

1. 俯瞰対象分野の全体像

1.1 俯瞰の範囲と構造

■ナノテクノロジーの定義と特徴

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

[ナノテクノロジー]

1ナノメートルから100ナノメートルの領域において、物質を成長させ、加工し、そしてそのサイズのパルク・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、パルク材料や薄膜材料を削り込んで所望のナノ構造を得る「トップダウン・ナノ加工」、もう一つは、原子や分子あるいはカーボンナノチューブや微粒子などのナノ材料から出発して所望のナノ構造を自己組織的に形成する「ボトムアップ・ナノ形成」である。後者が実現できれば、ナノテクノロジーの究極の形成・加工プロセスとなり得る。自己組織化は、前者の限界を克服、あるいは前者を補完する後者の鍵となる概念である。そして、二つのプロセスの融合も重要となる。

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

ナノスケールの物質構造の最大の特徴は、①サイズ効果としての量子効果、②原子より10～100倍程度大きいナノ単位格子の繰り返しから生じる量子波効果、③表面・界面の原子の

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

■材料の定義と特徴

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

（1）金属材料

鉄鋼やアルミニウムなどの金属、ステンレスやチタンなどの合金、アモルファス合金、あるいは、金属ガラスなど

（2）無機材料

セラミックスやガラス、非金属元素単体または金属元素と非金属元素の化合物など

（3）有機・高分子材料

炭素を主要元素として、酸素、水素、窒素原子などで構成される物質の総称。これはプラスチックのような高分子化合物による樹脂、繊維や有機ELなどの電子材料、自己組織化を利用した超分子集合体やゲル等を含む。

（4）生物材料

生物に由来する材料。主にタンパク質や核酸、糖鎖など

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

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

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

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

1.1.1 社会の要請、ビジョン

世界は今、社会・経済的にも地球・自然環境の面でも、そして地政学的にも、大きな変化のなかにある。SDGs（Sustainable Development Goals: 国連による持続可能な開発目標）は世界全体にとっての共通目標だが、各国・各地域にとっての目指す姿と、その優先順位や重みは多様である。世界的には、Industry4.0 や CPS、IoT の概念で目まぐるしい速度で開発が進んでおり、いわばデジタルトランスフォーメーションの大きな流れが加速しているが、先進国を中心とする産業界主導のビジョンといえるだろう。しかしこの導入や実証・実装は、途上国でも急速に進むケースが出始めている。IoT や AI のハード面の中核技術である半導体の世界市場は、2017、2018 年と、二年連続の二桁成長を見込む。2018 年 12 月現在、世界経済への不安要素から市場は踊り場にあるとも言われるが、数年来 3,500 億ドルが天井と思われていた市場は、一挙に 4,500 億ドルを超えるほどに拡大している。一方、SDGs の観点では、特に境界条件が明らかになってきた地球環境と人間活動とを調和させ、そして誰一人取り残さない社会をどうすれば実現できるのかという、社会にとって多くの困難を伴うであろう大目標へと向かっている。大気・海洋・河川・土壌・森林の持続性や、動植物の多様性確保、貧困の撲滅、教育や医療への公平なアクセス、感染症対策、温暖化の影響にも関連する災害対応・防災など、これらはいずれも一国だけでは成し得ない目標であり、日本にとっても重要テーマである。例えば、再生エネルギーの急速な導入拡大や、マイクロプラスチックによる海洋汚染対策、AI やロボティクスを用いた先進医療技術など、新たな挑戦が始まっている。

日本は過去、資源制約のなか工業立国として輸出を担う製造業を軸としてきたが、現在ではサービス産業の成長や、デジタル技術に立脚した新たなビジネス、産業構造の変革、グローバル化と国際化など、対応を迫られる課題が目白押しとなっている。他方では、いくつかの国・地域に見られるポピュリズムの台頭や、米中の技術覇権競争、貿易戦争を前にした複眼的な行動が日本にも求められている。人口減少に伴う少子高齢化は回避が難しく、社会保障費の上昇は未だ歯止めがかからない。日本各地の一次産業だけでなく、ハイテク産業を担う人材も不足してきている。日本は国のあり方、社会・行政・教育・福祉・経済、防災、あらゆる側面で、従来の延長線だけではない考えと行動が必要になってきている。例えば、国民生活にとっての生命線は、自国で必要最低量を賄うことのできていないエネルギー資源、鉱物資源、医薬品・医療機器、そして食糧の輸入であることは間違いないだろう。2017 年のわが国の輸入総額は約 75 兆円 / 年で、石化製品を含むエネルギー・資源関係がおよそ半分を占める。わが国の国際金融収支は黒字傾向にあるが、実体経済の重要部分を担う貿易収支においても、75 兆円の輸入に対して、それと同規模程度以上の輸出が重要且つ必要であろうことは想像に難くない。日本の輸出額は 78 兆円（2017 年）であり、自動車、機械・精密機器・電子部品、素材、が大半を占める。この「入り」と「出」を使いながら、内需の産業と国民生活が実体経済として回る。すなわち、製造業の輸出によって、エネルギー・原材料の輸入が賄われているという大局的な構造は、2018 年の時点でも続いている。輸出を担う製造業の付加価値の源泉は、これまでのところ自動車に代表される擦り合わせ技術の集大成であり、競争力のある製造装置や機械・電子部品、それらを実現する要素たる材料技術や、ナノテクに象徴されるデバイス・プロセス技術である。そしてこの足腰を担い支えるのは企業や大学・国研の研究開発活動である。かたちある製品に関して、世界中でモジュール化が進んできた今、電気自動車向けの蓄電池技術や、自動運転用の AI/ システム技術開発が大競争を迎えているが、ここに日本が今後も活路を見出

すことができるかどうかは予断を許さない。AI に代表される ICT 関連産業は国家的に重点化され国内投資は拡大しているものの、米国や中国から台頭したプラットフォーム企業への比肩を期待できる日本からの兆しは簡単には見つからず、ICT 関連技術・サービス産業においては輸入のウェイトが大きい。

ナノテクや先端材料は、イノベーションのエンジンとして、私たちの生活を取り巻く様々な素材や製品の開発に用いられている。一般消費者が手にする製品だと、日用品や衣料品、スマホあたりを思い浮かべるだろうか。これらは一見ただけではどんな素材でできているのか、何が良いのかはわからない。ましてこれほど普及した IT 機器を実現している材料や内部のデバイスに気を留める消費者は少ないだろう。しかし、熱を発する人工繊維でできたシャツは世界の消費者に受け入れられ、どこまでも色鮮やかなディスプレイやスマホの高解像度カメラは SNS に欠かせない存在になっている。排気ガスをほとんど出さない自動車など、社会が求める機能を次々に実現していく源泉には、いつも新素材・新材料がある。2014 年のノーベル物理学賞の対象となった青色 LED も、材料・デバイスのイノベーションを成し遂げた研究者・技術者たちによってもたらされた。次に期待されるのは、希少資源の使用を極限まで低減した環境に優しい材料や、患者への負担が少ない治療を実現する素材、再生可能エネルギーを生み出す材料・デバイス、高齢者に優しい器具、そして世界中の子供たちに夢を与えるような、あっと驚く機能を発揮するような新素材・新デバイスを用いたサービスだろう。さらには、廃水を綺麗にする材料や、災害に強い材料、壊れても自己修復する材料、光と磁気・熱や音を自在に制御し変換する材料、危険を検知する高感度センサの材料など、研究の種と期待は広がっている。しかし、日常生活における消費者の目に直接触れることがなかなかない。こうした新素材・新材料のイノベーションを牽引している科学技術の一つが、進化を続けているナノテクである。前述したようにナノテクは一般に 1 から 100nm 程度の範囲の微小世界を対象としているが、三次元で考えれば原子が数個から数万個集まった分子がこの領域に入る。これは、物質が多様な機能を発現する起源たるスケールに相当する。人間の目で観察できるサイズの世界では、人工物と自然物（生体）は全く異質でつながらないものだが、ナノレベルの世界では共通の原子が見えて、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」を持って初めて可能になる。事実、ナノバイオテクノロジーという融合領域研究が世界で進んでおり、がん治療の新しい技術や、高い生体適合性を持つ材料、生体信号センサへの応用が活況である。他方、極限追求するナノテクノロジーとして、半導体プロセスに代表される微細加工技術がある。これは物体を削りながら構造形成する“トップダウン”の加工技術だが、半導体チップに用いる最先端微細加工プロセスは、7nm の回路（ゲート長）を構成するまでに至り、究極の微細加工技術として 2018 年に実用化された。

■ IoT/AI 時代の CPS (Society5.0) への期待

このようなナノテク・材料によって実現される IoT デバイスを例に、Society5.0 で実現する世界を概説する。IoT のセンサを介して収集された膨大な情報（ビッグデータ）は、ネットワークを介してクラウド側に送られる。同時に末端のエッジデバイスにおいて瞬時に処理される情報と峻別される。クラウド側では AI を駆使してビッグデータの解析がなされ、そこで生まれる新たな知見は多様なビジネスが展開される実世界に高い付加価値を提供する。この結果、自

動車、家電製品、健康・医療機器、工場、金融、エネルギーネットワークなど、物理世界とサイバー世界との一体化が進展している。我々の身の回りの機器に埋め込まれた IoT は多様なセンシング機能と情報をクラウド側に送信するためのネットワーク機能、また使われる場面によっては自らを動作させるのに必要な電力をその場で得るエナジーハーベスト機能を具備する。ロボットや自動車などは即時の情報処理やアクションが必要である。また、ネットワークの負荷低減のために大量のデータ情報の事前処理が必要な場合もある。このようなときは IoT デバイス自身に AI をも含む高度のコンピューティング機能が搭載されるようになる。AI は通常のコンピュータでは難しい大量の画像や音声、動画処理、AR/VR、自然言語処理、最適化・推論などの領域で力を発揮する。これらの領域における AI への要求は高まりつづけ、これまでのフォン・ノイマン型のコンピューティングを超える新たなアルゴリズムや、それを実行するハードウェアへの期待が高まっている。生物が実現している低エネルギーでの情報処理の仕組みを取り込もうとするニューロモルフィックコンピューティングや、量子力学の原理に則り基本素子を動作させ、現状のコンピュータでは実質的に解く事が難しい問題に解を与える量子コンピューティングなどが候補とされ、これらの研究開発が世界的に活況である。

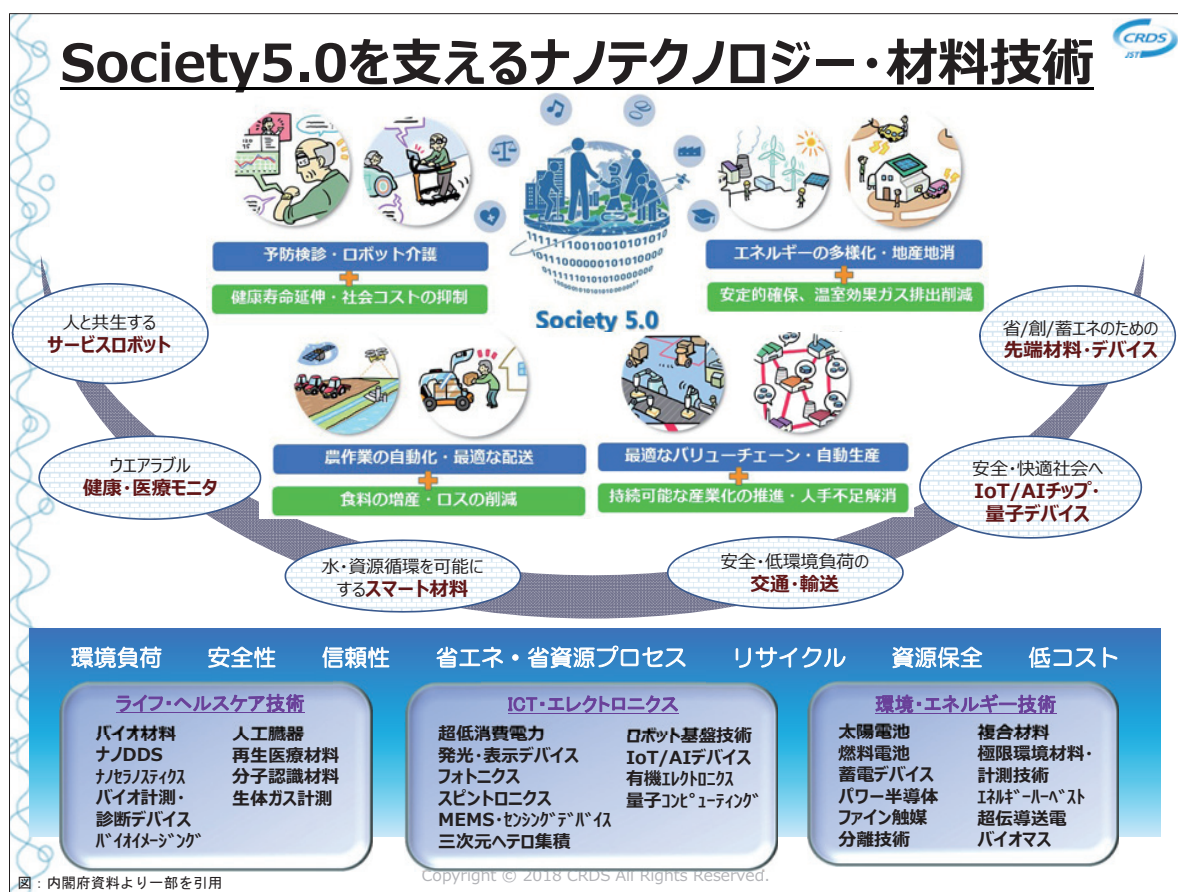


図1.1.1-1 Society5.0を支えるナノテクノロジー・材料技術

図 1.1.1-1 はナノテクノロジー・材料技術が支える将来の超スマート社会像を描いたものである。そこでは、IoT デバイスが様々な環境に配置され、私たちの生活を支援してくれる。特に高齢者を抱える家庭ではこの恩恵は大きく、仮想体験（Virtual Reality）によって世界中を旅行したり、文化に触れたり、家族と離れて暮らしていても、同じ場所にいるかのような会話

やふれあいを楽しめる。またロボットが常時、安全を見守り、何か異常を察知すれば適切な人に通報してくれたりすることが可能になる。車での移動では、安全で環境にやさしく、快適な環境が提供される。そこでは自動運転によって安全が担保され、電気自動車（EV）や燃料電池自動車によってCO₂を排出しない移動が可能になる。個々人の健康はウェアラブルデバイスによって常時モニターされ、そこで得られる情報は医療機関にネットワークを介して伝達される。医療機関に保有されている当人の健康に関するデータと合わせることで、健康状態が診断され、必要があれば、医師から遠隔での治療を受けることができる。オフィスや工場など働く場の環境も大きく変わってくる。再生可能エネルギーとITを活用したビルのエネルギー・マネージメント・システム（BEMS）により、徹底的な省エネルギー化が図られる。安全が担保された情報通信技術により、どの場にも移動してもオフィスと同様の情報セキュリティが担保された仕事環境が提供される。工場においては製造過程全体が情報管理され、省人化・無人化が進み、状況に応じて柔軟に対処できる効率的で歩留まりの高い製造が可能となる。これらを支える先端技術はセンシング、ネットワーキング、コンピューティングだが、ハード面を実現するのはナノエレクトロニクスを中心とするナノテク・材料である。

■複雑化、深刻化する環境・エネルギー問題と科学技術への期待

今、世界のエネルギー供給環境は大きく変化している。OPECを構成する中東諸国の情勢に伴う原油価格の変動、ロシアの天然ガス産出と各地（特に東欧・中東・中央アジア圏）へのガスパイプライン敷設、米国のシェールガス・シェールオイル革命、中国における石炭から再生可能エネルギーへの急激なシフト、そして日本に端を発した原子力エネルギーに対する見直し、あるいは国・地域によって方向性が分かれてきた原子力への依存度合に関する政策的変化。これらは各国の安全保障政策と深く関係し、地政学的な変動が起きている。同時に、SDGs、温暖化・気候変動、生物多様性、食糧生産、大気・土壌・海洋汚染など、複雑な地球的問題とのパズルのなか、各国は中長期的なエネルギー政策の選択を迫られている。

再生可能エネルギーに関しては、太陽光や太陽熱エネルギーの電力変換技術、風力発電技術、そして電力系統間での負荷変動にかかる蓄電池技術や、EVに代表される輸送機器の蓄電池技術、これらはいずれも、ナノテク・材料・デバイス技術が鍵を握る。発電技術そのものに関しては、高い電力変換効率とともに、耐久性と安定性へのニーズが特に高まっているといえるだろう。これを実現するために求められているのがナノテクを駆使した素材の革新である。また、蓄電池に関しても、充放電特性の向上と、長期安定性は喫緊の課題となっている。特に、モバイルやIoT、EV、ドローン、そしてこれから始まる5G技術など、蓄電池の性能向上はまさに核となる課題となっている。このような課題において様々な研究成果は見出されているが、特に重視されるのが製造・使用過程でのエネルギー消費である。あらゆる素材・デバイスの作成・使用過程において、省エネ技術は経済的にも環境的にも極めて重大な課題となっている。新しい研究成果を実用化できるかどうかの重要な判断基準が、エネルギーコストにあるといえる。

環境面では、大気や土壌汚染の改善・防止技術、海洋汚染（特にナノ粒子も含むマイクロプラスチック）がクローズアップされる。サーキュラーエコノミーの観点から、物質・材料・デバイスを、原料段階から、製造・加工、使用・消費、廃棄、リサイクルの循環まで、科学技術によって如何に実現させるかが、長期的には最重要課題である。もちろん、この課題は社会制度・法規制とセットで変革しないかぎり解決し得ない難題といえる。原料である炭素、水素、酸素、

窒素、リンやその他の鉱物元素やバイオ資源など分子レベルから、製品として使用し再利用に至るプロセスを実現することが究極の目標といえる。同時に、微生物を含む生態系への影響を最小限に抑えることが求められており、人間への安全性だけでなく、自然環境への影響や相互作用を考慮した、物質資源と生物資源の利活用を実現していくことが、未来を見据えた世界共通の期待である。例えばバイオマス、セルロースナノファイバーを用いることによる石油化学由来製品の代替が期待されている。普及には素材としての性能だけでなく、プロセス・エネルギーコストや、原料資源を大量消費した際の環境影響を、いずれも現実的に抑えることができるかどうか注目が集まる。

■超高齢化社会・人口減少時代のヘルスケア・医療への期待

わが国では平均寿命が年々延び、1975年に男性72.15年、女性77.35年だったものが、2017年には男性81.09年、女性87.26年と発表された。男女ともにこの40年で平均寿命は10年近く延びたことになるが、一方で健康寿命（健康上の問題で日常生活が制限されることなく生活できる期間）と平均寿命には10年程度の開きがあり、この差は21世紀に入ってから縮まっていない。超高齢社会に突入した我が国は、高齢化率（総人口に占める65歳以上の割合）が27.3%という世界最高水準にあり、今後も高齢者人口の割合は増加していく。人生における不健康な期間をできる限り短縮し、健康寿命を延ばすことは、個々人のQOL（Quality of Life）向上による活力ある社会の実現と、医療や介護にかかる社会保障費抑制の観点から喫緊の課題となっている。健康寿命の延伸には、できるだけ病気にならないこと《健康維持》、罹患した病気を治すこと《疾患治癒》、身体の機能低下・損傷部位を補うこと《身体機能の補修・代替》が求められる。具体的には、未病段階における超早期診断、健康状態に直結する生体情報のモニター、簡便な在宅診断システム、難治疾患・がん・脳疾患などの根本的治療、機能を失った臓器を代替する技術など、多数の医療・健康ニーズが存在する。このような未解決の医療・健康ニーズに応えるにはさまざまな新しい技術が必要であり、例えば、生体成分の高感度分析技術、無炎症・無感染の埋め込みデバイス・ウェアラブルデバイス、組織・臓器再生、ヒト組織・生体環境モデル、in vivo 診断・治療などの研究開発が期待されている。

これら技術の実現には、生体との間で生じる現象を制御する機能をもつ材料・デバイスが必要になる。例えば、生体組織が再生し機能を発揮するように細胞を誘導する材料や、生体と物質・情報をやりとりすることで検査・診断・治療をおこなう材料・デバイス、体外で細胞の3次元組織化を促進しモデル組織を構築する材料などが該当する。一方、生体組織や細胞、体液などの生体を構成する成分に接して利用される「バイオ材料」は、機能発現の以前に生体から異物認識されない生体適合性を有することが不可欠であり、そのためには多様な生体環境に対する適合性の発現メカニズムを解明することが鍵になる。

医薬品の開発は、長期にわたり多額の投資を要するが、新規医薬品（低分子化合物）開発の成功率は0.004%と極めて低く、また、臨床試験に入ったものであっても承認に至る確率は40%程度である。これは前臨床試験において動物で確認された効果がヒトでは得られないこと、いわゆる種差によるところが大きい。動物実験の削減・撤廃に向かう世界的な動きへの対応と、同時にヒトの薬物動態評価をin vitroでおこなうことが可能な評価系の確立が求められている。このことが、医薬品開発の高速化・効率化へ結びつく。

1.1.2 科学技術の潮流・変遷

本項ではまず、材料とナノテクノロジーのそれぞれの観点から技術進化の歴史の変遷を概観したうえで、今起きつつある技術的な潮流を述べる。

（1）材料科学技術の進化の歴史

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

1968年の本多健一と藤嶋昭（当時、東京大学）による酸化チタンを用いた光電気化学（ホーnderフジシマ効果）の発見は、その後、応用開発に引き継がれ、数十年を経て、耐候性に長けた汚れのつかないセルフクリーニング（光触媒コーティング）技術として1000億円規模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研究開発へ発展している。

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

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

1986年には、赤崎勇と天野浩（当時、名古屋大学）により窒化ガリウムの高品質な単結晶膜形成等の研究成果が生まれ、1993年に中村修二（当時、日亜化学工業）らによりInGaN（窒化インジウムガリウム）を用いた高輝度の青色LEDが開発され実用化に至った。その後1996年には、量子井戸構造を用いた青色LEDおよび青色レーザーが世界で初めて実用化された。この青色LEDの出現により、蛍光体と組み合わせた白色LEDが実用化された。白色LED

の実現により、液晶ディスプレイのバックライト光源、高効率な一般照明、車両のヘッドランプなどに応用が広がっている。高輝度で省エネルギーの白色光源を可能とする青色 LED の発明に対して、赤崎・天野・中村の三氏は 2014 年にノーベル物理学賞を受賞した。

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

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

ナノスケールの特徴的な構造を持つナノカーボン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、代表的なナノカーボン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ナノカーボン材料は、2004 年に登場した炭素の二次元原子層であるグラフェンへと発展し、いずれも特異な電氣的、機械的、化学的性質を有している。電子デバイス、スーパーキャパシタ、ディスプレイ、強靱な複合材料、医療・バイオ応用などの工学的応用への期待が高まっている。日本が世界市場の過半を有する複合材料の代表たる炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は、長年の研究開発の末、炭素繊維の欠陥構造をナノレベルで制御する技術開発によって、航空機や自動車への採用が進むに至っている。

図 1.1.2-1 に、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。

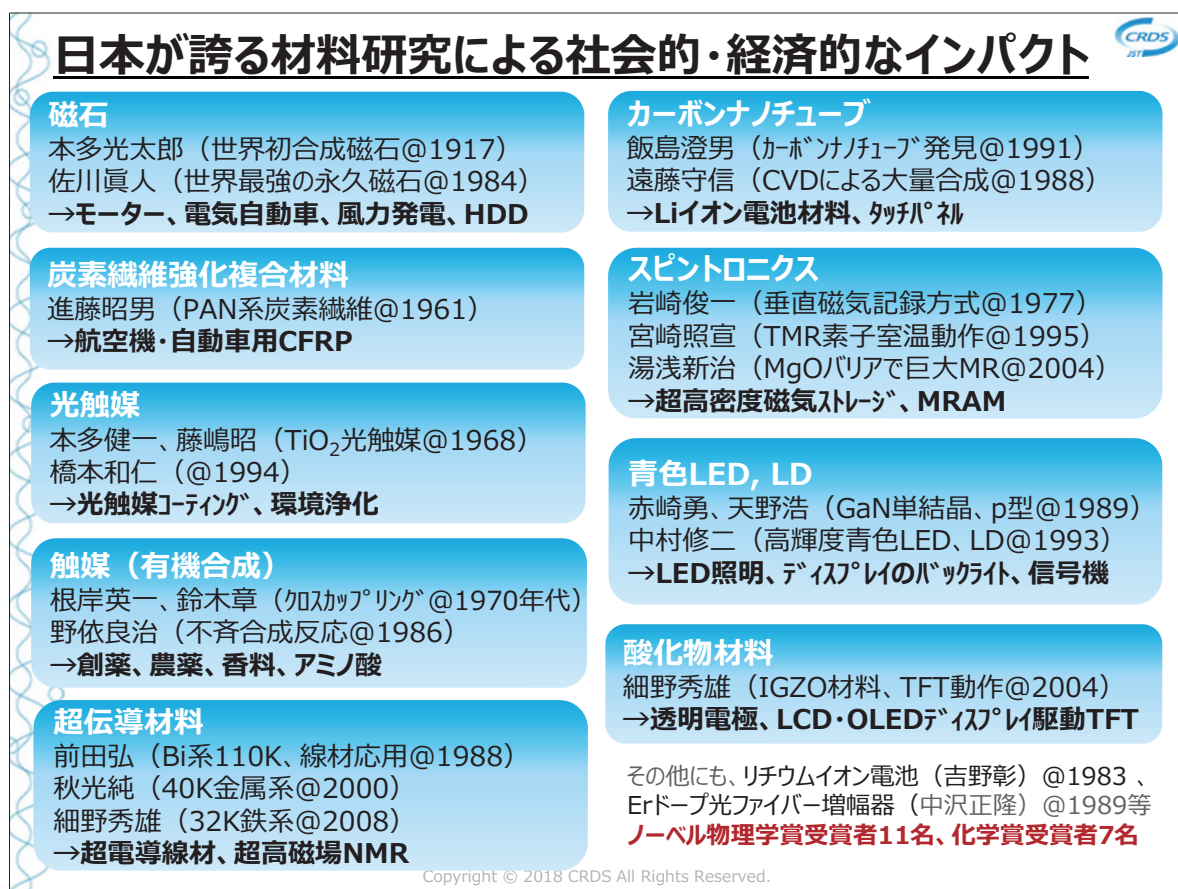


図1.1.2-1 日本が誇る材料研究による社会的・経済的なインパクト

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

今、地球規模での持続性に関わる課題解決に向け、材料科学技術によるイノベーションへの期待は高い。そのため、それを牽引するキーテクノロジーとしてナノテクノロジーの果たすべき役割が増している。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高機能を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など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の歴史

20世紀後半は、科学技術の進歩によって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る。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、特に第二次世界大戦後はそれらの学問を基盤に

した工学が発展し、新技術が生まれ、多くの産業が開花することになる。とりわけ、半導体産業は、1947年のBardeen, Brattain, Shockleyらによるトランジスタの発明を起点に興り、後にMooreの法則と呼ばれる半導体技術の微細化ロードマップに従う形で集積回路チップ上の素子の微細化と高集積化が進み、電子機器の飛躍的な性能向上と普及につながっていった。

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

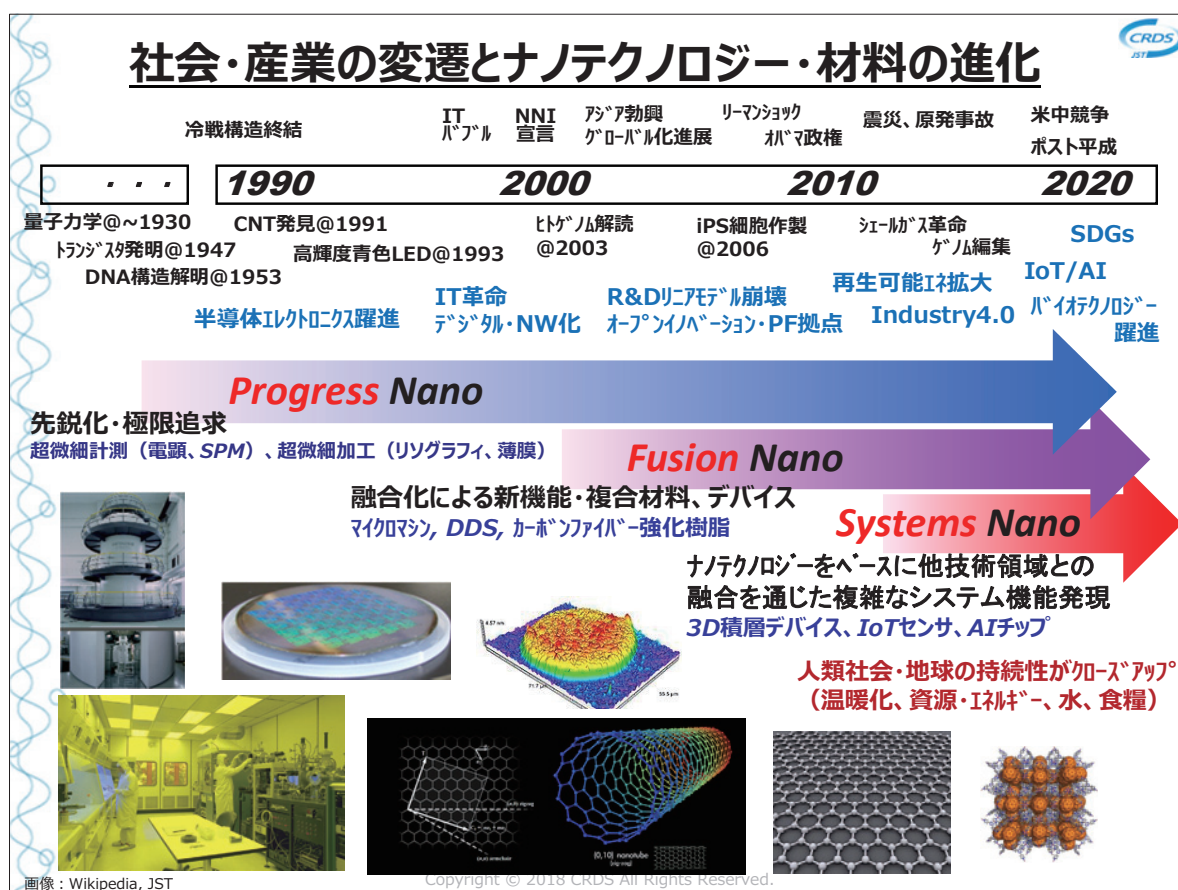


図1.1.2-2 社会・産業の変遷とナノテクノロジー・材料の進化

図 1.1.2-2 に示すように、1990 年代になると、半導体の LSI がコンピュータや通信機器をはじめ多くの電子機器に広く使われるようになり、電子機器のデジタル化が急速に進んだ。一方、冷戦構造が終結すると、米国において軍の中に閉じ込められていた多くの先端技術が民間に開

放され、Dual Use として積極的に民用展開が図られていく。GPS や ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network) などの通信ネットワーク技術がその代表例であろう。やがて、ARPANET はインターネットに進化して人々の生活に大きな影響を与えるようになる。先に述べた半導体の微細化技術の進展により、電子機器のデジタル化が進んでいくが、これとインターネットを中心に進展する情報のネットワーク化が、その後の IT 革命の牽引役を務めた。

1990 年代後半以降、半導体の微細化限界が顕在化するにつれ、それを突破する技術革新が求められるようになる。同様にハードディスクなどのストレージの世界でも半導体の Moore の法則を上回るスピードで、記憶セル領域の微細化、記憶容量の大規模化が進み、技術革新が常に求められた。これらがナノテクノロジーの研究開発をドライブし、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 年代に入ると、米国が「国家ナノテクノロジーイニシアチブ (National Nanotechnology Initiative : NNI)」を開始する。米国は当時の IT 革命を支える情報通信技術やソフトウェア技術で、またバイオテクノロジーの分野で、他国の追随を許さず、それらの技術が生み出す産業分野で独走状態にあった。一方で、21 世紀の先端技術産業を展望すると、物質科学に裏打ちされたナノスケールのものづくり技術の重要性がクローズアップされつつあった。当時、既に物質科学をベースとする新しい技術として、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 につながったと見られる。

同じく 2000 年頃から、生命科学分野でも技術の大きな躍進が見られるようになってくる。きっかけはヒトゲノムの解読技術や遺伝子組み換え技術に代表されるバイオテクノロジーである。生命科学の躍進に対して、情報科学、物質科学の研究者達が関心を持ち、多くの情報科学やナノテク・材料研究者が生命科学・バイオテクノロジーとの境界領域の研究開発に参加するようになる。その後の進歩は著しく、ES 細胞研究や 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、ゲノム編集のような新技術の獲得が次々と起こっており、まさに 100 年前の量子力学が創生期から実用へと徐々に向かった様を彷彿とさせる。現在の先端技術産業を支える物質科学の源に量子力学のベースがあることを考えると、この生命科学分野の膨大な知の蓄積が人類にもたらす恩恵は計り知れないが、同時に倫理的な側面や安全性についても合意形成やルール作りが必要になっている。量子力学という新しい学問分野の出現からそれを産業として現在まで発展させるのに人類は 100 年余を要した。しかしこれまでに物質科学をベースに発展してきた分子・原子レベルの計測技術、シミュレーション技術、ナノスケール微細加工や物質合成技術といったナノテクノロジーが強力な研究開発支援ツールとして機能することになり、はるかに短い時間スケールで、生命科学における知の蓄積が、医療・診断・健康といった社会・産業技術として開花するものと期待される。事実、遺伝子、RNA、タンパク質、代謝産物等から得られる生体情報を数値化・定量化するための技術やデバイス・装置のほとんどが、ナノテクノロジーや材料技術の寄与なくしては実現不可能なものである。ナノ粒子をキャリアとした薬物送達システム (ナノ DDS) は、患部へ効率的に薬物を到達させ、薬効を制御

するとともに副作用の低減を可能にした。温度感受性ポリマーは細胞培養基材に応用され、生体に移植可能なシート状の細胞集合体形成を可能としている。

IT革命の恩恵を受けて、この20年間に我々の生活は驚くほど豊かになった一方で、SDGsのような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。それらは化石資源から発せられるCO₂をはじめとした温室効果ガスに起因する地球温暖化問題、地球全体のスケールでの人口増大や経済活動のグローバル化に起因するエネルギー、水、食糧、資源の枯渇問題、環境汚染や感染症問題などである。日本に関しては前述したように少子高齢化・人口減少などである。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や生命科学を融合した新たな領域で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進展が鍵を握る。

ここまで、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3つのステージを辿っていくものであるが、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ステージは、「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以下の領域へ突入した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ものである。

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きた。微細化技術の追求とそれに伴う新材料の導入・開発を合体させた融合技術の登場がなければLSIのこれ以上の性能向上は期待できない。環境・エネルギーの分野でも、深刻化する地球温暖化問題、エネルギー問題を解決するキーデバイスとして太陽電池、燃料電池、蓄電池、さらには人工光合成などが期待されている。そこでは素材のイノベーションが要求されるが、デバイスを構成する電極材料、電解質材料など個々の材料の性能追求ではなく、デバイス、あるいはシステム全体の性能向上に向けた構成要素材料群の最適化が必要であり、融合化技術が不可欠となっている。

第三の「ナノのシステム化」は、先鋭化した諸々の要素技術やそれらが融合して新しく生まれた融合ナノ技術をシステムへと統合的に構成していく進化の段階である。まさに、IoT/AI時

代を先導するのが、先鋭化・融合化されたナノテクノロジーのシステムである。「ナノシステム」は、ナノテクノロジー・材料分野の要素概念・要素技術と他分野の概念・技術とを集積（統合・融合）し、全体として重要課題の解決に資する高度な機能を提供する部品・装置・システムとして定義される。これはナノテクノロジーの要素概念ではなく、要素が集積されてひとつのシステムとしての機能を生み出す概念である。米国や韓国ではこれを「コンバージェンス・ナノテクノロジー」（convergence nanotechnology）と称している。例えば、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インテリジェントチップへの期待が高まっている。これにより、自動車の自動運転システムや、人工知能を内包したロボット、あるいは我々の活動を支援してくれるナビゲータのようなシステムが可能になる。健康・医療の領域でもナノシステムは大きなイノベーションを引き起こす可能性を有している。DNAや細胞などの生物由来の物質を半導体チップ上に搭載し、生命科学の膨大な知の集積と最先端の半導体技術、電子・光技術との融合から生まれるイノベーションへの期待がある。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。

例として図1.1.1-4に、自動車へ統合・システム化されていくナノテクノロジー・デバイスの構成要素群を示す。

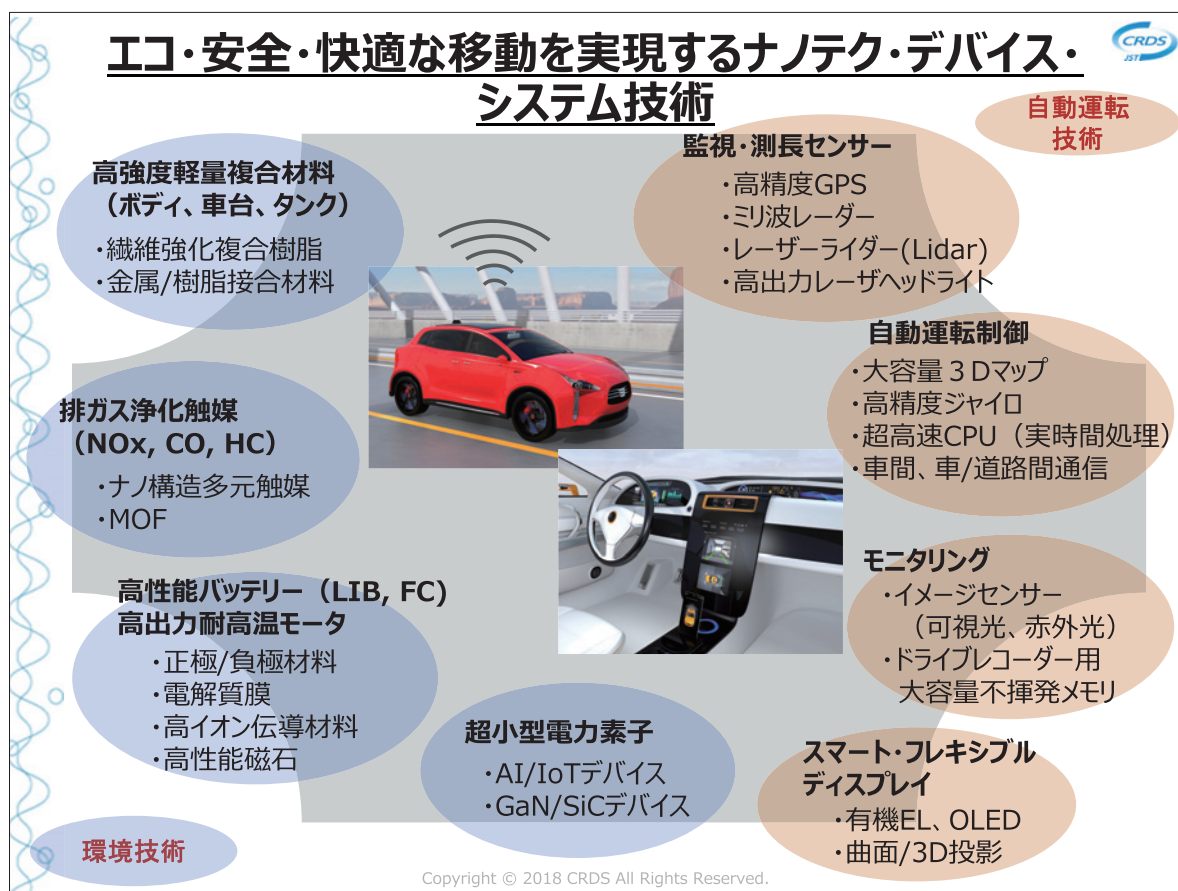


図1.1.2-3 エコ・安全・快適な移動を実現するナノテク・デバイス・システム技術

IoT/AI 時代には、このような多様な機能やビッグデータ処理に対応するコンピューティング技術がボトルネックになってくる。現在のコンピューティング性能向上や情報処理性能向上の担い手である集積回路は微細化の限界に直面しており、従来の CMOS ロジック回路によるノイマン型のコンピューティング技術だけではさらなる性能向上は困難になってきている。これまでの電子機器の発展において半導体、特に CMOS の微細加工技術の進展が果たしてきた役割は非常に大きい。インテル社創業者の一人であるゴードン・ムーア氏提唱の「ムーアの法則」をよりどころに、IBM 社のロバート・デナード氏による「スケーリング則」の設計指針もあり、3 年もしくは 2 年で 4 倍の集積度と 20 ～ 30% の動作速度向上もしくは低消費電力化を達成してきた。このように高性能化と製造コスト低減を同時に達成する電子機器は魅力的であり、その対象を大型計算機からパーソナルコンピュータあるいはデジタル家電、モバイルへと変えつつも、半導体メーカーはその技術革新に注力してきた。

