

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くらいの長さである。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。人間の目で観察できる巨視的な世界では、全く異質でつなぎようの無い人工物と自然物（生体など）であっても、ナノの世界に入ると共通の原子が見え、類似の分子が確認できるようになる。つまり、人工物と生体との融合はナノの視点をもってはじめて可能であり、事実、バイオナノテクノロジーという融合分野が開拓されている。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、原子や低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・加工プロセスであり、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。最近の成果では、超LSIの世界で、ブロックコポリマーを使って自己組織化で低誘電率 (low-k) 材料を形成した例がある。これとトップダウン・ナノ加工である光リソグラフィが組み合わせられ、高速伝送が可能な多層配線層が形成される。このように二つのプロセスの融合も重要である。

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。また、バイオの世界では、細胞は様々な「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、これらが通常に見え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、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、エネルギー・環境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。プラスチックを中心とした高分子物質や有機 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、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考えられる。

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、環境・エネルギー、健康・医療、情報通信・エレクトロニクス、ものづくりなどの広範な応用分野に対し、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・材料に対する社会的期待は大きい。ナノテクノロジー・材料がこれらの社会的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技術的な挑戦課題」で述べる。

■環境・エネルギー

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。同時にシェールガスの掘削手法が水質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、解決すべき課題も多く、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、ドイツ、オーストリア、イタリア、スイスは国レベルで脱原発を決定し、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、2014 年になっても稼働には至っていない。これまで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もはや不可能になっている。国際原子力機構 (IAEA) は、2050 年時点の世界の総発電量に占める原子力発電の割合が 2011 年の半分以下の 5.0% まで低下するとの予測をまとめている (2012 年 9 月)。

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、関連して生物多様性の保全というグローバルな課題も間近に控え、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、これまで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。今後、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要求されており、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提示していく必要がある。

■健康・医療

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、長寿化・少子化によって加速された高齢化社会にとって切実なグローバル課題であることは言うまでもない。現在、日本は世界の先頭をきって高齢化社会へ突入しようとしている。2013 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、これが 22 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る。これに伴い、国民医療費が増大し、2008 年に国民医療費が 35 兆円、その内、後期高齢者医療費が 11 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」）。

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の適正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に即した個別化医療、診断と治療の一体化など、医療介入の効果をより高めていくための研究開発が進められているが、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。今後発展が期待される再生医療では、材料としての細胞を治療目的に応じて培養・加工する技術の確立が求められている。

■情報通信・エレクトロニクス、ものづくり

情報通信の世界では、コンピューティングシステムの高性能化とネットワークの大容量化が進みつつあり、ビッグデータを収集、蓄積し、高速に処理することで、個人個人に必要な情報を、必要なタイミングで提供することが可能な時代に入りつつある。特にこれまでは人と人との通信が主であったが、我々の身の回りの機器や物に通信機能が埋め込まれ、人と物、さらには物どうしが情報を交換しあい、大量のデジタル情報が無線を介して飛び交いあう、いわゆる IoT (Internet of Things) の世界が到来すると予想される。IoT の世界を実現するためには、各種センサーデバイスや無線機能を搭載した超小型のチップや、いたる所でチップへの電力供給を可能とするエネルギーハーベスト技術が必要となってくる。センサーデバイスは我々の身の回りの環境をモニターし、また身体を健康をモニターすることで、健康で快適な生活を実現する、また周囲の異常を早期に検知し、情報が提供されることで、防犯、防災に適用され、安全、安心な社会を実現することが期待されている。

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期待が高まっている。最近のコンピュータの能力向上は、シミュレーション技術の可能性をも大きく広げており、上記のデータ科学技術手法の進展と相まって、新材料や新プロセス、さらには新しい設計手法の導入を可能とし、ものづくり技術の革新につながっていくと期待される。

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、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・材料へと適用されることで、デバイス・部素材が開発され、最終的に環境、エネルギー、健康・医療、社会インフラ、情報通信・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 2.1 に示す。



図 2.1

近年になってナノテクノロジーの進展と同期してナノスケールの科学が構築されてきた。そこでは物質科学、情報科学、生命科学、光科学、数理科学におけるナノスケールの現象に関係した知識体系が組み合わさってナノサイエンスが構築されている。

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設計・制御があり、そこに分子技術や、界面・空間制御、インフォマティクス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。これらの共通基盤は、物質・材料に具体的に適用されていくものである。物質・材料のレイヤーは、ナノテクノロジー・材料分野における基本的な物質・材料群（基盤領域と表記する）と、新たに登場してきたナノテクノロジー特有の複合化や階層化、あるいは機能化した物質・材料群（新興・融合領域と表記する）とから構成される。

これら物質・材料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、多様な部

素材・デバイスを応用目的に応じて、エネルギー・環境分野、健康・医療分野、社会インフラ分野、情報通信・エレクトロニクス分野に分類、配置している。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している。社会インフラとしては、我々の生活のライフラインである水、電力、交通、通信を想定しているが、これらは当然、エネルギー分野、情報通信分野とも重なってくる。ここではシステムとしてのウエイトの高いものを社会インフラ分野に分類している。

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、市場あるいは社会が受容できるかの判断がなされる。そこを通過することで、初めて社会実装がなされ、地球規模の課題解決、国際的な産業競争力、我々の生活の質の向上といった目的を果たすことになる。

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、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。

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、41 の領域を抽出した（図 2.2）。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。

主要な研究開発領域（3章に詳細動向を掲載）			
俯瞰区分	研究開発領域	俯瞰区分	研究開発領域
環境・エネルギー	太陽電池	設計、制御	界面制御
	人工光合成		空間・空隙構造制御
	燃料電池		分子技術
	熱電変換		バイオミメティクス
	蓄電デバイス		分子ロボティクス
	パワー半導体		元素戦略・希少元素代替技術
	グリーン触媒		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）
健康・医療	生体材料（バイオマテリアル）	共通基盤／科学技術	加工、プロセス
	再生医療用材料		トップダウン型プロセス（半導体超微細加工）
	ナノ薬物送達システム（ナノDDS）		ボトムアップ型プロセス
	バイオ計測・診断デバイス		走査型プローブ顕微鏡（SPM）
	バイオイメーシング		電子顕微鏡
	生体イメーシング		放射光・X線・粒子線
	構造材料（金属系）		超高速時間分解分光
社会インフラ	構造材料（複合材料）	計測	物質・材料シミュレーション
	水処理用分離膜		ナノテクノロジーのリスク評価・リスク管理・リスクコミュニケーションと社会受容
	高温超伝導送電		
	センシングデバイス・システム		
	放射性物質の除染・減容化など基盤的技術		
俯瞰区分	研究開発領域	グローバル、国内の社会的期待や研究開発動向等を踏まえ、3章の研究開発領域として41領域を選定	
ICT・エレクトロニクス	超低消費電力ナノエレクトロニクス		
	二次元原子薄膜（グラフェンなど）		
	スピントロニクス		
	フォトリソ		
	有機エレクトロニクス		
	MEMS/NEMS		
	異種機能三次元集積チップ		

図 2.2

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る。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(ホンドーフジシマ効果)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として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。その生産量は年毎に急激な上昇を続けており、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だが、その一種である IGZO（In-Ga-Zn-O）を半導体材料として用い、2004年に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実証した。現在スマートフォンをはじめとした製品にディスプレイとして組み込まれ始めている。

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おり、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 2.3 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。

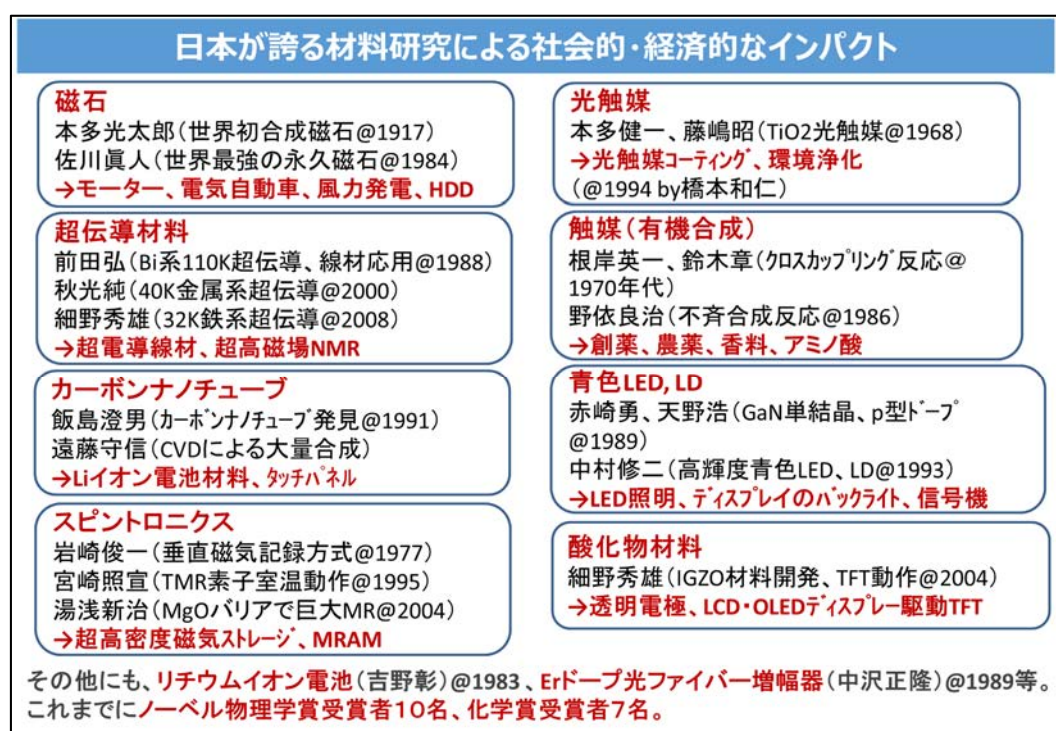


図 2.3

希土類元素や希少金属のように埋蔵量が少なく産出国が限定される元素が、日本の産業にとって重要な電子部品、触媒材料、構造材料、磁性材料の性能や機能、コストを決定するキー材料になっているケースが多い。2006年、中国が資源保護計画を発表したこともあり、これらの材料の使用量削減、代替を進める必要性が、クローズアップされ、緊急の課題になった。翌2007年には、省庁間で本格的に連携する初めての共同プロジェクトとして文部科学省の「元素戦略プロジェクト〈産学官連携型〉」と、経済産業省の「希少金属代替材料開発プロジェクト」がスタートした。その後、2012年には「元素戦略プロジェクト〈研究拠点形成型〉」という大型プロジェクトを新たに開始している。

これ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。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。最近、大規模に構築されつつある材料のデータベースをより充実させ、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可能とし、材料科学に革新をもたらすマテリアルズ・インフォマティクスと呼ばれる効率的な新物質探索・材料設計の新しい手法確立の動きが欧米で盛んになっている。米国ではマテリアル・ゲノム・イニシアチブという国家プロジェクトが打ち立てられ、年間100億円規模の資金が投じられている。これらの動向に対する日本の戦略的な取組みが早急に必要になっている。

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が、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ベース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 年のバーディーン、ブラッティン、ショックレー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ファインマン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。

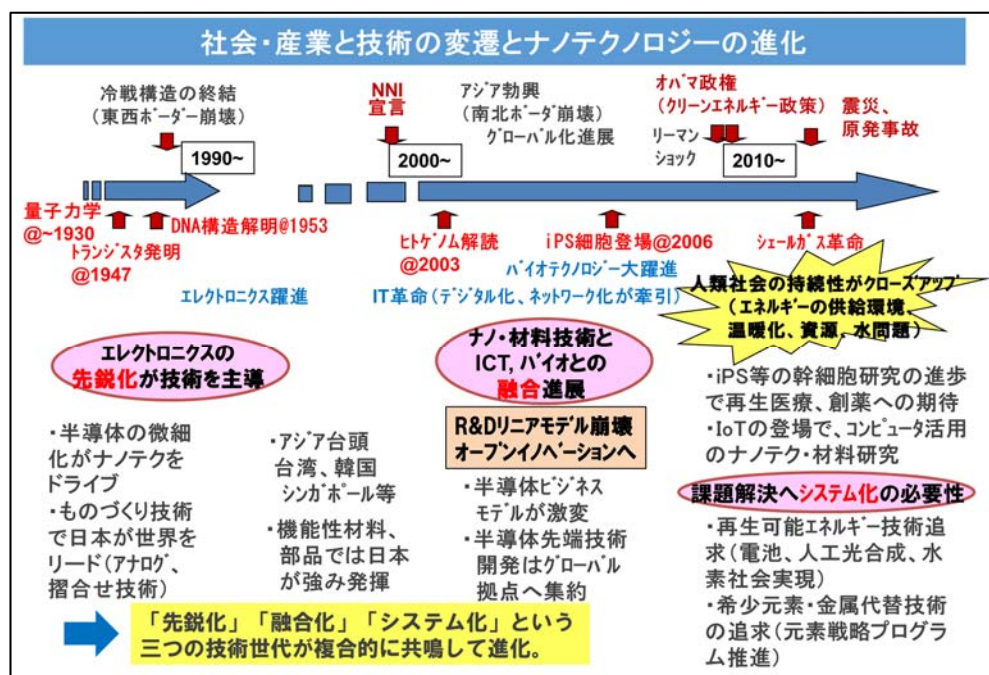


図 2.4

図 2.4 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) と呼ばれる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、記憶ビット領域の微細化、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で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、カーボンナノチューブや 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 宣言につながっている。

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 年余を要したが、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し、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。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が、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、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 SiO₂ 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くる。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。「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持つに至る過程と結果を含む概念である。ナノエレクトロニクスの領域では、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システムへの期待が高まっている。これにより、小型の人工頭脳を持ったロボット、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。とりわけ、ヒトゲノムの解読、iPS細胞の登場に見られるように近年の生命科学の進展は著しく、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。これらをさらに発展させるためには、それぞれについてここで述べた「ナノのシステム化」が価値創出の最終ステージとして位置づけられる。

図2.5には、例として米国で実施されているナノのシステム化を実践するプロジェクトを示す。



図 2.5

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年以降の10年間、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2.6に、世界主要国の2011年以降のナノテクノロジー・材料に関する国家計画をまとめた。

主要国の国家戦略	
国	ナノテクおよび材料の基本政策
日本	◆第4期基本計画では共通基盤として位置づけ／特化したイニシアチブは無かったが、イノベーション総合戦略（2014）において新たに横断領域として位置づけ。2015年以降の扱いが鍵
米国	◆National Nanotechnology Initiative（2001-） -第4期新戦略プラン（2014-）。省庁横断テーマとして5つの重点領域「シグニチャーイニシアチブ」を設定
	◆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
EC	◆Horizon 2020（2014-） -産業課題の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、先進製造が選定
独	◆Nano Initiative - Action Plan 2015（2005-）2010年に更新（2期目） -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-） -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-） -製造業の復興においてナノエレ、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」、重大科学計画4分野の一つに「ナノ研究」 -第12次5か年計画の戦略的新興産業の一つに「新素材」
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）」 ◆ナノテクノロジー総合発展計画（2001-）2011年から3期目（ナノ融合2020） -研究開発、教育・人材育成、インフラ整備の3つの柱。

図 2.6

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、イランも同様のナノテクノロジー国家計画を策定しており、現在は数十か国に達している。

LuxReserch社によるナノテクノロジーへの国家投資額の推移を示す（図2.7）。投資額の単純な比較は、各国のナノテクノロジーの定義やデータ集計法が異なるので避けるべきであるが、おおよその状況把握には好適である。ちなみに、日本は内閣府が公表しているナノテクノロジー・材料分野の科学技術予算が計上されており、ナノテクノロジー単体で予算が公表・計上されている他の国と事情が異なることに留意が必要である。

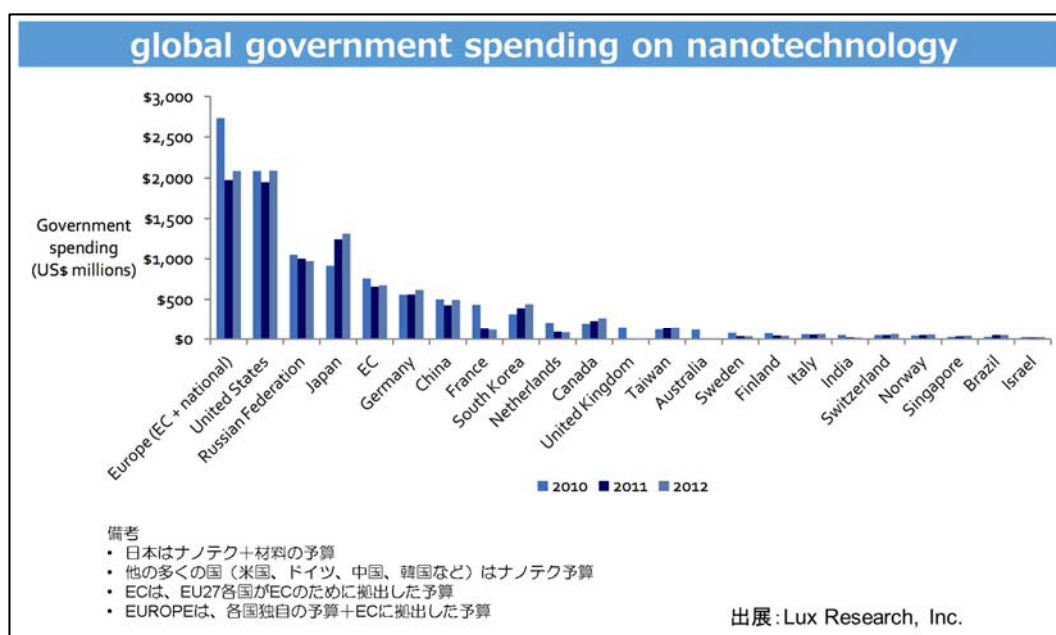


図 2.7

これによると米国、欧州（EC と各国予算の総和）が約 20 億ドルで肩を並べており、ロシア、日本、ドイツ、中国が 5 億ドルから 10 億ドルの間に並んでいる。

米国 NSF の調べによれば、2000 年における世界のナノテクノロジーへの総投資額（民間投資を含む）は約 \$1.2B（～1000 億円）、それが 2010 年には約 \$18B（～1 兆 5000 億円）に達していて、年平均成長率は 31% と非常に高い。日本はナノテクノロジー・材料分野への国家投資は民間投資のおよそ 1/10 と他国と比較しても小さい事が特徴であり、将来への技術シーズの創出が先細りになる危険性をはらんでいる。

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 年に入ってから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走らせていた。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（1981～1986 年）と他 10 件以上のプロジェクト、そして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）（1992～2002 年、260 億円／10 年）がある。これらは、いずれも、日本政府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。

日本では上記のような経緯があったため、米国 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。内閣府に総合科学技術会議が設置されて以後、第2期科学技術基本計画（2001～2005年度）と第3期科学技術基本計画（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分野の一つになり、ライフサイエンス、情報通信、環境とともに、10年にわたって優先的な資源配分を受けた。

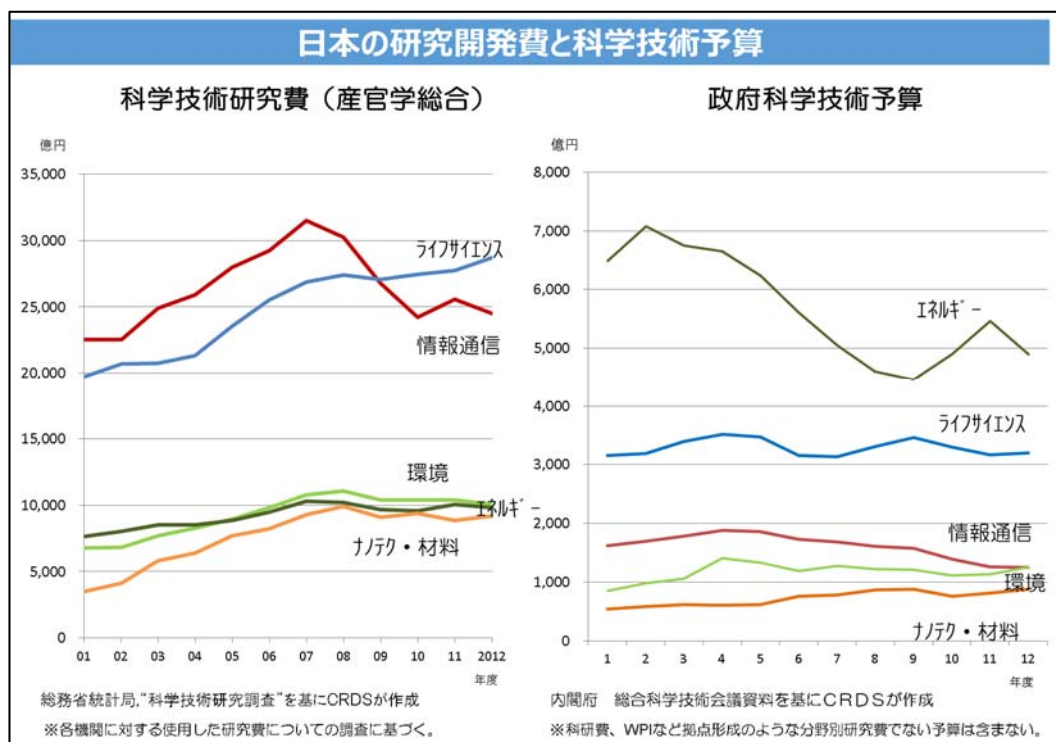


図 2.8

これら重点4分野が政策課題対応型の研究開発として重点化されていたにもかかわらず、分野別推進戦略が強調されて、政策も分野ごとに独立に立案される弊害があった（科学技術・学術審議会基本計画特別委員会中間報告／2009年12月25日）。このような縦割りを解消するための総合調整を図る機能が、行政システムとして十分に働かなかったという指摘がある。これにより、それぞれの分野別推進戦略が総合戦略化されず、このことが、第3期科学技術基本計画の3つの理念、6つの大目標という政策目標を達成する上で支障をきたした可能性が高い。特に本来の「ナノテクノロジー・材料」は、ライフサイエンス、情報通信、環境など、他の分野を横串的に横断する融合分野となることを期待されており、戦略遂行上の影響は大きかった。

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」に重要な研究開発課題を設定し推進し、主な成果・取組として、下記のものが挙げられている¹。

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

- ・ 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

分野推進戦略の縦割りという弊害にもかかわらず、日本は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ている。

第4期基本計画（2011-2015年度）においては、第3期の反省に立って、科学技術の重点領域型（ボトムアップ型）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た。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ている。このことは領域の横断的な性格から考えれば妥当な位置づけであり、第3期の反省の上に立った改善になっている。しかしながら、このような横断領域は、第4期基本計画においては独立した戦略イニシアチブとして設定されなかった。そのため、日本の第4期基本計画においては、横断的な基盤科学技術が三つの戦略政策課題ごとに個別に貼り付けられることによって過去10年にわたってイニシアチブとして形成されてきた学術・技術分野のネットワークが分断されたおそれがある。このことは、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ともなった。各政策課題と、それらを解決する技術分野群とをマトリックスとしてどうバランスよく結合させ、ネットワークを維持しつつ全体を推進していくのか、関係部署での協調と調整が必須である。

その後、日本再興戦略にともなって閣議決定された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。第5期科学技術基本計画においても、科学技術政策体系における位置付けを明確にした上で一層の強化を図ることが求められる。

産官学独それぞれのレベルでこれまでの連携ネットワークを維持発展させる自主努力が必要であり、それがイノベーションを加速する原動力になると考えられる。

■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、日本の研究開発プログラム・プロジェクトのうち主なものを俯瞰しておく。表にはCRDSが把握するナノテクノロジー・材料分野に関連するプロジェクトを抜粋している。各表では、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環境・エネルギーなどの分野分類を付している（複数の分野にまたがるものもあえて主な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2.9のような研究開発プログラムを実施している。3～5年で世界のトップを目指した先端的研究を推進するという目的で、平成21年より、「最先端研究開発支援プログラム（FIRST）」を実施した。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趣旨で「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～）			最先端研究開発支援プログラム（FIRST）（平成21～25年度）		
環境・エネルギー	革新的燃焼技術	杉山（トヨタ自動車）	環境・エネルギー	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	木本（京大）
	次世代パワーエレクトロニクス	大森（三菱電機）		低炭素社会に資する有機系太陽電池の開発	瀬川（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）	健康・医療	高性能蓄電デバイス創製に向けた革新的基盤研究	水野（東大）
	革新的構造材料	岸（ISMA）		再生医療産業化に向けたシステムインテグレーション・臓器ファクトリーの創生	岡野（女子医大）
物質・材料、共通基盤	革新的設計生産技術	佐々木（日立製作所）		ナノバイオテクノロジーが先導する診断・治療イノベーション	片岡（東大）
革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）（平成26年度～）				1分子解析技術を基盤とした革新ナノバイオデバイスの開発研究	川合（阪大）
健康・医療	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）		スーパー有機ELデバイスとその革新的材料への挑戦	安達（九大）
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）		フォトニクス・エレクトロニクス融合システム基盤技術開発	荒川（東大）
情報通信・エレクトロニクス	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）	情報通信・エレクトロニクス	マイクロシステム融合研究開発	江刺（東北大）
	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（NII）		省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発	大野（東北大）
物質・材料、共通基盤	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）		世界最速プラスチック光ファイバーと高精度・大画面ディスプレイのためのフォトニクスポリマーが築くFace-to-Faceコミュニケーション産業の創出	小池（慶應大）
	超薄膜化・強靱化「しなやかなタフポリマー」の実現	伊藤（東大）		グリーン・ナノエレクトロニクスのコア技術開発	横山（産総研）
	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）		量子情報処理プロジェクト	山本（NII）
	イノベーション可視化技術による新成長産業の創出	八木（キャノン）		強相関量子科学	十倉（理研）
			物質・材料、共通基盤	原子分解能・ホログラフィー電子顕微鏡の開発とその応用	長我部（日立）
				新超電導および関連機能物質の探索と産業用超電導線材の応用	細野（東工大）

図 2.9

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 2.10)。先端的な融合領域において、企業との連携により、新産業の創出等の大きな社会・経済的インパクトのある成果 (イノベーション) 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、高いレベルの研究者を中核とし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。そして、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 (「ビジョン」) 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ため、平成 25 年度から「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～)	
健康・医療	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	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)
	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	健康・医療	物質-細胞統合システム拠点 (iCeMS)
	若者と共存共栄する持続可能な健康長寿社会を目指す～Sustainable Life Care, Ageless Society COI拠点～	健康・医療	トランスフォーメティブ生命分子研究所 (ITbM)
	人間力活性化によるスーパー日本人の育成と産業競争力増進/豊かな社会の構築	物質・材料、共通基盤	国際ナノアーキテクニクス研究拠点 (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～安全・安心で地球と共存できる数世紀社会の実現～	物質・材料、共通基盤	東北大学原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR)
	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	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～)	
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	健康・医療	再生医療本格化のための最先端技術融合拠点
物質・材料、共通基盤	オンデマンド・ライフ&ワークを全世代が享受できるSmart社会を支える世界最先端ICT創出COI拠点	健康・医療	ナノ量子情報エレクトロニクス連携研究拠点
	共進化社会システム創成拠点	情報通信・エレクトロニクス	フォトニクス先端融合研究拠点
	コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点	情報通信・エレクトロニクス	マイクロシステム融合研究開発拠点
		情報通信・エレクトロニクス	光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点

図 2.10

その他、文部科学省、経済産業省では、特に国が支援すべきものとして、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 2.11)。

日本の主な研究開発プログラム ※ナノテク・材料関連を抜粋	
※主にAP 対象施策から抜粋	
文部科学省	
● 元素戦略プロジェクト (研究拠点形成型) ➢ 電子材料 ➢ 磁性材料 ➢ 電池・触媒材料 ➢ 構造材料 ● 東北発素材技術先導プロジェクト ● ナノテクノロジーを活用した環境技術開発 ● ナノテクノロジープラットフォーム ● 光・量子融合連携研究開発プログラム ● 最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム	
経済産業省	
● 革新的触媒による化学品製造プロセス技術開発 ● 次世代パワーエレクトロニクス技術開発プロジェクト ● 次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発 ● 希少金属代替材料開発プロジェクト ● 革新的新構造材料等技術開発プロジェクト ● 次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト ● ナノ炭素材料実用化プロジェクト	

