

1.2 世界の潮流と日本の位置づけ

1.2.1 社会・経済の動向

ナノテクノロジー・材料分野（ナノテク・材料）は、環境・エネルギー、ICT・エレクトロニクス、バイオ・医療、社会インフラ・モビリティなど、さまざまな応用を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・産業動向に影響される。以下では、ナノテク・材料分野と密接に関係する社会・経済の動向について述べる。

世界規模での社会動向としては、気候変動、水・衛生、エネルギー、イノベーションなど世界的に取り組むべきものとして国連で採択された持続可能な開発目標（SDGs）に向けた取組みが挙げられる。また、日本ではサイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会、Society 5.0の実現を掲げている。これらを実現するためには、新たなニーズに応えるための新規材料・デバイスの開発が求められている。また、ニーズは年々高度化・変化しており、それらへ迅速に応えるためにも、デジタルトランスフォーメーション（DX）などによる研究開発の加速が必要となっている。

世界的な気温上昇を抑えるための目標である2050年カーボンニュートラルの実現には、CO₂排出量削減のためのCO₂捕捉・利用技術や再生可能エネルギー利用技術、材料の利用効率を改善する技術やリサイクル・リユース技術などに加えて、すでに確立・最適化済みと考えられていた生産技術の再検討も必要になる。

さらに、米中貿易摩擦やロシアによるウクライナ侵攻などの地政学的リスクや、新型コロナウイルス感染症のような全世界的な健康リスクの顕在化によって、経済安全保障の観点からサプライチェーンの強靱化を目指す動きも重要となっている。重要な材料・デバイスの中には、希少元素や地域的に偏在する原料を使用しているものが少なくなく、これらについては豊富で無害な元素によって目的とする機能を発現させることが求められる。つまり、すでに確立済みと考えられていた製品においても原材料や製法の再検討が必要になっている。

また、新型コロナウイルス感染症拡大によって世界の研究開発活動が停滞したことにも影響を受け、研究開発のDXへの取り組みが格段に進んでいる。今後は、データ駆動型研究開発を含め、リサーチトランスフォーメーション（RX：デジタル技術を主なドライバーとする研究開発システムの変革）が一層進展するものと考えられる。

前述のように、ナノテク・材料は、環境・エネルギー、ICT・エレクトロニクス、バイオ・医療、社会インフラ・モビリティなど、さまざまな応用を支える基盤技術である。これらの応用分野に関連する日本の産業状況を以下に示す。

文部科学省 科学技術・学術政策研究所（NISTEP）「科学技術指標2022」では、主要国の貿易構造をOECDの定義に基づく産業分類ごとに分析している。ハイテクノロジー産業およびミディアムハイテクノロジー産業は研究開発集約活動（R&D - intensive activities）とされ、これらの貿易額は、実際に製品開発に活用された科学技術知識の間接的な指標であると考えられている。図 1.2.1-1はOECDの定義による産業分類ごとの日本の産業貿易輸出割合を示したものである。日本は、輸出に占めるハイテクノロジー産業とミディアムハイテクノロジー産業の割合が高く、ミディアムハイテクノロジー産業は全輸出額の50%以上を占めている。

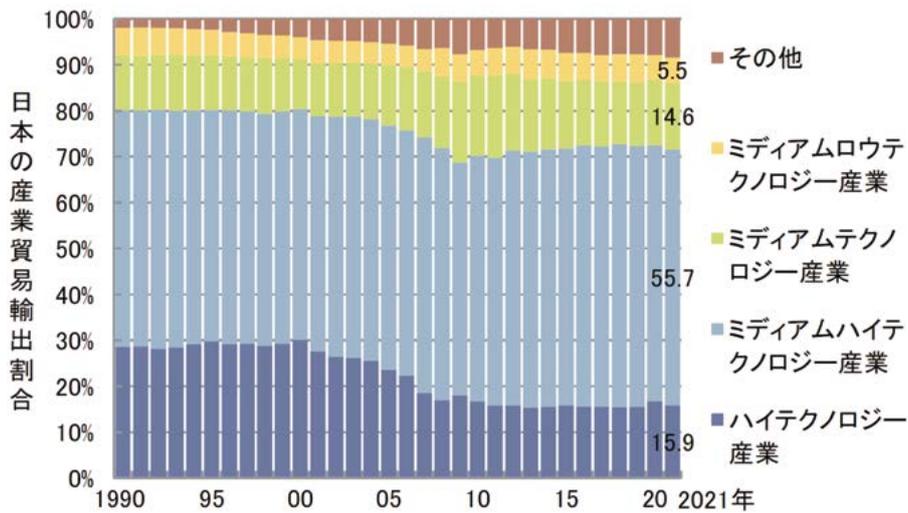


図1.2.1-1 日本の産業貿易輸出割合¹

ハイテクノロジー産業は、「医薬品」、「電子機器」、「航空・宇宙」の3つの産業を指し、またミディアムハイテクノロジー産業は「化学品と化学製品」、「電気機器」、「機械器具」、「自動車」、「その他輸送」、「その他（磁気・光学メディア、医療及び歯科用機器・備品など）」を含む。なお、「電子機器」はコンピュータ、電子および光学製品を示し、「電気機器」には電池および蓄電池を含む。

以下では、ナノテクノロジー・材料分野に関連性の高いミディアムハイテクノロジー産業と電子機器産業の合計についての年次推移を示す。

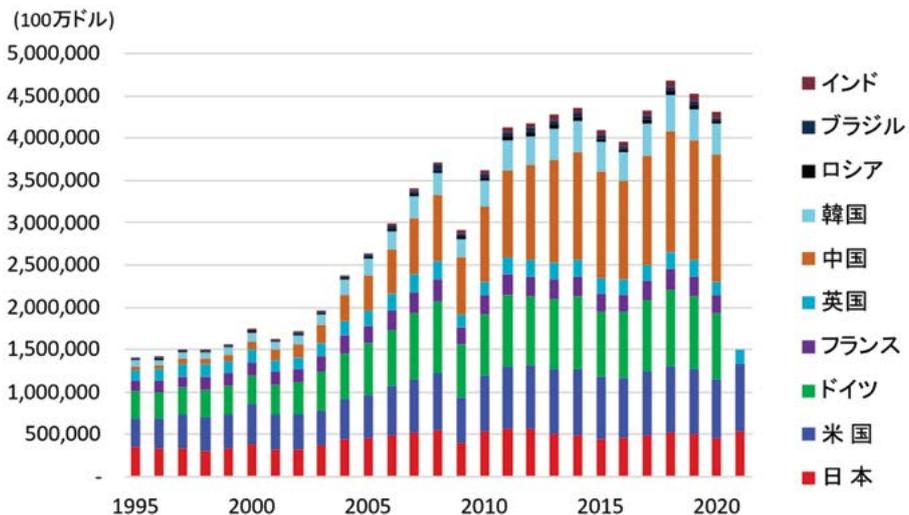


図1.2.1-2 主要国のミディアムハイテクノロジー産業と電子機器産業の輸出額合計²

1 文部科学省 科学技術・学術政策研究所、科学技術指標2022、調査資料-318、2022年8月

2 文部科学省 科学技術・学術政策研究所、「科学技術指標2022」を基に、JST-CRDSが加工・作成。

図 1.2.1-2には主要国のミディアムハイテクノロジー産業と電子機器産業の輸出額合計の年次推移を示すが、日本は2000年代後半以降はほぼ横ばいである。その内訳をとしては「自動車」が最も大きく、次いで「機械器具」「電子機器」「化学品と化学製品」「電気機器」の順である。

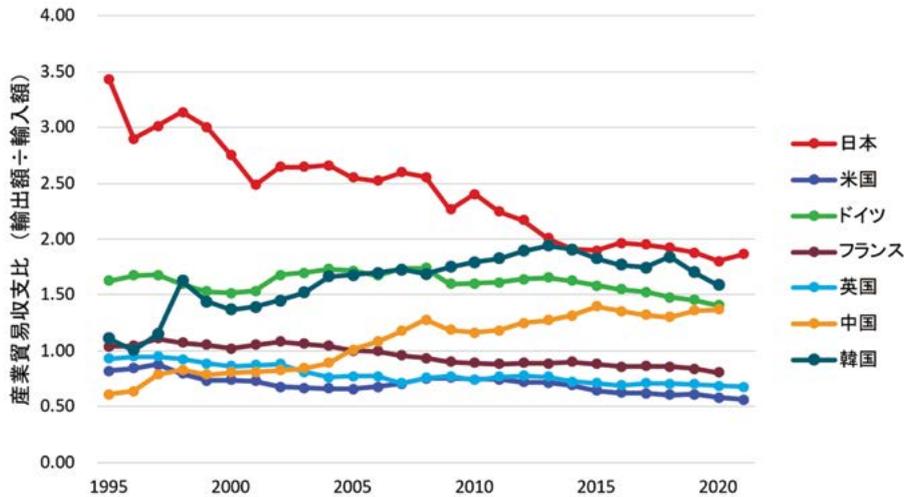


図 1.2.1-3 主要国のミディアムハイテクノロジー産業と電子機器産業合計の貿易収支比²

図 1.2.1-3にはミディアムハイテクノロジー産業と電子機器産業の合計における各国の貿易収支比（輸出額 ÷ 輸入額）を示す。日本は漸減傾向が続いているが、最近でも主要国中第1位である。それに対し、韓国、中国は徐々に貿易収支比を増加させており、近年は韓国の貿易収支比は日本と同等の水準になっている。

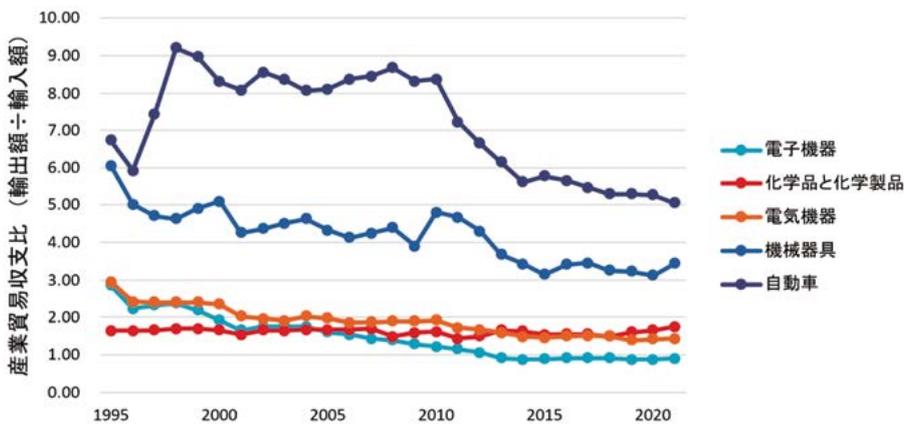


図 1.2.1-4 日本における産業ごとの産業貿易収支比²

図 1.2.1-4には、ハイテクノロジー産業、ミディアムハイテクノロジー産業に含まれる産業のうち、主要な産業の貿易収支比を示す。「自動車」がもっとも高く、次に「機械器具」であり、「電子機器」「電気機器」「化学品と化学製品」は、貿易収支比は1～2である。各産業とも漸減傾向にあるが、「化学品と化学製品」はほぼ横ばいである。

日本は、研究開発集約活動であるハイテクノロジー産業およびミディアムハイテクノロジー産業の全輸出に占める割合が高く、ナノテク・材料分野に関連性の高いミディアムハイテクノロジー産業と電子機器産業の合計の貿易収支比は最近でも主要国中第1位を維持しているものの、徐々に低下している。

これらの産業分野はいずれも、前述の社会動向の影響を強く受けているものである。新たなニーズに応えるための新規材料・デバイスの開発に加え、すでに確立済みと考えられていた製品の原材料や製法の改良、DXなど研究開発手法の変革などによって対応することが必要になるとともに、材料・デバイスに対する基礎研究から開発・製品化、サービスまでを含めたバリューチェーン全体での戦略の再構築が求められている。

各国の経済安全保障政策は、主には、図1.2.1-5に示す①サプライチェーン確保、②重要インフラとデータ保護などの、戦略的自立性を確保するための守りの政策と、③重要技術の流出防止、④重要技術の開発強化・支援、などの戦略的不可欠性に関する攻めの政策の4つの柱からなる。ナノテク・材料分野においては、生産国に限られる希少資源や先端電子部品の安定確保や、先端技術の流出・盗用の防止などのような、直近の安全保障に関するものだけでなく、それを保有していることが将来の産業競争力に直結する破壊的技術に早期着手することで未来の安心に繋げようという動きが目立つようになっている。それらの内容については、1.2.3においてさらに述べる。

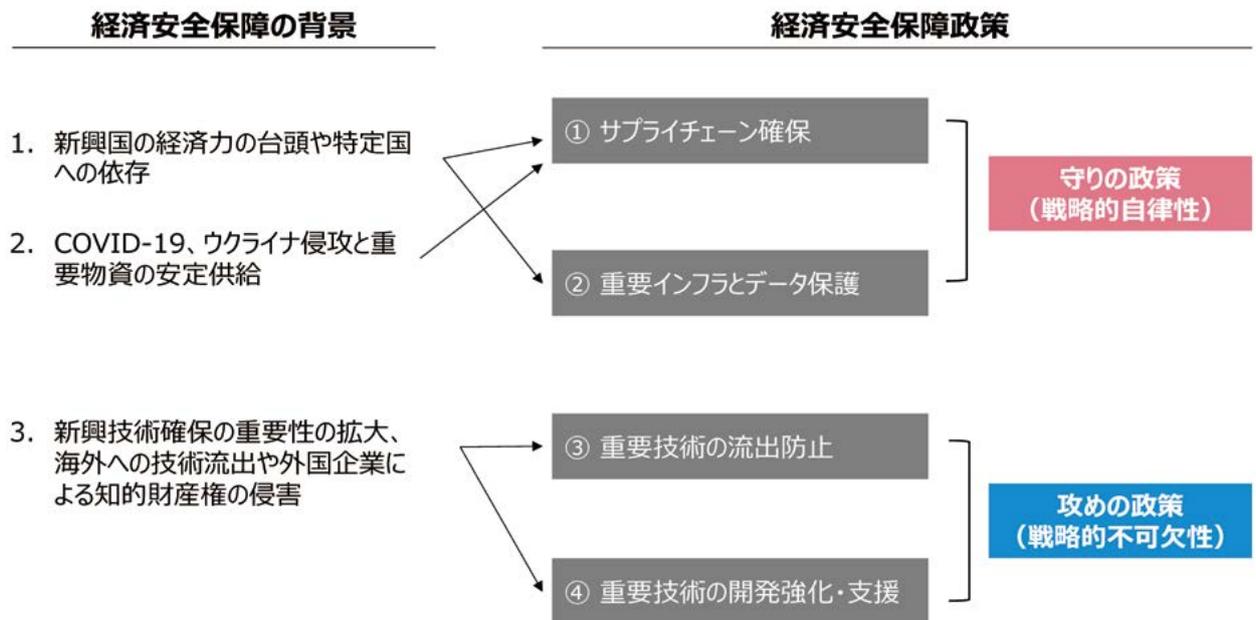


図1.2.1-5 経済安全保障政策の主な柱

1.2.2 研究開発の動向

■世界的な研究開発トレンド

ナノテク・材料分野における、近年の世界的な研究開発トレンド・技術開発の潮流を図1.2.2-1に示す。これらの技術は、(1) 普及製品において、製品中のナノテク・材料に関する要素技術の性能向上が、製品全体の性能を飛躍的に向上させると期待されているもの、(2) 実用化には至っていないが、機能の高さが実証されており、実用化され普及した際には社会に大きなインパクトを与えると見込まれているもの、(3) 現時点ではまだ優れた機能の実証や具体的な用途が明らかになっていないものの、その現象・原理が斬新で、今後の研究開発によって様々な用途が開ける可能性が見込まれるもの、のいずれかの特徴を持つものである。

以下では、上記の観点でCRDSが潮流として同定した10の材料・デバイス・技術事例について、注目すべき研究開発動向や政策動向を述べる。

蓄電デバイス

リチウムイオン電池に代表される二次電池を始めとした蓄電池は、スマートフォンやノートパソコンなどの小型携帯機器や、家庭用蓄電池、グリッド電力貯蔵、電気自動車などに使用され、現代の生活に不可欠なデバイスとなっている。特に、カーボンニュートラル社会の実現に向けては、蓄電池を用いたエネルギー貯蔵システムの構築や、運輸部門における内燃機関自動車から電気自動車への転換が世界中で推進されており、蓄電池の需要や世界市場は急拡大すると予測されている。また、ロシアによるウクライナ侵攻を受け、エネルギー価格の高騰や蓄電池に用いられる材料・資源価格の高騰が生じており、多くの国や産業界が、蓄電池を経済、エネルギー、国家安全保障、気候変動問題のキーテクノロジーと位置づけ、活発な研究開発や産業政策に取り組んでいる。



図1.2.2-1 世界的な研究開発トレンド・技術開発の潮流

蓄電池の研究開発の方向性としては、高エネルギー密度化、用途に応じた適切な入出力密度（車載用電池の充電時間の短縮）、長寿命化や低コスト化、安全性の確保が挙げられる。また、現行のリチウムイオン電池は、リチウム、コバルト、ニッケルといった希少資源を利用している。急拡大が予測される需要に対して希少資源の供給が追いつかない可能性が懸念されており、リサイクル技術の開発やリチウムを使わない次世代蓄電池の研究開発が活発化している。

現行の液系リチウムイオン電池に関しては、正極材料・負極材料の研究開発による性能向上が進展している。特に希少資源代替による低コスト化を志向した高性能な正極材料の開発が急がれる。一方で、高エネルギー密度化や作動電圧の向上は電解液の分解による性能劣化を引き起こすため、新たな材料設計指針にもとづく電解液の探索や、分解の恐れのない固体電解質の研究開発が進んでいる。

次世代蓄電池として、エネルギー密度と資源量の観点から、リチウム金属二次電池、リチウム硫黄電池、リチウム空気電池、リチウム全固体電池、ナトリウムあるいはカリウムイオン電池、フッ化物電池、マグネシウム金属電池、レドックスフロー電池の改良や新規開発などが行われている。特にナトリウムイオン電池は、ナトリウム資源の豊富さから近年改めて注目が集まり、アカデミアによる研究開発や産業界による実用化研究開発が活発化している。

このような背景を受け、日本は2022年8月に経済産業省が「蓄電池産業戦略」を策定した。本戦略は、液系リチウムイオン電池のサプライチェーンリスク低減のための国内製造基盤の拡大やグローバルシェアの再拡大を目標としている。また、全固体電池などの次世代蓄電池の早期実用化に向けた研究開発や人材育成の強化を掲げている。さらに、蓄電池の経済安全保障上の重要性の高まりを受け、経済安全保障推進法が掲げる「特定重要物資」に2022年12月に指定された。

研究開発施策としては、JSTのALCA-SPRING、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のRISING3、SOLiD-EVなどの次世代蓄電池開発の他、グリーンイノベーション基金による産業界主導のプロジェクトが進行している。また、経済安全保障重要技術育成プログラムにおいても公募を開始し、選考が進んでいる。

米国では、エネルギー省（DOE）を中心として基礎研究から実用化研究までを幅広く展開している。基礎研究では、国立研究所や大学を中心に構成されるJCESR（Joint Center for Energy Storage Research）の取り組みが顕著である。溶媒和現象、動的界面現象、複雑性材料などのエネルギー貯蔵の基盤科学を推進している。また、対象となる電池系としても、多くのプロジェクトが進行することで、先進リチウムイオン電池（Si負極、Li金属負極）、全固体電池、ナトリウムイオン電池や多価イオン電池など幅広く研究に取り組んでいる。また、バイデン政権は自律的な蓄電池サプライチェーンの構築を進めるため2021年11月のインフラ投資・雇用法、2022年8月のインフレ削減法を相次いで成立させ、それらに基づいて蓄電池製造事業者や電気自動車普及促進のための産業政策を展開している。

欧州では、域内におけるバリューチェーン創出のため、EU各国において電池や材料の製造基盤の確保や研究開発に対して、巨額の投資を行っている。また、欧州委員会は、カーボンフットプリント規制、責任ある材料調達、リサイクル材活用規制を含んだ新バッテリー規則案を2020年に発表しており、ルールメイキングによる競争力や主導権の確保に動いている。これらの動きと協調する形で、EUにおける研究開発フレームワークプログラムであるHorizon Europeの構想の下、2021年BATT4EUが設立した。原料から材料、セル、パックモジュール、エンドユーザー、リサイクルを含めたサプライチェーン全体に関する研究開発が進行している。

中国は、2020年に「新エネルギー自動車産業発展計画」（2021-2035年）を発表しており、車載用蓄電池の高性能化やリサイクル技術の開発も大きな目標となっている。中国はCATL社を始め、リチウムイオン電池製造において高い市場シェアを獲得している。そのような企業が大学に講座を設置するなど、産業界と大学との密接な研究開発が進展している。

韓国は、2021年7月に「K-バッテリー発展戦略」を策定した。蓄電池の革新技術を国家戦略技術に指定

し、研究開発費用や設備投資の税額控除等を行っている。次世代蓄電池として、2025年までにリチウム硫黄電池、2027年に全固体電池の実用化を目指すとしてされている。これには大手電池メーカーを中心として約40兆ウォンの投資が計画されている。

このように、蓄電池は気候変動というグローバル課題の解決のためのキーテクノロジーであるとともに、成長産業としても期待され、激しい競争領域に置かれている。

再生可能エネルギーによる物質変換

風力や太陽光などの再生可能エネルギーからの電力は、世界的に低価格化が進んでおり、地球温暖化の解決のためにも大規模な利用が期待されている。一方で、再生可能エネルギーは広く薄く分布し、さらに生産と消費の過程で場所と時間のミスマッチがあるため、大量に導入するにはそのまま電力として利用する以外に、水素などの他の物質に変換し、貯蔵・輸送する必要がある。

再生可能エネルギーを直接利用して物質変換する技術として、水電解による水素製造、光触媒による水素製造（人工光合成）などのグリーン水素製造技術が挙げられる。グリーン水素が生産されれば、高圧水素、液体水素以外に、水素を利用した反応によるアンモニアや、有機ヒドライド、ギ酸などのエネルギーキャリアに変換し、水素エネルギーの貯蔵・輸送に活用できる。また、水素との反応によりCO₂を還元し、アルコール、エチレンを合成し、化学原料として利用することもカーボンニュートラル社会のための重要技術となる。さらに、水素は鉄・セメント・ガラス製造等のマテリアル製造における低炭素化技術としての利用も期待されており、CO₂排出量削減の切り札と考えられている。

他に、再生可能エネルギーを直接利用する物質変換には、電気化学反応によるCO₂の還元、アンモニアおよび有機ヒドライドの製造も挙げられる。これらは水素を介さずに、再生可能エネルギーからの電気を直接利用し、電気化学反応により有用物質を製造する技術である。

また、合成した燃料を高効率で利用するための燃料電池技術についても、技術革新はもとより社会実装の迅速な推進が不可欠となっている。

ここに挙げた技術のなかでも、水電解による水素製造技術が注目されている。地球温暖化抑制のためだけでなくエネルギー安全保障の観点からも、各国で大きなプロジェクトが次々と立ち上がっている。

日本は2017年12月に世界で初めての水素基本戦略を策定したが、EUおよび欧州諸国を筆頭に各国が2020年以降、次々と水素に関わる戦略を策定しており、欧州諸国における再エネ水素の導入目標規模は日本に比べてかなり大きい。