1998 年からは国際半導体技術ロードマップ（International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS）が発行されるようになり、それはムーアの法則を堅持するための課題を国際的に共有する活動に発展し、国際学会でもその課題解決の構造や材料の提案が相次いだ。2017 年の IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) ではインテル社の 10nm CMOS 技術や AMD 社の 7nm CMOS 技術が発表され、現在も CMOS 微細加工技術の進展は続いている（なお、ここでの 10nm、7nm という数字は実際の寸法ではなく、加工プロセスの技術ノードを表しており、実際のデバイス寸法はもっと大きい）。5nm 以降は、ばらつきによる物理限界が近づいているとの見方が多い。それ以前に消費電力低減のメリットが薄れていることや、製造装置の導入に莫大な投資が必要であることから、10nm 以降の微細 CMOS プロセス技術を構築しているのはわずか数社に留まっている。

この限界を突破するためには 3 つの方向性があるとされる。1 つ目は、様々な機能のデバイス（CMOS、スピンドバイス、フォトリソグラフィデバイスなど）を 3 次元的に集積化する流れである。2 つ目は、ニューロモルフィックコンピューティング、量子コンピューティングなどに代表される、新規のアーキテクチャを取り入れるアプローチによるものである。3 つ目は、デバイスを構成する材料そのものを見直そうとするものであり、近年ではトポロジカル絶縁体やグラフェンのような新物質の持つ電子的な特性を活かし、消費電力削減と超高速化を同時に可能にする革新デバイスの創製を目指す流れである。

もちろん、EUV（極端紫外線リソグラフィ）やナノインプリントリソグラフィなどの新たな露光技術や 3 次元化集積技術などの導入により、今後も微細化・集積化はもう少しの間続くと予想されるが、集積回路の性能向上、消費電力低減の傾向は確実に鈍化している。IoT の進展やビッグデータなど巨大で複雑なデータ処理の要求は大きいことから CMOS 微細加工によらない性能向上を目指す動きが活発化してきている。すでにメモリでは 3 次元に積層することでスケーリングを実現するデバイスが量産され、ロジックデバイスでもチップを積層する技術が導入されてきている。今後はシステムレベルで新たなアーキテクチャが展開されることが重要になる。このように CMOS 集積回路微細化によるコンピューティング性能向上の限界が見えてきたことから、Society 5.0 の実現に向けては、新しいコンピューターシステム、アルゴリズム、アーキテクチャ、デバイス・材料などの技術レイヤー全体を含む新たなコンピューティング技術の開発が望まれている。

一方、ビッグデータを活用した CPS の進展は、ナノテクノロジー・材料の技術開発そのものにも大きな影響を与えると予想されている。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）という材料開発の新しいアプローチへの取り組みが、世界的な競争領域であり今後の進展への期待は大きい。最近のコンピュータの能力向上は、材料、部品、さらには複合システム品の設計開発を行うシミュレーション技術の可能性を広げている。量子力学が支配するナノスケールの構造から始まって、最終製品に近いマクロスケールの複合システム品までを一貫して設計するマルチスケールシミュレーションの研究開発も進む。さらには、これらのデジタル化された設計データを基に、目的の構造物を自在に作成可能な 3D プリンティング技術の進歩も著しく、情報技術に牽引される CPS の進展が、ナノテク・材料・デバイスの製造技術を含む、ものづくり技術全般の革新をもたらすと期待されている。

1.1.3 俯瞰の考え方（俯瞰図）

ナノテクノロジー・材料分野は、物質科学、量子科学、光科学、生命科学、情報科学、数理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、基盤技術が構築され、その技術を用いて具体的に物質・機能の設計・制御へとつながる。そして、デザインされた物質・機能をデバイス・部素材に適用し、最終的に環境、エネルギー、ライフ・ヘルスケア、情報通信（ICT）・エレクトロニクスなどの分野に対し、横断的に革新をもたらすイノベーション・エンジンとして機能している。これらの全体像を俯瞰図として図 1.1.3-1 に示す。

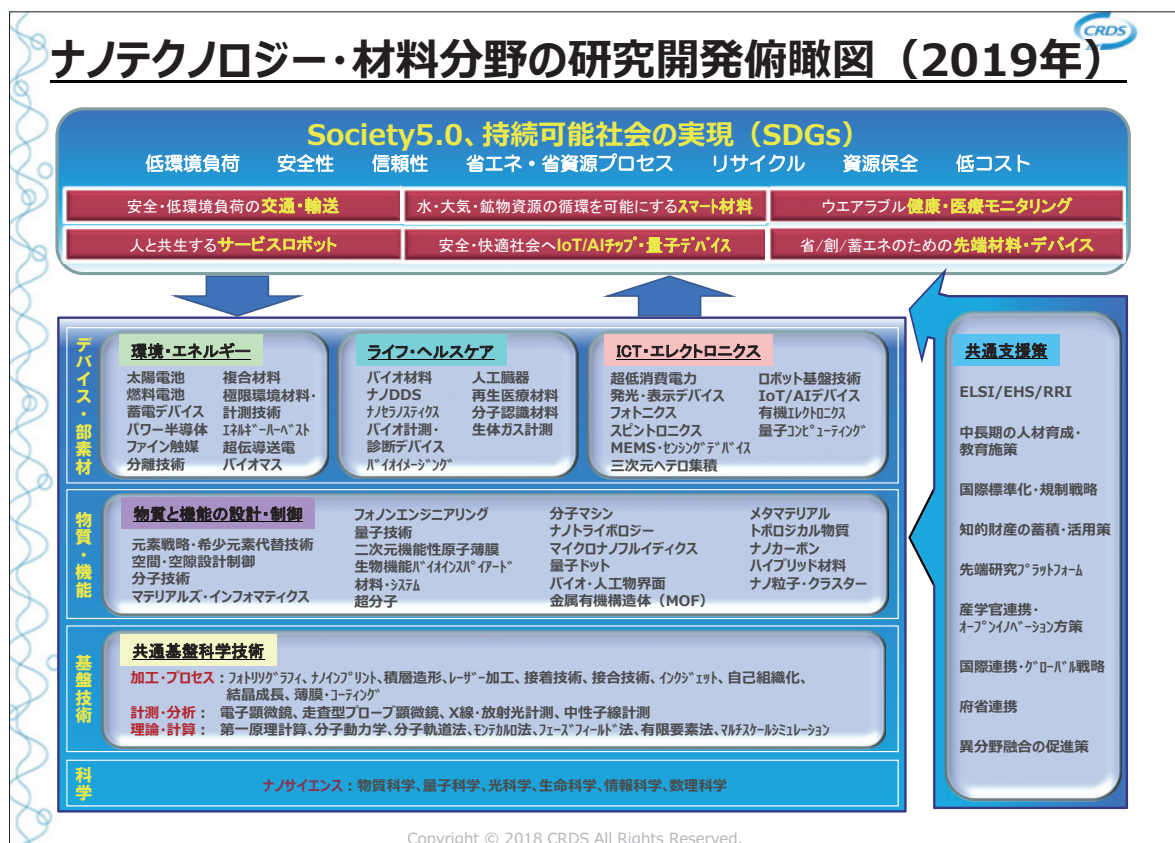


図1.1.3-1 ナノテクノロジー・材料分野の研究開発俯瞰図(2019年)

ナノサイエンスという土台の上に、漸次進展してきた微細加工技術や材料プロセスと成形が一体化した積層造形などの製造技術、高分解能顕微鏡などサブオングストロームの分解能におよぶ計測、第一原理電子状態計算による物質構造と機能の予測、シミュレーションやモデリングによる解析技術などを柱とした共通基盤科学技術が構築される。その上位レイヤーとして、元素戦略や分子技術、マテリアルズ・インフォマティクス、界面・空隙制御、フォノンエンジニアリングなどのナノテクノロジー・材料分野全体に関与する特有の概念として物質と機能の設計・制御技術を位置づけている。

これら物質・機能を組み合わせることで部素材、あるいはデバイスが構築される。また、多様な部素材・デバイスは応用目的に応じて、エネルギー・環境分野、ライフ・ヘルスケア分野、ICT・エレクトロニクス分野に分類される。個々の部素材・デバイスの中には、複数の分野で役割を果たすものも多く存在するが、ここでは代表分野に集約して記載する。

これら部素材・デバイスは最終的にはシステムとして組み上げられ、環境負荷、安全性、信頼性、省エネ・省資源プロセス、リサイクル、資源保全、コスト競争力といった特性も加味された上で、持続可能社会の実現（Society 5.0の実現、SDGsの達成）へと繋がる様々な社会ニーズに解決策を与えてくれる。

また科学技術が市場あるいは社会に浸透するかどうかを判断する際には、倫理的受容性・持続可能性・社会的な望ましさといった観点からの検討も必要となり、ELSI（倫理的・法的・社会的課題）、EHS（環境・健康・安全）、RRI（責任ある研究・イノベーション）といった考え方に基づいて、自然科学者と人文社会科学者の対話も必要となる。さらに、研究・技術開発

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

現代は VUCA 時代（Volatility / 不安定、Uncertainly / 不確実、Complexity / 複雑、Ambiguity / 曖昧）と言われるほど変化が早く、複雑で予測しにくい時代である。俯瞰図上では社会ニーズとして「安全・低環境負荷の交通・輸送」「安全・快適社会へ向けた IoT/AI チップ・量子デバイス」「ウェアラブル健康・医療モニタリング」「人と共生するサービスロボット」「水・資源循環を可能にするスマート材料」「省/創/蓄エネのための先端材料・デバイス」の 6 つを挙げているが、当然これらのニーズは時代の変化とともに変わりうる。今後も社会は変化し、ニーズも変化していくことになるが、図 1.1.3-1 に示すナノテクノロジー・材料に関する科学技術を進展させ、それらの統合化・複合化によって応えていくことが可能になる。

主要な研究開発領域（32領域）			
俯瞰区分	研究開発領域	俯瞰区分	研究開発領域
環境・エネルギー応用	太陽電池	物質と機能の設計・制御	空間空隙設計制御
	蓄電デバイス		分子技術
	パワー半導体		元素戦略・希少元素代替技術
	ファイン触媒		マテリアルズ・インフォマティクス
	分離技術		フォノンエンジニアリング
	複合材料		量子技術
	極限環境材料・計測技術		二次元機能性原子薄膜
ライフ・ヘルスケア応用	バイオ材料	共通基盤科学技術	生物機能インスパイアード材料・システム
	ナノDDS・ナノセラノスティクス		加工・プロセス
	バイオ計測・診断デバイス		微細加工プロセス
	バイオイメージング		積層造形・レーザー加工
ICT・エレクトロニクス応用	超低消費電力（ナノエレクトロニクスデバイス）		接着技術
	発光・表示デバイス	計測・分析	ナノ・オペランド計測技術
	フォトニクス		物質・材料シミュレーション
	スピントロニクス		理論・計算
	MEMS・センシングデバイス	共通支援策	ELSI・EHS
	三次元ヘテロ集積		ナノテクノロジーの ELSI/EHS、国際標準
	ロボット基盤技術		

Copyright © 2018 CRDS All Rights Reserved.

図1.1.3-2 主要研究開発領域

本報告書では、国内外の研究開発動向、マクロ環境などを総合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 年間程度は定常的に注視すべき研究開発領域として、32 領域を抽出した（図 1.1.3-2）。これら個々の領域の研究動向や方向性、国際比較について第 2 章に記載している。

1.2 分野の研究開発を取り巻く現状（世界と日本）

1.2.1 社会・経済の動向

ナノテクノロジー・材料分野は環境・エネルギー、ICT、社会インフラ、健康・医療、モビリティなど様々な応用を先導して支える基盤技術となっているが、要求される技術はこれら応用のさらに上位にある社会情勢や経済・産業動向にも大きく影響される。以下では、ナノテクノロジー・材料分野に密接に関係する社会・経済の動向について述べる。

世界規模での大きな社会動向としては、貧困・格差の問題、気候変動、エネルギー問題など世界的に取り組まなくてはならないものとして国連で採択されたSDGsがある。SDGsの17の開発目標には、水・衛生、エネルギー、インフラ・産業化・イノベーション、気候変動など、ナノテクノロジー・材料分野と密接に関わるものや、間接的に貢献するものが多数あり、SDGsを見据えて研究開発を進めていくことが求められる。また、過去第4期の科学技術基本計画で指摘された震災からの復興・再生の実現、グリーンイノベーションやライフイノベーションの推進など、日本の社会的課題の解決、第5期で推進されるIoTやAIに代表されるサイバー・フィジカル・システム（CPS）、Society 5.0の実現に向けた取り組みが必要になっている。これまでも、モーター用の高強度磁石、高強度の炭素繊維、青色発光ダイオードなどの実用化により、各種製品の軽量化、省電力化で社会的に大きなインパクトを与えており、今後もSDGs、CPSといった方向性を見据えた取り組みが主流である。

さらに、「価値形態の変化」が起きている。所有からシェアへ、ものの使用からサービスの利用へ、と機能的価値の重視に移行している。近年では、海洋プラスチック問題に端を発し、利便性や経済合理性といった従来の価値軸だけではない、地球規模の環境負荷低減という価値軸との調和が求められている。一方、個人の中古品売買の拡大など、個人のその時々ライフスタイルに合わせたカスタマイズが好まれ、大量生産された製品をそのまま使うより、自分の嗜好に合わせた形で使いたいといった要求が高まっている。このような価値形態の変化を前に、ナノテクノロジー・材料研究開発にも変化が生じていると考えられる。

経済動向としては、IT化・デジタル化の流れの中で、GAFA（Google、Apple、Facebook、Amazon）のようなサイバー世界の巨大企業がハードウェア領域にも大きな影響力を持っていることや、簡単なアセンブリによる大量生産品の製造が、先進国から人件費の安い国・地域に移っていること、半導体集積回路のように最先端の高度な加工技術に伴い巨額の設備投資が必要な製品は、限られた企業に集約されつつあることなどの動きが顕在化している。また、中国やインドの存在感が増しており、米中の貿易戦争や、一部の企業の通信機器の排除などにも発展している。このような状況にあって、日本が世界に存在感を示しているのが、エンジンやモーター、モーター制御技術などのコア技術をベースにした自動車やロボットなど、高度なすり合わせ・システム化技術を必要とする産業、高精度技術に裏打ちされた半導体製造装置や計測・分析装置のような製造装置産業、高性能・高信頼性を実現している部品や素材（部素材）産業である。特に、部素材のシェアは高く、最近では輸出産業全体に占める割合が増え、まさに日本の生命線たる技術領域、産業領域となっている。

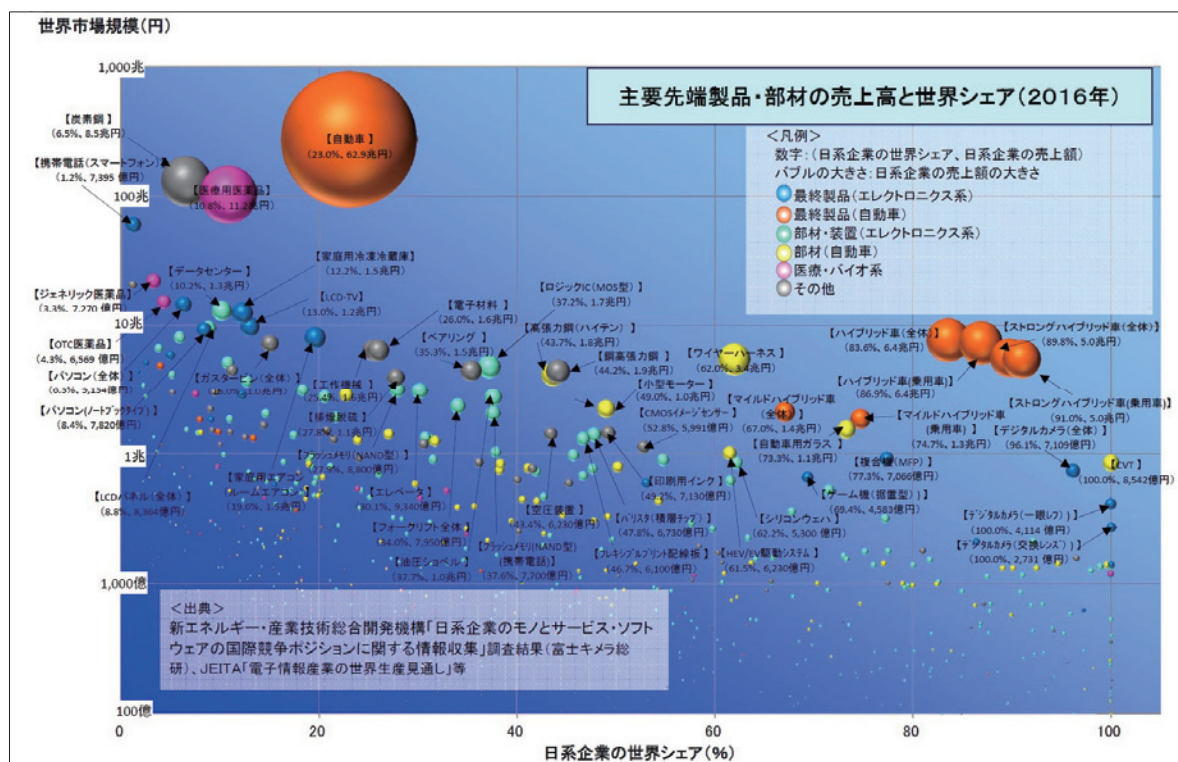


図1.2.1-1 バルーンマップ(NEDO-TSC 主要先端製品・部材の売上高と世界シェア2016)¹

図1.2.1-1は約1,400種の日系企業の製品・部材のシェアと世界市場規模を調査し、NEDO技術戦略研究センター(TSC)が作成したバルーンマップである。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、部素材産業全体では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・スマートフォン、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い。例えば、ディスプレイ用の偏光板やガラス基板、シリコンウェハ、積層セラミックコンデンサなど、日本企業が非常に高いシェアを獲得している。一方、液晶用フォトレ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などの素材は中韓の急迫により大きくシェアを低下させていることには注意が要る。日本が強みを発揮しているこれら部素材・デバイス、総体として大きな規模と競争力を形成しており、部素材・デバイスに対する基礎研究から開発・製品化、サービスまで含めたバリューチェーン全体での戦略が重要であることはいうまでもない。

¹ 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「平成29年度成果報告書 日系企業のモノとサービス・ソフトウェアの国際競争ポジションに関する情報収集情報収集項目(1)「モノを中心とした情報収集と評価」平成30年3月(委託先 株式会社富士キメラ総研)」

1.2.2 研究開発投資や論文、コミュニティ等の動向

■研究開発投資

2000 年以降、世界の主要国でナノテクノロジーへの大規模な国家投資戦略がスタートした。我が国では科学技術基本計画の第 2 期（2001 ～ 2005 年度）および第 3 期（2006 ～ 2010 年度）において、重点推進 4 分野の一つに「ナノテクノロジー・材料」分野が選定され、「ライフサイエンス」「情報通信」「環境」の 3 分野とともに 10 年間にわたって重点的な資源配分がおこなわれた。その後、科学技術基本計画は重点領域型から社会的期待に応える課題解決型（トップダウン型）へと舵が切られたが、「ナノテクノロジー・材料」に関しては、第 4 期（2011-2015 年度）では政策課題を解決する上での共通基盤的な技術として、第 5 期（2016-2020 年度）では新たな価値創出のコアとなる基盤技術として位置付けられ、戦略的投資が続いている。

総務省統計局「平成 29 年 科学技術研究調査結果の概要」によると²、2016 年度のわが国の科学技術研究費（以下、研究費という）は 18 兆 4326 億円（前年度比 2.7%減）である。その内訳としては、企業が 13 兆 3183 億円（同 2.7%減）、大学等が 3 兆 6042 億円（同 1.1%減）、非営利団体・公的機関が 1 兆 5102 億円（同 6.2%減）となっている。また、特定の目的のために使用した研究費のうち、「ナノテクノロジー・材料」は 1 兆 425 億円で前年度比 4.1%増となっている。「ライフサイエンス」は 3 兆 317 億円（同 0.1%増）、「情報通信」は 2 兆 1680 億円（同 3.5%増）、「環境」が 1 兆 1797 億円（同 1.4%減）、「エネルギー」が 9615 億円（同 9.6%減）となっている。図 1.2.2-1 に、2007 ～ 2016 年度の「ライフサイエンス」「情報通信」「ナノテクノロジー・材料」「環境」「エネルギー」の研究費の推移を示す。

各国における国家投資の規模を「ナノテクノロジー・材料」分野だけ切り出して比較することは、各国における科学技術政策あるいは産業政策の基本構造やデータ集計方法が異なることから困難である。LuxReserch 社の報告（2014 年データ）によると、世界のナノテクノロジーへの官民 R&D 投資は米国が最大であり、米国では企業による投資が増加しているが、その一方で民間の投資家による投資は減少傾向にあるという。なお、世界最大のナノテク政策である米国 NNI (National Nanotechnology Initiative) における 2019 年度予算は 14 億ドル（要求額）である。米国や日本を含む主要国の科学技術・研究開発政策に関する詳細は次項「1.2.3 主要国の科学技術・研究開発政策の動向」を参照されたい。

² 総務省統計局「平成 29 年 科学技術研究調査結果の概要」、https://www.stat.go.jp/data/kagaku/kekka/kekkgai/pdf/29ke_gai.pdf

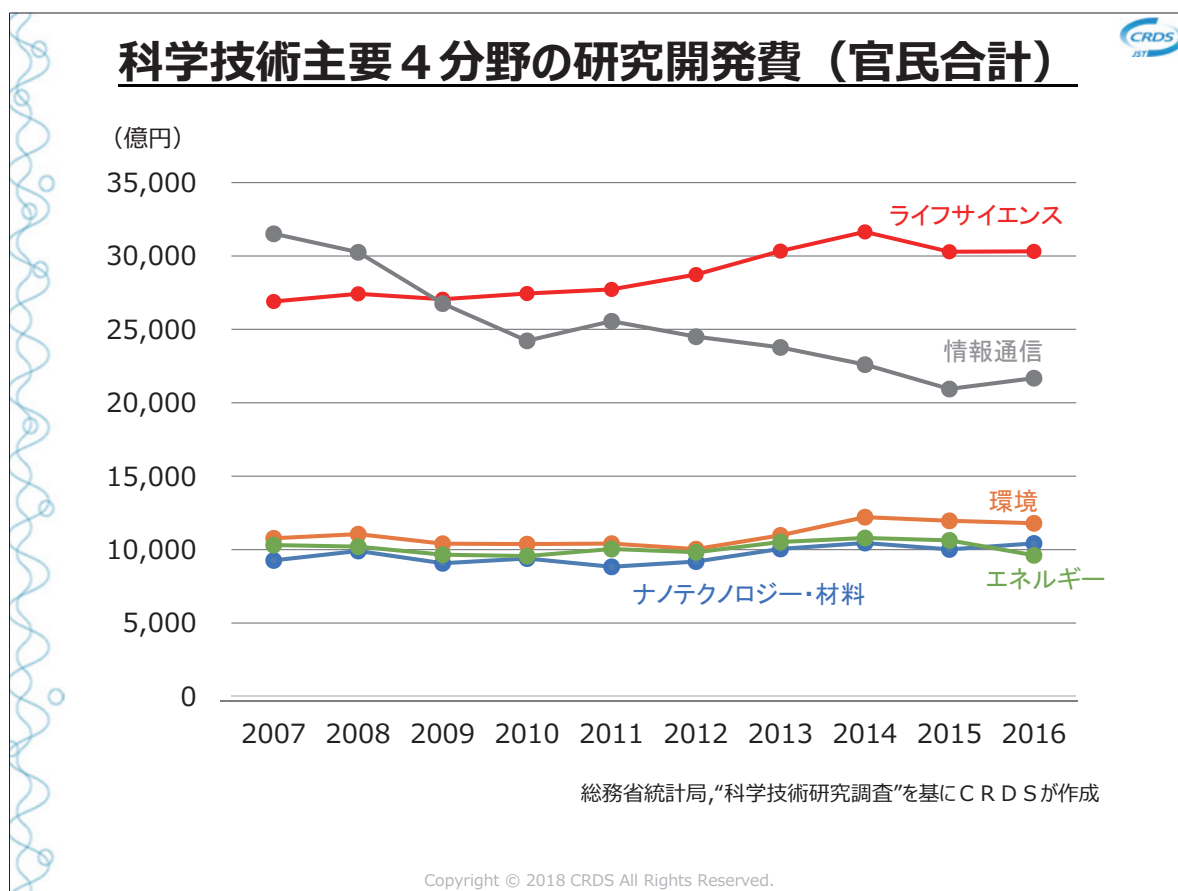


図1.2.2-1 科学技術主要4分野の研究開発費(官民合計)(縦軸／億円、横軸／年)

■学会の動向

図1.2.2-2は、日本と米国のナノテクノロジー・材料に関連する主要学会について、近年の会員数の増減を示したものである。日本、米国ともに会員数は減少傾向にあり、産業界からの会員数が減っていることが主要因と認識されている。日本では日本化学会の会員数が15年間で約8500人減、その他の学会も10～15年の間に2000人～3500人程度減っている。米国ではここ10年でAmerican Physical Society (APS) は会員数を増やしているものの、American Chemical Society (ACS) では約8000人、Materials Research Society (MRS) では約2000人減少している。

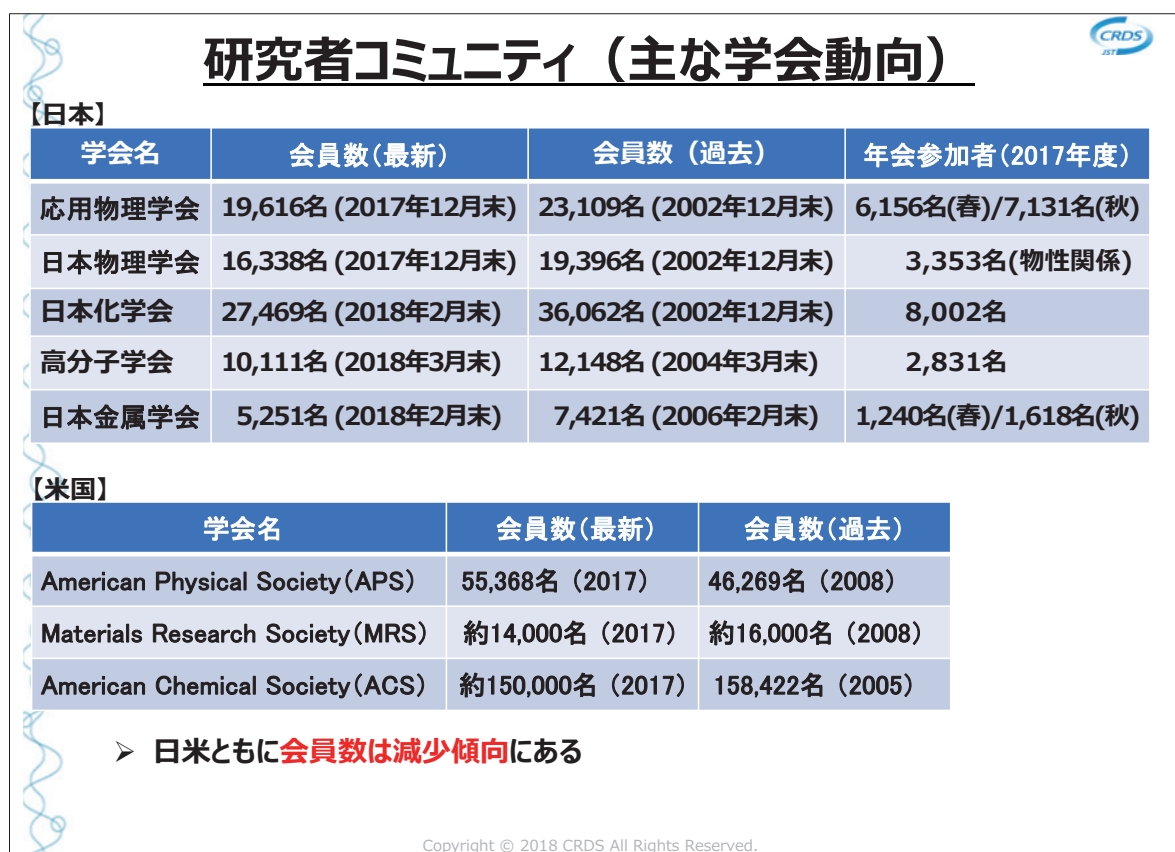


図1.2.2-2 研究者コミュニティ（主な学会動向）

■論文から見る研究コミュニティの動向

主要国のナノテクノロジー・材料分野における論文執筆研究者数の推移を図 1.2.2-3 に示す。2015 年に日本は約 5 万人で第 4 位に位置しているが、米国・中国と、日本を含む他の主要国とでは開きが大きい。2007 年からの変化を見ると、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 1.5 ～ 1.7 倍、韓国は約 2 倍、中国は 3 倍以上に伸びているが、日本は 1.2 倍の伸びに留まっている。なお、データベースへの収録誌数自体が増加しているため、これらの増加率がそのまま研究者人口の増加率に比例するわけではないことに留意が必要である。

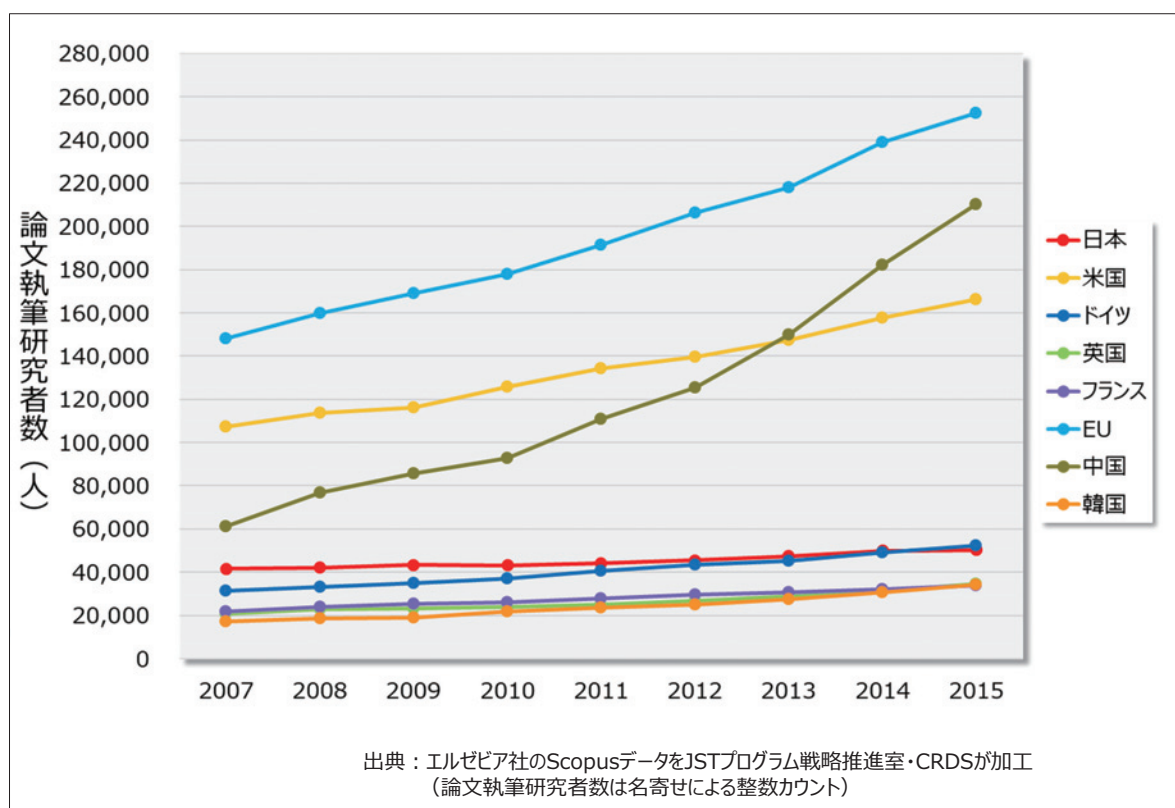


図1.2.2-3 ナノテク・材料分野の論文執筆研究者数の国別推移

各国の統計によると、主要国の研究者数は過去 25 年以上にわたって増加傾向にあり、21 世紀に入ってから中国と韓国の伸びが目立つ。一方で、近年の日本は、やや頭打ちとなっている。文部科学省が毎年発行している科学技術要覧の平成 29 年度版によると、各国の研究者数は、中国（161.9 万人／2015 年）、米国（135.2 万人／2014 年）、日本（84.7 万人／2016 年）、ロシア（44.9 万人／2015 年）、ドイツ（35.8 万人／2015 年）、韓国（35.6 万人／2015 年）、英国（28.9 万人／2015 年）の順となっている。また、研究者のうち企業研究者の割合は、米国（81.6%／1999 年）、韓国（79.7%／2015 年）、日本（73.4%／2016 年、専従換算）、中国（62.7%／2015 年）、フランス（60.5%／2014 年）の順となっており、欧州の主要国である英国（38.2%／2015 年）、ドイツ（56.5%／2015 年）では低めになっている。

■科学技術（研究開発）アウトプット（論文）の国際比較

主要国のナノテクノロジー・材料分野における論文数を比較したものを以下①～③に示す。論文数はいずれも分数カウント（共著者数で除して計算する方法）で表している。本分野の論文動向の総論としては、ここ 10 年ほどで中国が大きく伸び、長らく世界のトップにあった米国を抜いて量的（論文数）にも質的にも（ここでは被引用トップ 10% 論文のことを指して「質」と表現する）トップになっている。日本は論文の質・量ともに頭打ちの傾向が続く。

- ①ナノテクノロジー・材料分野の論文数の推移を図 1.2.2-4 に示す。2015 年の論文数は EU、中国、米国の順で、他の主要国は米国の 1/3 以下である。中国の伸びが群を抜いている。日本は横ばいが続く。

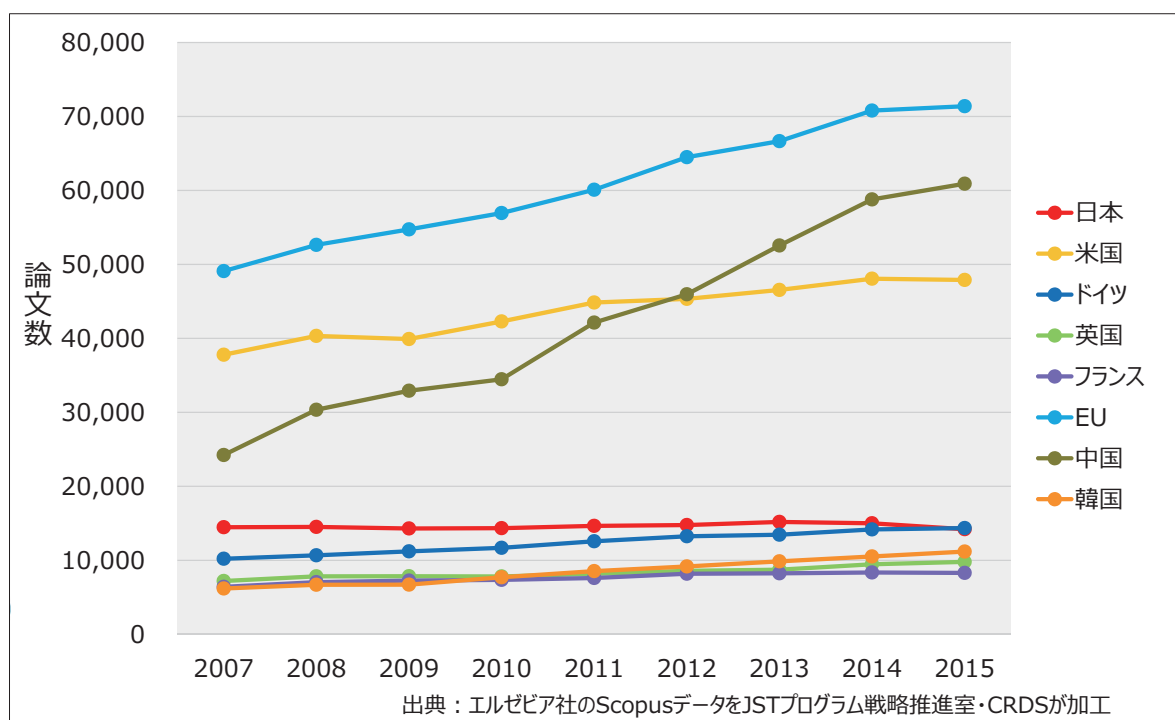


図1.2.2-4 ナノテク・材料分野(全体)の論文数推移

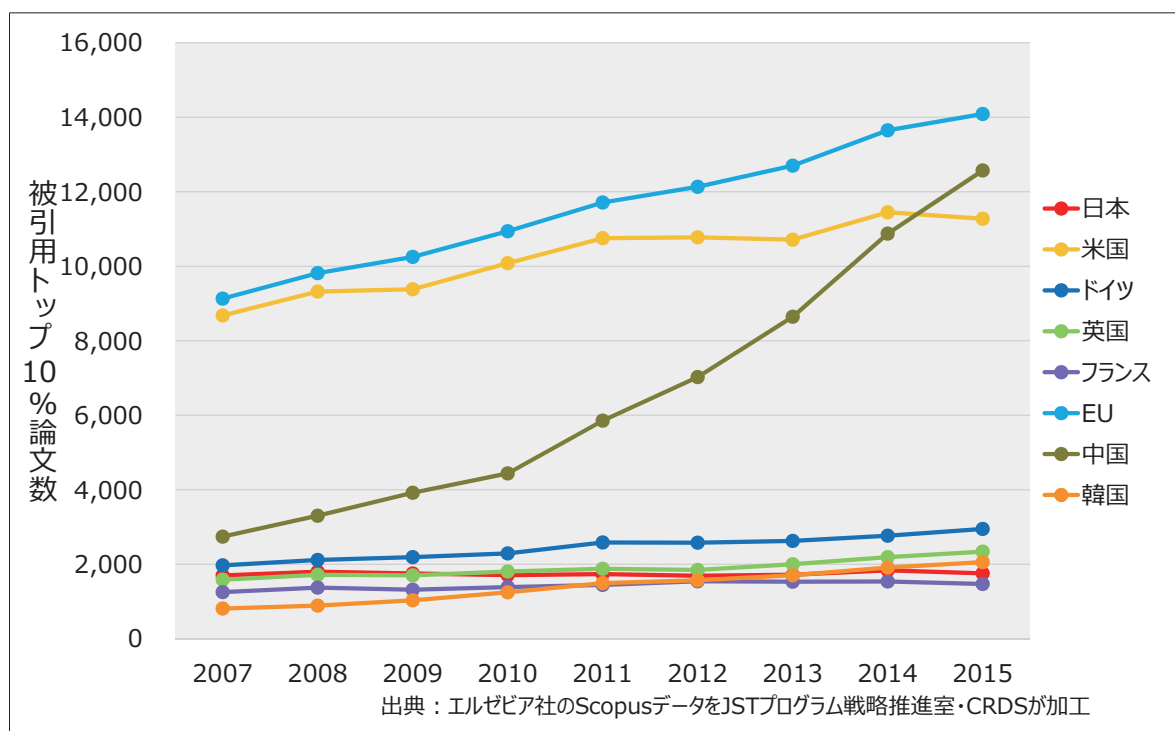


図1.2.2-5 ナノテク・材料分野(全体)の被引用トップ10%論文数の推移

②ナノテクノロジー・材料分野の被引用トップ10%論文数を図1.2.2-5に示す。中国の勢いが特徴的であり、上述の論文数と同様に、EU、中国、米国の順になっている。日本は横ばいが続き、徐々に順位を下げている。

