネ化、環境汚染物質除去、来たる水素社会に向けたガス分離・吸蔵、鉱物資源分離、医療など広範な分野における分離・吸着機能材料・システムの研究開発が鍵となる。近年の新材料・ナノ構造制御技術や、計測・シミュレーションの進展を最大限活用し、実現へ向かって分離技術の研究開発を行う必要がある。

(2) 生体／人工物間相互作用・制御バイオ材料・デバイス

生体内における材料と生体分子、細胞の間に働くナノレベルの相互作用を可視化・解析する。半導体チップ、マイクロ流路上に細胞、タンパク質、DNAを搭載し、分子レベルの相互作用の制御や診断・創薬スクリーニングに応用する。日本が蓄積してきた先端半導体微細加工技術やイメージング技術を新規バイオ材料・デバイスの開発に繋げ、ヘルスケア領域のニーズに対応していくことが重要である。

(3) ナノ動力学制御によるスーパー複合材料開発

マクロな機械的応力に対するナノサイズの分子集合体の挙動に関する新しい知見を積み上げ、新たな学術基盤を構築する。それを基に、ソフトマテリアルの応力集中現象、破断・自己修復現象、レオロジー、機能性分子の力学挙動などナノ領域の力学挙動の研究開発に展開することで、ポストCFRPとなるスーパー複合材料を生み出す。

(4) IoT/AI チップ革新

IoT/AI時代に求められるセンシング、次世代コンピューティング（ニューロ、量子）、ネットワーク等の機能を、半導体チップを核とする電子システムで実現する。そして、安全・安心な環境の実現、健康管理・介護医療・自動運転などの新サービスへの展開へと発展させる。ムーアの法則に従う素子の微細化が困難になる中、新しい動作原理のデバイスやコンピューティング・アーキテクチャ、さらには実装技術の革新が鍵となる。

(5) ナノ-IT-バイオ-メカ統合マニファクチャリング

生物が低エネルギーで実現している構造や機能、プロセス・駆動機構に学び、人工的に再構築する。3Dプリンティングなどを使ったバイオ・インスパイアード技術や、小型・

軽量・高出力の自律・協調動作ロボットを実現する。生物機構のモデリング技術や人との共存を可能にするソフト材料による筐体、AIチップによる認識・判断などが必要となる

(6) 量子系の統合設計・制御技術

電子、光子、スピンに加え、熱の起源「フォノン」を量子力学的に統合した統合制御技術を構築する。ICTの進歩に伴い避けられなくなってきた発熱問題を熱の起源から制御することが必要である。また、トポロジカル物質の登場で、電子・スピン・フォノンの新たな量子状態の出現が可能となっている。これらの量子状態を人為的に制御する技術や新物質の開発で、量子コンピュータやスピントロニクスなどへの応用展開が期待される。

(7) オペランド計測

物質から生物にわたる広範囲の対象に対し、先端計測技術を用いたオペランド（実動作下）観測を適用し、解析することによって、新物質の探索・創製、電池・触媒・デバイス等の開発、生命現象の解明につなげる。

(8) データ駆動型新材料設計（マテリアルズ・インフォマティクス）

発見から実用化まで30年かかるとされる材料開発のコストと時間を短縮するためには、データ科学を徹底活用した新材料探索・設計アプローチが必要である。より複雑化・多元化する高機能材料への期待を、データ科学、人工知能（AI）、機械学習と材料科学が連携した新アプローチによって克服することが求められている。



図 2-50 ナノテク・材料分野の研究開発 10 のグランドチャレンジ

■ナノテクノロジー・材料への社会的期待に答える研究開発の方向性

以上、2章でみてきたように、ナノテクノロジー・材料に期待される役割は大まかに、「社会の持続性に関わる課題の解決」、「安全・安心で質の高い生活の実現」、「日本の産業競争力強化」の3点にまとめることができよう。以下、各々における研究開発の方向性につき述べていく。