水電解には、常温から80℃程度の低温で運転するアルカリ水電解、固体高分子型（PEM型）水電解、アニオン交換膜型（AEM型）水電解、および500℃以上の高温で運転する高温水蒸気電解の4種類がある。

アルカリ水溶液を供給し電解を行うアルカリ水電解は、古くから研究されている電解法であり、大型の水電解装置の実証が進んでいる方式である。今後、高電流密度化を図るためには、材料の腐食防止対策、生成ガスの滞留による活性低下の克服などの課題がある。電極触媒としては、ニッケル系の触媒が利用されることが多い。また、出力が大きく変動する再生可能エネルギーからの電力では、変動に対する追従も問題となっており、大きな出力変動に対する電極および電極触媒の安定化なども課題となっている。

いずれの方式においても、温度、pH、電圧等の動作条件や反応環境に応じて、適用できる材料が制限されるため、新たな材料の発見による飛躍的な性能向上が期待されている。

電気化学プロセスを利用したCO₂還元も近年注目を集めている。CO₂電解還元では、CO、ギ酸、エチレン等のC₂以上化合物など多様な化合物が生成しうる。特に基礎化学品であるエチレンなどのC₂以上化合物の直接合成が注目されている。同様に、電気化学プロセスを利用したアンモニア、有機ヒドライドなどの水素キャリアの直接合成も報告されている。

日本では、NEDOのグリーンイノベーション基金事業によって、エネルギーキャリア、水素燃焼、水電解などの実証事業が進んでいる。また、JSTのALCA-SPRINGや関連のNEDOプロジェクトなど複数の国家ブ

プロジェクトが進行している。

CO₂電解については、NEDOのムーンショット型研究開発事業「目標4」にて、電気化学/CO₂資源化をキーワードとするプロジェクトが進められている。

米国ではDOEが業界横断的な水素および燃料電池関連の基礎および応用研究プロジェクトのH2@Scaleを進めており、2020年11月からは水素の製造、貯蔵、輸送、変換、燃料電池を含めた応用研究を行うHydrogen Program Planを進めている。さらに、DOEは、2021年10月にはEnergy Earthshots Initiativeを創設し、Hydrogen Shotを立ち上げた。水素エネルギーの活用に関し95億ドルを支出する戦略を発表し、10年後にクリーンな水素製造コストを1\$/kgとする事を目指している。

EUは2020年7月に水素戦略を発表し、2030年時点において欧州域内で40 GWの水電解装置を導入し、周辺国を含めた水素パイプラインインフラ構築を含む壮大な計画を進めている。欧州燃料電池水素共同実施機構(FCH JU)のプロジェクトが注目に値し、産官学をあげた研究開発と実証の両輪での製造、貯蔵、輸送、変換、利用を含めた水素技術全体への取組が進んでいる。

中国では、2022年1月時点で水素ステーションが178カ所稼働しており、水素ステーションの数でも、燃料電池自動車の累積販売台数でも日本を上回っている。水素・燃料電池開発に力を入れており、2035年までに100万台の燃料電池自動車の導入を目指している。また、2030年までに太陽光、風力発電設備容量を12億kW以上にするなどの目標を掲げている。多くの燃料電池を含む水素関連の研究開発重点プロジェクトも進んでいる。欧州、米国、日本企業も中国での水素・燃料電池事業を進展させている。

韓国では、中国同様に水素・燃料電池自動車の設置が進んでいる。2021年10月に「水素先導国家ビジョン」を策定し、大規模な水素の生産、輸送・貯蔵、活用に関する技術開発事業もスタートさせている。

mRNAナノ医薬

新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の世界的パンデミックを契機に、2020年に世界で初めてとなるmRNAワクチン(Pfizer社およびModerna社)が承認され、世界各国で使用された。mRNAワクチンは、脂質ナノ粒子などのキャリア分子に抗原タンパク質をコードしたmRNAを封入したもので、mRNAが宿主細胞内に取り込まれて翻訳されることにより抗原タンパク質が産生され、抗原特異的な免疫応答を誘導する。mRNAが生体内で分解されないように保護するため、ナノ医薬の分野で培われた、高分子や脂質により修飾する技術が用いられている。昨今のCOVID-19 mRNAワクチンの成功は、がんなどの多様な疾患に対するmRNAワクチンの臨床応用や産業化を推し進めると同時に、ワクチン以外の目的のmRNAナノ医薬の開発や、新たな分子設計および材料探索を目指した研究を活発化させている。

ナノ医薬の研究開発の歴史は長く、1970年代中頃から主にごん治療を目的として、医薬用核酸分子の安定性の確保、意図しない免疫反応の抑制、標的組織における選択的な翻訳などの実現を目指した技術開発がされてきた。固形がん組織は毛細血管・リンパ系が未発達であるため10~100 nm径の微粒子が集積し易いとするEnhanced Retention and Permeability (EPR)効果に基づいたナノ粒子のサイズ調整(特に小型化)や、標的細胞に特異的なリガンド分子を結合させることで、能動的に特定部位へ送達する技術などが開発された。また、EPR効果が乏しい組織に対しては、ナノ粒子のさらなる小型化や、表面修飾によって繊維組織の間隙あるいは細胞内部を通り抜ける技術、化学物質の投与や超音波などの外部刺激によりEPR効果を増強する方法などが報告されている。さらに、腫瘍組織の個体差に対応させ、治療精度を高めるために、治療と診断評価を一体的に行う「セラノスティクス」の技術が注目されており、治療薬に類似した生体内動態を有しかつ診断用プローブを搭載した「コンパニオン造影剤」を中核とした技術開発も進められている。

医薬用要素分子であるmRNAについては、翻訳効率や安定性の向上、また意図しない免疫反応の回避のため、塩基配列や核酸修飾、立体構造の設計などが検討されている。さらに、small interfering RNAによる「RNA干渉」(2006年ノーベル生理学医学賞)やCRISPR-Casシステムに基づくゲノム編集技術(2020年ノーベル化学賞)も利用されるようになってきている。

今後のナノ医薬開発においては、COVID-19以外の感染症を対象としたmRNAワクチン開発が展開されるとともに、がん予防を目指したワクチン開発にも注力が見込まれる。また、DNAはmRNAよりも化学的安定性に優れるため、ワクチン応用への期待が高い。DNAワクチンの実現には、DNAを細胞核へ輸送させるための技術開発が求められる。

さらに、ワクチン以外の医療応用、例えば、がん免疫療法、酵素補充療法、ゲノム編集治療を目的としたナノ医薬は、一層の研究開発が期待される重要技術である。これらの技術の実現のためには、より高効率かつ安定的なmRNA発現を叶える医薬用要素分子の開発に加え、キャリア用材料の探索を含めた送達技術の向上が必要である。具体的には、これまでナノ医薬開発で多く使われてきたポリエチレングリコール (PEG) に生体内での蓄積や抗体生産の可能性が示唆されたことから、新たなキャリア分子の設計が求められている。また、生体由来の細胞膜や細胞外小胞 (エクソソーム) と人工材料を組み合わせたハイブリッドシステムも、人工的には再現不可能な生体適合性や機能を利用できるとして近年研究が進められている。さらに、ターゲットとなる組織あるいは細胞で選択的に薬効を発揮させるため、脂質・高分子成分の構成の改良や各組織特異的な結合タンパク質で修飾する試みなどもある。併せて、ナノ医薬の投与方法 (静脈注射、吸引、鼻腔内投与、経口投与、膀胱内投与など) の検討も、組織選択性の向上には有用と考えられる。

米国では、国立衛生研究所 (NIH) の National Cancer Institute (NCI, 国立がん研究所) において、ナノテクノロジー特性評価研究所が設置され、がん治療または診断を目的としたナノ粒子の前臨床効果および毒性試験を実施している。また、同じくNCIのAlliance for Nanotechnology in Cancer では、分野横断的研究コミュニティを形成し、ナノテクノロジーを活用したがんの早期診断や治療を目指した研究開発を推進している。

欧州では、産業界と欧州委員会によって European Technology Platform Nanomedicine (ETPN) が2005年に設立され、ナノテクノロジーのヘルスケア応用に向けたイニシアティブとして活動している。再生医療とバイオマテリアル、ナノ治療薬 (ドラッグデリバリーを含む)、医療機器 (ナノ診断とイメージングを含む) などを対象としており、関連する様々なステークホルダー (学術、中小企業、公的機関など) が参画している。

日本では、日本医療研究開発機構 (AMED) における創薬基盤推進研究事業、次世代がん医療加速化研究事業、先端的バイオ創薬等基盤技術開発事業などでナノ医薬や治療薬の動態イメージングに関する研究開発が行われている。また、「ワクチン開発・生産体制強化戦略」に基づくAMEDのワクチン・新規モダリティ研究開発事業では、新たなワクチン開発に向け、シーズ探索と免疫応答評価、アジュバントやキャリアの開発、評価・解析技術、レギュレーション等の研究開発が進められている。本事業では、脂質ナノ粒子を含む多様なナノ医薬技術に関するデータベース構築が試みられており、技術共有によっても今後の技術発展の加速が期待される。

生体分子シーケンス

現代の生命科学研究においては、セントラルドグマ (DNA → (転写) mRNA → (翻訳) タンパク質) を基軸とした遺伝子発現の解析あるいは制御が、生命現象理解のための主たる手段となっている。DNAのシーケンス (配列解析) 技術は、高速化、自動化、低コスト化に加え、細胞叢の網羅的な大規模解析 (メタゲノム解析) や、一度に解読可能な塩基数の増加などを目指して、解析原理や装置、データ解析手法の開発が進められてきた。現在、次世代シーケンサー (NGS) は一研究室レベルでも使われるようになっている。また、解析対象となる生体分子の種類およびその修飾・立体構造特徴も拡がりを見せている。RNA配列は、逆転写反応を用いて相補的 (complementary) DNAを合成することでNGSにより網羅的解析が可能である (トランスクリプトーム解析)。より直接的に遺伝子の発現量を調べるためには、質量分析を主な手段としてタンパク質の同定と定量が試みられる (プロテオーム解析)。また、転写効率の制御に関わるゲノムDNAの化学修飾 (エピゲノム) について、塩基修飾のレベルから、ヒストン修飾、クロマチンの高次構造まで、シーケンス技術を基盤として解析する手法が発達している。タンパク質の翻訳後修飾や分解 (プロテオリシス) により

生じる多様なタンパク質一次配列・構成（プロテオフォーム）の解析も、昨今の潮流の一つである。さらに、これら複数種の情報を同時に取得するマルチオミクス技術の開発も、今後重要視される。

このような要素分子の網羅性を確保しながら、由来となる細胞の情報を1細胞レベルの分解能で取得するための技術開発が、近年精力的に進められてきた。特に、1細胞RNAシーケンスによるトランスクリプトーム解析により、同じゲノム情報を持つ細胞集団における遺伝子発現・形態の不均一性（ゆらぎ）や極少数個の特長的細胞の評価、分解系譜解析などが行われ、生命科学において大きな変革をもたらしている。

一方、NSGを用いた1細胞RNAシーケンスには課題もあり、例えば、読み取り長が数百塩基と限られ、比較的短いmRNAしか解読することができない。また、ポリメラーゼ連鎖反応（PCR）を用いるため、その過程で生じるロスやバイアスにより、低発現の遺伝子を見落とす可能性がある。そこで、1分子計測技術がこれらの課題を克服する手段として注目されている。ゼロモード導波路の中でDNA伸張反応を行い、取り込まれるDNAを1塩基毎に蛍光検出する1分子リアルタイムシーケンシング（SMRT）法と、生体ナノポアを利用してポアを通過するDNA塩基毎のイオン電流変化を検出するナノポアシーケンシング法が、現在有力とされている。また、タンパク質を1分子レベルで解析する手法の開発が、近年の特に大きな動きと言える。1分子タンパク質解析の開発方向性の1つは、アミノ酸配列の解読をしようとするものであり、多様な手法が提案されている中で、生体ナノポアを用いたペプチドシーケンス技術が発展著しい。また別の方向性として、タンパク質の高次構造や物理化学的性質の解析を目指した固体ナノポアセンサの開発も進められている。

さらに、細胞・組織の空間情報を保持したまま、オミクス解析を行う手法の開発も今後発展が見込まれる。2019年に10x Genomics社から製品化されたVisiumは、空間トランスクリプトーム解析を行う代表的なキットであるが、さらなる空間分解能の向上や、試料深部の解析を可能にするための技術開発に近年注力がされている。また、現在のオミクス解析では細胞を破碎して細胞内成分の抽出を行っているため、1つの細胞で時系列的な解析をすることは困難である。そこで、分子生物学的あるいはデータ解析的手段によりスナップショットのトランスクリプトームデータから時間情報を抽出する手法が考案されてきた。一方、2022年には低侵襲的に細胞内容物を採取することで1つの細胞から繰り返しトランスクリプトーム解析を行える手法が報告された。今後、時系列オミクス解析の展開に向け、非侵襲的サンプリング法の性能向上やハイスループット化に向けた技術進展も期待される。

米国では、国立衛生研究所（NIH）のNational Human Genome Research Institute（NHGRI）において、“Technology Development for Single-Molecule Protein Sequencing”プログラムが立ち上げられ、既存のプロテオーム解析技術を凌駕する、ハイスループット・高感度な1分子タンパク質シーケンス技術の開発が進められている。また、Northwestern大学の研究グループを中心に、トップダウンプロテオミクスのコンソーシアムが立ち上げられ、“Human Proteoform Project”が始動している。Human Proteoform Atlas（HPfA）を構築することを目指しており、医療に関連するプロテオフォーム研究の促進に加え、プロテオフォーム解析に資する1分子オミクス解析技術への投資も行われる。

欧州では、Horizon 2020および後継のHorizon Europeにて、様々なオミクス情報のシーケンス技術に関するプロジェクトが実施されている。特に、1分子レベルのタンパク質解析を目指す大規模プログラムとしては、“Proteome profiling using plasmonic nanopore sensors (NanoProt-ID)”および“Ultrafast Raman Technologies for Protein Identification and Sequencing (ProteinID)”がある。

日本では、JST戦略的創造研究推進事業のCREST・さきがけ複合領域「統合1細胞解析のための革新的技術基盤」(CREST:2014~2021年度、さきがけ:2014~2019年度)およびCREST研究領域「多細胞間での時空間的な相互作用の理解を目指した技術・解析基盤の創出」(2019~2026年度)において、1細胞オミクス技術の開発や、それを応用した多細胞動態の解析技術の開発が推進されている。その他、JSTのERATO、日本学術振興機構（JSPS）科学研究費助成事業の新学術領域研究、AMEDムーンショット型研究開発事業などの大型プロジェクトの中で、固体・生体ナノポアを用いた解析技術の研究開発が取り組まれている。

先端半導体

これまで半導体デバイスの高性能化を支え続けてきたムーア則やデナード則が終焉を迎えても、従来のCMOSを超える新構造・新動作原理のデバイスを開発し、超高速・超低消費電力でデータ処理する集積システムの実現をめざす研究開発は続けられている。

ロジックデバイスに関しては、「xx nm 世代」で呼称されるテクノロジーノードは、かつてはLSIの最小寸法であるゲート長を表していたが、14nm 世代以降は停滞が見られるようになり、過去10年の間、ほぼ縮小することがなくなった。ゲート長のシュリンクが鈍化した後は、デバイス構造の変更や、配線、コンタクトピッチ縮小で、集積化を続けてきたが、それも2 nm 当たりで限界を迎えると考えられている。それ以降の世代については、チャンネル材新たに二次元物質を導入してムーア則を追求しようとする流れや、磁性体、強誘電体などの材料を導入して新たな動作原理に基づく記憶デバイスや脳模倣デバイスといった機能デバイスを追求していこうとの流れが生まれてくると予想される。

ロジックデバイスの構造については、3 nm 世代までが現行のFinFET 構造をとるが、それ以降は、シリコンナノシートやナノワイヤを用いたGate All Around FET (GAAFET) を単位とし、それをさらに三次元的に積層していくことで集積化を図るとされている。量産技術が確立しているFinFET 構造から、全く構造の異なるGAAFET 構造に変わること、技術的には大きな変革期といえる。ロジックの配線材料については、5 nm あたりまでは現行の銅 (Cu) 配線が使われる予定であるが、それ以降の細かい配線ではCu 配線の抵抗増大が顕著になり、どのような材料を配線に使うかの決着はまだついていない。現時点ではコバルト (Co)、ルテニウム (Ru) が最有力候補となっている。

極低温動作する量子コンピュータの実用化には、現行のように一つの量子ビットの制御や読み取りのための信号線を、室温のエレクトロニクス機器から複数本配するやり方では量子ビットの高集積化に伴い、室温からの信号線の数が一方向的に増大し、実装上、あるいは熱の流入などで限界を迎える事は明らかである。そこで、室温から少ない配線数で制御信号を極低温部近く (4 K 程度) まで送り、そこで量子ビットチップ向けの多数の高周波信号を作りだす、CMOS デバイス (クライオCMOS) の開発が行われている。要求される性能は、量子ビットチップに必要な多数の高周波信号を、通常のSi CMOS が想定していない低温環境において、量子ビットチップの動作に影響を与えるような発熱や電磁氣的ノイズを発生させずに入出力することにある。

CMOSの基本であるブール論理ではなく、アナログ的な処理を行うことで低消費電力化を目指す検討も続いている。低消費・高効率演算を可能とするアナログコンピューティングデバイスとしては、トポロジカル絶縁体ロジックデバイス、スピントルクゲートデバイス、磁壁ロジックデバイスの開発が進展している。また、生体神経網を模したスパイクニューラルネットワークや、MTJ (Magnetic Tunnel Junction)、SEBAT (Single-electron bipolar avalanche transistor) など動作不良確率を盛り込んだプロバビリティック回路システムの研究が進められている。

不揮発メモリに関しては、最も普及が進んでいる3次元NANDフラッシュの3次元集積が一層進んでいく方向にある他、カルコゲナイド材料の結晶相を変化させ抵抗率を数桁変調させる相変化型抵抗変化メモリ (Phase Change Memory: PCM) や、MTJのトンネル抵抗率が、絶縁層両側の磁性体の磁化の相対的な向きによって変化することを利用した磁気メモリ (Magnetic Random Access memory: MRAM) などが引き続き検討されている。PCMについては、Intel/Micron社がクロスポイント構造の平面型素子を2層積層した大容量な3DXPのプレスリリースした後、開発が活発化した。また、MRAMについては、現在主流のSTT (Spin Transfer Torque) 書き込み方式が、2021年頃を境に製品開発ステージに移行しており、主要半導体企業 (IBM、TSMC、Global Foundry、Samsung、Kioxia、SKhynix、Sony、Runesas、Intel、EverSpin、Huawei) により実用化・応用検討が進められている。基礎的な研究開発は、次世代のSOT (Spin Orbit Torque) 方式などに移っている。

各国の政策に関しては、日本では、令和元年補正予算として、ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業 (1,100億円) の内、先端半導体製造技術の開発 (補助) に関するNEDOプロジェクトが2021

年より開始された。2022年には、経済産業省による「半導体戦略」の具体策となる「次世代半導体の設計・製造基盤確立に向けて」が公表され、熊本県にTSMCの28nm世代（平面型トランジスタ）の量産工場の誘致・建設が開始された。さらに、国際連携をベースとし、国内2nm世代ロジック半導体（3次元トランジスタ：積層GAAFET）の量産体制の確立（Rapidus）とそれ以降の研究開発組織である技術研究組合最先端半導体技術センター（Leading-edge Semiconductor Technology Center: LSTC）の開設を含む国策としての半導体ロードマップも明らかにされた。また、文部科学省も、2022年に、半導体技術に関する先行研究と人材育成を目的とした「次世代X-nics半導体創生拠点形成事業」を開始した。

米国は、国内の半導体製造を復活させ、研究開発に資金を提供し、技術サプライチェーンを確保することを目指した“CHIPS（Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors）for America”を開始した。ここでは、米国防総省が既の実施していた取り組みに少なくとも120億米ドルを追加投入する他、半導体の研究開発に向けてその他の連邦政府機関に50億米ドルを投資することが提案されている。また、世界最先端の半導体の微細化を実現しているTSMCに対して、米国が国内へ半導体工場を建設するよう要請し、アリゾナ州に半導体工場を建設することが決定している。

欧州では、欧州連合（EU）の欧州委員会が、人工知能（AI）などを対象に、今後10年間とさらにその先を見据えた画期的なデジタル戦略を発表した。EU圏の企業が産業データを共有できる制度を構築することでAI開発での産業データ活用を進めるとしている。AI開発を加速させるため、今後10年は年間200億ユーロの投資を呼び込む見込みである。

このように、ここ数年の米中経済摩擦、COVID-19パンデミック、ロシアのウクライナ侵攻などで深まったサプライチェーンへの不安から、最重要戦略物資としての先端半導体に世界各国の注目が集まる。これまで、少数のファウンダリに微細化投資と生産を任せることで効率化を図ってきた半導体製造に対する姿勢からの揺り戻しが、世界的に急速に進んでいる。

脳型AIチップ

高度なデジタル社会の実現には、フィジカル空間で生み出されるデータをサイバー空間で蓄積し、必要な情報に処理して、分析・解析・認識を経て、その後の適切な処置・行動を判断し、フィジカル空間にフィードバックすることが重要になる。これには、人間のように周りの環境を認識・理解し、状況に合わせた柔軟な判断を行うような高度な情報処理が求められる。すでに画像認識、音声認識、翻訳、自動運転、病気の診断、新材料探索、デバイス設計など様々な用途にクラウド上でのAI技術が用いられるようになってきたが、今後は自動車やセンサ端末などエッジでのリアルタイム性に優れた高度なAI処理を低消費電力で行うことが重要になってきている。そのため、複雑な知的情報処理を高エネルギー効率で自律的に実行している脳神経系を模倣あるいはそこからヒントを得て、高エネルギー効率でAI処理を行う脳型AIチップへの期待が高まっている。

脳型AIチップの研究開発としては、デジタル回路によるAIアクセラレータ、メモリ回路の中で演算を行うコンピュータインメモリ（CIM）、スパイクニューロンの動作を模倣したニューロモルフィックチップ、物理的な特性などを利用したリザーブコンピューティングなどが進められている。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、研究開発の大きなトレンドとなっている。例えば、ISSCCでは、2018年から2021年まで連続で深層学習や脳模倣・脳型コンピューティングに関するプレナリートークが行われ、機械学習プロセッサ、AIアクセラレータといったセッションで、様々なAIチップの試作結果が報告されている。

クラウド上のAIアクセラレータでは、2021年にGoogleがTensor Processing UnitとしてTPU4、TPU5を開発し、LSIの短期開発・小型化を可能とするAIによる最適回路配置・配線への適用などが実証されている。また、NVIDIAは2022年に自然言語処理に適した回路コアを導入して4PFLOPSを実現している。エッジ向けには、4ビット、2ビットと演算精度を落としたデジタルCNN回路や、アナログ回路を使ったCNN回路の研究開発が進められ、イスラエル、米国、フランスなどの多くの新企業により市場投入が開始されている。

CIMは、脳細胞のメカニズムを模倣した構成であり、メモリアレイのグリッドの演算素子は積（重みと入力）のみを行い、和は共通のカラムラインで電流の総和として一括して処理する。メモリに不揮発性メモリ（NVRAM：Non-Volatile RAM）を用いるもの（nv-CIM）では実用化研究に移行しており、2020年から製品化も始まっている。

ニューロモルフィックチップでは、デジタル回路によるシステム（IBMのTrueNorth、IntelのLoihiなど）に加え、アナログ回路をベースとしたシステム（ハイデルベルク大のBrainScaleS）、デジタル/アナログ混在回路によるシステム（Stanford大のBrainDrop、UZHのDYNAPsなど）が開発されており、最近ではLoihi2、BrainScaleS2などの後継のチップを用いた活動へと繋がっている。