図 2.11

JST の戦略的創造研究推進事業は、科学技術イノベーションにつながる新技術シーズを創出するもので、「CREST」はインパクトの大きなイノベーションシーズを創出するためのチ

ーム型研究を推進し、「ERATO」は新しい科学技術の源流の創出を目的として、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構築するものである。

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															
H18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
■ ナノ科学を基盤とした革新的製造技術の創成 研究総括: 堀池 靖浩 (物質・材料研究機構)															
■ ナノ界面技術の基盤構築 研究総括: 新海 征治 (京城大学)															
■ 次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究 研究総括: 渡辺 久恒 (EUVL基盤開発)															
■ プロセスインテグレーションによる機能発現ナノシステムの創製 研究総括: 菅根 純一 (物質・材料研究機構)															
■ プロセスインテグレーションに向けた高機能ナノ構造体の創出 研究総括: 入江 正浩 (立教大学)															
■ 先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開 研究総括: 伊藤 正 (大阪大学)															
■ 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: 笠木 伸英 (科学技術振興機構)															
■ 新機能創出を目指した分子技術の構築 研究総括: 山本 尚 (シカゴ大学・中部大学)															
■ 超空間制御(空間空隙構造制御)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)															
■ 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)															

図 2.12

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											
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
■ 中嶋ナノクラスター集積制御 研究総括: 中嶋 敦 (慶應大学)											
■ 彌田超集積材料 研究総括: 彌田 智一 (東京工業大学)											
■ 香取創造時空間 研究総括: 香取 秀俊 (理化学研究所)											
■ 竹内バイオ融合 研究総括: 竹内 昌治 (東京大学)											
■ 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)											
■ 安達分子エキシントン工学 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)											
■ スピン量子整流 研究総括: 齊藤 英治 (東北大学)											

図 2.13

JST では、戦略創造事業以外にもイノベーションの創出に向け、特色のあるプログラムを推進している (図 2.14)。「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。

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
革新的医療を実現するためのバイオ機能材料の創製		ヒト生体イメージングを目指した革新的バイオフォトニクス技術の構築
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
スピントロニクス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	縦型BC-MOSFET による三次元集積工学と応用展開	遠藤(東北大)
超伝導システム	PSD法によるフレキシブル窒化物半導体デバイスの開発	藤岡(東大)
蓄電デバイス	ダイヤモンド電極の物質科学と応用展開	栄長(慶應大)
耐熱材料・鉄鋼リサイクル高性能材料	エレクトロニクス物質科学と応用展開	細野(東工大)
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	フォトリソグラフィ結晶レーザーの高輝度・高出力化	野田(京大)
革新的省・創エネルギーシステム・デバイス	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)
	PCPN空間による分子制御科学と応用展開	北川進(京大)

図 2.14

日本が国として、推し進めている以上のプログラム・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、センサーデバイス (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。

●蓄電池

現行リチウムイオン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、理論的に設計・製造できる基盤技術体系を構築することが目標になっている。

NEDO・RISING (革新型電池先端 科学基礎研究事業) では、京都大学に中核的研究拠点を置き、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行い、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。このような国内のほぼ全てのアカデミア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、原理的に高耐压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ある。

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-nano）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地域を越えた連携が図られ、SiC デバイスおよび GaN デバイスの研究開発が行われている。

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（Ga₂O₃）、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と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年～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～）がある。

平成26年度には、NIMS に構造材料研究拠点が発足し、その中で、構造材料つくばオープンプラザ（TOPAS）が産学官連携のプラットフォームとなるべく活動を開始した。

炭素繊維複合材料 (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 構造ヘルスマニタリング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～) がある。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。

構造材料全般を扱うプログラムとして、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～) は、自動車をはじめ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の開発を行う。本プロジェクトの推進のために、「新構造材料技術研究組合」(ISMA) が設立され、鋼材、アルミニウム、チタン、マグネシウムの材料・プロセス・接合技術開発に関して 19 企業、1 独法が加入している。CFRP に関しては、名古屋大学をはじめ 1 大学、17 企業が加入し、量産車の超軽量化のための熱可塑性 CFRP (CFRTP) の開発を行っている。

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」では、耐熱合金、金属間化合物等がセラミックスコーティング、航空機用樹脂、繊維強化プラスチック (FRP) とともに研究開発項目として挙げられている。この中では全 26 採択課題のうち、2 拠点を含む 8 課題が耐熱合金・金属間化合物等領域に属し、航空機エンジン用部材としてニッケル基合金、チタン合金、チタンアルミの加工技術開発などが行われる予定である。また、1 拠点を含む 6 課題が航空機用樹脂・FRP 領域に属し、航空機エンジンファンケース・ブレード向け CFRTP、航空機機体構造用の脱オートクレーブ成形技術、大型部材成形技術などが行われる予定である。

●元素戦略

2007 年に開始した元素戦略 (文部科学省) と希少金属代替材料開発 (経済産業省) との連携施策が継続している。2012 年度には、文部科学省の元素戦略「研究拠点形成型」プログラムが 10 年事業として発足し、経済産業省の関連プロジェクト (未来開拓) との間で、両省のガバニング・ボードが設置されている (図 2.15)。

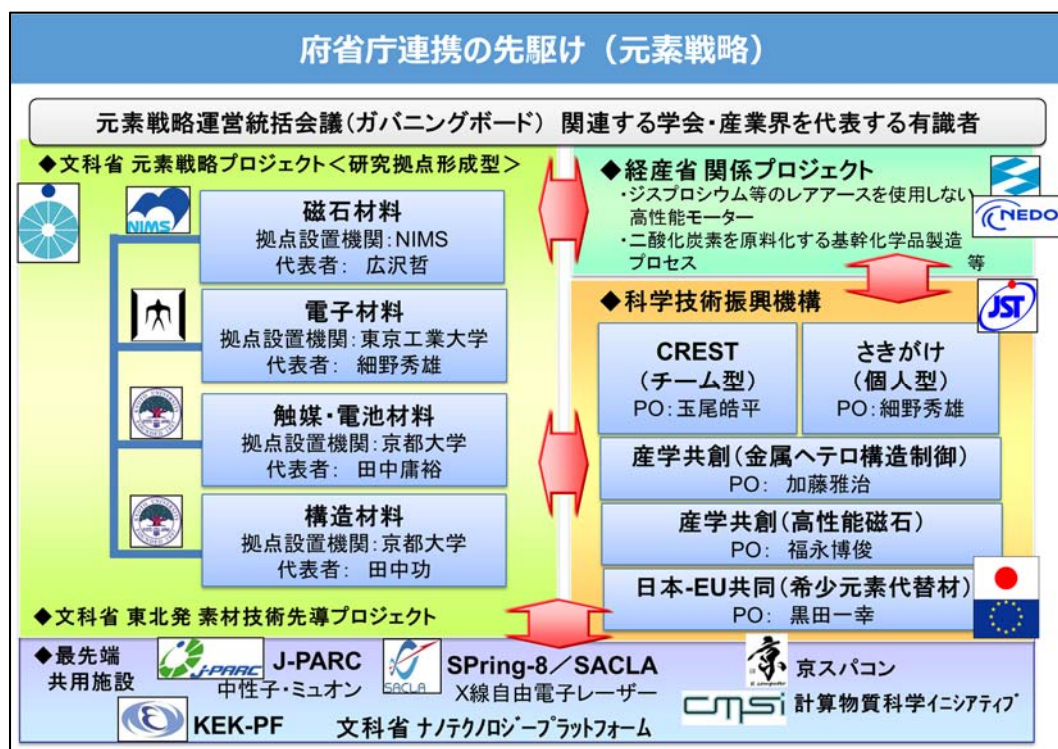


図 2.15

(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チブであり、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、2014 年度から第 5 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産業への技術移転支援、③教育、将来の熟練労働力の確保、インフラ整備、④EHS・ELSI 対策、である。

NNI の 2015 年度予算は約 15 億ドル（要求額／26 省庁・部局）である（図 2.16）。連邦政府の総投資額は 120 億ドル（約 1 兆円）に達している。とくに、グリーン・ニューディールでエネルギー関係に大きな予算が組まれた 2010、2011 年度においては、NNI の予算は 17 億 5000 万ドル前後の予算レベルになっている。

² 【参考文献】

◇ NSTC NSET “NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE STRATEGIC PLAN” February 2014
 ◇ OSTP “THE NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE Supplement to the President’s 2015 Budget”
 ◇ PCAST “REPORT TO THE PRESIDENT AND CONGRESS ON THE FIFTH ASSESSMENT OF THE NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE”

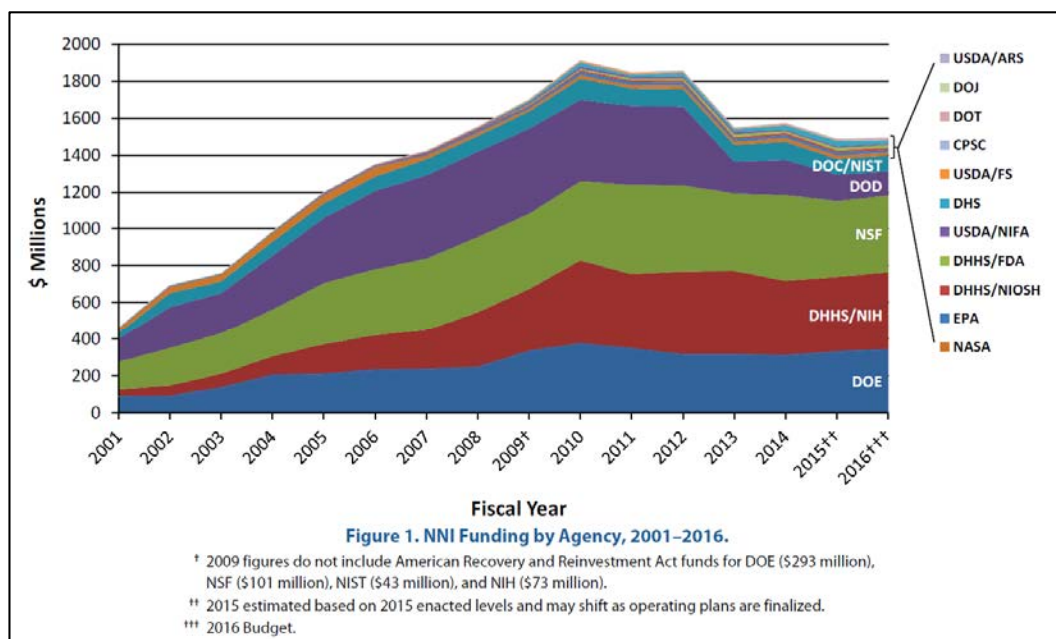


図 2. 16

NNI の投資はプログラム構成エリア（Program Component Areas）への戦略的な配分比率に従って実施されてきた。10 年単位で見た NNI の戦略面での変化は、従来 7 項目であった PCA（Program Component Area）の中で EHS（環境、健康、安全）を独立させて 8 項目にしたことである（2009 年度）。ナノテクノロジー産業の成長を確信して社会受容を加速するため安全性評価に重点を置くとする国の意思のあらわれである。なお、2014 年度からの NNI 戦略プランでは、PCA は図 2.17 のように定められている。この新しい PCA による管理は 2015 年度からおこなうとしている。

Table 2: Program Component Areas Defined for Fiscal Year 2015**1. Nanotechnology Signature Initiatives (NSIs)**

Nanotechnology for Solar Energy Collection and Conversion

Sustainable Nanomanufacturing

Nanoelectronics for 2020 and Beyond

Nanotechnology Knowledge Infrastructure (NKI)

Nanotechnology for Sensors and Sensors for Nanotechnology

2. Foundational Research**3. Nanotechnology-Enabled Applications, Devices, and Systems****4. Research Infrastructure and Instrumentation****5. Environment, Health, and Safety**

図 2.17

NSI (Nanotechnology Signature Initiative) は、大統領補佐官ジョン・ホルドレンから 2009 年 8 月に NSTC (National Science and Technology Council) 責任者に宛てた「ナノテクノロジー、バイオテクノロジー、情報テクノロジーにおける NSTC の重点項目」と題する覚書をベースに構築され、その後改定が加えられて、現在、以下の 5 つの戦略にまとめられている。(1) 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 (将来のエネルギー問題解決に貢献する)、(2) 持続可能なナノ製造 (将来の産業を創る)、(3) 2020 年以降のナノエレクトロニクス、(4) ナノテクノロジー知識インフラ (NKI) (工業ナノ材料の持続的設計でリーダーシップを執る)、(5) センサ用ナノテクノロジーおよびナノテクノロジー用センサ (健康、安全、環境を改善し保護する)。5 つの NSI は、特に省庁を横断して取り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。

NNI 開始後、80 の研究センター、共用施設 NNIN (14 拠点/NSF) および NCN (ナノテクノロジー計算機ネットワーク) が充実して、連携、融合、教育などの活動、あるいは新たな国家プロジェクトに有益に利用されている。その典型例は、SRC (Semiconductor Research Corporation) と NSF の共同プロジェクト NRI (Nanoelectronics Research Initiative) である。2020 年にゴールを置いて 35 大学、21 州が参加している。今後のナノテクノロジーセンターは、2007 年に開所した CNSI (California NanoSystems Institute) に象徴されるシステム化に向かうが、2012 年時点で、新たなナノシステムセンター 3 箇所の設置が予算的に認められている。

NNI の開始以来、PCAST (大統領科学技術諮問委員会) により 3 年に 1 回の評価が行わ

れ、報告書が発行されている。NNI 第5次評価報告書(2014年10月)によれば、ナノテクノロジー・コミュニティが重要な転換期にあると結論。NNI2.0へ移行するために、要素ベースのナノテクノロジーをナノシステムに発展させる、これまでの科学的な成果を産業化に結び付けることを目的とした活動を加速するよう勧告している。これは米国だけの問題ではなく、各国が抱える課題である。

NSIを具体的なものに結び付けるためのグランドチャレンジを設定することが提言されており、グランドチャレンジの例示として以下のようなテーマを掲げている。

- 1) Nano-enabled Desalination to solve the emerging Water Crisis.
- 2) Reducing Greenhouse Gas Emissions with Nano-enabled Solid State Refrigeration
- 3) Creating New Forefront of Manufacturing through Nano 3D Printing
- 4) Development of Nanoscale Therapeutic for at least major Cancer Type by 2030

同時に NNI では、2021 年からの第三期 (nano3) を見据えた活動 (コンセプト作り) を進めている。nano3 については、2012 年に行った、NBIC2 (Nano-Bio- Info-Cognitive Technologies) の一連の国際ワークショップ開催とそれらをベースにまとめた「Convergence of Knowledge, Technologies and Society」の報告書が基本になっている。nano1 (～2010) では主にナノテクノロジーの要素技術の開発、nano2 (2011～) では要素技術を融合・統合してシステム化が進められる。これらの結果、新たなシステム・プラットフォーム (基本ツール、人間、地球、社会) が形成され、その後に様々な領域の成果を出していく (Divergence) としている。このようなナノテクノロジーの進化と社会との関わりを整理して、長期的に国としてナノテクノロジー全体の進むべき方向性を示している。

・ 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・ホルドレンから提案された (2011 年 6 月)、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 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、しかも低コスト化することを目的とし、そのための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 100 百万ドルが手当てされ、これまでに 250 百万ドル以上、2014 年度は 5 つの省庁で 150 百万ドル以上の投資が計画されている。

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。

³ 【参考文献】

◇ “Materials Genome 10 Initiative (MGI) STRATEGIC PLAN”

◇ “FACT SHEET: The Materials Genome Initiative – Three Years of Progress”

本イニシアチブの下、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、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、大学、国立研究所、学術出版社のコンソーシアムが、データアクセスを促進し、共有することを目標に全国データサービス (NDS) の一部として材料データファシリティのパイロットプロジェクトを設立する意向を発表している。

■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 つのイニシアチブ（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、これらのイニシアチ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、

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）

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。本イニシアチブでは、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)

・半導体・ナノエレクトロニクス

NRI(ナノエレクトロニクス研究イニシアチブ) が中心になって研究開発を推進している。従来は NRI 主導で 4 つの地域の大学で、トンネルデバイス、スピンドバイス、グラフェンなどのテーマに対して集中的な研究を行っていたが、2013 年に更新され、3 つの NRI 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) になった。ここで STARnet が米国 DARPA と協力して運営されることは注目に値する。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く。また、新デバイスのコンセプトは新たな材料が基盤となるとしている。

さらに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 Prof. Ajayan, at Rice Univ.) を 10 億円規模で推進中である。CVD による MoS_2 原子膜の SiO_2/Si 基板上への直接成膜やグラフェン/h-BN/グラフェンナノキャパシタの製膜・解析など、二次元原子薄膜ヘテロ接合構造体の製膜とデバイス応用で世界を先導している。

(3) EU27

■基本政策

欧州では、2000 年以降、EU のフレームワークプログラム (FP6、FP7) の中でナノテクノロジーを重要戦略と位置付けて具体的な計画を実行してきた。特に EU 第 7 次欧州研究開発フレームワークプログラム (FP7: 2007~2013 年) においては、ナノ科学から新生産技術にいたるまで、FP6 (2001~2006 年) の 2 倍近い年間予算 5 億ユーロが 7 年間投入されている。欧州のナノテクノロジー戦略の目標には、(1) 計画と戦略投資/EU 諸国横断で産学共働、(2) イノベーションと大中小企業の競争力強化のための知財、規制緩和、標準化、(3)

新しいナノ科学教育とナノテクノロジートレーニング、(4) EHS など社会受容に向けて情報共有、リスク評価、官民の信頼関係確立、が主に挙げられていて、これらは「EU ナノテクノロジー政策（2004年5月）」、「ナノ粒子の健康および環境への影響に関する欧州ナノテクノロジー研究開発（2008年1月）」などの報告書で述べられている。ただし、日米と比較して欧州の弱点は、産業界のナノテクノロジーへの投資が公的投資に追いついていないことである。産業界からは、環境リスクを重視するあまり研究基盤開発に後れをとるのではないかとの不安も指摘されている。一方、ナノテクノロジー分野についての欧州外との国際協働プログラムには多くの予算を充当し、多様な戦略が実施されている。

この方向性は、FP7 の次の Horizon2020 においても引き継がれている。Horizon2020 は経済成長と科学技術・イノベーションの強化を目指して、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く（図 2.18）。この中では、次の 3 つの優先領域が設定されている。

- ① Excellent science : 240 億ユーロ（～30 億ユーロ@2014）
- ② Industrial leadership : 170 億ユーロ（～18 億ユーロ@2014）
- ③ Societal challenges : 300 億ユーロ（～28 億ユーロ@2014）



図 2.18

①に関しては、FP7 の終盤に開始されたグラフェ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。

図 2.19,20 は、INC10 (International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation) の場において、Dirk Beernaert 氏 (European Commission DG CONNECT - Adviser for Interdisciplinary and Integrating Activities) が “Reinforcing the competitiveness of Europe” というタイトルで講演したものであり、これらの技術が社会的課題解決に向けて協調して利用される必要があること、またすべての技術がナノテクノロジーに大きく関連していることを述べている。



図 2.19

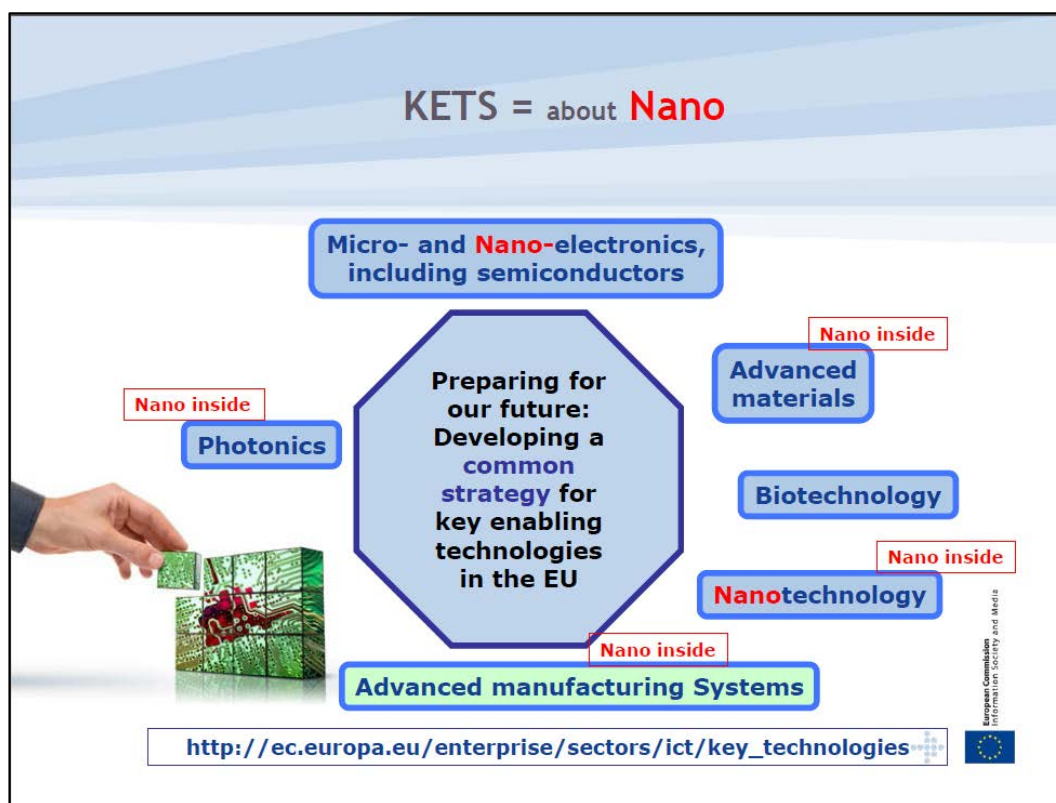


図 2. 20

Horizon2020 の中の優先的なプログラムの一つとして Electronic Components and Systems for European Leadership (ECSEL) が総額 50 億ユーロの予算（EU：12 億ユーロ、各国：12 億ユーロ、企業：24 億ユーロのマッチングファンド）で進められる。コネクティビティが世界を変えていき、全てのものがどこでも「スマート」化していくと考えており、Smart mobility、Smart society、Smart energy、Smart health、Smart manufacturing を主要な応用として位置づけている。このプログラム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ている。

ナノテクノロジー関係の業種の異なる業界団体が集まって「NANO futures Initiative」というコンソーシアム（メンバー数：約 700）を作っている。ここでは、テクノロジーロードマップの作成が進められている。社会の問題から出発して、アプリケーションや製品レベル、KET、具体的な技術を検討していくものである。

EU は、社会受容への関心は米国と同様に高く、リスク評価と管理の研究に 2007～2008 年の 2 年間で 5000 万ユーロを投入したが、これはナノテクノロジーへの全投資額の 5%に相当している。

■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

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に対し、多額の資金を提供する取り組み。

- 最初の 2 年半は FP 7 のルールの下で運営され、その後は Horizon2020 (H2020) のルールの下で運営予定
- 予算は 10 年間で 10 億ユーロ (2013 年 10 月発足、約 1300 億円、74 研究機関、17 カ国参加) を予定。EU が 50% を拠出、残り 50% を参加機関、国や地域が負担
- 最初の 2 年半は EU からの 5400 万ユーロの予算で行う。そのうち 900 万は今後参加する新メンバー (グループ) のためにプールされ、残りの 4500 万は、既存の 74 機関 (17 カ国) に配分される
- 企業は、ノキアや ST マイクロエレクトロニクス、BASF、エアバスなどが参加している。
- 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、16 分野中 1 分野が beyond graphene を含む基礎科学、5 分野がデバイスに関連 (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) している。
 - － Materials, Health and Environment, Energy, Nanocomposites, Production
 - － Innovation, Dissemination, Management, Research Management, Alignment
- 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。

また、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~、104 億円、マンチェスター大)。さらに、Print Graphene Technology (2014~、43 億円、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「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 10 月から「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

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)

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。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、Nantes 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、Moselle 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 MTorres 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

2006 年 8 月に、ドイツ連邦政府の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）」が発表され、ドイツの科学・イノベーション政策における基本計画として推進されている(図 2.21)。

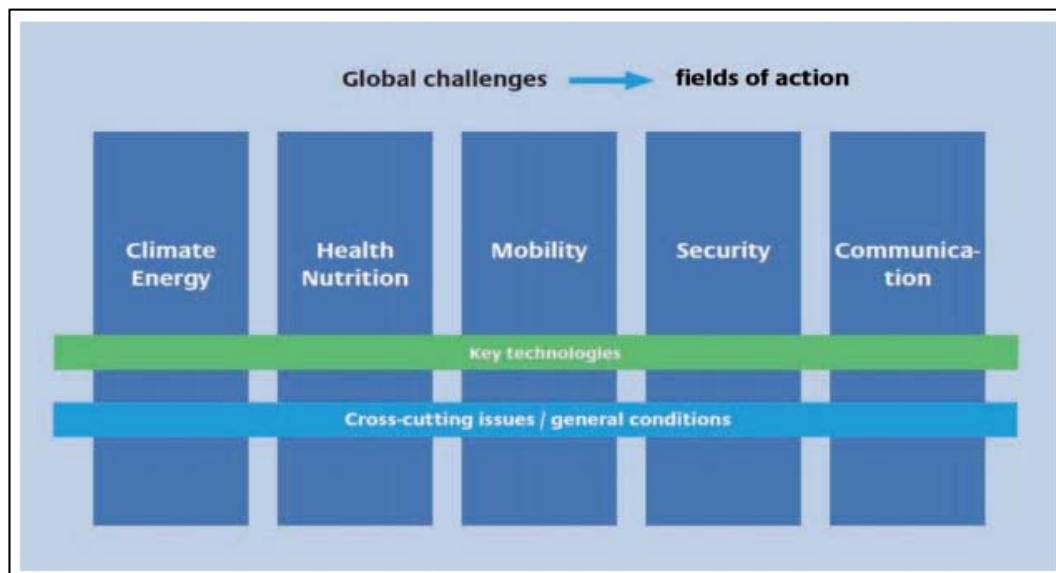


図 2.21

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

⁶ 【参考文献】 Nano De reports 2013

り、この一環として、省横断、「ナノテクノロジー行動計画 2015 (Action Plan Nanotechnology 2015)」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、環境、気候変動、エネルギー供給、資源、および健康、農業、食品、モビリティでのイノベーションを目指して、研究／教育／経済／政治が総合的にポテンシャルを上げるように協力すべきとしている。

連邦教育研究省 (BMBF) とともに、ナノテクノロジーの分野における五つのイノベーション連合を設置した。すなわち、有機発光ダイオード (OLED)、有機太陽光発電 (OPV)、カーボンナノチューブ (CNT)、分子イメージング及びリチウムイオン電池である。

NanoMobil (自動車)、NanoLux (光学)、NanoFab (電気電子)、Nano for Life (ライフ) などの BMBF プロジェクトが実施された。また、ナノテクノロジー分野の国際協力強化を図っていて、人材確保のため中国との具体的かつ最適の交流方法を探っている。

BMBF はナノテクノロジーの発展状況および国際社会におけるドイツの地位を継続的に観察するため、2009 年から 2 年毎にドイツにおけるナノテクノロジーの現状を調査している。書面によるアンケート調査の結果によれば、過去 2 年間ににおいてはナノテクノロジー研究活動の種類と方向性に関する大きな変化は見られない。今後 5 年から 10 年の間に特に医療／製薬、エレクトロニクスおよびエネルギー分野がナノテクノロジーの研究成果の恩恵を受けると予測している。ナノエレクトロニクス分野はアジア諸国と米国の主導的立場がはっきりしているが、エレクトロニクス分野においてもドイツが重要な役割を果たしているスピントロニクス、プリンタブルエレクトロニクスもしくはグラフェン研究のような部門も存在する。測定およびデバイス技術 (たとえば、ナノ解析装置、イオンビーム加工装置)、光学 (X 線光学、ダイオードレーザー、有機 EL) の各分野やナノマテリアルおよびナノコーティング部門は、ドイツは優位に立っていると評価している。ドイツのナノテクノロジー研究の高い水準と開発状況は今後も継続すると推測される。ドイツ以上に高く評価された国は米国だけである。上記評価の第三位には日本が位置し、それに続くのは 2011 年のアンケート時に比べ大幅に評価を高めた欧州の他の国およびアジアの新興工業国である。