③ナノテクノロジー・材料分野の論文動向について、「環境・エネルギー」「ライフ・ヘルスケア」「ICT・エレクトロニクス」の3つの区分別にしたものを図 1.2.2-6 ～図 1.2.2-8 に示す。いずれの分野も中国の論文数および被引用トップ 10% 論文数の伸びが顕著である。論文数の世界的な増加傾向から判断すると、最も勢いがあるのは環境・エネルギー区分であり、特に中国の相当な注力が窺える。2015 年のデータを見ると、日本は論文数において、いずれの分野でも米・中に次ぐ 3 位もしくは 4 位辺り (EU 除く) に位置するが、被引用トップ 10% 論文数はいずれも 6 位であり、全体的に停滞気味であることがわかる。

●環境・エネルギーに関するナノテクノロジー・材料

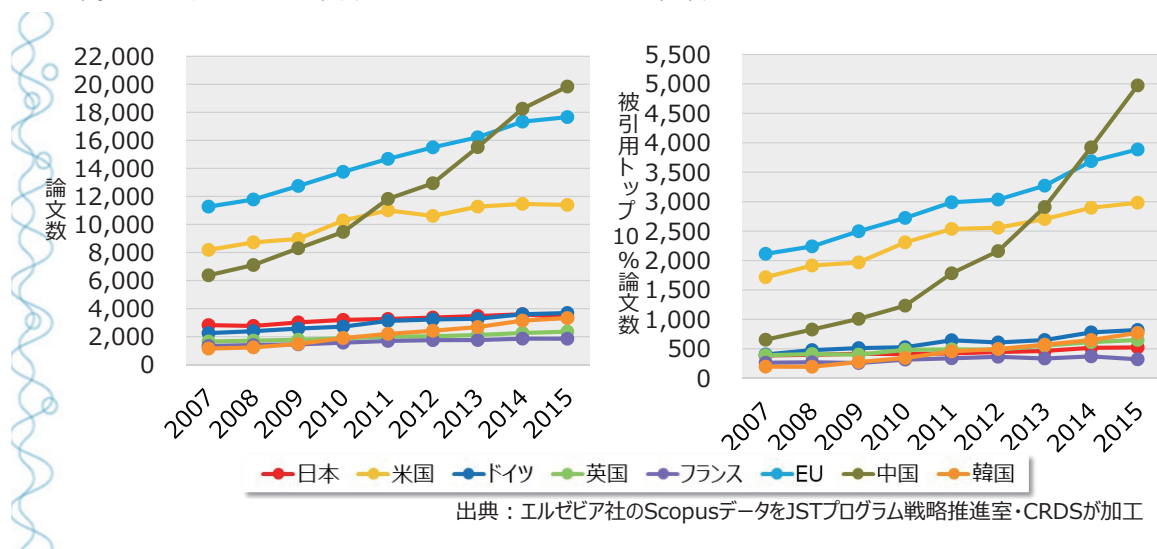


図1.2.2-6 環境・エネルギーに関するナノテク・材料分野の論文動向

●ライフ・ヘルスケアに関するナノテクノロジー・材料

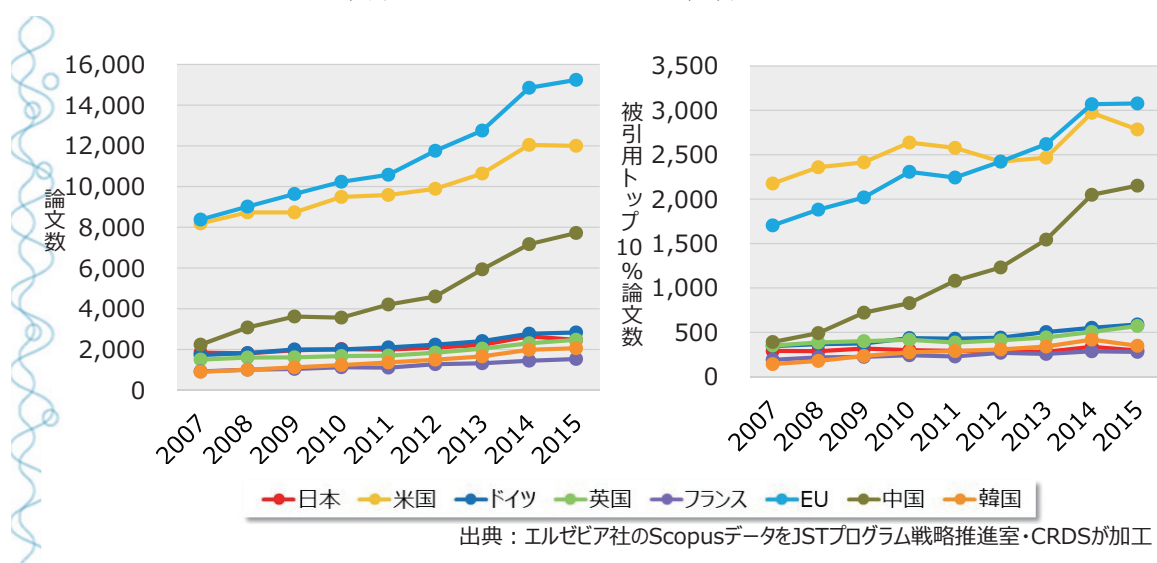


図1.2.2-7 ライフ・ヘルスケアに関するナノテク・材料分野の論文動向

● ICT・エレクトロニクスに関するナノテクノロジー・材料

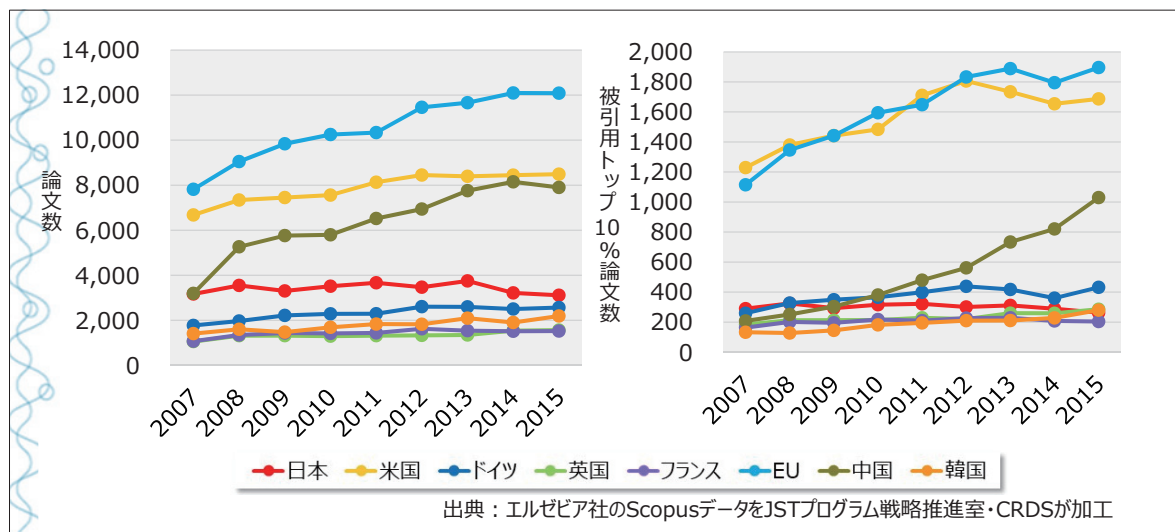


図1.2.2-8 ICT・エレクトロニクスに関するナノテク・材料分野の論文数

※図 1.2.2-3 ～ 1.2.2-8 は、エルゼビア社の Scopus データをもとに JST プログラム戦略室・CRDS が加工したものである。Scopus における著者キーワードと索引キーワード付与のタイミングの問題で 2015 年までのデータのみ掲載している。

1.2.3 主要国の科学技術・研究開発政策の動向

■総説

2001年以降、世界各国で進められてきたナノテクノロジー・材料に関する各種取組の推移を概括的にまとめておく。図1.2.3-1に、世界主要国の近年のナノテクノロジー・材料に関する主要国の政策・戦略をまとめた。

CRDS
JST

主要国のナノテク・材料科学技術政策・国家戦略

日本	◆ 第5期科学技術基本計画、Society5.0の実現へ向けた11のシステムの一つに「統合型材料開発システム」を特定。新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術として「素材・ナノテクノロジー」「光・量子」など ◆ Q-LEAP（2018-）を開始	
米国	◆ National Nanotechnology Initiative（2001-） - 第6次NNI戦略プラン（2016-）省庁横断テーマNational Signature Initiativeを更新 - National Strategic Computing InitiativeやBRAIN Initiativeと連携し、Future Computing GCを特定 ◆ Materials Genome Initiative（2011-2016）、Electronics Resurgence Initiative（2018-）、National Quantum Initiative（2019-） ◆ Critical Mineral Executive Order発令（2017.12）	
欧州	EU	◆ Horizon 2020（2014-2020） - Key Enabling Technologies（KETs）として、ナノテクノロジー、先端材料、先進製造技術、バイオテクノロジーを選定 - Future and Emerging Technologies（FET）として、2018年よりQuantum Flagshipを開始
	独	◆ Action Plan Nanotechnology 2020（2016-2020） ◆ Quantum Technologies –from basic to markets（2018-2022、最長2028）
	英	◆ UK Nanotechnologies Strategy（2010-） - BIS（現BEIS）が中心となって策定し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 ◆ UK Quantum Technologies Programme（2014-）
	仏	◆ SNR France Europe 2020（2015-） - 10の社会的課題に対する重点的研究方針として、希少資源への依存度減少、化石燃料からの脱却、新材料設計、センサーを特定
中国		◆ 国家中長期科学技術発展計画綱要（2016-2020） - 先端技術8分野の一つに「新材料技術」、重大科学研究4分野の一つに「ナノ研究」 - 第13次五ヶ年計画 2030年を見据えた15の重大科学技術プロジェクトに「重点的新材料」「量子通信・量子コンピュータ」「スマート製造・ロボット」「航空エンジン・ガスタービン」等を指定 ◆ 国家重点研究開発計画の一つとして「材料ゲノム工学のナノテクノロジー」と支援ナノテクノロジーを開始（2016-） ◆ 中国製造2025 半導体自国化へ向け投資拡大。R&D投資を対GDP比で1.5%程度から3%程度へ引き上げる ◆ 合肥に量子科学技術国家実験室を建設中（2020年完成予定）
韓国		◆ 第4期ナノ技術総合発展計画（2016-2025）米国の技術レベルを100%としたときに、92%まで到達させる ◆ 第3次National Nanotechnology Map（2018-2027） - 70のコアテクノロジーを同定。ナノテクノロジー、人工知能、無線通信、無人飛行機、超急速充電電池などの開発を推進

Copyright © 2018 CRDS All Rights Reserved.

Copyright © 2018 CRDS All Rights Reserved.

図1.2.3-1 主要国のナノテク・材料基本政策・国家戦略

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

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。

日本

■基本政策

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

第 3 期（2006-2010 年度）は、5 領域「ナノエレクトロニクス領域」、「ナノバイオテクノロジー・生体材料領域」、「材料領域」、「ナノテクノロジー・材料分野推進基盤領域」、「ナノサイエンス・物質科学領域」で重要な研究開発課題が設定・推進された。そこでの主な成果・取組は以下のとおりである³。

- 国家基幹技術「X線自由電子レーザー」、「ナノテクノロジー・ネットワーク」等のインフラの整備
- 日本初のオープンイノベーション拠点「つくばイノベーションアリーナ」（TIA - nano）による産学官連携の強化
- 府省連携プロジェクト：『元素戦略プロジェクト』（文部科学省）と『希少金属代替材料プロジェクト』（経済産業省）の着実な進捗等

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

第 4 期（2011-2015 年度）においては、科学技術の重点領域型から社会的期待に応える課題解決型（トップダウン型）の政策へと舵が切られ、その中でナノテクノロジー・材料領域は、政策課題三本柱の横断的領域と位置付けられた。しかし、このような横断領域は独立したイニシアティブとして設定されなかったため、国際的にも「日本では基本政策においてナノテクノロジーが重点化されなくなった」と認識される事態が起こった。その後、科学技術イノベーション総合戦略 2014 では、ナノテクノロジーは産業競争力を強化し政策課題を解決するため

³【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

の分野横断的技術として重要な役割を果たすという旨が明記された。また、同総合戦略 2015 では、「重点的に取り組むべき課題」の一つである超スマート社会の実現に向けた共通基盤技術や人材の強化、において、センサ、ロボット、先端計測、光・量子技術、素材、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー等の共通基盤的な技術として、改めて位置付けが明確化された。

第5期（2016-2020 年度）では、過去 20 年間の科学技術基本計画の実績と課題として、研究開発環境の着実な整備、ノーベル賞受賞に象徴されるような成果が上げられた一方で、科学技術における「基盤的な力」の弱体化、政府研究開発投資の伸びの停滞などが指摘された。この中で、ナノテクノロジーは「新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術」の一つに位置づけられた。超スマート社会「Society5.0」への展開を考慮しつつ 10 年程度先を見据えた中長期的視野から、高い達成目標を設定し、その目標の実現に向けて基盤技術の強化に取り組むべきとしている。さらに、基礎研究から社会実装に向けた開発をリニアモデルで進めるのではなく、スパイラル的な産学連携を進めることで、新たな科学の創出、革新的技術の実現、実用化および事業化を同時並行的に進めることができる環境整備が重視された。Society5.0 の実現に貢献する 11 のシステムが特定され、その一つに「統合型材料開発システム」がある。計算科学・データ科学を駆使した革新的な機能性材料、構造材料等の創製を進めるとともに、その開発期間の大幅な短縮を実現することを目標としている。そこで注目される施策が、「統合型材料開発システム」に関する 3 府省連携施策である。内閣府 SIP「革新的構造材料」（2014 年度 -）における「マテリアルズインテグレーション」、文部科学省・JST「イノベーションハブ構築支援事業」の一つのとして NIMS に発足した「情報統合型物質・材料開発イニシアティブ（MI2I）」（2015 年度 -）、経済産業省・NEDO・産業技術総合研究所を中心とする「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト」（2016 年度 -）がそれに相当する。これら 3 府省のプロジェクトが補完的に研究開発を実施していく体制が、総合科学技術イノベーション会議 ナノテクノロジー・材料基盤技術分科会を通じて構築された。

科学技術イノベーション総合戦略 2016、2017 においては、Society5.0 の実現に向けたプラットフォーム構築に必要な基盤技術であるサイバー空間関連技術やフィジカル空間（現実空間）関連技術の開発を横断的に支える技術として「素材・ナノテクノロジー」が位置づけられ、統合型材料開発システムとともに早期構築を進める、とされている。

また、文部科学省が 2018 年 8 月に「ナノテクノロジー・材料科学技術 研究開発戦略」を策定している。材料やデバイスをマテリアルという言葉でまとめ、未来社会実現への壁を打破しながら産業振興と人類の幸せの両方に貢献する「マテリアルによる社会革命（マテリアル革命）」の実現を目標として掲げた。その達成へ向け、魅力的なマテリアルの創出やマテリアルを世に送り出すサイエンスへの挑戦、人的・時間的・資金的制約を乗り越えるための研究現場の生産性の向上、マテリアル革命を成功に導くための推進方策といった 4 つの取組を整理し、研究開発戦略としてまとめた。

■研究開発プロジェクト

現在の日本の研究開発政策のトレンドを把握するために、日本における主な研究開発プログラム・プロジェクトを俯瞰する。図 1.2.3-1 から 1.2.3-9 にナノテクノロジー・材料分野に関連するプロジェクトを抜粋している。

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 1.2.3-2 のような研究開発プロジェクトを実施している。我が国の産業にとって将来的に有望な市場を創造し、日本経済の再生を果たしていくという趣旨で、2014 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 2014 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・ハインパクトな挑戦的研究開発を推進する「革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）」を開始した。SIP、ImPACT とも 2018 年度末に全てのプロジェクトが終了することを受けて、2017 年 6 月より次期 SIP についての検討が CSTI 有識者議員を構成員とする SIP ガバニングボードで始まり、同年 12 月の「新しい経済政策パッケージ（平成 29 年 12 月閣議決定）」において、当初は 2019 年度開始予定であった次の SIP を前倒しで開始することが決定された。その後の SIP ガバニングボードおよび CSTI 本会議での議論を通じて、「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第 2 期」の研究開発課題とプログラムディレクター（PD）が決定している。

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・材料関係を抜粋	
戦略的イノベーション創造プログラム（SIP） 2014-18年度		革新的研究開発推進プログラム（ImPACT） 2014-18年度	
革新的燃料技術	杉山 雅則（トヨタ）	超薄膜化・強靱化「しなやかタフポリマー」の実現	伊藤 耕三（東大/JST）
次世代パワーエレクトロニクス	大森 達夫（三菱電気）	コピキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿命社会の実現	佐野 雄二（東芝/JST）
革新的構造材料	岸 輝雄（ISMA）	無充電で長期間使用できる究極のエコIT機器の実現	佐橋 政司（東北大/JST）
インフラ維持管理・更新・マネジメント技術	藤野 陽三（横国大）	重介護ゼロ社会を実現する革新的サイバニクスシステム	山海 嘉之（筑波大/JST）
革新的設計生産技術	佐々木 直哉（日立）	超高機能構造タンパク室による素材産業革命	鈴木 隆領（小島プレス工業/JST）
戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期 2018-22年度		タフ・ロボティクス・チャレンジ	田所 諭（東北大/JST）
フィジカル空間デジタルデータ処理基盤	佐相 秀幸（富士通）	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 玲子（東芝/JST）
統合型材料開発システムによるマテリアル革命	岸 輝雄（東大、ISMA）	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 令子（名大/JST）
光・量子を活用したSociety 5.0実現化技術	西田 直人（東芝）	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 喜久（JST）
		豊かで安全な社会と新しいバイオものづくりを実現する人工細胞リアクタ	野地 博行（東大/JST）

図1.2.3-2 日本の大型研究開発プロジェクト(SIP、ImPACT)

文部科学省では、世界トップレベルの研究推進や産学連携促進・イノベーションの創出といった観点から研究拠点を整備している（図 1.2.3-3）。世界トップレベルの研究拠点形成を目指すとして、2007 年度から「世界最高レベルの研究水準」「融合領域の創出」「国際的な研究環境の実現」「研究組織の改革」の 4 つの要件を満たす「世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）」を実施している。WPI 拠点のうち、2007 年度に採択した京都大学 iCeMS、物質・材料研究機構 MANA、東北大学 AIMR の 3 拠点に関しては 2016 年度で補助金が終了し、東

京大学 Kavli IPMU は 2021 年までの支援延長となっている。また、2016 年 11 月に開催された第 3 回研究力強化に向けた研究拠点の在り方に関する懇談会（主査：平野眞一・上海交通大学講席教授）において WPI の長期計画や補助金終了後の措置等について議論がなされた。その結果、2017 年度より新たに公募が開始され、補助金終了後の WPI 拠点をはじめとする日本トップレベルの拠点をネットワーク化し、それらの持つ経験・ノウハウを展開することで全国的な基礎研究力の強化につなげる枠組み“WPI アカデミー”を立ち上げ、WPI の成果最大化に向けた取り組みが始まっている。また、2016 年に終了した上記 3 拠点に関しては現在も大学の運営費交付金での支援によって活動を継続している。

2013 年度より、将来社会のニーズから導き出される社会の姿、暮らしの在り方を設定し既存分野・組織の壁を取り払い、企業だけでは実現できない革新的なイノベーションを産学連携で実現することを目的とした「革新的イノベーション創出プログラム（COI STREAM）」が開始された。現在、研究活動も後半期に差し掛かっている。

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・材料関係を抜粋			
世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI） 2007年度-		革新的イノベーション創出プログラム（COI STREAM） 2013-21年度	
化学反応創成研究拠点（ICReDD） 2018年度-	前田 理（北大）	さりげないセンシングと日常人間ドックで実現する理想自己と家族の絆が導くモチベーション向上社会創生拠点	東北大学、NECソリューションイノベータ
ナノ生命科学研究所（NanoLSI） 2017年度-	福岡 剛士（金沢大）	自分で守る健康社会拠点	東京大学
トランスフォーマティブ生命分子研究所（ITbM） 2012年度-	伊丹 健一郎（名大）	スマートライフケア社会への変革を先導するものづくりオープンイノベーション拠点	川崎市産業振興財団
カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所（I2CNER） 2010年度-	ベトロス ソフロニス（九大）	活力ある生涯のためのLast 5Xイノベーション拠点	京都大学、パナソニック
カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU） 2007年度-	大栗 博司（東大）	「サイレントボイスとの共感」地球インクルーシブセンシング研究拠点	東京工業大学、ソニー
		人間力活性化によるスーパー日本人の育成拠点	大阪大学、パナソニック
		コヒーレント光子技術によるイノベーション拠点	東京大学
		革新材料による次世代インフラシステムの構築拠点	金沢工業大学、大和ハウス工業
		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	信州大学、日立製作所
		持続的共進化地域創成拠点	九州大学、NTT西日本

Copyright © 2018 CRDS All Rights Reserved.

図1.2.3-3 日本の主な研究拠点型プロジェクト（WPI、COI、等）

その他、文部科学省、経済産業省では、国が支援すべき特定のテーマについて拠点形成やネットワーク化、産学連携、産業化などを促進する様々な観点からプログラムを推進している（図1.2.3-4）。このなかで注目されるのは、文部科学省において 2018 年度から開始された「光・量子飛躍フラッグシップ（Q-LEAP）」および 2019 年度から開始する「材料の社会実装に向けたプロセスサイエンス構築事業（Materealize プロジェクト）」、および NEDO において 2019 年度から開始する「IoT 社会実現のための超微小量センシング技術開発（nano-IoT）」である。

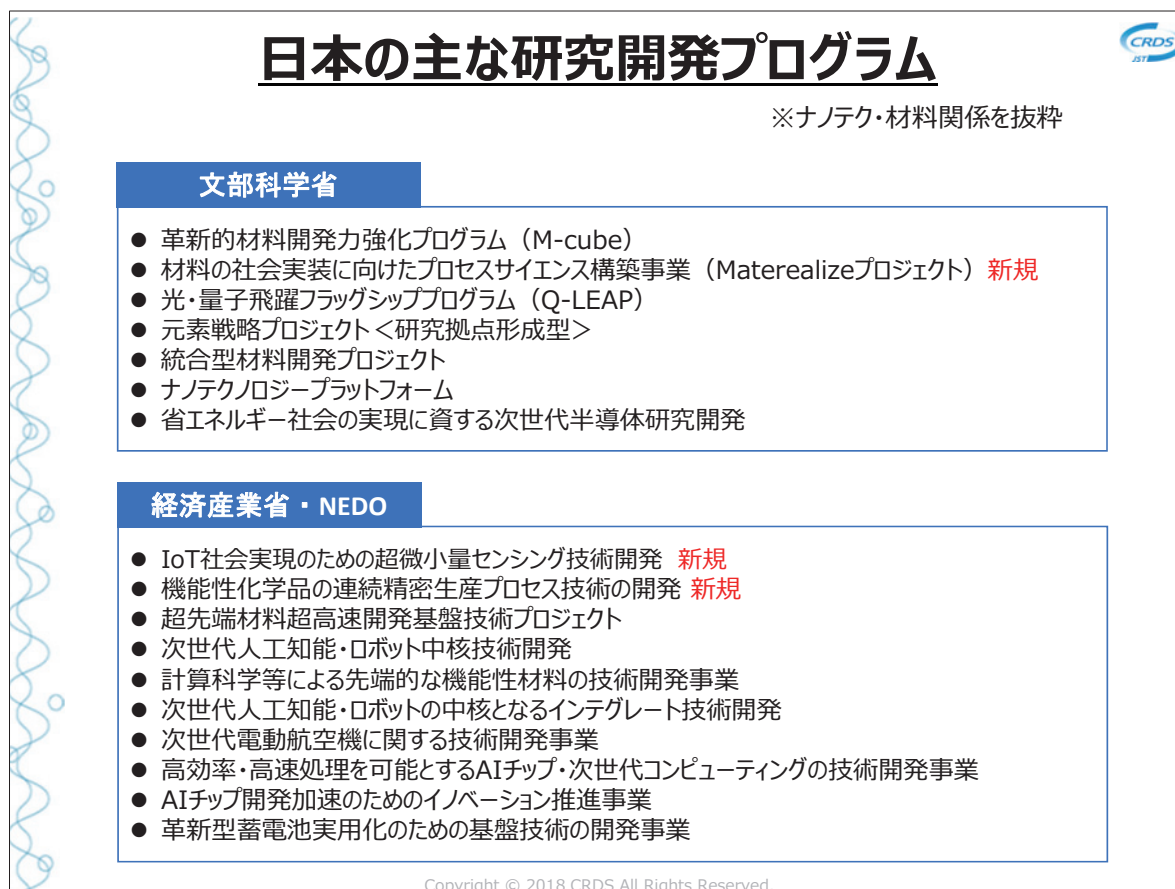


図1.2.3-4 日本の主な研究開発プログラム（文部科学省、経済産業省）

JST の戦略的創造研究推進事業は、日本が直面する重要な課題の達成に向けた基礎研究を推進し、科学技術イノベーションを生み出す創造的な新技術を創出することを目的にしたトップダウン型の競争的資金である。その中で「CREST」では、国が定める戦略目標の達成に向けて、課題達成型基礎研究を推進し、科学技術イノベーションを生み出す革新的技術シーズを創出するためのチーム型研究を推進している（図 1.2.3-5）。一方、「ERATO」では卓越したリーダーの下、独創性に富んだ課題達成型基礎研究を推進し、新しい科学技術の源流を創出することを目的としている。いずれのプログラムも高い能力と大きな可能性をもった研究者が、挑戦すべきと考える研究テーマに存分に没頭できる体制を提供している（図 1.2.3-6）。

近年のJST戦略的創造研究推進事業（CREST）															※ナノテク・材料関係を抜粋									
2011	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25										
■ エネルギー高効率利用のための超界面科学 研究総括： 花村 克悟（東京工業大学）																								
■ 新機能創出を目指した分子技術の構築 研究総括： 山本 尚（中部大学）																								
■ 超空間制御に基づく高度な特性を有する革新的機能素材等の創製 研究総括： 瀬戸山 亨（三菱化学）																								
■ 素材・デバイス・デバイス融合による革新的ナノデバイス等の創成 研究総括： 榎井 貴康（東京大学）																								
■ 再生可能材料からの材料・デバイスの製造とその利用のための革新的基礎技術の創出 研究総括： 江口 浩一（京都大学）																								
■ 二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基礎技術の創出 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： 宮野 純夫（東京大学）																								
■ 多様な天然炭素資源の活用に関する革新的触媒と創出技術 研究総括： 上田 渉（神奈川大学）																								
■ 新たな光機能や光物性の発現・活用を基軸とする次世代デバイス等の基礎技術 研究総括： 北山 研一（光産業創成大学院大学）																								
■ 微小材料を利用した革新的な環境発電技術の創出 研究総括： 谷口 研二（大阪大学）																								
■ 量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出 研究総括： 荒川 泰彦（東京大学）																								
■ 計測技術と高度情報処理の融合によるイメージング計測・解析手法の開発と応用 研究総括： 南宮 慶幸（東京大学）																								
■ ナノスケール・サーマルマネジメント基礎技術の創出 研究総括： 丸山 茂夫（東京大学）																								
■ 実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新 研究総括： 細野 秀雄（東京工業大学）																								
■ 新たな生産プロセス構築のための電子やイオン等の能動的制御による革新的反応技術の創出 研究総括： 吉田 潤一（群馬工業高等専門学校）																								
■ トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出 研究総括： 上田 正仁（東京大学）																								

Copyright © 2018 CRDS All Rights Reserved.

図1.2.3-5 近年のJST戦略的創造研究推進事業(CREST)プロジェクト

CRDS
2017

近年のJST戦略的創造研究推進事業（ERATO）

※ナノテク・材料関係を抜粋

2013	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23					
■ 安達分子エキシトン工学 研究総括： 安達 千波矢（九州大学）															
■ 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）															
■ 伊丹分子ナノカーボン 研究総括： 伊丹 健一郎（名古屋大学）															
■ 磯部縮退 π 集積 研究総括： 磯部 寛之（東京大学）															
		■ 百生量子ビーム位相イメージング 研究総括： 百生 敦（東北大学）													
		■ 齊藤スピン量子整流 研究総括： 齊藤 英治（東京大学）													
		■ 山元アトムハイブリッド 研究総括： 山元 公寿（東京工業大学）													
			■ 中村巨視的量子機械 研究総括： 中村 泰信（東京大学）												
						■ ニューロ分子技術 研究総括： 浜地 格（京都大学）									

Copyright © 2018 CRDS All Rights Reserved.

Copyright © 2018 CRDS All Rights Reserved.

図1.2.3-6 近年のJST戦略的創造研究推進事業(ERATO)プロジェクト

また、JST では 2017 年度より、社会・産業ニーズを踏まえ、経済・社会的にインパクトのあるターゲット（出口）を明確に見据えた技術的にチャレンジングな目標を設定し、戦略的創造研究推進事業や科学研究費助成事業等の有望な成果の活用を通じて、実用化が可能かどうか見極める研究開発を実施する、未来社会創造事業を新たに設置した。ここでは、「探索加速型」と「大規模プロジェクト型」の 2 つのアプローチを採用している。「探索加速型」では、探索研究から本格研究へと段階的に研究開発を進めることを原則とし、文部科学省が定める領域を踏まえ、JST が「科学技術で作りたい未来社会像」に関して提案募集を行う。提案募集結果を通じて設定された「重点公募テーマ」に基づき、研究開発課題を公募している。一方、「大規模プロジェクト型」では、科学技術イノベーションに関する情報を収集・分析し、現在の技術体系を変え、将来の基盤技術となりうる「技術テーマ」を文部科学省が特定し、その技術テーマに係る研究開発課題に集中的に投資している（図 1.2.3-7）。尚、本事業はステージゲート方式が導入されている。

JST未来社会創造事業（MIRAI）	
探索加速型	重点公募テーマ
「超スマート社会の実現」領域 運営統括：前田 章（元日立製作所）	- 多種・多様なコンポーネントを連携・協調させ、新たなサービスの創生を可能とするサービスプラットフォームの構築（2017年度-） - サイバー世界とフィジカル世界を結ぶモデリングとAI（2018年度-）
「持続可能な社会の実現」領域 運営統括：國枝 秀世（JST/名古屋大学）	- 新たな資源循環サイクルを可能とするものづくりプロセスの革新（2017年度-） - 労働人口減少を克服する“社会活動寿命”の延伸と人の生産性を高める「知」の拡張の実現（2017年度-） - 将来の環境変化に対応する革新的な食料生産技術の創出（2018年度-）
「世界一の安全・安心社会の実現」領域 運営統括：田中 健一（三菱電機）	- ひとりひとりに届く危機対応ナビゲーターの構築（2017年度-） - ヒューメインなサービスインダストリーの創出（2017年度-） - 生活環境に潜む微量な危険物から解放された安全・安心・快適なまちの実現（2018年度-）
「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域 運営統括：橋本 和仁（NIMS）	「ゲームチェンジングテクノロジー」による低炭素社会の実現（2017年度-）
「共通基盤」領域 運営統括：長我部 信行（日立製作所）	革新的な知や製品を創出する共通基盤システム・装置の実現（2018年度-）
大規模プロジェクト型	技術テーマ
運営統括：林 善夫（JST）	- 粒子加速器の革新的な小型化及び高エネルギー化につながるレーザープラズマ加速技術（2017年度-） - エネルギー損失の革新的な低減化につながる高温超電導線材接合技術（2017年度-） - 自己位置推定機器の革新的な高精度化及び小型化につながる量子慣性センサー技術（2017年度-） - 通信・タイムビジネスの市場獲得等につながる超高精度時間計測（2018年度-） - Society5.0の実現をもたらす革新的接着技術の開発（2018年度-） - 未来社会に必要な革新的水素液化技術（2018年度-）

Copyright © 2018 CRDS All Rights Reserved.

図1.2.3-7 JST未来社会創造事業

JST では、上記の戦略的創造研究推進事業や未来社会創造事業以外にもイノベーションの創出に向け、特色のある産学連携プログラムを推進している（図 1.2.3-8）。「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、「先進的低炭素化技術開発（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。

CRDS

近年のJST諸事業

※ナノテク・材料関係を抜粋

戦略的イノベーション創出推進プログラム（S-イノベ） 2009年度-	
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	PO: 谷口 彬雄（信州大）
フォトニクスポリマーによる先進情報通信技術の開発	PO: 宮田 清蔵（農工大）
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	PO: 佐藤 謙一（元住友電気工業）
スピン流を用いた新機能デバイス実現に向けた技術開発	PO: 安藤 功児（産総研）
国立研究開発法人を中核としたイノベーションハブの構築支援事業 2015年度-	
情報統合型物質・材料開発イニシアティブ（MI ² I）	中核機関：NIMS
先端的低炭素化技術開発（ALCA）革新技術領域 2013年度-	
太陽電池および太陽エネルギー利用システム	PO: 大須賀 篤弘（京大）
超伝導システム	PO: 大崎 博之（東大）
蓄電デバイス	PO: 逢坂 哲彌（早大）
耐熱材料・鉄鋼リサイクル高性能材料	PO: 原田 幸明（NIMS）
バイオテクノロジー	PO: 近藤 昭彦（神戸大）
革新的省・創エネルギー化学プロセス	PO: 辰巳 敬（NITE）
革新的省・創エネルギーシステム・デバイス	PO: 谷口 研二（阪大）

産学共創基礎基盤研究プログラム 2010年度-	
テラヘルツ波時代を切り拓く革新的基盤技術の創出	PO: 伊藤 弘昌（東北大）
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	PO: 加藤 雅治（新日鉄住金）
革新的次世代高性能磁石創製の指針構築	PO: 福永 博俊（長崎大）
ACCEL	
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 泰弘（分子研）
ダイヤモンド電極の物質科学と応用展開	宋長 泰明（慶應大）
P S D 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 洋（東大）
元素間融合を基軸とする物質開発と応用展開	北川 宏（京大）
近接場結合集積技術による革新的情報処理システムの実現と応用展開	黒田 忠広（慶應大）
濃厚ポリマーブラシのレジエンシー強化とトライボロジー応用	辻井 敬巨（京大）
スローライト構造体を利用した非機械式ハイレゾ光レーダーの開発	馬場 俊彦（横国大）
スーパーバイオイメージャーの開発	染谷 隆夫（東大）
半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開	田中 耕一郎（京大）

Copyright © 2018 CRDS All Rights Reserved.

Copyright © 2018 CRDS All Rights Reserved.

図1.2.3-8 近年のJST諸事業

NEDOの主要プロジェクト				※ナノテク・材料関係を抜粋	
分野	事業・プロジェクト名	研究期間	分野	事業・プロジェクト名	研究期間
太陽光発電	太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト	2014-18	新製造技術	高輝度・高効率次世代レーザー技術開発	2016-20
	太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト	2014-18		次世代型産業用3Dプリンタの造形技術開発・実用化事業	2017-18
	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発	2015-19	材料・ナノテクノロジー	非可食性植物由来化学品製造プロセス技術開発	2013-19
燃料電池・水素	固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発	2013-19		二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発	2014-21
	水素利用等先導研究開発事業	2014-22		有機ケイ素機能性化学品製造プロセス技術開発	2014-21
	水素社会構築技術開発事業	2014-22		革新的新構造材料等研究開発	2014-22
	固体高分子燃料電池利用高度化技術開発事業	2015-19		次世代構造部材創製・加工技術開発	2015-19
	超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業	2018-22		超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト	2016-21
蓄電池・エネルギーシステム	革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発	2016-22		省エネ製品開発の加速化に向けた複合計測分析システム研究開発事業	2018-22
	先進・革新蓄電池材料評価技術開発（第2期）	2018-22		次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発	2014-21
電子・情報通信	低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト	2011-19		IoT社会実現のための超微量センシング技術開発	2019-23
	次世代プリントエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発	2010-18		機能性化学品の連続精密生産プロセス技術の開発	2019-25
	超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発	2013-21	ロボット技術	インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト	2014-18
	高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発	2016-27		次世代人工知能・ロボット中核技術開発	2015-22
	IoTを活用した新産業モデル創出基盤整備事業	2017-18		ロボット活用型市場化適用技術開発プロジェクト	2015-19
	AIチップ開発加速のためのイノベーション推進事業	2018-22		ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト	2017-21

Copyright © 2018 CRDS All Rights Reserved.