リザバーコンピューティングでは、Echo State Property（ESP）と呼ばれる性質（入力の伝達と非線形作用、入力の忘却、および入出力の再現性）を持てばよく、構成素子の持つダイナミクスの多様性が計算性能にとって重要であり、必ずしも神経活動を再現している必要がない。このため、多様なネットワークモデルを利用することができ、材料・デバイス分野（光、スピン、軟体（生体やゴムのような柔らかいもの）、分子など）の研究が活発になっている。

日本では、2019年6月に統合イノベーション戦略推進会議が「AI戦略2019」を発表し、2021年6月に「AI戦略2021～人・産業・地域・政府全てにAI～」、2022年4月「AI戦略2022」にて戦略が更新されており、AIの社会実装や利活用に重きを置いた戦略にシフトしつつある。主要プロジェクトとしては、NEDO「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」（2016～2027年度）、JSPS研究拠点形成事業「マテリアル知能による革新的知覚演算システム」（2022～2026年度）、JSTのCREST研究領域「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術」（2018～2024年度）、さきがけ研究領域「革新的コンピューティング技術の開拓」（2018～2023年度）がある。これまでAI技術についてはソフトウェアを中心に、情報処理学会、人工知能学会で議論されてきたが、2019年には応用物理学会でデバイス・材料のAI応用を目指すフォーカストセッション「AIエレクトロニクス」が創設され、デバイス・材料の研究者を含めた研究開発が活発化している。

米国では、2016年にAI戦略「The National Artificial Intelligence Research and Development Strategic Plan」が策定され、これを踏まえて2020年末に「Pioneering The Future Advanced Computing Ecosystem: A Strategic Plan」でPost-Moore、Post-von Neumannに向けて、ニューロモルフィック計算、生物模倣計算、新しい材料とデバイスの開発、チップデザインからシステムインテグレーションまでのエコシステムの構築を目指したプランが示されている。AIデバイス関連の研究開発プロジェクトとしては、例えば国防高等研究計画局（DARPA）のElectronics Resurgence Initiative（ERI、2017年～）の「Lifelong Learning Machines（L2M）」があり、タスクの実行中に学習が可能な革新的なAIアーキテクチャ、機械学習技術などの開発を目指している。

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が進められ、2021年からは第二世代のBrainScaleS-2/SpiNNaker-2チップに活動の軸を移している。

中国では、2017年に国務院が「次世代人工知能発展計画（AI2030）」を公表し、2030年までのAI発展に関する3段階目標を設定している。重点項目の一つとして「基礎分野（スマートセンサ、ニューラルネット・チップ等）」があり、2030年までにAI理論・技術・応用で世界トップ水準となり、中国が世界の“AI革新センター”になるとしている。

量子コンピューティング

汎用性が高く複雑な演算が可能とされるゲート型量子コンピュータは、従来のコンピュータの処理速度を

はるかに上回る計算が可能であるため、実用化によって新薬の開発などに大きな変革をもたらすことが期待されている。ゲート型量子コンピュータには、超伝導量子ビット、トラップドイオン量子ビット、中性冷却原子量子ビット、光子とフォトニクス技術を用いた量子ビット、シリコン量子ビット（量子ドット）、トポロジカル量子ビット、等様々な方式が提案されており、それぞれ実用化に向けた開発が進んでいる。

研究開発が先行している超伝導量子ビットでは、実用的な計算の実行には100万量子ビットが必要とされている。超伝導量子ビットの制御に必要な高密度（多ビット）の高周波生成・制御システムの開発、パッケージ技術、それらを格納する冷凍機、等、量子ビット素子だけでなく周辺要素の進展によって、大規模化だけでなく、忠実度やコヒーレンス時間の改善も進展している。IBMは2022年に開発ロードマップを更新し、2025年に4000ビット以上を実現する計画を明らかにした。日本では、富士通が理化学研究所と共同で1000ビット規模の量子コンピュータの研究開発を表明した。量子誤り訂正/耐性に関する研究も重要になっている。Googleは2022年に表面符号で論理量子ビットの実現につながる誤り抑制実験を発表した。

このようにゲート型量子コンピュータの研究開発は着実な進展を見せているが、実用的な量子コンピューティングに必要となる100万量子ビット以上の大規模集積化には20年以上が必要とされているため、100量子ビットから1000量子ビットレベルのノイズを含んだ中間スケール量子コンピュータであるNISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum computing) の開発も世界各国で盛んに実施されている。今のところNISQは実用的な計算で従来型コンピュータに対する優位性を示すには至っていないが、今後新しいアルゴリズム・アプリケーションが発見されれば応用が加速すると期待されている。

トラップドイオン量子ビットでは、2020年に米IonQが32量子ビットのコンピュータを発表した。また、米Quantinuumは2022年7月に全結合の20量子ビットシステム開発に成功したと報告している。量子誤り訂正に関しては、2021年にメリーランド大学、IonQなどが量子誤り訂正/耐性の実現、2022年にQuantinuumが誤り耐性を有する2量子ビットゲートの実現を報告している。冷却原子量子ビットにも大きな進展が見られ、米国ColdQuantaなど複数のスタートアップが設立されている。日本でもリユードベリ軌道電子の超高速制御による量子計算の研究開発が進んでいる。

光子を用いる方式ではシリコンフォトニクス等を活用した小型化・集積化が試みられている。米PsiQuantumは半導体製造装置を用いて量子誤り訂正可能で拡張性を備えた光量子コンピュータを開発している。中国科学技術大学は2020年に光量子コンピュータで量子超越性を示したと発表し、中国は米国に次いで量子超越性を示すことに成功した。日本でも東京大学と理化学研究所が中心となって、独自アーキテクチャの光量子コンピュータを開発中である。その他、半導体量子ビットやトポロジカル量子ビット等でも高精度制御による忠実度の改善、量子ビットもつれ状態の生成、量子誤り訂正実現、等が報告されている。

ゲート型量子コンピュータ以外に、組み合わせ最適化問題を解くことに特化した量子アニーリング型コンピュータも盛んに研究されており、カナダD-Waveは5000量子ビット超の商用ハードウェアシステムを発表するなど集積化が進められている。

量子科学技術に関して主要国はそれぞれ国家戦略を構築しており、それに基づく新たな国家プロジェクトを進めている。そのなかで量子コンピュータは最重要課題と位置づけられ、特に米国、EU、中国では巨額の投資に基づいた研究開発が行われている。米国では、2018年の国家量子イニシアティブ法（The National Quantum Initiative Act）に基づく量子技術に向けた国家投資が進んでいる。2021年度には7億9,300万ドルが計上されており、2022年度に向けて8億7,700万ドルが要求されている。研究拠点化では2022年時点で、5ヶ所の米国国立科学財団（NSF）Quantum Leap Challenge Institutes、5ヶ所のDOE Quantum Information Science (QIS) Research Centers、3ヶ所の国防権限法（NDAA）QIS Research Centersが量子拠点として運営されている。また、2022年に新たに制定された米国半導体・科学法では量子技術開発の後押しがアナウンスされた。欧州では、EU Quantum Flagshipが2022年から新しいQUCATSと呼ばれる新しいフェーズに移り、量子技術の普及、協力、活用に向けた取り組み、標準化やベンチマーク、量子技術に関連する人材教育や訓練の開発・評価などの活動が強化されている。中国では、第

13次5ヶ年計画（2016～2020年）に引き続き、2021年からの第14次5カ年計画でも量子コンピュータの研究開発の強化が謳われている。企業も本源量子、アリババグループなどが量子コンピュータに取り組んでおり、百度グループは2022年にクラウドサービスの運用をアナウンスした。

日本では2020年の内閣府「量子技術イノベーション戦略」をさらに進め、2022年には内閣府「量子未来社会ビジョン」によって量子技術による社会変革への展望が示された。量子技術の推進拠点は2拠点増加し10拠点となった。光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）のフラッグシッププロジェクトでは、初の国産超伝導量子コンピュータ実機による量子アプリケーション検証実験を2023年から開始している。Q-LEAPでは教育プログラムも開始し、研究者や技術者の育成が強化されている。内閣府のムーンショット目標6は、2050年までに誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現を目指している。2022年度に新たに追加の公募がなされ、冷却原子、半導体量子ビットに関する新たなテーマが立ち上がることになった。NEDO「量子計算及びイジング計算システムの統合型研究開発」は、ハードウェア開発、ミドルウェア開発、ソフトウェア開発の三つの領域からなる統合的な研究プロジェクトである。統一的なプログラミングによってイジングマシンを活用するためのソフトウェア開発を実施している。

次世代パワー半導体

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、脱化石燃料のため太陽光発電に代表される再生可能エネルギーの導入、それに伴う電力網のスマートグリッド化、さらに自動車の電動化に代表される輸送機器、産業機器、各家庭での電力有効利用などが求められており、効率的に電力変換を行う技術であるパワーエレクトロニクス的高度化要求が高まっている。現在のパワー半導体は、主にシリコン（Si）半導体が用いられており、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現在もデバイス性能の向上が図られ、200mmから300mm製造ラインへの移行による低価格化が進められている。しかしSiの材料定数に依存するデバイス性能の限界から、中・高耐圧以上の用途では、高耐圧化と低損失化（低オン抵抗化）の両立に優れたワイドバンドギャップ半導体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には、結晶品質向上、ウェハの大口径化、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、長期信頼性向上など多くの研究開発課題があるが、電力機器やエレクトロニクス機器の省電力化によるCO₂排出量の大幅な削減への期待から、世界で活発な研究開発が行われている。

ワイドバンドギャップ半導体で最も開発の進んでいる炭化ケイ素（SiC）は、ショットキーバリアダイオードの実用化から20年、パワーMOSFETの実用化から10年が経過し、それらを組み込んで高効率化、小型化を達成した製品やシステムが多くみられるようになった。応用例としては、電車（新幹線N700S、山手線、東京メトロ銀座線など）と電気自動車（Tesla Model 3など）がある。しかし、SiCの基板・ウェハ作製やデバイス集積化などの技術レベルはSiには程遠く、コストの面も含めて研究開発課題への取り組みが重要になっている。

窒化ガリウム（GaN）はSiに比べて低オン抵抗、高速スイッチングが可能でキャパシタやインダクタの大幅な小型化が可能のため、2019年頃からGaN横型パワーデバイスを65W以上の大容量のUSB充電器に搭載した製品が登場し急速に広まっている。Si基板上に作製した横型GaN-HEMT（GaN on Si）は移動体通信の基地局に使用され始め、最近ではSiC基板上に作製したGaN-HEMT（GaN on SiC）の使用も検討されている。GaN自立基板についても近年進展が著しく、ハイドライド気相成長（HVPE）法、アモノサーマル法、Naフラックス法などで4インチ基板が発売され、さらに大口径の基板開発も進められている。

酸化ガリウム（Ga₂O₃）は最安定結晶構造のβ-Ga₂O₃のバルク単結晶融液成長が比較的容易にできるため、最近急速に関心が高まっており、日本、米国、中国を中心にトランジスタ、ダイオードの開発成果が多数発表されるようになってきている。また、準安定構造のコランダム型α-Ga₂O₃の薄膜結晶成長やデバイス開発も活発化している。α-Ga₂O₃は、主にサファイア基板へのヘテロエピタキシャル成長で得られる結晶構造であるため、準安定構造の中では最も研究が進んでおり、FLOSFIA社ではすでにα-Ga₂O₃を用いたショットキーバリア

ダイオード (SBD) を用いた DC/DC 降圧コンバーターの販売を開始している。

国内の研究開発プロジェクトとしては、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」(2009～2019年度)、内閣府の戦略的イノベーション創造プロジェクト (SIP)「次世代パワーエレクトロニクス」(2014～2018年度)が行われた。最近では、NEDO「グリーンイノベーション基金事業/次世代デジタルインフラの構築」(2021～2030年度)で8インチの高品質低コストSiC単結晶/ウェハ製造技術、8インチ次世代SiC MOSFET、次世代高耐压電力変換機器向けモジュールなどの開発、第2期SIPの「IoE社会のエネルギーシステム」(2018年度)のサブテーマ「IoE共通基盤技術」として、ワイドバンドギャップ半導体を用いたユニバーサルスマートパワーモジュール (USPM) や α -Ga₂O₃パワートランジスタの開発、「ワイヤレス電力伝送システムの基盤技術」としてGaNデバイスの研究開発などが行われている。基礎的な研究としては、文部科学省の「革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業」(2021～2025年度)において、SiCのMOS界面科学の構築と新規MOS構造形成技術が取り組まれている。

米国では、国防総省 (DOD) 海軍研究局 (ONR) のMURI (Multidisciplinary University Research Initiatives Program)、NEPTUNE (Naval Enterprise Partnership Teaming with Universities for National Excellence)、DOEエネルギー高等研究計画局 (ARPA-E) のSWITCHES (Strategies for Wide Bandgap, Inexpensive Transistors for Controlling High-Efficiency Systems) などのプログラムが実施されている。最近ではSiCやGaNよりもバンドギャップの大きな Ultrawide bandgap (UWBG) が注目され、それに伴いこの分野への研究投資が拡大し、アカデミアのGa₂O₃研究者人口は増加している。

欧州では、SiC関係でSPEED (SiC Power Electronics Technology for Energy Efficient Devices、2014～2017年)、CHALLENGE (3C-SiC Hetero-epitaxially grown on silicon compliant substrates and new 3C-SiC substrates for sustainable wide-band-gap power devices、2017～2021年)、OSIRIS (Optimal SiC substrates for Integrated Microwave and Power Circuits、2016年～)、WInSiC4AP (Wide Band Gap Innovative SiC for Advanced Power、2017～2020年)などが行われてきた。GaN関係では、PowerBase Project (2015～2018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られた。Ga₂O₃関係では、ドイツベルリン地区の国研、大学のグループにより、GraFOx (Growth and fundamentals of oxides for electronic applications) というGa₂O₃結晶成長、物性研究に関する大型研究ファンド (4年総額 1.1 Mユーロ) が2016年から2020年まで実施され、その後継プロジェクト (GraFOx2) が2020年7月にスタートしている。

中国では、国家自然科学基金および国家重点研究開発計画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。中国国内に鉄道やEVメーカーなどのユーザーが多数存在するため、ウェハからデバイス、モジュールまで全方位での研究開発が行われている。GaN-on-Si横型パワーデバイスに多額の研究費が投入され、GaN-on-GaN研究も増えている。GaN-on-Siを利用した製品 (PC用ACアダプター) の企業が多数あり、チップメーカーと連携し着実に技術を高度化させている。

データ駆動型材料設計・創製

SDGsの達成やSociety 5.0の実現に向けて、材料開発に対する要求がますます高度化している。このため、材料開発は多元素化・複合化や準安定相・ハイエントロピー相の利用などの方向に向かっており、材料探索空間 (探索の範囲) が急拡大している。この広大な材料探索空間を従来の材料探索技術 (実験科学・計算科学・理論科学を駆使した試行錯誤的アプローチ) のみで探索するのはもはや不可能となっており、データ科学とAI技術を駆使したデータ駆動型物質・材料開発が必須とされ、世界的に急ピッチで技術開発が進められている。

2011年に米国が「Materials Genome Initiative (MGI)」を発表して以来、マテリアルズ・インフォマティクスは、特に、新規物質・材料の設計・探索において有力な手法であることが様々な研究事例をもって実証され、材料研究にデータ科学を活用することが今では日常的になりつつある。今後は、材料製造プロセス

スを探索・最適化するプロセス・インフォマティクスや、計測・解析を効率化する計測インフォマティクスとの連携の重要性が増している。また、広大な材料探索空間においてデータ駆動型材料設計・創製を行うために、実験DXの活用も重要であり、ロボットなどによるハイスループット実験や、AI技術によるスペクトル解釈・画像解析、これらを統合した自律的最適化手法、さらにデータ蓄積・活用基盤は、材料設計・創製に大きく貢献するものである。

米国においては、MGIの初期5年間で一度終了したのちは国家政策上の後継は顕在化していなかったが、2021年11月に、この先5年間で想定した戦略目標 MGI Strategic Plan 2021が発表され、(1)材料イノベーション基盤 (MII: Materials Innovation Infrastructure) を統合すること、(2)材料データの力を活用すること、(3)材料研究開発の労働力について教育と訓練を行い繋げていくことの3つのゴールが掲げられている。

欧州においては、FAIR Data Infrastructure for Physics, Chemistry, Materials Science, and Astronomy e.V. (FAIR-DI) が、FAIR原則に従うデータ管理の実現と、そのための世界的なデータ・インフラストラクチャーを構築することを目的として2018年9月に発足している。また、エクサスケールのHigh Performance Computing基盤としては、MATERIALS design at the eXascale (MAX) a European centre of excellenceが設置され、スイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL) が中核的な役割を果たしている。

わが国においては、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)」(2015~2019年度)において、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きた。

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)」(2016~2021年度)では、主に有機系材料を対象とし、計算・プロセス・計測の三位一体による革新的な材料基盤の構築、従来と比較して試作回数・開発期間の1/20への短縮、国内素材産業の優位性確保のためプロジェクト成果の実用化を最終目標として研究が行われた。

2018年には内閣府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」(2018~2022年度)が開始され、欲しい性能から材料・プロセスをデザインする「逆問題」に対応した次世代マテリアルズ・インテグレーション (MI) システムを構築し、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する先端的な構造材料・プロセスの事業化をめざしている。

JST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」(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」(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」(2017~2024年度)が相次いで発足した。

第6期科学技術・イノベーション基本計画においては、研究力の強化のための施策として、オープンサイエンスやデータ駆動型研究等の新たな研究システムの構築が挙げられている。具体的な施策として、研究データの管理・利活用、スマートラボ・AI等を活用した研究の加速や、研究施設・設備・機器の整備・共用、研究DXが開拓する新しい研究コミュニティ・環境の醸成が取り上げられている。2021年4月には、内閣府においてマテリアル革新力強化戦略が策定され、アクション・プランの1つとして「マテリアル・データと製造技術を活用したデータ駆動型研究開発の促進」が示され、具体的には、良質なマテリアルの実データ・ノウハウ・未利用データの収集・蓄積・利活用促進や、製造技術とデータサイエンスの融合、革新的製造プロセス技術の開発が記載されている。

マテリアル革新力強化戦略を踏まえ、文部科学省では、マテリアルDXプラットフォーム構想を開始した。

データ創出から、データ統合・管理、データ利活用まで一貫通貫した研究DXを推進することを目指し、①データ中核拠点整備、②データ創出基盤構築（マテリアル先端リサーチインフラ（ARIM））、③データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト開始をし、それぞれが強く連携してマテリアル研究開発を推進することを目指している。データ中核拠点は、NIMSが担い、ARIMの利用を通じて新たに創出されるデータを含めて、利活用できる材料データプラットフォーム事業を推進する。ARIMは、データ創出基盤として、7つの重要なマテリアル領域をカバーするかたちで、全国25の大学・研究機関が参加して2021年度よりスタートした。各機関が先端共用設備を外部に解放し、それを利用した研究からの高品質なデータを創出する基盤としての役割を果たすとともに、得られたデータを収集・構造化し、利用しやすい形で登録するための手法も整備しつつある。データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクトは、データ活用型研究を取り入れることにより革新的機能を有するマテリアルを創出することを目的としており、2022年度から「極限環境対応構造材料研究拠点（代表機関：東北大学）」「バイオ・高分子ビッグデータ駆動による完全循環型バイオアダプティブ材料の創出拠点（代表機関：京都大学）」「智慧とデータが拓くエレクトロニクス新材料開発拠点（代表機関：東京工業大学）」「再生可能エネルギー最大導入に向けた電気化学材料研究拠点（代表機関：東京大学）」「データ創出・活用型磁性材料開発拠点（代表機関：物質・材料研究機構）」の5拠間で研究開発プロジェクトが開始された。

以上、述べてきたように、広大な材料探索空間におけるデータ駆動型材料設計・創製の重要性が高まっている。

低次元・トポロジカル材料

Si系半導体によるCMOSテクノロジーの限界が語られるようになる中、次の世代のデバイスを構成する材料の模索が積極的に行われている。そのような材料の候補として、シリコンを凌駕する輸送特性を有するグラフェンに代表される二次元材料や、電子軌道の対称性によって守られた堅牢（ロバスト）な電子構造を持ち、外乱による信号やエネルギー散逸がおこりにくいトポロジカル材料などが特に注目を集めている。

低次元材料が従来の三次元半導体と大きく異なる点は、①「原子～分子レベルでの薄さ、細さ」という構造的特徴を持った物質が示す特異な物性やその応用の可能性、②複数の二次元物質をビルディングブロックとした新たな材料の創生や、二次元物質の積層界面を作ることで生じる新たな機能の可能性である。前者については、グラフェン、カルコゲン化物（カルコゲナイド）シートなど二次元物質（原子層物質）に特徴的な電子状態（層数に依存した電子バンド構造の変調、ディラック電子系、非常に高い易動度、等）から、それを用いたエレクトロニクスデバイス、エネルギーデバイス、低次元物質特有の光学特性や磁気・スピン特性などを利用した、オプトエレクトロニクスやスピントロニクスなどへの展開が検討されている。また、後者については、ヘテロ積層によってトポロジカルな性質を発現させた例や、ツイスト積層によって母物質では現れない物性を発現させた例がある。適切な組み合わせを選ぶことで有用な機能を出すことが可能である。同時に、界面の超構造等に注目することで元々の低次元物質からは想像もしなかった物性が発現することが分かっている。

トポロジーは位相幾何学という数学の一分野であり、ものの形を連続変形しても保たれる量に焦点を当てたものである。近年特に注目が集まっている物質科学におけるトポロジーは、波動関数やハミルトニアンといった量子力学的な要素がいくつかのパラメータに依存しているときに、そのパラメータが連続的に変化しても不変となるような量に着目したもので、そのような不変性を利用することで、ノイズ・外乱に対して耐性の高い信号処理を実現できるのではないかと期待を集めている。トポロジカル物質群の中核をなすトポロジカル絶縁体は、内部は絶縁体状態であるにもかかわらず、表面にトポロジーに特徴づけられた特異な金属状態が実現している物質である。その金属状態を流れる電子は質量がほぼゼロで、かつスピンの向きが揃っていることが特徴である。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準粒子が存在しうること、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準粒子が存在することなどが相

次いで発見されている。これらの準粒子はトポロジカル物質の特異な物性の起源となっている。さらに、実空間におけるトポロジーに起因した特異なナノスケールスピン配列構造であるスキルミオンは、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。