(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。政府機関としては、BIS 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 (エマージングテクノロジー)・実現技術 (エネイブリングテクノロジー) 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、及びより広い世界の 4 セクションに分けていくつかの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は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させ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。

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）、それに応える形での科学技術会議（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」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。その中には、国立複合材料センターを設立するために 1600 万ポンドの政府投資がなされる旨も明記されている。同センターは 2011 年 11 月、ブリストルに正式に開所された。

また、Geim と Novoselov のノーベル物理学賞受賞（2010 年）を契機に、同じく BIS がグラフェン・グローバル研究技術拠点（Graphene Global Research and Technology Hub）を決定している。

（6）フランス

フランスは、2008 年、当時のヴァレリー・ペクレス高等教育・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 6 月に「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」）が定められている。同戦略は、4 年ごとに改定される予定である（CRDS-FY2012-FR-02 参照）。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、「France

Europe 2020」という基本戦略が策定された。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がっている。

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）中国⁷

中国の科学技術・イノベーション政策の基本方針は、2006 年に国务院から発表された「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、そして中長期計画の 2020 年までに 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ー「天河 2 号」（天津 2013 年 6 月にスパコンランキング TOP500 で 1 位を獲得。以来 4 年連続 1 位）、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。

中長期計画の中で、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现する先端技術 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。

⁷ 【参考文献】中国総合研究交流センター「中国の科学技術の現状と動向（平成 26 年度改訂版）」

工業・情報化部は2012年1月4日付で「新材料産業『第12次5ヵ年』発展規画」（「新材料産業“十二五”発展規画」）を通知した。同規画では、新材料の重大プロジェクトとして、レアアース及びレアメタル機能性材料、炭素繊維低コスト化・ハイエンドイノベーション実証、高強度軽合金材料、高性能鋼鉄材料、高性能膜材料、新型省エネ・環境保護建材実証応用、先進電池材料、電子情報機能性材料、生物医用材料、新材料イノベーション能力構築、をリストアップしている。

科学技術部は2012年8月21日、各省や自治区等の関係機関に対して「高性能膜材料科学技術発展『第12次5ヵ年』特別規画」（「高性能膜材料科技発展“十二五”專項規画」）を通知した。同規画は、高性能膜材料が高い効率の分離技術の核心材料であると位置付けたうえで、水資源やエネルギー、環境等の分野の重大問題を解決するための技術の1つになっていると指摘し、国民経済の発展や産業技術の進歩、国際競争力の強化を促進するためにもきわめて重要との考えを明らかにした。

科学技術部が2012年5月14日付で各省や自治区等の関係機関に通知した「ナノ研究国家重大科学研究計画『第12次5ヵ年』特別規画」（「ナノ研究国家重大科学研究計画“十二五”專項規画」）では、2010年に終了した「第11次5ヵ年」期にオリジナルな重要な成果が得られたことを明らかにした。それによると2010年末時点のSCI(Science Citation Index)論文発表件数は、中国がトップで、引用された件数も世界2位という。中国のナノテクノロジーに関する特許登録件数は世界2位となったとしている。

同規画によると、今後20～30年にナノテクノロジーが情報やエネルギー、環境保護、バイオ医学、製造、国防等の幅広い分野で応用されることが有望であるとしたうえで、ナノ材料や部品・システム、バイオ医学、測定特性評価等の分野で国際的に見ても一流のオリジナルな成果を取得するとともに、情報やバイオ医薬、エネルギー、環境、製造等の重要分野で重大な進展を達成するとの目標を掲げた。また、ナノグリーン印刷・製版、高密度メモリ、新型ディスプレイ、疾病の迅速診断、水の浄化、高効率のエネルギー転換等においてナノ材料や部品、技術の大規模な応用を促進するほか、ナノテクノロジー分野での人材育成にも努力を傾注する考えを明らかにしている。

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は、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

的に主催であり、2013年9月の第5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、1400人を超える参加者(うち海外が400人弱)を集めた。中国からの参加者の95%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。

(8) 韓国

韓国の科学技術・イノベーション政策は、2013年7月に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2期ナノ技術総合発展計画 (2006~2015年)」(注: 10年間を見据えた5年計画) が実施されていて、ナノテクノロジー技術競争力について2015年までにGlobal Top Threeになる、米日に次いで世界3位の地位を占めることを目標としていた。2001-2011年の11年間で23億USドルが7省庁に配算され、学術成果としてScience Citation Index (SCI) の韓国ナノテクノロジー論文数は、2011年に中国、米国に次いで第3位に浮上し、また、被引用論文数も2009-2011の積算で第3位になった。(ただし、発表論文あたりの被引用率では、米、独、仏、日、中、韓の順)。

「第3期ナノ技術総合発展計画 (2010-2020)」においては、さらにナノテクノロジー戦略の目標が強化され、(1) 2020年までに米国のナノテクノロジー技術水準の90%にまで追い上げ、ナノテクノロジー先導国家となること、(2) 統合 (convergence) およびグリーン産業への波及効果の大きいナノ統合基幹技術を30件以上確保し、新未来産業を創出すること、(3) EHS予算をナノテクノロジー国家投資全体の7%に引き上げ、社会的・倫理的責務を強化すること、(4) ナノテクノロジー関連の優秀な人材を2020年までに2万人育成するとともにインフラ活用を極大化すること、などが掲げられている。

2010年時点で、ナノテクノロジー学科の創設は大学36、大学院40に達し、学生6084人、院生1300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し、ニューヨーク州アルバニーのCollege of

Nano-scale Science and Engineering (CNSE) に次いで世界の 2 例目である。

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。

ナノの EHS については国として予算を重点化して、省庁横断の 1st Comprehensive Plan for Nano-Safety Management を 2011 年 10 月に発表している。

ナノを支援する政府組織として、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が、2010 年にあらたに国立ナノテクノロジー政策センター（NNPC）が設立され、戦略面での貢献が期待されている。

ナノテクノロジー関連の企業数は 2005 年の 154 社から 2011 年には 900 社まで増加している。

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）がスタートし、IT、BT、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、約 440 百万 US ドル（政府 370 百万 US ドル、企業 70 百万 US ドル）の投資を決めている。政策推進のため、Technology Convergence Policy Center の設置が決定されている。

また、「部品素材専門企業等の育成に関する特別措置法」に基づき「第 3 次部品・素材発展基本計画（2013-2016）」（2013 年・産業通商資源部）が 2013 年 12 月に発表され、部品素材分野の 4 強となるため、フォロワーから抜け出し市場リーダーとなることを目標としており、特許戦略を新たに整備すること等も視野に入れられている。

（9）その他の国・地域

オランダ政府のナノテクノロジー研究開発イニシアチブ “NanoNed” は、2005 年 4 月にスタートし、8 つの CEO (7 大学 + TNO) と Philips によるコンソーシアム、および “Flagship” と呼ばれる 400 人の研究者が参加する 11 の共同プログラムに対して、政府から 9500 万ユーロのグラント（2005－2009 年末）が、また、コンソーシアムパートナーなどから 2 億 3500 万ユーロの資金が提供された。

次いで 2011 年、“NanoNextNL” が後継の国家計画として立ち上がり、コンソーシアムに対して 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、Kavli NanoLab Delft、Zernike NanoLab Groningen、NanoLab@TU/e、TNO NanoLab Delft、Philips Innovation Services が参加している。

ロシアは、2007年に初めて8カ年の国家科学技術計画を発表したが、2010年には1,000億円を投資し、2015年までにナノ製品販売を3兆2000億円にすることを目標としている。2008年からは、ナノテクノロジー研究やナノテクノロジー産業のためのインフラ整備事業として、RNN（Russia Nanotechnology Network）計画がスタートした。装置類の充実やネットワーク化のため、2008～2010年の3年間で8億ユーロが投資される。ナノテクノロジーの産業化を目指して、国が投資する公社「RusNano」が誕生し、諸外国に連携を呼びかけている。RusNanoの2013年予算として、383億ルーブル（9.6億ユーロ）がナノテクノロジー製品・製造に、126億ルーブル（3.15億ユーロ）が長期投資のための融資に、それぞれ配分されている。ロシアの抱える問題は、高い経済成長率にも拘わらず研究人口が減り続けていることである。そのこともあって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）にも、ドイツと同等規模の資金を出していることが知られている。

台湾は、第1期台湾ナノテクノロジー国家計画（2003～2008年／555百万US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574百万US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、2012年時点で、34社、1150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。タイではNanoQという制度名である。

ナノリスク管理については、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。EU、英国、プレトリア、南アフリカ、カナダとの国際協力がある。毎年、台湾ナノ展示会が開催されている。

シンガポールは、2011-2015年で161億シンガポールドルを科学技術産業化政策に投資し、2015年にはGDP比で3.5%の投資を目指している。このような積極投資のもと、ナノ印刷技術などに焦点を絞った産業コンソーシアム、あるいはA*STAR、大学中心の戦略（NUSNNI）による学際研究所（NUSNNI-NanoCore）など、英語環境の下で国際的なナノ研究開発拠点が築かれつつある。

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。

インドは、農業との関連でバイオテクノロジーに大きな重点が置かれているが、2007 年から材料を含む「Nano Mission」もスタートし、エネルギー、飲料水、健康などの優先応用分野を指定し、4 つの技術分野 (表面コーティング/ナノ粉体技術、ナノ燐光体、ドラッグデリバリー (薬物送達)、センサーデバイスなどナノエレクトロニクス) に政策的な焦点を絞っている。ナノテクノロジーのインフラとして、7 つのセンターが開設されている。これらのセンターによって、MEMS/NEMS、ナノデバイス、バイオセンサ、ナノエレクトロニクス、バイオシステム、光発電、ティッシュエンジニアリング (生体用人工組織工学) などがカバーされていて、さらに計算科学に関するセンターも設置予定である。

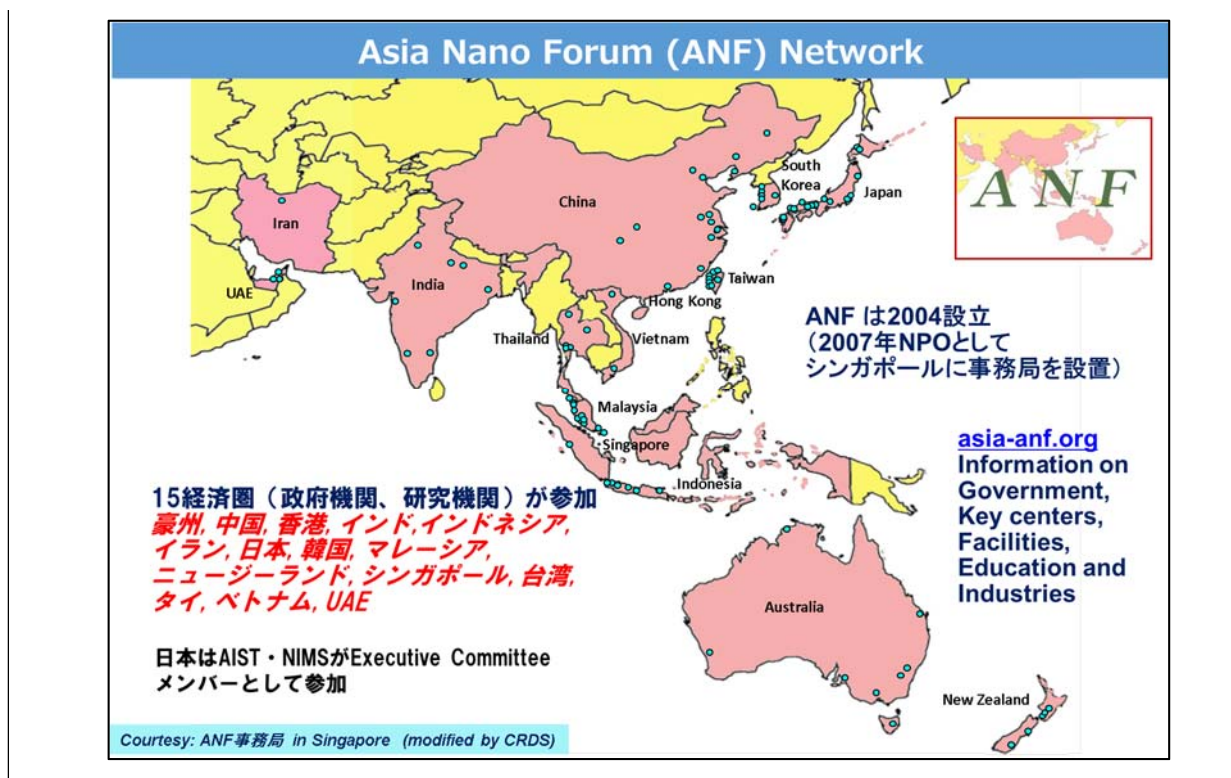
中東では、UAE とイランがナノテクノロジーの政府計画を持つ。とくに、イランは量・質ともに充実したナノテクノロジー国家計画と組織 (Iran Nanotechnology Initiative Council (INIC)) を有し、最近数年の SCI 学術誌掲載のナノテクノロジー分野の論文数で世界の 10 ~15 位につけており、増加率にすると世界トップにいる。

【コラム】アジア・ナノ・フォーラム

2004 年 5 月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 のメンバーは、アジア・太平洋地域の 15 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。日本からは産業技術総合研究所と物質・材料研究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 6 つのワーキンググループ活動 (ナノテクノロジー標準化・リスクマネジメント、ナノテクノロジー教育、研究インフラ、ナノ安全、水・環境問題、若手リーダー会) である。教育 WG では、各経済圏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~) をおこなっている。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。

ANF は 2007 年 10 月に 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。



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、若者の理科離れ、工学部志望学生の急減、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、戦略の体をなしていない。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言える。

■学会の動向

図 2.22 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。米国の学会が会員数を増やしているのに対し、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 10 年で約 6,000 人減、日本物理学会と応用物理学会は約 2,000 人減）。特に企業会員数が減っているとの認識である。

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2.4万人弱（重複有り）。			
学会名	会員数(最新)	年会参加者数(24年度)	会員数(過去)
応用物理学会	21,029名(2013年末)	約6,700名	23,109名(2002年末)
日本物理学会	16,998名(2012年末)	約3,700名※	19,396名(2002年末)
日本化学会	30,055名(2013年2月末)	約8,100名	32,263名(2008年)
高分子学会	11,283名(2013年度末)	約3,400名	12,148名(2003年度末)
日本金属学会	5,877名(2013年2月末)	約1,500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)	50,578(2014)	46,269(2008)	
Materials Research Society (MRS)	16,600(2013)	16,000(2008)	
American Chemical Society (ACS)	161,000(2013)	158,422(2005)	

図 2.22

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、アカデミアとしては課題があると言わざるを得ない。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。

国際交流について、この数年間の数少ない成功例として、物質・材料研究機構の ICYS（英

語を公用語とする国際若手研究者センター）が将来のテニュアトラックと結び付けて海外研究者の定着を考慮した運営を実施し、世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI：World Premier International Research Center Initiative）で10年続く「国際ナノアーキテクニクス研究拠点（MANA）」の国際化につなげることに成功している。

■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2.23）は、2013年に約3.5万人で、中国、米国に次ぐ第3位となっている。しかし、ここ10年、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、中韓が3倍以上の伸びを見せる中、日本のみが1.5倍弱の伸びに留まる。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。

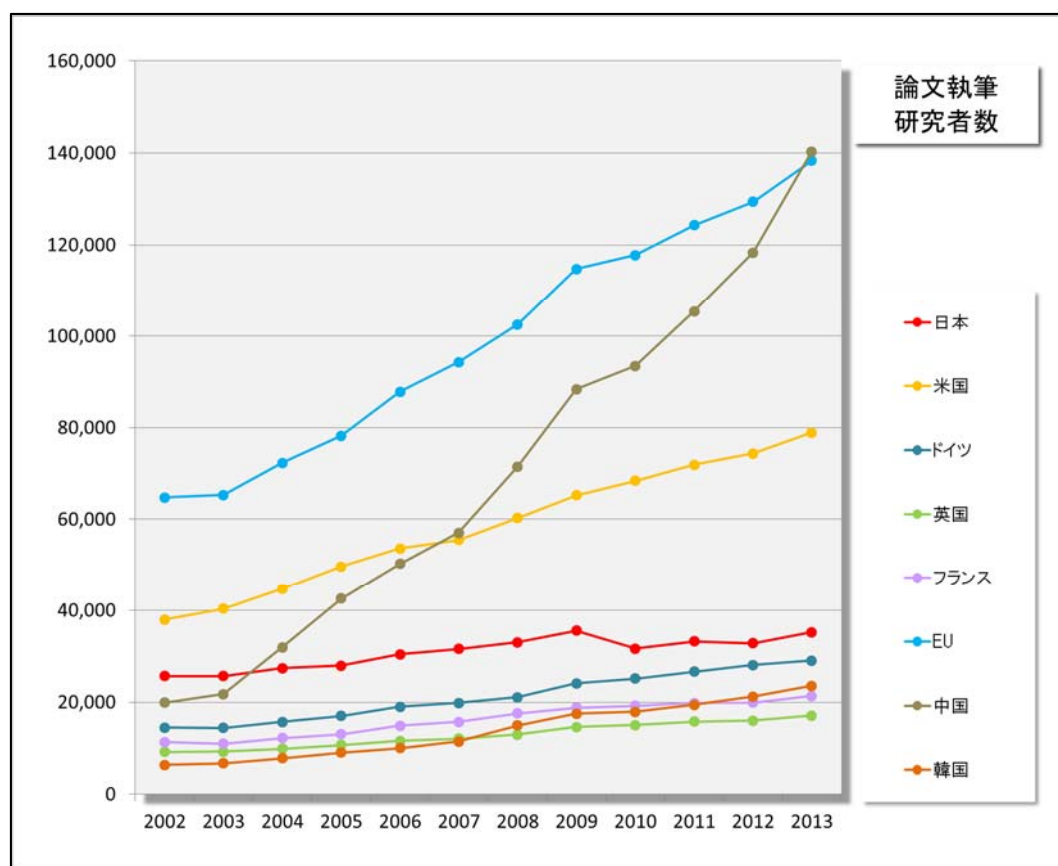


図 2.23

日本は企業研究者が論文を書かなくなったと言われている。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。2010年時点で、各国の研究者数は、米国（141.3万人）、中国（121.1万人）、日本（84.3万人）、ドイツ（32.7万人）、韓国（26.4万人）、英国（23.5万人）の順となっている。各国の研究者の割合を組織別にみると、企業研究者の割合は、米国（81.6%/1999年）、韓国（76.5%/2010年）、日本（74.8%/2011

年、専従換算)の順に高く、欧州の主要国、英国(34.2%/2010年)、フランス(57.0%/2009年)、ドイツ(56.8%/2010年)は低めである。中国(61.1%/2010年)はドイツ、フランスに近い。

■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) HPCI 戦略プログラム 分野 2 計算物質科学イニシアチブ(H22-27)

[概要]

3つの中核機関と、11の協力機関で計算物質科学に関連する新規研究テーマの推進や外部連携を行っている。参加研究者数は、研究担当者(実施者)約180名、協力者約118名である(2014年4月)。本戦略プログラムは、①画期的な成果創出、②高度な計算科学技術環境を使いこなせる人材の創出、③最先端コンピューティング研究教育拠点の形成を目指し、「戦略分野の研究開発の推進」および「計算科学技術推進体制の構築」を目的としている。

[雇用形態]

- ・ 特任教員と特任研究員の2つ。研究員には、教員が提案する研究を実施する重点研究員と分野振興を主業務とする拠点研究員の2タイプがある。
- ・ 特任教員7名および特任研究員(ポスドク)として、重点研究員10名、拠点研究員14名を雇用している。
- ・ 重点研究員は上司である教員の下でプロジェクトとしての研究を実施(比較的自由に)。
- ・ 拠点研究員は拠点長が上司で、プロジェクトで実施しているイベント企画実施やソフト利活用のサポートも担っており、研究に対するエフォートは50%。

[若手(ポスドク)のキャリアパス]

- ・ 優秀なPDは、任期中に他の公募に応募し、助教や准教授になる。
- ・ 他のプロジェクトの特任教員やPDに移る。
- ・ 教員が手放したくないPDは、大学内で特任教員のポジションを作って格上げする。
- ・ これまで企業に就職した例は、約40名中1名。

[課題]

- ・ 後継のプロジェクトがないと行き先がなくなってしまう研究者が多く出る。
- ・ シミュレーションソフトの利用支援のポジションを魅力的に感じってくれるPDがいらない。
- ・ プロジェクトの中盤を過ぎると、研究員の応募は欧米以外の外国人か研究者としての経験が浅いDr新卒になる。

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37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。2014年4月時点で約500名の教員・研究者が参画、約100名の技術専門人材を雇用。地域大学や民間企業を含め、利用件数は年間2500件にのぼる。

[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、技術に対応できるためのスキルアップを定期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・独法の定員の問題もあり、教員数との競合。
- 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独立行政法人で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)」がスタートした。Nanotech CUPAL は、TIA-nano 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小中高一貫教育 (K-12) 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（後述 KoNTRS の責任編集）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・系統的なプログラムは存在しない。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、5 年間に大学院学生の履修者 1100 名、修了者 700 名を数え、社会人にも多数教育訓練を施している。継続性を維持するため、別のプログラム（特別教育研究経費）で 2009 年から 4 年間延長することに成功し、社会受容まで含めたナノテクノロジー教育訓練の充実を図っている。これは現場の自主努力によるところが大きく、そのあとの継続的な運営が保証されているわけではない。今後は、マッチングファンドなど、自主努力のインセンティブを付与する政策

が必要である。

【コラム】グローバルな人材流動の動向

平成 21 年度版の科学技術白書には、日本の内向き志向と国際交流の遅れを示す端的なデータがある。まず、日本の留学生受け入れ者数は欧米主要国や中国よりも少ない。米国における米国人以外の理工系博士号取得者数は、アジアに限ってみると、中国が断然多く、韓国、インド、台湾がそれに続き、国として韓国や台湾よりも人口の多い日本は、はるかに少数になっている。つまり、米国の理工系大学院において日本はアジアのマイノリティになっている。

また、2012 年ユネスコ統計研究所が調査した世界の留学生に関する結果が日本経済新聞（2014 年 6 月 14 日）に掲載されたが、そこでは世界の留学生（大学・大学院）は 400 万人（2012 年）であり、2000 年に比べ約 2 倍（97%増）となっている。日本は 22 位である。2000 年から 2012 年にかけてアジア新興国は留学生数を 2～5 倍増やす中、日本は反対に減っている。

グローバル化が進む現在、若者のグローバル意識やコミュニケーション能力を涵養していくことが重要で、内向き志向は深刻な問題である。いかにして国際交流を増やしていくのか、まずは、国レベルでの真剣な分析と対策が急がれる。

世界の留学生					
留学生の出身国			受け入れ国		
1位	中国	69.4万人	1位	米国	74.0万人
2位	インド	18.9	2位	英国	42.7
3位	韓国	12.3	3位	フランス	27.1
4位	ドイツ	11.7	4位	オーストラリア	24.9
5位	サウジアラビア	6.2	5位	ドイツ	20.6
6位	フランス	6.2	6位	ロシア	17.3
7位	米国	5.8	7位	日本	15.0
8位	マレーシア	5.5	8位	カナダ	12.0
9位	ベトナム	5.3	9位	中国	8.8
10位	イラン	5.1	10位	イタリア	7.7
22位	日本	3.3			
引用：日経（夕刊）2014年6月14日（土） （注）2012年ユネスコ統計研究所調べ。 高校より上位の高等教育機関が対象で、1年未満の短期留学は含まず			国名	2000年	2012年
			中国	14万人	69万人
			インド	6万人	18万人
			韓国	7万人	12万人
			日本	5.9万人	3.3万人

全論文数に占める国際共著論文数の割合も、欧米主要国にかなわない。米・英・独と日本を比べると、日本の停滞は顕著である。論文増加率の違いは、国際共著論文数の増加率を反映していることが、科学技術白書の中で分析されている。そして、国際共著論文は引用度が 2 倍あることを考えると、国際的なネットワークへの発展の力が弱い日本は、当然引用度も少なくなってくる。

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41の研究開発領域について、5つの区分ごとに国際比較結果を記す。P.54には国際比較表のまとめを掲載する(表2.1)。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、グリーンプロセス触媒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。特に蓄電デバイスは世界的に研究が強化傾向にある。

国別に見ると、日本は7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プロセス触媒の産業化においては中韓との競争により状況が停滞傾向にあり、今後の開発強化が課題である。

米国は熱電変換、パワー半導体、グリーンプロセス触媒が強く、熱電変換や蓄電デバイスでは基礎研究から産業化まで「上昇傾向」にある。また、グリーンプロセス触媒はシェールガス革命を背景に新規ガス変換プロセスが数多く立ち上がり産業化の力が強い。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産業化が弱い。

欧州は太陽電池、熱電変換、パワー半導体、グリーンプロセス触媒が強く、熱電変換、蓄電デバイス、パワー半導体が基礎研究から産業化まで「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、熱電変換およびグリーンプロセス触媒の基礎研究と応用研究が強く、また産業化まで含めて「上昇傾向」にある。蓄電デバイスおよびパワー半導体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。一方、太陽電池については基礎研究や応用研究は活発であるが、欧州の購入支援策の縮小やモジュールの生産過剰による販売価格の急速な低下で産業化は「下降傾向」にあり、企業の体質改善が必要になっている。

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、蓄電デバイスおよびグリーンプロセス触媒の応用研究と産業化は強い。蓄電デバイスにおいては電池開発強化を国策としており、基礎研究から産業化まで「上昇傾向」にある。また、グリーンプロセス触媒においては民間企業が開発に注力しており、産業化においても我が国に比べ高い競争力を有している。

健康・医療分野に関わるナノテクノロジー・材料

ナノ薬物送達システム（ナノDDS）が基礎研究から産業化のフェーズまで「上昇傾向」にある。ナノDDS製剤の臨床試験や上市が進み、活況を呈している。造影剤を搭載したナノDDSの進展により、生体イメージングも「上昇傾向」にある。

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、バイオイメージングでは世界に伍しているが、他領域では基礎研究の強みを産業化フェーズの競争力に確実につなげられていない。大企業の参入が進まないことや、ベンチャー企業が未成熟であることが共通の要因として挙げられる。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り、循環器系生体材料や人工関節など、市場規模が大きく、今後需要増が見込まれる分野でも国内生産率が低い状態が続いている。

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確実に進めつつある。ナノ DDS では主要雑誌において被引用回数で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、再生医療用材料、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。

社会インフラ分野に関わるナノテクノロジー・材料

世界的に構造材料や分離膜材料、センサーデバイスについての取組みが盛んになっている。

日本は、構造材料（金属系）で基礎から産業まで強みを有する。炭素繊維複合材料（CFRP）や水処理膜にも強みを有するが、センサーデバイスの応用・産業化では欧米が先行している。これらは今後世界的に注目の高い領域であることから不安要素といえる。

米国は、基礎研究から産業化のフェーズに至るまで競争力を維持している。膜素材に関する研究から工業化に至る幅の広い研究が行われている。またセンシングデバイス・システムの代表的なベンチャー企業である MEMSIC や InvenSense などが、ビジネスで成功を収めている。

欧州も基礎研究から産業化のフェーズに至るまで競争力を維持している。特に CFRP の応用に関する意欲が高く各国で研究が盛んである。また、IMEC やフラウンホーファーなどでセンサーデバイスに関する基礎から産業化までの研究が活発である。