図1.2.3-9 NEDOの主要プロジェクト

米国

■基本政策

● National Nanotechnology Initiative : NNI⁴

17省庁が参加する省庁横断の国家イニシアティブであり、大統領府に存在する OSTP（Office of Science and Technology Policy）に設置された「NSET（Nanoscale Science, Engineering, and Technology Subcommittee）」で、OMB（行政管理予算局）も参加の下、企画・推進されている。2001～2005年度の第1次 NNI 戦略プランに始まり、2016年度からの第6次 NNI 戦略プランまで出されている。2018年現在においてこれは更新されていない。NNIのビジョン・ゴールは一貫して、①ワールドクラスのナノテク研究開発プログラムの推進、②商業的および公共的利益のために新技術の製品への移転を促進する、③ナノテクの教育資源と熟練労働力を確保し、ナノテクを推進するインフラストラクチャーとツールセットを整備し維持する、④ ELSI・EHS・対策によるナノテクノロジーの責任ある発展、である。NNIでは教育やアウトリーチに積極的に施策展開を図ってきており、これらは継続的に取り組まれている。2001年から2019年予算まで含めると NNI には累計で、270 億ドル以上が投じられてきた。2019年度予算は約14 億ドルであり前年から5% 減である。

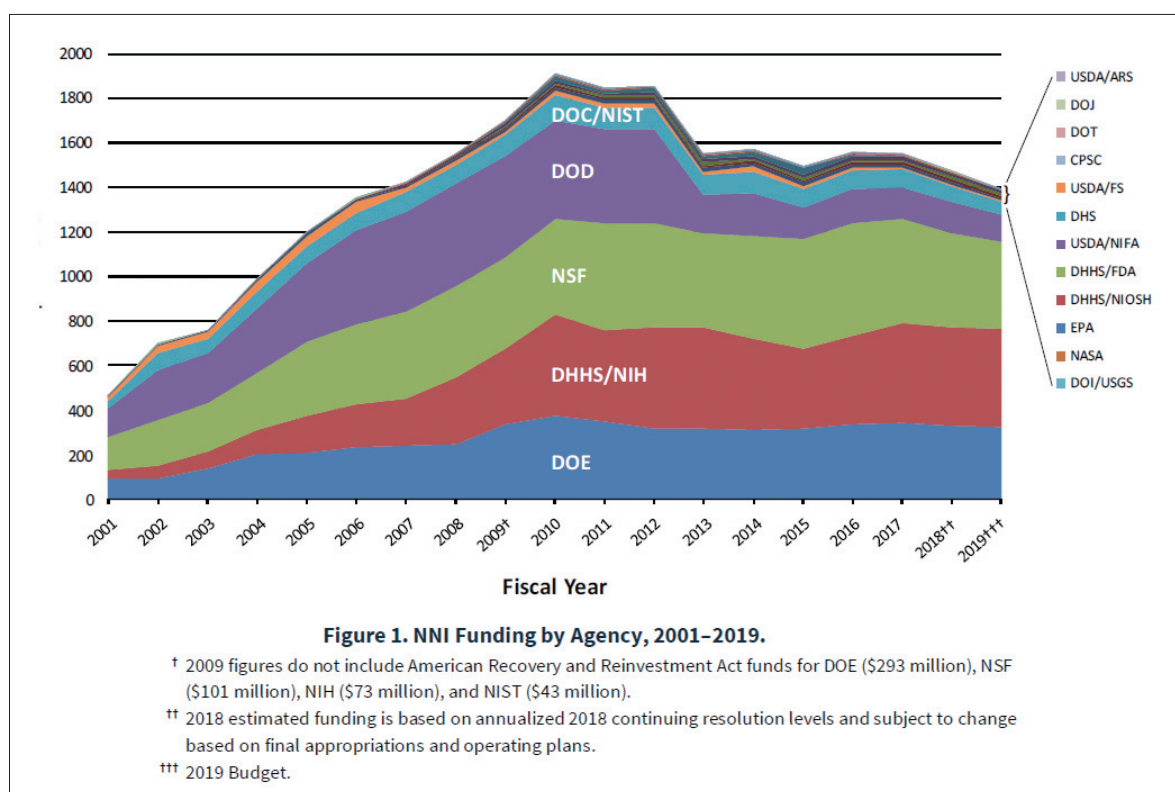


図1.2.3-10 米国NNIの省庁別予算推移

NNIの投資はプログラム構成エリア（PCA:Program Component Areas）への戦略的な配分比率に従って実施されてきた。NNIの戦略面での変化は、当初7項目であったPCAの中で

⁴【参考文献】

☆ NSTC NSET “NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE STRATEGIC PLAN” February 2016

☆ “THE NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE Supplement to the President’s 2019 Budget”

EHS（環境、健康、安全）を2009年から独立させて8項目にし、さらに2015年度からは下表の1.のようにNSIs（Nanotechnology Signature Initiatives）を省庁横断型で強化する項目として定めた。これは2014年に策定したNNI戦略プランにもとづく変更であり、2018年時点ではこのPCA5構成を継続している。

Agency	1. Nanotechnology Signature Initiatives (NSIs) and Grand Challenges (GCs)	1a. Nanomanufacturing NSI	1b. Nanoelectronics NSI	1c. NNI NSI	1d. Sensors NSI	1e. Water NSI	1f. Future Computing GC	2. Foundational Research	3. Nanotechnology-Enabled Applications, Devices, and Systems	4. Research Infrastructure and Instrumentation	5. Environment, Health, and Safety	NNI Total
CPSC	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
DHS	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
DOC/NIST	19.0	3.7	10.0	0.9	0.8	0.3	3.3	11.4	4.6	20.7	2.3	57.9
DOD	22.5	0.5	15.7	1.1	0.9	2.2	2.1	72.7	26.5	0.7	3.5	125.9
DOE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	182.1	9.2	132.9	0.0	324.1
DOI/USGS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DOJ/NIJ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.5	0.0	1.7
DOT/FHWA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	1.5
EPA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	4.5
HHS (total)	14.4	0.0	0.0	1.7	12.7	0.0	0.0	91.8	294.7	22.8	40.5	464.3
FDA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.5	12.5
NIH	14.4	0.0	0.0	1.7	12.7	0.0	0.0	91.8	294.7	22.8	16.9	440.7
NIOSH	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	11.1
NASA	1.3	0.0	0.8	0.0	0.5	0.0	0.0	3.4	1.2	0.0	0.0	6.0
NSF	111.2	28.0	32.0	19.5	7.5	11.0	13.2	185.4	38.0	42.6	10.6	387.7
USDA (total)	8.3	4.3	0.0	0.0	3.0	1.0	0.0	2.3	7.0	1.0	2.1	20.7
ARS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	2.0
FS	3.3	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.1	3.7
NIFA	5.0	1.0	0.0	0.0	3.0	1.0	0.0	2.0	5.0	1.0	2.0	15.0
TOTAL	177.0	36.5	58.5	23.2	25.8	14.5	18.6	549.0	383.9	221.3	64.4	1395.6

図1.2.3-11 NNIにおけるPCA別の各省予算配分案

トランプ政権以降、NNIの予算は減少に転じている。2018年度と2019年度と共に前年度比▲5%で、\$80M規模の減額が2年連続している。2015年におこなわれたNNIの包括的評価で指摘された、「商業化促進のために、NNIを取り巻く環境を再び活気あるものにしていくことが課題である」。「そのため、あらゆる分野の団結が必要で、国民への周知と参画、教育、研究開発、環境問題、ナノ関連物質が使用された商品の健康や安全に対するリスク、倫理的、法的、社会的課題を広く知らせ、商業化を促進し、それにより国民が経済的な恩恵を得ることができる」、これらに対して、いくつかの主要予算項目での減額措置は研究開発の現場に影響を与えている。

NNI予算の省庁別内訳は、保健福祉省（HHS、大部分がNIH）が33%で最大で、次に全米科学財団（NSF）とエネルギー省（DOE）が続く。この3機関でNNI予算全体の84%を

占めている。残りが国防総省（DOD）、米国標準技術研究所（NIST）と続き、これら5つの省庁・機関で全体の97%を占める。2019年のPCA別の予算配分は以下のように計画されている。

- ・ Nanotechnology Signature Initiative（13%）
- ・ Foundational Research（39%）
- ・ Nanotechnology-Enabled Applications, Devices, and Systems（28%）
- ・ Research Infrastructure & Instrumentation（16%）
- ・ EHS: Environment, Health and Safety（5%）

当初、設定された NSIs では5つを掲げたが、そのうちの一つにあった「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」は、研究開発成果が民間に転用され「投資は成功した」と判断され、NSIs としては2015年度で終了、替わって新たに「ナノテクノロジーによる持続可能な水：グローバルスケールの課題に対するナノスケールソリューション」を立てた。①ナノテクで水の利用可能性を高めること、②ナノテクの水の供給と利用の効率を改善する、③ナノテクを用いた次世代の水モニタリングシステム、が掲げられている。さらに、2016年に Grand Challenge として Future Computing GC を特定し、これを NSIs に組み込んだ。この背景には、National Strategic Computing Initiative (NSCI) や BRAIN Initiative があり、これらと NNI を連携させ、データから学習し、学習によって不慣れな問題も解き、人間の脳と同等のエネルギー効率で作動する新しいタイプのコンピュータを創造するために、ナノスケールのシステム・コンピュータ構造の飛躍的な進歩を目標としている。“Beyond Moore”のハードウェア開発と AI ソフトウェア開発を共同で進めることが計画されている。

他の NSIs は図表の 1a～1d のとおりであり、1a ナノ製造、1b ナノエレクトロニクス、1c ナノテク知識インフラ、1d センサ、である。これら NSIs は、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。2018年予算において大きく減少した DOE は、2019年予算では維持された。NIH も堅持されている。手厚くキープしているのはエレクトロニクスの \$59M である。DARPA の Electronics Resurgence Initiative（5年間で \$1,500M）等、新たなプロジェクトが開始されている。

一方、大幅減となるのは、NSI のフューチャーコンピューティング \$19M（▲25M）、そして NSF \$388M（▲33M）は、2018年の▲45Mにつづく大幅減である。NSI のなかでもセンサは増額され、ナノバイオセンシングで新しいプロジェクトが計画されている。

MGI マテリアルゲノムイニシアティブ関連は、NKI (Nanotechnology Knowledge Infrastructure) として \$23M をキープ（ただし NNI における MGI 関連予算は分散しているため正確な数字ではないことに留意）。MGI 自体は、当初の5年間のイニシアティブを終了しており、現在は各省・研究機関において地道な活動が続けられている。

NNI の特徴的なプログラムに、NSF の National Nanotechnology Coordinated Infrastructure (NNCI) がある。前身事業から継続される共用研究インフラネットワークで、2016年からの5年間で81Mドルの予算で運営されている。15州にまたがる27機関から成る16拠点（内、9拠点にはパートナーとして1つ以上の地方大学が参画する形態）で構成される。日本の文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業（H24-33）に相当するプログラム

であり、規模的にも概ね同程度と考えられる。NNCI に採択された拠点は、産官学の研究者に対し微細加工や解析・計測装置などのナノテク最先端研究設備をオープンな共用施設として提供する。また、専門技術スタッフにより装置利用や技術習得、専門知見の面でのサービスを充実させる。前身の NNIN で培ったフレームワークを活かして、科学技術上の新発見やイノベーション創出、教育、商業化により社会的利益に貢献することを目的としている。NSF ではこれまで 40 年間の長期にわたりナノテク研究インフラ・サービスの充実に投資を続けてきたが、次世代へ向けて NNCI ではこれをさらに拡張・促進させるとしている。NNCI の各拠点は、エレクトロニクス、フォトリソ、マイクロ機械、マイクロ流体、など、それぞれに特徴・専門性を有する。なかには地球科学やライフサイエンスに専門性を有する拠点も含まれており、新分野を促進させることも重視している。NNCI の設備群は、学生・専門家を問わずアクセスが可能であり、国内だけでなく世界中にオープンである。

■希少資源対策

これまで米国は、DOE の Innovation Hub の 1 つとして、Critical Materials Institute を 2012 年に Ames 研究所に設置し、5 年間で 120M ドルの予算で研究開発投資をおこなってきた。日本でいえば元素戦略プロジェクト（研究拠点形成型）に対応するような集中型の研究拠点であるが、Critical Materials Institute は 2018 年から 5 年間の延長が決定されている。この背景には、希少鉱物に関する 2017 年 12 月の大統領令 “Critical Minerals Executive Order” , “A Federal Strategy To Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals”（安全かつ信頼できる希少鉱物の確保のための連邦政府戦略）がある。米国の経済と安全保障において脆弱性の要因となりうる希少鉱物の輸入依存の低減と安定供給ルートの確保を目的とするものであり、その後内務省が希少鉱物リストとして 35 鉱種を指定している。ここからさらに、商務省、国防総省、農務省、財務省、エネルギー省、OSTP などの省庁が対応方針を策定することを求められており、上述の MGI とも研究開発戦略上は密接な関係にあるものとして、今後、より具体的な施策が展開されるものと予想される。

欧州

■基本政策

欧州はフレームワークプログラム「Horizon 2020」（2014 ～ 2020 年）の枠組みの中で、ナノテクノロジー・材料分野の強化が図られている。その中でもデジタル化、スマート化を強く進める大きな政策目標を掲げ、マイクロエレクトロニクス・ナノエレクトロニクスの分野の強化を図っている。政策的には、「Digital Single Market」としてデジタル化の活動の最大化や EU でのデジタルバリューチェーンの構築を目指し、R&D 投資を GDP の 3% とすることや米国との生産性のギャップを埋めることなどを目標にしている。Horizon2020 は 7 年間で 74.8B ユーロ（10.7B ユーロ / 年）の予算で、三つの優先領域にそれぞれ次の予算が割り当てられている。

- ① Excellent science : 24.4B ユーロ
- ② Industrial leadership : 17.0B ユーロ
- ③ Societal challenges : 29.7B ユーロ

①の中では、10年間で総額1BユーロのFuture & Emerging Technologies (FET) が注目され、「Graphene Flagship」、「Human Brain Project」、「Quantum Flagship」の三つのプロジェクトが推進されているが、これらはナノテクノロジー・材料と深く関わっている（後述）。②では、ナノテクノロジー、材料、ICT、バイオテクノロジー、マニファクチャリング、宇宙、が関係する「Leadership in enabling and industrial technologies (LEITs)」に13.5Bユーロが予算化されている。また、このLEITsの中で、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) が設定されており、ナノテクノロジー、先端材料、先進製造技術、バイオテクノロジー、の4つの技術分野が選ばれている（当初は、マイクロ・ナノエレクトロニクス、フォトニクスを含む6分野）。

電子コンポーネントとシステムにおける欧州の優位性を高めるために、産業界がリードするパブリック・プライベート・パートナーシップ (PPP) のモデルとして、ECSEL (Electronic Components and System for European Leadership) プログラムが2014年から始まっている。総額は約5Bユーロ (EU: 1.2Bユーロ、参加国: 1.2Bユーロ、企業: >2.6Bユーロ) の予算で進められている。ここでは、ナノエレクトロニクスの研究開発と、応用までのバリューチェーンとを結びつけ、パイロットラインの構築までを視野に入れた高いTRL (Technology Readiness Level) を狙っている。また、ECSELに関連して、2015年よりNEREID (Nanoelectronics Roadmap for Europe: Identification and Dissemination) において、半導体のデバイス技術からシステムデザインまでを含めたロードマップの作成活動が行われている。この活動は、「国際半導体技術ロードマップ (ITRS)」の後継として2016年に発足した「国際デバイスおよびシステムロードマップ (IRDS)」とも密に連携している。

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

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

欧州のバリューチェーン強化に向け研究クラスターおよびクラスター間の連携を図る仕組みの例として、フランダースとオランダ南部のクラスターであるDSP (Designing Smart Products) Valleyがある。ここではスマートなエレクトロニクスシステム (Smart Industry、Smart Health、Smart City、Smart Vehicle、Smart System [IoT ecosystem]、Smart Flexible Electronics、Smart Bike) を目指し、様々な応用分野のシステムインテグレー

ションのためのマイクロ・ナノエレクトロニクスのバリューチェーンを構築している。また、DSP Valley、SILICON SAXSONY、MINALOGIC など 12 の半導体関係のクラスターが SILICON EUROPE というアライアンスを形成して、バリューチェーンの構築、知識や技術の移転などの強化を図っている。さらに、学術分野を越えたバリューチェーンの構築として、FlandersBio、Biosaxony などのバイオ領域やその他の技術領域との連携も図っている。

ナノエレクトロニクスのデザインやデバイス作製を行うインフラとして ASCENT (Access to European Nanoelectronics Network) がある。これは LETI、IMEC、Tyndall National Institute (Ireland) の連携で 2015 年に作られた。14nm 以降のバルクおよび SOI の CMOS デバイス、ナノワイヤ、二次元材料、FINFET など最先端のプロセスが扱える。

欧州は、ナノテクノロジーの ELSI/EHS (および RRI) に関する取り組みを世界的に主導している。この詳細は後述の 1.2.5. 社会との関係における問題、責任あるナノテクノロジー研究開発の在り方、および第二章の 2.6.1 ナノテクノロジーの ELSI/EHS、国際標準に記載しているので、参照されたい。

■研究開発プロジェクト

10 年間で 1.0B ユーロという巨額のプロジェクト FET (Future and Emerging Technologies) が Horizon2020 の三つの柱の一つである Excellent science の中で進められており、2013 年開始の「Graphene Flagship」、「Human Brain Project」と、2018 年開始の「Quantum Flagship」はナノテクノロジー・材料分野とも密接に関係するため、簡単に紹介する。

「Graphene Flagship」では、23 カ国から 158 機関、1250 人以上の人が関わっている。研究領域としては、基礎科学、材料、健康・医療、センサ、エレクトロニクス、フォトニクス、エネルギー、複合材料、グラフェン関連材料の製造があり、15 の科学技術的なワーク・パッケージで研究が進められている。このプロジェクトの計画では 2013～2016 年が立ち上げ、2016～2018 年がコアー 1 プロジェクト、2018～2020 年がコアー 2、2020～2022 年がコアー 3 とし、ロードマップを作成している。2017 年までの顕著な成果としては、高性能な光検出器や光変調機の開発などがあり、論文数:1400 件、特許:37 件、製品化:17 件、スピンオフ企業:6 社などの数値が挙げられている。

「Human Brain Project」は脳科学から医療、コンピューティングまで含む多様な学術領域の幅広い研究が進められている。研究活動は 8 つのサブプロジェクト (Neuroinformatics Platform、Brain Simulation Platform、Neuromorphic Computing Platform、Widening Scientific Impact、Medical Informatics Platform、Neurorobotics Platform、High-performance Analytics & Computing Platform、Advancing Brain Science and Medicine) で行われており、19 カ国から 116 機関、850 人以上の人が参加している。この中でナノテクノロジー／ナノエレクトロニクスと関係の深いのは Neuromorphic Computing Platform であり、従来のノイマン型のコンピュータよりも桁違いの演算速度、エネルギー効率を目指したニューロモルフィック・コンピュータや次世代のニューロモルフィックチップの開発を目指している。2018 年には異なるモデルによる二つのニューロモルフィック・コンピュータ (BrainScaleS system、SpiNNaker system) 用のチップの提供を予定している。

「Quantum Flagship」は 2018 年 10 月から新たに開始されたものであり、ここでは 5 つの

領域（Quantum Communication、Quantum Computing、Quantum Simulation、Quantum Metrology and Sensing、Basic Science）で研究が進められ、140 件の応募から 20 件のプロジェクトが選ばれている。2018 年 10 月～2021 年 9 月までは立ち上げ期間として、132M ユーロの予算が付けられている。プロジェクトの内容でナノテクノロジー・材料分野に関するものとしては、超伝導、トラップイオン、2 次元物質／光集積回路を用いた量子コンピュータおよびその基礎技術開発や、ダイヤモンド NV センターを用いた磁気センサ、コンパクトな原子時計、量子センサと MEMS 技術による新たなセンサなどがある。

ドイツ

ドイツ連邦政府は 2006 年に、研究開発およびイノベーションのための包括的な戦略である「ハイテク戦略（High-Tech Strategy）」を発表した。これは省庁横断型の戦略であり、幅広い施策や戦略が網羅されている。さらに、2010 年には、このハイテク戦略を更新するものとして、「ハイテク戦略 2020（High-Tech Strategy 2020）」を発表した。ドイツが今後どの分野に力を入れていくかを社会的な課題から導き出して明示しており、気候、エネルギー、健康・栄養、交通・輸送、安全・コミュニケーション技術の重点 5 分野を特定した。さらに 2014 年秋に、第三期となる「新ハイテク戦略（New High-Tech Strategy）」を発表、前戦略を踏襲する形で、経済成長が見込まれる 6 分野（デジタル経済と社会、持続可能な経済とエネルギー、イノベティブな職場、健康的な生活、インテリジェントな交通・輸送、市民安全の確保）を特定した。2018 年には、3 回目の更新として「ハイテク戦略 2025（HTS2025）」を発表した。ここでは未来のためのガイドラインとしてドイツにおける繁栄、持続可能な発展および生活の質を向上させることを目標に、研究とイノベーションを結集させることを強調している。マイクロエレクトロニクス、材料、バイオテクノロジー、人工知能といった技術領域を「未来技術」と位置づけ、教育における問題とも結びつけている。連邦政府は 2018 年に 150 億ユーロ強を投資、さらに 2025 年までに産業界・州政府合わせて対 GDP 比で 3.5% を研究開発に投資するとしている。

また、デジタル化や様々な分野のキーテクノロジーに関して、欧州における他の国々との国際協力関係を強固にすることでドイツだけでは実現不可能な研究開発を推進することを掲げている。

ハイテク戦略 2025 で新たに追加された研究項目のうち、ナノテクノロジー・材料分野に関係するものとしては、

- ・プラスチック問題への対応（リサイクルを前提とした材料開発）
- ・電池の製造プロセス技術の開発
- ・自動走行用の高信頼性・高性能センサ、エレクトロニクスの開発がある。

一方、ナノテクノロジーは材料とともに横断のキーテクノロジーの一つとして位置づけられており、この一環として「ナノテクノロジー行動計画 2020（Action Plan Nanotechnology 2020）」（対象期間 2016 ～ 2020 年）が発表されている。ナノテクノロジーは、将来の市場に重要な影響を及ぼす分野と位置付けているが、ナノテクノロジーの横断的性質のため、ドイツでの研究資金は連邦政府の様々な専門プログラムに定着しており、省庁間の支援の枠組みの一

部として推進されている。さらに、連邦省庁による共同予備的資金援助が機関研究資金の活動と相乗して行われている。連邦教育研究省（BMBF）としては、以下の幅広いテーマでイノベーション活動を計画している。

- ・ **Bioeconomy** バイオエコノミーのためのナノ技術

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

- ・ **Electromobility** 電気自動車のバッテリー研究

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

- ・ **Energy research** エネルギー研究へのナノテク利用

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

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

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

- ・ **Health** 医療技術へのナノテク利用

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

- ・ **Information and communication technologies** 情報通信技術へのナノテク利用

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

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

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

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

- ・ 気候研究と資源保護のプログラム「持続可能な発展のための研究」が開始され、インテリジェントで効率的な原材料の使用、および持続可能かつ確実な原材料の供給に貢献するため、化学原材料としての CO₂ の利用等が含まれる。

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

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

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

プログラム「明日の生産、サービス、作業のためのイノベーション」では、顧客に応じ

た、資源問題のない新技術とシステムの開発を支援する。インダストリー 4.0 の枠組みでのイノベーションがナノスケールの粒子、繊維、コーティングからの製造に適用される。

・ **Security research** 食品安全性研究でのナノテクノロジー

プログラム「民間安全のための研究」は人々を守るための技術的解決策を追求するが、ナノテクノロジーを基盤技術として食品分野における物質革新の安全性に関する研究。

・ **Risk research** ナノマテリアルの健康・環境リスク研究

ナノマテリアルの健康および環境リスクに関する具体的な課題を追求する。研究結果は、欧州および国際機関の議論と活動に適用される。BMBF 材料研究プログラムには、ナノ材料の使用に関連する潜在リスクに関する基礎研究結果も組み込まれている。

さらに、連邦政府は 2018 年に基本計画「量子技術－基礎研究から市場へ（Quantum Technologies – basic to markets -）」（2018 ～ 2022 年、最長 2028 年まで）を発表し、2021 年までに量子技術領域の研究開発に約 6 億 5000 万ユーロを投資する予定である。ドイツにおける量子技術を科学的にも経済的にも将来確固たるものにするを目的として、研究センターの設置、産業界とのネットワーク構築、産学連携プロジェクトの推進、人材育成などに取り組む。

英国

英国は、2016 年 6 月の国民投票の結果を受けて、EU からの離脱を決定した。ナノテクノロジー・材料分野を含む科学技術全体への影響は、離脱後の英国と EU との関係により異なってくるが、政府は科学技術界に広がる懸念や不安を払拭するため、EU 離脱後も英国人の研究資金を助成することや、2017 年から産業戦略チャレンジ基金（ISCF : Industrial Strategy Challenge Fund: for research and innovation）を新設することを決めている。また、ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS : Department for Business, Energy & Industrial Strategy、2016 年にビジネス・イノベーション・技能省（BIS）とエネルギー気候変動省が統合）は研究インフラへの投資を継続し、2021 年度までに 58 億ポンドを投資することを決めている。この中には、サー・ヘンリー・ロイス先進材料研究所（マンチェスター）に 1.26 億ポンド、ライフサイエンス・物理科学全英中核研究センター（オックスフォード）に 1.03 億ポンドなどが含まれている。

英国のナノテクノロジー・材料科学技術戦略の基盤となっているのは、BEIS の前身であるビジネス・イノベーション・技能省（BIS : Department for Business, Innovation and Skills）が 2010 年に発した「英国ナノテクノロジー戦略」である。国民、産業界、学界のニーズを反映しながら、新興技術（Emerging Technology）・実現技術（Enabling Technology）であるナノテクノロジー分野で政府が安全で信頼できる持続可能な方法でイノベーションを支援し、利用を促進することにより、英国の経済および消費者はナノテクノロジー開発から便益を受けるとしている。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囲に含まれている。また、2014 年の科学技術イノベーションに関する戦略「Our Plan for Growth: Science and Innovation」では、英国が研究開発で世界をリードする重要な技術として 8 つの技術を設定しており、その中の一つがナノテクノロジーと先端材料となっている。

ナノテクノロジーに関する環境・衛生・安全（EHS）研究および規制に関して、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）の報告がある。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。

2009年には、耐久性が高く軽量かつ高性能な複合材料の開発と同分野の産業競争力の向上に向けて、BISにより「英国複合材料戦略：The UK Composites Strategy」が発表された。また、その推進として、「高付加価値製造カタパルト：High Value Manufacturing Catapult」の中で、この複合材料戦略に沿った国立複合材料センター（National Composite Center）をブリストル地区に設立している。このセンターはブリストル大学内に設置されているが、インペリアル・カレッジ、マンチェスター大学、シェフフィールド大学、クランフィールド大学とも共同研究を行っている。また、GKN社やロールス・ロイス社も参加して、年間20億円程度の大規模な研究拠点となっている。

グラフェンの研究とその実用化に向けた取り組みも顕著である。マンチェスター大学のアンドレ・ガイム教授とコンスタンチン・ノボセロフ博士のグラフェン研究が2010年のノーベル物理学賞を受賞したことを受け、2011年10月に5,000万ポンドを投じてグラフェン・グローバル研究技術拠点（Graphene Global Research and Technology Hub）を設立することを決定した。2013年にはマンチェスター大学内に国立グラフェン研究所（National Graphene Institute）が作られ、80社を超える企業が参加して異分野融合の研究が進められている。また、2018年度には、産業界主導の開発を行うグラフェン技術応用イノベーションセンター（Graphen Engineering Innovation Centre）が同大学内に開設された（総額60Mポンド）。これらの政府投資により、大学や公的機関の研究者と産業界との協力によるグラフェン材料の応用・商業化の促進や、ハイテク分野における雇用の創出が期待されている。

フランス

フランスでは、2009年に「国家研究・イノベーション戦略（SNRI）」が取りまとめられた。これに関連して、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」イニシアティブが策定・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が設立され、2009年に7,000万ユーロが配算されている。2013年7月、それまで別々に制定されていた高等教育の基本法と研究の基本法とが統合され、高等教育・研究法が制定された。この法律を踏まえ、研究開発の分野では、「（研究・技術移転・イノベーションのための戦略的アジェンダ）France Europe 2020」という基本戦略が策定された。この戦略的アジェンダでは、9つの社会的課題に基づいた研究の方向性が示されるとともに、研究戦略会議の設置、新たな高等教育・研究評価機関（HCERES）の設置、研究拠点の強化、などの制度改革の方向性も示された。ここではナノエレクトロニクス、ナノマテリアル、マイクロ・ナノ流体工学といった領域が優先領域として挙げられている。また、Horizon 2020における優先領域である、先進材料も優先項目に挙がっている。さらに、一連の制度改革が進んだ2015年3月には、現行の戦略である「SNR（国の研究戦略）France Europe 2020」が公表された。SNR France Europe 2020はFrance

Europe 2020 を洗練したもので、2020 年までを視野に入れた研究戦略である。10 項目の社会的課題を特定し、それらに対する重点的研究方針を定めている。ナノテクノロジー・材料分野に関連するものとして、希少鉱物への依存度減少、エネルギーや化学に使用する化石系炭素化合物の代替品、新材料の設計、センサなどが重点的研究方針としてあげられている。

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。2018 年 7 月には「2019 年行動計画（Plan d' action 2019）」が発表され、2019 年の ANR の研究助成の全体的な展望について記載されている。ここでは、人工知能、人文社会科学（Social and Human Science：SHS）、量子技術、薬剤耐性、神経発達障害における自閉症、希少疾患におけるトランスレーショナル・リサーチ（基礎研究を実用化へ繋げる橋渡し研究）を国の戦略的優先事項として指定している。

また、ANR は日仏の化学研究における協力促進を目的に 2017 年 12 月に JST と協力枠組み合意を締結した。この合意に基づき、2018 年より戦略的創造研究推進事業（CREST）における下記 2 領域において、日仏研究者による日仏共同研究プロジェクトに対する支援を開始している。

- ・人間と情報環境の共生インタラクション基盤技術の創出と展開（研究総括：間瀬健二・名古屋大学教授）
- ・量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出（研究総括：荒川泰彦・東京大学特任教授）

オランダ

ナノテクノロジーの国家的計画としては、2005 年に立ち上がった研究開発イニシアティブ“NanoNed”、その後継である産学官コンソーシアム“NanoNextNL”（2011～2016 年）がある。“NanoNextNL”では、総額 2 億 5,000 万ユーロが配算され、その 50%を政府、残りを企業、大学、研究所、大学医療センターなどが負担した。MESA+NanoLab Twente、Kavli NanoLab Delft、Zernike NanoLab Groningen、NanoLab@TU/e、TNO NanoLab Delft、Philips Innovation Services で充実した研究インフラを保有していることが特長である。しかし、2017 年以降、同程度の規模を有する国家プロジェクトは見られず、研究インフラへの継続的投資がないことによる科学技術分野での国力、主導権の減退を心配する声も上がっている。

このような状況に加え、欧州におけるナノ加工研究が国ごとに分断され相互のネットワークが欠如しているという問題も顕在化してきたことから、上記の研究インフラも活用しつつ、ナノシステム研究用のクリーンルームを統括する欧州インフラの構築を目指す“EuroNanoLab”プロジェクト（フランス、オランダ、ノルウェー、スウェーデン、ポルトガル、スペイン、チェコ、イタリアの欧州 8 か国で設立したコンソーシアム）が 2018 年から開始されている。既に総額で 15 億ユーロの価値を有する 26 箇所の研究用クリーンルームが結集し、フランス CNRS が統括している。

また、欧州における研究助成プログラム Horizon 2020 の下、GoNano プロジェクトが 2017 年より開始され、Twente 大学と De Proeffabriek コンサルティングが 10 機関の一つとして参画している。本プロジェクトは食物、エネルギー、健康のために必要な材料を対象にして、研

研究者が一般市民、産業、政策立案者と共創するというコンセプトで推進されている。

2011年にオランダ政府が位置づけた国際的に強い産業分野（農業・食料、化学、ハイテクシステム・材料、ICT、園芸・育種、物流、ライフサイエンス・健康、エネルギー、水・海洋、社会インフラ課題、産業創造）、いわゆる「トップ・セクター」の研究に対して、オランダ科学研究機構（NWO）が2018～2019年で5億5,000万ユーロを拠出している。このうち、2億7,200万ユーロは産業界からの投資で作られた官民パートナーシップへ支出、残りの2億7,800万ユーロは実用研究や研究施設及びICT、NWO傘下機関の研究、好奇心主導型研究などに充てられた。注目すべき新しい試み「クロスオーバー・コール（crossover call）」は、複数のトップ・セクターからの官民パートナーで構成されたコンソーシアムが社会的課題の解決を目指して分野横断的な研究を進める。

中国

中国の科学技術・イノベーション政策の基本方針は、2006年2月に国務院から発表された「国家中長期科学技術発展計画綱要（2006－2020）」に記載されている。また、2016年5月には、国務院から「国家イノベーション駆動発展戦略綱要（2016～2030年）」が発表されている。世界が劇的に変動する中、後者は次期の科学技術イノベーション中長期計画を前倒しで示した形になっている。直近での実施事項については、この2つの基本政策を踏まえて計画された「科学技術イノベーション第13次五カ年計画（2016～2020年）」に記載されている。従来の科学技術五カ年計画と異なり、本計画は名称に「イノベーション」が入っており、中国政府が科学技術と経済、科学技術とイノベーションを直結させ、研究・開発から産業化までのイノベーション創出の全過程を視野に入れていることが窺える。

国家中長期科学技術発展計画綱要においては、2020年までに中国を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。本計画綱要に基づく科学技術行政の特徴は、欧米を追う立場にあるサイエンスの強化に重点を置くことで、中国は「世界の工場」から「自主イノベーション」を引き起こす国になるよう科学技術戦略を転換しようとしている点である。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」（2013年6月～2015年11月までスパコンランキングTOP500で1位）および「神威・太湖之光」（2016年6月～2017年11月までスパコンランキングTOP500で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）、量子科学実験衛星「墨子号」（世界初）など、急速に充実してきている。本計画綱要では、次世代のハイテクおよび新興産業発展の重要な基盤を構成し、ハイテクイノベーション能力を総合的に体現する先端技術8分野が掲げられており、そのうちの1つとして「新材料技術」が指定されている。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、優れた機能をもつ特殊機能性材料や新世代の光通信材料を開発するなどの目標が設定されている。また、基礎研究分野の重大科学研究4テーマの1つに「ナノテクノロジー研究」が設定されている。

一方、国家イノベーション駆動発展戦略綱要は、2050年までを見据えた15年間の中長期戦略である。本戦略綱要では2050年までにイノベーション強国を実現するためのロードマップが掲げられ、2030年までの経済競争力の向上に関する核心的で重要な内容、社会発展の差し

迫った需要、国家の安全に関する重大問題をしっかりと踏まえて重点的投資をおこない、各省庁による投資の役割分担と連携を強化するとされている。

これら2つの綱要を踏まえた第13次五カ年計画においては、具体的な目標として、国家イノベーション能力ランキングを世界15位に（2017年世界17位）、R&D経費の対GDP比を2.5%に（2017年2.15%）、国際科学論文被引用回数ランキングを世界2位に（2017年世界第2位）それぞれ引き上げること、PCT特許出願数を2015年から倍増させること等が設定されている。また、ナノテクノロジー・材料分野に関しては、産業技術の国際競争力の向上につながる「新材料技術」、基礎研究の強化に係る「新材料の設計と製造工程に関する研究」、2030年を見据えた15の重大科学技術プロジェクトの中の「重点的新材料」「量子通信・量子コンピュータ」「スマート製造・ロボット」「航空エンジン・ガスタービン」等の記載がなされている。

さらに、第13次五カ年計画は、製造業の高度化を目指す「中国製造2025」やインターネット技術と製造業との融合を推進する「インターネット+」などの重大な国家戦略を支える位置付けにある。特に、2015年に公表された「中国製造2025」は、中国が製造大国から製造強国へ転換するための国家戦略であり、強化すべき重要な産業分野として10の重点分野「次世代IT技術産業」「高級NC旋盤とロボット」「航空・宇宙設備」「海洋工程設備と高性能船舶」「先進的な軌道交通設備」「省エネルギー・新エネルギー自動車」「電力設備」「農業機械」「新材料」「バイオ医薬品と高性能医療機器」が掲げられている。

一方、財政資金の使用効率を高めることを目的に、中国では研究開発資金やプロジェクトの改革が進められ、代表的な研究開発計画である「973計画（国家重点基礎研究発展計画）」「863計画（国家ハイテク研究発展計画）」などが2016年に国家重点研究開発計画へ統合された。国家重点研究開発計画の2018年第一期、第二期においては、9つのテーマが設定され、そのうち1つに「ナノテクノロジー」が指定されている。9テーマの下の細目プロジェクト総数は合わせて122件、総経費は23億元（約400億円）となっている。

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。

2011年3月に中国科学院（CAS）の院長に就任した白春礼は、2003年に北京に設立されたNCSNTの理事長であり、中国のナノテクノロジー政策をけん引している。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と共同で“Nanoscale”という国際学術誌を発刊した。同誌は白春礼がアジアのregional editorを務め、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（現在は7.23）。また、NCNSTは北京で2年に一度開催されるナノ科学・技術国際会議（China NANO）を主催しており、2017年8月の第7回会議（China NANO2017）では参加国数40ヶ国、2100人を超える参加者を集めた。China NANO2017においては、NCSNT、CAS文献情報センター、Springer Nature社が共同で作成した白書「Small Science in Big China」が公表され、論文や特許に関するデータ分析をもとに、中国がナノサイエンス研究およびナノテク研究開発において世界の強国となったと報告している。本白書によると、ナノテク関連Science Citation Index (SCI) 収録論文のうち、中国人研究者による共著は1997年には6%に過ぎなかつ

たが、2016年には世界の3分の1以上を占め、第2位の米国のほぼ2倍に達している。特許取得件数も急増し、ナノテク関連の出願件数では世界トップとなっている。応用研究面では、中国は触媒分野で最先端にあり、ナノ医療やエネルギー関連の分野への貢献も大きいとされている。

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。

韓国

韓国は、2018年2月「第4期科学技術基本計画」を公表し、また、同年7月に「国家技術革新システム高度化に向けた国家R&D革新」を発表した。国家R&Dの方向を従来の技術獲得・経済性重視から人と社会に重点を置くとの方針を示している。これらに先立ち発表された「革新成長に向けた人中心の第4次産業革命対応計画」（I-KOREA4.0）（2017年11月）ではナノテクノロジー・材料に関連する未来型新産業として、以下を掲げている。

- ・電気自動車・水素自動車の普及拡大
- ・先端技術産業の融合・複合推進戦略を策定し、半導体、ディスプレイ、炭素産業など第4次産業革命の実現に必要な先端新素材・部品の開発
- ・製薬・バイオなどの革新技術開発、人材育成、事業化・海外進出支援を通じた、製薬・バイオ、マイクロ医療ロボットなどの医療機器産業の育成

韓国のナノテク政策は、従来からの、「ナノ技術開発促進法（2003年制定）」に基づき、「第4期ナノ技術総合発展計画（2016～2025年）」を運営している。ナノテクノロジーの競争力について、製造業のリーディング技術開発を掲げ、米国の技術レベルを100%としたときに、92%のレベルに到達するとしている。その過程で、12,000人の高度ナノテク人材を育成する。また、ナノテク産業でグローバルリーダーとなることを掲げ、ナノテクベース製品のマーケットシェアを12%にすることを目標値に設定、ナノテク関連ベンチャーを1000社設立するとした。韓国におけるナノテクへの公的研究開発投資は、2013年以降、2012年以前までと比較して倍増しており、年間5億ドルを超える規模である。その内訳は研究開発86%、共用研究インフラ10%、人材育成4%の配分となっている。

2017年3月（前政権）、未来創造科学部（現・科学技術情報通信部）は、産業通商資源部など10省庁共同で「2017年度ナノテクノロジー発展施行計画」を発表している。ここでは、ナノテクノロジーの特許件数は世界3位レベル（1位米国、2位日本）であり、最近5年間の事業化成果は3,512件、年平均約40%増加したと報告している。

また、2018年4月、第4次産業革命や未来社会の中核領域を後押しするため「未来素材源泉技術確保戦略」を公表した⁵。科学的・社会的問題に先行的に対応するために必要な「30の未来素材」を導出するとともに、中長期 R & D 投資戦略をまとめている。

＜30の未来素材＞

- ①超接続社会のためのスマート素材（8つ）：増大するデータ・電子機器のモバイル化に対応して機器の高速・超低消費電力・大容量化を実現するインテリジェント素材
- ②超高齢化社会のためのウェルネス・バイオ素材（9つ）：超高齢化や生活習慣の変化に伴う慢性疾患の急増に対応できる生体適合材料
- ③持続可能な社会に向けた環境変化対応素材（5つ）：様々な大気汚染により発生する環境問題を最小限に抑え、自然からエネルギーを生成することができる素材
- ④災害から安全な社会のための安全素材（8つ）：地震、原発稼働・廃棄時に安全が確保可能な材料、突然の停電や社会災害発生時に効率的に対応可能な素材

ナノテクの共用施設としてナノ総合技術院（旧ナノファブ・センター）が KAIST を中心に全国6か所に設置されている。2018年には、ナノファブ・センターの機能高度化を決めた。急変する技術の変化に産学官が先行的に対応できるように、カスタマイズされたサービスを中心に、超低消費電力ナノデバイス、フレキシブルディスプレイ、インテリジェントセンサなど、産業需要が急増している分野の標準的な工程を構築する。企業の製品開発成功の可能性を高めるためにステップバイステップのプロセスの結果を検証する試験認証システムを構築する。ナノファブは、ナノ融合先端デバイスの公認試験・認証機関へと発展させるとしている。