日本における研究は、NEDO「希少金属代替材料開発プロジェクト」の中の「透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発」(2007～2011年度)を皮切りに、2012年、NEDO「革新的ナノカーボン材料先導研究開発」(2011～2012年度)、NEDO「低炭素社会を実現する革新的カーボンナノチューブ複合材料開発プロジェクト/グラフェン基盤研究開発」(2012～2014年度)、JSPS新学術領域研究「原子層科学」(2013～2017年度)、2014年NEDO「低炭素社会を実現するナノ炭素材料実用化プロジェクト」(2014～2016年度)、JSTのCREST研究領域「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出」(2014～2021年度)、NEDOエネルギー・環境新技術先導研究プログラム「二次元材料の産業化に向けた革新的製造プロセスとデバイス作製基盤技術の開発」(2021年度) 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)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)、JSPS新学術領域研究「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)、同じく新学術領域研究「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」(2015～2019年度)などで継続的に推進されてきた。また、現在も、JSPS学術変革領域研究(A)「2.5次元物質科学：社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト」(2021～2025年度)や、JSTのCREST研究領域「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」(2018～2025年度)およびさきがけ研究領域「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」(2018～2023年度)の中で新たな成果が生まれている。一方、世界各国でも基礎研究から応用研究、までを目指す大型プロジェクトや産業界での実用化に向けた展開が行われている。低次元物質に関しては、2010年度ノーベル物理学賞受賞を契機として、欧州においては2013年から10年間10億ユーロの計画でGraphene Flagshipが開始され、欧州の当該分野の科学技術水準の向上と産業応用の加速化を推進する原動力として機能している。英国やドイツもそれぞれ独自に、基礎から応用にいたる二次元材料とそのデバイス応用研究を行っている。中国では、泰州巨納新能源有限公司が中国初のグラフェン国家基準「ナノテク 専門用語 第13部分：グラフェン及び関連二次元材料」(GB/T 30544.13-2018)を2018年に制定し、グラフェン、CNT、および関連二次元材料の基礎から産業応用にいたる全領域を対象として研究投資を行っている。

トポロジカル材料に関しては、米国では、Gordon and Betty Moore財団の助成プログラムEPIQS (Emergent Phenomena in Quantum System) Initiativeの中で第一ステージ(2014～2019年)に引き続き、第二ステージ(2020～2025年)においてもトポロジカル物質を含む量子物質における創発物性の基礎研究を支援している。さらに、Microsoft Research Station Qではディレクターに数学者のMichael Freedman(1986年フィールズ賞受賞)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。

二次元材料のLSI応用の検討も本格的に行われ始めている。半導体素子の微細化に伴い、電荷担体(電子、正孔)が流れるチャンネルの薄層化が必要になる。最先端の微細半導体では薄層化された半導体チャンネルにおける電子・正孔の移動度がSi系半導体材料の移動度が急速に小さくなる問題が明らかになってきているが、グラフェンに代表される原子層半導体では、三次元物質に比べ薄層化しても移動度が小さくならないことがわかっており、インテルなどは2030年代のデバイスとしてナノシート半導体を採用すると提案している。しかし、半導体集積回路を設計するには、絶縁層や電極も二次元物質にしなければならず、「いかに二次元物質を積層するか」という問題が発生している。前述の学術変革領域「2.5次元物質科学」はこの問題を解決

する取り組みも視野に入れている。

最近の主な成果としては、古くから一部の強誘電体において観察されていた大きな光起電力が、波動関数の対称性によるトポロジカルな効果であるシフト電流が起源であることが見出され、様々な材料系で新たに大きな光起電力が確認されたことが挙げられる。遷移金属カルコゲナイド、硫化ヨウ化アンチモン (SbSI)、ナノチューブを用いたバルク光起電力の研究が行われ、現在使われている最大効率を持つジャンクション型太陽電池に及ばないものの、バルク光起電力の変換効率を非常に大きくすることが可能となった。ドイツや日本で活発に研究がなされている。

また、グラフェンを特定の角度でねじって積層することにより、ねじれ角によってモット絶縁体状態、超伝導状態、量子異常ホール状態となることが発見されたことから、「ツイストロニクス」と呼ばれる領域が誕生している。グラフェンは電子相関やスピン軌道相互作用をほとんど示さないが、魔法角 ($\sim 1.1^\circ$) のねじれによって生じるモアレ構造によって相互作用強度が劇的に増大し、超伝導およびチャーン絶縁体になる。このような量子現象は、二次元遷移金属ダイカルコゲナイドでも設計可能である。その例として、 60° 近くねじれた $\text{MoTe}_2\text{WSe}_2$ ヘテロ二層膜がある。二次元ヘテロ構造の設計は、今後も新しい量子現象・機能の豊富な供給源となることが期待される。

また、ワイル反強磁性体 Mn_3Sn 系は反強磁性体でありながら巨大な異常ホール効果を示すことが発見されたことから、強磁性体を用いたスピントロニクスの弱点 (漏れ磁場が大きいために集積化が難しく、外場に敏感でメモリ保磁力が制限、動作速度が速くできない) を解決できる可能性があるものとして注目され、反強磁性スピントロニクスという新たな分野を開こうとしている。

■分野別の俯瞰ワークショップのサマリー

CRDSでは2021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、「ライフサイエンスとナノテク・材料の融合が拓く新領域」「計算物質科学」のそれぞれで俯瞰ワークショップを開催した。さらに、ナノテク・材料分野全体に広範な波及効果を与える材料科学や材料設計指針の新たな潮流を展望する俯瞰ワークショップ「マテリアル設計の未来戦略」を開催した。

各回とも、識者へのインタビューを含む事前調査を経てワークショップを開催し、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。

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 ライフサイエンスとナノテク・材料の融合が拓く新領域 (2022年1月20日開催)

次世代センサーやmRNAワクチン、リキッドバイオプシーなど、医療やバイオエコノミーに変革をもたらす数多くのイノベーションが近年登場しているが、このようなイノベーションの根底にはライフサイエンス・医学研究により得られた知見とナノテク・材料技術との融合により生み出された新たな材料・デバイスや計測技術、操作・制御技術が存在している。

こうした状況を踏まえ、ライフサイエンスとナノテク・材料技術の融合領域より、今後もイノベーションの源泉となりうる新たなシーズが生まれてくることを期待して、CRDSライフサイエンス・臨床医学ユニットとナノテクノロジー・材料ユニット共同で本ワークショップを企画、開催した。

当日は、生命科学・医学とナノテク・材料の融合の在り方の概念図 (図1.2.2-1) を提示したうえで、2つの基調講演「ナノバイオデバイス、AI、量子技術が拓く未来医療」、「細胞内分解ダイナミクス」を実施するとともに、ライフサイエンスとナノテク・材料技術の融合により創出が期待されるシーズを大きく3種類に分け、それぞれに対応する形で「生体分子・生体環境の計測技術」「細胞・組織等の操作・制御技術」「人工分子システムのデザイン・創製」の3つのセッションを設定し、それぞれの融合領域の第一線で活躍する研究者によ

る話題提供をもとに議論をおこなった。議論の結果から浮かび上がった、今後の研究開発の方向性、システム・制度上の課題・問題点を以下に示す。

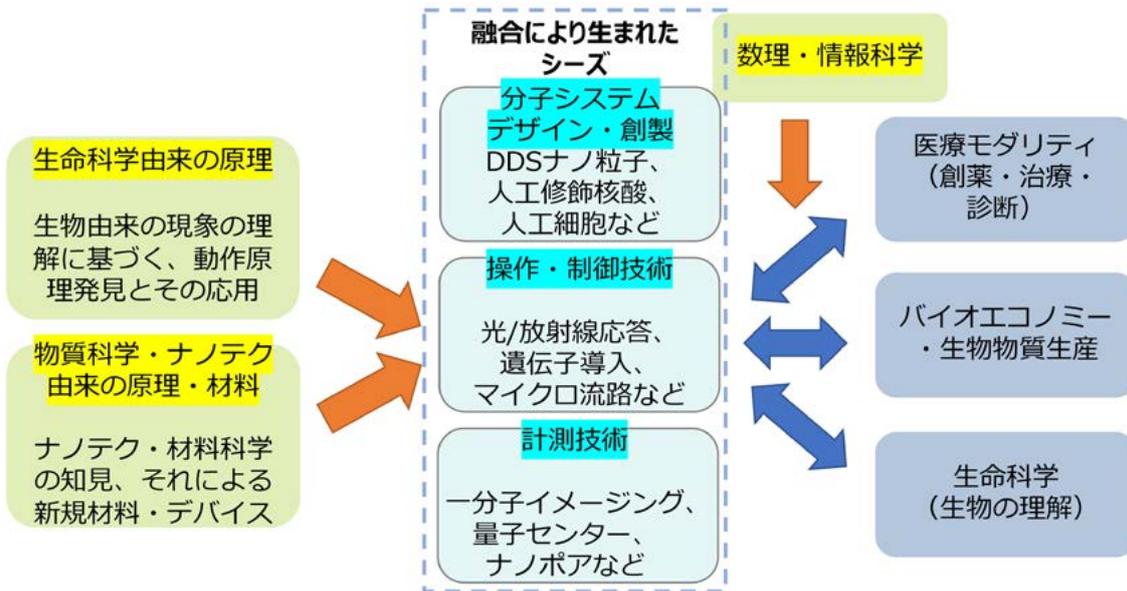


図 1.2.2-2 生命科学・医学とナノテク・材料の融合の在り方の概念図

• 今後の研究開発の方向性

- 計測技術に関する研究開発の方向性として、非蛍光での高感度・一分子計測技術や多項目計測技術が挙げられ、一分子計測や多項目計測に伴う膨大なデータの取得・処理も課題として指摘された。
- 合成生物学は基礎、応用科学の両面でこれから極めて重要であること、また、日本にはナノ材料、有機化学・超分子などに蓄積があり、これらの関連分野が融合することで、合成生物学において強みを発揮できる可能性が指摘された。
- 応用に向けた方向性として、ワークショップ開催時に主に想定されていた基礎生命科学での活用と医療への応用に加えて、植物・農業への応用も重要であるとの示唆が得られた。世界で見た時の産業規模・問題の大きさから、日本でもナノテク・材料技術の植物・農業への応用を更に掘り下げて検討すべきとの指摘があった。

• システム・制度上の課題・問題点

- 融合領域であるがゆえの課題として、異分野間の交流・情報交換の場や新材料のトライアルの場、医工連携を可能にするプラットフォームなどの構築が課題として挙げられた。

本ワークショップを通して、わが国においてもライフサイエンスとナノテク・材料技術の融合領域からはイノベーションの源泉となりうる様々なシーズが生まれていることが確認された。特にバイオ計測技術においては、基礎研究のみならず、実用技術としての検討が望まれる段階にまで達しているものも多く見られた。一方、操作・制御、デザイン・創製に関してもユニークな技術が数多く生まれているが、実用可能な人工分子システムの構築に向けては、これらの技術を単独ではなく、適切に組み合わせて研究開発を推進することが必要であるとの認識を得た。

近年、計算物質科学分野では、新しい計算手法の開発などが進んでいる。計算を活用した物質科学の深化に期待がかかっている。

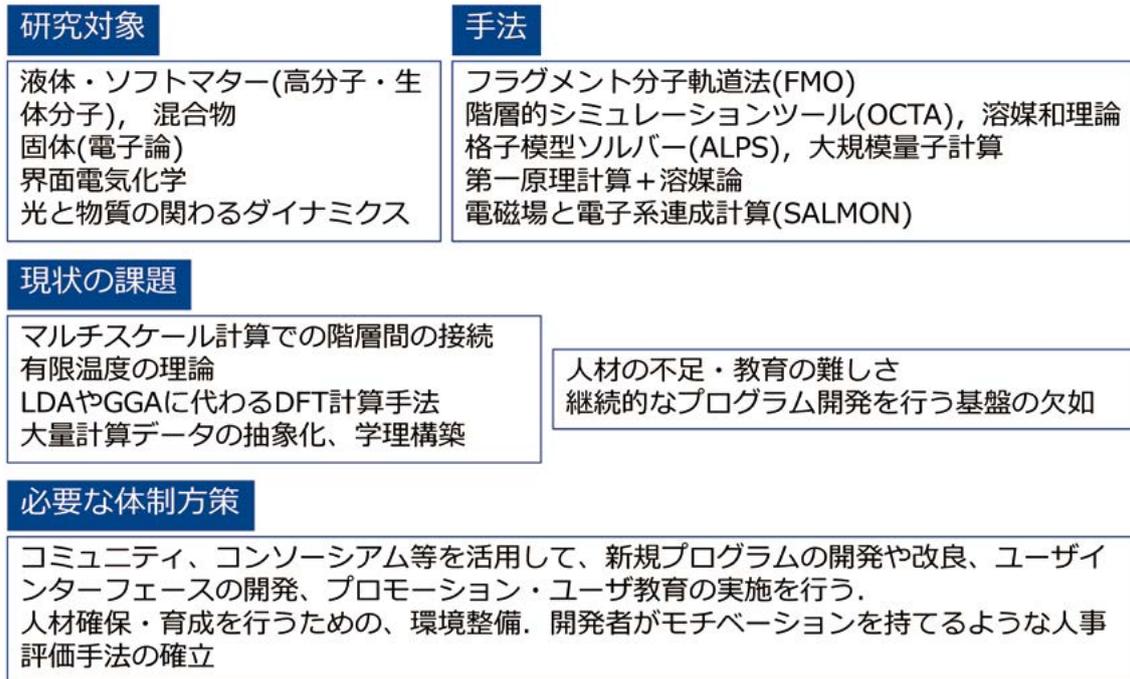


図 1.2.2-3 計算物質科学の潮流

②新しい計算物質科学の潮流 (2022年4月11日開催)

近年の調査・検討を通じて、「これからの物質科学においては、合成-計測-理論/予測の三角形のループが回ることで初めて新しい時代を切り開くことができる」ことは明らかといえる。特に、この三角形の一翼を担う計算物質科学分野では、新しい計算手法の開発などが行われており、これにより「以前に比べはるかに高精度な計算が可能になる」、「これまでの計算で用いられてきた理想化の条件を使わず、より現実に近いモデルでの計算を行える」といったことが可能になりつつある。

こうした状況に鑑み、新しい手法開発による計算物質科学の事例を俯瞰し、将来の可能性、解決すべき課題などを把握することを目的としたワークショップを開催した。その結果得られた今後の研究開発の方向性を図 1.2.2-3 に示す。

• 研究対象と手法

ワークショップで報告された研究対象としては、液体・高分子・生体分子などソフトマターやそれらの混合物、固体の電子論、界面電気化学、光と物質が共存する系のダイナミクスなどがある。それぞれの対象について、いくつかの新しい手法が開発され、それまでの手法（第一原理計算や従来の分子動力学計算）に比べ、大規模、高速、正確なシミュレーションが可能になってきている。

• 現状の課題

科学技術面での課題としては、マルチスケール計算を行う際の階層間の接続問題、元々は絶対零度での計算手法である第一原理計算を有限温度に拡張するためのより洗練された理論、DFT (Density Functional Theory) 計算手法として広く使われているものの、現時点でその欠点が明らかになっている LDA (Local Density Approximation) や GGA (Generalized Gradient Approximation) に代わる新たな計算手法の開発などが挙げられた。また、計算手法の改良や計算機の高速化によって大量の計算データが得られるよう

になっており、それを抽象化する手法の開発やそのための学理構築も必要である。研究環境に関する課題としては、慢性的な人材の不足や若者の教育の問題が挙げられている。前者については、材料科学分野に来る学生の絶対数の少なさ、博士後期課程への進学率の低さが指摘され、後者については、データ科学的手法の物質科学への活用が目覚ましいため、若手研究者が物質科学、計算機科学に加えて統計数学やデータ科学までも学ぶことが求められるようになってきている現状が報告された。

• 必要な体制・方策

プログラムの新規開発を続けていくためには、小さな研究グループ単位での活動には限界があることから、コミュニティやコンソーシアムを活用して、新規プログラム開発や継続的な改良、使いやすいプログラムとするためのユーザインターフェース開発、ユーザを増やすためのプロモーションやユーザ教育などを重層的に行っていくことが必要との指摘がなされた。また、若手人材にとっての分野の魅力を増し、人材確保・育成を行うための環境の整備を行う必要があることや、開発者がモチベーションを保てるような人事評価制度やキャリアパスの充実が必要であることが述べられた。

③物質と機能の設計・制御 ～マテリアル設計の未来戦略～ (2023年2月12-13日開催)

物質・材料またはその機能を設計・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る。材料の所望の機能を実現させるための設計・制御手法をわが国みずから開拓することは、材料科学に新展開をもたらし、将来的にわが国の産業に貢献することが期待される。

今回の俯瞰調査において、材料科学の新たな潮流に焦点を当て合宿形式のワークショップを開催した。将来の材料研究の発展を担う気鋭の研究者22名を招聘し、5つの分科会形式による集中討論および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

- 多くの物質・材料には、組成、相状態、界面、組織などのナノからマクロまでの各階層において、無秩序性、不均一性、歪みなどの乱れが内在している。こうした乱れを含む状態では、必ずしも理想的な材料物性および機能は発現されない。一方で、近年の材料科学の進展により、材料機能の向上に資する良い乱れと、機能を損なう悪い乱れとの分類ができつつある。今後は、「乱れの学理の体系化と制御技術の構築」および材料に内在する「動的非理想界面の理解、制御と利活用」を進めていくことが重要であるとの方向性が提示された。
- また、近年の計算科学やデータ科学、計測技術の進歩により材料開発のスピードは飛躍的に向上しつつある。しかしながら、材料の合成・製造過程や材料が機能を発現する瞬間である遷移状態や中間状態は正確な把握が難しく、いまだにブラックボックスとなっている。これによって、実験者により材料の品質が異なる、またはスケールアップが難しく、基礎研究と応用・実用化研究との乖離が生ずるという課題がある。今後は、「合成・製造過程の隠れたパラメーターの計測・定量化・制御」や「遷移状態の科学的理解にもとづく材料開発」を進めていくことが重要であるとの方向性が提示された。

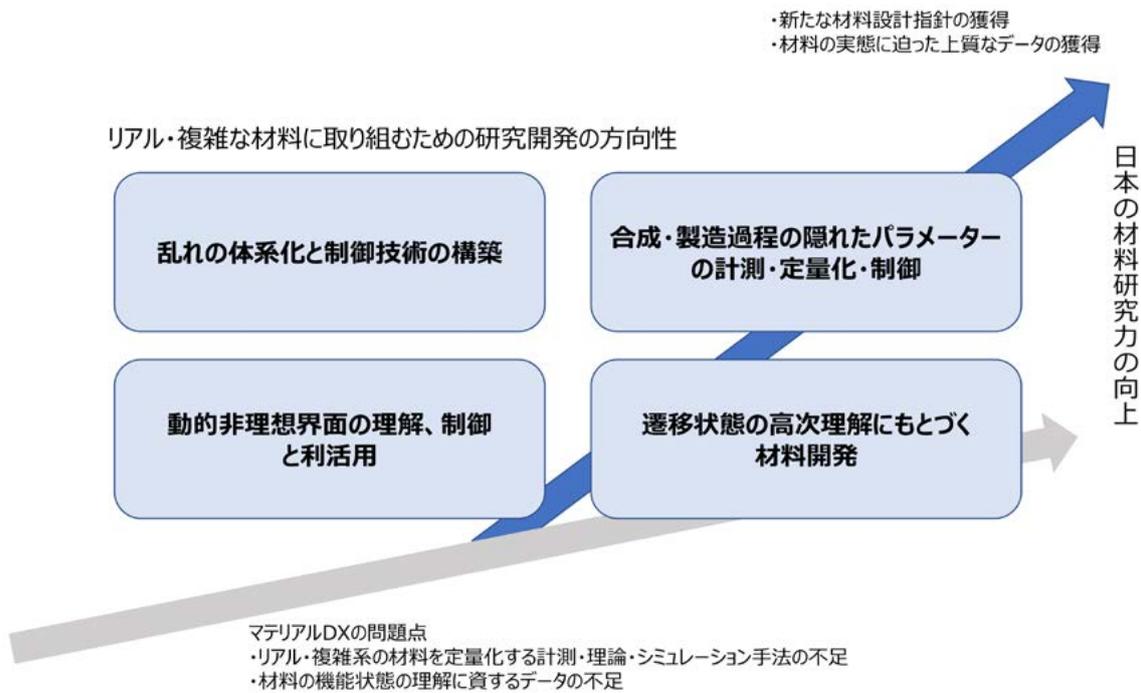


図 1.2.2-4 物質と機能の設計・制御の俯瞰WSから得られた方向性

これらいずれの方向性においても、広い時空間レンジでの計測技術や非破壊計測技術などの先端計測技術の高度化や、現象理解を支える理論・シミュレーション技術の高度化を併せて進めていく必要がある。このような高度な材料開発からは、材料の本質により深く迫る付加価値の高いデータ創出が期待されるため、現在構築が進むMaterial DXプラットフォームへと接続していくことで、わが国全体としてのMaterial革新力の向上につながると期待される (図 1.2.2-4)。

これらの研究開発は、材料が本来有する性能や機能を最大限発揮させるための方法論として、環境・エネルギー分野、バイオ分野、ICT分野、航空・宇宙分野など幅広い分野での波及効果が期待される。

・研究開発のシステム・制度上の課題・問題点

本ワークショップでは、招聘者自身が研究室を主宰して間もない、もしくは近い将来に主宰することが想定される気鋭の研究者を招聘した。また、首都圏や地方といった地域性、所属機関の人員・予算規模等を含め、多様な研究者を招聘した。そのなかで以下のような課題・問題点が挙げられた。

- ・研究開発を支える技術職員の拡充
- ・共用施設・環境の拡充：計測や加工に関してはMaterial先端リサーチインフラ等の共用プラットフォームが活用できるが、材料合成に関しては簡便に合成をテストできる環境がほとんどない
- ・研究室や講座制の廃止に伴う人材の欠員・不足からくる、研究設備運用の停止・維持困難への対応

ナノテク・材料分野の特有の、研究開発に長い期間がかかる、研究室で培われた技術やノウハウが大きな価値を持つ、との特徴を踏まえつつ、大学等の人材の流動性を確保した今後の研究環境を構築していくことが求められている。

※本ワークショップの詳細は、俯瞰ワークショップ報告書「Material設計の未来戦略」(2023年5月頃発行予定)を参照されたい。

1.2.3 社会との関係における問題

■化学物質・ナノ材料の人と環境への影響

ナノテクノロジー・材料分野は、主に部素材・デバイスを通じて幅広い応用領域に関係しているため、社会や生活と幅広い接点を有している。中でも、工業排出物や廃棄物が環境や生物相に悪影響を及ぼすことがあるとして、社会とのつながりの強い問題として古くから認識されてきた。明治時代の鉱毒事件に始まる公害は、日本の近代工業が急速に発展した高度成長期には、大きな社会問題となり、経済・産業の発展と工業排出物による環境への悪影響の軽減をどのように折り合わせていくかに多くの工夫がなされた。1960年代に制定された公害対策基本法、大気汚染防止法、水質汚濁防止法、土壌汚染対策法などの各種法律は、新たに判明した問題に対処するために適時改訂されながら、化学物質による環境汚染や人体への害が可能な限り顕在化しないよう運用されている。このように、工業化による環境汚染被害を経験したのちに、国内ルール・規制が出来上がっていくという流れは、ある程度工業化が進んだほとんどの国で共通して見られる。

しかし、化学物質の環境や人体への有害性や毒性は、直ちに発現するものばかりではない。過去、使いやすく安価で性能劣化もほとんどない理想の断熱材と見做されていたアスベストや、毒性がなく不燃性の最良の冷媒とされていたフロンなどが、肺癌や肺繊維症を引き起こしたり、地球のオゾン層を破壊したりすることは、何十年もの間、曝露、放出された後に初めてその科学的な因果関係が判明したことである。当初は想定しなかった重大な問題により、多大な対策コストが発生する、場合によっては取り返しのつかない永続的影響を残す例もある。

こうした事例に可能な限り事前に対処できるよう、日本国内では、新規化学物質が製造・輸入される前の、化学物質の事前審査、継続的な管理措置、性状に応じた規制措置などを定めた「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」(化審法) などによる、予防策が設けられている。また、欧州においても21世紀以降、EUのRoHS指令¹やREACH²規則を通じて有害物質の使用を制限したり、登録・開示し情報が利用できるようにしたりする方策がとられており、国際的にもそれを追認する形で環境や人への害が甚大化する前に適切に対処していく枠組みが作られている。