中国は、構造材料を除き、日米欧に比べて基礎研究から産業まで劣勢とされる。構造材料に国として精力的に取り組んでおり、応用・産業においては日欧米に比肩するレベルに達している。膜材料についても国家的に重点的に取り組み、急速にレベルを上げている他、センサーデバイスについても今後上昇の兆しが見える。

韓国は全体的に日米欧に比べて基礎研究から産業まで劣勢とされているが、浦項製鉄（POSCO）が自ら浦項工科大学（POSTECH）を創立して鉄鋼材料研究を一手に引き受けていることや、逆浸透（RO）膜に関する大型のプロジェクト（seaHERO）や水処理に関する大型プロジェクト（Eco-Smart Waterworks System）など膜研究が非常に活発であることなど注目に値する。

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。

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クトロニクスの分野では「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・さきがけ等による巻き返し・新基軸が期待される。

米国は量子情報、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に強いが、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。

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、産業化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。

ナノテクノロジー・材料の基盤科学技術

物質・材料の設計・制御技術、合成・加工、計測・解析、計算など幅広い研究領域が含まれる。特に空間制御材料やバイオミメティクス、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）などが世界的にホットな領域となっている。

日本は総じて基礎研究は強く、産業化に向けた研究で欧米の後塵を拝す傾向がある。元素戦略に関する材料開発や放射光など計測において、基礎から産業化まで強みを有するが、空間制御材料やフォノンエンジニアリング、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）といったホットな領域が今後の競争に大きく影響すると予想される。

米国は、基礎から産業化まで世界をリードしている。新しいアイデアや概念のほとんどが米国から出てくる状況である。空間制御材料やバイオミメティクスに強い他、EHS、ELSI についてもきちんと取り組まれている。

欧州は、日米と並び基礎から産業化まで取り組まれているが、やはり米国同様、空間制御材料やバイオミメティクスに強い他、EHS、ELSI についての意識が高い。

中国は基礎から産業化までこれからというところであるが、バイオミメティクスに優れた成果が出ている他、電子顕微鏡の一部で世界と伍している。

韓国は基礎から産業化まで満遍なく平均的な取り組みがされているが、特別に強みを発揮している領域は見当たらない。

表 2.1 国際比較表まとめ

環境・エネルギー

	国	フェーズ	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	
			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	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	産業	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
米国	基礎	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	応用	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	産業	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
欧州	基礎	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	応用	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	産業	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
中国	基礎	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	応用	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	産業	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
韓国	基礎	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	応用	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	産業	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△

健康・医療

	国	フェーズ	生体材料（バイオマテリアル）		再生医療用材料		ナノ薬物送達システム（ナノDDS）		バイオ計測・診断デバイス		バイオイメージング		生体イメージング	
			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	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	産業	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
米国	基礎	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	応用	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	産業	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
欧州	基礎	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	応用	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	産業	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
中国	基礎	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	応用	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	産業	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
韓国	基礎	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	応用	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	産業	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△

社会インフラ

	国	フェーズ	構造材料（金属系）		構造材料（複合材料）		水処理用分離膜		高温超伝導送電		センシングデバイス・システム		放射線物質の除去・減容化など	
			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	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	△	→	△
	産業	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	△	→	△
米国	基礎	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	△	→	△
	応用	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	△	→	△
	産業	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	△	→	△
欧州	基礎	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	△	→	△
	応用	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	△	→	△
	産業	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	△	→	△
中国	基礎	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	応用	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	産業	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
韓国	基礎	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	応用	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	産業	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△

情報通信・エレクトロニクス

	国	フェーズ	超低消費電力デバイス（エレクトロニクス）		超低消費電力デバイス（エレクトロニクス）		二次元機能性薄膜（グラフェンなど）		スピントロニクス		フォトニクス		有機エレクトロニクス		MEMS		異種機能三次元集積チップ	
			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	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	産業	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
米国	基礎	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	応用	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	産業	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
欧州	基礎	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	応用	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	産業	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
中国	基礎	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	応用	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	産業	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
韓国	基礎	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	応用	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	産業	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△

基盤科学技術

	国	フェーズ	界面制御		制御空間・空隙構造		分子技術		バイオミメティクス		分子ロボティクス		元素戦略・希少元素代替技術		データ駆動型材料設計・インテリジェント材料		超微細加工・ナノ構造加工		プロセス・デバイス		ナノ計測（走査型顕微鏡）		ナノ計測（電子線・X線・粒子放射）		ナノ計測（超高速時間分解）		物質・材料シミュレーション		ナノテクノロジーの管理・リスク評価・リソースと社会への影響	
			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	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	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	産業	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
米国	基礎	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	応用	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	産業	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
欧州	基礎	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	応用	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
	産業	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎
中国	基礎	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	応用	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	産業	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
韓国	基礎	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	応用	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△
	産業	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△

■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（2013年）第2版」からの変化や世界的なトピックス（図2.24）について述べる。

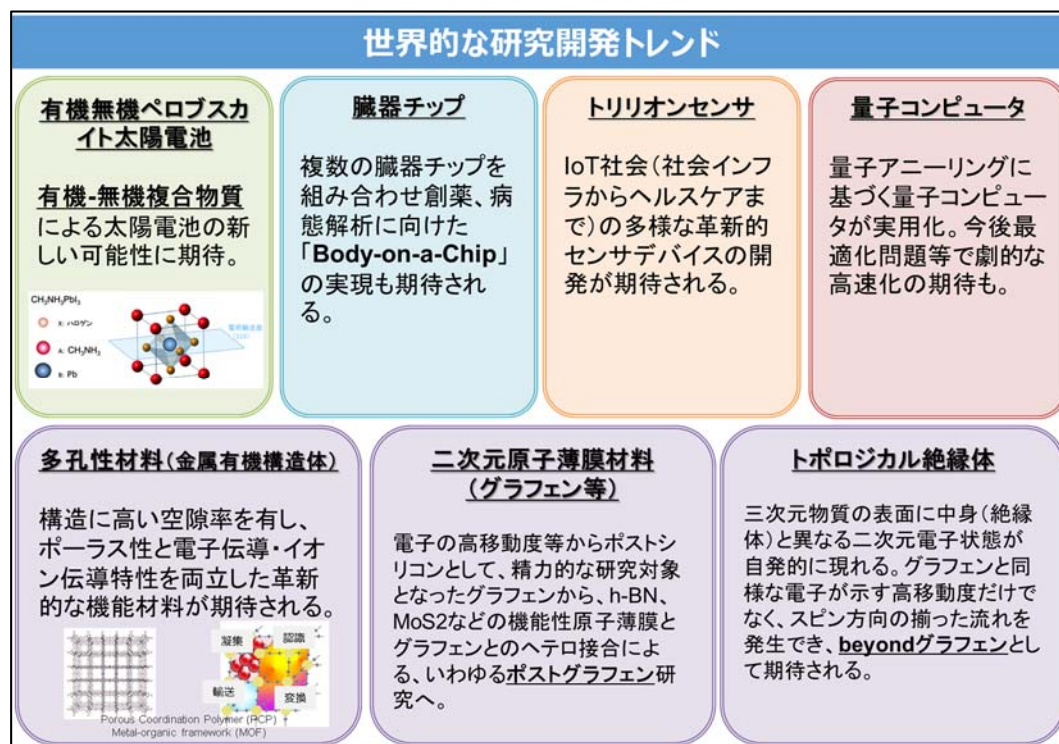


図 2.24

ハイブリッド型ペロブスカイト系太陽電池

2009年、宮坂力（桐蔭横浜大学）らのグループが開発した有機-無機複合物質であるハロゲン化鉛系ペロブスカイトを利用した太陽電池は、現在、既に変換効率約19%が達成されている。急激な変換効率の上昇に伴い日本、米国、欧州、中国、韓国等、世界中で熾烈な研究開発競争が開始され、日本発の革新的太陽電池にもかかわらず、研究開発では世界の後塵を拝する結果となっている。この太陽電池は発電機構の詳細は不明なままであり、研究開発が始まったばかりである。今後はさらなる高効率化を目指した新材料開発と発電機構の解明、新規ペロブスカイト化合物やホール輸送剤の開発、また耐久性の改善が重要な課題となる。低毒性化を目標とした非鉛系ペロブスカイト化合物の開発も必要になる。実用化に向けてはさらなる高効率化、高耐久化など多くの課題をクリアする必要がある。そのためには、国が主導した新材料開発、発電機構解明、劣化機構解明等の基礎研究を強力に推進するとともに、産学官連携による技術開発を効果的に進めていく必要がある。

日本では、JSTのCREST、さきがけ、ALCAでペロブスカイト系太陽電池の研究が一部実施されているが、今後の新たな取り組みとして、これらの複数のプロジェクトに関係する研究者を結集した横断プロジェクトの実施が期待される。

臓器チップ

生体反応や細胞応答の一部をチップ上で再現する研究はこれまでも単発的に行われてき

たが、ハーバード大学の Ingber グループが、「Lung-on-a-Chip」と冠した3次元培養モデルを報告して以来、マイクロデバイス上に組織臓器を集積する研究が米国を中心に急速に進展している。米国は国防高等研究計画局（DARPA）、国立衛生研究所（NIH）がそれぞれ5年間で70百万ドル規模のプロジェクトを2012年に開始している。生体組織・臓器の機能を模倣した新しい3次元培養モデル（臓器チップ）の開発により、創薬の効率化への貢献を目指している。複数の臓器チップを組み合わせることにより、将来的には、目的の作用についての全身応答が解析可能な「Body-on-a-Chip」の実現も見込まれ、創薬だけでなく、病態解析など幅広い応用が期待される。

日本は、マイクロデバイスや細胞組織工学で高い研究レベルを維持している。臓器チップの開発に必要な要素技術では米国に比べても遜色なく、個々の研究室のレベルでは優れた成果も発表されている。しかし、臓器チップ開発をターゲットとしたプロジェクトがないこともあり、大きな流れを形成するに至っていない。臓器チップの開発には、マイクロデバイス工学と細胞組織工学を中心とする生命科学との密接な連携が必要であり、研究開発拠点形成など集学的な研究体制の構築を支援していく必要がある。

トリリオン・センサ

2013年、米国で 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、本取組みはセンサー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。2013年10月に Stanford University で第1回 “Trillion Sensors Summit”を開催し、“Trillion Sensors Universe”を10年以内に実現するための TSensors Roadmap™ の作成を宣言した。

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 Fairchild Semiconductor 社、米 Intel 社、米 Texas Instruments 社、ドイツ Robert Bosch 社、伊仏 STMicroelectronics 社、韓 Samsung、台 APM、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 University のほか、米 California Institute of Technology、米 University of California (UC) Berkeley、UC San Diego、仏 CEA-LETI、ベルギーIMEC、VTT、Fraunhofer など10を超える大学・研究機関も参加した。

9つの応用領域（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。

今後、特に、人の生活、健康に関連するウェアラブルセンサ、インプラントセンサなどの開発・活用の一層の盛上がりが見込まれる。

量子コンピュータ

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。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）の実現に必要なとされるような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。日本においては、まだ応用開発・産業化につながる活動はほとんどないが、基礎研究においては、新学術領域研究「量子サイバネティクス」、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、成果も得られている。また、2014年から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。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。

二次元機能性原子薄膜（グラフェン等）

2010年のノーベル賞受賞を契機に世界中で精力的な研究が行われたグラフェンではあるが、現在の世界的な流れは、単なる原子薄膜としてのグラフェン単体研究から、h-BN、MoS₂などの機能性原子薄膜とグラフェンとのヘテロ接合による、いわゆるポストグラフェン研究に大きくシフトしている。原子層オーダーで膜厚が制御されたグラフェン、h-BN、ダイカルコゲナイド半導体二次元機能性原子膜を連続的にヘテロエピ成長する製膜技術と材料構造・物性評価技術のリンケージ開発が新たな技術動向として注目されている。

グラフェン素材の産業応用としては、大面積量産化グラフェン製膜技術によるグリーンエネルギー応用のタッチパネル・太陽電池用透明電極、および蓄電池応用が先行し、MoS₂やWS₂などの二次元ダイカルコゲナイド半導体によるフレキシブルTFTが続くと期待される。機能デバイス応用研究では、グラフェン単体の各種物性応用から、グラフェン（G）/h-BN/グラフェン（G）ヘテロ接合を介した共鳴トンネリングやスピン注入など、二次元機能性原子薄膜ヘテロ接合に発現する物性機能応用へと研究動向が進化している。

日本では、グラフェンおよび二次元機能性原子薄膜の材料・デバイス開発に関する国家プ

プロジェクトは、いくつかのプロジェクトで個別課題として研究開発支援がなされるに留まってきたが、2013 年度にグラフェン関連領域：文部科学省科学研究費新学術領域「原子層科学」(H25-29 年度)が採択され、さらに、2014 年度に NEDO の「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」(H26-28 年度)、JST の CREST 新領域として、「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」(H26-33 年度)が発足するに至り、ようやく、国家規模での研究開発投資体制が整ってきた。

トポロジカル絶縁体

特異な二次元電子状態をもつグラフェンや原子膜厚の遷移金属カルコゲン化合物への研究が加速しているのと相まって、三次元物質の表面に中身と異なる二次元電子状態が自発的に現れるトポロジカル絶縁体にも注目が集まっている。中身が絶縁体になるトポロジカル物質では、グラフェンと同様な質量ゼロの表面電子状態に起因する高移動度を示すだけでなく、スピンの向きが揃った流れを発生できることにも応用の期待が大きい。これと関連して、電流で磁化を制御できる能力（スピン注入磁化反転）の最も大きい物質がトポロジカル絶縁体であると、2014 年に米欧の共同研究グループが報告し注目を集めている。このような beyond グラフェン電子機能は他にも数多く理論予測されており、実験検証が着々と進められている。強磁性をもつトポロジカル絶縁体では、外部磁場なしに発生するホール抵抗が更に量子化される。この異常量子ホール効果について、中国に続き日本からも確認実験の成功が報告された。

一方で、中身が超伝導になるトポロジカル物質では、新たな原理で量子計算を可能にする電子状態がその表面に生じると理論的に予測されており、その実現に向けた物質開拓や物性検証が活発に行われている。これらトポロジカル物質の研究の多くは基礎段階にあり、今後の応用にむけた展開が期待される。

日本では上述の JST-CREST 新領域「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」で、トポロジカル絶縁体関係もスコープに含まれている。

MOF (Metal organic framework : 金属有機構造体)

これまでポーラス性化合物は、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 MOF 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、その後の多孔性構造の設計に大きな指針を与えた。2008 年前くらい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。

また応用の観点からはその電子伝導性からキャパシタへの応用、あるいは高温においても安定なものも存在するため小分子ガスの活性化（触媒）にも適用されており、機能材料としても高いインパクトを与えている。

日本では、2013 年から JST-CREST・さがけで「超空間制御」が発足している。

(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先進国である。

図 2.25 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言うまでもない。



図 2.25

(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 をもとに JST-CRDS が作成した資料を用いる。論文動向の総論としては、この 10 年ほどで中国が伸び、量的 (論文数) に世界のトップに、また、質的 (※ここでは被引用 Top10%論文のことを指して「質」と表現している) にも 2011 年時点でトップに立った。日本は、論文の質・量ともに頭打ちになり、質的には 2011 年時点で韓国にも肉薄されている。

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 2.26)、2011 年以降で、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、2 番手の米国の 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。

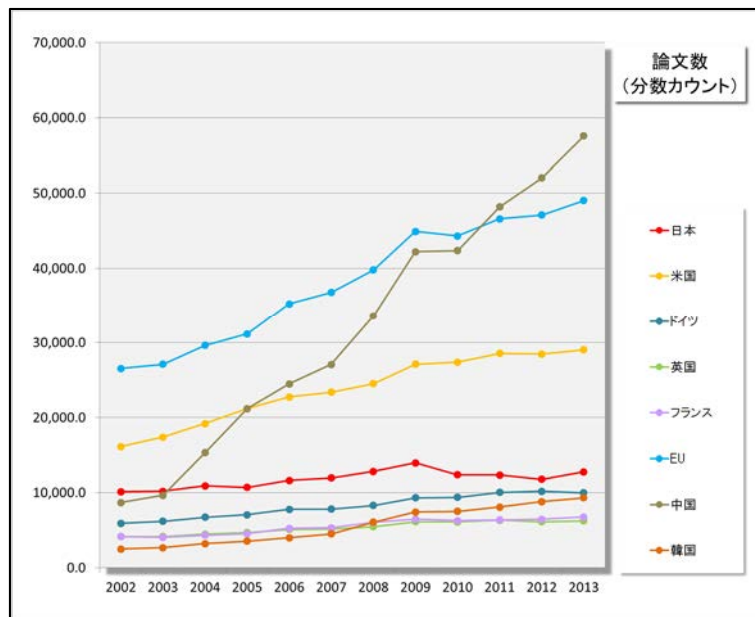


図 2.26

② 被引用数トップ 10%論文数を分数カウントで見ると(図 2.27)、EU、中国、米国の順である。こちらも中国の勢いが確認される。日本は、2002 年には、米国に次いで 2 位であったが、現在では、中国、米国、ドイツの後ろを韓国と並んでいる状況である。

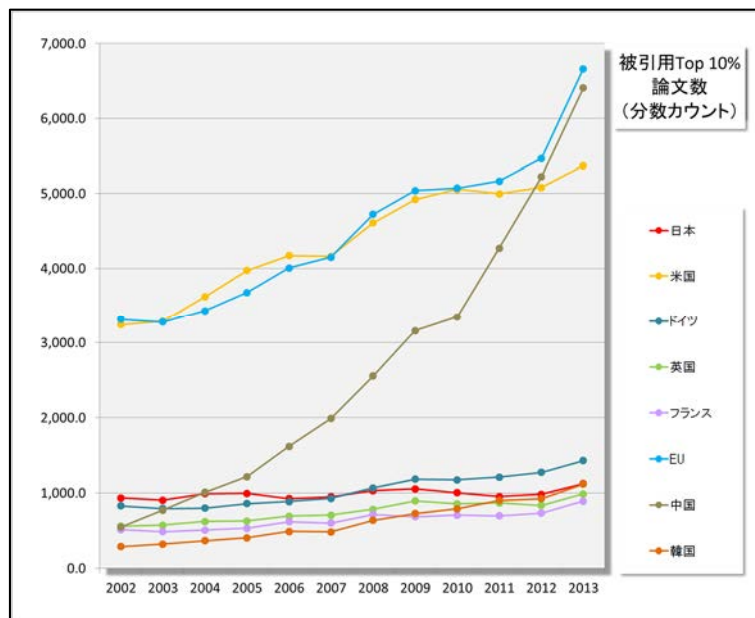


図 2.27

③ ナノテクノロジー・材料分野を分野別にブレイクダウンした環境・エネルギー、健康・医療、社会インフラ、情報通信・エレクトロニクス、基盤科学技術で比較すると(図 2.28~32)、それぞれに特長があることがわかる。

ナノテクノロジー・材料分野のうちでも、環境・エネルギーに関する研究は他の分野に比

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わかる。また 2013 年、健康・医療区分の被引用トップ論分数で中国が急な伸びを見せ、欧米を越えたことは注目に値する。

日本は論文数においては、いずれの区分でも米中に次いで、3位、4位辺り（EU 除く）にいたが、被引用トップ論分数に関しては、ドイツ、韓国と同等、あるいは後塵を拝し5位のことが多い。被引用を見る限り、基盤区分で最も評価されており、健康・医療区分では主要国中、最下位である。

・ 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)

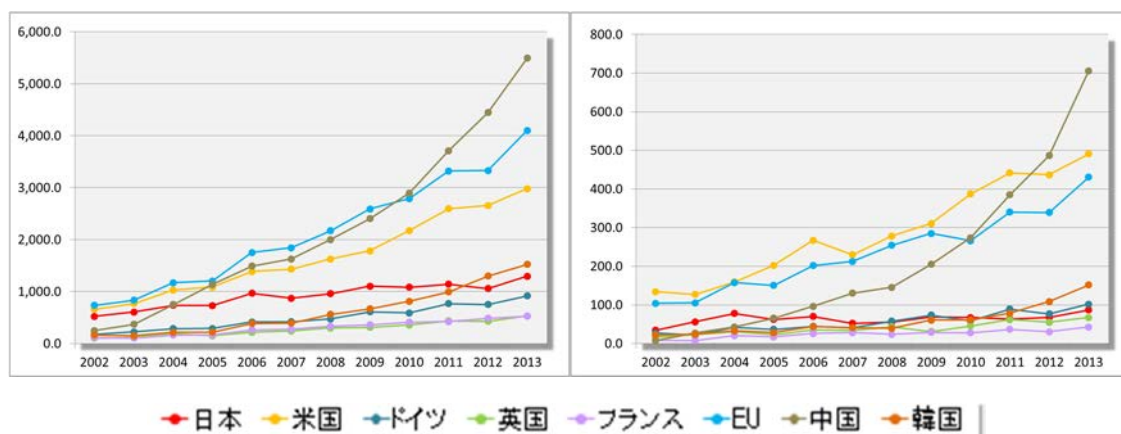


図 2.28

・ 健康・医療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)

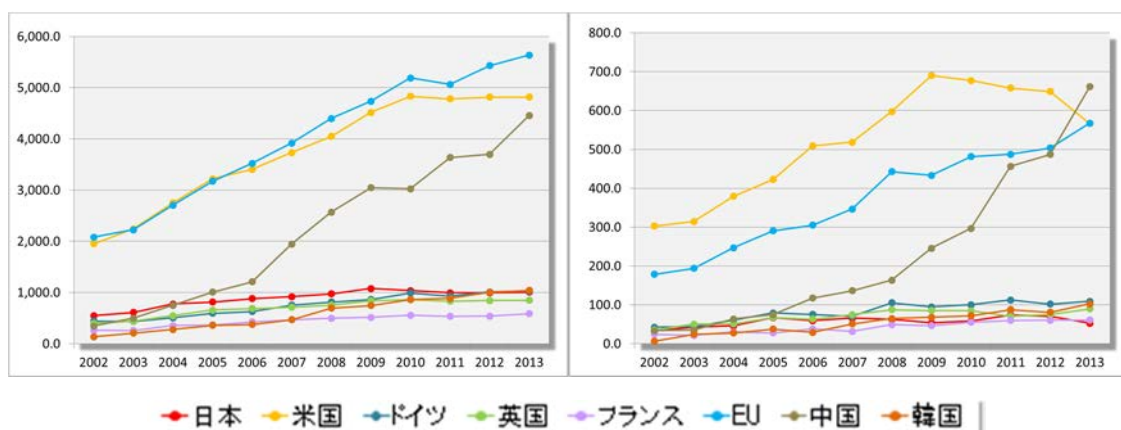


図 2.29

・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)

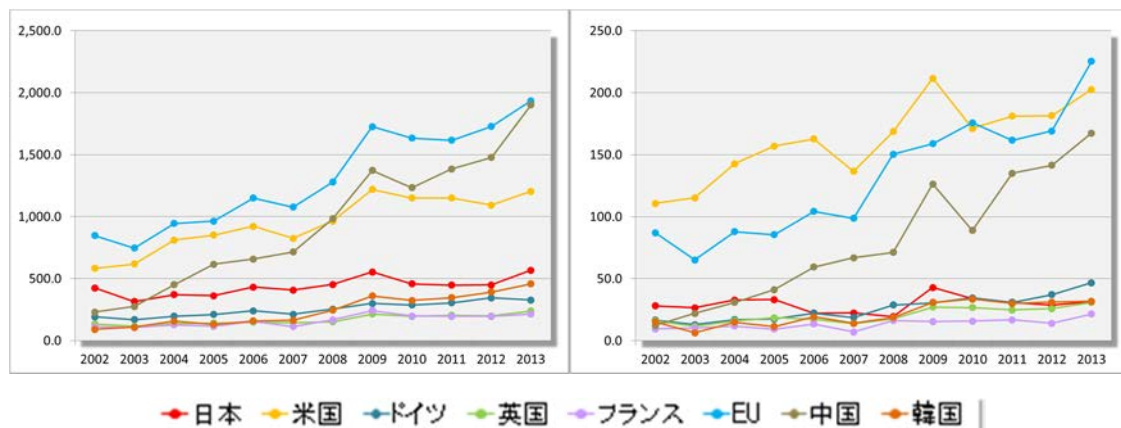


図 2.30

・情報通信・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)

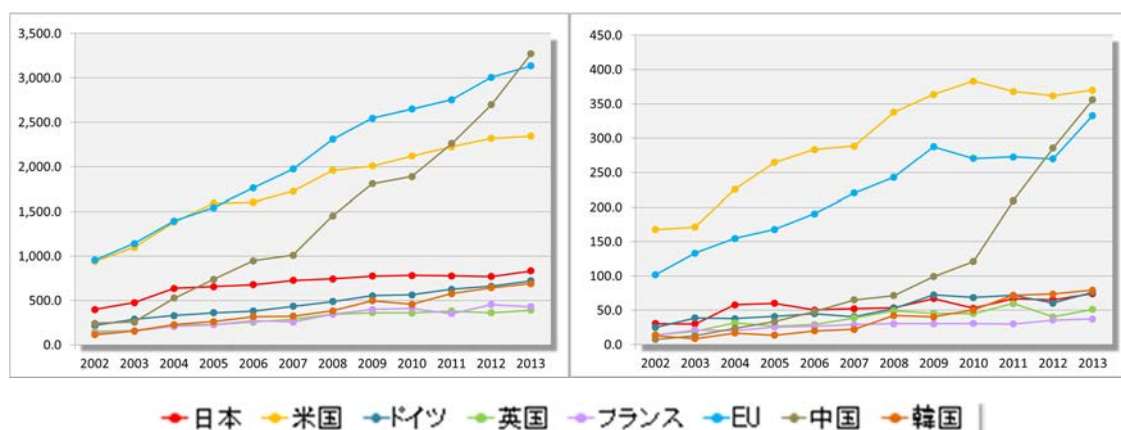


図 2.31

・ナノテクノロジー・材料に関する基盤科学技術 (左: 論文数、右: 被引用トップ10%論文数)

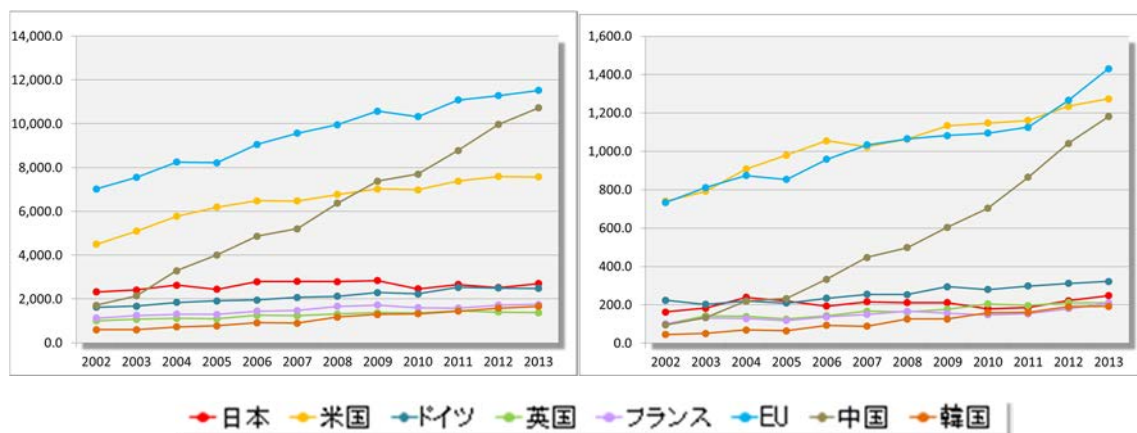


図 2.32

<特許>

特許庁は毎年特定のテーマを選定し、特許出願技術動向調査を実施している。その「特許出願技術動向調査報告」において、Derwent World Patents Index (WPI) を使用して、出願人国籍別出願公開件数推移と比率 (パテントファミリー単位) を公開している。以下図 2.33~42 に本報告書と関連の深い領域について抜粋して掲載する。