ナノテクの ELSI/EHS については予算を重点化し、省庁横断の 1st Comprehensive Plan for Nano-Safety Management を 2011 年に発表して以降、継続的な取り組みを進めている。また、ナノテク関連政策を支援する政府組織として、2,000 名のナノテク研究者を会員に擁する韓国ナノ科学技術協会（KoNTRS）が、ナノテク科学の推進・ネットワークの構築・教育の促進に貢献してきたことが特徴である。

2018年に韓国政府は、関連10省庁の合同で作成した「第3次 National Nanotechnology Map (2018-2027)」を発表した。世界における第4次産業革命の到来によって、センサ、バッテリー、自動運転車、バイオチップ、IoT など、将来のコア技術に関して、ナノテクの重要性が再浮上したと認識し、2027年に向けて研究開発投資を強化するとしている。ポータブルな人工知能、スピード無制限通信、無人飛行機、超急速充電電池等の開発を進めることを掲げている。韓国におけるナノテク関連産業は、2016年時点で国内総製造業売上高（約1,418兆ウォン）の9.5%に相当する約135兆ウォンまでに成長している。しかし近年、ナノテクの量的・質的レベルの向上が停滞し、特定分野に事業化が偏り、売上高の大部分を大企業が占めるなど、中小企業主導の市場形成が遅れている状況に懸念が持たれている。韓国におけるナノテク関連製造業の分野別売上高比率は、ナノエレクトロニクス（90.1%）、ナノ材料（7.5%）、ナノ製造装置・機器（1.7%）、その他（0.7%）であると推計されている。

「第3次 National Nanotechnology Map (2018-2027)」の主な内容は次のとおりである。

○戦略的技術：韓国における未来社会の3大目標である「便利で楽しい生活」、「地球とと

⁵ <https://www.msit.go.kr/web/msipContents/contentsView.do?cateId=mssw311&artId=1381169>

もに生きる生活」、「健康で安全な生活」について、「ナノテクノロジーで実現する未来技術 30」を選定し、将来技術の実現に必要な詳細ナノテックロードマップが作成された。

30 の未来技術を実現するための、70 のコアテクノロジーが同定されている。

- 「便利で楽しい生活」のために、超微細加工を活用して、より速く、より正確で鮮明な特性を持つ人工知能半導体、IoT デバイス、未来ディスプレイなどの開発を推進する。
- 「地球とともに生きる生活」のために、ナノマテリアルの革新的な現象を利用し、無限のクリーンエネルギー、ナノ粒子除去、水資源の生産技術を構築する。
- ナノ物質界面の迅速な伝達特性を利用し、簡便・正確で効果的な予防・診断・治療により「健康な生活」を実現する。また、安全な食品、災害安全技術の開発を通じて「安全な生活」を実現する。
- ナノデバイス、ナノエネルギー・環境、ナノバイオ、ナノマテリアル、ナノプロセス・ナノ計測・機器、ナノ安全など、ナノテク 6 大分野の開発
- ナノファブ・センターの機能高度化とともに、実習中心の専門人材教育プログラムを企業と連携することで、雇用創出する。企業における技術の商業化のサポートにより、ナノ融合産業の雇用を拡大する。
- （ナノ安全）ナノ安全基準の設定、認証システムの確立など、ナノ物質とナノ物質を含む製品の全サイクル安全管理システムを構築する。

ロシア

ロシアは、国家予算を重点的に配分することを目的に選定した 8 つの優先的科学技術分野の 1 つに「ナノシステムと材料産業」を掲げており、2007 年に承認された「ナノ産業発展戦略」によって、ナノテク重視の方向性を明確に打ち出した。これを受けて、ナノテクノロジーの産業化のための投資会社「RUSNANO」が国の 100 % 出資により誕生し、2015 年までにロシア国内のナノテク産業の市場規模を 9,000 億ルーブル（約 1 兆 5,000 億円）、そのうち RUSNANO が投資した企業による売上高を 3,000 億ルーブル（約 5,000 億円）にするとの計画を示した。この売上目標は計画通り達成され、2016 年末において 3,690 億ルーブル（約 6,200 億円）であったことが公表されている。今後 RUSNANO は 2020 年までに 1,500 億ルーブル（約 2,500 億円）の投資を行い、ロシアのナノテク産業の市場規模を 1 兆 3,000 億ルーブル（約 2 兆 1,600 億円）、うち RUSNANO 投資企業による売上高を 6,000 億ルーブル（約 1 兆円）にするとの計画である。

ロシアは他国との共同研究開発に熱心であり、欧州（EU）のプロジェクトにも積極的に資金を投入している。たとえば、X線自由電子レーザーのような巨額の予算を必要とするプロジェクト（独ハンブルグの DESY）に対して、RUSNANO がドイツと同等規模の資金を拠出したことが知られている。また、アジア太平洋地域との協力にも関心が高く、各国の企業との共同ファンドが設立されている。インドネシアやインドにおける航空宇宙関連、中国における IT や新エネルギー、新材料関係の共同ファンドなどが挙げられる。風力発電関係で日本の企業との協力も検討されている。

台湾

台湾は、第 1 期台湾ナノテクノロジー計画（2003 ～ 2008 年／ 5.55 億ドル）で、ナノ産業

化 63%、インフラ・コア施設 15%、先端学術研究 20%、教育 2% の配分で戦略投資を実施し、第 2 期 6 年計画（2009 ～ 2015 年）に 7.12 億ドルを計上している。産業化振興策を含め、インフラへの計画投資（全国 10 箇所）、将来の人材育成のための小中高一貫教育（米国の K-12 相当）用教科書作り、教師の育成など、バランスの取れた計画を着実に進めている。2015 年から開始されたナノ科学革新応用テーマ計画（Innovation and Application of Nanoscience Thematic Program : IANTP）では、科学的発見に基づく橋渡し研究を推奨することでこれまでのナノテクノロジー計画を加速することを目的としている。「バイオテクノロジー・医学」「エネルギー・環境」「エレクトロニクス・オプトニクス」「評価・合成」の 4 つの重点分野に対して、「コンセプト開発」から「プロトタイプ実証」まで（技術成熟度レベル TRL2 ～ 4 に相当）を促進することで、社会的課題の解決や産業発展に貢献することを目指している。

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、2017 年時点で、29 社、2078 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。また、2017 年よりナノマークの管理を経済省から台湾ナノテクノロジー産業発展協会（TANIDA）に移管している。

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

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

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

シンガポール

シンガポール貿易産業省（MTI）は、2020 年に向けての 5 カ年計画「2020 年研究革新起業計画（RIE2020）」を策定し 190 億 SGD（約 1 兆 5,500 億円）の投資を計画している。バイオメディカル・サイエンス、双方向デジタルメディア、フィジカル・サイエンス&エンジニアリング 3 分野を今後 5 年間の政府の新たな重点研究分野とした。フィジカル・サイエンス&エンジニアリングのなかに、先進的素材・製造業、先進的システム・エンジニアリングが含まれている。このような科学技術産業化政策への積極投資のもと、A*STAR が運営するナノインプリントファウンドリー（NIF）や、大学を中心として英語環境の下で国際的なナノ研究開発拠点が築かれている。シンガポール国立大学に設置されている主なセンターを以下に挙げる。

NUS Nanoscience and Nanotechnology Initiative (NUSNNI)

Centre for Advanced 2D Materials (CA2DM)

Centre for Quantum Technologies

Singapore Synchrotron Light Source (SSLS)

Centre for Ion Beam Applications (CIBA)

Solar Energy Research Institute of Singapore

インド

インドでは、科学技術省（Ministry of Science and Technology）の下に、科学技術局（Department of Science and Technology: DST）、バイオテクノロジー局（Department of Biotechnology: DBT）、科学産業研究局（Department of Scientific and Industrial Research: DSIR）が設置されている。DSTにおいては、2001年10月に Nano Science and Technology Initiative（NSTI）を立ち上げた。その後継プログラムとして、2007年5月に National Mission on Nano Science and Nano Technology（Nano Mission）が開始された。当プログラムのミッションには、基礎研究の促進、ナノ科学・ナノテクノロジーのインフラ整備、ナノ分野の産業応用開拓、フェローシップを通じた当該分野の人材育成、国際共同研究促進が挙げられており、それぞれのミッションごとに助成金の公募を行っている。ナノ科学・ナノテクノロジーに関する人材育成プロジェクトを支援し、全国のいくつかの研究所にナノ科学技術研究所の基盤を構築することにより、当該分野のエコシステム構築に成功しているとしている。Nano Mission は 2020 年 3 月まで規模の拡大が決まり、この分野の基礎的な研究開発を継続してサポートし、より多くの技術関連プロジェクトを支援するための環境創出を目指している。産業界との間でナノ科学技術関連プロジェクトを共同出資したり、DST やその他の省庁の他のイノベーションプログラムと密接に協議してインキュベーターや新興企業を支援したりすることで、産業界との積極的な連携が図られている。本ミッションでは、「ナノ」のキーワードと関連のある半導体微細加工技術、材料科学、バイオテクノロジーや化学工業の研究開発も含め、幅広い領域をカバーしている。

2018 年から DST とドイツ DFG が、材料科学・材料工学分野の共同プロジェクトを開始するなど、材料分野においても積極的な国際共同研究を推進する動きが見られる。

タイ

タイは、サイエンスパーク（TSP）内に各科学技術分野のセンターを集積した国家科学技術開発庁（NSTDA）を持つ。その中に国立ナノテクノロジー・センター（NANOTEC／研究者 100 余名）があり、政府のナノテクノロジー施策の責任を負う。国家科学技術イノベーション計画（2012－2021）において、国家ナノテクノロジー政策フレームワーク（2012-2021）が策定され、NANOTEC マスター計画が 2012－2016 年、2017－2021 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、10 年で科学技術投資を GDP 比 0.2% から 2% にまで増やすとしている。NANOTEC の巨大な新研究棟（産官共用）が完成している。2016 年に設置された国家ナノキャラクター化センター（NANC）やナノ化粧品ラボは注目に値する。また、ナノ安全に関しては積極的に取り組んでおり、2012 年から 5 カ年のフレームワーク計画を運用、2016 年にはナノ製品ガイドラインを公表している。台湾と連携し、Nano Q というナノ製品認証制度を開始している。

中東

中東では、UAE とイランがナノテクノロジーの政府計画を持つ。特に、イランは量・質ともに充実したナノテクノロジー国家計画と組織（Iran Nanotechnology Initiative Council (INIC)）を有し、多様な研究開発プロジェクトだけでなく、共用研究開発インフラネットワークの運営、国際標準化の推進、ナノテク教育・人材育成政策など、ソフト面が非常に充実して

いる。2017、2018年には「ナノ安全・ナノ製品認証に関するアジア欧州対話（Asia-Europe Dialogue on Nanosafety and Nanoproduct Certification）」や「国際ナノテクノロジーオリンピック（International Nanotechnology Olympiad : INO）」のイベントをイラン国内で相次いで開催するなど諸外国を巻き込んだ活動が活発化してきている。また、過去数年で、ナノテクノロジー分野の論文数・増加率とも世界のトップクラスに仲間入りするまで躍進している。

【コラム】アジア・ナノ・フォーラム

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

2018年末時点でのANFのメンバーは、アジア・太平洋地域の8経済圏の各主要研究機関から構成され、日本、韓国、台湾、タイ、マレーシア、オーストラリア、イランを含む（※アジア地域ではないが欧州からオーストリア政府機関が参画している）。日本からは産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、科学技術振興機構がメンバーとなっている。

ANFの主な活動内容は、毎年サミット会議（ANFoS）および実行委員会（ExCo）開催による各国の情報交換、テーマ別の5つのワーキンググループ活動（ナノテクノロジー標準化、ナノテクノロジー教育、研究インフラ、ナノ安全・リスクマネジメント、ナノ商業化）である。2018年のANFoSにおいてワーキンググループの活動方針を見直した結果、いくつかのワーキンググループではコーディネーターを再編し、研究インフラWGについては活動を中断することとなった。

1.2.4 研究開発の動向

■世界的な研究開発トレンド

ナノテクノロジー・材料分野において、近年の世界的な研究開発トレンド・技術開発の潮流を図1.2.4-1に示す。



図1.2.4-1 世界的な研究開発トレンド・技術開発の潮流

以下では、上記11の材料・デバイス・技術それぞれに対して、注目すべき研究開発動向や政策動向について詳述する。

次世代パワー半導体

現在普及しているパワーエレクトロニクス用のパワーデバイスは、主にシリコン（Si）半導体を用いられている。現在も、スーパージャンクションやトレンチなどの構造上の工夫により、デバイス性能の向上が図られているが、Siの材料定数の限界からくるデバイス性能の限界が指摘されている。このため、将来に向けてパワーエレクトロニクス機器のさらなる省エネ化と高性能化を推進するためには、パワー半導体デバイスの基本性能を大きく向上させる技術革新が必要であり、パワー半導体デバイスの基本性能である高耐圧化と低損失化（低オン抵抗）の両立に優れたワイドバンドギャップ半導体の研究開発が重要になっている。このような次世代パワー半導体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、デバイス作製プロセス、デバイス構造、性能優位性の向上、高精度の熱設計・パワーマネジメント、モジュール・実装技術、電力変換回路・制御技術、周辺部材・受動部品、長期信頼性向上など

の多くの研究開発課題がある。次世代パワー半導体は、電力機器やエレクトロニクス機器の省電力化による酸化炭素（CO₂）排出量の大幅な削減が期待されるため、世界の研究開発のトレンドになっている。

国内では、内閣府の最先端支援プロジェクト（FIRST）「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」（2009年度末～2013年度末）、経済産業省の「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」（2009年度～2014年度末）、NEDOの「低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト」（2009年度～2019年度）、JSTのスーパークラスタープログラム（2013年度～2017年度）などが実施されてきた。最近では、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「次世代パワーエレクトロニクス」（2014年度～2018年度）において、ワイドギャップ半導体としてSiC、GaN、Ga₂O₃、ダイヤモンドを用いたデバイスの開発が基板、デバイス、パッケージなどを含め包括的に行われている。また、文部科学省、環境省などでも、GaNパワーデバイス関連プロジェクトが進行している。2016年には文部科学省の「省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発」事業による結晶創製拠点（名古屋大学）や、名古屋大学と産総研との窒化物半導体先進デバイスオープンイノベーションラボラトリ（GaN-OIL）が発足し、名古屋大学を中心にGaNデバイスの研究開発が精力的に進められている。

欧州では、EU内のエネルギー融通、CO₂削減などを主目的に、パワーエレクトロニクス・パワー半導体関連の技術革新のために、各種プロジェクトが展開されている。将来のパワーエレクトロニクス応用を見据えた欧州パワー半導体産業競争力強化を目的にSemI40（Power Semiconductor and Electronics Manufacturing 4.0）が2016年度から始まっている。SiC関係では、SPEED（SiC Power Electronics Technology for Energy Efficient Devices）、CHALLENGE（3C-SiC Hetero-epitaxially grown on silicon compliance substrates and new 3C-SiC substrates for sustainable wide-band-gap power devices）、OSIRIS（Optimal SiC substrates for Integrated Microwave and Power Circuits）、WiSiC4AP（Wide Band Gap Innovative SiC for Advanced Power）などが行われている。GaN関係としては、PowerBase Project（2015年～2018年）などでIT系応用を見据えた200mm GaNパワーデバイス製造技術の開発などを進めている。ダイヤモンドのパワーデバイスについても研究が盛んになりつつあり、GreenDiamond Projectが進行している。

米国では、米国防総省（DoD）海軍研究局（ONR：Office of Naval Research）のMURI（Multidisciplinary University Research Initiatives Program）、NEPTUNE（Naval Enterprise Partnership Teaming with Universities for National Excellence）、米エネルギー省（DoE）エネルギー高等研究計画局（ARPA-E：Advanced Research Projects Agency-Energy）のSWITCHES（Strategies for Wide Bandgap, Inexpensive Transistors for Controlling High-Efficiency Systems）などのプログラムの中で次世代パワー半導体の研究開発が実施されている。また、DoEが主導し、アメリカでのハイテク製造業の雇用創出とパワーエレクトロニクスシステムへのワイドギャップ半導体（SiC、GaN）の大規模適用の加速による省エネルギー化をミッションとして2015年から5年の期間で140M\$の予算で進められているPowerAmericaもあり、ノースカロライナ州立大を中心に産官学合わせて67の機関が参画している。

中国は、最近論文の発表件数が急増していることから豊富な研究資金が各研究機関に配分

されていると考えられる。提供元（プログラム）は限られており、National Natural Science Foundation、National Key R&D Program、National High-Tech R&D Program の中で次世代パワー半導体の研究開発が進められている。例えば、2016 年から National Key R&D Program の中で、SiC 基板、エピタキシャル成長、パワーデバイス、応用まで一貫した開発を行っており、1200V SiC-MOSFET を用いて 1200V/200A の SiC パワーモジュールの開発や、35KV/5MW の SST（Solid-State Transformer）の開発なども行っている。

韓国では MOTIE/KEIT と呼ばれるプロジェクトや、パワーデバイス応用に向けた研究開発ファンド Development of epitaxies and power devices technologies（3 年総額 90 万ドル）などが進行している。

次世代蓄電デバイス

蓄電池は、すでに多く用いられている携帯機器のほか、近年は電気自動車、そして定置電源用へと大型の蓄電池の活用が始まっている。蓄電池の課題はこれまでも、高エネルギー密度化や高出力化、急速充電などであるが、大型蓄電池では安全性を高めることや原材料の資源的制約が小さいことが特に大切になってくる。

そのため、蓄電池の主流は取り扱いが容易なリチウムイオン電池の開発が主流であるが、大型の蓄電池としてレドックスフロー型、あるいは NAS 電池の開発も進められている。

リチウムイオン電池において、従来の携帯機器に用いられている有機電解液系電池では、正極の高電位化、負極のシリコン化などの高容量化研究が進められている。また、電解液を濃厚にし、フリーな溶媒分子がほぼ存在しない様にした電解液で安全性を向上させた研究成果が出ている。

一方、安全性を高められること、高電位正極の活用が可能な全固体電池の開発が進展している。全固体電池は、電池原料、電池製造プロセスに多くの変更が必要である。したがって高性能全固体電池をいち早く開発し、新しい製造プロセスまで開発すればゲームチェンジャーとなりうるチャンスがあるが、同時に既存製造設備をスクラップするリスクも発生する。この背景もあり開発競争が激しくなっている。

先行するのは、硫化物系固体電解質を用いる全固体電池である。硫化物系固体電解質はイオン伝導率が有機電解液を越えた。これにより従来の有機電解液系より高レート（高速）の充放電、低温での良好な充放電特性実現が可能となっている。硫黄系全固体電池は、電池が破壊したときに水が浸入すると硫化水素が発生するリスクがあること、製造プロセス中に酸素を完全に排除する固体プロセスが必要で、従来のリチウムイオン電池製造プロセスとの互換性に問題がある。これに対して 酸化物系全固体電池は製造時の酸素の問題が無いこと、硫化水素発生（発生）のリスクがなく、きわめて安全性が高いことが期待される。しかし、固体電解質のイオン伝導率が硫化物系より 2 桁ほど低いことが課題である。最近、電極作製に湿式プロセスを用いず、スパッタを用いる真空プロセスの薄膜電池では高速イオン伝導が達成されている。これは、酸化物界面自体にイオン伝導を妨げる要因がないこと、従来からの湿式プロセスに由来する何かがイオン伝導を妨げていることを示唆する。これらの知見から酸化物系全固体電池の低イオン伝導の原因究明が進むことが期待される。

多くの国がリチウムイオン電池の次世代である革新電池への積極的な研究を進めている。革新電池では、金属空気電池や多価イオン電池、硫黄正極電池などの研究が進められているが、

リチウムイオンを用いない、アニオンインターカレーション型蓄電池に進展がある。これはリチウム資源量の制約がないこと、溶媒和しやすいリチウムイオンが動くことを利用しておらず急速放電への期待がある。

日本では、NEDO が、2020 年代後半に全固体電池の実用化を目指したプロジェクトを進めている。電池の難燃化、数分レベルでの急速充電、エネルギー密度の向上を目標とする。自動車メーカーを含む企業 23 社、大学・研究機関 15 法人が参加する。第 1 ステップは硫化物系固体電解質を用いた蓄電池を対象に、車載を想定したサイズの積層ラミネートセルの試作、材料評価技術の構築、電気自動車への搭載、量産技術開発を行う。第 2 ステップは安全性と製造のしやすさを向上する目的で酸化物系固体電解質を用いた蓄電池を目指すとしている。また、JST の ALCA-SPRING において革新型電池の研究を 2013 年度から 2023 年度の計画で遂行中である。全固体電池の他、主にエネルギー密度の向上を目的とし、多価電池、硫黄電池、金属空気電池など革新電池の研究を行っている。

米国エネルギー省は、15 分以内の充電完了を可能とする急速充電可能な蓄電池技術へ 1900 万ドルの資金を拠出している。このプロジェクトでは、2028 年までにバッテリーパックのコストを kWh あたり 100 ドル未満、電気自動車の走行距離を 300 マイル以上とすることを目標とする。

欧州では、Horizon 2020 研究およびイノベーションプログラムからの資金提供を受けた研究計画が始まる。2019 年 1 月から期間 43 ヶ月、790 万ユーロの予算でリチウム硫黄電池の設計と製造技術の開発に投資をする。電気自動車への展開を目標とする（LISA プロジェクト）。特にエネルギー密度の向上、電池製造に必要な希少金属量を削減することを目標としている。20Ah 級の実用サイズのセルを試作して検証する。非可燃性の固体電解質を用いる予定になっている。そのため、今後の製造プロセスも視野に入れた開発計画である。現状のセルは 250-300 Wh/kg のエネルギー密度であるが、400 Wh/kg を達成し、トラックやバスに用いることを目標としている。

ヒト体内動態再現モデル・チップ

薬物や、ヒト体内での使用を目的とするバイオ材料の実用化においては、ヒト臨床試験に進む前に、動物モデルを用いた前臨床試験によって有効性・安全性が確認されなければならない。しかし、動物とヒトでは免疫や代謝などに相違点が多く、動物実験ではヒトでの応答を正しく予測できない場合があり、創薬やバイオ材料開発が頓挫する要因になっている。さまざまな物質のヒト体内における動態を *in vitro*（生体外）で正確に再現可能なモデルが構築できれば、バイオ材料や薬物の開発効率が大幅に向上すると期待され、また、疾病メカニズムの解明やバイオロジー研究の有力なツールにもなり得ることから、世界的に研究開発が盛んになっている。

近年、特に注目されているのが、チップ上にヒト組織・臓器の機能を再現する Organ-on-a-chip である。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従来から単発的に行われてきたが、2010 年にハーバード大学 Wyss 研究所の Ingber グループが肺機能を再現した Lung-on-a-Chip を報告して以降、マイクロデバイス上に組織・臓器を搭載する研究が米国を中心として急速に進展し、心臓、肝臓、腎臓、消化器系、神経系、皮膚などさまざまな組織・臓器を模倣したチップが開発された。また、複数の組織・臓器チップを接続し、組織・臓器間における相互作用を模倣したシステムの開発も進められている。ただし、現状では動物実験に

替わる *in vitro* 評価系として確立されるには至っていない。

生体内動態の正確な再現には、個々の組織・臓器機能をより高度に模倣する必要がある。そこで、ヒト組織・臓器の複雑な構造と機能を再現するオルガノイドを作成し、チップに搭載するための研究が進められている。オルガノイドの作成法には、胚性幹細胞（ES 細胞）や人工多能性幹細胞（iPS 細胞）を分化誘導して臓器の芽となる器官原基を作製する方法と、3D プリンティング（バイオプリンティング）などの技術によって細胞を 3 次元配置する方法がある。いずれの手法においても、生理学的な機能を正確に再現するには、細胞から 3 次元組織をつくるために用いられるバイオ材料が重要であり、目的の細胞への分化誘導に適した生化学的性質・力学的性質をもつ培養基材や、組織・臓器に特異的な細胞外環境を再現するバイオインクの研究開発が求められている。

ヒト体内動態再現モデルの活用が期待される分野として、さまざまな医療技術への展開が期待されているエクソソームの動態解析が挙げられる。細胞外小胞（Extracellular Vesicle, EV）の一つであるエクソソームは、細胞が分泌する 30 ～ 100nm 程度の小胞で、内部にメッセージ RNA（mRNA）やマイクロ RNA（miRNA）が取り込まれており、他の細胞に RNA を運ぶシャトルとして機能する。細胞間の長距離コミュニケーションや生体内のシグナル伝達を担い、種々の生命現象に関係していることがわかってきており、疾患の新規バイオマーカーとして、また、生体由来のナノキャリアとして、さらには再生医療への利用に関心が高まっている。in vitro の生体内動態モデルによって、エクソソームの生成・分泌から細胞による取り込みまでの動態を詳細に解析し、細胞間、組織・臓器間におけるコミュニケーションの実体を解明できれば、バイオリジの進展とともに、エクソソームを用いた診断や医療応用が実現に近づくと期待できる。一方、個別化医療の観点から、患者特異的な病態を再現するモデルの実現も期待されている。近年、患者由来の細胞を用いた PDM（Patient-derived model）が注目されており、オルガノイドに患者由来がん細胞を組み込んで搭載したチップも研究されている。

米国には NIH を中心に多くの関連研究プログラムが存在する。NIH の研究機関の一つである NCATS（National Center for Advancing Translational Sciences）では、Tissue Chip for Drug Screening プログラムが DARPA、FDA（Food and Drug Administration（Defense Advanced Research Projects Agency）との協力の下に進められている。また、複雑なヒト組織を模倣した 3 次元組織をバイオプリンティングで作る 3-D Tissue Bioprinting Program も進められている。さらに、将来の医療につながる新しい技術を生み出し、基礎研究から臨床研究まで広範に適用することを支援する NIH の BTRCs（Biomedical Technology Resource Centers）の枠組みで、組織工学、3D プリンティング、バイオプリンティング関連の新技术開発をおこなう CECT（Center for Engineering Complex Tissues）が置かれ、複数の研究組織による連携の下で研究が推進されている。欧州では ORCHID（Organ-on-Chip in development）コンソーシアムによる強力な研究体制のもとで Organ-on-a-chip の研究開発が進められており、欧州圏の著名大学、ドイツの Fraunhofer、ベルギーの半導体コンソーシアムである IMEC 等、研究機関と企業が参加している。我が国においても平成 29 年度より、Organ-on-a-chip に関する AMED プロジェクト「再生医療の産業化に向けた評価基盤技術開発事業（再生医療技術を応用した創薬支援基盤技術の開発）」が開始している。我が国は Organ-on-a-chip やバイオプリンティングの基盤となる材料創製・加工技術、ナノ・マイクロデバイス技術、さらには iPS 細胞など細胞関連技術に強みを有しており、これらを活かした研

究開発の推進が期待される。

センサ・MEMS 技術

Society 5.0 あるいは高度なサイバーフィジカルシステム（CPS）を築くためには、人工知能などの新たな情報処理技術や、IoT（Internet of Things）における高速大容量ネットワーク技術と並んで、現実の世界の多種多様な情報を取得するセンシング技術が重要になっている。その応用は、IT 機器、自動運転車、ロボット、ドローン、VR・AR システム、健康・医療、インフラ保守など、社会の様々なシステムに広がっている。これらの応用のためのセンシングデバイス（センサ）としては、画像・映像を取得するイメージセンサと加速度、圧力、音などの多様な物理量を検出・測定可能な MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）が最も重要でその利用も拡大している。今後はこれらに加え、健康・医療などの応用分野で安定して使い易い化学センサの開発も期待され、物理センサや化学センサと集積回路（IC）やプリントドエレクトロニクス（Printed Electronics）との組み合わせも重要になると考えられる。

イメージセンサはすでに大きな産業となっており企業主体で開発が進められているので、ここでは、主に MEMS センサや化学センサの動向について述べる。このセンサ・MEMS 技術における研究開発課題としては、センシングデバイスの高感度化、高信頼化、低消費電力化、小型軽量化、低コスト化、MEMS プロセス技術の高度化、プリントドエレクトロニクス技術などがあり、IoT 時代のキーテクノロジーとして世界的に研究開発が活発化している。

米国では、DARPA（Defense Advanced Research Projects Agency）が MEMS 技術を約 25 年にわたり強力に支援している。その主な理由は、兵器のナビゲーションに必須の慣性センシング技術にあり、これに関する最新のプログラムとして Precise Robust Inertial Guidance for Munitions (PRIGM) program が推進されている。慣性センサの 1 つであるジャイロ스코ープには MEMS の中核をなす重要技術が凝縮されており、この研究を行うことは MEMS 技術の本筋を研究することにも繋がっている。他に、干渉に強いアダプティブ高周波デバイスを研究する Signal Processing at RF (SPAR) program、超省消費電力センサを研究する Near Zero Power RF and Sensor Operations (N-ZERO) program が実施されている。

欧州では Horizon 2020 のもと、主に Industrial Leadership のためのプロジェクトとして、いくつかの MEMS 関連プロジェクトが実施されている。MEMS スピーカもそれらのプロジェクトの 1 つで開発されたものであり、事業化を目指すベンチャー企業 USound が注目を集めている。また、Fraunhofer 研究機構（ドイツ）、Leti（フランス）、IMEC（ベルギー）などの研究拠点の役割が大きい。これらの研究拠点には、先行投資して開発された技術群を基に複数の企業が集まり、効率よく研究開発が進められている。

中国では、2015 年に上海に設立された MEMS やパワー半導体の大型研究拠点である SITRI（Shanghai Industrial μ Technology Research Institute）は、8 インチラインの立ち上げが遅れていたが、昨年に完了したと思われる。半導体デバイスや半導体装置の国産化に多額の投資を続ける中国政府は、MEMS 関連の国内企業にも積極的に補助をしている。最近、米国との貿易紛争で中国国内のハイテク産業が危機にさらされていることが、政府投資を活発にさせている。

日本では、センサや MEMS に関してまとまったプロジェクトはないが、IoT 推進やプリントドエレクトロニクスなどの一部として、センサ・MEMS 関係の研究開発が行われている。

NEDO の「IoT 推進のための横断技術開発プロジェクト」（2016 年度～ 2018 年度）、「IoT 推進のための横断技術開発プロジェクト」、「次世代プリンテッドエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発」（2011 年度～ 2018 年度）、JST の ERATO「生体調和エレクトロニクスプロジェクト」（2011 年度～ 2016 年度）などが実施され、最近では内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第 2 期「フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」（2018 年度～）の研究サブテーマ II として「超低消費電力 IoT デバイス・革新的センサ技術」が推進される。なお、MEMS のように産業に直結するような技術開発においては、我が国においても研究拠点への政府投資だけに頼るのではなく、欧州の IMEC のように産業界から多くの資金調達をおこない、ある程度自立できる研究拠点・体制とすることが望まれる。

革新的コンピューティング・デバイス技術

近年はネットワーク・Web の拡大、スマートフォンなど携帯機器の普及、コンピュータの飛躍的な性能向上などにより、ビッグデータ処理による購買分析、材料探索や、深層学習（Deep Learning）などの人工知能技術を活用した画像認識や病気診断などにおいて、新たなサービスを創出する動きが活発になっている。これらはクラウド側での情報処理が基本になっているが、今後は IoT（Internet of Things）の普及により、センサなどからの生データの解析と価値のあるデータへの変換、安全なデータ転送（プライバシー保護、セキュリティ確保）、認識・判断（画像認識、音声認識、危険回避など）などのエッジ側での処理が重要になってくる。このようなエッジ側における情報処理は、超低消費電力性、リアルタイム性、ロバスト性などクラウド側とは異なる特性が要求されるため、これらを実現できる新たなコンピューティング技術に対する期待は大きい。一方、現在の情報処理性能向上の担い手である半導体集積回路はすでに加工寸法が 10nm 程度になってきて微細化の限界に直面しており、従来の CMOS デジタル回路によるノイマン型のコンピューティング技術だけではさらなる性能向上は困難になってきている。このため、従来のコンピューティングのアルゴリズムやアーキテクチャなどにとられない新たなコンピューティング技術やそれを支える新たなデバイス技術の研究開発が望まれる。

今後取り組むべきコンピューティング技術の研究開発課題は、アルゴリズム・ソフト、回路・アーキテクチャ、デバイス・材料の全ての技術レイヤーに関わる。また、研究開発のやり方として、これらの技術を網羅的に行うのではなく、重要な応用に向けて、時間軸を考慮した計算ドメイン志向により各技術レイヤーから適切な技術を選択し、垂直統合的な技術開発を行うことが社会実装や効率性の点からも望まれる。ここで言う計算ドメインとは、自律制御、リアルタイム画像認識、診断・予測、分散学習など、いくつかの応用領域で共通の重要な計算・処理を指している。

コンピュータアーキテクチャの国際会議（ISCA、HPCA、MICRO など）や、半導体回路・デバイスの国際会議（ISSCC、VLSI、IEDM など）では、ディープニューラルネットワークのハードウェア実装事例が多数報告され、研究開発の大きなトレンドとなっている。産業界の動きも活発化している。NVIDIA は深層学習向けの次世代 GPU アーキテクチャ「Volta」の開発で AI 分野での躍進を目指し、Intel は AMD と共同で CPU/GPU 混載チップの開発を発表するなど、競争が過熱している。

米国では、プロセッサとプログラムの記憶装置間のアクセス速度が性能を律則するという

フォン・ノイマン・ボトルネック問題が顕在化したことで、IEEE「Rebooting Computing Initiative」が設立され、脳型、量子、光計算などによる新たなコンピューティングを模索する動きが加速している。2008年より DARPA の SyNAPSE プログラムでニューロモフィックチップの開発が進められた。2016年には IBM によりニューロシナプティックコンピュータチップ「TrueNorth」が報告されている。一方、機械学習（深層学習：Deep Learning）を組み込んだ専用のアクセラレータ TPU（Tensor Processing Unit）が Google により開発され 2015 年より実装されている。また、2017 年より DARPA によりグラフ解析に特化した研究プログラム HIVE が開始されている。NSF では「Expedition in Computing」プログラムを実施し、量子コンピュータアーキテクチャ、DNA コンピューティング、分子コンピューティング、視覚ニューロモフィック計算などの 5 年間プロジェクトに最大年 200 万ドルのグラントを行っている。

欧州では、10 年間で 1.0B ユーロという巨額のプロジェクト FET（Future and Emerging Technologies）の一つである Human Brain Project（2013 年～）のサブプログラムの中で、従来のノイマン型のコンピュータよりも桁違いの演算速度、エネルギー効率を目指したニューロモフィック・コンピュータや次世代のニューロモフィックチップの開発が進められている。また、この FET の新たなプロジェクトとして 2018 年 10 月より「Quantum Flagship」が開始され、超伝導、トラップイオン、2 次元物質／光集積回路を用いた量子コンピュータおよびその基礎技術開発などが進められる予定になっている。

中国では、第 13 次五カ年計画で、2 台の 100 PFLOPS のスパコンシステム（Sunway）の取り組みを実施中（2016～20 年）である。また、清華大学で時分割方式で処理するニューロンを持つニューロモフィックチップ、中国科学院でニューラルネットワーク処理用のアーキテクチャなどの研究を行っている。

韓国では、KAIST（韓国科学技術院）などで、動的再構成可能なシストリックアレイから構成される画像認識用プロセッサ、畳み込み演算の並列化や冗長なメモリアクセス削減などの特徴をもつ CNN 計算用プロセッサなどの研究を行っている。

日本では、これまで新デバイス開発のプロジェクト（例えば、JST-CREST「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクス創成」（2013 年度～）、「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」（2014 年度～）や、集積システム化技術（例えば、JST-ACCEL「近接場結合集積技術による革新的情報処理システムの実現と応用展開」（2015 年度～））など、単独の技術レイヤーでのプロジェクトが行われてきた。2018 年度になって、レイヤー統合的な新たなコンピューティングに向けてのプログラムが、内閣府、経済産業省（NEDO）、文部科学省（JST）で開始された。内閣府では戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第 2 期として「フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」が始まり、その中の一環として超低消費電力 IoT チップの開発を進める。NEDO 事業としては、AI チップの研究開発に特化した「高効率・高速処理を可能とする AI チップ・次世代コンピューティングの技術開発事業」および「AI チップ開発加速のためのイノベーション推進事業」が開始されている。JST では CREST「Society5.0 を支える革新的コンピューティング技術」、さきがけ「革新的コンピューティング技術の開拓」が開始され、デバイスからアーキテクチャ、アルゴリズムに至る幅広い計算ドメイン指向の研究開発が行われている。また、富士通の AI エンジン「Deep Learning Unit」や日立の「CMOS アニールリング」などクラウド向けの専用チップ・アーキテ

クチャ研究開発が企業中心に進んでいる。

量子コンピュータ

D-Wave 社が世界初の商用量子コンピュータで採用したのは量子アニーリング方式（イジングマシン）である。これに対し、量子ビットを最小単位として演算を行う量子コンピュータを量子ゲート型と呼ぶ。2016年5月にIBMが世界で初めて、量子ゲート型量子コンピュータをクラウドで公開し、その後2017年11月には50量子ビットの試作機の製作と稼働に成功、12月には20量子ビットでユーザー提供を始めた。IBMの量子ゲート型量子コンピュータは超伝導量子ビットを用いており、GoogleやスタートアップのRigetti computingと開発競争を繰り広げている。IntelはオランダのQuTechと共同で、超伝導量子ビットと半導体量子ビットで参戦している。ベンチャー企業のIonQは、イオントラップ方式のハードウェアを採用する唯一の企業で、2018年12月に160量子ビットを備え79量子ビットの演算を達成できる量子コンピュータの開発に市場で初めて成功している。実際に演算を実現するには、量子状態を長時間保持し続けることが必要であり、これを満たしつつ演算の高速化の鍵である量子ビット数を増やすことに注力されている。

現状のゲート型量子コンピュータの本質的問題は、計算の誤りを検知して訂正をする誤り訂正という機能がないことである。この問題を解決するために、量子コンピュータにも古典コンピュータと同じように量子誤り訂正が提案されているが、技術的な実装の難易度が高い。このことを踏まえて、「今はNISQの時代である」とカリフォルニア工科大学のPreskill教授は定義している。NISQとはNoisy Intermediate-Scale Quantum Computerのことで、ノイズがありスケールしない量子コンピュータのことである。NISQ技術のターゲットとして、量子効果による計算の加速を科学的に実証する量子超越性や、古典コンピュータと合わせてその性能を最大限に引き出す古典量子ハイブリッドアルゴリズムなどがある。後者では、ノイズを含む小規模・中規模の量子コンピュータの量子化学計算や機械学習への応用が模索されている。

米国では、量子コンピュータの研究に多額の投資が集まっており、Rigetti computingは2017年3月に6400万ドル（約70億円）の資金調達に成功した。2018年にはエネルギー省（DOE）及び全米科学財団（NSF）がそれぞれ量子情報科学（Quantum Information Science：QIS）研究開発プロジェクトへの資金提供を発表するなど、政府による大型投資も始まった。また、同年12月には国家量子イニシアティブ法（National Quantum Initiative Act）が成立し、2019年からの5年間で約12億ドルが量子技術研究（人材育成を含む）に投じられる予定である。さらに同法の成立に基づき、米国科学技術政策局（Office of Science and Technology Policy：OSTP）の下に国家量子調整室（National Quantum Coordination Office）が設置される予定である。