ところが、ナノテクノロジーのカテゴリーに含まれるナノマテリアルの場合には、これまでの材料に関する取り組みのやり方では対処が難しい問題がある。以後は、ナノマテリアルに固有の問題とそれに対する取り組みについて記述する。

ナノマテリアルは、一般的には、少なくとも次元の大きさが100 nm以下で人工的に製造された材料を指す。材料をナノスケールサイズにすると、生体にとっては組織浸透性が向上することに加え、比表面積が大きくなることで電子反応性や界面反応性も向上し、ナノマテリアルの特異な機能が発現する。RoHSで指定された、鉛、カドミウム、水銀などは、それらの元素自体が持つ毒性を考慮して、それらの元素を含む物質に対する規制を行えばよかったのに対し、ナノマテリアルに関しては、原料や組成だけからは、その影響を事前にはかり知ることができない。

ナノマテリアルは、エレクトロニクス産業のほか、医薬品、化粧品、食品など様々な分野に使用されるため、人への曝露機会は非常に多く、また今後もさらに増えていくと予想される。こうした状況で、安全性を確保するためには生体影響や環境影響の評価を、サイズ・表面性状をはじめとした物性との連関によって解析することが必要となる。このために、様々なナノマテリアルを細胞/動物に添加/投与し、その応答が解析されている。リスクの解析には、曝露実態に沿った生体応答/細胞応答評価が重要であり、ハザードに関する情報のみならず、吸収・分布・代謝・排泄や蓄積といった動態情報を定性・定量解析し、「曝露実態」を解明することで、

1 Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment

2 Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals

リスク解析に資する情報の集積を図ることが必要となる。

こうした背景から、欧州を中心にナノマテリアルの登録制度・規制や評価基準の規定、国際標準化が進んでいる。ナノマテリアルの定義、分類、測定方法、評価方法、評価結果の解釈は国際協調で進んでいるが、科学的データの共有は十分に進んでいない。また、時間もコストもかかるリスク解析を、あらゆるナノマテリアル種に対して完全に行うことは現実的でなく、ほぼ不可能である。ナノマテリアルを用いた製品の価値を認め世界市場で流通させるには、国際標準化を行い、世界共通の客観的尺度でその有用性や品質を示していくことが欠かせない。国際標準は、客観性のある科学的知見に基づき国際的な合意の下で形成された文書であり、国際標準に準拠することは市場展開において信頼性の観点で特に重要となる。

世界的には、欧州や米国でナノマテリアルの登録制度が開始する中、実際にどのようにナノマテリアルのリスク評価を行うのかの観点で検討も進められている。当初は、これまでの化学物質のリスク評価・管理の枠組みを拡張する方向で様々な評価法の開発が進められてきたが、2019年以降、REACH規則において、ナノマテリアルが本格的に対象となった。安全性を評価するため、OECDにおいてもリスク評価のための試験法ガイドラインの開発や改良が進められている。また、欧州では、ナノマテリアルを含む先端材料やそれらを複合的に組み合わせた新規物質を「アドバンスドマテリアルズ (Advanced Materials)」とカテゴライズして、ナノマテリアルのみならずより広い新材料の安全性をどう評価すべきであるかの方向へと議論が展開している。

対象がナノマテリアルからアドバンスドマテリアルズに拡大するとしても、生体への吸収性や反応性の点では検討すべきことは同様であり、安全性評価のために検討してきた研究課題のフレームは毒性学的観点から大きく変わることはない。しかし、評価対象がナノマテリアルからアドバンスドマテリアルズに広がることによって、行政的なリスク評価・管理体制へのインパクトは大きい。ナノマテリアルの評価は、様々な材料の原料としての化学物質評価体系の中で行おうとしてきたのに対して、アドバンスドマテリアルズに関しては、単なる一材料としての評価だけではなく最終（消費者）製品としての製品評価を行うことが必要になるためである。医療機器や食品容器などへのアドバンスドマテリアルの適用が進んできていることから、化学物質を単独で管理する体系とは異なった行政的な管理体系での評価も必要となる。例えば、日本の化審法は、化学物質が環境経由でヒトに曝露する際の安全性を評価対象としているため、医療や食品関連に含まれるアドバンスドマテリアルのように直接ヒトに曝露する際のリスクを化審法の範囲内では十分にカバーできない可能性がある。また、医療や食品関連の製品はそれぞれ異なる評価システムで管理されているため、一つの物質でも異なった評価が行われることがあり、安全性評価の整合性の観点から課題となる。

さらに、長期曝露による発がん性を中心とした評価法の課題は、依然として解決していない。慢性影響の評価を確定するための試験は、動物実験などの長期毒性試験に頼らざるを得ず、アドバンスドマテリアルズへと広がる数多くの物質に対しては、このような試験を行うことはますます現実的でない。より効率的な試験法の開発が必要となる。慢性影響を評価するための管理システムは、通常の化学物質に対してさえも効率的に機能しているとはいえない状況もあるなか、かなりの難問である。

研究開発者と市民・社会の多様なステークホルダーによる、相互作用的なプロセスを経て科学技術イノベーションの成果を社会へ還元させるべきであるという「責任ある研究とイノベーション (RRI)」の考え方が国際的に広がっている。これまで述べてきたように、ナノテクノロジーのようなエマージングテクノロジーの研究開発においては、科学的に不確実性やリスクを払拭することが難しいため、社会との関係構築が特に重要となる。代表的な例として、製品としての応用が広がるナノ材料としてのナノカーボンがある。ナノカーボンの代表例であるカーボンナノチューブ (CNT) は、高アスペクト比の形状から、アスベストに似た毒性を持つのではないかと推測もあったが、実際には、両者の使用環境におけるサイズには大きな相違があり、生体影響があるかどうかは科学的に十分に明らかになっていない。フラーレンやナノスケールの銀、酸化チタン、酸化亜鉛等についても、殺菌効果や抗酸化作用、紫外線からの保護性能等に着目した製品、日焼け止め、抗菌防臭剤、食品添加物などへの応用が広がる一方で、有害性やリスクを評価する科学的データは未だ十分ではなく、さらなる研究が必要と指摘されている。これらの事例では、RRI的な考え方にに基づき、継続的なリスク評

価を行うことと、得られた評価結果・情報を迅速に社会への開示することで、信頼を獲得していくことが求められている。すでに市場に流通する製品は多く、各国政府や環境保護団体などからの消費者に向けたファクトレポートや、安全性情報や安全な使用方法についての説明を含むFAQ (Frequently Asked Questions) などが多数公開されている。

また、ナノマテリアル管理に関する最近の大きな動きとして、欧州委員会において、2022年6月にナノマテリアルの定義が10年ぶりに更新されたことが挙げられる。2011年の定義との違いとしては、カーボンナノチューブ、フラーレン、グラフェン、といった炭素系材料が明示されなくなり、直径が1 nm未満で長さが100 nmを超えるすべての細長い粒子および厚さが1 nm未満で、横方向の寸法が100 nmを超える板状の粒子は、化学元素に依らず、ナノマテリアルに含められることとなったこと、規制の一貫性を担保する表現に改めたこと、凝集していても個々の粒子が識別できる場合はそれら一次粒子を考慮に入れることなどがある。

日本の厚生労働省では、化学物質の評価をリスク評価検討会の枠組みで運用・規制してきた。しかし労働環境において発生している化学物質に関連する労働災害の8割は規制対象外の物質が原因で発生していることが判明しており、現状のリスク評価事業のスピード感では規制が追い付かないことが明らかとなっている。そこで、2019年9月から【職場における化学物質等の管理のあり方に関する検討会】にて議論が行われた結果、「労働安全衛生法施行令の一部を改正する政令（令和4年政令第51号）及び労働安全衛生規則及び特定化学物質障害予防規則の一部を改正する省令（令和4年厚生労働省令第25号）」が、令和4年2月24日に公布され、令和5年4月1日から施行（一部令和6年4月1日から施行）された。その中では、従来国が行ってきた化学物質のリスク評価は今後行わず、企業が自律的に化学物質のリスク評価を行うことになった。今後、企業は自らの責任において事業所で取り扱う化学物質のリスクアセスメントを行い、従業員の暴露対策を実施し健康で安全な職場を実現する責任が発生することになる。

日本の産業界においては「一般社団法人ナノテクノロジー・ビジネス推進協議会 (NBCI)」が積極的な活動を展開している。2017年より、NBCI会員企業のうち30社以上が集まる「ナノ材料安全分科会」を進めている。分科会では大きく三つの主課題が設定され、1) ナノ材料の有害性評価に関する主課題、2) ナノ材料のリスク評価に関する主課題、3) ナノ材料等に係る各国の規制動向等の調査（情報収集と必要に応じた提言）に関する取り組みがある。ISOの規格などを元に、各種ナノ材料の利用に際する注意や評価手順などを検討しJIS化を目指している。また、ナノマテリアルの健全な普及のための活動として、「ナノカーボンFAQ」や「CNT取り扱い手順書」を公表している。

ナノマテリアルに対する国際的な規制は、日本の事業者が海外へそれらの材料を輸出する際に影響を受ける可能性があるにも関わらず、この方面への日本の対応は十分とは言えない。欧州において様々なルールセッティングが進展している状況に比較し、日本は「ナノマテリアルに関する安全・安心の担保のため、産業界等に対する適切な安全指針・規制の提示と認可等の仕組みづくり」といった議論が進展せず、評価手法の検討に留まっている。日本では、毒性学の研究者や、国際標準化活動を担う人材・組織が特に限られているため、研究開発段階から大学や国研の毒性研究者が参画した安全性評価研究は、ほとんどなされていない。科学的な根拠に基づいた国際標準化への参画が求められている。

■経済安全保障とナノテクノロジー・材料分野

近年立て続けに起こった、米中の覇権争い、COVID-19パンデミック、ロシアによるウクライナ侵攻は、様々な物資やサービスのサプライチェーンに大きな混乱を生じさせると同時に、20年以上続いてきたグローバリズムへの流れを大きく変えることになった。そもそも、グローバリズムの流れは、90年代のソビエト連邦崩壊、ロシアや東欧諸国の民主化と市場原理導入、中国の改革開放路線への転換に端を発している。立て続けに起こったそれらの事象こそが、グローバリズムの3規範（民主主義、市場原理、科学技術）の正しさや有効性を示すものと受けとめられ、北アフリカ諸国の民主化運動などにも影響を与えながら、3規範をより尊重する方向に世界全体が動いてきた。この3規範の一つである市場原理は、国内の産業を保護するよりも、国ごと

の産業の役割分担・国際分業を徹底することで経済合理性を追求することを指向した。市場開放の旗印の元で、生産地のグローバル最適化を行い続けた結果として、2000年代の終わりには、市場シェアの大部分が少数の国、地域で占められる製品分野が多く存在するようになっていた。例を挙げれば、先端半導体は台湾、韓国、太陽電池セル・パネルやリチウムイオン電池は中国、家電製品やIT機器は韓国・中国などに製造が集中している。「最も適した場所で生産を行う」との選択を世界各国およびグローバル企業が行った結果、ハードウェアの生産がアジアに集中したことになる。人類のコントロールの効かない天然資源の特定国・地域への偏在と同じような状態が、自由な経済活動の結果生じたことは皮肉といえる。

この状況で起きた昨今の国際情勢の混乱は世界中を委縮させるのに十分な衝撃であった。いつでも自由に最適地である他国から入手できると考えていた物やサービスの入手が途絶することで、国内のあらゆる活動が制限されることを身をもって実感させられたからである。現在、各国は、経済安全保障対策の最重要課題として、供給元が限られていて将来にチョークポイントとなりうる資源や工業製品のリストアップや、対応策の検討を急ピッチで進めている。

1.2.1節で述べた経済安全保障の4つの柱（①サプライチェーン確保、②重要インフラとデータ保護、③重要技術の流出防止、④重要技術の開発強化・支援）の中で、ナノテク・材料分野に関連が深いのが、①、③、④である。図1.2.3-1に、それぞれの柱に対しての各国の主な取り組みを列挙した。

	米国	中国	欧州	日本
① サプライチェーンリスク低減	<ul style="list-style-type: none"> ・ サプライチェーン強化のための大統領令(2021) ・ 国防権限法2021：半導体及びサプライチェーン構築 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 「第14次五カ年計画」：重要原材料製品の研究開発・生産 (2021) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 新産業戦略：クラウド技術、エッジコンピューティング技術、半導体技術の海外依存解消 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 経済安全保障推進法「重要物資の安定的な供給の確保に関する制度」(2022)
③ 流出防止	<ul style="list-style-type: none"> ・ エンティティリスト拡大 ・ 投資管理法強 (FIRRMA) ・ 研究インテグリティ強化 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 輸出管理法(2020) ・ 信頼できない主体リスト ・ 輸出禁止等技術リスト (2020) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 域内直接投資審査の強化 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 「みなし輸出」管理強化 (2021) ・ 研究インテグリティ強化(2021) ・ 特許の非公開化 (2022)
④ 開発強化・支援	<ul style="list-style-type: none"> ・ TSMC工場の誘致 ・ 機微・新興技術国家戦略(2022更新) ・ 競争法案(審議中) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 「第14次五カ年計画」：科技主導発展の継続、基礎研究強化(2021) ・ 科学技術707分野の重要課題(2021) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 欧州半導体法案 ・ 官民合計430億ユーロ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 経済安全保障重要技術育成プログラム(2022) ・ 量子・AI・バイオ・マテリアル国家戦略策定・改定(2019-2022) ・ 半導体戦略(2021-2022)

図 1.2.3-1 ナノテクノロジー・材料に関する主要国の経済安全保障の政策動向

欧州や米国が、アジア地区に生産拠点が偏っている先端半導体やリチウムイオン電池の製造に関して、国内での製造や研究開発能力の拡充策に着手していること、欧米の姿勢への対応策として中国も輸出禁止等の措置で対抗していることが見て取れる。また、先端半導体に関しては、10年ほど前に最先端ロジックのプロセス開発競争から撤退し、海外ファブからの調達に舵を切った日本も、国内研究開発拠点や製造会社の設立、台湾メーカの国内誘致、人材育成拠点の設立等の施策を次々と打ち出し、全方位的な強化の姿勢を見せている。新たに発足した半導体製造企業Rapidusは、日本が量産を断念した20 nm世代から5 nm世代をすべて飛び越えて、2 nm以降世代の量産を狙う。海外調達が困難になることへ備える動きは、希少資源への対応としては以前からも行われてきたものだが、国際情勢の急速な変化により、工業製品にまで適用され先鋭化されてきている。

さらに、経済安全保障のための研究開発の加速や技術流出保護の動きは、現行ビジネスに近い技術の開発だけでなく、将来における産業や軍事面での競争力につながる新興技術や、一部の基礎的研究の範囲にまで及んでいる。基礎研究から社会実装までの時間が比較的短い分野や、民生品と軍事技術の差異が小さい分野においては、その傾向が特に顕著で、技術の萌芽的な段階から特別な枠組みで開発加速や保護を行う動きが

出始めている。

■外国人研究者と研究力と経済安全保障

日本の大学や国立研究所は、少子高齢化社会を背景にした高度外国人材活用の一環として、外国人学生や研究者を積極的に迎え入れる様々な施策を取ってきた。大学の自然科学分野では、2019年度2万人程度の外国人留学生³がいるが、卒業後多くの外国人が、日本国内でポスドクなどの研究開発の職業についている。こうして、若い外国人研究者は、日本の先端的材料研究を支えており、一部の研究機関では、外国人学生、ポスドク抜きでは研究活動の継続が事実上不可能であるケースさえある。しかし、昨今の安全保障や経済安全保障を重視する流れの中で、アカデミアにおける国際協力にブレーキがかかるケースも見られ始めている。科学的インパクトが高く萌芽的な基礎研究を行っている研究室に、勤勉で能力の高い若手外国人研究者がいることは、研究遂行の推進力にこそなれ、国家としての危機には直接つながらないとされてきた。一般に、材料の基礎研究が社会に応用されるまでには長い年月がかかるため、たとえ、外国人研究者を通じて情報が持ち出されたとしても、技術が実用化される頃にはその知識が陳腐化しているか、あるいは、広く知れ渡って世界の共通認識となっているかのどちらかのケースが多いからである。しかし、最新のICT機器においては民生用と軍事用の差がないものもあり、最先端の民生品が軍事に転用される例が散見されることから、基礎研究段階でさえも情報流出を論じる動きや課題が出始めている。

指数関数的な性能向上が当たり前のAI技術や先端半導体に比べると、材料やデバイスの性能の進化ぶりは緩やかである。このため、学術的色彩が強い基礎研究段階ではオープンな研究環境が望ましいとされてきたが、二次電池、先端半導体、希少金属対応などの技術が経済安全保障を論じる際の要ともなっており、以前のような国際的にオープンな研究は難しくなりつつある。

その一方で、安全保障や経済安全保障に直接関わらない科学技術や、地球環境や感染症対策のような人類全体で立ち向かうべき課題にかかる科学技術に関しては、いずれの国においても外国人研究者の排除は全体の効率を落とすことことに繋がるため、積極的にオープンな国際連携を図るべきともされている。

研究機関にとって、多様なアイデアを創出するうえで、また単一の思考に陥りがちな日本の研究者に刺激を与えるうえでも、多様な技術的、文化的背景を持った海外の研究者がいることは重要である。また国際的な共同研究が成果創出にとって重要になっている基礎研究分野では優秀な海外の研究者を確保することは重要である。そのうえで顕在化する経済安全保障問題に対応するには、適切な開示と秘匿に関するルールと運用方法を作りあげ、「開き過ぎず、閉じ過ぎない」適切な基準を共有することである。

また、この問題の根本にあるのは、本文野の先端研究を志望する日本人の学生が少なくなっていることにある。少子化の影響からくる分以上に、この分野の日本人研究者が減っているかについては適切な統計が存在しないが、早急な把握と原因の分析、それに対する必要な対応が必要であろう。科学の道を志すこと自体が、次世代の人材にとって魅力のないものになることのないよう、長期的な視点からの研究者の活躍環境の整備や待遇改善策の構築などが求められよう。

3 毎年2万人程度であった外国人留学生は2020年以降COVID-19の影響で激減した

1.2.4 主要国の科学技術・研究開発政策の動向

近年、世界各国で推進されてきているナノテク・材料に関係する大きな取り組みについて述べる。図1.2.4-1は、主要国の近年のナノテク・材料に関係の深い政策・戦略をまとめたものである。

2001年に、米国が、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づけ、大々的な投資を行う計画を発表したのを皮切りに、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推進のための国家計画を立ち上げた。日本は80年代からナノテク・材料関係の研究開発を国家として推進してきており、米国に遅れることなく、第2期科学技術基本計画に盛り込む形で推進してきた。近年は、アジア諸国、BRICsなど、多くの新興国も同様にナノテクノロジー国家計画を策定し、イノベーションをめざして先端科学技術への国家投資をすすめている。また、最近では、経済安全保障の観点から、友好国以外への産業・技術依存の軽減、安定的入手可能な資源・原材料へのシフトをめざす動きも目立ってきている。

以下に、各国個別にナノテク・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

2021年4月、内閣府が「マテリアル革新力強化戦略」を策定した。本戦略は、2006年に当時の総合科学技術会議が策定した「分野別推進戦略（ナノテクノロジー・材料分野）」以来の、日本が強みを有するマテリアル分野を俯瞰的に展望する戦略となっている。ここで「マテリアル革新力」とは「マテリアル・イノベーションを創出する力」と定義されている。本戦略は、2030年の社会像・産業像を見据え、Society 5.0の実現、SDGsの達成、資源・環境制約の克服、強靱な社会・産業の構築等に重要な役割を果たす、「マテリアル革新力」を強化するための、社会実装、研究開発、産官学連携、人材育成を含めた総合的な政策パッケージとなっている。また、第6期科学技術・イノベーション基本計画では、マテリアルがわが国の科学技術・イノベーションを支える基盤技術として位置づけられ、マテリアル革新力強化戦略の強力な推進が明記されている。

■マテリアル革新力強化戦略にもとづく具体的な取り組み

マテリアル革新力強化戦略は、産学官共創による迅速な社会実装の強化、データ駆動型研究開発基盤の整備、人材育成やサプライチェーン強靱化による持続的発展性の確保、を原則として掲げ、その実現のための具体的な取り組み（アクションプラン）を以下の3つの観点で整理している。

1. 革新的マテリアルの開発と迅速な社会実装
2. マテリアルデータと製造技術を活用したデータ駆動型研究開発の促進
3. 国際競争力の持続的強化

特筆すべきは、データ駆動型研究開発の促進にかかる取り組みである。文部科学省を中心として、良質なマテリアルの実データ、ノウハウ、未利用データの収集・蓄積、利活用促進を図るマテリアルDXプラットフォームの整備が進んでいる。また、経済産業省を中心として、製造技術とデータサイエンスの融合、革新的製造プロセス技術の開発に取り組むプロセス・イノベーション・プラットフォームの構築が進んでいる。後者は、産業技術総合研究所の地域センター（つくば：先進触媒拠点、中部：セラミックス・合金拠点、中国：有機・バイオ材料拠点）を拠点とし、高機能材料の製造プロセスデータを一気通貫・ハイスループットで収集できる設備環境の整備を進めており、2022年4月より運用が開始している。

日本	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 政府「マテリアル革新力強化戦略」を策定 (2021)、第6期科術・イノベ基本計画において同戦略を実行 (2021) ◆ 産学からマテリアルデータを効果的・持続的に蓄積・利活用するマテリアルDXプラットフォーム構想を文科省が開始 (2021) ◆ 政府「量子未来社会ビジョン」を策定 (2022) ◆ 経産省「半導体戦略」(2021)、「蓄電池産業戦略」(2022)、「新・素材産業ビジョン」(2022)を策定 ◆ 官民地域パートナーシップにもとづく次世代放射光施設「NanoTerasu」が2024年より運用開始予定 	
	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 国家ナノテクノロジーイニシアティブ (NNI、2001-)、NNI戦略計画 (2021-) ◆ マテリアル・ゲノム・イニシアティブ (MGI、2011-)、MGI戦略計画 (2021-) ◆ The CHIPS and Science Act (半導体・科学法2022)、国家量子イニシアティブ (2019-) ◆ アメリカのサプライチェーンに関する大統領令 (Executive Order on America's Supply Chains、2021) 	
欧州	EU	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Horizon Europe(2021-2027) <ul style="list-style-type: none"> - Horizon 2020でのECSELの後継であるKey Digital Technologies Joint Undertaking (KDT JU) が開始 - Future and Emerging Technologies (FET) がFlagshipsと名称変更し、「Graphene Flagship」、「Human Brain Project」、「Quantum Flagship」を推進 - EUの「バッテリー戦略活動計画」により、2019年よりBattery 2030+を推進
	独	<ul style="list-style-type: none"> ◆ ハイテク戦略2025 (HTS2025) (2018-2025) ◆ Quantum Technologies –from basic to markets (2018-2022、最長2028)、未来パッケージで追加投資 (2020-) ◆ 水素戦略2020 (The National Hydrogen Strategy) (2020-)、「H2グローバル」プロジェクトに資金拠出 (2021-)
	英	<ul style="list-style-type: none"> ◆ UK Nanotechnologies Strategy (2010-) : 省庁横断の国家ナノテクノロジー戦略 ◆ UK COMPOSITES STRATEGY (2009-) : 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 <ul style="list-style-type: none"> - National Composite Center をブリストル地区に設立し、大企業との共同研究などで、2022年まで累計300Mポンドを投資 ◆ UK National Quantum Technologies Programme (2014-) <ul style="list-style-type: none"> - 量子技術を社会実装を目指し、産学官連携で1Bポンド (10年間、2022年実績 : 494Mポンド) を投資
	仏	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 5か年投融資計画「フランス2030」(2021-) : 5つの必要条件と10の目標を掲げ、マイクロエレクトロニクス、ロボティクス、AI、5G、サイバーセキュリティ、量子技術の強化と、環境・エネルギー、農業・食料、バイオ薬品、航空宇宙・深海探査の各分野・領域の成長を目指す。 <ul style="list-style-type: none"> - ナノテク研究のネットワークRENATECH+の実験インフラや、原子力・代替エネルギー庁 (CEA) 電子情報技術研究所 (LETI) のナノテクプラットフォームPNFCを支援 (2022-)
中国	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 中国国民経済・社会発展第14次五カ年計画および2035年長期目標綱要 (2021-2035) <ul style="list-style-type: none"> - 重要な先端科学技術7分野に「量子情報」、「集積回路」、「脳科学と脳模倣型人工知能」、「臨床医学と健康」 - 戦略的新興産業に「次世代情報技術」、「新エネルギー」、「新材料」など。同産業の付加価値をGDP比の17%以上にする。 ◆ 国家イノベーション駆動発展戦略綱要 (2016~2030) ◆ 中国製造2025 (2015.5) : 重点領域10分野に「次世代情報通信技術」、「先端デジタル制御工作機械・ロボット」、「新材料」、「バイオ医薬・高性能医療機器」 	
韓国	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 「第5期科学技術基本計画 (5th Science and Technology Basic Plan) (2023-2027)」の策定中 ◆ 水素先導国家ビジョン、K-半導体戦略、K-バッテリー発展計画 (2021-) ◆ 尹錫悦政権下でもで、半導体、人工知能(AI)、車載電池などを未来戦略産業と位置づけて育成する方針 	