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、最新の DB にも直近 2 年程度のデータはない、あるいは反映できていないことに留意が必要である。ここではだいたい 10 年程度のデータが示されているが、下記では直近 5 年程度に絞って分析する。

■太陽電池

トレンドとして上昇傾向にあり、2008 年頃までは日米欧が力を入れていたが、直近のデータを見ると、中韓が伸ばしていることが読み取れる。

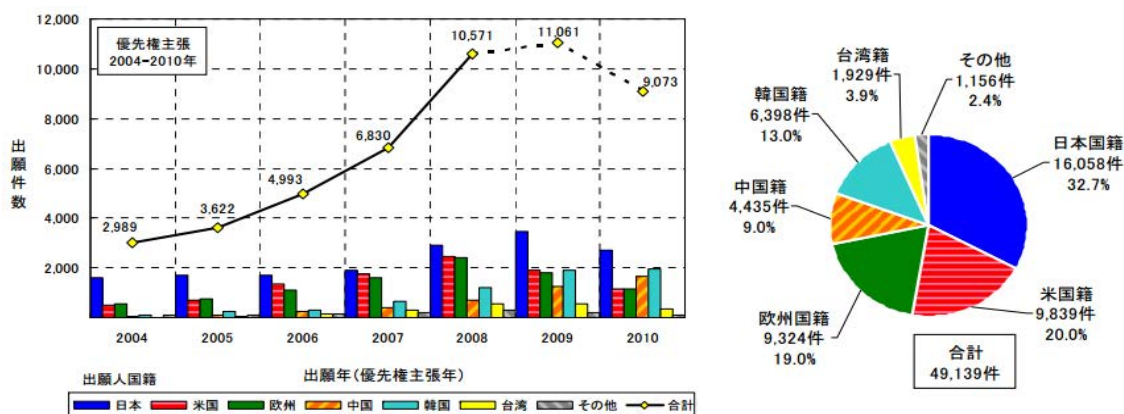


図 2.33 特許庁「平成 24 年度特許出願技術動向調査報告書 (太陽電池)」

■燃料電池

減少トレンドであるが、日本の独壇場であることがわかる。

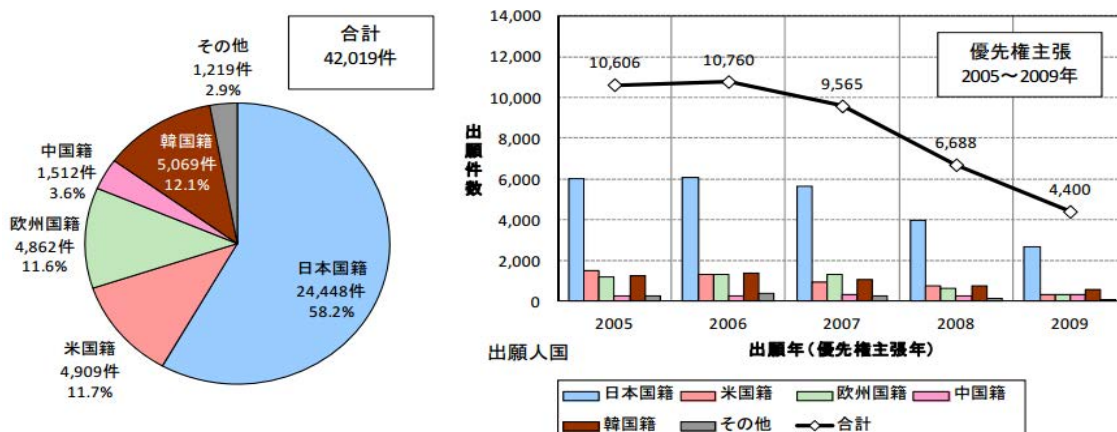


図 2.34 特許庁「平成 23 年度特許出願技術動向調査報告書 (燃料電池)」

■リチウムイオン電池

トレンドは微増であり、やはり日本が強いが、中国が伸びを見せている。

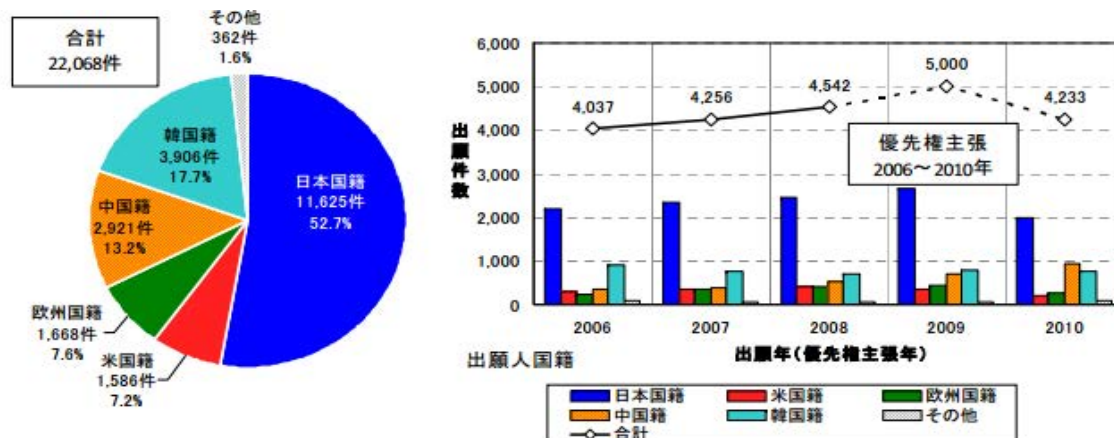


図 2.35 特許庁「平成 24 年度特許出願技術動向調査報告書（リチウムイオン電池）」

■熱電変換

上昇トレンドであり、日本と欧州が力を入れており、近年韓国が伸びを見せている。

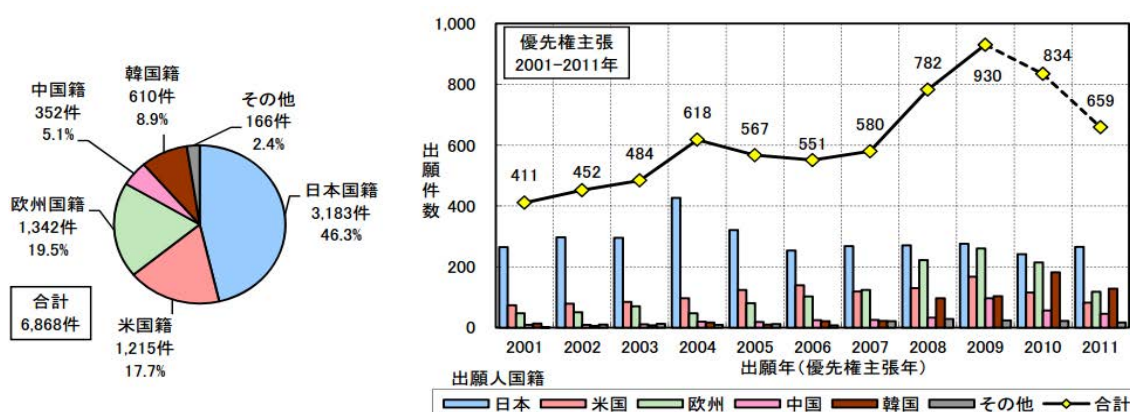


図 2.36 特許庁「平成 25 年度特許出願技術動向調査報告書（熱電変換技術）」

■パワーデバイス

トレンドは横ばいで、日本がダントツの強さをを見せている。

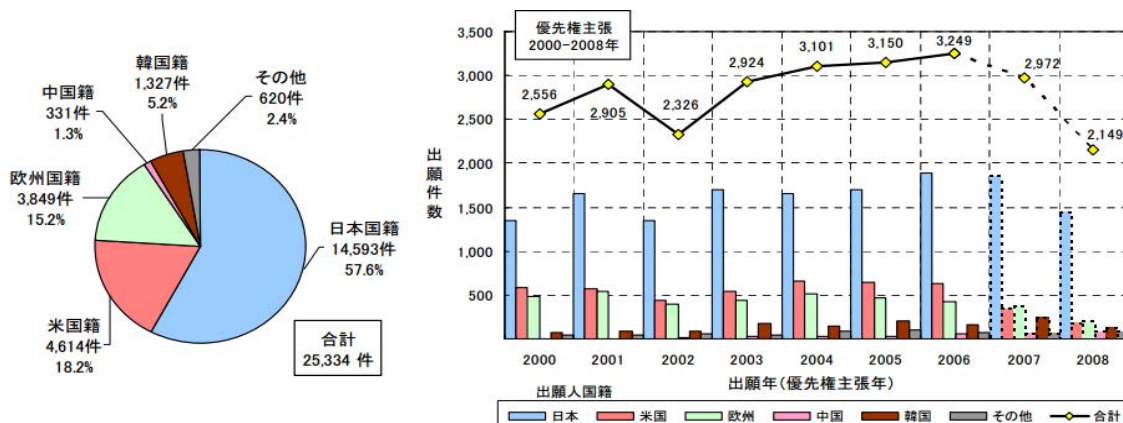


図 2.37 特許庁「平成 22 年度特許出願技術動向調査報告書（グリーンパワーIC）」

■スピンドバイス

横ばい基調の中、米国が強さを見せており、日本は下降傾向にある。

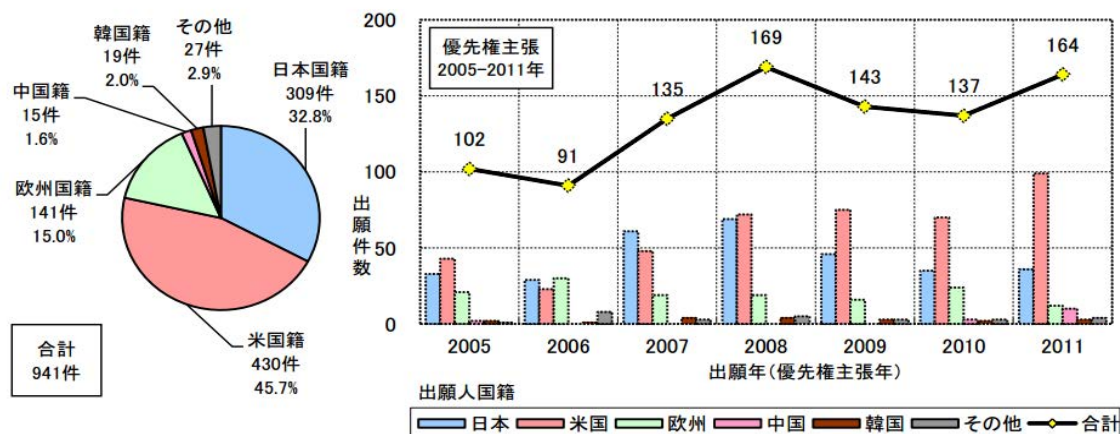


図 2.38 特許庁「平成 22 年度特許出願技術動向調査報告書（スピントロニクスデバイスとアプリケーション技術）」

■光エレクトロニクス

全体として下降傾向の中、日本は下降・横ばい傾向にある。

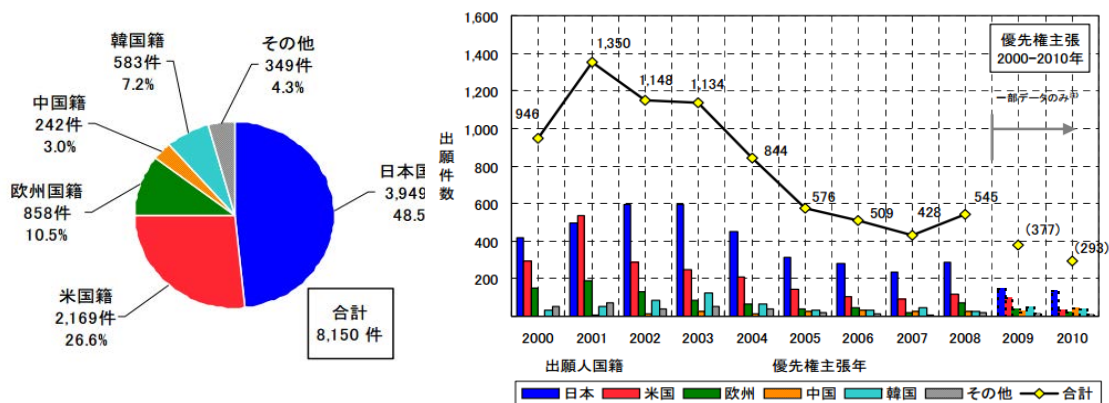


図 2.39 特許庁「平成 22 年度特許出願技術動向調査報告書（光エレクトロニクス）」

■炭素繊維

トレンドとして横ばいであり、日欧で安定した取り組みが見てとれる他、近年中国が勢いを伸ばしそうである。

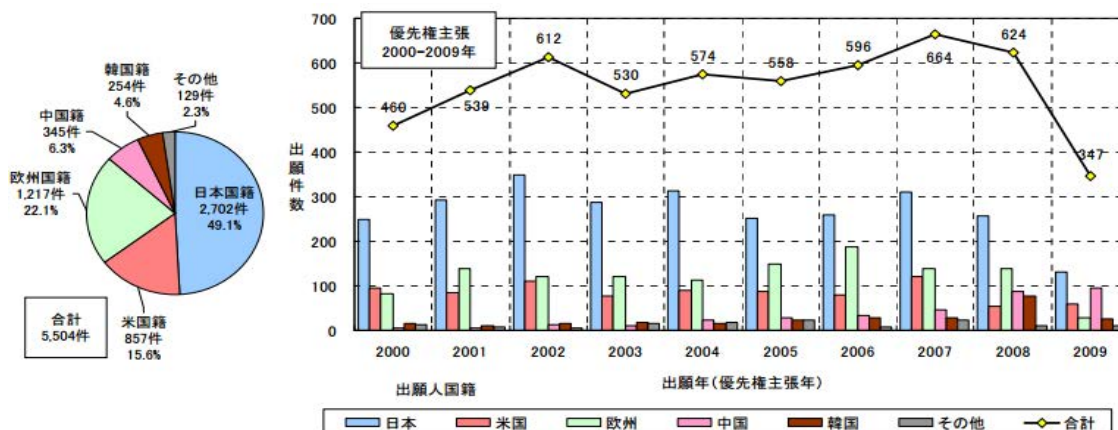


図 2.40 特許庁「平成 23 年度特許出願技術動向調査報告書（炭素材料及びその応用技術）」

■ナノカーボン材料

トレンドは横ばいであるが、中韓が勢いを見せている。

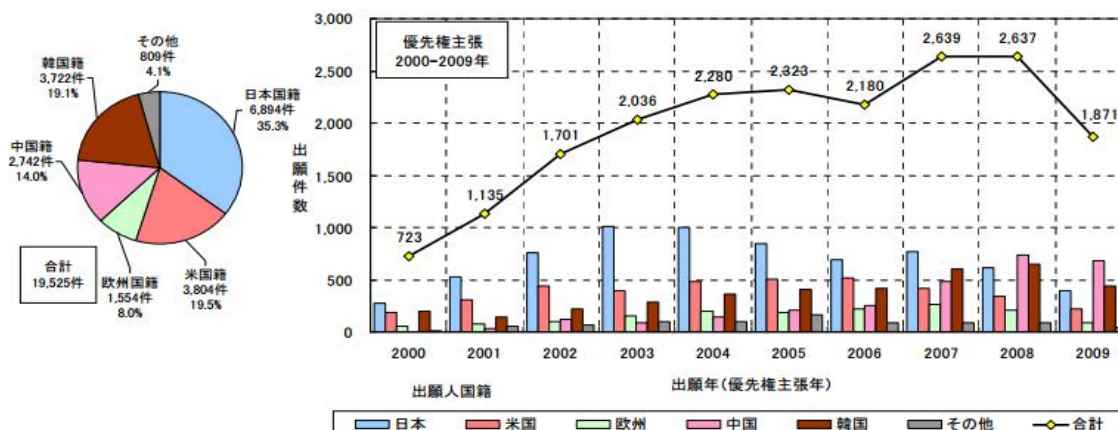


図 2.41 特許庁「平成 23 年度特許出願技術動向調査報告書（炭素材料及びその応用技術）」

■水処理膜

トレンドは横ばいであり、日本が存在感を発揮していたがここに来て中国が伸びを見せている。

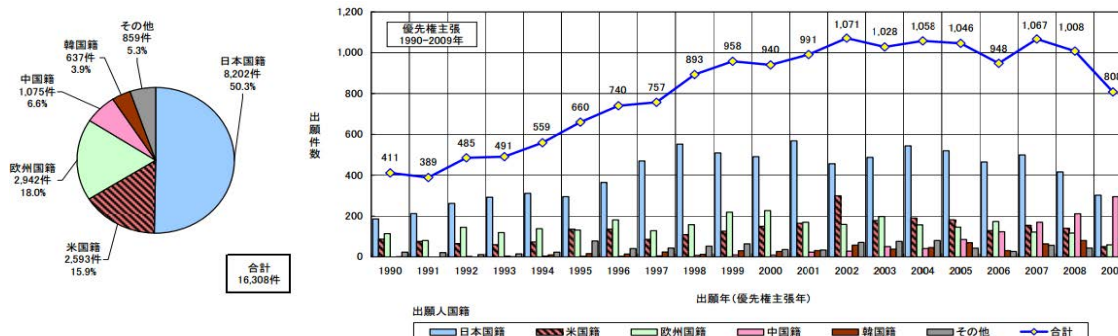


図 2.42 特許庁「平成 23 年度特許出願技術動向調査報告書（水処理膜）」

次に世界の特許出願公開動向について上記とは異なる切り口で概括する。

特許庁では、毎年、特許出願動向調査（マクロ調査）を実施し、日本、米国、欧州、中国、韓国における出願動向に関して、特許出願件数等の比較分析を行っている（Derwent World Patent Index（トムソン・ロイター社）を使用）。その中で、日本、米国、欧州いずれかの国（地域）・機関になされた特許出願であって、三極（日米欧）全てに国内移行しているものを「三極コア出願」と定義している。つまり、日本国籍出願人の三極コア出願件数は、①日本を優先権主張国（最初に出願した国）として米欧の公報番号を有するもの、及び②日本特許庁を受理官庁として最初に出願された PCT 出願であって三極全てに国内移行しているもの、を合わせた件数である。

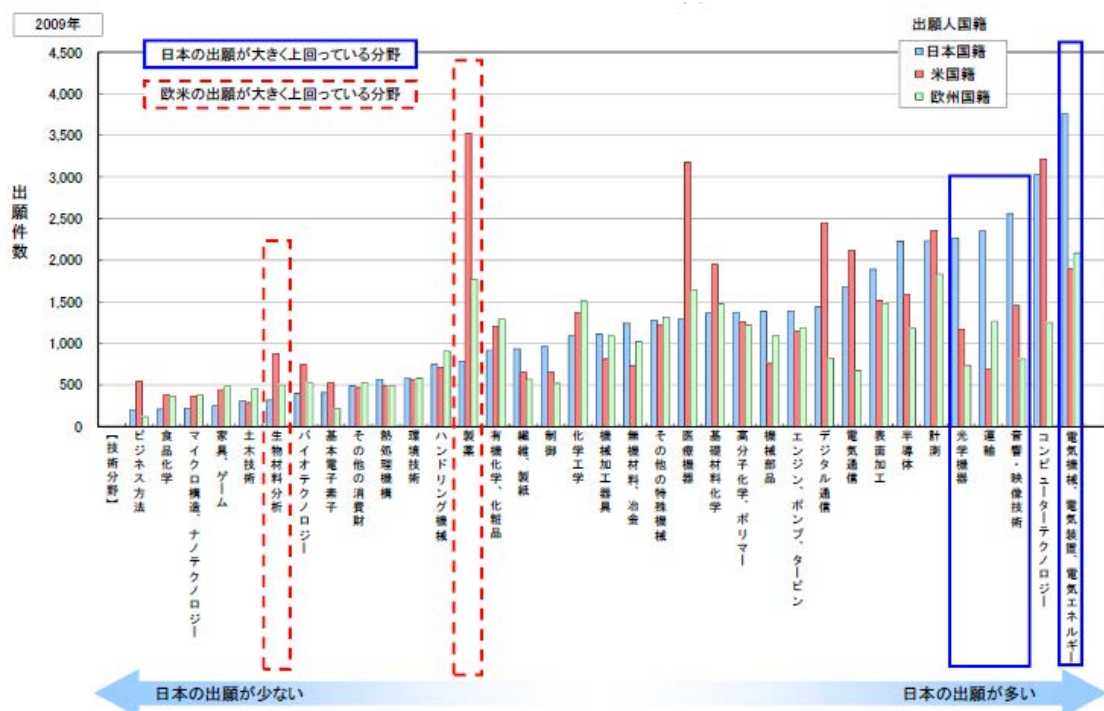


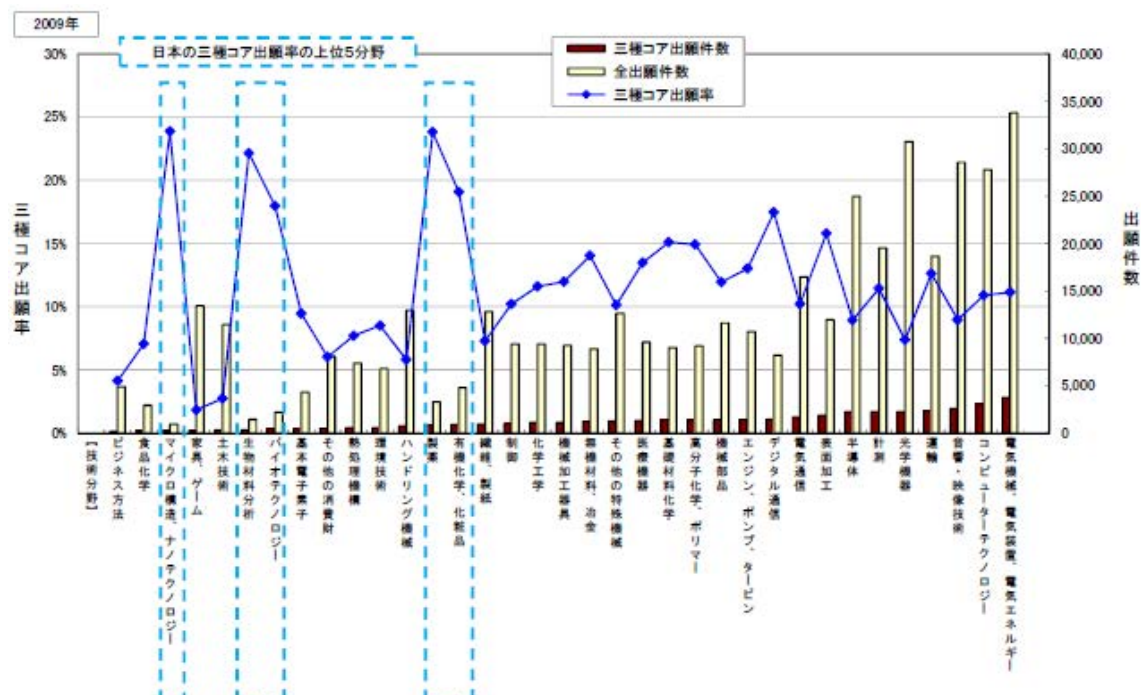
図 2.43

【出展】特許庁「平成 25 年度特許出願動向調査報告書（概要）－マクロ調査－」

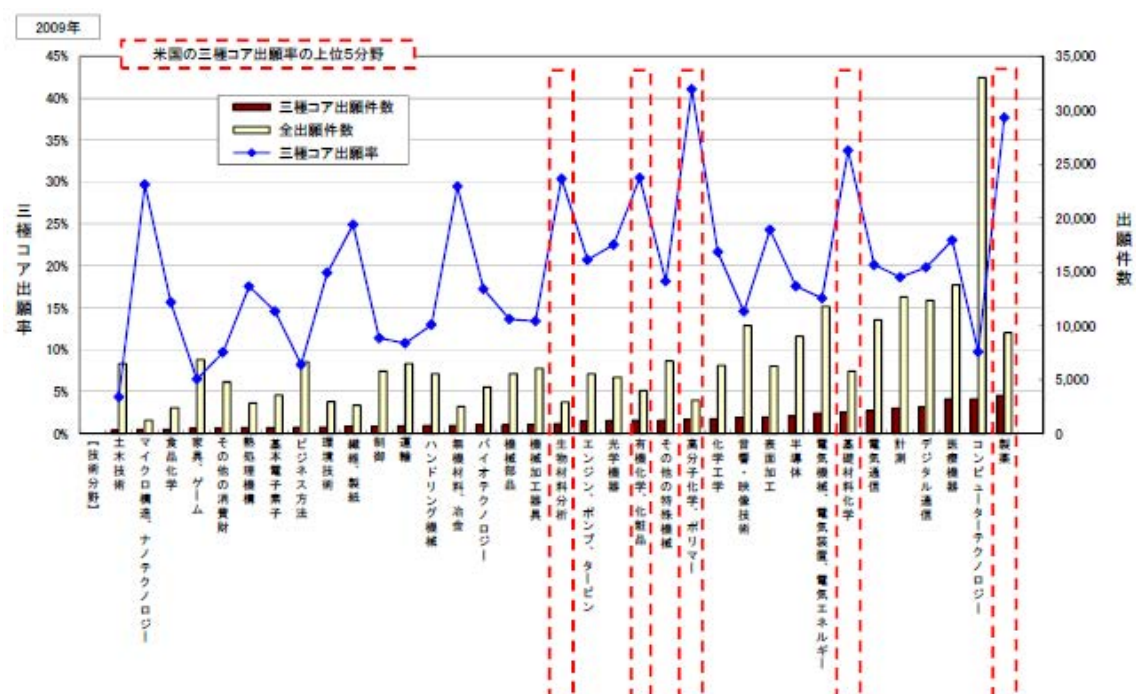
① 図 2.43 は、その国の産業が、国際競争力をもちたい技術分野として最も重視している（得意としている）分野と言い換えることができる。日本は電気機械、音響・映像などのエレクトロニクス分野、自動車に代表される運輸分野、デジタルカメラに代表される光学機器が多い。

② 次に、技術分野別の出願率（それぞれの技術分野において、日米欧それぞれの自国出願件数に対し、三極コア出願が占める割合）を見ると（図 2.44）、日米欧とも「マイクロ構造、ナノテクノロジー」、「有機化学・化粧品」が高い位置を占めることがわかる。また欧米では、「高分子化学・ポリマー」、「基礎材料化学」が高い数字を示している。

これらはいずれも、ナノテクノロジー・材料に深く関連する分野であり、本分野は産業競争が激しく、日米欧いずれの産業においても注視していることがわかる。



● 米 国



●欧州

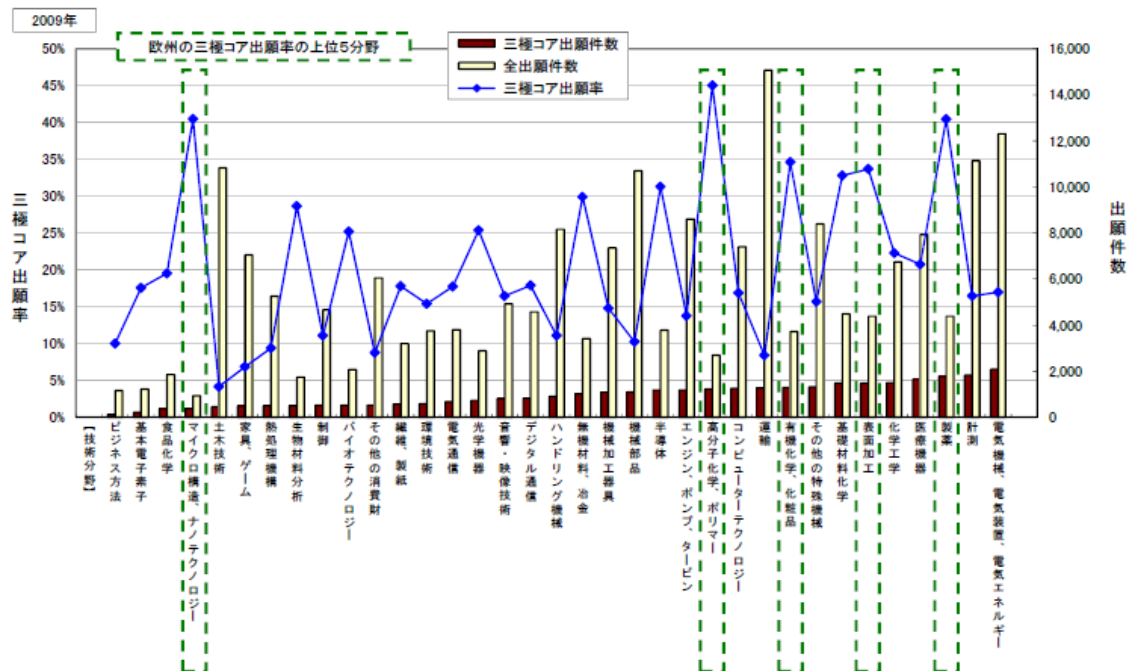


図 2.44

【出展】特許庁「平成 25 年度特許出願動向調査報告書（概要）ーマクロ調査ー」

(4) 分野別の俯瞰ワークショップのサマリー

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⁸では検討が不足していた5つの視座、バイオナノ、物質・材料、光、ナノ計測、設計・製造を取り上げた。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。ここでは、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のHPで公開)を参照されたい。