中国では、安徽省合肥市に760億元を投資して量子情報科学国家実験室を建設中（2020年完成予定）である。また、2015年に量子コンピュータ分野に進出したIT大手のアリババ（阿里巴巴）グループは、中国科学院と組んで新たな研究施設を開設し、2018年2月には11量子ビットの量子プロセッサによるサービスをクラウド上で開始した。また、2025年までに量子シミュレーションを現在の世界最速スパコンの水準にまで高めるなどの目標を掲げている。

EUでは、2018年よりQuantum Technology Flagshipを立ち上げ、重点分野の一つとして量子コンピューティングを推進するとともに、独自に量子ソフトウェアを新興領域に定めてい

る。2018 年秋に 20 課題が採択されたことが発表され、翌年より 10 年間で 10 億ユーロが投じられる予定である。EU 各国では、ドイツが 2018 年から 5 年プロジェクトで約 170 億円/年、オランダでは Delft + QuTech によるプロジェクトにインテルが約 50 億円（10 年、2015 年から）、マイクロソフトも 2017 年から出資している。イギリスでは、2014 年から、UK National Network of Quantum Technology Hubs（約 80 億円/年、5 年）が開始されている。

日本では、2016 年に ERATO 中村巨視的機械プロジェクト、CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」、さきがけ「量子の状態制御と機能化」が発足した。2018 年からは、量子科学技術（光・量子技術）を駆使して非連続的な解決（Quantum leap）を目指す「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）」が文部科学省において開始されている。Q-LEAP のうち、量子情報処理（主に量子シミュレータ・量子コンピュータ）領域（伊藤公平 PD・慶大教授）では、超伝導量子コンピュータに関する Flagship プロジェクト、および、冷却イオン、冷却原子、シリコン量子ビットで構成される量子シミュレーター・コンピュータに関する基礎基盤研究が連携し、10 年の予定で実施されている。

超複合材料

製品の軽量化や強度・耐熱性の向上などの複数の機能を同時に実現するため、異なる材料を一体的に組み合わせて材料の性能を高める複合材料の重要性が高まっている。CO₂ 排出量削減や低消費電力化など、持続可能社会実現に向けた要求を満たすためには、複合材料の特長を最大限に活かす構造の設計技術の進化が必要であり、そのためには劣化・破壊・機械的強度といった力学特性の発現メカニズムをナノスケールレベルから解明することが必要であり、既存の複合材料の性能を凌駕する超複合材料創製に向けた研究開発が進展しつつある。

わが国においては、内閣府革新的研究開発推進プログラム（Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program: ImPACT）「しなやかタフポリマーの実現」（PM: 伊藤耕三、2014～2018 年度）においては、自動車部品や輸送機器の性能を飛躍的に向上させるために、タフネス性・柔軟性・自己修復性という特徴を有し、かつ、従来の限界を超える薄膜化・強靱化を同時に実現する「しなやかタフポリマー」の実現を目指している。また、同じく内閣府の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」（PD: 岸輝雄、2014～2018 年度）では、強く、軽く、熱に耐える革新的材料を開発し、航空機をはじめとする輸送およびエネルギー産業での実機適用、エネルギー転換・利用効率向上を目指した研究開発が行われている。

NEDO「革新的新構造材料等研究開発」（PL: 岸輝雄、2014～2018 年度）においては、自動車、航空機、鉄道車両などの抜本的な軽量化に向けて、革新的なアルミニウム材、チタン材、マグネシウム材、鋼板、炭素繊維および炭素繊維強化樹脂（CFRP）の開発を行っている。同じく NEDO「次世代構造部材創製・加工技術開発」（PL: 青木隆平、2015～2019 年度）では、航空機の燃費改善によるエネルギー消費量と CO₂ 排出量削減、整備性向上、安全性向上を目指した複合材料や軽金属材料などの技術開発を行っている。

米国においては、デラウェア大学複合材料センターにおいて、CFRP などの各種成形技術および材料設計技術、生産ライン最適化技術の開発が進められている。またエネルギー省（DOE）先端複合材料製造イノベーション研究所（Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovation: IACMI）では、CFRP などの複合材料の先進的な製造およびリサイクルプロセ

スの低コスト化、高速化、高効率化を目指して成形技術や損傷シミュレーション技術の開発を行っている。

英国においては、航空機宇宙産業に有用な複合材料の研究開発を積極的に進めており、CATAPULT プログラムの一環として、ブリストル大学を中心に国立複合材料センター（National Composite Centre : NCC）を設立し、産学官コンソーシアムも形成している。また、欧州 Horizon2020 の枠組の中で「Self-healing geological construction materials and structure : GEOHEAL」プロジェクトが進行しており、主にコンクリートなどの構造材料に対して、自己修復のメカニズムの解明および自己修復性を誘起する方法を特定・評価する技術開発を行っている。

中国においては、2017 年 1 月に、中国恒瑞有限会社（Hengri Corporation）が、常熟国家ハイテク技術産業開発区の合意の下、ドイツ・フ라운ホーファー化学技術研究所（Institute for Chemical Technology : ICT）と共同で先進的複合材料技術センター（Advanced Composite Technology Center）を設立している。欧州における成熟した炭素繊維複合材料の研究開発の成果と技術をシステムチックに中国に導入し、中国内の複合材料の研究および応用レベルを引き上げることを目的としている。加えて、中国における製造業新興長期プランである「中国製造 2025」においても、先進材料や航空機関連領域が重点分野に含まれており、今後もこの分野に大きな資金が投入されることが予想される。

データ駆動型材料開発（マテリアルズ・インフォマティクス）

2011 年の米国「Materials Genome Initiative : MGI」をきっかけに、従来の実験・理論・計算科学に加えて、材料データベースと機械学習などの情報科学的手法を併用することで物質探索・設計手法に革新を起こし、開発期間とコストを大幅に削減するデータ駆動型材料開発が世界中で精力的に行われている。

材料科学においては、対象となる物質の組合せが膨大、かつ、組合せのわずかな違いで特性が大きく変化するという特徴がある。これに対して米国 MGI は、研究者の長年の経験や勘だけに頼るのではなく、進展著しい情報科学を駆使することで優れた性能を持つ新物質を産み出す速度を従来の 2 倍に高めることを目指した。2014 年には戦略プラン（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）が公表され、計算科学、データベース、機械学習、深層学習等を用いた材料開発の効率化が進められた。5 年間で総額 500 百万ドル以上の資金が投入され、2016 年 8 月に公表された総括文書では、①材料開発におけるパラダイムシフトの醸成、②異分野横断型基盤的ファンドの充実、③次世代人材の教育、④データベースの構築、⑤コンソーシアムの設立などが主な成果として挙げられ、MGI は今後も米国製造業に革新をもたらす可能性があるため継続すべきである、とされている。ただし、現トランプ政権下においては、MGI は政策的優先事項には含まれておらず、各省予算の中で 4 つのセンター（CNGMD、CHiMaD、PRISMS、SUNCAT）などで引き続き継続して研究開発やデータベース構築が行われている。このような状況に対して 2018 年 4 月に NIST が中心となって「MGI を支援する技術基盤の国家ニーズに関する経済分析レポート」が公表されている。本レポートでは、米国における先進材料産業界の 100 名を超える専門家へのアンケート結果に基づいて、6 つの重要ニーズの特定および各ニーズに対する経済的イン

パクトの見積を行っている。6つの重要ニーズとは「実験、計算、ソフトウェアコードなどの高品質データへの容易なアクセス」「材料データ共有による協働ネットワークの構築」「計算科学的アプローチによる材料設計手法の確立」「試行錯誤から脱却し、高い費用対効果を生み出すための生産とスケールアップ手法の構築」「材料欠陥制御や製品ばらつき予測を可能にする品質保証／制御とコンポーネント基準認証方法の確立」「モデル検証と不確定性の定量化」であり、特に「高品質データへの容易なアクセス」が最重要課題であり、民間投資のみでは対処が困難なため国による支援が必要、とされている。さらに、経済的インパクトとしては、上記6つの重要ニーズを満たすことで、年間1230～2700億ドルに相当する経済利益を生むこと、新材料開発に伴うリスクが約50%削減されること、新材料開発期間が約35%短縮されること、などが見積もられている。

欧州においては、欧州材料モデリング協議会（European Materials Modeling Council：EMMC）の活動が活発化している。本協議会は、材料モデリングの産業応用を目的として設立され、関連するステークホルダーのコラボレーションの強化、統合材料モデリングの促進、学術的イノベーションの産業応用への迅速な移行の促進、産業界（特に中小企業）における材料モデリングに対する意識向上、材料モデリングの産業応用への障壁の特定およびそれを克服するためのロードマップ策定を目標に、6つのWG活動を推進している。また、欧州においては、独マックスプランク研究所を中核機関とするNOMAD（Novel Materials Discovery）Repository（2015年11月～2018年10月、約500万ユーロ）、スイス連邦工科大学ローザンヌ校を中核機関とするMARVEL（Materials' Revolution: Computational Design and Discovery of Novel Materials）（第1フェーズ：2014～2018年、18百万スイスフラン、第2フェーズ：2018～2022年、最大22百万スイスフラン）において、それぞれデータベースの整備が進められている。

中国においては、上海および北京においてデータ駆動型材料開発が精力的に行われている。上海においては、上海市の支援の下、2014年に上海大学材料ゲノム研究所、2016年に上海交通大学材料ゲノムイニシアティブセンターが設立されている。さらに上海付近の関連機関間でShanghai Institute of Materials Genome（SiMG）というアライアンスを設立している（メンバーは上海大学、上海交通大学、中国科学院上海セラミックス研究所、中国科学院上海応用物理研究所、華東理工大学、復旦大学）。北京においては、2016年に中国科学院物理研究所および北京科技大学等が共同で北京材料ゲノム工学イノベーションアライアンス、2017年には中国鋼研科集団有限公司等も参画する北京材料ゲノム工学イノベーションセンターを設立し、潤沢な資金と人材を活用した研究開発を実施している。また、国家重点研究開発計画の一つとして「材料ゲノム工学のキーテクノロジーと支援プラットフォーム」が2016年から開始され、2018年までの3年間に計44件、総額約8億元の研究資金も投入されている。

わが国においては、JST研究開発戦略センターが2013年8月に戦略プロポーザル「データ科学との連携・融合による新世代物質・材料設計研究の促進（マテリアルズ・インフォマティクス）」を発行し、マテリアルズ・インフォマティクスの重要性について政府に提言を行った。その後、2015年にJSTにおいて「国立研究開発法人を中核としたイノベーションハブの構築支援事業」が開始され、物質・材料研究機構（NIMS）を中核機関とする「情報統合型物質・材料開発イニシアティブ（Materials Research by Information Integration Initiative：MI²I）」（PL：伊藤聡、2015～2019年度）が発足し、蓄電池材料、磁性材料、伝

熱・熱電材料を具体的テーマとしてデータ駆動型材料研究開発に取り組んでいる。それ以前の2014年に開始した内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program : SIP）「革新的構造材料」（PD：岸輝雄、2014～2019年度）の中の研究開発項目の一つ「マテリアルズインテグレーション」（領域長：小関敏彦）においては、工学的な視点に立って理論・実験・解析・シミュレーション・データベースなどの全ての科学技術を融合した統合的な材料技術ツールの開発に取り組んでいる。

また、2016年より開始した経済産業省／NEDO「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト（超超プロジェクト）」（PL：村山宣光、2016～2021年度）では、有機系機能材料を対象に計算科学を駆使して材料の「構造」と「機能」を結びつけたデータ群を作り出し、マテリアルズ・インフォマティクスと融合することで革新的な機能性材料の創製・開発の加速化を目指している。

2016年度から開始された第5期科学技術基本計画において、データ駆動型材料開発は、超スマート社会「Society5.0」の実現に貢献する11のシステムの一つ「統合型材料開発システム」として位置づけられており、上述の3つのプロジェクト（MI²I、SIP マテリアルズインテグレーション、超超プロジェクト）の間で、実施者を加えた3府省連絡会議等を適宜開催し、各プロジェクトの進捗や成果の共有を図ることとしている。

2018年にはSIP（第2期）として、「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（PD：岸輝雄、2018～2022年度）が開始され、マテリアルズインテグレーション（MI）の素地を活かし、欲しい性能から材料・プロセスをデザインする「逆問題」に対応した次世代MIシステムを世界に先駆けて開発するとともに、MIを活用して競争力ある革新的な高信頼性材料の開発や設計・製造・評価技術の確立に取り組み、発電プラント用材料や生体用材料、航空用材料等を出口として、先端的な構造材料・プロセスの事業化を目指している。

JST 戦略的創造研究推進事業においては、2015年にさきがけ研究領域「理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズインフォマティクスのための基盤技術の構築」（研究総括：常行真司、2015～2020年度）、2016年よりCREST・さきがけ複合領域「計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測・解析手法の開発と応用」（研究総括：雨宮慶幸、副研究総括：北川源四郎、CREST:2016～2023年度、さきがけ:2016～2021年度）、2017年よりCREST研究領域「実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新」（研究総括：細野秀雄、2017～2024年度）が相次いで発足した。わが国においてもマテリアルズ・インフォマティクスが物質・材料開発を行う際の強力なツールの一つとして確立されつつある。

トポロジカル物質

トポロジーは位相幾何学という数学の分野で発展してきた学問体系であるが、2000年以降、それを物質系に適用することで、従来の金属・半導体・絶縁体の分類では記述できない新たなタイプの物質相として「トポロジカル物質」が登場した。トポロジカル物質の代表例であるトポロジカル絶縁体においては、物質の内部は絶縁体状態であるにも関わらず、物質の表面、つまり外部との境界（3次元系であれば表面、2次元系であれば端）にトポロジーに特徴付けられた特異な金属状態が実現している。その金属状態を流れる電子は質量がほぼゼロで、かつスピンの向きを揃えていること（スピン運動量ロッキング）が特徴である。また、トポロジカル絶縁体の派生物質であるトポロジカル超伝導体の中にマヨラナ粒子が存在すること、トポロジ

カル半金属の1種であるワイル半金属の中にワイル粒子が存在することなどが相次いで発見されている。通常の物質とは異なり、トポロジカル物質には非磁性の欠陥や不純物に対して堅牢（ロバスト）な性質を持つ電子が存在するため、スピントロニクスや量子コンピューティングへの応用に大きな期待が寄せられている。さらに、実空間におけるトポロジーに起因したスキルミオンは、高密度高速メモリへの応用に向けた精力的な研究が行われている。

日本では、内閣府最先端研究開発支援プログラム（FIRST）「強相関量子科学」（2009-2013年度、中心研究者：十倉好紀・東京大学教授（当時））および最先端・次世代研究開発支援プログラム（NEXT）「トポロジカル絶縁体による革新的デバイスの創出」（2010-2013年度、安藤陽一・大阪大学教授（当時））において、トポロジカル絶縁体や周辺のトポロジカル物質に関して世界を牽引する成果が生まれている。また JSPS 科研費新学術領域「対称性が破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」（2010-2014年度、領域代表：前野悦輝・京都大学教授）、同じく新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」（2015-2019年度、領域代表：川上則雄・京都大学教授）で着々と上記分野における基礎学術基盤が築かれつつある。さらに、2018年にはこれまで蓄積された基礎研究成果を元にデバイス応用へ向けた研究を加速することを目的として文部科学省の戦略目標「トポロジカル材料科学の構築による革新的材料・デバイスの創出」が設定された。それを受けて、JST においては戦略的創造研究推進事業 CREST「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」領域（2018-2025年度、研究総括：上田正仁・東京大学教授）およびさがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」領域（2018-2023年度、村上修一・東京工業大学教授）が発足している。

一方で米国では、Gordon and Betty Moore 財団の助成プログラム EPiQS（Emergent Phenomena in Quantum System）の中でトポロジカル物質の研究開発を支援している。さらに、Microsoft Research Station Q ではディレクターに数学者の Michael Freedman（1986年フィールズ賞授賞）を迎え、トポロジカル量子コンピューティングの研究に着手している。ドイツのエクセレンス戦略におけるエクセレンスクラスターの一つとして、2018年よりケルン大学を中心とした「Matter and Light for Quantum Computing : ML4Q」が開始され、トポロジカル量子コンピューティング実現へ向けた研究開発が開始されている。その他、カナダ CIFAR（Canadian Institute for Advanced Research）や中国の SCCP（Shanghai Center for Complex Physics）などにおいてもトポロジカル絶縁体などの研究が盛んに行われている。

3D プリンティング

3D プリンティングの手法としては様々あるが、付加製造（additive manufacturing）、あるいは積層造形は世界的な研究開発のトレンドになっており、ポリマーから始まり、金属やセラミックスまで様々な材料が扱われるようになってきている。大きさもメートルサイズからマイクロメートルサイズまで、幅広く扱われている。材料の面で見ると、金属の付加製造のメリットが大きく、実用的な視点からも注目される。設計の自由度が大きくなること、カスタマイゼーションができることに加え、金型（鋳型）を使うことなく金属材料の造形ができることが特徴として挙げられる。その一方で、複雑な金型の製造にも利用される。付加製造では金属の質の良いものはできないだろうと思われがちであるが、現状では鋳造よりも力学特性の優れたものを作ることができる。応用分野としては、航空機や医療分野などがあり、エンジンのタービンやインプラント材料などへの適用が間近になっている。

金属の付加製造法の特徴は、熱源により3次元に溶接（肉盛り）を繰り返す点であり、機能傾斜した造形品を作製することもできる。最も世界的に導入されている金属付加製造法は Powder Bed Fusion というタイプで、数 10 μ m オーダで金属粉末を敷き詰めながら2次元のスライスデータで造形し、それを積み重ねて3次元の形状を実現する。Powder Bed Fusion の熱源には電子ビームを使う場合とレーザービームを使う場合があり、それぞれに利点、欠点がある。重要な点は、粉末を原料として、製品を一気に作り上げられることであり、革新的プロセスとしての可能性がある。このような金属の付加製造法の研究開発課題としては、付加製造装置の高性能化、原料粉末の製造技術、リアルタイムプロセスモニタリングと計算機シミュレーションによる組織予測、形状制御と材質制御の両立などが挙げられる。

欧州では、1984年から始まったフレームワークプログラム（FP1）の中でもポリマーのレーザースキャン技術に対するファンディングを行っており、その後も継続的に付加製造技術に対して支援を続けている。FP7（2007-2013）においては、60を超えるプロジェクトに対して、160Mユーロのファンディングを出しており、Holizon2020では主に Key Enabling Technologies の枠組の中で、2013年～2016年に発足した20のプロジェクトに対して95Mユーロをファンディングしている。

米国では、2012年に始まった先進製造（NNMI : National Network for Manufacturing Innovation）の取り組みの第1号として、付加製造技術の研究開発を行う National Additive Manufacturing Innovation Institute（NAMII）が設立され、政府からの予算 \$30M と参加組織（40社の企業、9つ大学など）からの \$40M のマッチングファンドで推進された。

このような欧米の早期の取り組みなどにより、金属の付加製造技術に関しては、欧米が先行しており、日本は遅れている状況にある。応用分野で見ると、例えばタービンブレードは、GE が中心となってボーイング等の会社と一緒に開発を進めている。フランスのエアバスもコンソーシアムを作り、他企業と連携して技術開発を進めている。2020年にはボーイング 777x に搭載予定である。また、燃焼ノズルには付加製造でなければならない形状のものが作られ、燃費向上による CO₂ の削減と、航空機エンジンそのものの軽量化が可能となる。付加製造装置では、電子ビームを使った装置はスウェーデン、レーザーを使った装置はドイツのように装置メーカーが欧米に集中している。原料粉末の製造技術も装置メーカーと一体となって開発している海外メーカーに大きなシェアを取られている。このような状況に対し、日本では NEDO プロジェクト「次世代型産業用 3D プリンタの造形技術開発・実用化事業」（2017年度～2018年度）において、技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構（TRAFAM）が世界最高水準の純国産産業用 3D プリンタの開発を目的として、装置および粉末原料、制御ソフト開発などに取り組んでいる。日本としては、付加製造装置や粉末原料の開発で欧米に追いつくだけでなく、リアルタイムモニタリングやシミュレーションによる高精度の組織予測や、形状制御と異方性などの材質制御を日本の強みとしていく必要がある。

オペランド計測

ラテン語の「オペランド（Operando）」は“working”、“operating”という意味で、2002年に触媒研究の分野にて使われ始めた。放射光 X 線、中性子線、レーザーなどのプローブによる量子ビーム分光法の急速な発展を基にして、車の排ガス処理などに用いられる触媒反応や半導体やメモリ、太陽電池などの実デバイス動作の計測、さらには生体組織や細胞の生きたま

まの観測を可能とするオペランド計測が広く使われ始めている。狭義の「オペランド」は、「動作環境」、「時間変化」、「その場」の3要素が揃う必要があるが、材料分野では「その場」の代替語として広義で考えた方が実用的である。ナノ計測という観点では、最近の進歩が著しい走査型透過電子顕微鏡（STEM）、多彩な走査型プローブ顕微鏡による観察技術もオペランド計測に必要不可欠となっている。

最近のナノ・オペランド計測では、究極の原子・分子計測を目指して時間・空間・エネルギー・角度分解能が向上したばかりでなく、特に分光プローブで最もニーズの高い放射光 X 線において、分光法と顕微法を組み合わせた新規計測技術が次々と報告されている。ナノ空間分解能での分光には、X 線を試料に集光させるか、試料から出てくる X 線を位置分解計測するかが必要である。後者の例として、最近、急速に進展しているのがタイコグラフィ（ptychography）である。タイコグラフィはコヒーレンス性を利用した X 線回折イメージング手法であり、異なる位置からのコヒーレント X 線回折パターンを得た後、位相回復計算を実行することで位置分解像を得るものである。例えば、タイコグラフィと XAFS とを組み合わせることで、自動車触媒 $\text{Pt/Ce}_2\text{Zr}_2\text{O}_x$ の酸化還元過程やリチウムイオン電池中の高分解組成などがマッピングされた。

諸外国で、ナノ・オペランド計測のみに注力するプロジェクトへの大規模な政府投資は見られない。米国 LBNL における STEM 用ピクセル検出器の開発、フランス CNRS のカソードルミネッセンス（CL）開発、ドイツの SALVE プロジェクト、英国の SuperSTEM3 などが注目である。欧米では、ピクセル検出器とビッグデータ解析の融合を目指すプロジェクトも動き始めている。一方、中国における放射光 X 線のオペランド計測は、装置開発よりも導入装置による分析応用に重点が置かれており、例えばリチウムイオン電池の計測などが精力的に展開中である。また、中国が巨額な研究投資を背景として、ハイエンド STEM を精力的に導入しており、急速に実力を伸ばしている。今後、本格的な装置開発に参入する可能性も否めず、引き続き注視する必要がある。

日本では、2016 年 6 月に、「産総研・東大 先端オペランド計測技術オープンイノベーションラボラトリ」（OPERANDO-OIL）が設立され、企業への「橋渡し」を念頭に、先端オペランド計測基盤技術の開発や生体機能性材料、新素材、革新デバイスなどの創出に向けた研究が進められている。政府投資としては、文部科学省の「光・量子融合連携研究開発プログラム」で、放射光 X 線、中性子線や他の光・量子ビーム技術との融合によるオペランド計測のプロジェクトが 2017 年まで進められた。これと並行し、小型中性子源として理化学研究所の RANS 開発が戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」のプロジェクトで進展した。現在、ナノ・オペランド計測のみに注力する大型のプロジェクトは見当たらないが、JST の研究成果展開事業「先端計測分析技術・機器開発プログラム」や戦略的創造研究推進事業 ERATO 百生量子ビーム位相イメージングプロジェクト、さががけ「エネルギー高効率利用と相界面」、科学研究費補助金の新学術領域研究「ナノ構造情報のフロンティア開拓・材料科学の新展開」、特別推進研究「原子・イオンダイナミックスの超高分解能直接観察に基づく新材料創成」の一部課題として、STEM、X 線顕微法・イメージング技術関連のプロジェクトが進行している。無磁場、あるいは高速化 STEM が、実際の装置開発・販売者である JEOL と東京大学との協力により開発中であることは注目される。また、放射光 X 線のオペランド観測については、NEDO の「固体高分子形燃料電池利用高度化技術開発事業」、「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発」、文部科学省が実施している「元素戦略プロジェクト

＜研究拠点形成型＞」が深く関わっている。

■分野別の俯瞰ワークショップのサマリー

2017年版の俯瞰報告書発行以降、国内外の社会情勢、科学技術の動向を踏まえ、情報の更新が必要と考えられた4つの領域「エネルギー材料・デバイス」「製造加工技術」「オペランド計測技術」「物質と機能の設計・制御技術」を俯瞰ワークショップのテーマとして取り上げた。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および俯瞰ワークショップを開催し、各領域における技術・産業の状況の把握、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議論を行った。また、日本における研究開発予算の飽和と世界の中で相対的な研究開発力の低下が続く材料・デバイス研究をどのように進めていくべきか議論することを目的としたワークショップも開催した。

以下では、各ワークショップから得られた知見、注目動向、今後の方向性、制度・政策上の課題等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webページに公開）を参照されたい。

①再生可能エネルギー大量導入時代を見据えたエネルギー材料・デバイス研究開発

将来の再生可能エネルギーの姿を俯瞰するワークショップを開催し、検討した。発電量が気象条件に左右される不安定な再生可能エネルギーの比率が高まり、これを如何に補償するかが大きな課題となる。対策としては蓄電池での電力平準化、水素製造など化学エネルギーへ変換して燃料電池で発電することなどが考えられている。一方で、変動する電力は価値が低く、火力発電などの安定した電力は高い価値を持つ。電力にいわば色をつけて価格差を設け、蓄電や送電のコストを分散する考え方も出てきている。

○将来の電力・エネルギーデバイス・システム

将来の電力システムにおいては、太陽光や風力を用いた再生可能エネルギー由来の電力は変動のリスクがある反面、自然由来であるため設備償却後にはコスト0を目指すことができる。需要、品質に応じて電力の価格が変化し、これによりインターネットのように双方向接続が可能になる。これは電圧の高低による電力流通から、社会経済原理に基づいた価格差に基づく電力流通に変わることを意味している。

さらに個々のデバイス開発の方向性を検討し、以下のような結論を得た。中でも、太陽電池、熱電変換、人工光合成は、創エネルギーデバイス・システムとして期待されている。

（1）太陽電池

ペロブスカイト型の進展、鉛フリー化、そしてシリコン型とペロブスカイト型の積層による低コスト高効率化が進んでいる。また、太陽電池に用いられる有機薄膜の形成について、数ミクロンの厚さでも高移動度を実現する新しいプロセスが登場している。

（2）熱電変換

100℃以下の低温領域のBi-Te系やBi-Sb-Te系に加え、中温域（500～600℃）における熱電物質の特性が近年大きく向上している。これにはフォノンエンジニアリングが貢献しており、学際的な交流、検討の重要性を示す一例といえる。

（３）人工光合成

可視光での反応の実現が重要であり、二酸化炭素を原料とする有用な有機物生産や、水から直接水素を発生させる反応について効率を今後いかに向上させるかが重要である。

（４）燃料電池

水素などの燃料のエネルギーを電気に変換する効率 80%をいかに実現するか、かつ耐久性を向上させるかが重要である。変換効率は特に空気極側の材料に課題がある。現在、蒸気タービン、ガスタービン、燃料電池を直列に用いるハイブリッドシステムで高効率発電を目指した研究が進んでいる。もし、燃料電池のみで効率が 80%に達することができれば、蒸気タービンおよびガスタービンとのハイブリッドを考える必要がなくなるため、システムとしては簡便になるというメリットがある。

（５）蓄電池

酸化物固体電解質型が高い安全性への期待と、電力をためる活物質が電解液であるレドックスフロー型が超大容量への対応が安全に行えることで注目を集めている。酸化物型固体電解質の蓄電池は、電解質のイオン伝導と、電解質粒同士の間および電解質と活物質間の界面が鍵である。界面制御には電場による固体中のイオン移動の理解が重要で、これには固体物理学の知見が必要となる。また、高品質な界面形成には原理的に低温での材料合成が必要である。

電解質に硫酸を用いたレドックスフロー型電池の実用化が主に米国や中国で始まりつつある。一方で、電解質に有機材料を用いたり、中性電解液で動作させるなどの新たな可能性も提案されていることから、研究課題も多いが今後の発展の余地が大きい分野でもある。

（６）超伝導

近年、磁気揺らぎや軌道揺らぎ、電荷揺らぎに着目した新たな理論的研究が進展するなど、高い転移温度を持つ新しい超伝導物質の発見が期待されている。特に、結晶構造そのものによる圧力効果など、新しい材料設計、合成プロセスが重要である。

（７）パワーエレクトロニクス

パワーエレクトロニクス材料として注目される α 型酸化ガリウムは、ミスト CVD という低温での材料合成プロセスを用いることによって、きわめて安価に材料を合成し、かつシリコンより高耐圧なスイッチを作ることができる。新たな低温合成法が生まれれば、これまでは不可能と考えられていた元素組成を持つ半導体作製が可能となり、飛躍的な特性向上が期待される。

○システム・制度上の課題

デバイス、材料の研究においては、学際的な人材育成、研究体制の構築が求められる。たとえば電池は電気化学の専門家が現状では主に関わっているが、固体電解質中のイオン移動の理解には固体物理の知識が必要である。また、熱電変換材料と超伝導材料の間には共通する物理があるなど、ある大きな課題を設定し、そこに異分野の専門家が広く集うような仕組み作りが重要である。さらに、挑戦的な研究を推進する上で、いかに目標設定をおこなうかという点も課題である。

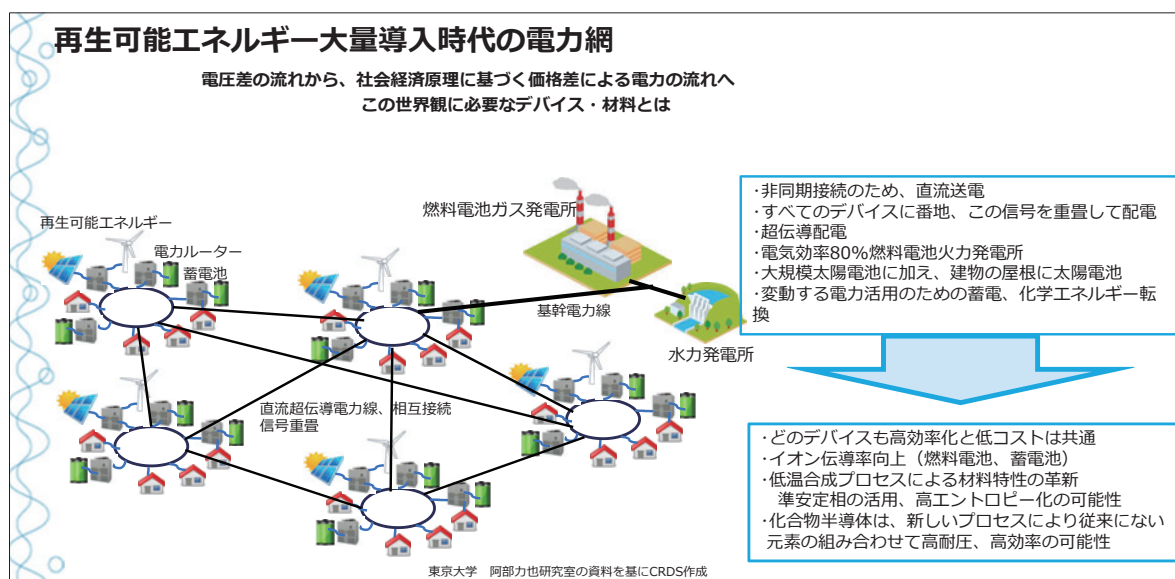


図1.2.4-2 再生可能エネルギー研究の方向性のまとめ

②共通基盤科学技術（製造加工）ーデジタル情報を基にした製造加工の姿ー

ナノテクノロジー・材料の進展に不可欠な製造技術・加工技術に関する研究開発動向を広く俯瞰することを目的にワークショップを開催した。製造加工技術は新奇材料の登場や高度化に向けた成熟技術の漸次進展の側面と、材料プロセスと成形がより密接になった新たな技術展開の2つの側面を持つが、ここでは前者の技術として精密機械加工技術、後者の技術としてAdditive Manufacturing技術およびプリンテッドエレクトロニクス技術を取り上げて話題提供してもらい、材料機能の設計・制御とその加工手法、製造加工の新たな方向性、製造加工技術を基盤学術として維持発展させるための仕組みなどを総合討論で議論した。その結果、以下のような今後の研究開発の方向性を得た。

●今後の研究開発の方向性

(1) デジタル化した製造加工の姿と提供すべき価値

- ・デジタル化で構造設計から材料設計、製造までを一体化し、加工技術をフレキシブルに組み合わせることで多様なニーズに対応して製造していく。
- ・デジタル化により、データを持っているところとデータから物を作るところに付加価値が存在するようになり、利用者の欲しい機能が製造技術を通して提供される。

(2) 新しい製造の形に向けた課題

- ・試作から生産への移行に大きなギャップがあるが、これらを融合化してコンパクトにし、生産のギャップを埋めることがデジタル製造の課題である。
- ・日本の強みをさらに強くするには、縦の技術であるものづくりプロセスの技術を強くすることに加え、デジタル化で物質研究、材料開発、製造加工、サービスといった横のバリューチェーンをつなげることにある。

(3) デジタルデータにおける価値

- ・データの中に加工におけるサイエンティフィックな深み（材料の理解、加工現象の理解）を加え、それを蓄積していくことが強力な付加価値になる。

- ・企業も自前のデータでは追いつかなくなっており、公的機関のデータベースの活用や戦略的なオープン化を考える必要がある。
- （４）製造加工プラットフォームの必要性
 - ・プロセスの中のメカニズムやパラメータの情報も含めて、質の高いデジタルデータを保有し、誰もが使える製造加工技術のプラットフォーム（技術基盤および場所）が必要である。
 - ・大学が開発した技術や装置をオープンに使えるプラットフォームをつくり、それをブラッシュアップしていくことが重要である。
- （５）人材育成の課題
 - ・大学における工学教育の中で、ものづくりに関する基盤的教育が難しくなっており、企業でも工学的基礎知識を持たずに製造に従事するという危機的状況にある。
 - ・大学と企業との共同研究を通じて、学生への基盤的教育とともに、社会人による博士号取得を進めるべきである。

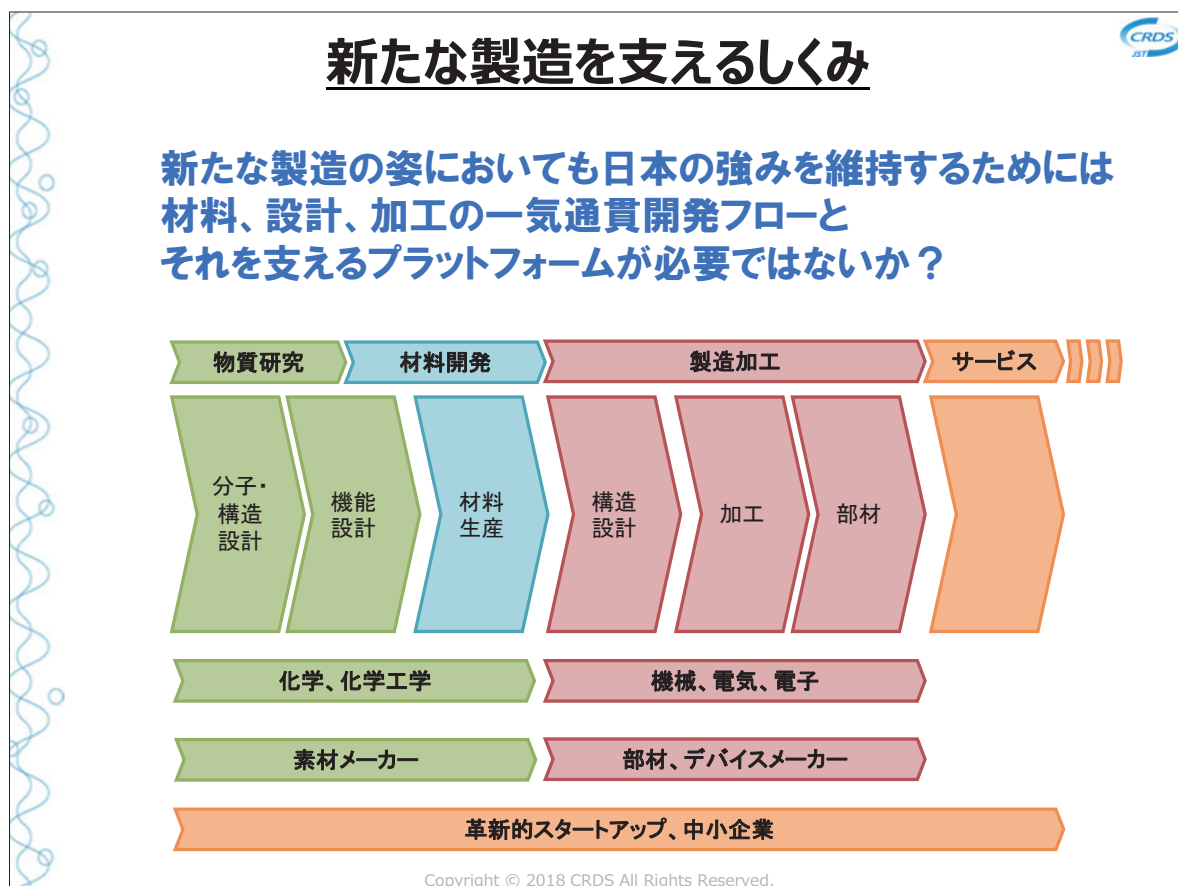


図1.2.4-3 新たな製造を支えるしくみ

③共通基盤科学技術（計測分析）ーオペランド計測技術ー

計測分析技術の中でも、デバイスの動作状態や生体の活動状態などにおけるナノスケールの構造や物性の動的変化を観察できるオペランド計測を取り上げ、表面・界面や摩擦、電場・磁場などに関するオペランド計測技術の最新の研究開発動向を俯瞰するとともに、オペランド計測による可視化・定量化が期待される現象とそれに必要な技術要素など、今後の計測技術の方

向性について議論することを目的にワークショップを開催した。その結果、以下のような今後の研究開発の方向性を得た。

●今後の研究開発の方向性

（１）オペランド計測の役割

- ・どこにオペランド計測をやる意味があるか、どこにブレークスルーがあるかを見きわめ目標設定する必要がある。
- ・構造と機能の相関を結びつけるところが非常に重要な視点である。本質的な理解には階層構造、マルチスケールという目で見える必要がある。

（２）オペランド計測によって期待されるサイエンスの展開

- ・機械工学には原子分子論的な立場に立脚して物事を理解すべきオペランド計測（分析）の対象が多く存在する。
- ・オペランド計測だからこそできる非線形現象の解明が期待される。

（３）オペランド計測におけるデータ科学・AIの活用

- ・計測が高度化すればデータが膨大になるのは必然であり、機械学習、AIの導入は必然の流れであり、データサイエンティストの協力が必要である。
- ・機械学習は膨大なデータから新しい知見を見出すだけでなく、多次元空間の中から最適化に必要なパラメータを見出し、効率的なデータの取得を支援できる。

（４）計測機器の使用と作製

- ・今では装置は買ってくるのが常識になっているが、10年後には装置が陳腐化してしまうため、世界のトップを走るためには装置の作製・高度化が必要である。
- ・施策のほとんどは装置を使う方であり、作る方をどのように支援していくかに課題がある。装置のアイデアを実現できる環境や仕組みの整備が必要である。

（５）人材育成

- ・オペランド計測の活性化を図るには、オペランド計測の要素技術と材料側のニーズの両方がわかっている人の育成が重要である。
- ・大型施設だけでなく、小規模の施設をサポートしてすそ野を広げ、人材教育を進める必要がある。