図1.2.4-1 主要国のナノテク・材料基本政策・国家戦略

■マテリアルDXプラットフォーム構想の推進

マテリアルDXプラットフォームは、産学官の高品質なマテリアルデータの戦略的な収集・蓄積・流通・利活用に加えて、データが効率的・継続的に創出・共用化されるための仕組みを持つ、データ駆動型マテリアル研究開発のための日本全体としてのプラットフォームである。この実現は主に、データ中核拠点の形成、データ創出基盤の整備・高度化（マテリアル先端リサーチインフラ事業）、データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクトの推進の3つの柱から成り立っている。

○データ中核拠点の形成

物質・材料研究機構（NIMS）は、日本全国で創出されるマテリアルデータを収集・蓄積して広く研究者が利活用できるようにするための中核システムの構築を進めている。具体的には、NIMSがこれまでに蓄積してきた信頼性の高い研究・分析データを活かし、世界最大級のマテリアルデータベースを構築するとともに、集めたビッグデータを利活用できる材料データプラットフォーム事業を推進する計画となっている。現在、世界最大級の材料DBであるMatNaviの活用や後述のマテリアル先端リサーチインフラ事業（ARIM）との連携に向けた検討や試験運用を進めており、2025年から本格運用が予定されている。各種国家プロジェクトから創出されるデータ共有にかかる試行的な取り組みも始まっている。さらに、データベース構築にとどまらず、プラットフォームの機能の一つとしてAI解析基盤を提供し、研究者によるデータ駆動型研究の促進や普及も目標となっている。

○データ創出基盤の整備・高度化（マテリアル先端リサーチインフラ事業）

文部科学省は、2021年度より10年間の計画で、全国的な最先端共用設備体制と高度な技術支援提供体制に加え、リモート化・自動化・ハイスループット化された先端設備による共用促進によって、マテリアルデータを利活用しやすい形で収集・蓄積・提供を行うマテリアル先端リサーチインフラ事業（ARIM）を開始した。ARIMは、前身のナノテクノロジープラットフォーム事業で培われた先端共用設備群や技術支援体制を発展させ、広範に充実した最先端設備群及び技術・ノウハウを有するハブ機関と、一定の領域で特徴的な設備・技術を有するスポーク機関からなるハブ&スポークによる全国体制を構築している。現在、データフォーマットの検討やデータ共用・利用のルール検討が進んでおり、2023年度よりNIMSが担うデータ中核拠点との接続や、ARIMの利用を通じて創出されたデータの共用利用（広域シェア）に関する試験運用を開始する。

○データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクトの推進

マテリアル研究開発の効率化・高速化・高度化のために、データやAIを活用した新たな研究開発手法や研究開発環境の本格導入など、研究のデジタルトランスフォーメーション（DX）の必要性が高まっている。従来の研究手法に加え、データサイエンス的手法を戦略的に活用することで革新的なマテリアル創出を目指すのが、マテリアルDXプラットフォームの三つ目の柱である「データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト」である。

2021年度はデータ駆動型研究を取り入れた次世代の研究方法論の具体化の検討を行うFSを行い、2022年度より事業の本格実施を開始した（2030年度まで）。本格実施では、10年先の社会像・産業像を見据え、カーボンニュートラルの実現、Society 5.0の実現、レジリエンス国家の実現、Well-Being社会の実現に重要な役割を果たす革新的な機能を有するマテリアルを効率的に創出することを目的に、従来の試行錯誤型の研究にデータサイエンス的手法を取り入れたデータ駆動型の先進的な研究手法を開発し実践するとしている。本格実施として次の5拠点・代表機関を採択している。

- ・ 極限環境対応構造材料研究拠点（東北大学）
- ・ バイオ・高分子ビッグデータ駆動による完全循環型バイオアダプティブ材料の創出拠点（京都大学）
- ・ 智慧とデータが拓くエレクトロニクス新材料開発拠点（東京工業大学）
- ・ 再生可能エネルギー最大導入に向けた電気化学材料研究拠点（東京大学）
- ・ データ創出・活用型磁性材料開発拠点（物質・材料研究機構）

以上の3本の柱を中核としながら、今後他の国家プロジェクトともデータ共有・利活用の範囲を拡大していくことで、データ駆動型マテリアル研究を促進することが期待されている。

■これまでの経緯

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术事業団（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（National Nanotechnology Initiative：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¹。

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

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

第4期（2011～2015年度）においては、科学技術の重点領域型から社会的期待に応える課題解決型（トップダウン型）の政策へと舵が切れ、その中でナノテクノロジー・材料は、横串的横断領域と位置付けられた。しかし、このような横断領域は独立したイニシアティブとして設定されなかったため、国際的にも「日本では基本政策においてナノテクノロジーが重点化されなくなった」と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」が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「Society 5.0」へ

1 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

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た。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。Society 5.0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」があった。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た。そこで注目された施策が、「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」(2014-2018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(MI²)」(2015-2019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」(2016-2021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。さらに、2018年度からは内閣府においてSIP第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」(2018-2022年度)が開始され、炭素繊維強化プラスチックや粉末・3D積層材料を対象として、既存の材料データベースを活用することと並行して、新プロセス・評価技術に対応したデータベースの構築、材料科学・工学と情報工学を融合した逆問題マテリアルズインテグレーション(MI)を援用して社会実装に向けた開発期間・開発費用を低減するマテリアル革新が掲げられた。

一方で、世界の国々が投資を強化し研究開発競争が加速するAI、バイオテクノロジー、量子技術といった3つの先端技術分野の強化を最優先の取組として強調する反面、ナノテクノロジー・材料に関する記述はそれぞれの技術領域に散見されるのみとなった。

そのような中、文部科学省は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、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。翌2019年10月には「イノベーション創出の最重要基盤となるマテリアルテクノロジーの戦略的強化に向けて(第6期科学技術基本計画に向けた提言)」を策定した。ここでは、上記の「ナノテクノロジー・材料科学技術 研究開発戦略」の内容を基に、物質や材料、デバイスに係る科学技術である「マテリアルテクノロジー」が今後の我が国における最重要の基盤技術であると明示した上で、マテリアルテクノロジーの持つ重要性や強みを基本認識として整理するとともに、今後の研究開発の推進の方向性と必要となる具体的取組について提示した。このような検討を重ねるなかで「マテリアル革新力強化」というビジョンが徐々に錬成されていった。

そして、2020年4月に文部科学省および経済産業省の下に「マテリアル革新力強化のための戦略策定に向けた準備会合」が設置され、同年6月に、マテリアル革新力強化のための政府戦略策定に向けた基本的な考え方、今後の取組の方向性等をとりまとめた「マテリアル革新力強化のための政府戦略に向けて(戦略準備会合取りまとめ)」を公表するに至った。

2020年10月、内閣府は統合イノベーション戦略推進会議(議長:官房長官)の下に「マテリアル戦略有識者会議」を設置し、マテリアル革新力を強化するための検討を開始した。そして、2021年4月に上述した「マテリアル革新力強化戦略」の策定に至っている。

■研究開発プロジェクト

日本の研究開発政策のトレンドを把握するために、推進中の主な研究開発プログラム・プロジェクトを俯瞰する。図1.2.4-2から1.2.4-10にナノテクノロジー・材料分野に関連する主要プロジェクトを抜粋している。

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) 第2期 2018-22年度	
フィジカル空間デジタルデータ処理基盤	PD: 佐相 秀幸 (富士通)
統合型材料開発システムによるマテリアル革命	PD: 三島 良直 (AMED)
光・量子を活用したSociety 5.0実現化技術	PD: 西田 直人 (東芝)

ムーンショット型研究開発 制度 2020年度-	
ムーンショット目標 4 2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現	PD: 山地 憲治 (RITE)
ムーンショット目標 6 2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現	PD: 北川 勝浩 (阪大)

経済安全保障重要技術育成プログラム 2022年度-	
航空機エンジン向け先進材料技術の開発・実証	PD: 未発表
ハイパワーを要するモビリティ等に搭載可能な次世代蓄電池技術の開発・実証	PD: 未発表
高感度小型多波長赤外線センサ技術の開発	PD: 未発表
超音速・極超音速輸送機システムの高度化に係る要素技術開発	PD: 大林 茂 (東北大)

図 1.2.4-2 日本の大型研究開発プロジェクト (SIP 第2期、ムーンショット型研究開発制度、経済安全保障重要技術育成プログラム)

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1.2.4-2のような研究開発プロジェクトを実施している。2014年度より、わ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「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、ともに2018年度末で終了している。2017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1年前倒しで開始することが決定され、2018年度より「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第2期」の研究開発課題が各プログラムディレクター (PD) の下で推進されている。現在SIPは2025年度からの第3期の実施に向けて、研究開発課題や研究開発計画の検討が進んでいる。

さらに、日本発の破壊的イノベーションの創出を目指し、従来技術の延長にない、より大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発を推進する新たな制度として「ムーンショット型研究開発制度」が創設され、2020年度よりプロジェクトが進行している。

近年の新たな施策としては、「経済安全保障重要技術育成プログラム」の新設が挙げられる。本プログラムは、日本の安全保障をめぐる環境が一層厳しさを増し、世界的に科学技術・イノベーションが国家間の覇権争いの中核となっている中、日本が技術的優位性を高め、不可欠性の確保につなげていくために、国が強力的に重要技術の研究開発を進め、育成していくことを目的としている。「先端的重要技術」「社会や人の活動等が関わる場としての領域」といった観点から本プログラムで支援すべき重要技術の検討が行われ、2022年9月に研究開発ビジョン (第一次) が発表された。現在本ビジョンにもとづく公募が進行し、選考の過程にある。

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-		共創の場形成支援プログラム 2020年度-	
持続可能性に寄与するキラルノット超物質拠点 (SKCM ²) 2022年度-	イヴァン・スマリユク (広島大)	共創分野 【本格型】 ◆ セキュアでユビキタスな資源・エネルギー共創拠点 ◆ 「ビヨンド・ゼロカーボン」を目指す“Co-JUNKAN”プラットフォーム研究拠点 ◆ フォトノクス生命工学研究開発拠点 ◆ 再生可能多糖類植物由来プラスチックによる資源循環社会共創拠点	松田亮太郎 (名大) 菊池 康紀 (東大) 藤田克昌 (阪大) 高橋 憲司 (金沢大)
量子場計測システム国際拠点(QUP) 2021年度-	羽澄 昌史 (KEK)	政策重点分野 (量子技術分野) 【本格型】 ◆ 量子ソフトウェアとHPC・シミュレーション技術の共創によるサステナブルAI研究拠点 ◆ 量子ソフトウェア研究拠点 ◆ 量子航法科学技術拠点	藤堂真治 (東大) 北川 勝浩 (大阪大) 上妻 幹旺 (東工大)
化学反応創成研究拠点 (ICReDD) 2018年度-	前田 理 (北大)	政策重点分野 (環境エネルギー分野) 【本格型】 ◆ 先進蓄電池研究開発拠点	金村 聖志 (NIMS)
ナノ生命科学研究所 (NanoLSI) 2017年度-	福岡 剛士 (金沢大)	政策重点分野 (バイオ分野) 【本格型】 ◆ つくば型デジタルバイオエコノミー社会形成の国際拠点 ◆ 世界モデルとなる自律成長型人材・技術を育む総合健康産業都市拠点	西山 博之 (筑波大) 望月 直樹 (国立循環器病研究センター)
WPIアカデミー 2007年度-			
材料科学高等研究所 (AIMR)	折茂 慎一 (東北大)		
物質-細胞統合システム拠点 (iCeMS)	北川 進 (京都大)		
国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (MANA)	谷口 尚 (NIMS)		
カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU)	大栗 博司 (東大)		
カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 (I ² CNER)	ベトロス・ソフロニス (九大)		
トランスフォーマティブ生命分子研究所 (ITbM)	吉村 崇 (名大)		

図 1.2.4-3 日本の主な研究拠点型プロジェクト (WPI、COI-Next、等)

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 1.2.4-3)。世界トップレベルの研究拠点形成を目指し、「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)」として、2007年より事業を開始している。2012年度までで一度公募は区切りを迎えたが、WPIの長期計画や助成期間終了後の措置等の議論を重ね、2017年度より新たに公募を開始している。また、助成期間終了後の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。

他の拠点系事業としては、JSTにおいて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、2021年度で事業が終了した。現在、COI STREAMのコンセプトを継承し、国の成長と地方創生に貢献する産官学共創に向けた拠点形成事業である「共創の場形成支援プログラム (COI-NEXT)」が推進中である。

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 1.2.4-4)。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)」、2019年度から開始された「材料の社会実装に向けたプロセスサイエンス構築事業 (Materailize プロジェクト)」、2022年度から開始された「次世代X-nics半導体創生拠点形成事業」であろう。次世代X-nics半導体創成拠点形成事業は、カーボンニュートラルやデジタル社会の実現、経済安全保障の確保に向けて重要な役割を果たす革新的半導体集積回路の創生を目的とし、わが国の強みを活かした研究開発及び人材育成の中

核的なアカデミア拠点形成を推進するとしている。

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と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1.2.4-5)。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1.2.4-6)。

日本の関連主要プログラム・プロジェクト

文部科学省

- データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト 2021年度新規
- マテリアル先端リサーチインフラ事業 2021年度新規
- 革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業 2021年度新規
- 次世代X-nics半導体創生拠点形成事業 2022年度新規
- 革新的GX技術創出事業 (GteX) 2023年度新規
- 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-PJ)
- 革新的材料開発力強化プログラム (M-cube)
- 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)

経済産業省・NEDO

- グリーンイノベーション基金事業 2021年度新規
- マテリアル革新技術先導研究プログラム 2021年度新規
- 電気自動車用革新型蓄電池技術開発 2021年度新規
- 省エネエレクトロニクスの製造基盤強化に向けた技術開発事業 2021年度新規
- IoT社会実現のための革新的センシング技術開発
- 官民による若手研究者発掘支援事業
- 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
- 超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト
- 革新的新構造材料等研究開発

図1.2.4-4 日本の主な研究開発プログラム (文部科学省、経済産業省)

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

2015	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
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・利活用を基軸とする次世代ITコアの基礎技術 研究総括: 北山 研一 (光産業創成大学院大学)														
微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出 研究総括: 谷口 研二 (大阪大学)														
量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出 研究総括: 荒川 泰彦 (東京大学)														
計測技術と高度情報処理の融合によるソフトウェア計測・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: 柳 日替 (大阪府立大学/台湾国際交通大学)														
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)														
革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明 研究総括: 伊藤 耕三 (東京大学)														
独創的原理に基づく革新的光科学技術の創成 研究総括: 河田 聡 (大阪大学)														
原子・分子の自在配列・配向技術と分子システム機能 研究総括: 君塚 信夫 (九州大学)														
情報担体を活用した集積デバイス・システム 研究総括: 平本 俊郎 (東京大学)														
未踏探索空間における革新的物質の開発 研究総括: 北川 宏 (京都大学)														
分解・劣化・安定化の精密材料科学 研究総括: 高原 淳 (九州大学)														
社会課題解決を志向した革新的計測・解析システムの創出 研究総括: 笠尾 隆 (大阪大学)														

図 1.2.4-5 近年のJST戦略的創造研究推進事業 (CREST) プロジェクト

近年のJST戦略的創造研究推進事業 (ERATO)

※ナノテク・材料関係を抜粋

2016	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
沼田オルガネラ反応クラスター 研究総括: 沼田 圭司 (京都大学)						追加支援 期間					
浜地ニューロ分子技術 研究総括: 浜地 格 (京都大学)											
前田化学反応創成知能 研究総括: 前田 理 (北海道大学)											
山内物質空間テクトニクス 研究総括: 山内 悠輔 (クイーンズランド大学)											
鈴木RNA修飾生命機能 研究総括: 鈴木 勉 (東京大学)											
野崎樹脂分解触媒 研究総括: 野崎京子 (東京大学)											
柴田超原子分解能電子顕微鏡 研究総括: 柴田直哉 (東京大学)											
内田磁性熱動体 研究総括: 内田健一 (NIMS)											

図 1.2.4-6 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実施している（図1.2.4-7）。本事業では、研究開発のステージや技術テーマの重要度に応じて「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、ステージゲート方式の導入など柔軟な公募・運営スキームを展開している。

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）	<ul style="list-style-type: none"> 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-） サイバーとフィジカルの高度な融合に向けたAI技術の革新（2019年度-） 異分野共創型のAI・シミュレーション技術を駆使した健全な社会の構築（2020年度-）
「持続可能な社会の実現」領域 運営統括：國枝 秀世（あいちシンクロトロン光センター）	<ul style="list-style-type: none"> 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-） モノの寿命の解明と延伸による使い続けられるものづくり（2019年度-） 社会の持続的発展を実現する新品種導出技術の確立（2020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）	<ul style="list-style-type: none"> 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-） 食・運動・睡眠等日常行動の作用機序解明に基づくセルフマネジメント（2019年度-） 心理状態の客観的把握とフィードバック手法の確立による生きがい・働きがいのある社会の実現（2020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：魚崎 浩平（NIMS）	<ul style="list-style-type: none"> 「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）	<ul style="list-style-type: none"> 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：大石 善啓（三菱総研）	<ul style="list-style-type: none"> 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-） センサ用独立電源として活用可能な革新的熱電変換技術（2019年度-） トリオンセンサ時代の超高速情報処理を実現する革新的デバイス技術（2020年度-） 安全・安心かつスマートな社会の実現につながる革新的マイクロ波計測技術（2021年度-）

図1.2.4-7 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。

日本学術振興会（JSPS）では、2020年に従来の新学術領域研究（研究領域提案型）の見直しが行われ、次代の学術の担い手となる研究者（45歳以下の研究者）の参画を得つつ、多様な研究グループによる有機的な連携の下、様々な視点からこれまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させることを先導することなどを目的として「学術変革領域研究」を創設した。助成金額や研究期間等に応じて、「学術変革領域研究（A）」と「学術変革領域研究（B）」の2つの区分が設置された（図1.2.4-8）。

科学研究費補助金 学術変革領域研究

※ナノテク・材料関係を抜粋

学術変革領域研究(A)	
データ記述科学の創出と諸分野への横断的展開(2022年度-)	平岡 裕章 (京都大学)
「学習物理学」の創成 – 機械学習と物理学の融合新領域による基礎物理学の変革(2022年度-)	橋本 幸士 (京都大学)
生体反応の集積・予知・創出を基盤としたシステム生物合成科学(2022年度-)	葛山 智久 (東京大学)
光の螺旋性が拓くキラロ物質科学の変革(2022年度-)	尾松 孝茂 (千葉大学)
超セラミックス：分子が拓く無機材料のフロンティア(2022年度-)	前田 和彦 (東京工業大学)
光の極限性能を生かすフォトニックコンピューティングの創成(2022年度-)	成瀬 誠 (東京大学)
極限宇宙の物理法則を創る – 量子情報で拓く時空と物質の新しいパラダイム(2021年度-)	高柳 匡 (京都大学)
超温度場材料創成学：巨大ポテンシャル勾配による原子配列制御が拓くネオ3Dプリント(2021年度-)	小泉 雄一郎 (大阪大学)
デジタル化による高度精密有機合成の新展開(2021年度-)	大嶋 孝志 (九州大学)
生物を凌駕する無細胞分子システムのボトムアップ構築学(2021年度-)	松浦 友亮 (東京工業大学)
2.5次元物質科学：社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト(2021年度-)	吾郷 浩樹 (九州大学)
動的エキシトンの学理構築と機能開拓(2020年度-)	今堀 博 (京都大学)
高密度共役の科学：電子共役概念の変革と電子物性をつなぐ (2020年度-)	関 修平 (京都大学)
マテリアルシミュレーションのための生命物理化学 (2020年度-)	山吉 麻子 (長崎大学)
超秩序構造が創造する物性科学 (2020年度-)	林 好一 (名古屋大学)
散乱・揺らぎ場の包括的理解と透視の科学 (2020年度-)	的場 修 (神戸大学)

図1.2.4-8 科研費・学術変革領域研究

1 俯瞰対象分野の全体像

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	
分野横断	グリーンイノベーション基金事業	2021-	新製造技術	積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業	2019-23	
	官民による若手研究者発掘支援事業	2020-26		革新的新構造材料等研究開発	超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト	2016-22
	NEDO先導研究プログラム	2014-			機能性化学品の連続精密生産プロセス技術の開発	2019-25
太陽光発電	太陽光発電主力電源化推進技術開発	2020-24	材料・部材	IoT社会実現のための革新的センシング技術開発	2019-24	
燃料電池・水素	水素利用等先導研究開発事業	2014-22		海洋生分解性プラスチックの社会実装に向けた技術開発事業	2020-24	
	水素社会構築技術開発事業	2014-22		炭素循環社会に貢献するセルロースナノファイバー関連技術開発	2020-24	
	超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業	2018-22		次世代複合材創製・成形技術開発プロジェクト	2020-24	
蓄電池	燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業	2020-24	カーボンサイクル実現を加速するバイオ由来製品生産技術の開発	2020-26		
	先進・革新蓄電池材料評価技術開発 (第2期)	2018-22	ロボット・AI	次世代人工知能・ロボットの中核となるインテグレート技術開発	2015-22	
	電気自動車用革新型蓄電池開発	2021-25		人工知能技術適用によるスマート社会の実現	2018-22	
省エネルギー	環境調和型プロセス技術の開発	2017-22	革新的ロボット研究開発基盤構築事業	2020-24		
	戦略的省エネルギー技術革新プログラム	2012-24				
	脱炭素社会実現に向けた省エネルギー技術の研究開発・社会実装促進プログラム	2021-35				
電子・情報通信	未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発	2015-22				
	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				
	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				
3R・水循環	ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業	2019-				
	高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業	2017-22				
	革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発	2020-24				