■ バイオナノテクノロジー

バイオナノテクノロジーは、生命現象の分子レベルでの理解に必要となる様々なツールの提供により、ライフサイエンスの深化・進展に貢献する。また幹細胞をはじめとする各種細胞のマニピュレーション技術、疾病の迅速・高精度診断を可能にするプローブ・デバイスや、精密に制御された薬物投与を実現するドラッグデリバリーシステムなど、医療技術の革新に不可欠な技術領域である(図2.45)。

・ 今後の研究開発の方向性と技術的課題

- 多数の細胞の平均としてではなく、1細胞を対象とした分子レベル解析を可能にする技術が求められている。試料の前処理から分子の検出までの機能を集積化した Sample-in、Answer-out 型のデバイスを実現するために、ミリメートルからナノメートルのオーダーまで10の6乗にわたるスケールで液体を駆動する技術開発。
- 細胞内での生体分子や薬物の振る舞いを理解し制御するには、温度、親疎水性、水の活量(存在状態)といった細胞内局所環境の情報が不可欠である。このような物理化学的パラメータを測定・可視化するための解析手法の開発。
- 細胞が発生する力(収縮力)の大きさは細胞の運命を決定付ける大きな要因である。収縮力の計測・可視化あるいは制御を可能とし、生命科学の研究者が広く使えるようなツールの開発。
- 生体臓器は、複数の細胞が集合して相互作用することで高い機能を発現している。生体臓器に近い機能と構造を有する3次元多細胞体は、再生医療分野だけでなく、創薬分野でも求められている。細胞間の相互作用を制御する材料技術や3Dプリンティングなどの造形技術を活用し、1細胞レベルで構造が制御された3次元多細胞体を構築する技術の開発。
- ナノ粒子を薬物のキャリアとした薬物送達システムは、患部に選択的に薬物を送達するだけでなく、生体イメージングとの一体化により、高精度診断や治療過程の可視化にもつながる。ナノ粒子の物性・構造と体内動態との関係を明確にしてナノ粒子の分子設計にフィードバックし、試行錯誤から脱却する必要がある。

・ 政策・制度の課題

- 異分野間をつなぐ橋渡し人材の育成とそのような人材を活かす場や評価システムの構築、研究開発の初期から幅広い分野の研究者による連携プロジェクトを支援する制度設

⁸ <http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/FR/CRDS-FY2013-FR-05.pdf>

計が必要である。

- 微細加工技術を活用したバイオデバイスの研究開発を実用化につなげるには、量産試作が可能なファウンダリが必須であり、そのような場を整備する。
- 社会のニーズは、企業だけでなく一般の消費者を含めたニーズに基づかななくてはならない。イノベーションを起こすには、消費者も加わる産学連携により、大学が社会のニーズを把握できるようなシステムの構築が必要である。

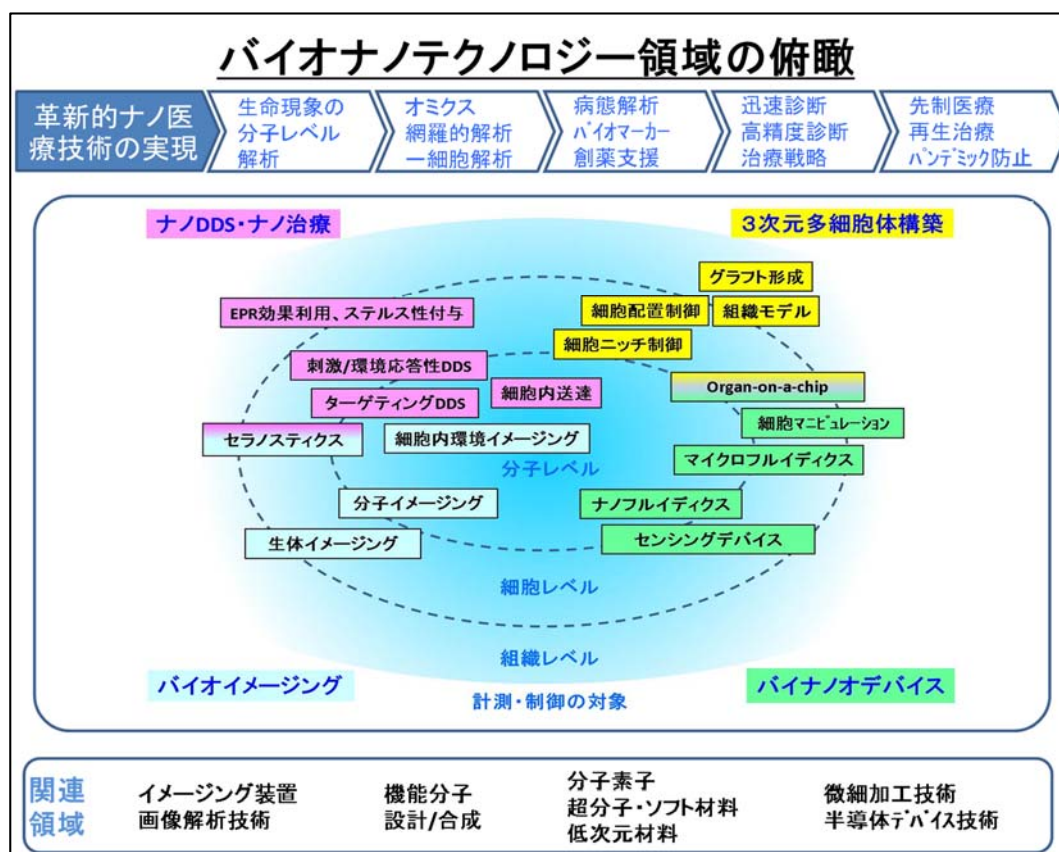


図 2. 45

■物質・材料

構造材料は金属を中心とした研究から複合材料まで、機能性材料（電子材料）は、シリコンを中心とした研究から、セラミクス、カーボン、有機分子と様々な研究の広がりを見せている。機能性材料には、超分子や生物材料（タンパク質や核酸など）を含む分子材料の進展もある。

- ・ 今後の研究開発の方向性
 - 3D プリントなど積層造形技術の活用による革新的材料の創出
 - マルチスケールの連結とメゾ領域（数十 nm から mm のオーダー）の制御による革新的材料・デバイスの創出
 - ボトムアップ的手法とトップダウン的加工法の活用による革新的デバイス創出
 - 理論と実験の一層の連携による予測に基づく物質・材料研究の促進

- 演繹的手法と帰納的手法の双方向の活用による革新的な物質・材料設計 (マテリアルズ・インフォマティクス)
- 二次元薄膜の複合・積層化による革新的デバイスの創製
- 輸送、相変化、非平衡、揺らぎなどの現象をテーマに異分野が連携することによる新しい価値 (材料の機能) の創出

・政策・制度の課題

イノベーションが起こる確率を上げていくためには、以下のような仕組みや場が必要である。

- 大学研究者の産業への貢献を評価する仕組み
- 大学と企業の定常的なコミュニケーションの場
- 大学研究におけるシステム統合 (垂直連携) の仕組み
- 明確な目標の下、コーディネータの巧みなさばきによるプロジェクト
- ソフト・サービス基盤の強化
- 異なるキャリアを持つ人材の役割連携によるチーム形成
- 新たな価値を創造できる人材育成のための教育や人材循環

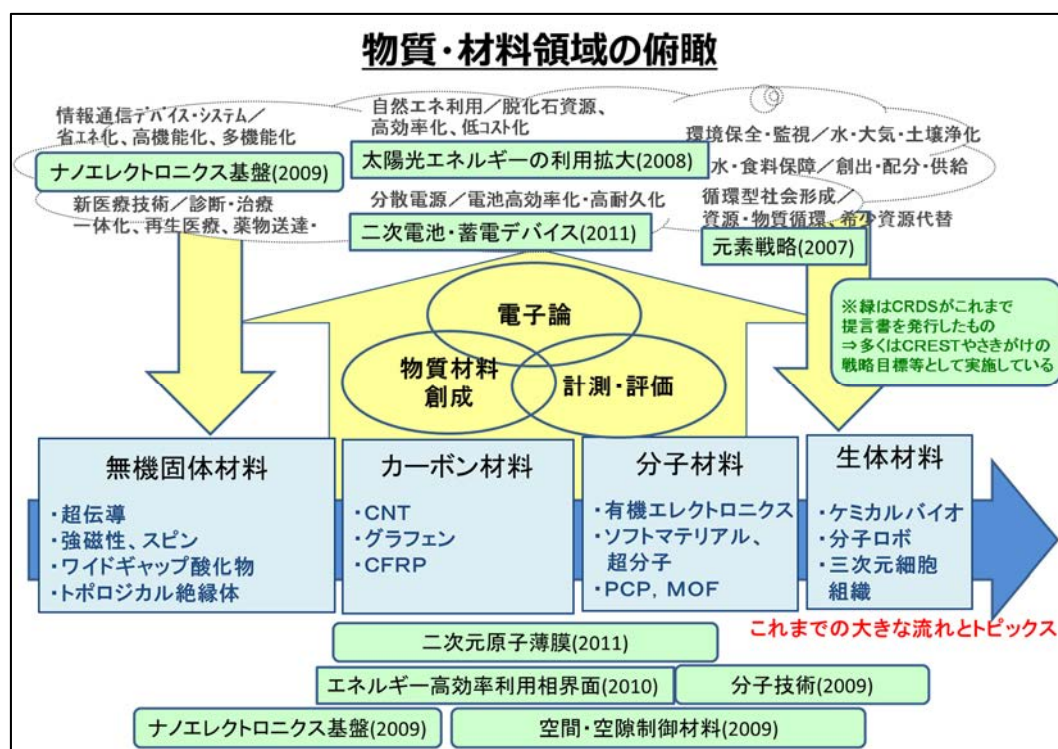


図 2.46

■光

光 (フォトンクス・オプティクス) 領域は広い応用分野に利用される基盤技術であり、光学材料や構造を基盤にして、光による物質計測、光による物質制御、光の発生・検出、光の制御・検出に関わる各種の光技術が進展している。今後は異分野の技術との融合・統合による新たな光技術の創成と、分野やレイヤーの違う人達との協業により、新しい価値を作っていくことが求められる。図 2.47 において、光の性質、光の特長で分類、社会と技術とのつな

がりを示した。

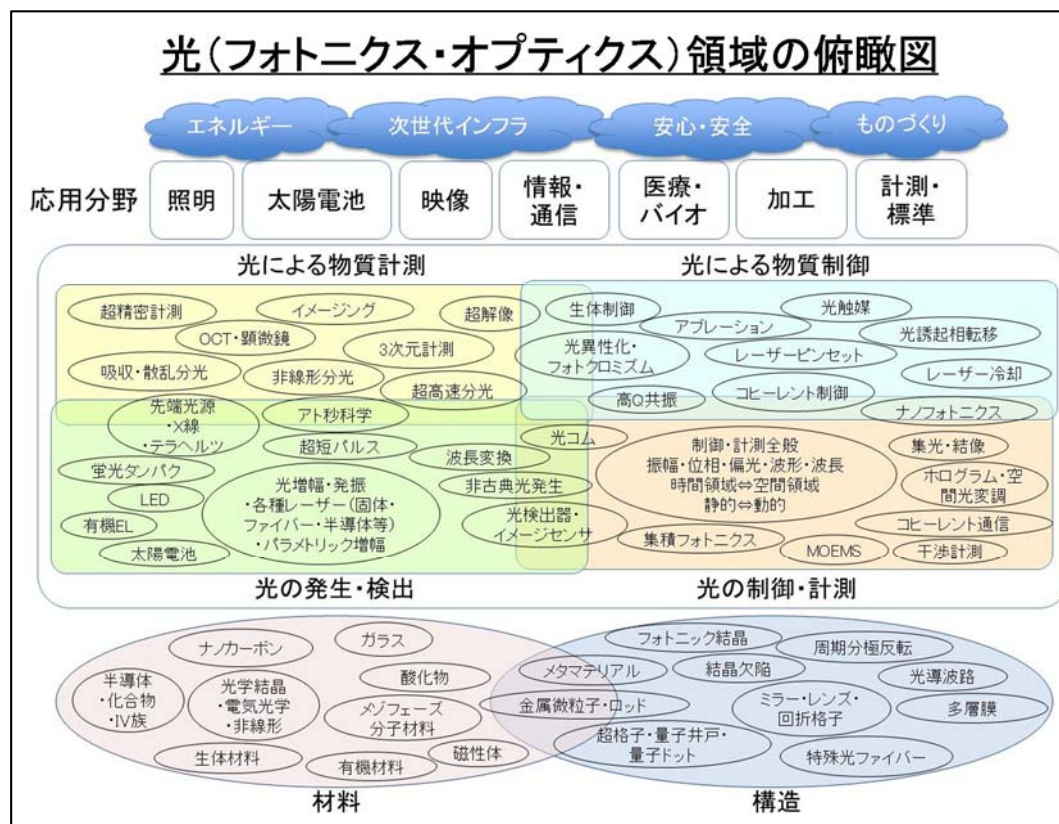


図 2.47

- ・ 今後の研究開発の方向性
 - － 新たな価値を創造するための、光技術と異分野技術との融合や統合を促進する研究開発。例えば、バイオセンシングの高速化・高感度化、生体材料の機能を模倣した新しい分離分析法の創出を目指した、光物理学と生命科学との異分野融合技術開発。
 - － 光ネットワーク・光配線や分析・医療用、ディスプレイ等の応用分野に向けた光デバイスの低消費電力化・小型化と高集積化。
 - － 微小共振器、フォトリック結晶、プラズモニクス、メタマテリアルなどとナノ材料の融合による革新的光技術の創成。
- ・ 政策・制度の課題
 - － 新たな価値の創出のためには、異分野の人たちにも重要性を示すプログラムのパッケージングが必要。
 - － 研究開発とともに、企業化・市場化していくための政策をセットでやる必要がある。
 - － 課題解決だけでなく、「光と物質」、「光と生命」など骨太の提案を募集し基盤技術をしっかりやることも必要。
 - － 装置貸し出しや試作サービスのプロジェクト外利用の制約など、制度上の規制や制約の改善が必要。

■ナノ計測

物質や材料の物性は、一般に原子あるいは分子が数個から数十個程度集まった大きさ、すなわちナノスケールの構造に起因する。複雑に見える現象であっても、ナノスケールの領域で生じる少数原子（または分子）間の相互作用に起源がある場合が多い。したがって、材料の物性や諸現象の起源を理解するためには、ナノスケールの構造や物性、さらにはその動的変化を直接計測できるナノ計測技術が必須となる。

材料物性や物理化学現象の起源を理解できれば、それらを制御し改善するための方向性や指針が得られる可能性がより高まる。また、その方向性や指針に応じたナノ構造制御技術を開発・改良する場合にも、構造・物性の変化を評価する技術が必要となる。このようにナノ計測技術には、物性や現象の起源を理解し、それを制御するための方針を立て、そして実現するための手段を確立する一連の過程において研究開発ニーズがある。ナノ計測技術はすでに幅広い学術・産業分野の発展にとって欠かせないものとなっている。

・今後の研究開発の方向性

- ナノ計測では、計算科学と計測技術、材料創製との連携による Plan Do See のポジティブフィードバック構築が重要。
- 複雑な材料や、材料のその場観察・リアルタイム観察のニーズが高まり、ニーズとシーズのマッチング機会の創出が肝要。
- 特に生命科学やエネルギー・環境用途の材料においては、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“その場ナノスケール計測”へのニーズが増大。
- とりわけ戦略的な仕組みを構築しなければならないのは、ナノ材料のリスク評価や、新材料開発と社会受容とを両立させる計測システム開発。そしてその結果を産業界が取り入れながら開発をおこなうことである。開発の初期段階から異なるステークホルダー間がコミュニケーションをとりながら連携して取り組む必要がある。

・政策・制度の課題

- 先端的なナノ計測技術は、継続して独自の技術を開発し続けられるかどうか競争を分ける。そのためには、国が関与した長期的な体制があるかどうか、世界的にも鍵になっている。また、国家プロジェクト等で開発した装置を広く展開するためには、展開のための導入措置が必要になる。産学両体として国の戦略的取り組みが決め手になる部分である。長期体制に伴う独自技術があれば、多くの新しい発見ができ、飛躍的な知の創出にもつながると考えられる。新しい測定技術は、効果を発揮する用途を見出していくことが重要であり、例えば研究開発の公募の際に、技術開発と応用研究の異なるチーム同士が一緒に取り組むことを条件にするなどの工夫が考えられる。

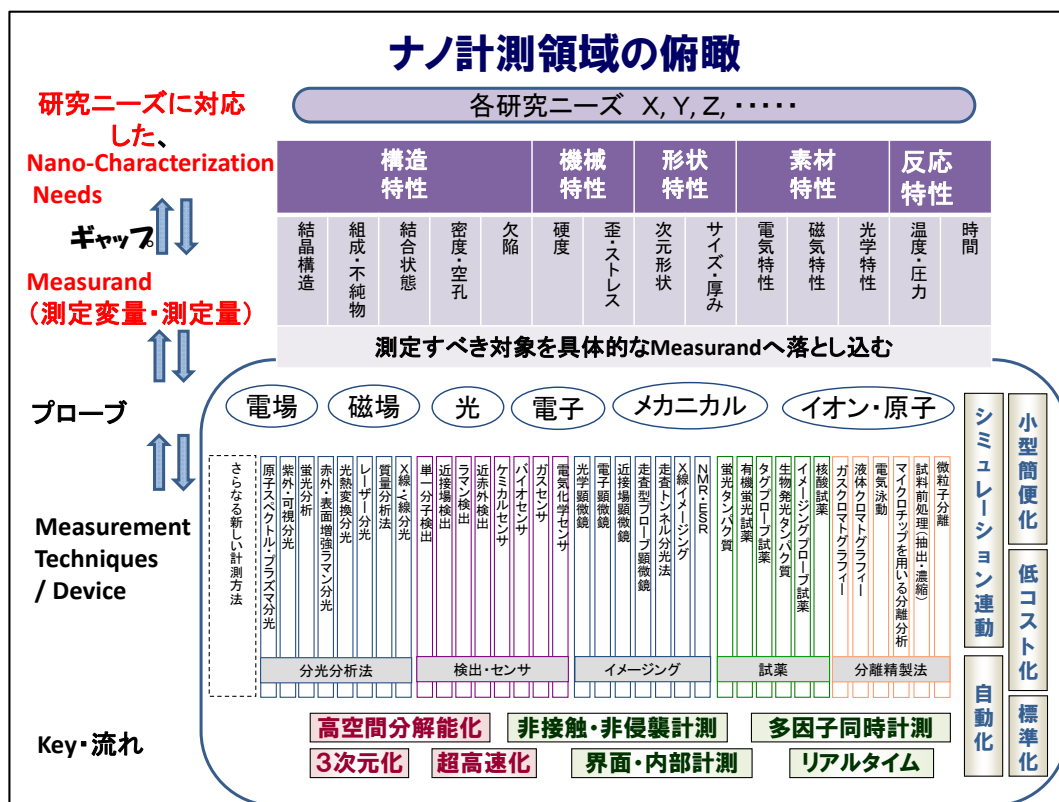


图 2.48

■ものづくり基盤技術

ナノスケールの設計・製造技術の上位概念である「ものづくり」が、産業的にも政策的にも世界的に新たな様相を呈していることから、ナノテクノロジー・材料という枠を超えて、ものづくり全般に対して俯瞰を行うことを試みた。この新たな展開には驚異的な進展を見せる IT 技術とものづくりとの融合、ものづくりのグローバルなバリューチェーンの再編、産学連携で後押しされたドイツのものづくり競争力の強化、3D 積層造形技術などへの注目を挙げることができる。

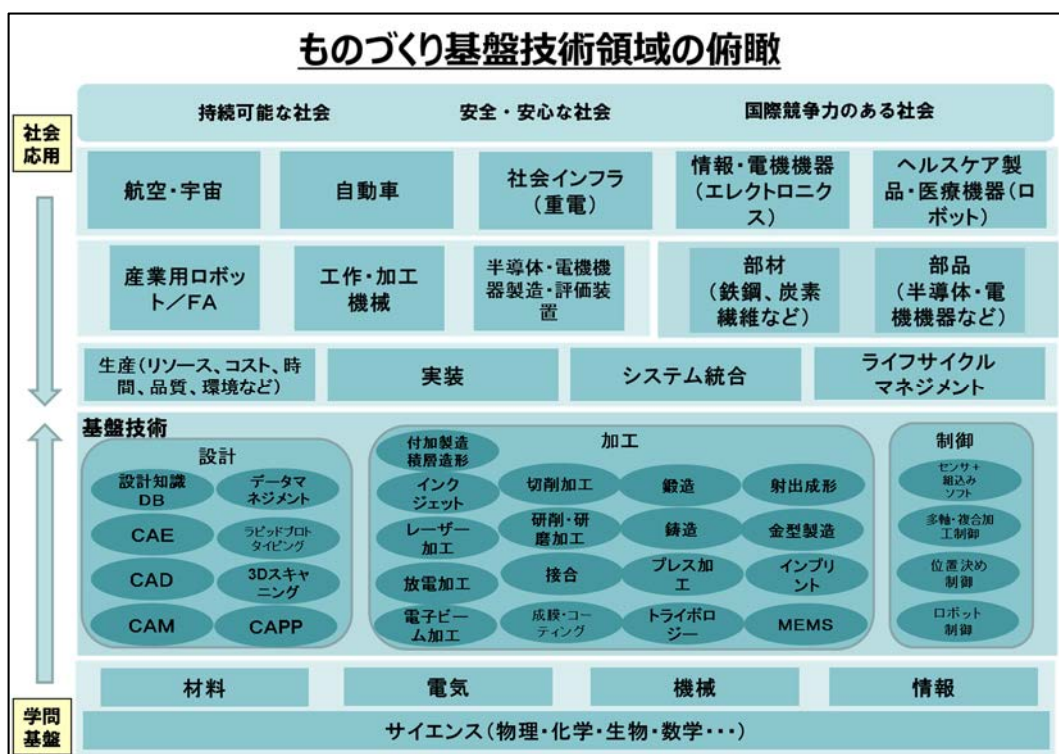
ものづくりは、日本において産業界が得意としてきた分野であり、産業用ロボットや工作機械など機械や電気分野は現在でも世界的に高いシェアを有する。アカデミアの強みは、①マイクロ・ナノレベルでの解析、制御（加工・形成技術や計測・評価、シミュレーションなど）や②ビッグデータに表現される先進的な情報処理技術など、歴史の浅い新しい（変革の激しい）学問領域といえる。

今後も日本のものづくり競争力を維持するためには、自動車やロボット等のシステムものづくりを支える設計(ビッグデータやシミュレーション等の活用)、製造技術(先進加工技術、ロボットやAI等)などについて中長期的に取り組む必要があり、材料、機械、電気、情報の統合を可能にする産学のプラットフォーム(ハブ拠点と全国ネットワーク)の設置などが考

えられる。ドイツのフラウンホーファー研究機構のモデルをおおいに参考にすべきである。

【海外動向】ものづくりに関する世界の新潮流

- 米ゼネラル・エレクトリック（GE）、米シスコシステムズ、米 AT&T、米 IBM、米 Intel の 5 社が 2014 年 3 月にインダストリアル・インターネットや Internet of Things (IoT) に関する普及推進団体「Industrial Internet Consortium (IIC)」を設立した。インダストリアル・インターネットとは、先進的な産業機器、予測分析ソフトウェアと意思決定をする人々が結び付き、この結果、医療技術の向上、鉄道や航空機における輸送プロセスの変革、発電電における効率的なシステムの登場、などを通じて多くの産業における生産性の向上を実現しようとするもの。
- Industrie 4.0 は、ドイツ政府が 2011 年から CPS（Cyber Physical System：サイバーフィジカルシステム）による製造業の変革を実現するとして推進している取組みであり、開発・生産・サービスといった製品のバリューチェーン上のプロセスで扱う情報を、細かくリアルタイムに収集し、取得した情報と既存の情報を解析し、製造装置の制御データや生産管理用のデータとして使うことで、刻一刻と変わる市場ニーズや、工場の稼働状況、原材料の状況に応じて、最適な製品を、最適な時期に、最適な量生産し、市場投入できるようにすることを目指している。



【コラム】3D プリンタ

研究の世界では、付加製造 (Additive Manufacturing) と言うことが多い。世界最大規模の標準化団体である ASTM では、“process of joining materials to make objects from 3D model data” (3次元デジタルデータからものを作るために材料を結合するプロセス) と定義している。ここでは、主にプロセスと材料の観点から記載する。

複雑な形や複合的な材料構成で部材が作れる **Complexity** (切削加工や成形加工は、工具が抜けるところがないと絶対にものできないが、付加製造はかなり複雑な形ができる)、データからダイレクトに早く安く作れる **Rapidity** (データを基本としているので、インターネットとの相性が良く、銃のデータが一瞬にして世界中飛び回ることが起こる) の他、切削加工との大きな違いとして、切りくずがないので非常にエコであることなどが大きな特徴として挙げられる。

数万円で売られているパーソナル向けの 3D プリンタ (コンシューマー用) と工作機械として電子ビーム等を使った 130 万ユーロ (約 2 億円) するもの (企業向け) は、利用者や利用シーン、市場などがまったく異なるものであることを認識する必要がある。さらに後者には試作用途に用いるものと実製品製造に用いるものがある。これらの用途によって製作物に求められる精度、強度、コストが異なってくる。

材料を結合させる代表的な方法をいくつかあげる。

- 光硬化性の樹脂(液体)をレーザーで固め、積層させるもの (光造形方式)
- 溶かした樹脂をノズルから出して積んでいくもの (熔融押出・FDM 方式)
- インクジェットで材料を選択的に供給して固めるもの
- 粉を敷いておいてレーザーや電子ビームで溶かしてくっつけるもの (粉末床熔融結合・粉末焼結 (パウダーベッド) 方式)
- レーザー肉盛溶接の原理を用いて、素地をとかしてそこに粉を供給するもの (指向性エネルギー堆積方式)

焼結・熔融するためのエネルギーを局所的に与えるためのビーム源 (プロセス) として、レーザービームと電子ビームの 2 つの方式がある。前者は、高出力のファイバーレーザーが使用されており、高出力化・多重光源化が進んでいる。後者は、レーザービームに比べ照射深さ方向にビーム幅をほとんど変えずに侵入するため、敷き詰めた粉末を深さ方向に効率良く熔融させることができ、 2000°C を超える高融点材料でも高密度に造形が可能となる。また、真空中で造形するため、酸化および窒化の影響がなく、高品質な金属製品の造形に適している点である。さらに、熔融前に行う予備加熱により、熔融・凝固後に生じる製作物内部の残留応力を消失させる効果が得られ、造形物の強度が増すと考えられている。真空チャンバーが必要となるなど両者の長所と短所は相補的であり、それぞれが得意とする材料、加工品質、生産性によって応用分野を分ける傾向にある。