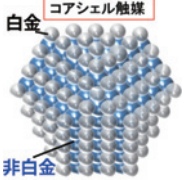
オペランド

オペランド計測の定義と研究の広がり

- 実際の使用環境下で半導体や電池、触媒反応などの物質・材料測定や、生きた状態の細胞・生体組織の測定をおこなうこと。刻々と動作・変化し続ける現象を直接観測することによって、測定対象と機能との相関を見出すことを目的とする。
- “Operando”という言葉はラテン語で“working”, “operating”の意味を持ち、触媒研究で2002年ころより使われ始めた。
- 特に、放射光施設を用いてのオペランド計測が産業界や研究ニーズの高まりから急展開しつつある。今後はオペランド計測は、液中走査プローブ電子顕微鏡、ガス環境電子顕微鏡、実環境ラマン測定、共焦点顕微鏡測定など、放射光測定以外の手法にも広がってきている。



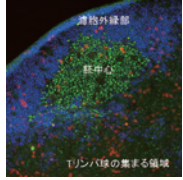
蓄電池充放電過程



触媒反応状態測定



材料界面トライボロジー



細胞動態測定

Copyright © 2018 CRDS All Rights Reserved. 写真) <http://www.riken.jp/pr/press/2011/20110603/>

図1.2.4-4 オペランド計測まとめ

④物質と機能の設計・制御 ～材料科学の未来戦略～

物質もしくは機能を設計・制御する概念や技術は、ナノテクノロジー・材料分野全体の根幹をなすものであり、所望の機能を実現させるための構造を設計・制御することでサイエンスの新局面を切り拓き、わが国の将来社会を支え、産業に貢献しうる技術領域として重要である。今回の俯瞰調査においては、「材料科学」に焦点をあて、ワークショップを開催した。将来の材料科学の発展を担う若手研究者を中心に、合宿形式で議論を深めた。また、ワークショップの進め方として、4つの分科会形式による集中討論、参加者全員による総合討論を実施した。その結果、以下のような研究開発の方向性が得られた。

●今後の研究開発の方向性

- 次世代 AI/IoT 社会においては、多様な材料・機能の高度集積が不可欠であり、CO₂削減や高効率の資源循環が極めて重要になる。それに対応できるよう、多種材料・界面・電子状態に対応した結合力を理解・制御するための学問体系を構築する
- 現状ではナノ・メソ・マクロの各階層での学問体系、技術体系は構築されているものの、それらの間が繋がっていないためにナノ構造の機能がマクロな材料・デバイスに活かされていない。この課題を克服するために「スケーラブル高機能材料開発のための「乱れ」の科学と制御技術」および「物質表面・界面近傍で発現する新たな弱い相互作用や複雑な構造、多種多様な状態の自在制御技術」を構築する

－近年顕在化してきたマイクロプラスチック問題などの環境汚染問題の防止や海洋生物保護の観点から原料、合成、加工、使用、廃棄、リサイクルといった材料のライフサイクル全てを設計・制御する「材料の運命制御技術」を構築する

上記の結果を踏まえて、持続可能社会実現に向けて現在直面している「水」「食料」「貧困」「環境」「エネルギー」「医療」などの地球規模の課題に対して解決策を与える新たなサイエンスとして、「ナノレベルの特性（素機能）をマクロ物性に出させる材料科学」および「秩序性の乱れと時間発展を活用した材料科学」を構築することが必要であるとの共通認識を得るに至った。

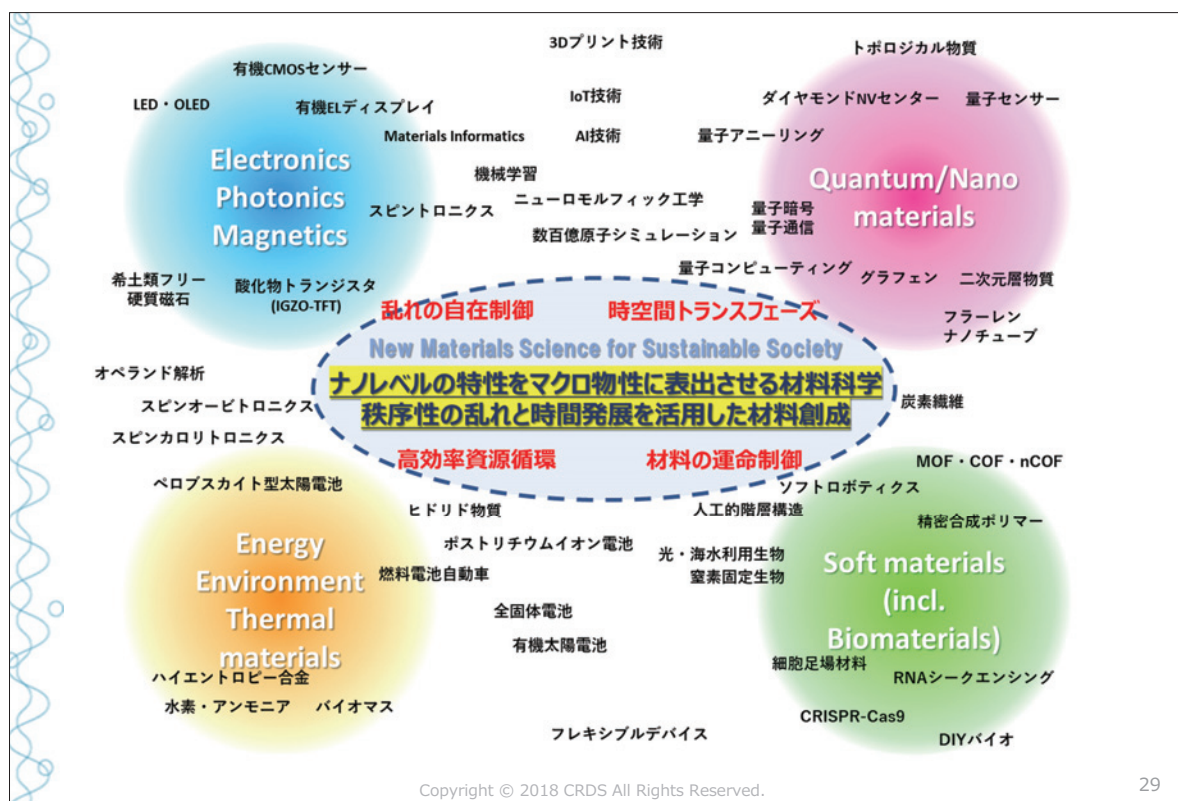


図1.2.4-5 物質と機能の設計・制御(材料)の俯瞰WS結果

⑤世界を先導する材料・デバイス研究の方向性

第5期の科学技術基本計画における Society 5.0 の推進、世界的に注目されている持続可能な開発目標（SDGs）、少子高齢化やエネルギー問題などの日本の社会的課題の克服に向けた科学技術の進展が期待されている。しかしながら、日本では研究開発予算の飽和と相対的な研究開発力の低下が続き、網羅的な資金配分が困難になってきている。このワークショップでは、このような状況の中で、材料・デバイス研究をどのように進めていくべきか議論するため、CRDS で検討中の方向性を示すとともに、「材料・デバイス研究に対する産業界からの期待」、「日本としての重要な視点と強化する技術領域」、「今後強化が必要な基盤技術と強化方法」に関する話題提供を行い、これらを踏まえて材料・デバイス研究の方向性に関する総合討論を行った。その結果、以下のような方向性が示された。

●今後の方向性

（１）今後の材料・デバイス研究の重点化の視点

- ・世界の中で日本が目指す姿（世界の中で日本がプレゼンスを発揮し、個人が個性を発揮して活躍できる社会の実現）の明確化
 - －日本の文化、価値観と並ぶ、日本の科学技術力のブランド化
 - －個人の能力の拡張、および個人へのカスタマイズ可能なインフラ実現
- ・SDGs、社会的課題の克服、Society 5.0 の推進、産業競争力強化への貢献
- ・様々な価値観を持つ人のコンセンサスを得るためのロードマップ作成

（２）強化する材料・デバイス基盤技術

- ・日本のプレゼンス向上技術：イノベーションに繋げる技術統合・システム化（ロボット、医療技術など）
- ・装置・システムの小型・省エネ・高信頼化を実現するコア技術：センサ、機能材料など
- ・ものづくりの基盤技術：高効率加工・プロセス技術、高精度計測・評価技術、信頼性・安全性評価技術など
- ・強化の方向性：材料・デバイスの信頼性・安全性の確保に向けたメカニズム解明とサイエンスの強化、ハードとソフト（サービス）の組み合わせ追求、革新的・破壊的技術への挑戦

（３）材料・デバイスコア技術の強化方策

- ・プロセス基盤の産学官連携拠点整備と世界的エコシステム構築
- ・データ連携基盤の構築（安全性などのデータの蓄積による競争力強化、データの組み合わせによる新たな価値の創造）
- ・企業やベンチャーキャピタルからの投資による有望技術の研究開発加速
- ・社会実装に向けた基礎研究・応用研究・開発・試験研究の適切な成果指標の構築
- ・長期的視点の継続的なプロジェクト推進と、次世代リーダーへのバトンタッチ

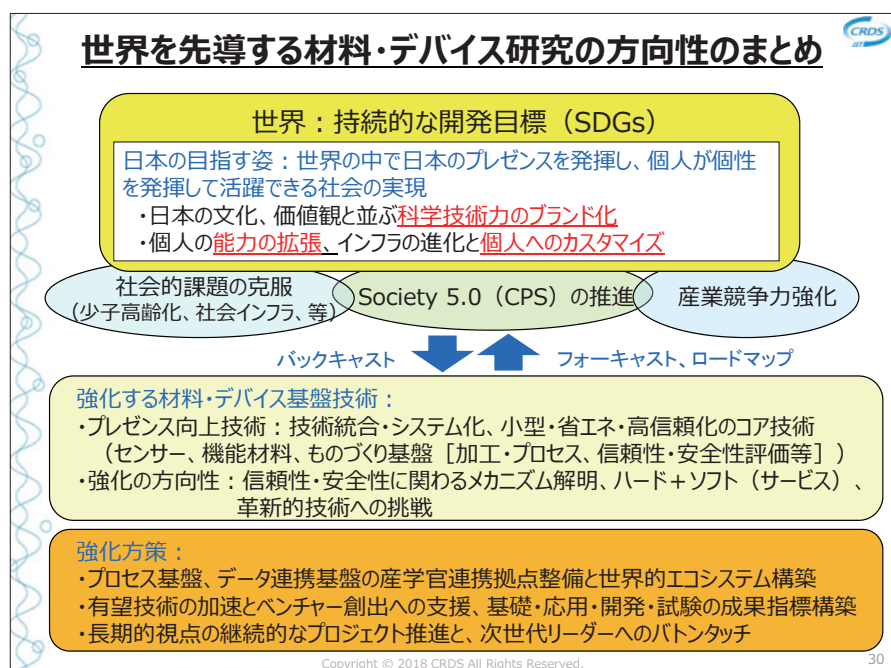


図1.2.4-6 世界を先導する材料・デバイス研究の方向性のまとめ

1.2.5 社会との関係における問題

■責任あるナノテクノロジー研究開発の在り方

ナノテクノロジー・材料科学技術への期待の一つに、ナノ材料が従来の化学物質やバルク材料とは異なる新奇で優れた特性を有していることがある。このことは同時に、ナノ材料が健康や環境に対して未知の影響をもたらす可能性があることも意味している。ナノ材料の有用面だけでなく、リスクが適切に評価・管理されることが重要となる。人類が公害問題で経験した化学物質や、農産物における遺伝子組み換え技術のように、適切な利用に限れば有用な技術であっても、不確実性・リスクへの懸念や不安から、社会が判断を下すことが難しくなる、または拒絶する可能性がある。社会への周知やコンセンサス形成が十分でないままに、効用・効率のみを追い求めて大規模にナノ材料を環境へ暴露してしまう懸念もあるだろう。例えば近年、マイクロプラスチック（およびナノプラスチック）による海洋汚染の影響がクローズアップされているが、原料から製造・使用・廃棄・リサイクルまでの循環を考慮し、科学的評価を踏まえ、持続可能な使用を実現することが求められている。そのためには、科学者、技術者、事業者、消費者・市民、行政が、ナノ材料の未知の側面に関心を寄せるとともに、適切な役割分担で取り組み、ルール形成や意思決定に反映していくことが肝要となる。最近、欧州各国を中心に、ナノ材料の登録規制や評価基準の規定が進んできた。このことは、事業者がナノ材料を活用したサービスをおこなうに際し、事業推進の可否に決定的な影響を及ぼすことになる。ナノ材料の定義、分類、測定方法、評価方法、評価結果の解釈は国際協調で進むが、関連データの共有は十分に進んでおらず、また、対象範囲やバラつきも多いことから、あらゆるナノ材料種に完全に対応するような取り組みは現実的でなく、不可能と考えられている。一方、現時点において「ナノであるがゆえに特有」の負の健康影響や環境影響は、科学的には確定していない。近年はどちらかといえば「ナノであるがゆえに特有」の生体作用機序は存在しないのではないかという認識が科学者の間で徐々に増えており、従来型の化学物質のガイドライン類が、基本的にはナノ材料の評価にも適当であるとする考え方が広がってきている。このことを踏まえ、世界的にナノ材料を含む化学物質の規制当局は、ナノ材料の登録制度を開始するなどしながら、それぞれの規制枠組みの中で実際にどのようにナノ材料のリスク評価を行うのかという観点で議論するようになってきた。

このような状況において、当該領域の意義は、近年二つに大別できるようになってきた。一つは、個々のナノ材料についてのリスクを明らかにするものである。これらは、ナノ材料一般の代表というよりも、個々のナノ材料としての関心の高さによるものであり、従来の化学物質におけるリスク評価研究と同様のスタンスといってよい。もう一つは、ナノ材料に特有の状況に由来するものである。すなわち、ナノ材料は同一の化学組成であってもサイズや形状の違いが多岐にわたるため、効率的な評価を行うための手法が必要となる。これはすなわち、規制枠組みを支える試験方法の整備に関係する。従来の化学物質の評価においても、カテゴリー化・グルーピング（類似の物質を括って評価する）、リードアクロス（評価対象物質の特性を、類似物質の既評価物質の特性から類推する）、QSAR（Quantitative Structure Activity Relationship/ 定量的構造活性相関：物質の構造や基本的な物理化学特性値から有害性等を推定する）がおこなわれてきた。ナノ材料において、評価の効率化が求められていることは、単なる試験コスト削減に留まらず、最近強まっている動物試験削減の動きや、ナノ材料の活用によるイノベーションへの期待を背景にしている。

ナノ材料を用いた消費者製品が増加するにつれて、製品の輸送、保管、販売、使用、さらには使用済み製品の廃棄やリサイクルなど、ナノマテリアルの全ライフサイクルを対象にしたヒトや環境への影響を明らかにする研究が関心を集めるようになってきている。安全性について特に関心を集める代表的なナノ材料は、カーボンナノチューブである。繊維状で高アスペクト比という形状が、アスベストに似ているのではないかとされるが、両者の使用環境におけるサイズには相違があり、生体影響に関する相違は科学的に十分に明らかになっていない。そのため各国の関心も高く、例えばドイツでは両者を比較する研究成果だけを集めたシンポジウムが開催されるなどしている。また、ナノスケールの銀、酸化チタン、酸化亜鉛についても、高い殺菌効果や紫外線からの保護性能等に着目した製品、たとえば日焼け止め、抗菌防臭剤、食品添加物などへの応用が増える一方で、有害性やリスクを評価するためのデータはいまだ十分ではなく、さらなる研究が必要であると指摘されている。ナノスケールの銀、酸化チタン、酸化亜鉛は、すでに市場に流通する製品も多く、消費者からの関心は高い。各国政府や環境保護団体などから消費者に向けたファクトレポートや、材料の安全性や製品の安全な使用方法についての説明を含む FAQ などが公開されている。

これまで欧州を中心に行われてきた様々な安全性評価関連のプロジェクトにおいて、多くの知見が積み上げられてきた。しかし上述したように、すでに当初から提言されてきた物理化学的性状に応じたグルーピングやカテゴリー評価が有用であるという一般的概念に対して、技術的に新しい進展があったわけではなく、酸化金属などの特定のナノ材料に対する知見が蓄えられたに過ぎない状況であるにもかかわらず、欧州ではフレームワークを作り、ガイドラインも整備して、REACH 登録制度などの様々な規制・登録制度に取り込んでいこうとしている。このことは結局、様々なナノ材料・関連製品の安全性に関わる情報は、個々の企業が実際に試験を行うことで作成し、それを欧州当局が吸い上げるという構図になっていくことを示し、そのようなスキーム・制度を持たない国では、官民ともにナノ材料に関する安全性情報が手に入らなくなる。さらに、欧州では動物実験が実施しにくい流れになっているが、安全性を基本的に評価する OECD 試験法の多くは *in vivo* 試験であり、現に欧米主導で *in vivo* 吸入試験の改定が行われた。このことは、依然として現時点では欧米当局でも安全性評価のためには動物試験を必要としていることを示しており、将来的に欧米の規制当局で開発されると予想される物理化学性状に応じたグルーピングやカテゴリー評価手法開発のための基本的な *in vivo* 試験情報は、企業から申請された企業秘密データとして公開されることはなく、対応するスキーム・制度を持たない日本を含む国々では、ナノ材料の安全性情報の収集にとり残される懸念がある。少なくとも、事業者の独自の蓄積・取り組みには限界があり、公的に、第三者が利用可能なかたちで適切に安全性情報をデータベース化し、そのデータを活用することで、新たな学術的な研究や、新規材料への評価対応、輸出入されるナノ材料の安全性をチェックし適切に規制・認可の判断をすることなどが求められる。

日本では、個々のナノ材料について、たとえば多層 CNT の MWNT-7 をがん原性指針に追加するなどの対応は行われているが、ナノ材料に対する全体的な規制制度が存在していないこともあり、効率的な評価枠組み検討の方向性が明確になっていないことが問題である。ナノ材料製造・応用開発と同時に安全性研究を行い、安全性研究の結果をフィードバックすることで、より有害性が低く、より暴露可能性が低い製品の開発に貢献することができる。また、作業現場の適切な安全管理を支援することができる。

一方、欧米各国の規制当局は、それぞれの国や地域の化学物質管理枠組みやナノ材料の産業化の状況を前提に、届け出の際に要求するデータ項目を決定するとともに、カテゴリー化等の考え方を構築しつつある。日本の関連産業や社会が諸外国の規制に遅れることによる不利益を被らないためには、単に諸外国の規制制度の状況を踏まえるだけでなく、また、単に学術的な関心からの試験・研究だけではなく、自国の置かれた状況に即したリスク評価技術の研究開発を産学官連携の体制により進めることが必要と考えられる。研究開発の段階から安全性研究を行うことで、安全性に懸念のある粗悪品を扱う事業者を線引きしながら、国際競争に臨むことが重要であろう。特に日本で開発が先行する材料について、グローバル市場に出る際には、各国・地域の規制を前にしても科学的な安全性評価データをしっかり蓄積し、公表・発信していくことが重要である。ナノ材料に限らず今後も創出され続ける新規材料のリスク評価全体を、公的研究機関が、産学と連携して定常的に担っていく必要がある。欧米にみられるような、関連する公的研究機関の研究者が「組織の壁を越えて連携する（バーチャルな）組織」の構築が課題である。特に、高度なリスク評価技術を身に着けた技術者が、プロジェクト期間の終了とともに現場を離れざるを得ない状況は好ましくない。このような体制づくりは、各研究者の効率的な役割分担・負担の均等化につながるものであり、また、それぞれ得意とする評価試験を適材適所で行うことで、負担の大きい評価プロセスの投資効率を最大化することが可能になる。

日本では、毒性学を含めた安全性研究やリスク評価の体制は欧米に比較して脆弱であり、特に材料開発研究との協力体制が弱い。日本の毒性学の専門家人材は、近年、減少の一途を辿っている。各国が戦略的に位置付けるナノテクの競争優位性は、安全性研究の学術的基盤の整備と一体で行われないうち、なし得ないだろう。日本における安全性評価研究は、個別研究課題としてごく部分的に存在しているのみの状況であり、戦略的な体制からは遠い。諸外国との継続的な積み重ねの差が、国際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、次第に影響を及ぼすようになる。さらに、今後は製品の廃棄時やリサイクル時における評価と対策手法も重要になってくる。このような背景があり、産業界、特にベンチャー・スタートアップとして新規ナノ材料の事業化をおこなおうとする際などに、第三者的な評価をおこなうにも多額のコストと長期間を要する。このことが起業家のアントレプレナーシップにネガティブな影響を与え、体力的にも事業化を躊躇させる要因となってしまうため、今後これを如何に払拭するかが課題である。大企業であっても、特に日本では経営層レベルで科学技術面の ELSI に関する知識・認識不足があり、時間を要する投資が難しく、研究開発がとん挫してしまうことがある。

ナノテクの研究者を志す人に向けた優れたカリキュラムを提供する大学・大学院は日本に多いが、その一方で、「責任ある研究・イノベーション (RRI)」の文脈に触れる機会は極めて少ない。現在、大阪大学のナノサイエンスデザイン教育研究センターが、ナノテクの社会受容に関わる課題をテーマとし、ナノテク・ナノ材料研究開発に携わる研究者・学生が様々な課題の最新の動向に触れる機会を提供する講座を継続して開講している。2018 年の時点では、ナノテクの社会的な課題について包括的に学ぶことができるカリキュラムを提供している大学は、大阪大学だけである。ナノ材料を作製する事業者が、官と連携してリスク評価を行い、社会に伝える機能と、社会と共に歩む研究開発文化の醸成が課題である。

■ ライフ・ヘルスケア分野における基礎から産業への橋渡し

我が国は大学等における基礎研究のレベルが高いにもかかわらず、基礎研究の成果がライフ・ヘルスケア分野の応用・実用に結びつきにくく、産業化まで至らないという課題を抱えている。特に、医療機器の分野における我が国の産業化の弱さの要因として、下記が挙げられる。

- ・ 医療機器は少量多品種生産が多く、一部の例を除き市場規模が小さく事業性が低い。
- ・ 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。
- ・ ベンチャー企業への投資による製品開発と、その後の大企業による買収・事業化という欧米で一般的な展開が、日本では活発ではない。
- ・ 欧米に比べ、許認可取得にコスト・期間を要する。
- ・ 評価・試作のための環境や、橋渡し促進に必要な支援体制の整備が十分でない。

法制度に関してはある程度改善が進み、薬事法の改正（薬機法）、低リスク生体材料の第三者機関による審査、再生医療等製品の条件及び期限付き承認制度（早期承認制度）、混合診療に伴う規制緩和などの取組が開始されている。しかし、他の課題解決に向けた施策は十分とは言い難い。近年、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や、大学発ベンチャーを支援する制度が実施されているが、よほど市場性の高いシーズ技術でない限り事業化には至らない。まずは医療機器の低事業性を改善することが、国産医療機器の事業化促進には肝要である。国内市場に限らず国際展開を推し進め、海外市場への参入障壁を下げることで、市場を拡大する必要がある。また、事業化コストを下げるため、承認申請用試験データの合理化及び取得支援、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。さらに、医療機器の開発には最適化のための試作が必要であり、ナノテクノロジープラットフォームがその役割を果たしてきた面があるが、製品化に向けて生産の規模を拡大するには、ある程度の量産が可能な共用施設の整備が必要である。

なお、事業化・製品化の以前に、基礎研究と応用研究・開発をつなぐための支援体制の整備も重要である。2015年に発足したAMEDにおいて、アカデミアの研究成果を医療技術として実用化することを目的とした支援事業が実施されているが、AMED事業では実用化への筋道が明確な応用主体の研究開発に重きが置かれ、基礎研究を実用化研究へ発展させるための支援は限定的である。このギャップを埋めるため、実用化に必要なノウハウの提供、製品として求められるスペック・開発項目の洗い出しや知財取得の支援、認可取得に必要な評価プロセスや評価項目検討の支援、動物モデルを用いた前臨床試験の支援など、基礎研究シーズを効果的に実用化研究へつなぐための包括的な支援が必要であり、そのための環境整備、人材確保・育成、研究開発費の拡充が求められる。

■ 大学等研究、および産学共同研究における知財戦略

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

日本の大学からは、近年、年間10,000件を超える特許出願がなされ、ナノテクノロジー・

材料分野はそのおよそ 1/4 を占めている。これらの特許権の実施等で日本の大学全体が受ける収入は、2016 年度で 26 億円弱となっている。一方で米国の大学全体が受ける特許収入は年間 25 億 US ドル近くに達しており、桁違いの差がある。米国ではバイドール法の制定以降、産学連携の推進、大学による特許取得、企業へのライセンスが急伸している。これが米国大学による巨額の特許実施収入に結びついている。一方、日本でも米国に遅れること 20 年の 1999 年に日本版バイドール法が制定され、国の方針として大学自らが特許のライセンス収入を稼ぐように方向付けられた。しかしながら、日本においてはそれ以降、産学連携が活発化するという兆候は見られず、大学所有特許の企業へのライセンス供与は低調のままで、実施料収入の日米差は依然として大きく開いている。

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

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

1.3 今後の展開・方向性

1.3.1 今後重要となる研究の展望・方向性

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について区分ごとにまとめて記述する。

■環境・エネルギー分野におけるナノテクノロジー・材料技術の今後の方向性

CO₂を排出しないエネルギー源としては原子力もエネルギー基本計画においてその役割が位置づけられるが、2011年の福島第一原子力発電所事故以降、安全性やコストの観点でコンセンサス形成が難航している。安全性を科学的に担保していくためには、システムとしての安全性確保に加え、放射線環境下や高腐食環境下における材料の劣化などのメカニズムを明らかにして精度の高い劣化予測技術を開発したり、このような極限環境下での耐性の高い材料を開発したりすることが今後一層重要であろう。

太陽光や風力などの再生可能エネルギーの導入が世界的に活発になってきている。太陽光発電に対しては、実用化されているシリコンや化合物半導体のさらなる高効率化と低価格化とともに、中長期的には有機薄膜太陽電池やペロブスカイト太陽電池などの革新的太陽電池の実用化が期待される。風力発電に対しては、プロペラの大型化に対応できる高強度・軽量の複合材料の開発が必要となろう。また、時間変動の大きな太陽光や風力の利用においては、電力を一時的に蓄えて平準化する大型の蓄電池・蓄電システムの開発が重要になり、主流になっているリチウムイオン電池だけでなく、大型のシステムに最適な電池の開発も必要であろう。太陽光の利用としては直接的に電気に変換するだけでなく、特殊な触媒を用いて貯蔵しやすい水素や炭化水素などの化学エネルギーに変換する技術の実現も期待される。再生可能エネルギーが普及するまで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が、高効率火力発電においては、燃焼温度の高温化を目指して、高温耐熱材料やコーティング材料の開発が重要である。

一方、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、さらには廃熱を電気エネルギーに回生する熱電素子などの開発が必要となってくる。特に、世界のエネルギー消費に占める電気エネルギーの比率は現在25%であり年々増加傾向にあることから、電力の変換・制御に必要なパワー半導体の高効率化に関する期待は大きく、高耐圧化、低オン抵抗特性を可能とするワイドギャップ半導体パワーデバイスの進展が重要になる。

環境を守るという視点では、広く世界を見ると、飲料に用いることのできる水は限られており、海水や廃水からの淡水生成、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有害物質を含んだ随伴水の浄化といった分離に関する技術開発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。また、鉱物資源の少ない日本においては、回収されたエレクトロニクス機器からレアメタルなどの希少元素を効率的に分離する技術の開発も重要になってくる。

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、ナノテクノロジー・材料分野だけで解決することはできず、異なる学術分野や技術分野との連携や、制度

的な改革も必要になってくる。一方で、日本は環境・エネルギー分野に関わる材料技術・プロセス技術で国際的な競争力を有しており、新たな材料やデバイスの開発により、優れた特性や性能を実際に示していくなかで、その他の学術分野や産業界、他国を巻き込んで行くことが可能になると考えられる。その意味で、日本としては環境・エネルギー分野のナノテクノロジー・材料技術による産業競争力強化が一層重要になっている。

■ライフ・ヘルスケア分野におけるナノテクノロジー・材料技術の今後の方向性

ヒトゲノムの解読、iPS 細胞の創出、ゲノム編集技術の登場に見られるように、近年のライフサイエンスの進展は著しく、ナノテクノロジー・材料技術との融合によって生まれるイノベーションへの期待は大きい。特に、世界に先駆けて超高齢社会に突入した我が国においては、ライフ・ヘルスケア分野におけるニーズの高度化・多様化が進み、新しい健康・医療技術の実現に対する期待が高まっている。

個々人の QOL (Quality of Life) 向上という願いと、高齢者人口の増加に伴って急増が予想される医療費を適正化する必要性とに鑑みると、本格的な医療が必要になる前に病気の兆候を検知し、早期に予防的な措置を施すことが重要である。日常的な健康モニタリングの観点では、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、身体異常の早期発見・早期診断のためには、尿や血液などの体液に含まれる生体由来物質を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。いずれの場合も重要なのは、特定の疾患につながるバイオマーカーの高感度検出である。また、IoT 技術を活用したウェアラブルデバイスの実用化に期待が集まっているが、現状では物理情報の計測に留まり、今後は健康・疾病の状態に直結するバイオ／化学情報を計測する技術の開発が期待される。さらには、センシングの対象をウィルスなど病原体にまで拡張して、環境中の病原体を常時監視するシステムを構築することにより、感染症の流行を未然に防ぐ技術の実現も期待される。

新しい薬剤や、人体への侵襲度の高い治療に用いられる新規材料の開発においては、動物モデルを用いた前臨床試験によって有効性・安全性が確認されなければならない。しかしながら、動物実験ではヒトでの応答を正しく予測できない場合のあることや、動物実験廃止に向かう欧州を中心とした動きから、ヒト体内における動態を *in vitro* (生体外) で正確に再現可能なモデルが求められている。近年、ES 細胞や iPS 細胞などの幹細胞技術の進展によって、幹細胞から組織・臓器を構築する研究が進み、創薬のための *in vitro* モデルや再生医療への利用に期待が高まっている。幹細胞を分化誘導し、望みの組織・臓器の機能を再現するには、足場となるバイオ材料が重要であり、目的の細胞への分化誘導に必要な生化学的性質・力学的性質・微細構造をもつ材料や、3次元組織体を構築するための材料について知見が積み重ねられている。また、マイクロ・ナノ加工技術やマイクロ・ナノ流体デバイス技術と、細胞制御技術、組織工学などの融合によって、チップ上にヒト組織・臓器の機能を再現する Organ-on-a-chip の研究が盛んになっている。これらの技術の統合によって、複数の組織・臓器間における相互作用や、各組織・臓器の機能をより正確に再現することが可能になり、将来的には動物実験に替わる *in vitro* 評価系を確立することで、新しい健康・医療技術の実現に結び付くと期待される。

精密に設計されたナノ粒子やナノ構造体をキャリアに用いて、薬物や診断用プローブを患部等へ選択的に送達するナノ薬物送達システム (ナノ DDS) の研究も進展している。近年、遺伝子編集技術をはじめ医療に革新をもたらす可能性を秘めた多様な要素技術・材料が登場して

おり、これらの新技術・材料の医療応用には、体内／細胞内動態を制御するナノ DDS の開発が必要となっている。また、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、診断と治療を一体化・複合化した新たな医療技術であるナノセラノスティクスとして、研究開発が進められている。光、超音波、中性子線等の物理エネルギーと組み合わせた、ピンポイントかつ非侵襲な医療技術についても研究開発が進むと期待されている。

上述してきた新しい健康・医療技術の実現には、いずれも生体と材料の間で生じる多様かつ複雑な現象を制御するバイオ材料が必要である。また、既存の医療技術においても、患者の QOL 向上の観点から新しい材料が必要とされている。生体現象を制御する機能と高い生体適合性を併せもつバイオ材料の創出に向けて、研究開発の戦略的な推進が求められている。

■ ICT・エレクトロニクス分野におけるナノテクノロジー・材料技術の今後の方向性

ポストムーア（ポストスケーリング）時代の到来で、新しい技術創出への期待が高まっている。その中心となるのが、今後の情報社会の中核となる IoT（Internet of Things）関連の技術であり、最近では人工知能（AI）・ディープラーニング（DL）や量子コンピュータ技術、ロボット基盤技術、センシング技術などの進展が著しい。IoT 時代には、大量のデータを瞬時にかつ最小エネルギーで処理することが求められる。これを実現するのがナノエレクトロニクス技術であり、デバイスの超低消費電力化のみならず、情報を蓄積するスピントロニクス、伝送するフォトリソグラフィ、発光・表示デバイス（ディスプレイ）、さらには MEMS 技術に基づく各種センシングデバイスなどが必要となる。これらの技術の進展が、第 5 期の科学技術基本計画における Society 5.0 の推進、世界的に注目されている持続可能な開発目標（SDGs）の達成、環境エネルギー問題、健康安全社会の実現、少子高齢化問題の解決など、グローバルな社会的課題を解決する一助として活用され続けることが期待される。

IoT 時代のスマート社会を実現するうえで、ナノエレクトロニクスの果たす役割は大きく、素子の微細化極限の追及（ナノの先鋭化）から、新材料導入による電子素子と光・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 IoT デバイス応用（ナノのシステム化）へと進化していくと予想される。

今後のナノエレクトロニクス技術の進展には、2 つの観点が重要になる。一つは、エレクトロニクスデバイスが従来の 2 次元構造から 3 次元構造に発展していくことであり、もう一つは、従来デバイスの構成材料として、シリコンや銅配線材料など、バルク（3 次元）材料を使っていたものが、グラフェンなどに代表される 2 次元材料の導入が始まることである。つまり、デバイスは 2 次元から 3 次元に、材料は 3 次元から 2 次元に移行していくことになる。

デバイスの 3 次元化は、LSI に搭載される回路規模が増大を続け、その情報処理能力が向上するに従い生じてくるデータの入出力ボトルネックの解消技術として位置づけられる。そこでは、より高いチップ間のデータ転送帯域を実現する技術としてチップの 3 次元集積化が注目されているが、コストの高さや歩留まりの問題で TSV（貫通シリコンビア）の実用化が遅れている中、磁界結合によるチップ間通信の技術開発に期待が集まる。従来技術に比べて通信電力を 1/1000 にできることも示され、この技術をシステム LSI とメモリ間のチップ通信に用いることで、いわゆるフォン・ノイマン・ボトルネックの解消が可能になり、コンピュータの電力を大幅に低減し高性能にできると期待される。

一方、超高性能な電子デバイスを実現するためには、従来のバルク材料に比べて、より高速

な電子状態やスピン自由度が得られる 2 次元原子薄膜材料が、今後の新規電子デバイスの実現に不可欠なものとして世界中で研究が活発に行われている。

■ナノテクノロジー・材料における設計・制御技術の方向性

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

近年の情報通信技術の進展によりナノテクノロジー・材料技術に関する研究開発の方法が大きく変わりつつある。その背景には、デバイスの性能、信頼性追及の中で、それを支える材料はより一層、複合化、多元素化の方向に進むと同時に、必要な機能を自然界に豊富に存在する元素の組合せで実現することが求められている。対象となる物質の組合せは膨大であり、従来の実験的あるいは理論的手法による材料探索、材料開発は困難になりつつある。一方で、ここ数年の間にコンピュータの飛躍的な能力と情報技術の進展により、ビッグデータと呼ぶにふさわしい大規模な材料データの中から、材料の性能、機能に関する系統的な法則を発見し、材料の開発を短時間で効率的に行うアプローチが世界中で精力的に行われるようになってきている。これを推し進めるためには、膨大な材料データを整理、検索し、新たな知識を発見する最先端の情報技術、さらにはそれらを新材料の開発につなげる研究者集団、それぞれの存在が必要である。マテリアルズ・インフォマティクスと呼ばれるこのような取り組みは、日本の産業競争力の源泉である材料開発力の維持・強化のために必須であるとの考えから、2015 年に物質・材料研究機構（NIMS）内に情報統合型物質・材料研究拠点が設立されたことをきっかけに経産省や JST において関連するプロジェクトが多数発足している。

1.3.2 日本の研究開発力の現状

上述した内容および 2 章の各研究開発領域から見てくるわが国の研究開発力の現状としては、長年の技術蓄積から生まれる強みとして、元素戦略、分子技術、空間空隙構造制御、エネルギー材料、電子材料、複合材料などの物質創製・材料設計技術が挙げられる。また、それらを支える計測・分析・評価・加工技術に関してもわが国が強みを有する技術と言える。さらに、IoT 時代においては膨大なデータを効率的・効果的に処理することが求められるが、そのために必要なセンサ／アナログ機能やコンピューティング機能のヘテロ集積モジュール化技術に対してわが国は高いポテンシャルを有する。一方、データ科学、標準化・規制戦略、医工連携、産学連携、ナノ物質・新物質の ELSI/EHS/RRI などのソフト面の整備に課題がある。

以下では、第2章における全32研究開発領域の国際比較まとめ（図1.3.2-1）に基づいて、各区分単位で日本の研究開発力の現状、諸外国に対する位置づけについて記述する。

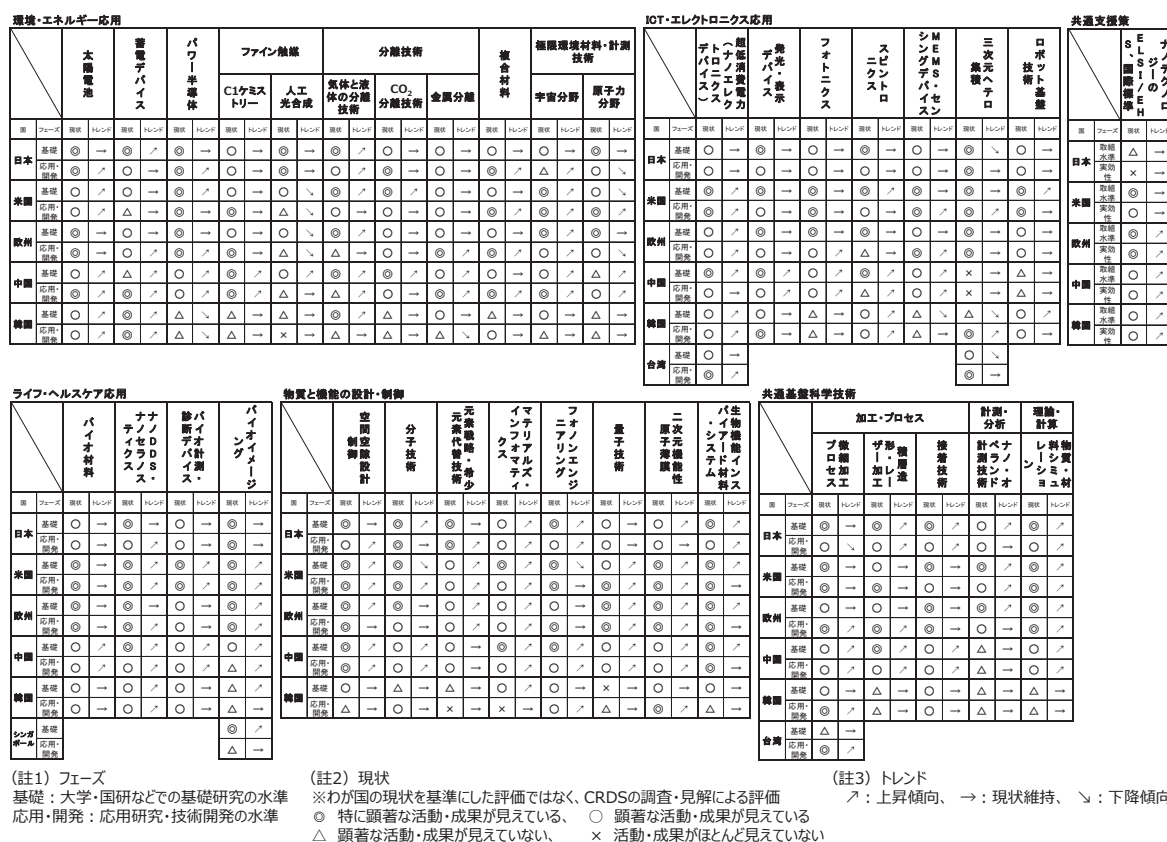


図1.3.2-1 国際比較表まとめ(第2章、32領域)