図1.2.4-9 NEDOの主要プロジェクト

安全保障技術研究推進制度

※ナノテク・材料関係を抜粋

2022年度公募テーマ	2023年度公募テーマ
量子暗号通信技術に関する基礎研究	量子ネットワーク技術に関する基礎研究
光波領域における新たな知見に関する基礎研究	光波領域における新たな知見に関する基礎研究
高出力レーザの発振・伝搬に関する基礎研究	光波センシングや光通信における新たなアプローチに関する基礎研究
高速放電及び高出力・大容量電力貯蔵技術に関する基礎研究	高出力レーザの発振・伝搬に関する基礎研究
冷却技術に関する基礎研究	高出力、大容量電力貯蔵技術や電池・高速放電や再充電電源システムに関する基礎研究
高強度材料・機能性材料・表面加工に関する基礎研究	エレクトロニクスデバイスやレーザ装置の冷却技術に関する基礎研究
接合技術に関する基礎研究	高強度材料・機能性材料・表面加工に関する基礎研究
耐熱技術に関する基礎研究	材料間の相互接合技術による軽量化・強度向上に関する基礎研究
極限環境下における計測技術に関する基礎研究	耐環境性・適切な電磁波特性を確保する耐熱技術に関する基礎研究
磁気センサ技術に関する基礎研究	磁気センサ技術に関する基礎研究
化学物質検知及び除去技術に関する基礎研究	化学物質検知及び除去技術に関する基礎研究
耐性及び信頼性に優れた高速デバイス・回路に関する基礎研究	高周波数・高出力デバイスに関する基礎研究
極超音速技術に関する基礎研究	小型で超高速情報処理を実現する新規な演算デバイスに関する基礎研究
	極超音速推進・空力技術に関する基礎研究

図 1.2.4-10 安全保障技術研究推進制度

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）では、経済産業行政の一翼を担う公的技術開発マネジメント機関として、「エネルギー・地球環境問題の解決」と「産業技術力の強化」という2つのミッションを掲げ、企業、大学および公的研究期間の英知を結集して、技術開発・実証に取り組んでいる（図 1.2.4-9）。

その他省庁でも各種研究開発プロジェクトを実施しているが、昨今の安全保障上の課題を受けて注目されるのが、防衛装備庁が実施する「安全保障技術研究推進制度」である。本制度は、防衛分野での将来における研究開発に資することを期待しながらも、先進的な民生技術についての基礎研究を推進することを目的としている。図 1.2.4-10 に示すようにナノテク・材料分野に関連深い研究テーマが公募対象となっている。

米国

■基本政策

米国における本文野の基本政策として、国家ナノテクノロジーイニシアティブ（NNI）、マテリアルズ・ゲノムイニシアティブ（MGI）の二大イニシアティブを取り上げ、さらに本稿ではThe CHIPS and Science Act of 2022（半導体・科学法 2022）と希少鉱物資源に関する施策に触れる。

• 国家ナノテクノロジーイニシアティブ（National Nanotechnology Initiative: NNI）²

NNI は「21 世紀ナノテクノロジー研究開発法」に基づき、2001 年の開始から 20 年以上に渡って推進されてきた。30 以上の連邦機関が関与する省庁横断の国家イニシアティブとして、大統領府の OSTP（Office of Science and Technology Policy）に設置された NSET 小委員会（Nanoscale Science, Engineering, and Technology Subcommittee）にて、OMB（行政管理予算局）参加のもと企画・推進されている。正式な組織構造としては、NSET のもと 2 つの組織、ナノテクノロジー環境・健康影響（NEHI）作業部会と、

2 ・ NSET: NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE STRATEGIC PLAN, October 2021.
 ・ NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE SUPPLEMENT TO THE PRESIDENT'S 2023 BUDGET.

国家ナノテクノロジー調整局 (NNCO: National Nanotechnology Coordination Office) とがあり、NNCOが組織間の調整を担う。NNIは個別の資金提供プログラムではなく、関連する政府機関全ての活動の「総和」であり、ナノテクノロジーを進展させるために協力するコミュニティであると定義している。NNIでは戦略計画を5年毎に更新し、現在の計画は2021年度に策定された。同戦略計画ではナノテクノロジーのR&D、商業化、研究インフラ、責任ある開発をNNI参画省庁・機関が支援するために、設定したゴールを維持するとともに、教育と労働力へより明確に焦点を当てるべく新たなゴールを追加した(表1.2.4-1 ゴール4)。また、コミュニティ全体として「多様性、包摂性、公平性、アクセス (IDEA)」に新たに重点を置くとした。

表 1.2.4-1 NNI 戦略計画 2021 における 5 つのゴール

<p>ゴール1. 研究開発において世界トップの座を維持</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・世界レベルのナノテクノロジー R&D を実現し進展させる ・NNI 参加機関の間のターゲットを絞った協働を通じて共通の関心分野を進展させる ・連邦政府の既存及び新規の優先事項・イニシアティブとNNIのつながりを強化する ・ナノテクが世界的問題に対処することができる分野に取り組みを集中させる ・共通の関心分野における国際的協働とコミュニケーションを推進する。
<p>ゴール2. R&Dの商業化促進</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ナノテク起業家コミュニティの訓練及び強化、支援を行う ・国内のあらゆる地域においてナノテクの商業化を支援するために、地域イノベーションエコシステムと協働し、つながりを強化する (Manufacturing USA 研究機関とのシナジーを生かす) ・技術開発経路の後半を支える連邦政府の活動に対する認識を高め、調整を行う (開発・応用に関する特定課題に迅速に対処し、技術ロードマップを作成するために「タイガーチーム」を設置) ・ターゲット分野における官民パートナーシップを構築・拡大する
<p>ゴール3. 研究、開発、実用化を持続的に支援する研究インフラの提供</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ナノテク R&D インフラを支援する連邦政府の取り組みを調整する ・重要なナノテクインフラの開発と入手性を支援する ・米国全土において全ての米国人のためにナノテク研究開発インフラへのアクセスを促進する ・データベースの相互運用性とベストプラクティスを推進することでデータの共有を促す ・研究ユーザー施設からプロトタイプング・試験・製造リソースへの移行に対する認識を高め、移行のための経路を支援する ・ターゲットとする技術分野においてテストベッドとプロトタイプング施設を整備する ・特殊なナノテクインフラを活用した教育及び訓練、人材開発の機会を提供・促進する
<p>ゴール4. パブリック・エンゲージメントを求め、ナノテクノロジー人材を拡大</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ナノテクを用いて、科学・技術・工学・数学の学位及びキャリアパスを追求する学生を増やす ・教員訓練を提供し、ナノテク教育リソースへのアクセスを促す ・学生の研究及びインターンシップ、交流、国際経験の機会を促進・拡大する ・特殊なナノテクインフラを活用した教育及び訓練、労働力開発を提供・推進する ・労働者を、ナノテクを活用した新技術に関する高度な仕事に備えさせる ・ナノテク人材を拡大・多様化する ・ナノテクの科学及び用途、影響に関連する問題について一般市民に情報を提供し、参画を求める
<p>ゴール5. 責任ある開発を保証する</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ナノテクの責任ある開発に関連する連邦政府の活動の調整を行う ・ナノ EHS に関する科学的理解を進展させ、幅広く共有する ・ナノテクを活用した製品及びナノマテリアルの研究及び開発、商業化における責任ある開発の原則の採用を支援する。 ・教育・訓練プログラムにおける責任ある開発の原則の採用を奨励する ・ナノテクの責任ある開発を支援するために国際的エンゲージメントを強化する

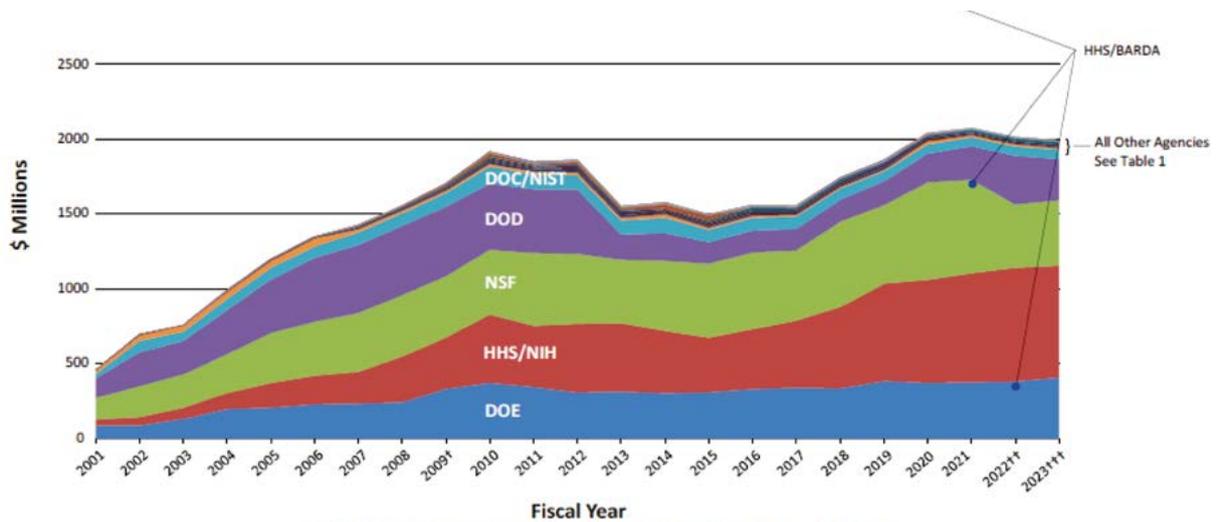


Figure 1. NNI Funding by Agency, 2001–2023.*

- * 2021 figures include supplemental funding. BARDA investments (blue dots) not included in line graph totals.
- † 2009 figures do not include American Recovery and Reinvestment Act funds for DOE, NSF, NIH, and NIST.
- †† 2022 numbers are based on appropriated levels.
- ††† 2023 Budget.

図1.2.4-11 米国NNIの省庁別予算推移

バイデン大統領の2023年予算教書では、NNIに19.9億ドルを要求しており（図1.2.4-11）、未来の産業を発展させ、世界の課題に取り組むために必要な発見を促進する基礎研究への投資を継続するとしている。累計407億ドル以上（2023年要求分含む）のNNI投資は、ナノスケールで物質を理解し、知識を米国民に利益をもたらす技術の飛躍的進歩に転換するための研究を支援するものとしている。これまでのNNI投資では、ナノサイエンスの基礎研究、応用、デバイス、システムを進歩させる研究、研究開発を支える重要研究インフラ（国家ナノテクノロジー共用基盤（NNCI）等）に持続的に重点を置いてきた。NNI予算は各省庁・機関（NNIクロスカット）によって割り当てられたナノテクノロジー関連投資の合計を表している。各機関は、OMB、OSTP、および議会との調整により、ナノテクノロジー研究開発予算を決定している。NSET小委員会、そのワーキンググループ、コーディネーター、戦略リエゾン、およびNNCOを通じて緊密に協力・連携が図られ、統合的な研究開発プログラムを構築している。2020年と2021年の予算は、“Biomedical Advanced Research and Development Authority”による大規模な追加資金を含み、COVID-19パンデミックに対処するための追加投資がおこなわれた。各省庁はこの取り組みの一環として、感染の検査、治療、予防、ウイルスの理解のために、ナノテクノロジーを活用する多くの研究開発活動に資金を投じた。

NNIの投資はプログラム構成エリア（Program Component Areas: PCA）への戦略的な配分比率に従って実施されてきた。PCAの内容や予算配分は変更を伴いながら過去推移してきたが、現在は5つのPCAとなっている（PCA1.基礎研究、PCA2.応用・デバイス・システム、PCA3.研究インフラ・装置、PCA4.教育・労働力開発、PCA5.責任ある開発）。各PCAへの予算配分は図1.2.4-12の通りである。

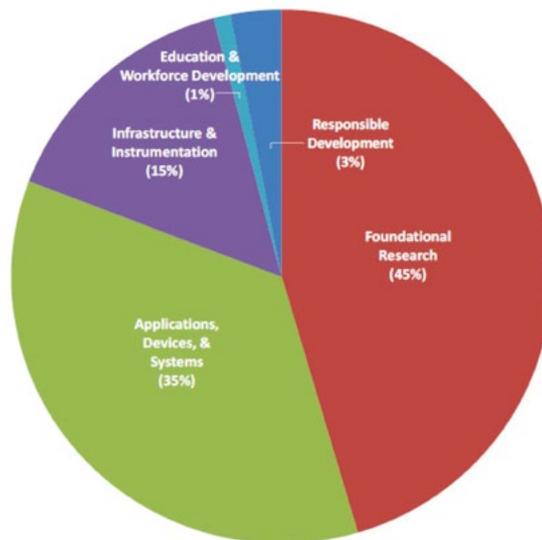


図1.2.4-12 NNIのPCA別2023年度予算案

NNIは過去10年間、「ナノテクノロジーシグニチャーイニシアティブ (NSI)」として特定技術・応用領域の強化支援を掲げて重点投資を行ってきたが、NSIの指定は終了させた。今後はNSIの経験を生かし、コミュニティのニーズの変化をベースとした特定技術・応用領域に関する非公式な共同体 (community of interest) を設定し、NSET小委員会が毎年見直しを行うとした。新たに設定されたものとして「ナノプラスチック共同体」が構築されている。このコミュニティでは、検出や特性評価の手法など、米国の20年以上に及ぶ工業ナノマテリアルに関するEHS研究を基に、二次的ナノマテリアルが及ぼす影響を理解・軽減するための方法を開発している。NNCOの支援を受け、現在は20の政府関係機関と100名以上の参加者で構成されている。今後、共通の優先事項に関してNNI共同体がさらに構築される予定である。「センサーNSI」及び「ウォーターNSI」の政府機関間グループは、上記の共同体として今後も継続する。

NNIは他のイニシアティブとの協働をこれまでも実施してきたが、より明確にシナジー効果のある連携のために、「戦略リエゾン」を定めている。戦略リエゾンは活動全体における情報共有のパイプ役としての役割を果たし、NSET直属となる。例えば、ナノテクノロジーと量子情報科学、マイクロエレクトロニクス、情報技術は互いに重なる部分がある。新たに設置されたNSTCマイクロエレクトロニクスリーダーシップ小委員会は、NNCO局長が共同委員長を務めている。ネットワークング及び情報技術研究開発国家調整局及び国家量子調整局の局長は、同小委員会のメンバーであり、両調整局のメンバーが小委員会のスタッフ支援を行っている。このケースにおいては、調整局の局長がイニシアティブ間のリエゾンとしての役割を果たしている。また、ナノテクノロジーコミュニティ全体でIDEAの原則と手法を取り入れるために、NNIはナノテクノロジーコミュニティ内で最新の機会と手法を実行に移すことを目的としてSTEMにおけるIDEAを改善する方法について政府全体での議論を主導する連邦政府グループとの連絡を担当するIDEAリエゾンを定めている。戦略リエゾンの設置により、つながりがさらに強化され、NNIが確実に政権の優先事項と足並みを揃えることができるようになるとしている。リエゾンは、NNIの議会に対する年次報告書としての役割を果たす大統領予算教書のNNI補遺で定められる。戦略リエゾンの仕組みを補完するものとして、NNIは政府内外での連絡窓口としての役割を果たし、積極的に政府関係機関間の取り組みの調整を担うコーディネーターを引き続き主要分野で採用する。国際問題分野と規格分野のNNIコーディネーターは継続する。本計画を通じて、さらにインフラコーディネーター及び教育・人材コーディネーターを定める。さらに、NNCOには実業界と地域のイノベーションエコシステムが参画するための専用の産業・地域リエゾンを設けている。これらの仕組みにより、増加するナ

ノテクノロジーに従事する政府関係機関の活動を調整・活用し、関連する連邦政府の活動との協働を意図的に実施するための枠組みがもたらされる。

幅広いナノテクノロジーコミュニティは、米国及び世界中の研究者、大企業と小規模企業、教師と学生、連邦政府及び州政府、地方政府の職員、非営利団体、一般市民など、多くのステークホルダーで構成されている。NNIは全てのステークホルダーを関与させるためのターゲットを絞った活動を実施しており、2021年度からの5年間に、そうした取り組みを拡大・強化する。NNCOはコミュニティを関与させるための様々な仕組みを有しており、NNIのウェブサイトNano.govとソーシャルメディアチャンネルに加え、パンフレットやウェビナー、ワークショップ、ポッドキャストを通してターゲットを絞ったコンテンツを提供し、重要なコミュニティを発展・促進させるためのネットワーク形成を促している。

世界中の研究者を集めて特定のトピックに協力して取り組む研究コミュニティ (COR) モデルは、積極的で生産的な協働を育むために過去10年間にわたり効果的に活用されてきた。NNCOが欧州委員会と協力して支援を行う「研究者主導型ナノテクノロジー環境・健康・安全 (ナノEHS) COR」は、参加者により幅広い分野に対して目に見える影響を及ぼしている活発な取り組みである。ナノEHS COR内で構築された強固な関係は、データシェアリングやプロトコル開発などの重要な分野の進歩とナノEHSの知識をフル活用するための研究再現性及び信頼性の向上を加速させる。NNIはこのような強力なモデルを拡大し、世界的な関心分野において国際的コミュニティをまとめていく。

現在の世界的パンデミックへの対処において、ナノテクノロジーを活用したワクチンと診断法が利用されていることから、スモールサイエンスの力が浮き彫りになっている。ナノテクノロジーは、病気との闘いや気候変動への対処、浄水化、食料生産の増大、その他の多くの世界的懸念事項への対処に貢献する。NNIは、重要な問題に対処する手助けをすべく、ナノテクノロジーコミュニティを動員し、つなげるために新たな仕組みとして「国家ナノテクノロジーチャレンジ (NNC)」を立ち上げた。社会に便益をもたらすソリューションを推進するためにこうした問題に焦点を当てたより幅広い取り組みと、こうした分野に従事するナノテクノロジー研究者をつないでいくとしている。2022年10月、NNCOはNNCの一つとしてナノテクを活用した気候変動対策プログラム「国家ナノテクノロジーチャレンジ“Nano4EARTH”」を発表した。同プログラムでは、気候変動の現状と傾向の評価・監視・検出、将来の温室効果ガス排出の防止、既に存在する温室効果ガスの除去、ナノテクによる問題解決のための高度なスキルを持つ労働力の教育・訓練、気候変動に起因する社会的・経済的圧力の緩和と強靱性の向上、などの取り組みが挙げられている。

NSFのプログラムである国家ナノテクノロジー共用基盤 (NNCI) は、近年、ナノ・アントレプレナーシップに関する訓練を提供する取り組みを拡大し、米国全土で機会を提供するためにこの取り組みに特化したアソシエイト・ディレクターを設けた。こうした訓練プログラムに加え、中小企業及びスタートアップ企業におけるインターンシップの機会は、ナノテクノロジーの道に進むことに関心がある学生に貴重な体験を提供する。ナノテクノロジービジネスを成長させている起業家はあらゆる起業家と同じ課題に直面するが、他にも高額なツールを利用する必要性やナノ材料の安全な取り扱い手順など、ナノテクノロジー分野特有の問題に直面する可能性がある。ナノテクノロジー開発経路の実施に成功した起業家のベストプラクティスとリソースを共有するために、NNCOはナノテクノロジー起業家ネットワークを支援している。

ナノテクノロジーの開発経路を効率的に進めるためには、資金提供から適切な機器へのアクセス、規制指針まで、多様なリソースが必要となる。Nano.govは産業界向けのさらなる情報を提供するために拡充され、規制機関からの最新情報報告やターゲットを絞ったコンテンツなど、各分野における多くのリソースを紹介している。NNI参加機関は、開発の後半と製品化を支援する資金提供機会の幅広いポートフォリオを提供する。例えば、中小企業イノベーション研究 (SBIR) プログラムと中小企業技術移転 (STTR) プログラムは、米国のシードファンドとしての役割を果たし、国内の小規模企業に商業化の可能性のある連邦R&Dに携わるよう奨励する。その他のプログラムとしては、NSFのパートナーシップス・フォー・イノベーションプログラムやDOEの技術商業化基金、国防生産法第三編プログラムが挙げられる。科学技術商業化リエゾンの設置は、

先進テクノロジーの商業化を支援する様々な連邦プログラムとナノテクノロジーコミュニティを結び付ける手助けをする。

NNIにおける共用施設を介したR&D・イノベーション、教育、アウトリーチ活動

NNI参加機関は、NSFの国家ナノテクノロジー共用基盤NNCIやDOEのナノスケールサイエンス研究センター(NSRC)、NISTナノスケール科学技術センターのナノファブ、ナノテクノロジー評価研究所、計算ナノテクノロジーネットワーク(NCN)のnanoHUB.org.など、独自の機能を提供する一連のユーザー施設(共用施設)を設立してきた。NNCIは、16州にまたがる29の大学・パートナー機関のナノ加工・特性評価拠点のネットワークであり、69の異なる施設と2,000以上のツールを提供している。250の国立機関と900社以上の企業、約60の政府機関及び非営利団体から、年間13,000人以上のユーザーがNNCIを活用している。こうした大学を基盤とした施設は、周囲のイノベーションエコシステムを支え、教育とアウトリーチ活動のプラットフォームとしての役割を果たしている。協力大学や産業界、州、その他の連邦政府機関からの資金、利用料や寄付金を含め、NSFによるNNCIネットワークへの事業予算を効果的に活用している。その結果NSF予算1,600万ドル/年は、他の約4,400万ドルの資金が合わさるかたちで活用されている。

DOEが出資するNSRCは、ナノサイエンス研究の最先端施設を有しており、実験計画と実施に関して研究者を指導し、サポートするために世界レベルの科学者と専門家を雇用している。NSRC施設はDOEの国立研究所内に戦略的に設置されており、中性子源またはシンクロトロン光源などその他の主要なユーザー施設と同じ場所に設置されている。利用プロジェクトは、ピアレビュープロセスを通じて選ばれる。

国立がん研究所は、NIST及びFDAと協力し、ナノ粒子の有効性と毒性の全臨床試験を行うためにNCLを設立した。NCLは、全てのがん研究者ががんの治療・診断用のナノテクノロジーに対する規制機関による審査を円滑に進められるようにするための国家的なリソース・知識基盤としての役割を果たしている。ナノ材料を提供する企業に重要なインフラと特性評価サービスを提供することで、NCLはナノスケール粒子とデバイスの臨床応用への移行を促す。物理的なインフラに加え、NCNはnanoHUB.orgでナノテクノロジー研究コミュニティ全体が利用することのできる320を超えるシミュレーションツール及びモデリングツールを提供しており、年間160万人の利用者にサービスを提供している。大学を基盤とした施設から国立研究所を基盤とした研究センター、nanoHUBが提供するサイバーインフラまで、NNIユーザー施設の力が組み合わせられ、研究者及び開発者、教育者、学生、起業家に重要なツール及び機能へのアクセスを提供する活発なエコシステムを促進している。