材料は樹脂、金属で主流あるが、セラミクスや細胞等への応用も始められている。金属も

ステンレス鋼、アルミ、チタン合金など様々な材料が用いられるようになっている。コンシューマー用の主流はFDM法でABS樹脂とPLA樹脂を用いるものである。試作用としては、ABSライク樹脂、PP（ポリプロピレン）ライクなどのエポキシ系の紫外線硬化樹脂をFDMや光造形法で結合させるものが多い。

今後実（最終）製品に3Dプリンタが用いられることはあるのか、拡大していくかという疑問に対し、2つの観点から優位性を発揮できる場面を想定する。一つ目としてやはり現状では、中空構造をもつような三次元複雑構造やトポロジー最適化（バイオミメティック構造）などの機能や付加価値を著しく向上するような特殊な形状・構造の多品種少量生産に向いていると考えられ、この特性をいかして出口をどこに設定するかが非常に重要であると考ええる。もう一つ、高機能金属材料、たとえばチタン合金、チタンアルミ合金、ニオブ系の高融点合金というのは、ほとんど活性、あるいは脆いといった特性をもっており、通常の塑性加工方法は非常に適用しにくい。熱間鍛造ができない、鋳造のときに元素の偏析が大きくなる、あるいは鋳造欠陥が生じて、さらには鋳型との反応によって材料特性が非常に劣化してしまうといった問題に対し、積層造形によってこれらの問題が解消する可能性がある。上記の観点から、現状では、医療機器分野で患者毎に最適にデザインされた人工歯・人工骨等、航空・宇宙分野の超高機能部品等が取組まれている。例えば、ボーイング社・GE社は、ジェットエンジンのパーツ製造などにおいて、中が入れ子構造になっており従来は別々に作ってロウづけしていたものを一体で作れるようにしているなどの例がある。

技術的な課題は実環境で求められる精度、強度を実現する材料・プロセスの一体的な開発であり、特にセラミクスや金属において、材料科学・工学（結晶学、メタラジー・冶金学など）が重要な課題と言える。

1980年に小玉秀男（名古屋工業試験所）により光造形の特許が出願された（審査請求せず）ことに端を発するとも言われているが、現在3Dプリンタの市場は、米国のStratasys社および3Dsystem社の2社で、世界の8割程度を占め、電子ビーム積層造形装置は、世界で唯一スウェーデンArcam ABが製造販売しており、日本は遅れをとっている。

米国はNational Network of Manufacturing Innovation(NNMI)プログラムの下、2012年8月、オハイオ州ヤングスタウンNAMII（National Additive Manufacturing Innovation Institute）85以上の企業、13の研究型大学、9のコミュニティカレッジ、18の非営利団体・学会が参加している。ドイツでは、フラウンホーファー研究機構が付加製造に関する産学官のアライアンスを構築している。

経済産業省では、平成26年度より、「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム」を実施し、27社、4大学・公的機関の参画を得て、装置の高速・高機能化や製品の高精度化、金属等の粉体材料の多様化・高機能複合化等の技術開発を実施している他、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）／革新的設計生産技術では、複数の3Dプリンタに関連する課題が採択されている。

参考文献：ナノテクノロジー・材料分野俯瞰ワークショップ報告書「ものづくり基盤技術分科会」、新野教授（東京大学）、千葉教授（東北大学）発表等

2.2.1.5 産業動向⁹

わが国の部素材産業は、機能性材料分野を中心に、市場規模が小さくとも高い世界シェアを確保している製品を多数有しており（図 2.50）、部素材産業としてまとめると面として大きな市場を獲得している。製品別の世界シェア獲得状況の詳細をみると、自動車、デジタルカメラ等の精密機器では、日系企業のシェアが高く、同様に関連部素材も日系企業のシェアが高い。一方、携帯電話、半導体等の製品では、日系企業の世界シェアが低下傾向にあるが、関連部素材は日系企業のシェアが高いものも依然多く存在する。

個別の材料では、半導体材料、液晶ディスプレイ材料、リチウムイオン電池材料、炭素繊維、水処理用分離膜など、日本企業が世界市場で非常に高いシェアを獲得している品目が多数存在する。一方で、液晶用フォトリジストやカラーフィルタなど一部の液晶ディスプレイ材料、リチウムイオン電池材料のように中韓の急迫により大きくシェアを低下させている素材があることにも目を向けなければならない。

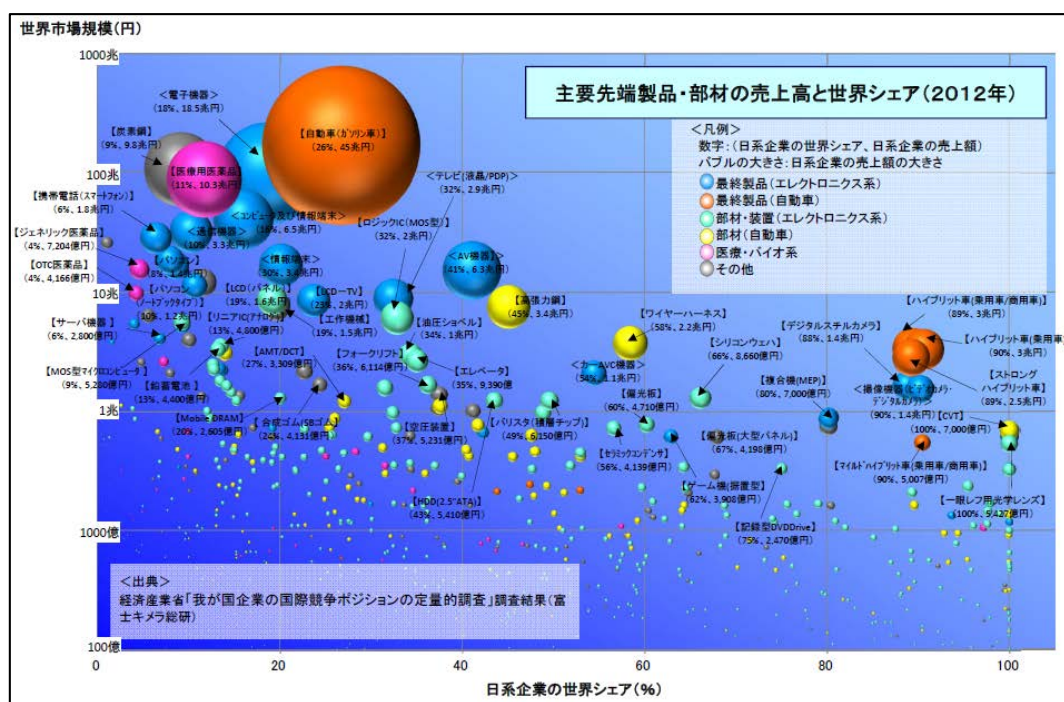


图 2.50

【出展】経済産業省、富士キメラ総研「我が国企業の国際競争ポジションの定量的調査」平成26年3月

一般的に、材料と異なり、ナノテクノロジーはプロセスに使われたり、デバイスの一部の材料に使われたりと、極めて多様な使われ方をするため、どう生かされたかを最終製品から判断することは難しく、そのため成果が目に見えにくいという特徴がある。ナノテクノロジー関連商品が市場に出始めて急速に立ち上がる傾向が見えており、英 BCC Research 社がおこなっている市場予測では、2014 年の世界のナノテクノロジー市場はおよそ 260 億ドルに達し、2019 年まで年平均成長率 19.8%で推移し、640 億ドル規模に成長する見込みであると述べている。

⁹ 【出展】経済産業省、富士キメラ総研「我が国企業の国際競争ポジションの定量的調査」平成26年3月

平成 12 年から 24 年にかけての日本の輸出額の世界計では、12 年間で「化学製品」が 7.4% から 10.0%、「原料別製品（鉄鋼や非鉄金属等）」が 9.8% から 13.2%、「輸送用機器」が 21.0% から 23.5% とシェアが拡大したのに対して、「電気機器」が 26.5% から 17.9%、「一般機械」が 21.5% から 20.1% とシェアが縮小しており、平成 24 年は「輸送用機器」（23.5%）、「一般機械」（20.1%）、「電気機器」（17.9%）の順でシェアが高い。

ただし、製造業の海外生産比率は 2000 年度の 11.4% から 2013 年度には約 20% まで上昇しており、これが日本からの部品・素材の輸出と最終製品の輸入につながっていることに留意が必要である。

■自動車

自動車は、市場の規模、構成する部品を見ても非常に裾野の広い産業と言えるが、自動車の革新には材料技術が密接に関係している。鉄、アルミ、樹脂は自動車の三大材料と言えるが、他にもタイヤのゴム、フロントガラス、センサに使われているセラミックス、排ガス浄化の触媒など重要な材料が多い。

図 2.51 を見ると、川上の材料から川下の製品本体まで、日本が高いシェアを有する分野であることがわかる。自動車のセット部品を構成する部品・部材には、各種センサやマイコン、半導体等が含まれる。

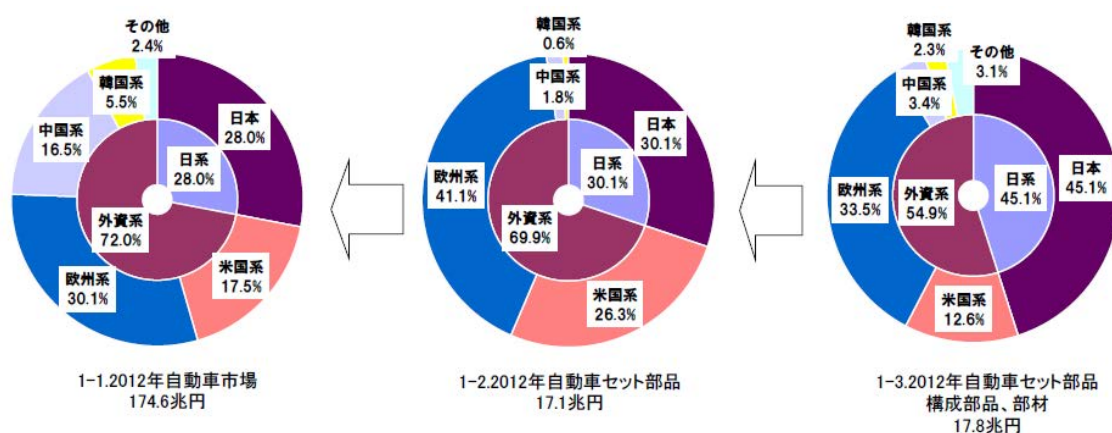


図 2.51

【出展】経済産業省、富士キメラ総研「我が国企業の国際競争ポジションの定量的調査」平成 26 年 3 月

■半導体・エレクトロニクス

パソコン、タブレット端末、スマホ（携帯電話）、テレビをはじめとするデジタル家電、半導体などの電子情報産業全体の世界市場は 250 兆円ほどであり、自動車をしのぐ規模を有する。日本が得意であったエレクトロニクスも、半導体技術に代表されるデジタル化、アジアの台頭により開発のモデルが大きく変わり、グローバル化が進んでいる。特に、パソコン、携帯電話、テレビなどのセット機器の日本のシェアは大きく低下していることは周知の事実である。一方で、半導体材料、電子部品については、依然日本メーカーが世界的に高いシェ

アを有する。しかし、タブレット端末やスマートフォン等の成長で売上の伸びが堅調なメモリなど、電子部品・材料分野等の一部の分野において、韓国・中国・台湾勢が猛迫しており、圧倒的に優位であったその地位が揺らぎつつあることも事実である。

図 2.52 の集積回路には、ロジック IC のほか、マイコン、DRAM、フラッシュメモリなどが含まれる。個別半導体は、パワー半導体やその材料が該当する。パワー半導体は日本が強い。2030 年には 4 兆円規模の市場になると予測されている。半導体を構成する材料、または作製するための材料については、日本が軒並み高いシェアを有している。一方、DRAM や NAND フラッシュ等では韓国が、過半のシェアを占める。

図 2.53 の光ディスク装置は、CD、DVD、Blu-ray などのドライブが該当し、その装置は半導体レーザー、光ピックアップ用の各種部品などからなる。ハードディスクの部品とともに、日本が世界で高いシェアを有する。

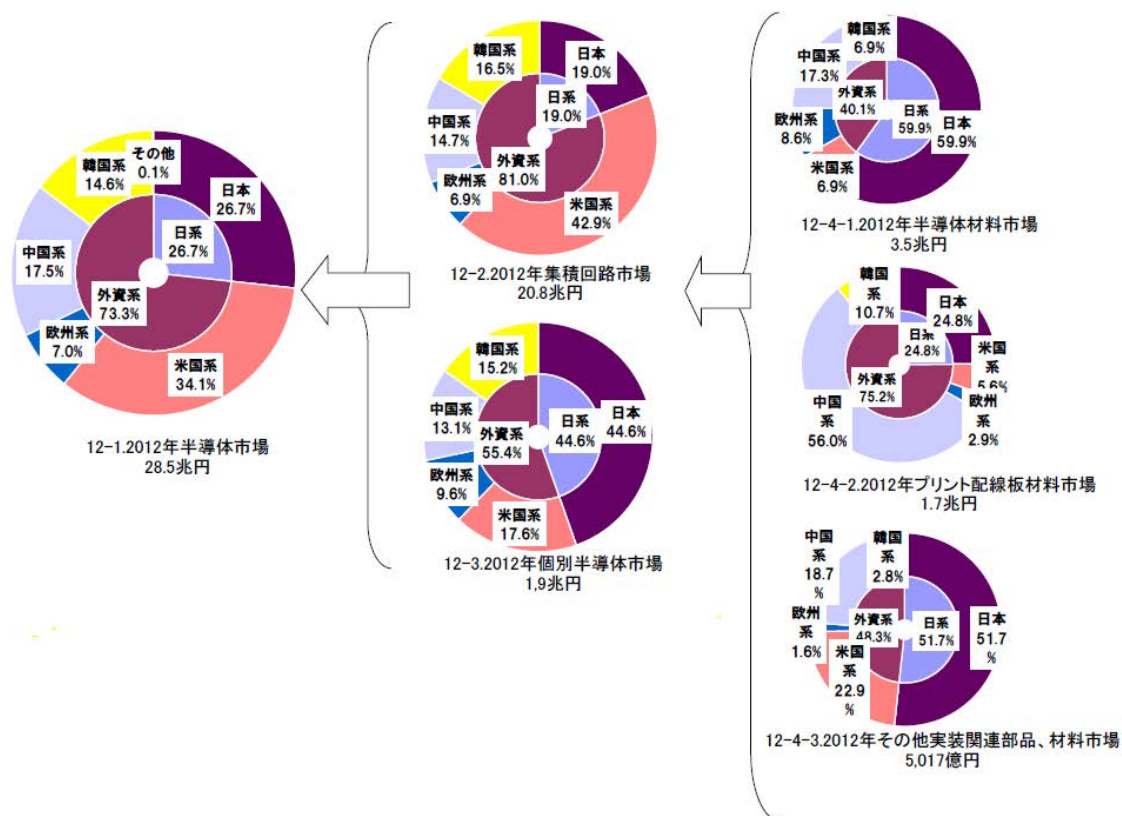


図 2.52

【出展】経済産業省、富士キメラ総研「我が国企業の国際競争ポジションの定量的調査」平成26年3月

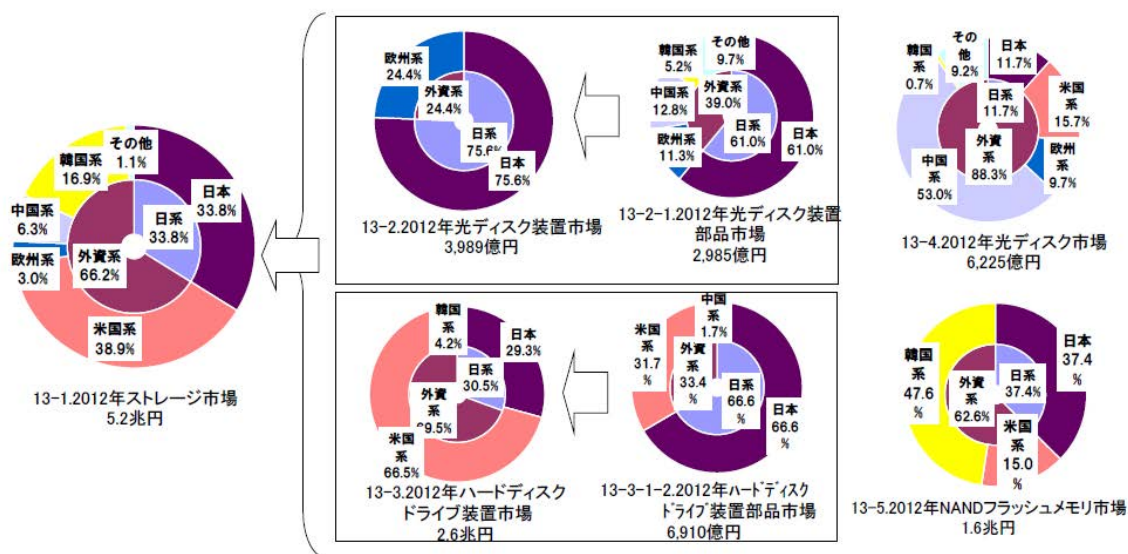


図 2.53

【出展】経済産業省、富士キメラ総研「我が国企業の国際競争ポジションの定量的調査」平成26年3月

【コラム】ファウンドリとファブレス・ファブライト

1980年代後半から半導体分野で、設計と製造を別の企業が担うという分業が主流になってきた。半導体技術の進歩に伴って製造設備の費用が膨大になり、常に最先端の設備を保持するには数千億円規模の投資を続けなければならない時代になった。一方、最先端の半導体製品の設計では、大企業より少数精鋭のベンチャーの方が迅速に動いて有利な点が多い。このように、全世界規模での水平分業が進んだ結果、次第に半導体メーカ（いわゆる IDM：Integrated Device Manufacturer）の存在感は低下した。

日本でもここ数年、IDMがファブレスやファブライト（自社で最小限の製造規模を維持しながら大半の製造はファンドリに委託する）にシフトしているが、海外のファブライトに比べて戦略が中途半端になっている。海外のファブライトは投資コストに耐えられないことを理由にファブライトに移行するのではなく、自分たちの強みをより有効に生かすために設計に軸足を移している。一方で、アジアの Foundry や EMS (Electronics Manufacturing Service) は、世界中から半導体製品の発注案件が集まる結果、大量の情報が集まり、ノウハウと技術が蓄積される。Foundry や EMS が巨大になり、高い製造技術力を持ってくると、欧米や日本の企業の単なる下請けではなくなり、半導体事業における主導権を握るようになってくる。

今後、中国・台湾や東アジアにおいて特徴的なファブレス・ファブライトが台頭してくる可能性があり、日本のファブライト化も投資の重点化など、競争力確保のための戦略が求められる。

また、従来の製造ラインの発想から脱却し、製造設備の大幅な費用低減や、生産効率の向上、多品種少量生産への対応などを目的とし、産総研を中心に超小型生産システム（ミニマルファブ）を作る新たな動きも出てきた。0.5 インチ径の小さなウェハを用い、クリーンな専用カセットに入れてウェハを小型のプロセス装置に運び個別の処理を施すものであり、巨大

なクリーンルームや大型の装置を必要としない。2012 年からミニマルファブ技術研究組合が作られ、国家プロジェクト「革新的製造プロセス技術開発(ミニマルファブ)」として MEMS および LSI 用の装置開発、製造生産システム開発が行なわれている。日本独自の試みであり、これを使うことで競争力を発揮する新たな製品分野が生まれる可能性もあり、新たな生産方法として注目される。

■二次電池

低炭素社会の構築に向け、蓄電池の重要性がますます高まっている。蓄電池は、その電池特性等から、ナトリウム硫黄（NAS）電池に代表される中長周期の出力変動対策に適した蓄電池と、リチウムイオン電池やニッケル水素電池に代表される短周期の出力変動対策用に適した蓄電池、またいずれの用途にも適するレドックスフロー電池に大別される。

車載用としては、電気自動車、ハイブリッド自動車の時代になり、軽量かつコンパクトで大容量の電池が求められている。定置用としては、蓄電池を使うことにより、夜間に蓄電池に電気を貯めておき、電力需要の高まる昼間、蓄積された電気を利用することが可能になる。一方でパソコンやスマートフォンなどのモバイル機器における小型高容量における電池の重要性は変わることはない。これらの需要に応えるリチウムイオン二次電池の主要材料は正極活物質、負極活物質、電解液、セパレータであり、日本が世界で大きな市場シェアを確保している（図 2.51）。2020 年には世界全体の蓄電池市場は 20 兆円になると予測されている。

今後の二次電池市場で大きな割合を占めると予想されるリチウムイオン電池では、2000 年時点における世界シェアは日本勢が 93%を占めるなどほぼ独占状態にあったが、2014 年現在では韓国・中国メーカーなどの台頭もあり、世界シェアは 22%まで大きく落としている。負極材料や正極材料、セパレータといった電池材料はまだ日本のシェアが高いものの、二次電池そのもののシェアの低下とともに部素材のシェアが低下していくのではないかと懸念もある。

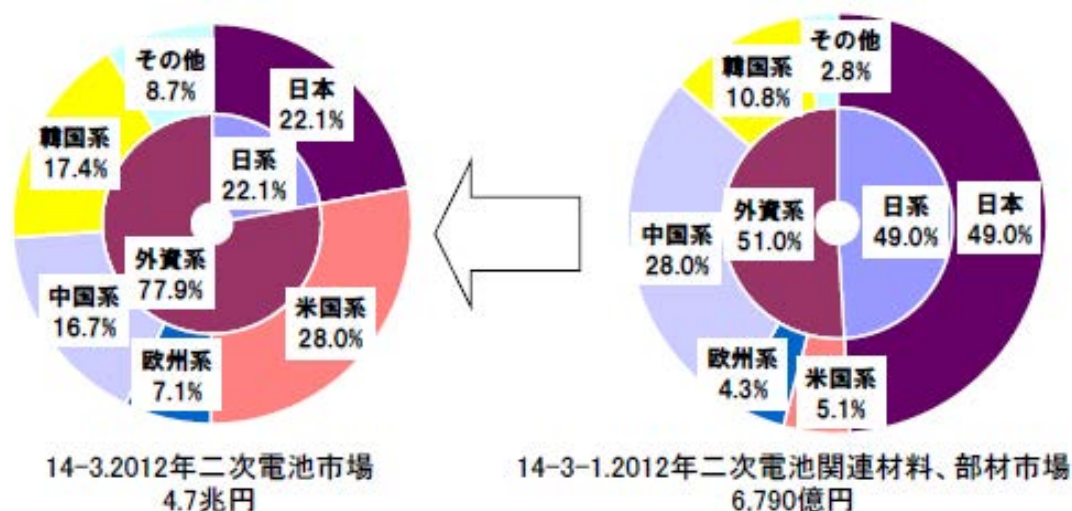


図 2.54

【出展】経済産業省、富士キメラ総研「我が国企業の国際競争ポジションの定量的調査」平成26年3月

■太陽電池、燃料電池

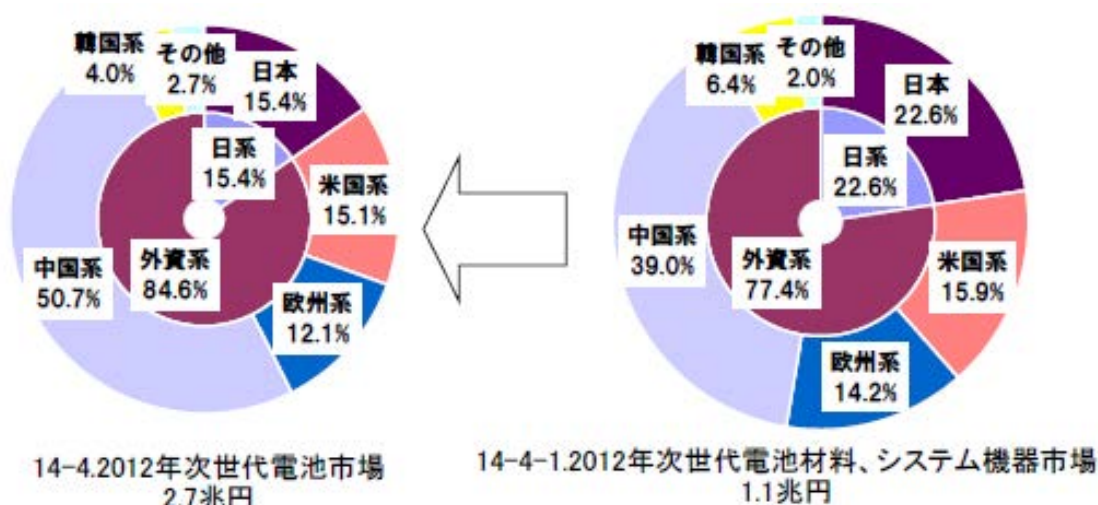


図 2.55

【出展】経済産業省、富士キメラ総研「我が国企業の国際競争ポジションの定量的調査」平成26年3月

太陽電池に関しては、国際的な低価格競争の中で、原料やウエハメーカーなど撤退を余儀なくされた国内企業や業績不振のセルメーカー・装置メーカーも少なくない。一方で、固定価格買い取り制度によって、国内各地のメガソーラー設備や住宅用向けにモジュール生産量は急激に増加した。集光型太陽光発電は、太陽電池の使用量が圧倒的に少量化できるため、低コスト化のための新技術として注目され始め、参入企業が増加してきている。直達日射量の多い地域では、今後ニーズが増えることが予想される。太陽光発電設備を含めたスマートグリッド関連技術の開発など、エネルギーのトータルソリューションを提供することでメーカーは生き残りをはかっている。太陽光発電システム技術の研究開発は、実用化された太陽電池の技術革新を含め、主として日本、欧州、米国の3極で進められており、中国、韓国における研究開発は現段階では実用化された分野の開発成果の吸収・国産化に主眼が置かれている。しかし、今後中国勢の台頭が一層顕著になると予想される。

国内のSi系の薄膜太陽電池では苦戦が続いている。海外他社との連携や、薄膜技術をヘテロ接合に利用した高性能結晶Si太陽電池の開発に活路を見出そうという動きもある。CIGS太陽電池については、ソーラーフロンティアが世界を牽引しており、年産1GWの生産規模は突出している。将来の海外進出時の基本製造プラントとすることを視野に入れ、最新の高効率化製造技術を採用した新工場を建設している。

燃料電池に関しては、2009年に家庭用燃料電池が市場投入され、2011年度の燃料電池システム世界市場は、約700億円であるが、今後2015年に燃料電池自動車が市場投入され、その後市場拡大が進むことで2025年度の世界市場は5兆円を超えると予測されている。

■炭素繊維と複合材料

炭素繊維の特長は軽くて強いことであり、省エネ時代のニーズに合致し、航空機、自動車をはじめとする輸送用機器分野、風力発電などエネルギー産業分野などで、今後の市場拡大が期待されている。現在は 2000 億円程度の市場であるが、その規模は年率 20%程度で拡大すると予想され、2020 年には 4,500 億円の見込みである。炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の成形品まで含めると、2.5 兆円程度の規模になると見込まれている。2012 年では日本の 3 社で世界の 7 割ほどと大きなシェアを占めており、今後も高いシェアを占めると予想される。炭素繊維の応用製品として、航空機、風力発電が今後も伸びるとともに、これまでは小さな割合であった自動車、土木建築、圧力容器などが大きく伸びると予想される。

■水処理用分離膜

水処理用分離膜は逆浸透膜 (RO 膜)、ナノフィルタ膜 (NF 膜)、限外ろ過膜 (UF 膜)、精密ろ過膜 (MF 膜)、イオン交換膜に大別され、水中の塩分除去、超純水製造、発電所や化学プラントの復水処理装置、下水・排水再利用等の幅広い分野で利用されており、今後も、水資源の限定的な海外地域における海水淡水化案件の増加により更なる拡大が予想されている。全体で 2000 億円弱の市場があり、日系企業は RO 膜・NF 膜で世界市場の約 5 割弱、UF 膜・MF 膜で約 4 割を占める (2012 年)。しかし、RO 膜・NF 膜では中国系および韓国系企業が徐々にシェアを増加させつつあり、シンガポールも水処理技術の研究開発に注力しており、アジア勢との競争が激しくなると予想される。