■環境・エネルギー分野に関わるナノテクノロジー・材料

この分野の研究開発領域（太陽電池、蓄電デバイス、パワー半導体、ファイン触媒（C1 化学、人工光合成）、分離技術、複合材料、極限環境材料・計測技術）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 排出量削減などと密接に関わり、世界的にも関心が高く、活発に研究開発が実施されている。特に太陽電池や蓄電デバイス、分離技術は世界的に研究が強化される傾向にある。

国別に見ると、日本は全般的に基礎研究フェーズに強みを有し、特に太陽電池、蓄電デバイス、パワー半導体、人工光合成に関しては国家プロジェクトも充実し、上昇傾向にある。一方、複合材料は CFRP を始め応用研究・開発フェーズに強みがあるが、新材料の基礎研究フェーズを強化する必要がある。また、極限環境材料・計測技術に関しては、基礎研究のレベルは高いものの、基盤設備の消滅やファンディングの減少という厳しい状況によって下降傾向にあり、研究開発力の維持が課題である。

米国はパワー半導体に強みがあり、基礎研究フェーズから応用研究・開発フェーズまで上昇傾向にある。また、極限環境材料・計測技術に関しては、軍需などを背景に、特に応用研究・開発フェーズが上昇傾向にある。一方、蓄電デバイスとファイン触媒は停滞気味である。

欧州は太陽電池、パワー半導体、極限環境材料・計測技術に強みがある。蓄電デバイスに関しては、現状は特段の強みを有しているとは言えないが、自動車の電動化を背景に、基礎研究

から応用研究・開発まで強化が進められている。

中国は全体的に上昇傾向にあり、特にシリコン系太陽電池の最高効率の実証など、世界をリードする成果も生まれている。ファイン触媒のうち、C1 化学分野は基礎研究フェーズ、応用研究・開発フェーズとも活況であるが、人工光合成はそれほど強化が進んでいない。複合材料や極限環境材料・計測技術はキャッチアップの段階を通過し、今後、航空宇宙を含め、基礎研究フェーズ、応用研究・開発フェーズとも強化される可能性を秘めている。

韓国は太陽電池、蓄電池が基礎研究フェーズから応用研究・開発フェーズにかけて上昇傾向にあるが、その他の領域では基礎研究フェーズ、応用研究・開発フェーズともに劣勢になっている。

■ライフ・ヘルスケア分野に関わるナノテクノロジー・材料

バイオ材料、ナノ DDS・ナノセラノステイクス、バイオ計測・診断デバイス、バオイメーシングなど、いずれの領域においても日本は基礎研究では高いレベルにあるが、基礎研究の強みが産業化フェーズの競争力につながっていない。医工連携・異分野融合が不十分であることや、安全性評価・承認取得の難しさ、リスクを嫌う大企業の参入不足、ベンチャー企業を支える環境の不足などが共通の要因として挙げられる。基礎研究と応用研究・開発をつなぐための支援体制構築が課題である。

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・開発フェーズにおいて、ベンチャー企業を中心に多様なプレイヤーがおり層が厚い。NIH、FDA による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、かつては欧米、日本のキャッチアップ研究が目立ったが、現在は世界トップレベルの研究が多く見られるようになっている。ナノ DDS では主要雑誌において論文数、被引用回数ともに米国とトップを争うレベルに到達している。自国内に大きな市場をもつことや、臨床研究の障壁の低さを背景に産業化も加速している。

韓国はインフラ整備や人材獲得に積極的に取り組んでおり、再生医療材料、ナノ DDS、バイオデバイスで競争力を増している。

なお、バオイメーシングに関しては、シンガポールの存在感が大きい。世界中から優秀な研究者を集め、世界最高レベルの基礎研究を推進している。

■情報通信・エレクトロニクス分野に関わるナノテクノロジー・材料

この分野の日本の技術トレンドは、超低消費電力ナノエレクトロニクス、発光・表示デバイス、フォトリソ、スピントロニクス、MEMS・センシングデバイス、三次元ヘテロ集積、ロボット基盤技術の全てにおいて現状維持が多い。超低消費電力ナノエレクトロニクスに関しては、ロジック関連技術では GPU、FPGA などによる高速化、低消費電力化、さらには AI チップの開発競争が激化しており、メモリ関係では不揮発性メモリを中心に世界的に研究開発活動が活発化している。これは今後の人工知能や IoT 時代に使われる基盤デバイスとして、AI チップなどのロジック関係のデバイスの重要性が増大すると共に、その高速化にはストレージクラスメモリ（SCM）などの「高速・大容量の不揮発性メモリデバイス」の支援が必須との認識

から来ている。新しい兆候としては、発光・表示デバイスへの応用が考えられるフレキシブルデバイス技術や、自動運転への適用も考えられるロボット基盤技術などがあげられる。

国別に見ると、日本は伝統的にスピントロニクスや発光・表示デバイスが強いが、フォトニクス、MEMS、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。米国は、不揮発性メモリ、発光・表示デバイス、フォトニクス、MEMS系、三次元ヘテロ集積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、ファブレス企業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、各分野の基礎研究には強みを発揮しているが、応用研究・開発のフェーズでは、日米韓に対して劣勢である。ただし、MEMS・センシングデバイスの分野では、Bosch、ST マイクロなどがフラウンホーファーなどと共同研究を精力的に行い全方位の研究開発を実施している。パワーデバイスではインフィニオンが存在感を示している。また EU は今後急速に進展が期待される自動運転技術に関しては、いくつかの重要技術を有している。中国は現状分析では、他の地域に比して全般的に劣勢であるが、トレンドとしては「上昇傾向」が多く、今後の急速な進展が予想される。特にハイシリコンは世界トップの設計力を有しており、ディスプレイ関連でも韓国を急迫している。韓国は基礎研究フェーズでは日米欧に比して劣勢であるが、応用研究・開発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）、発光・表示デバイス（ディスプレイ）など、エレクトロニクス応用展開では日米欧を凌ぐ高いレベルにある。台湾では TSMC が 7nm の量産を始めようとしており、今後の動向に注視する必要がある。

■ナノテクノロジー・材料における設計・制御技術

ナノテクノロジー・材料分野の核をなす研究領域が含まれ、近年は特に、データ駆動型物質・材料開発（マテリアルズ・インフォマティクス）、量子技術が世界的に最もホットな領域となっている。国別に見ると、日本は新学術領域研究や戦略的創造研究推進事業などのファンディング制度を活用して、基礎研究フェーズで活発な研究が行われている。また、応用研究・開発フェーズにおいても上昇傾向のトレンドを示す研究開発領域が多いが、現状では欧米と比較するとやや劣勢にあるといえる。特に、データ駆動型物質・材料開発においては、基礎研究フェーズ、応用研究・開発フェーズとも米国の取り組みがリードしており、日本も NIMS を研究開発拠点とする MI²I を中心に精力的に研究が進められている。また、量子技術に関しては、米国と欧州の研究開発が活発であり、一部の分野では中国が欧米を凌ぐ研究開発を実施している。日本では基礎研究を中心に応用研究へ向けた重点化が図られ始めている。

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

欧州においては、Horizon2020 による支援を中心にイギリス、ドイツ、フランス、オランダなどで活発に研究開発が展開され、基礎研究フェーズでは強みを有する研究開発領域が多い。応用研究・開発フェーズにおいても、ほとんどの研究開発領域で他国と比べ優位性を保っている。今後、イギリスの EU 脱退がどのような影響を及ぼすか注視が必要である。

中国においては、膨大な科学研究予算を投資し、欧米での留学経験のある若手研究者の登用

や欧米の有力大学から有能な研究者を招聘すること等により、基礎研究フェーズおよび応用研究・開発フェーズともほぼ全ての研究開発領域で他国を凌ぐ勢いである。データ駆動型物質・材料開発においても中国版 Materials Genome Initiative (MGI) の下、国家重点研究開発計画に指定されるなど、基礎研究フェーズで活発な動きが見られ、さらに最近では企業も巻き込んだデータベースの構築も始まっており、今後の動向に注視が必要である。

韓国においては、二次元機能性原子薄膜の研究開発領域において、新プロセス、デバイス等のフレキシブルエレクトロニクスに関する研究プロジェクトが推進されるとともに、KAIST や国立ソウル大学がグラフェン・二次元薄膜デバイス応用の研究拠点になるなど、応用研究・開発フェーズで世界をリードしている。

■ナノテクノロジー・材料の共通基盤科学技術

「共通基盤科学技術」区分には、「加工・プロセス」（微細加工プロセス、積層造形・レーザー加工、接着・接合）、「計測・分析」（オペランド計測）、および「理論・計算科学」（物質・材料シミュレーション）が含まれる。

「加工・プロセス」の微細加工プロセスは、半導体分野にとどまらず、ナノメカニクス、スピントロニクス、バイオナノテクノロジーなどへの波及が進んでいる。微細化を牽引してきた「Moore の法則」の限界が叫ばれるようになって、微細化・高集積化のテンポはやや遅くなっているが、10nm 以下のシングルナノメートル領域に向けた微細化の要求は大きく、ArF 液浸露光技術とマルチパターニング技術を併用した加工技術、極端紫外線（EUV）露光技術、ナノインプリント技術などを中心に微細化の技術開発が続けられている。日本は欠陥評価技術、レジスト技術、ナノインプリント技術を保有しているが、CPU やメモリなどの応用に向けた微細加工技術開発では欧米および韓国、台湾にリードされている状況にある。今後、露光方法にかかわらずナノレベルの欠陥の問題が顕著になってくるため、実用化研究と合わせて、ナノレベルの欠陥の発生機構などの現象解明に繋がる基礎的な研究も重要になっている。

積層造形・レーザー加工では、樹脂や金属などを 3 次元的に積層して構造体を作製する積層造形／Additive Manufacturing（付加製造）／3D プリンティングと、高出力のレーザーを用いて金属、セラミックス、ガラス、樹脂などの複雑な切断、穴開けなどの高度で高品質な加工技術を取り上げている。積層造形の考えは 1980 年に日本で出されたものであるが、樹脂を扱う製造装置が 1987 年に米国で発売され、欧米を中心に急速に装置開発と応用開拓が進められ、近年では様々な金属材料にも適用され、複雑な形状を持ち実用上の強度を持つ航空用の構造部品が製造できるようになってきている。実用的な装置および粉末原料の開発では欧米がリードしているが、日本でも内閣府の SIP「革新的設計生産技術」、NEDO「次世代型産業用 3D プリンタの造形技術開発・実用化事業」、技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構（TRAFAM）などにより、熔融凝固現象の学理解明などの基礎的な研究も含めて、技術開発が進められている。一方、レーザー加工用の高強度レーザーの開発では、欧米を中心に CO₂ レーザーから安価で使いやすいファイバーレーザーへの置き換えが進められてきたが、近年では中国がシェアを拡大してきている。日本はファイバーレーザーの技術開発で遅れたが、加工技術と組み合わせることで巻き返しつつある。2018 年度から開始された内閣府の第 2 期 SIP「光・量子を活用した Society5.0 実現化技術」や文科省の光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）などにおけるレーザー加工技術の開発が期待される。

接着接合技術が、航空機や自動車などの輸送機器における CO₂ 排出量削減を目的としたマルチマテリアル化による軽量化を実現するためのキーテクノロジーとして注目を集めている。世界的な接着剤メーカーを有する米国やドイツが基礎研究、応用研究・開発ともリードをしているが、日本は産総研「接着・接合界面現象研究ラボ」を中心に、エレクトロニクスから航空機にいたるまでの広範な工業製品における接着技術に関して、接着界面の分析、新規接着剤材料の開発、接着接合部の強度評価・信頼性評価、表面処理および検査手法の開発など総合的な研究開発が実施され、基礎研究フェーズは上昇傾向にある。

「計測・解析」区分のオペランド計測は、機能が発現する「動作環境」で、様々な物性量の時間変化を観測する技術領域であり、触媒、電池、トライボロジーなどにとどまらず、生きた細胞、生体組織、半導体メモリ、太陽電池などまで広がり、学界と産業界の両方において活発な研究が実行されている。具体的な技術としては、走査型プローブ顕微鏡（SPM）、走査型透過電子顕微鏡（STEM）、放射光 X 線、中性子線などがあり、STEM、X 線、中性子線の新たな利用技術やオペランド測定用の専用特殊ホルダーの開発などでは、欧米が一步進んでいる。日本においても、STEM における微分位相コントラスト（DPC）法の開発、世界初の大気圧光電子分光測定、50nm 位置分解能のタイコグラフィ XAFS などの顕著な成果が出てきており、追いつけている。

「理論・計算科学」は、物質・材料科学の基礎を支える重要な科学技術で、量子力学や統計力学の諸知見を活かし、物質の構造、物性、材料組織、化学反応機構などを高精度に解析・予測する技術の確立を目指す。ここ 2～3 年の間に、マテリアルズ・インフォマティクスと量子コンピューティング分野への適用の観点から物質・材料シミュレーションの重要度が高まっている。米国では、2011 年の「Materials Genome Initiative（MGI）」発表をきっかけに、物質・材料分野へ巨額の公的資金が投入され、民間からも物質設計の分野への積極的投資が行われている。MGI は 2016 年に終了したものの、今後も NIST 主導で大規模大容量の物質データ処理分野への研究開発が積極的に行われ、世界を牽引していくと考えられる。欧州では、2009 年に MatSEEC を組織し、欧州各国において物質材料科学分野に集中的な支援を行ってきた。さらに 2012 年に PRACE が組織され、2020 年までの 9 年間にわたって、計算科学の諸分野への支援がなされる計画である。重点課題として「強相関電子系」、「ソフトマター」、「量子化学」、「光化学（励起状態）」、「第一原理に基づくデバイス設計」、「ナノ構造形成」を挙げている。中国においては、計算物質科学研究に関する論文が格段に増加しており、質の高さでも日本を凌駕している。超並列計算機環境も、世界の Top を占めており、応用計算に多くの資源が供給されている。

1.3.3 国として推進すべき重点テーマ

これまで述べてきたことから浮き上がってくる、ナノテクノロジー・材料分野からの貢献が特に求められる 6 つの社会ニーズに対応する材料・デバイス・技術について述べる。続けて、それらの材料・デバイス・技術を生み出すために取り組むべき 10 のグランドチャレンジについて述べる。

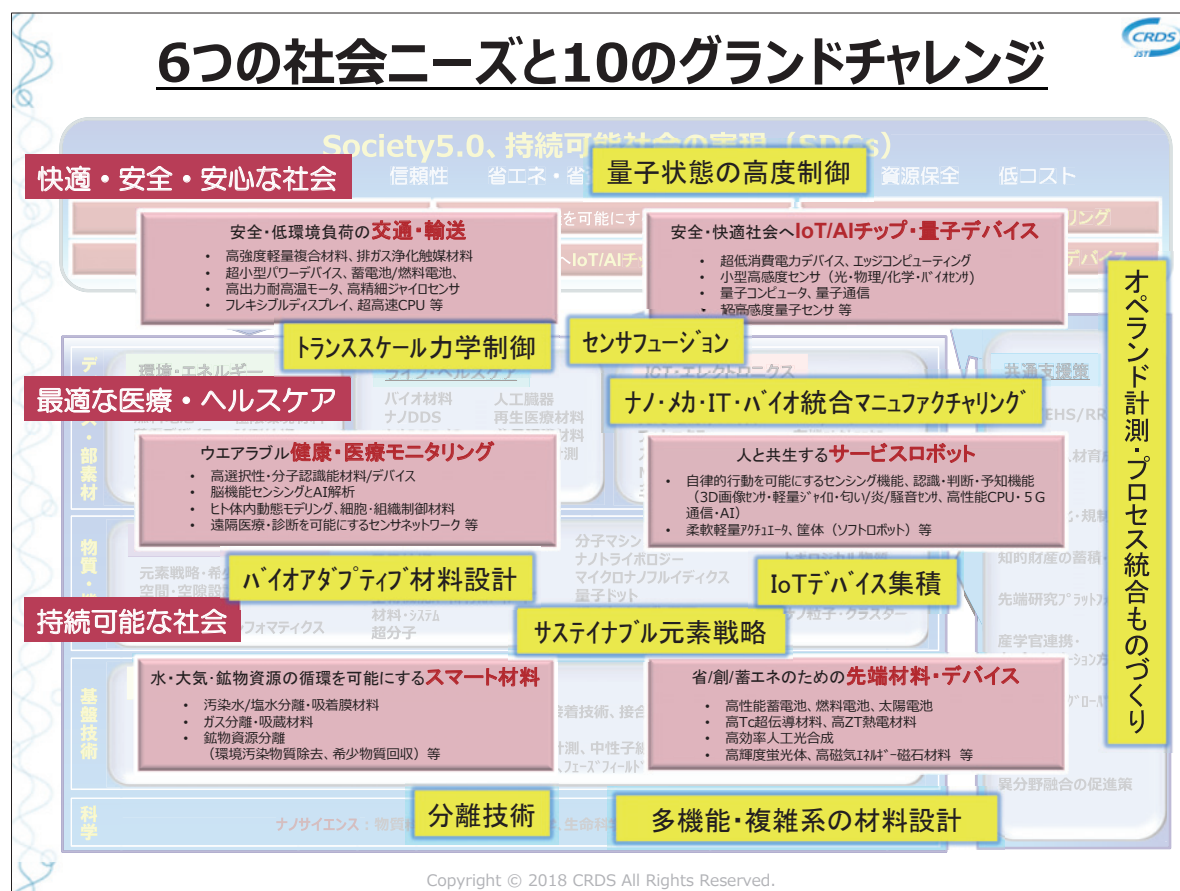


図1.3.3-1 6つの社会ニーズと10のグランドチャレンジ

図 1.3.3-1 は 6 つの社会ニーズと 10 のグランドチャレンジ（黄色）の位置関係を示したものであり、あるべき社会像は「快適・安全・安心な社会」「最適な医療・ヘルスケアが受けられる社会」「持続可能な社会」の 3 つに大別される。

■快適・安全・安心な社会の実現に向けて

●社会ニーズに対応する材料・デバイス

①安全・低環境負荷の交通・輸送

事故や渋滞を激減し、安全で快適な移動空間を提供する自動車、燃料効率が高く、CO₂排出量が抑制された航空機など、安全・低環境負荷の交通・輸送機器に対するニーズが高まっている。これらを実現する上で必要な材料・デバイスへの要求も拡大しており、具体的には、高強度軽量複合材料、排ガス浄化触媒材料、耐熱材料、超小型パワーデバイス、蓄電池・燃料電池、高出力耐高温モータ、高精細ジャイロセンサ、フレキシブルディスプレイ、超高速 CPU などの開発が必要である。

②安全・快適社会実現へ向けた IoT/AI チップ・量子デバイス

人間が安全・快適に暮らせる豊かな社会を実現するため、車や家といった生活空間、さらにはオフィスや工場といった我々を取り巻くあらゆる場所に、様々なセンサを搭載した IoT デバイスを設置し、得られたビッグデータを高速かつ低消費電力で処理すること、そこから生まれる新たな情報を活用することが求められている。そのために開発が必要な材料・デバイスとし

て、具体的には、超低消費電力デバイス、エッジ・コンピューティングデバイス、小型高感度センサ（光・物理／化学・バイオセンサ）、量子コンピュータ、量子通信、超高感度量子センサなどがある。

●取り組むべきグランドチャレンジ

i 量子状態の高度制御

電子、光子、スピン、フォノンなどの個々の量子状態およびそれらの相互作用がもたらす物理現象を理解し、さらにトポロジジーといった新しい概念を導入することで、新しい量子状態を実現し、これらの高度制御を図る。これによってシリコンテクノロジーだけでは実現できない新たな機能を創出・付加し、量子コンピュータやスピントロニクスなどへの応用展開を加速させる。

ii トランススケール力学制御

航空機・自動車等における CO₂ 排出量の大幅削減、摩擦などによるエネルギー損失を大幅低減した機械機器、社会インフラ材料の超長寿命化や修復など、持続可能社会に貢献する材料・デバイスを創製するためには、ナノスケールにおける諸現象の理解をベースに、マクロな力学特性発現メカニズムを解明し、「接着・接合・剥離」「摩擦・摩耗」「自己修復」といった力学特性を自在に設計・制御する技術開発が必要である。

iii センサフュージョン

物理センサおよび化学センサを統合的に用い、老朽化や災害時における橋梁やトンネルなどの社会インフラの異常検知、日常生活における病気やけがにつながる異常兆候の検出などを可能にする。様々な場所で常時観測を行いつつ、あるセンサ端末が異常検知した際には他のセンサ端末と連携して原因特定のための詳細情報を自律的に取得する。高い選択性と分子認識能を持つ材料・デバイス、エネルギーハーベスト技術、異常・正常の判断を可能にするデータの整備などが必要である。

■最適な医療・ヘルスケアが受けられる社会の実現に向けて

●社会ニーズとそれを解決するために必要な材料・デバイス

③ウェアラブル健康・医療モニタリング

疾患の早期診断や、健康状態・生体情報のモニタリングを実現するウェアラブル（またはインプラントラブル）な健康・医療モニタリング技術が求められている。これを実現する上で必要な材料・デバイスとして、具体的には、高選択性材料・デバイス、分子認識能材料・デバイス、脳機能センシングと AI 解析、ヒト体内動態モデリング、細胞・組織制御材料、遠隔医療・診断を可能にするセンサネットワーク、手術用ロボット、高精細ディスプレイなどの開発が必要である。

④人と共生するサービスロボット

少子高齢化が進む今後の日本社会において、負担の少ない高齢者介護、持続可能な社会インフラ保守管理、災害やテロに対するセキュリティ強化などの課題の解決のため、人間が苦手な作業の代行や人間の作業能力を補強・拡張するなど、人と共生するサービスロボットの活用が望まれている。これを実現するために必要な材料・デバイスとして、具体的には、自律的行動を可能にするセンシング機能（3D 画像センサ、軽量ジャイロ、匂い／炎／騒音センサ）および

認識・判断・予知機能（高性能 CPU、5G 通信、AI）、柔軟軽量なアクチュエータ・筐体などの開発が必要である。

●取り組むべきグランドチャレンジ

iv ナノ・メカ・IT・バイオ統合マニファクチャリング

生物が実現する巧妙な構造や機能、低エネルギーで実現する動作や物質生産に学び、人工的な材料・デバイスの生産システムとして再構築する。3D プリンティングなどを使ったバイオ・インスパイアード技術や小型・軽量・高出力の自律・協調動作ロボットを実現する。人に対する親和性をもたらすソフト材料による筐体、AI チップによる認識・判断などが必要となる。

v バイオアダプティブ材料設計

生体環境に適合した材料の探索という従来の概念から脱却し、生体との相互作用を積極的に活用して能動的に制御する機能をもつ材料を設計・創製する。生体との相互作用を積極的に活用することで初めて実現可能な機能を持つ材料、具体的には、生体现象を制御する機能を持つ材料や、現状の網羅的探索の延長では達成不可能な極めて高い生体適合性を有する材料の創出基盤を構築する。

vi IoT デバイス集積

IoT/AI 時代に求められるセンシング、エッジ・コンピューティング、ネットワーク等の多機能をヘテロ集積モジュール化した安価な電子システム、さらには新アーキテクチャ（ニューロ、量子）による高性能コンピューティングの開発を通じて、安全・安心な環境の実現、健康管理・介護医療・自動運転などの新サービスへの展開へと発展させる。ムーアの法則に従う素子の微細化が困難になる中、新しい動作原理のデバイスやコンピューティング・アーキテクチャ、さらには実装技術の革新が鍵となる。

■持続可能な社会の実現に向けて

●社会ニーズとそれを解決するために必要な材料・デバイス

⑤水・大気・鉱物資源の循環を可能にするスマート材料

今後予想される世界の人口増による著しい水不足や大気汚染、世界のハイテク産業を支える希少元素をはじめとする鉱物資源枯渇の危惧や偏在性から生ずる価格高騰のリスクを解決するため、水・大気・鉱物資源の循環を可能にするスマート材料が求められている。具体的には、汚染水／塩水分離・吸着材料、ガス分離・吸蔵材料、鉱物資源分離技術（環境汚染物質除去、希少元素回収）などの開発が必要である。

⑥省 / 創 / 蓄エネルギーのための先端材料・デバイス

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災に伴う原発事故によって、わが国のエネルギーを巡る環境は大きく変化し、再生可能エネルギーの大量導入は必須であり、高効率な省・創・蓄エネルギーを実現する先端材料・デバイス開発が必要となっている。具体的には、高性能蓄電池・燃料電池・太陽電池、高い転移温度を持つ超伝導材料、高 ZT 熱電材料、高効率人工光合成触媒、高輝度蛍光体、高磁気エネルギー磁石材料などの開発が必要である。

●取り組むべきグランドチャレンジ

vii サステイナブル元素戦略

厳しい資源制約のあるわが国において、グローバルの課題解決に資する魅力的な機能を持った材料・デバイスを継続的に創出するには、新機能の追求と同時に元素・物質の循環に代表されるサステナビリティを重視した材料創製を可能にする強固な材料開発基盤の構築が必要である。これまで材料研究開発の世界的な流れを先導してきた「元素戦略」をさらに進化させ、新機能の追求と同時に希少資源の極限的な回収や、プラスチック素材の再資源化など、限りなく「ゼロ・マテリアル・エミッション」に近づけることを目指す。材料の原料調達から、創製、リサイクル、廃棄までのライフサイクル全体を考慮した材料設計指針の確立を行う。

viii 分離技術

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

ix 多機能・複雑系の材料設計

蓄電池や燃料電池の構成材料（正極、負極、電解質、セパレータ、バインダ）、超伝導材料、磁性材料、触媒材料などでは相反する機能や複数の機能を同時実現することが求められ、その高性能化には物質・材料の多元素化や複合化が避けられない。このような複雑な材料システムでは多様な結晶構造が可能になり、要求に対し最適の特性を有する結晶構造（結晶の安定相）をどのように設計するか、どのようなプロセスで実現するかが材料開発の鍵を握っている。グローバルな開発競争が激化している現状においては、従来のような絨毯爆撃的な材料設計から脱却し、進展が著しいシミュレーションやデータ科学、さらにはオペランド計測を駆使した精緻な材料設計、プロセス設計手法を確立し、ハイスループットの材料創製に結びつける必要がある。

■共通基盤技術を構築するためのグランドチャレンジ

x オペランド計測・プロセス統合ものづくり

反応プロセス中の物質・材料もしくは実動作下の材料・デバイスを対象にオペランド計測を実行し、得られた計測結果に対してデータ科学的手法も駆使して高速・高効率なデータ解析を行うことが、今後の新物質・材料開発には欠かせない。解析結果をただちに合成プロセス条件や動作条件にフィードバックすることで、より高品質な物質・材料創製もしくはよりリアルな実動作下の材料・デバイスの特性評価が可能となる。データ科学を活用しつつ、計測とプロセスを一体化したものづくり技術の開発が必要である。

1.3.4 研究開発体制・システムのあり方

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

一方で、研究開発はグローバルなスケールで競争が激化し、開発スピードへの要求は拡大し、

世界的に以下のメリットを享受できる拠点型のオープンイノベーションへの取組みが実践されている。

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

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

■世界のナノエレクトロニクス大型研究拠点

ナノエレクトロニクスの研究開発拠点は、ベルギーの IMEC、フランスの MINATEC、米国の Albany Nano Tech（ANT）など、限られた拠点到集中している（図 1.3.4-1）。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。

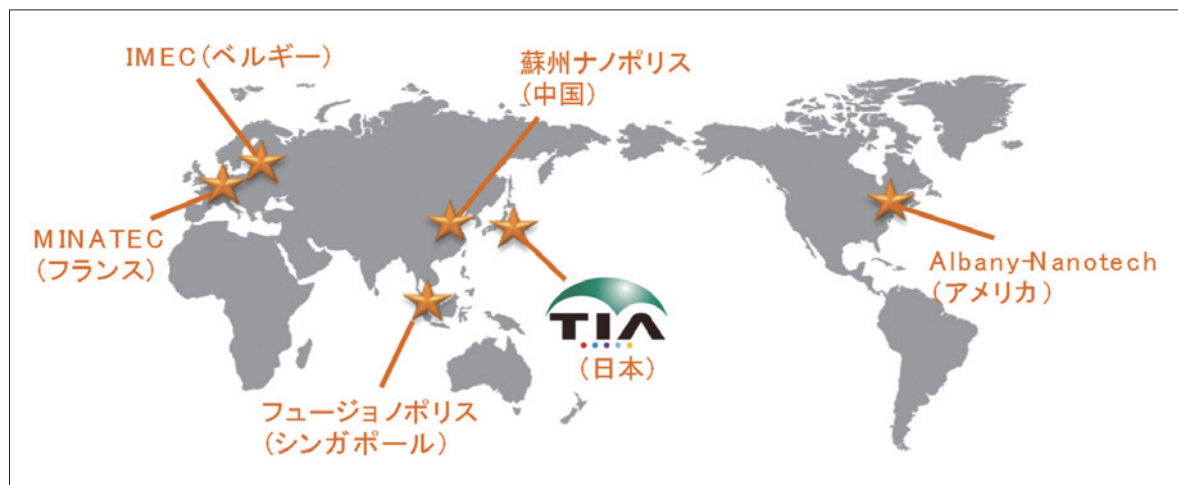


図1.3.4-1 世界のナノエレクトロニクス大型研究拠点

IMEC は、ナノエレクトロニクスの国際的な研究請負機関であり、2017 年の収入は 546 億ユーロ（2016 年の 497 億ユーロから約 1 割増収）である。約 2 割がベルギー・フランデース地方政府からの助成金だが、1984 年の創業以来、業績は毎年伸びている。IMEC の伝統的なビジネスモデルは研究協業（受託研究）であるが、中小企業向けのファウンドリサービスも行っている。200mm もしくは 300mm の試作ラインを活用して、CMOS、光デバイス、化合物パワー半導体、太陽電池、イメージセンサ、MEMS などを提供している。さらに、IMEC が複数の中小企業をまとめて TMSC のようなメガファウンドリへの製造委託も行っている。2016

年9月に、フランダース地方政府における科学技術振興政策強化の一環として、同地方のデジタル技術研究機関でありインキュベーションセンターでもあった iMinds を吸収合併したことで、従来からの強みであったハードウェアと iMinds のソフトウェアを融合させ、広範囲の IoT アプリケーション開発（スマートヘルス、スマートモビリティ、スマートシティ、スマートインダストリー、スマートエネルギー）の研究を促進し始めている。その結果、研究協業先も半導体関連産業にとどまらず、健康、医療、自動車、エネルギーなどに広がりを見せている。2018年5月現在の人員は3500名を超え、そのうちの500～600名が世界中の研究委託企業から派遣されている研究者（給与は派遣元の企業が負担）、同じく500～600名が博士号取得のための研究を行う大学から派遣されてきた学生である。また、試作製造だけではなく、デバイス設計の受託や、IMEC での研究成果で起業しようとするスタートアップの支援も行っている。日本からも東京エレクトロンや SCREEN をはじめとする製造装置メーカーの他、住友化学、JSR、富士フイルム、カネカなどの材料メーカーも参加している。

MINATEC は 20 ヘクタールの敷地に研究者 3000 名、学生 1200 名、産業界の技術移転専門家 600 名を集め、13000 平方メートルのクリーンルームを持つ、グルノーブルの産学独集積クラスターの中心である。年間予算は約 3 億ユーロ（うち、5 千万ユーロは設備投資費）。毎年約 350 件の特許が出願され、1600 件以上の研究論文が発表されている。また、多岐にわたる分野（オプティクス、バイオテクノロジー、部品・設計回路、センサなど）で多くのスタートアップを設立している。MINATEC では自己評価の指標として、① International visibility、② Ecosystem generation、③ Economic impact、の 3 つを重視しており、これらを高めていくための運営に集中している。

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

アジアでは特に中国の存在感が増している。たとえば、蘇州においては 1994 年から建設されてきた蘇州工業園区(SIP)がつくば研究学園都市の 10 倍の規模に成長し、深センにおいては、世界有数の大企業や大学を巻き込んでイノベーションのためのエコシステムが構築されつつある。また、シンガポールにはフュージョノポリスが国際拠点となっている。このように、韓国、

中国、台湾に加え、南アジア、東南アジアではシンガポールを中心にハブ化が進みつつある。

日本での取り組みとしては、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が中核となり、日本経済団体連合会（経団連）とも連携して2010年にスタートした「つくばイノベーションアリーナナノテクノロジー拠点（TIA-nano）」がある。先端ものづくり国家としてのわが国の繁栄とともに世界的に魅力あるナノテクノロジー研究拠点を造り上げようとしたものである。2015年からは第2期として今後5年間の行動体系を示した「TIA-nano ビジョン（2015-2019）」を示し、オープンプラットフォームの構築に向けた活動を明確にしている。2016年度から新たに東京大学が加わり、ナノバイオやデータ駆動科学などの新たな取り組みも進めていくことから、名称をTIA-nanoからTIAに変更して活動を広げている。具体的には、3つのプラットフォーム（システム化プラットフォーム、先進材料プラットフォーム、共通基盤プラットフォーム）に分けて研究開発を推進している。システム化プラットフォームには、ナノエレクトロニクス、パワーエレクトロニクス、MEMSの研究領域、先進材料プラットフォームにはカーボンナノチューブ、ナノグリーンの研究領域が含まれ、それぞれ企業と連携して関連するプロジェクトを推進している。共通基盤プラットフォームには、光・量子計測、人材育成、共用施設ネットワークがあり、計測技術の高度化、研究者の能力向上・キャリアアップ、研究の支援などを行っている。また、2016年度より中核5機関の研究者が連携して将来のイノベーションに繋がる新たな研究領域の探索を行うために、TIA連携プログラム探索推進事業「かけはし」を開始している。バイオ・医療の研究領域は主にこの「かけはし」で支援されている。2018年度までの3年間の活動で、予想以上の興味深い新たな研究テーマが提案されて、具体的な研究プロジェクトに移行したものもあり、今後は企業も含めた形でのさらなる展開が計画されている。TIAが世界に注目される研究拠点になるには、TIA独自の強い研究領域を形成する必要がある、従来の国家プロジェクト中心の研究だけでなく、「かけはし」から新たな融合研究領域が生まれ、世界に注目される活動に育つことが渴望される。

これまでTIA拠点を活用するプロジェクトとしては内閣府のFIRST、SIP、ImPACTや文部科学省、経済産業省、NEDOなど様々な国のプロジェクトが進められ、多くの成果が創出されている（第1期[2010-2014年度]:33プロジェクト、第2期[2017年度まで]:16プロジェクト）。2017年度におけるTIA連携企業は171社、外部から970名の研究者が集まっていることから、イノベーションハブとしての機能は徐々に高まっている。オープンイノベーションを促進すべく、公的資金のみならず、企業会員からの資金も得ながら、持続・自律的な拠点経営を実践している例が出始めている。ナノグリーン領域におけるNOIC（NIMS Open Innovation Center）や、パワ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（Tsukuba Power-Electronics Constellations : TPEC）が挙げられる。また、企業主体の新事業創出を促進するために、単層カーボンナノチューブや複合材料の提供や技術相談・共同研究を行う「CNTアライアンス・コンソーシアム」の活動も行われている。

一方で、IMEC、MINATECなどに比べて教育・人材育成の面の弱さ、コア技術開発が日本企業だけで多様性が不足、海外からのユーザー・ニーズが取り込めない、産業界に対するPRが弱い、28nm世代以降の最先端の半導体製造設備がなく既存設備も老朽化しているといった指摘もある。産業界へのPR活動の一つとしてつくばエリア見学会なども開催されるようになってきているが、このような地道な勧誘活動を続けていくことや、企業にとって魅力的なコア技

術を蓄積して、利用しやすい制度、他にない装置・設備の拡充などが期待される。

今後 TIA が、世界の強力な半導体開発拠点に伍してどこまで競争力を持ち得るのかは、国のエレクトロニクス研究開発政策の位置づけにも依存し、各セクターの意志と行動にかかわる問題である。拠点は国際的に開かれた組織とし、他国のネットワークとも接続し、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。

■世界のナノテクノロジー研究開発インフラ・プラットフォーム

米国、韓国、フランス、ドイツ等は戦略的に公的資金を投入（ナノテクノロジー国家投資額の 5%～10 数%を研究開発インフラ・プラットフォーム・拠点形成に配分）し、充実した先端研究インフラのプラットフォームを構築した。特に、米国の National Nanotechnology Coordinated Infrastructure : NNCI や Network for Computational nanotechnology : NCN (NSF)、韓国の 6 センターはオープンな研究開発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プラットフォームやネットワークが形成されている。

米国の充実した数十の拠点ネットワーク（NNCI / NSF : 16 拠点によるナノテクノロジーコーディネーション拠点ネットワーク、NCN / NSF : 7 つの計算機センターによるナノテクノロジーコンピュータネットワークなど）においては、長年の経験を活かし、平均すると連邦政府からの資金は全体運営費の 3～4 割ほどで運営が成立している。

日本は、過去、文部科学省のナノ支援（2002-2006 年度）、ナノネット（2007-2011 年度）の両プログラムにおいて 10 年間、13 拠点が運営されたものの、投資不足と拠点機関側の意識の低さのため、全体的に見ると施設運営費の補填の面があった。産業界から頼られるネットワークとまではならず、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、2012 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かなりの部分克服している。先端装置類を地域単位で集中配備してオープンにすることで、ユーザーの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すことが起きている。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）を提供し、全国 25 法人、37 実施機関が参画している。それぞれ共用を担う実施機関及びその代表となる代表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（JST は 2017 年度まで））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窓口・コーディネート機能を担っている。

2017 年度には、プラットフォームの年間利用件数はおよそ 3000 件にまでに成長している。文部科学省の事業予算（19 億円 / 2018 年度）とユーザーからの利用料収入、そして実施機関の属する法人による自己負担とが合わさり、プラットフォーム全体が運営されている。そのなかで、産業界に対する具体的な研究開発支援や、大学研究者に対する高度設備の利用・技術支援、技術代行等により、専門技術者のスキルと知・ノウハウへのアクセスを可能としている。利用者の持つ課題・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。こうしたプラットフォームの構築により、ユーザーが課題を最初に持ち込んだ先の機関では対応できない課題も、プラットフォームを介して他の機関へと課題が移り、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、解決策などの蓄積自体がプラットフォームの強みであり、価値創出の源泉たるストックとなっている。特に web サイトの充実など、バーチャルの部分で利用事例等の知識や、設備情報のデータベース化、ICT の駆使がポイントになっている⁶。本事業は、2017 年度に行われた外部委員による中間評価で高く評価されているが、同時に、科学技術や産業を取り巻く状況の変化に即した対応技術領域の強化と、先端機器・技術専門人材の強化拡充、適切な利用課金体系の充実、国際化など、より持続的な運営形態を目指して発展・成長させていくべきとされた。

このようなプラットフォームは、ナノテクノロジー・材料分野に限らず、他分野においても研究開発プロジェクトや産学連携を支え、融合や連携を促進する共鳴場として不可欠な研究インフラになってくると考えられる。一方で、研究開発に用いる先端機器の世代が進歩していくなか高額化が進んでいることから、陳腐化する既存設備の更新や、データの利活用基盤の構築、高度設備の性能を最大限に引き出してユーザーの研究開発成果を共に生み出す専門技術者の継続確保と育成が課題となっている。

⁶ 参考：共用設備利用案内サイト <http://nanonet.mext.go.jp/yp/>