(1) 社会の持続性に関わる課題の解決

これは特に老朽化が進む社会インフラ上の課題、深刻化する一方の温暖化問題、地球上に局在する希少金属や元素の工業用途による消費問題、さらには世界的スケールで見れば有害物質による大気汚染、水質汚染などの環境汚染問題などを挙げる事ができる。これら社会の持続性に関わる課題は、解決に向けて関与するステークホルダーの広がり大きく、行政上、倫理上、あるいは社会的利害上の課題、地域性の課題等、解決への道は複雑である。ナノテクノロジー・材料分野が提供できる解決策は限定的だが、行うべき研究の方向は明確である。課題解決に向けた全体像の中で、ナノテクノロジー・材料の果たすべき役割を明確にしていくと共に、ナノテクノロジー・材料の最先端研究の動向や成果を上記ステークホルダーに積極的に発信し、情報共有、連携を図っていくことが重要となる。このために、社会的課題に直接、アプローチする統合的な研究プロジェクトを設定し、その中で要求されるナノテクノロジー・材料からの貢献を他と連携しながら進めていく事も必要になると考える。

上述の状況下でも、とりわけ、環境エネルギー分野では、温暖化問題を抑制し、クリーンなエネルギーを実現していく太陽電池、蓄電池、燃料電池、熱電変換素子、人工光合成、水や大気のクリーン化を実現する分離膜等々、ナノテクノロジーをベースとする新素材のイノベーションへの期待は極めて大きい。ダイナミックに変化する社会的要請の中で、個々の研究の目標がどのような位置づけになるのかを意識し、研究の重点化を図っていく事が重要であろう。

(2) 安全・安心で質の高い生活の実現

IoTが我々の身の回りに配置され、安全で安心、快適な生活環境が提供されようとしていることは本章で繰り返し述べてきた。AIも含め、ICTの驚異的な進歩が我々に質の高い生活を提供しようとしている。今後、このような進展をベースに多様なサービスが市場に登場してくると想像される。自由闊達な市場競争が生み出す将来の社会像は想像を超えるが、一方でこれらの進展をもたらしている源泉は驚異的な進歩を見せるコンピューティング機能である。半導体の微細化を牽引してきたムーアの法則が崩れようとしている現在、コンピューティングのアーキテクチャと実装技術が今後、極めて重要になってくると予想される。アーキテクチャ、材料・デバイス技術、実装技術の3者が絡み合っただけでなく、今後のコンピューティングの進歩を支える。そのような視点でのプロジェクト運営が今後、重要になってくる。

健康・医療の分野も高齢化が進む社会では、アルツハイマー等の脳疾患、高齢化で顕在化するガン疾患、腎疾患等、社会的に大きな負担を強いられる疾患の様子がかつてとは変わりつつある。一方で、ライフサイエンスの進展は著しく、医学上の重要な発見や技術が次々と生まれ、新たなバイオマーカーやエクソソームなどの新規生体物質の発見が続いている。この分野では現場の医療診断と並んで基礎科学の重要性は言うまでもない。DNAから細胞、臓器に至るまでミクロなスケールの観測・評価・操作技術を提供し、

また iPS 細胞などの分化、細胞増殖を制御し、人工細胞、臓器の合成を可能にするとの意味で、ナノテクノロジー・材料分野は生命科学の進歩にとって切り離せない存在となっている。これらは早期の診断・治療、患者の負担を軽減する非侵襲の計測、人工物質による再生医療を可能にし、患者の QoL（Quality of Life）を高めるうえで重要な役割を果たす。この分野でも生命科学、あるいはバイオテクノロジーとナノテクノロジーとが一体になった研究開発が望まれる。

(3) 日本の産業競争力強化

経済活動のグローバル化が進み、産業構造がグローバルなバリューチェーンを構成する中、産業競争力を日本だけの視点で排他的に論じても無意味となっている。ここでは日本で開発される技術が重要な部品を構成し、世界へ競争力のある製品として提供されることを念頭に議論を進める。ナノテクノロジー・材料がカバーする技術領域の中で、電子部品や半導体などのナノエレクトロニクス、電池などのエネルギー部品、各種センサ、機械部品、化学製品、素材などは、日本の産業競争力の源泉となっている。ここでの課題は部素材、デバイスレベルの競争力を如何に付加価値の高いシステムレベルの競争力につなげていくか、基礎研究レベルの成果を如何に素早く試作品、さらには競争力のある応用製品に結び付けていくかにある。このためには、産官学で連携したオープンイノベーションの研究体制が重要な役割を果たすと期待される。この体制の運営には、知財戦略、標準化戦略、国際化戦略、異分野の研究者／技術者の結集、各参加機関の持つ技術の結集等が必要であり、高度の経営能力、マネジメント能力が要求される。最終的には産業界が中心となり、利益を生み出す構造にしていく事が必要だが、初期段階では運営体制の構築、基盤技術の構築等のため、国によるトリガー資金の注入も必要になるだろう。