図 2.56 に関連する材料、デバイスの今後の市場規模の予測について、民間シンクタンクなどが公表している数値をまとめたものを示す。

産業動向 (主な製品の市場規模)			
	現在 (2012,2013)	将来	出展
太陽電池(※モジュール)	3兆1,300億円	5兆1,270億円(2030)	富士経済
燃料電池	—	5兆1,843億円(2025)	富士経済
蓄電デバイス	5兆円程度	20 兆円(2020)	経済産業省
	6兆4564億円	7兆5616億円(2018)	富士経済
パワー半導体	143億1,300万ドル	294億5,000万ドル(2020)	矢野経済
	1兆6797億円	2兆7907億円(2020)	富士経済
触媒	—	195億ドル規模(2016)	フリードニア・グループ社
半導体	3450億米ドル	3,553億ドル(2016)	世界半導体市場統計(WSTS)
半導体材料	3兆0,707億円	3兆7,013億円(2017)	富士経済
ディスプレイ	11兆7,091億円	13兆9,129億円(2019)	富士キメラ総研
プリントド、有機、フレキシブルエレクトロニクス	298億ドル	736億9,000万ドル(2025)	グローバルインフォメーション
センサデバイス	3兆2,669億円	4兆5,293億円(2020)	富士キメラ総研
バイオマテリアル	440億米ドル	884億米ドル(2017)	グローバルインフォメーション
再生医療	1,000億円	1,0兆円(2020)	経済産業省
再生医療周辺産業	2,400億円	1,1兆円(2020)	
生体イメージング装置	2,408億円	2,751億円規模(2018)	シード・プランニング
炭素繊維	1,500億円程度	4,500億円(2020)	経済産業省
高機能分離膜	1,122 億円	1,823 億 9,000 万円(2020)	矢野経済
	4,842億円	5,988億円(2020)	富士経済

※Web上で公開されているもののみ

図 2.56

2.2.1.6 世界の研究開発・イノベーション促進方策（環境整備）

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、制御が必要となっていることから、全ての専門領域をカバーする研究者集団、高額な実験装置とそれをフルに活用できる専門家を個々の研究機関や企業で確保するのは困難な時代となっている。

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大きくなっており、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。

- ・ コスト・リスクシェアによる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
- ・ 共通研究開発インフラ、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（融合化・システム化）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である。

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プロジェクトの計画と同時に）知財戦略、標準化戦略、技術の社会受容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、米国の Albany Nano Tech (ANT)、ベルギーの IMEC、フランスの MINATEC など、限られた拠点に集中し始めている（図 2.57）。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 2.57

2014 年現在 ANT に参加している主要民間企業は、IBM、Intel、GlobalFoundries、SEMATECH、Samsung、TSMC、Applied Materials、東京エレクトロン、ASML、LamResearch の 10 社である。その中で中心研究機関の SEMATECH は 2013 年に新た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 億円である。NY 州政府が約半分以上を支出し、企業が半分を、毎年出し続けている。2013 年にできた 450mm ライン “NanoFab X” を擁し、450nm 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 年秋から開始している。コンソーシアムは IBM、Intel、GlobalFoundries、Samsung、TSMC の 5 機関で構成される。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) 棟が完成予定である。

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。

IMEC は規模の拡大と充実が著しく、最近では幹細胞研究も対象としたバイオナノのセンターも発進させて、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、2015 年ころ 450mm のパイロットライン構築、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。

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 (2009 年) 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、フォトリソ、化学、生物医学であり、各種のセンター技術の開発にも力をいれている。また EU のグラフィックフ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 200mm、300mm のプロセスラインを持ち、クリーンルームの総面積は 7500m²、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、①International visibility、②Ecosystem generation、③Economic

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。

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拠点としての第1期建設計画を終えている。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り、アジアの中でさえ相対的に日本の存在感が失われようとしている。すでに、日本の主要企業が、国内の拠点ではなく、上記の海外拠点で自社の研究開発を大々的に行うことが増えている。技術的には、ポストCMOSあるいは微細化路線が、近い将来、限界を迎えることになるだろう。今後の基本戦略について、徹底的に議論すべき時期に来ている。

日本では、2010年4月にスタートしたつくばイノベーションアリーナTIA-nano（ティア・ナノ）は、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（KEK）が中核となり、日本経済団体連合会（経団連）とも連携した、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する取り組みである。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、産学官の資金・人材を集約し研究開発を行っている。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ている。

6つの重点領域については、内閣府FIRSTなど様々な国のプロジェクトがTIAを活用して進められ、多くの成果が創出された。TIA活用企業は200社を超え、外部から1000人近い人材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。なかでも、ナノグリーン領域における、NOIC（NIMS Open Innovation Center）やパワエレ領域における、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）のように、オープンイノベーションを促進すべく、国の資金のみならず、企業会員からの出資も得ながら、持続・自立可能な拠点経営を実践している例も出始めている。また、民間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民間企業に貸与することも行っている。

一方で、ANT、IMEC、MINATECに比べて教育・人材育成の面で弱い、コア技術開発が日本企業だけで多様性が無い、海外からのユーザ・ニーズが少ない、企業に対するPRが弱いといった指摘もある。特に参加学生数の少なさは、海外の拠点と比較して大きな開きがある。

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、産独学各セクターの自主努力にも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の接続を目指し、もって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、産業技術総合研究所を中心とする独法は一層の努力を傾注し、内閣府、経済産業省、文部科学省の関連府省は支援体制を強化する必要がある。

■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（NNIN/NSF：14センターによるナノテクノロジーインフラネットワーク、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の上で、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、既存設備を利用して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25機関37組織が参画している。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。

2014年には、プラットフォームの年間利用件数は2600件を超えるまでに成長している。文部科学省の事業予算（17億円/H26年度）とユーザからの利用料収入、そして実施機関の自己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、産業界の具体的な開発支援や、大学研究者が少ない予算でも高額な設備を利用でき、専門技術者のスキルと知にアクセスできる。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、プラットフォームによっ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。特にバーチャルの部分では利用事例等の知識や、設備情報のデータベース化、利用システムの面でICTを駆使することがポイントになる¹⁰。先端

¹⁰ 参考：共用設備利用案内サイト <https://nanonet.go.jp/yp/>

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・自立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や、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、国際化対応などが課題である。

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

バイオナノ分野における我が国の産業化の弱さは、

- 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、かつ開発力がある国内医療機器企業が限られていること
- 3) 欧米のようなベンチャー企業への投資による製品開発およびその後の大企業による買収・事業化展開が活発ではないこと
- 4) 法制度の関係上許認可取得コスト・期間が欧米よりも大きいこと

による。

それゆえ、大学等における基礎研究のレベルが高くとも、最終目標が達成されず、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。

制度改善の面では、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、多くが実施されているところであるが、他の課題に対応した政策の実施は限られている。2) および 3) については、近年公的資金により大学等の研究機関と中小企業が共同で大学発のシーズ技術を発展させ事業化を目指す制度が実施されている。しかし、このような直接的支援は市場性の高いシーズ技術であれば有効だが、そうでないシーズについては結局事業化には至らず、研究投資を回収できない。国産医療機器事業化を促進するには、医療機器の低事業性を改善する必要がある。国内市場が小さく事業性が見出しにくいのであれば、海外市場への参入障壁を下げ、市場性を拡大する必要がある。また、事業化コストを下げるために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取り組みが必要である。

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、ナノ粒子等の材料を提供すれば無料で *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、医療製品の実用化促進につながることを期待される。

■大学等研究、および産学共同研究における知財戦略

iPS 細胞研究でノーベル賞を受賞した山中伸弥教授が「研究開発と同じスピードで倫理や知財に対応しなければ、本当の意味での実用化はなされない」と話したことは記憶に新しい。これは、ナノテクノロジー・材料分野においても当てはまる。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。

ここで、知財に関し、日本の現状を統計データで眺めてみたい。図 2.58¹¹は日本の大学の特許出願件数の年次推移を示しているが、近年はほぼ一定して年間 9000 件前後の出願がなされ、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。これらの特許活用に関しては、日本の大学全体が特許権の実施等で受ける収入は、平成 24 年度で 15 億円強となっている。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、桁違いの差となっている。

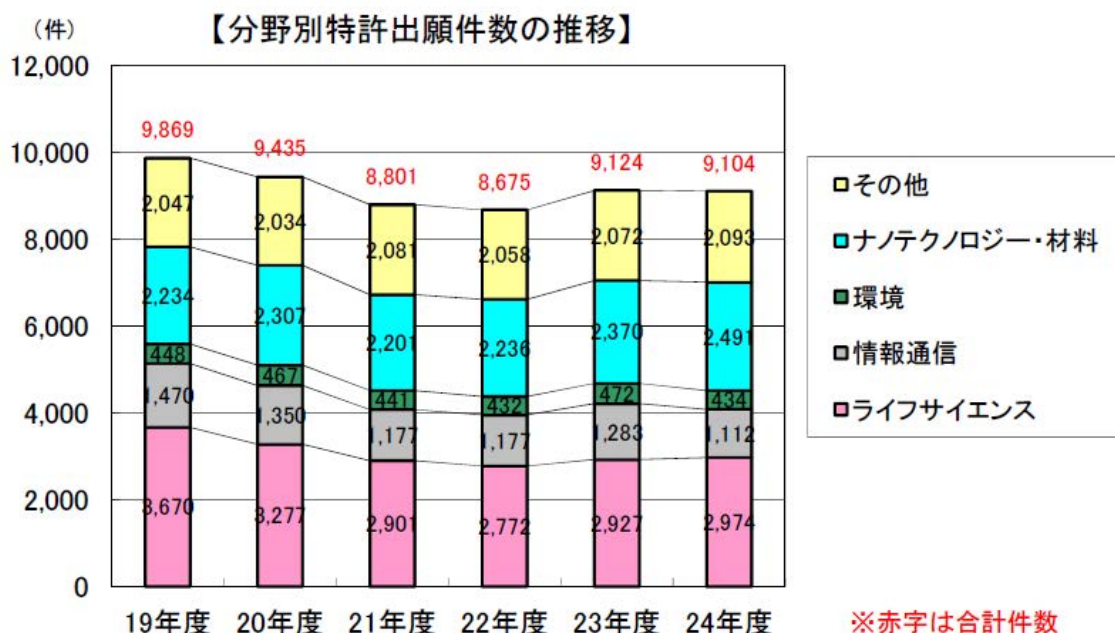


図 2.58

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の急伸が起きている。これが上記の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、相応の費用が必要であるが、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

¹¹ 文部科学省科学技術・学術政策局産業連携・地域支援課「平成 24 年度大学等における産学連携等実施状況について」

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、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なっている。

一方で、知財の存在が、新しく得られた知見が内外の研究コミュニティに速やかに広がることを妨げ、研究の進展に支障をきたしたり、知財に関する複雑な契約交渉のため、産業界との共同研究が進まなかったりと負の側面が生ずるケースもみられる。これらの問題点を踏まえた根本的な知財戦略の見直し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 と社会受容）

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、従来の材料とは異なるナノ構造ゆえの新物性を持つものがあることから、大きなリソースを要し、必然的に国家の枠組みの下で取り組まれている。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）、あるいは倫理的・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戦略的な取り組みが重視されている。多くの国では国家計画レベルでのナノテクノロジー政策の役割を、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、その安全性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、欧米ではナノテクノロジー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。以下では概略を示し、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、ナノテクノロジー安全性評価を標準化と結びつけ、通商において戦略的に利用する意図が明らかになりつつある。これは新規な方策ではなく欧州化学品規制 REACH（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を扱う事例が増えてきている。そのために、まず、規制対象としての「ナノ材料」の定義の議論が先行した。これは、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、実社会で現実的に製造・輸入・販売される材料を「ナノ材料」として取り扱う対象とするかどうかに関するものである。例えば、2011年に欧州委員会は「粒子（1つ以上の次元の外寸が1 nm から 100 nm 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。その他、EU 各国、米国、カナダ、オーストラリア、中国、韓国において、各法制度等を想定して「ナノ材料」が定義されている。さらに、ナノ材料の定義を踏まえ、具体的な法規制での対応の動きも出てきており、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ている。また、REACHでのナノ材料の取り扱いについての議論も活発化している。EUでは、全てのナノマテリアルはREACHに見合うものでなければならないとしている。

一方、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、ある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 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 であると見なすとされた。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 では WPMN（Working Party on Manufactured Nanomaterials：ナノ材料作業部会）を 2006 年に立ち上げ、産業用ナノマテリアルに関するヒト健康影響と環境保護という側面について国際協力を促進させることを目的とし、9 つのステアリンググループ（SG）を運営してきた。その内の SG3：工業ナノ材料の代表的セットの安全性試験の活動は、スポンサーシッププログラムと呼ばれ、カーボンナノチューブ（CNT）などの炭素系ナノ材料、二酸化チタン（TiO₂）などの金属酸化物など、13 の代表的ナノ材料について、各国がスポンサーとなり、物理化学特性、環境挙動、生態毒性、ほ乳類毒性に関する網羅的なデータが収集されている。日本は、単層 CNT、多層 CNT、C₆₀ の主スポンサーとしてデータ提供を実施してきた。最近、WPMN の SG は再編され、SG3、4、7 は、SG-TA（Steering Group of Testing and Assessment）となり活動している。

日本でも、ナノ材料のリスクや社会受容に関する研究・検討はおこなわれてきた。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、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。さらに、NEDO では、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（NEDO 交付金以外分）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」で研究が進められている。国全体としては、第 3 期科学技術基本計画における 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。しかし、第 4 期の基本計画以降、連携施策は継続されていない。

米国 NNI2014 や欧州 FP7 の Nanosafety Cluster が産業と規制組織の協調による新産業の育成を提案するなど戦略的に省庁間の連携を促しているなかで、今後は貿易管理や独占禁止法などの考え方も見直される可能性がある。翻って、日本では、毒性学を含めた安全性研究の体制は欧米に対して脆弱であり、また材料研究との協力体制は特に不十分である。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ノロジーで競争優位性を維持するには、学術的基盤の整備が必要と考えられる。日本における評価研究の側面では、各省庁個別のプロジェクトが部分的に継続している状況であるが、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を行ったのみで、管理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性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。工業規格についても日本は産官学のいずれも対応が十分とはいえない。日本においては関連省庁間の調整機構が機能しないために、標準化や適切な規制になかなかつながらないのが現状

である。産業界、公的機関、学会が一体となって、常に世界の情報を集めて継続的に分析し、標準化や工業規格の課題に対応することが肝要である。この点でわが国の対応は、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、戦略的な仕組みを構築する必要がある。日本では、安全安心を中心とした議論が「白黒」対決になりがちで、戦略的・科学的観点が不足し、結果として取組み・体制が脆弱なままになっている。対して欧米は、安全性評価技術研究の基盤が国家安全保障戦略とも並存している。運営面でも欧米では司令塔を明確にしている。米国は NNI2014 より NSF はなく、National Science & Technology Council の基で NIST が核になっている。欧州は EC DG Research の下に 2013 年からオランダの RIVM が核になっている。いずれも、科学系に加えて法律、社会学、経済、情報収集と分析の分野が糾合されている。日本はどうしても予算とともに省庁別になってしまい、一体感がないように海外から見られている。対応組織構造の検討が必要である。

また、日本企業は未だに安全性評価を付随的なもの、あるいはビジネスの妨げと捉える傾向があり、特に経営層の理解は乏しい。技術サービスとして東レ、旭化成、三菱化学が毒性評価分析サービスを提供しているが、BASF や DuPont のような安全性評価で世界的リーダーになれる組織、人材、設備、戦略を持つ企業は存在しない。今後は、通商、すなわち資金の流れのパラダイムシフトが、ナノテクノロジー安全性の標準化によって起こることの認識を、産業界のトップ・マネージメントも持たなくてはならないだろう。学术界を見ても、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大学や学問分野が存在していない。かろうじて日本毒性学会はその任を担っているが、予算・活動規模は十分とはいえない。対して米国 University of West Virginia、University of Montana、University of Rochester は、安全性に関する学科を有している。特に University of Rochester は世界で最大の、毒性、安全性学の学部を持ち世界的に重要な研究者を多数輩出している。基礎研究では依然として先頭集団にいる日本のナノテクノロジー・材料科学技術からのベネフィットを社会が享受するためにも、ナノテクノロジー応用製品の通商戦略は欠かせない。しかし、材料産業としてみた場合、市場規模が小さく安全性評価費用を捻出することはビジネス合理性が無くなる。一方で、ナノの安全性評価とその標準化を全面的に海外に委ねることは、科学技術・政策的課題として諸外国と対等に交渉する術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から、世界と伍して行くためにもナノテクノロジー・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の政策的検討が必要であろう。また、急速に活動を展開させている新興国との協調・共同の方策も求められる。

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技術的な挑戦課題

ここでは、2.1.2 節に記載したナノテクノロジー・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と思われる。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となろう。

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 CCS (CO₂ Capture & Storage) の技術が進んでくると化石燃料から多くの CO₂ を大気に放出することなく水素を生成することも可能となってくる。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様式を見直し、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。

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。米国のオバマ政権が打ち出したグリーン・ニューディール政策をはじめ、各国の様々なエネルギー・環境政策では、ナノテクノロジーをベースとした技術開発が重要な役割を果たすと期待されている。

■健康・医療

ヒトゲノムの解読、iPS 細胞の創出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、生体由来物質の精密な計測、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。

医療費の増大に対しては、本格的な医療が必要になる前に、病気を検知し、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気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の高感度検出を実現する事への期待は高い。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ってくる。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 や単一細胞、単一分子を持ち込み、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みつつある。ナノ DDS は核酸医薬の実用化に不可欠であると認識されており、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必要である。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した技術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になってくる。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。ここでも物質科学と生命科学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。

実用化された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

IoT（Internet of Things）の世界では各種センサーデバイスや通信機能を搭載した超小型で安価なチップが必要となる。これらのチップは我々の身の回りの物に埋め込まれるため、それに電力を供給する超小型電池や身の周りに存在する様々なエネルギーを電気エネルギーに変換するエネルギーハーベスト技術が必要になる。これにより、我々の周囲の環境をモニターし、また我々自身の健康をモニターし、健康で快適な生活を実現する、さらには周囲の異常を察知することで、防災、防犯にも適用され、安全で安心な社会を実現すると期待される。このような社会を実現するうえで、ナノエレクトロニクスへの期待は大きく、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、さらには 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、特にナノスケール熱制御の重要性につき述べておく。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、フォトンと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、どちらかというとな下支的な役割のため、その理論的、あるいは計測上の統一的な取り扱いは遅れている。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。熱を電気エネルギーに変換する熱電素子においては、電子とフォノンの流れを同時に制御することが要求され、互いに相反する輸送に関する要請を材料やデバイス構造の工夫によりどのように実現するかが高性能化の鍵を握っている。また次世代の磁気ストレージとして期待される熱アシストの磁気記録書き込み方式では、ナノスケールの領域におけるナノ秒オーダーの熱の制御が、微小磁区領域でのスピン制御と並んで実行されなければならない。このように、ナノスケールでの熱（フォノン）の制御が応用上、重要になっている。今や、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。

■材料、ものづくり

情報通信技術の進展はナノテクノロジー・材料技術に関する研究開発の様相をも大きく変える可能性がある。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、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現実のものになりつつある。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。このような領域はマテリアルズ・インフォマティクスと呼ばれ、日本の産業競争力の源泉である材料開発力の維持・強化のためには、上記の要素が結集する拠点の構築が、求められている。

欧米を中心に製造技術の復権を目指す動きが顕在化している。米国ではシェールガスの登場により、電力コストが低下したこともあり、海外に展開していた工場を米国に戻そうとするリショアと呼ばれる動きがある。また、米国ではインダストリー・インターネット、ドイツではインダストリー4.0 という情報通信技術を活用した新たな時代の製造業のモデルが打ち出されている。コンピュータの飛躍的な能力向上は、シミュレーション技術の可能性をも大きく広げており、上記のマテリアルズ・インフォマティクスの進展とあいまって、ものづくりにおける設計技術の革新につながると期待される。そのひとつの現れが、コンピュータを駆使した3D造形技術の進展である。製造物の形状に関するデジタル化された3次元情報と3D造形装置があれば、誰でも複雑な形状の製造物を同じ様に作りだすことができる。この技術は進化過程にあり、多様な材料の適合化、3次元形状のデジタル情報をベースにしたコンピュータによる自由な設計、造形装置の発展により、ものづくりの新たな展開が期待される。

ものづくりに関しては、これまでの電力多消費、資源多消費の方向から低環境負荷で人と調和性の高いものづくりを目指そうとの動きが顕在化してくると予想される。特に、今後重要性を増すと考えられる動きが、バイオミメティクスと呼ばれる技術分野である。これは生物の組織構造、機能、生産プロセスに学び、新しいものづくり技術として応用しようとするものである。生物学と工学（ナノテクノロジー、材料、機械、電気）との融合分野であり、未来のロボット技術、医療技術など、多くの産業分野に新機軸を打ち立てる可能性がある。生物学とナノテクノロジー・材料分野の研究者との連携による体系的な取り組みが必要となっている。

■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節で述べてきた事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・吸着機能材料・膜

環境汚染物質除去、化学プロセス分離工程の省エネ化、来たるべき水素社会に向けて水素の分離・吸蔵、さらには医療など広範な分野において分離・吸着機能材料、機能膜は鍵となる。多孔性材料、ナノカーボン材料など新しい材料も積極的に取り込み、用途に応じた工学的性能を明確にして実用性をもった機能材料、膜の研究開発を行う必要がある。

（２）インタラクティブ・バイオ界面

半導体技術、マイクロ流路技術、さらには電子・光技術で作製されたデバイスを細胞やタンパク質・DNAなどの生体物質に適用し、その動的振る舞いを理解、制御することで、再生医療、診断、創薬スクリーニングに応用していくことが望まれる。そのためにはデバイスのバイオ界面をより精緻に設計・構成し、細胞・生体物質と分子レベルでの相互作用を可能にするインタラクティブ・バイオ界面の研究開発が必要である。

(3) ウェアラブル・インプラントブル電子機器

今後、我々の身の回りにはコンピューティング機能がいたるところに埋め込まれ、それらが情報交換を行う IoT の時代に入っていくと予想される。ここではセンサ、ネットワーク、エネルギーハーベストといったナノエレクトロニクスの機能を超小型、低コストの半導体チップに埋め込み、ウェアラブル (身体装着型)、インプラントブル (身体埋め込み型) な電子機器を構成していくことが求められている。

(4) バイオインスパイアド・デジタル・ナノ製造技術

ものづくり技術の重要性の象徴として、生物の組織構造、機能、生産プロセスに学び、それをマテリアルズ・インフォマティクスや大規模シミュレーションのような進化したコンピュータ援用設計技術と 3D 造形に代表される先端の製造技術を駆使して、全く新しいものづくりにつなげていく、バイオ・インスパイアド製造技術、材料、超小型ロボットなどの技術開発が挑戦課題として挙げられる。

(5) 電子、光子、スピン+フォノンによるデバイス革新

デバイス微細化時代の挑戦として、ナノスケールの熱 (フォノン) 制御技術の構築を行い、先行している電子、スピン、光子の設計・制御技術と組み合わせ、量子力学的な粒子波動描像である電子、スピン、光子、フォノンの統合設計技術の確立がナノエレクトロニクスの挑戦的課題として挙げられる。

(6) 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)

ますます複雑化、多元化する高機能、高信頼、低コスト材料の追求において膨大な材料データを駆使して、効率的な材料開発、探索を行う新しいアプローチの構築が日本の産業・科学技術力の競争力の維持・向上のために求められている。



図 2.59

■ナノテクノロジー・材料イノベーションプラットフォームの構築

地球規模課題に対応するためにも、日本の産業競争力の源泉であるナノテクノロジー・材料における研究開発力の維持・強化は生命線である。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ち、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とし、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必要がある。ナノテクノロジー・材料は、原子、分子レベルの微小領域を取り扱う技術体系であり、微小領域の観測、そこで起きている現象の理解、制御には、高度で巨額の装置が必要であり、それを運用する専門性の高い技術者が必要である。また現象の理解には、原子数にして膨大なスケールのシミュレーションが必要であり、そこから生み出される膨大な情報を整理、統合し、新たな知識発見につなげる仕組みも必要である。これらを実行するためには、高速のシミュレーションを可能とするスーパーコンピューター、物質・材料の計測・加工・合成を可能とするナノテクノロジープラットフォーム、さらには膨大な量の材料データを管理・提供できる材料情報基盤を整備する必要があり、これらが各々、拠点を形成し、全体が密に連携を取り合って活動する「ナノテクノロジー・材料イノベーションプラットフォーム」を日本全体として構成することが急務である。このプラットフォームは日本のナノテクノロジー・材料技術に対する国際的な窓口としての機能や、人材交流の役割を果たす事が期待される。また、ナノテクノロジープラットフォームで既に実行されているように、このナノテクノロジー・材料イノベーションプラットフォームは地方にサテライト拠点を設け、日本全国にネットワークとして根を張るような形態も合わせて構築すべきである。これにより、地方にしながら、日本全体の最先端技術にアクセスでき、また研究者間の交流も可能となることで、地域産業の活性化にもつながると期待される。以上の概念をまとめたものを図 2.60 に示す。

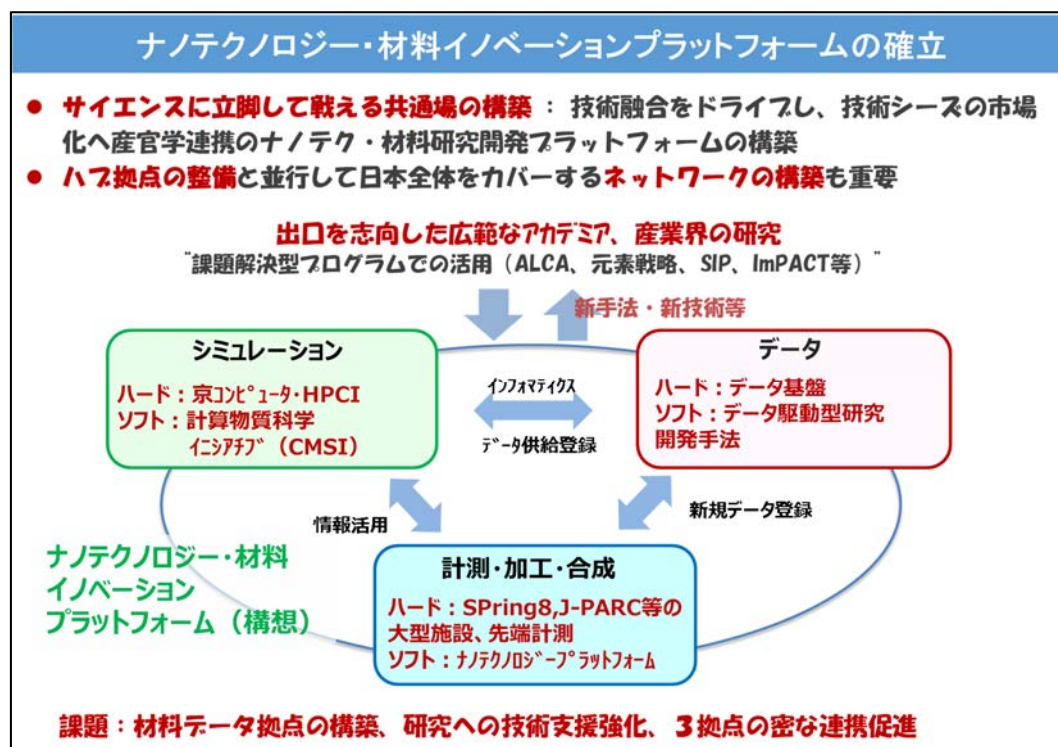


図 2.60