図 2-51 は IoT/AI チップの革新を目指す次世代半導体のオープンイノベーション研究開発体制に関するひとつの想定図で、大学・国研で構成されるデバイス・材料要素技術の開発・評価を行うコンソーシアムとしてのナノテクノロジー・プラットフォーム（ナノテク PF）、新材料、新デバイス、新アーキテクチャに関するアイデアをチップレベルで具現化する次世代半導体ハード・ソフト融合システム化プラットフォーム（次世代半導体 PF）、試作チップの量産化を図る国内外の産業界による量産化ラインからなる。ナノテク PF は全国 26 の大学・国研が保有する最先端設備と研究支援能力を産官学の利用者に対し提供する文科省のプログラムであり、微細加工、微細構造解析、分子・物質合成の技術領域をカバーする。平成 24 年度から活動を開始し、最近では、産業界の利用も急激に増え、実績を高めつつある。ナノテク PF は次世代半導体 PF からの新材料開発、新材料やデバイスの構造評価に関する要請に答え、逆に次世代半導体 PF はナノテク PF からの要素技術のシステム化、高度化、市場化の要請に答えていく。次世代半導体 PF では新しいアイデアが詰まった半導体チップの試作を行い、そこで生まれた回路設計に関する IP はその場に IP バンクとして蓄積され、再利用を可能とする。次世代半導体 PF では、EDA ツールを整備し、新デバイス、新アーキテクチャによる回路設計を可能にする。またチップ試作に必要な標準プロセスで不足している部分があれば、産業界の製造ラインが活用できるよう、相互乗り入れの体制を構築し、チップ試作のスループロセスが提供できるようにする。スループロセスとしては現状、日本で可能な 45nm の微細プロセスが想定されようが、より微細なプロセスが必要な時には、次

オープンイノベーション研究開発体制のエコシステム (IoT/AIチップ革新に向けた研究開発プラットフォーム例)

“連携、共同開発、技術移転”

産業界 (Industry) → **国内量産** (Domestic Mass Production) → **海外量産** (Overseas Mass Production) → **量産化製造ライン** (Mass Production Manufacturing Line)

海外連携R&D機関 (Overseas Collaborative R&D Institution) → **連携** (Collaboration) → **回路設計プラットフォーム** (Circuit Design Platform)

アカデミア “JST、NEDOの関連PJで活用” (Academia “Utilized in related projects of JST, NEDO”) → **利用** (Utilization) → **回路設計プラットフォーム**

回路設計プラットフォーム (Circuit Design Platform) includes: **ファブ拠点A**, **ファブ拠点B**, **ファブ拠点C**, and **回路設計プラットフォーム**.

“マーケットへの試作品提供、” (Provision of prototypes to the market)

“開発を通じ独自IP蓄積、IPバンク構築” (Accumulation of independent IP and IP bank construction through development)

次世代半導体ハード・ソフト融合システム化プラットフォーム (Next-generation semiconductor hardware-software fusion systematization platform)

“新材料・デバイス、新アーキ・ソフト実証” (New materials, devices, new architecture-software validation)

“集積化システムの評価、要素技術の提供” (Evaluation of systematized systems and provision of element technologies)

“要素技術のシステム化、高度化、市場化” (Systematization, high-levelization, and marketization of element technologies)

ex. ナノテクノロジープラットフォーム (e.g., Nanotechnology Platform) includes: **微細加工** (Microfabrication), **物質合成** (Material synthesis), and **構造解析** (Structural analysis).

デバイス・材料開発・評価コンソーシアム “要素技術開発” (Device, material development and evaluation consortium “Element technology development”)

産業界 (Industry) and **大学・国研** (University and National Institute) are involved in the ecosystem.

- ◆ 基礎研究レベルの成果が市場化までつながるエコシステムを形成
- ◆ 成果が蓄積され、再利用できるR&Dの循環システムの構築

“新材料・デバイス、新アーキ・ソフトのアイデアをチップで具現化、回路設計IPを資産化する場”

図 2-51 オープンイノベーション研究開発体制のエコシステム