• マテリアルズ・ゲノムイニシアティブ (MGI) ³

MGIは、実験と共にデータと計算ツールの力を利用することによって、低コストで新材料の発見及び設計、開発、実用化を加速することを目的として、2011年にオバマ政権下で開始された。初期の5年間のイニシアティブが一度終了したのちに国家政策上の後継は顕在化していなかったが、トランプ政権下においてもNISTや主要大学では活発な活動を継続していた。大統領科学技術諮問会議 (PCAST) が2020年6月に発出したレポートにおいて、ポストMGIとしての方向性が再提起され、翌2021年11月、バイデン政権下でNSTCのMGI小委員会は、MGI戦略計画2021を策定した。戦略計画では、次の3つのゴールが掲げられた。(1) 材料イノベーション基盤 (MII: Materials Innovation Infrastructure) を統合すること、(2) 材料データの力を活用すること、(3) 材料研究開発の労働力について教育と訓練を行い繋げていくこと、である (表1.2.4-2)。MIIとは、シームレスに統合された先進モデリングツール及び計算ツール、実験ツール、定量データの動的かつ発展的でアクセス可能な枠組みを指す。MIIの統合とは、個々のツールの価値を高め、より簡単にアクセスできるようにすることである。増え続けるデータを統合することと、材料開発全体にわたり全てのステークホルダーが容易に理解を共有するプラットフォームの構築を指す。MGIコミュニティ全体の現在及び未来のニーズに対処するために、全米材料データネットワーク (NMDN) の構築を掲げている。表1.2.4-3に、MGIに関連する主要プログラム・プロジェクト・拠点等をまとめて示す。

表 1.2.4-2 MGI 戦略計画 2021 における 3 つのゴールおよび各戦略目標、アクションプランの全体像

ゴール	戦略目標	アクションプラン
ゴール 1: 材料イノベーション基盤 (MII) の統合	1. MIIの構成要素を結び付け、構築・強化する	計算 (理論、モデリング、シミュレーション) ツール ・現在の計算ツールのギャップ、特に材料開発全体にわたって多様なステークホルダーに近づく機会の妨げとなるギャップを特定・解消する ・コミュニティコードの開発とこうした技術の商用コードへの組み込みを促すことで国家的計算インフラを活用・強化する ・学際的研究とツール共有・開発を強化するために関連コミュニティとの関係を構築し、協力体制を強化する
		実験 (合成、特性評価、プロセッシング) ツール ・合成・プロセッシングツールをより多くの材料領域に拡大するための戦略を策定し、マルチモーダルな特性評価ツールを開発する ・研究開発から製造にわたって、モジュール式の統合型自律ハイスループット実験ツールの開発を推進する ・歴史的黒人大学やその他のマイノリティ受入大学 (MSI) を含む多様なユーザーコミュニティによる最新機器へのアクセスを制限する障壁を特定し、取り除く
		統合型研究プラットフォーム ・コミュニティを構築し、協働に対するインセンティブおよび障壁を明らかにするためにワークショップを開催する ・統合型材料プラットフォームの開発を促すための試験的プロジェクトを特定する。 ・産業界における統合型材料プラットフォームの例から学ぶ
		データインフラ ・データリポジトリと分析ツールを構築・維持する ・分散リソースを連合システムに統合する ・材料データインフラがどのように既存のニーズを満たすか、または満たせないかを見極めるために、研究者と関与し続ける ・材料データインフラの採用を加速するためにインセンティブのメカニズムを開発する

3 NSTC Subcommittee on the Materials Genome Initiative: MATERIALS GENOME INITIATIVE STRATEGIC PLAN, November 2021.

<p>ゴール1. 材料イノベーション基盤(MII)の統合</p>	<p>2. 全米材料データネットワーク(NMDN)を構築する</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・NMDNの構築に向けたコミュニティの取り組みを明らかにし、協働・支援を行う ・パブリックデータリポジトリとプライベートデータリポジトリを紐付けし、統合させるための枠組みを開発する ・実験装置からデータリポジトリまで自動データワークフローに関する取り組みを試験的に実施する ・ギャップを特定・解消し、既存のデータインフラを統合する ・データ交換のための標準とプロトコルを策定する ・協働に向けた補完的な国際的取り組みを特定する ・データインフラロードマップをはじめとする維持戦略を策定・実施する
<p>ゴール2. 材料データの活用</p>	<p>AIの活用を通じて材料R&Dの実用化を加速させる</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・FAIRデータポリシーに基づいて、よりAI-Readyなデータセットを確保する ・FAIRデータ手法の実施を奨励する ・データの質を評価するためのツールを提供する ・コミュニティのメタデータ標準を策定し、その採用を奨励する ・材料から情報を得るAI手法のオペランド製造工程への応用を実証する ・自律的R&D技術の研究所から製造現場へのトランスレーションを行う ・ワークショップや3千年紀問題の明示を通じてAI駆動型の手法を推進する
<p>ゴール3. 材料R&D労働力の教育及び訓練を行い、繋げていく</p>	<p>1. 材料R&D教育における現在の課題に取り組む。</p>	<p>基礎的K-12STEM教育</p> <ul style="list-style-type: none"> ・K-12科学教員向けのデータサイエンス訓練を促進する ・博物館やスカウト活動、博覧会等の課外体験向けのMGI教材を開発する ・K-12学生と教育者向け教材とMGI関連分野のプログラムを統合・改良・拡大する <p>学部生教育</p> <ul style="list-style-type: none"> ・MGIに精通したカリキュラムの開発を促進する ・MGI教育者ネットワークを構築する ・MGIに重点を置いた学部生向けの研究とキャップストーン体験を可能にする ・コミュニティカレッジを対象としたアウトリーチ活動を拡大する <p>大学院生教育</p> <ul style="list-style-type: none"> ・データを活用した材料研究及び教育、訓練のための効果的な学際プログラムと手法を開発・公開する ・産業界のスキルセットに関する学際的なグラデュエート・サーティフィケートを推進 ・MGI関連のインターンシップとその他の体験学習の機会を促進する
<p>2. 次世代の材料R&D労働力の訓練を行う。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・急速に進化するMGIツールの効果を最大化するために、継続的な教育プログラム、職業プログラム、サマースクールプログラムを推進・支援する ・MGIサバティカルを通じてキャリア中期の専門家の再訓練を行う機会を創出する ・研究トランスレーション、アントレプレナーシップ、技術移転、商業化について科学者とエンジニアのクロストレーニングを行うためのプログラムを促進する 	
<p>3. 人材と機会を結び付ける。</p>	<p>多様でインクルーシブな材料労働力を確保する</p> <ul style="list-style-type: none"> ・効果的なプログラムを特定し、不足分を補う ・多様でインクルーシブな労働力の誘致と育成を拡大する <p>MGI労働力開発におけるパートナーシップ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・学術界と国立研究所、産業界の間のパートナーシップを強化・拡大する ・発見から設計、製造、実用化まで、材料開発全体で専門技能と知識の交流を促す 	

表 1.2.4-3 米国における MGI 関連の主要プログラム・プロジェクト・拠点等

DMREF (Designing Materials to Revolutionize and Engineer our Future)	NSFのプログラムとして、すべての材料研究テーマを対象に公募。2012年以降、毎年30課題程の研究テーマが採択されている。1課題あたりの予算は4年間で\$1,200,000～\$1,800,000の範囲。
MIP (Materials Innovation Platforms)	NSFの支援により、材料研究の進歩を加速するために設計された中規模インフラを構築する。2016年に電子材料と量子材料に関するMIPとして、PARADIMと2DCC-MIPが立ち上げられ、2021年から5年間の更新が認められている。また、2020年にはさらに生体材料とポリマーに関するMIPとして、BioPACIFIC-MIPとGlyco-MIPが発足した。各拠点は5年間で\$15,000,000～\$25,000,000の予算が見込まれる。
HTE-MC (High-Throughput Experimental Materials Collaboratory)	NISTが中核となり、DOEの関係する研究所の材料研究拠点を結び、材料合成、特性評価、データ管理サービスを統合した拠点ネットワーク。材料データベースを構築し、材料科学の予測設計を大幅に改善するために、高品質の実験データを迅速に大量に生成する。すべてのデータおよびメタデータをワンステップで閲覧できるようにしている。サンプルが共同研究機関内の様々な機器で用いられる際に、サンプルライブラリと新しい測定データの自動的な関連付けを行う。
Materials Project	DOE科学局の基礎エネルギー科学（BES）と先進科学計算研究（ASCR）プログラム、およびエネルギー効率・再生可能エネルギー局（EERE）の電池材料研究（BMR）プログラムが支援するプロジェクト。シミュレーションによるデータ蓄積や機械学習オンラインツールを用いて材料スクリーニングを可能にすることを目指す。開発されたオンラインツールやデータベースは、その利便性から世界中で広く使用されている。MITのグループ（現在はUC Berkeley）とローレンス・バークレー国立研究所等が実施。
CHiMaD (Center for Hierarchical Materials Design)	NISTが支援する研究センターで、2019年に5年間の継続を決定している。構造材料を中心に、結晶構造から材料組織までのマルチスケールを、プロセス、材料組織との関係も含め、データから相関を統合する。ノースウェスタン大学、シカゴ大学、アルゴンヌ国立研究所、企業コンソーシアムに、学会ASM Materials Education Foundationが加わる。熱力学・状態図計算など、ニーズに合わせて速度論のシミュレーションを行い、材料特性の予測、材料開発の支援を実施。
MaRDA (Materials Research Data Alliance)	米国の材料研究データインフラを接続・統合し、オープンで利用しやすく、相互運用可能な材料データの実現を目指すコミュニティ主導のネットワーク。アイデア、人材、データ、ツールの融合を促進し、発見を加速させ、材料メカニズムへの新しい洞察を可能にし、材料設計への人間中心およびAI支援アプローチの基礎を築くためのプラットフォームを提供する。MaRDAの活動を調整する会議体、MaRDACによって運営されている。
Rational Design of Advanced Polymeric Capacitor Films MURI (Multidisciplinary University Research Initiative)	海軍研究局が支援する学際的大学研究イニシアティブ・助成プログラムによる支援で、高電圧・高エネルギー密度コンデンサ技術に適した、高誘電率・高耐圧の新高分子材料を設計する。最先端のスケールブリッジング計算、合成、加工、電気特性評価、相関データベースの構築によって実施する。

• The CHIPS and Science Act of 2022（半導体・科学法2022）⁴

CHIPS and Science Act（以下、CHIPS法。CHIPSはCreating Helpful Incentives to Produce Semiconductorsの略）は、米国が将来にわたって競争し勝利するため、新たに527億ドルの投資を行うものである。直接的な半導体だけでなく、幅広い科学技術分野が対象に含まれている。企業における半導体・関連機器の製造にかかる資本支出に対しての25%の投資税額控除や、既存事業・プログラムの継続・増加分なども含めると、総額で2,500億ドル規模の予算措置を見込む。製造業、サプライチェーン、国家安全保

4 ・ CHIPS and Science Act of 2022 Division A Summary - CHIPS and ORAN Investment
 ・ FACT SHEET: CHIPS and Science Act Will Lower Costs, Create Jobs, Strengthen Supply Chains, and Counter China

障を強化し、研究開発と将来の労働力へ投資する。米国がナノテクノロジー、クリーンエネルギー、量子コンピュータ、人工知能、バイオテクノロジーなどの未来の産業におけるリーダーであり続けるためのものであると、さらに民間における数千億ドルの半導体投資を呼び起こすものと見込んでいる。

新たな527億ドルのうちおよそ390億ドルは、半導体メーカーが米国を拠点として製造装置や施設・ファブへ投資することを後押しするために5年間で配分される。商務省(DOC)に110億ドル、国防総省に20億ドルを割り当て、マイクロエレクトロニクス研究開発のための国家ネットワークを構築する。インテルは、オハイオ州への投資を当初は200億ドルとしていたが、CHIPS法のインセンティブにより、1,000億ドルまで拡大する可能性を掲げた。マイクロンは、グローバルで1,500億ドルを投資する計画の一環として、米国内の製造施設に2030年までに400億ドルを投じることを発表した。また、グローバルファウンドリーズは、ニューヨーク工場を拡張することを発表した。サムスンも、テキサス州に2,000億ドル規模の工場建設計画を発表しており、CHIPS法はこれら産業界の投資に拍車をかけるものとなっている。

CHIPS法の主な資金使途には、半導体の製造、組立、試験、パッケージング、研究開発などがあり、米国に拠点を置く施設・設備が広く含まれる。特に施設の建設、拡張、近代化、人材開発・労働力確保、材料開発、複雑な設備のメンテナンス等の支出に充てることができる。商務省は、資金の一部を融資や融資保証に充てることもできるとしている。一方、資金受給する企業は、中国等を念頭に置いた「懸念のある国」で高度な製造活動を展開することや、自社株買い・株主配当に資金を使用することはできない。

DOCが発足を予定する全米半導体技術センター(NSTC)は、先端半導体技術の研究と試作を行い、人材訓練プログラムや、スタートアップからの新技術の商業化を支援する投資ファンドを維持する官民コンソーシアムを担うものとして注目される。PCASTが2022年9月に発した勧告では、米国の半導体エコシステムの長期的な健全性と競争力を確保するため、10のアクションを掲げている。NSTCの設立に際して、広く政府、産業界、学界からの参加を得た包摂的なものとする、半導体の能力拡大における重要技術の前進に沿った6つの分散した卓越連合の創設によって、地理的な包摂性も確保することを勧告している。また、学生が半導体エコシステムにおいて、高需要・高収入の仕事で幅広く活躍できるようにするため、教育と訓練の機会を作る必要性も強調している。そのため米国政府は、あらゆるタイプの教育機関の学生にアプローチし、幅広く多様な労働力を構築するための積極的努力が必要であるとしている。短期的には、NSTCが5億ドルの投資基金を立ち上げ、半導体のスタートアップに対する財政支援と、プロトタイピングのための施設やツールへのアクセスを提供するよう勧告している。さらにNSTCは2025年までに、チップレットプラットフォームの創設または資金供給を行い、スタートアップや学術機関の研究者が、より迅速にイノベーションを起こし、開発コストを大幅に削減できるようにする必要があるとしている。長期的には、国家研究アジェンダで特定された優先課題に資金全体の30~50%程度を充て、全国規模の協力が有効な3つの課題(1.ゼタスケール時代を見据えた高度コンピューティング、2.設計における複雑さの大幅な低減、3.ライフサイエンス用途の半導体の普及)に取り組むことを勧告している。

さらにNISTは、集積回路におけるパッケージ技術開発を行うためのNational Advanced Packaging Manufacturing Program(NAPMP)を始めとして、マイクロエレクトロニクスに特化した最大3つの“Manufacturing USA 拠点”を設立する。2022年会計年度はNSTCに20億ドル、NAPMPに25億ドル、残りの活動に5億ドルが割り当てられる。これらプログラムには、その後の4年間でさらに合計60億ドルが計画され、DOCが資金配分の裁量権を有している。また、全米の地域のイノベーションとテクノロジーのハブに投資するために100億ドルを認可し、州政府や地方自治体、高等教育機関、労働組合、企業、地域密着型組織を集め、技術、イノベーション、製造部門の発展のために全米20か所の地域技術ハブ・パートナーシップを構築する。これらの拠点で雇用を創出し、地域経済発展を促し、AI、先端製造業、クリーンエネルギーなどの高成長・高賃金分野をリードすべく全米のコミュニティを位置づけるものとしている。

NISTはまた、研究者が新しいナノテクや半導体デバイスの開発に利用できる半導体チップを開発・製造す

るため、Googleと共同研究開発契約を締結した。Googleが生産開始の初期費用を負担することで、初回生産分の費用を支援する。NISTは、大学研究者と共同で半導体チップの回路を設計する。設計はオープンソースとし、大学や中小企業の研究者が、制限やライセンス料なしに半導体チップを使用できるようにする。この共同研究では、生産量を増やして規模の経済を実現し、ライセンス料を不要とする法的枠組みを導入することで、半導体チップのコストを大幅に下げることが期待されている。協力機関にはミシガン大学、メリーランド大学、ジョージワシントン大学、ブラウン大学、カーネギーメロン大学などが参画する。

DODの資金によるマイクロエレクトロニクス研究開発のネットワークでは、研究開発上のイノベーションを実用技術に移行することを任務としている。新材料、デバイス、アーキテクチャに関する費用対効果の高い研究、および米国の知的財産を保護するための、国内施設でのプロトタイプ製造を可能にするよう求めている。マイクロエレクトロニクス製造における次のイノベーションには、高度な3Dパッケージングによって可能となる異種材料や異種部品を統合する、ヘテロジーニアスインテグレーションが必要である。国防高等研究計画局(DARPA)の新プロジェクト「次世代マイクロエレクトロニクス製造(NGMM)」は、3Dヘテロジーニアスインテグレーション(3DHI)の研究開発と製造を行う米国拠点の設立を目指している。NGMMプロジェクトは、次世代3DHIプロトタイプ製造が可能な米国内初のオープンアクセス施設を設立することで、パイロットライン製造アクセラレータを立ち上げる予定である。これにより米国のユーザーは、高額な投資をすることなく、設計・テストをすることができ、国産3DHIプロトタイプ製造の推進、標準化、迅速化が可能となる。DARPAは、NGMMプロジェクトで開発された成果・能力を、上述のNIST-NSTCに関連する全米先端パッケージング製造プログラム(NAPMP)に移行することを予定している。

米国ではCHIPS法の実行のためには労働力ニーズが2倍になるとの懸念があり、CHIPS法にもとづく財源からNSFは、半導体マイクロエレクトロニクスの人材育成・教育のために全国ネットワークの構築を含む活動へ5年間で2億ドルの拠出を計画している。このネットワークは、カリキュラムの開発、教育インフラの共有、広報、準学士号・学士号取得機関、労働団体、産業界間の地域的パートナーシップを支援するものとしている。初等・中等・高等のすべてのSTEM教育と訓練への投資を認めている。また、NSFは研究インフラへの支援・投資である中規模研究インフラプログラムを、2027年度に1.8億ドルまで増加させることを推奨している。このプログラムでは、600万ドルから1億ドル規模の研究機器や施設に資金を提供する。また、NSFはインテルと共同で、米国の半導体製造労働力の教育・訓練を支援するために、10年間で1億ドルの共同支援を発表している。

DOE関係では、国立再生可能エネルギー研究所、国立エネルギー技術研究所、アイダホ国立研究所、サバンナ・リバー国立研究所を最新鋭化するプロジェクトのために、2027会計年度まで年間6.4億ドルを議会に計上するよう推奨している。さらに、ロスアラモス研究所、ローレンス・リバモア研究所、サンディア国立研究所に、年間1.6億ドルの拠出を提案している。さらにDOE傘下の各国立研究所の研究インフラ投資を、現在の2.9億ドルから2027会計年度までに5.5億ドルへ引き上げることを議会に提言している。

• 希少鉱物に関する主な施策・プログラム

米国では希少鉱物(critical minerals)の確保に関する戦略的取り組みが進んでいる。2017年に発出された大統領令「希少鉱物の安全かつ信頼できる供給確保のための連邦政府戦略」に基づき、2018年に内務省(DOI)は米国の経済および国家安全保障上の観点から35種の希少鉱物のリストを作成した(パブリックコメントを経て、同5月に確定)。これらを踏まえ、2019年には商務省(DOC)が政府機関全体の行動計画を含む希少鉱物の供給確保戦略を発表し、リサイクルや代替技術の開発、サプライチェーン強化など希少鉱物の対外依存度低減に向けた方策を打ち出している。さらに2020年には、新たな大統領令「希少鉱物を敵対的な外国に依存することによる、国内サプライチェーンへの脅威への対処」が発出され、米国内の希

少鉱物サプライチェーンの確保と拡大に向け、輸入制限措置をはじめ資源マッピングやリサイクル、プロセス技術への資金提供など必要な行政措置の整備が進められている。これら2つの大統領令はトランプ政権によるものであるが、その効力はバイデン政権においても維持されている。

バイデン大統領は2021年2月の大統領令⁵において、重要4品目（含む希少鉱物）と6つの産業のサプライチェーンを包括的に見直すとした。その後、同6月の報告書では希少鉱物に関する提言として、1) 希少材料集約型産業向けの持続可能性基準の開発、2) 回収・リサイクルを含む国内生産および処理能力の拡大、3) 国防生産法等によるインセンティブの活用、4) 生産拡大のための産業界の招集、5) 持続可能な生産と熟練技術者の支援のための省庁横断型研究開発の促進、6) 国家備蓄の強化、7) 同盟国・友好国と連携したグローバルサプライチェーンの透明性強化、を掲げた。これに対応した主な施策としてDOEとDARPAはそれぞれ以下のようなプログラムを策定または開始している。

DOEは2022年2月、米国では初となる希少鉱物の精製施設建設のために、1.4億ドルのプログラム立ち上げることについての情報提供要請（RFI）を発表した。非従来型資源から希少鉱物を抽出・分離精製する商業的実現可能性を実証するための、新しい施設の設計、建設、運営を対象としている。超党派インフラ法にもとづくものであり、石炭廃棄物や石炭灰、酸性鉱山廃液、随伴水などのレガシー廃棄物に含まれる豊富な重要鉱物は未開発の資源であることから、これを開発し、脆弱なサプライチェーンに対処して且つ新たな雇用を創出することを掲げた。同8月にはさらに、6.75億ドルを投じる「希少物質の研究・開発・実証・商業化プログラム」の策定を発表し、意見募集を開始した。希土類元素、リチウム、ニッケル、コバルトなどの海外依存度を減らし、国内調達・国内生産を促進して製造業のリーダーとして米国の地位を強化するとしている。

DARPAでは、希土類元素を国家安全保障のサプライチェーンに不可欠なものとして認識し、多方面からアプローチしている。Environmental Microbes as a BioEngineering Resource（EMBER）プログラムは、微生物や生体分子による選択性を高め、レアアースを分離・精製することを目的として2022年に開始された。ローレンス・リバモア研究所、サンディエゴ州立大学、バテル記念研究所からなる複数のチームが採択されている。合成生物学の手法を応用して、過酷な条件下でレアアースと特異的に結合する生物や生体分子を設計し、これらの技術を個々のレアアースを精製するための機能的なバイオマイニングのワークフローに統合していくとしている。4年間のプログラムは3つの段階に分かれ、各チームは複雑な原料から、より多くのレアアースを高純度で得ることを目指している。国内のレアアース資源からパイロット・スケールの精製を行うことを目標に掲げる。EMBERに加えて、2022年に開始されたDARPAのRecycle at the Point of Disposal（RPOD）プログラムでは、使用済みの電子機器ハードウェア（e-waste）に含まれる重要元素を回収する技術的実現可能性を研究する。アリゾナ州立大学、アイオワ州立大学、マサチューセッツ工科大学からなる複数のチームが採択されている。RPODでは抽出プロセスにおけるエネルギー消費と廃棄物の発生を削減し、フットプリントの小さなプラットフォームを開発することを目標としている。元素の分離・抽出技術は、最終的にベンチトップ型のハードウェアプロトタイプで実証することを計画している。この他、DARPAは米国地質調査所（USGS）と提携し、重要鉱物資源の評価を迅速化する可能性を探るコンペティション「AI for Critical Mineral Assessment Competition」を立ち上げている。USGSの多くの地図はデジタル化されておらず、機械学習や人工知能を利用して、スキャンした地図やラスタ地図から自動的に特徴を抽出し、資源評価のジオリファレンス化をするための革新的ソリューションを募集した。複数の企業およびMITやアリゾナ大学、ペンシルバニア州立大学、南カリフォルニア大学、ミネソタ大学、イリノイ大学などが優れたソリューションを提案し賞金を獲得した。今後USGSは、それらの提案をもとにさらなる鉱物評価ワークフローの開発を行うことを計画している。

5 Executive Order on America's Supply Chains

欧州 (EU)

■基本政策

欧州はフレームワークプログラム「Horizon 2020」(2014年～2020年、74.8Bユーロ/7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きた。2021年からは新たなプログラム「Horizon Europe」(2021年～2027年、95.5 Bユーロ/7年)が開始されている。以下、これまでのHorizon 2020と新たなHorizon Europeにおけるナノテクノロジー・材料関係の政策動向や主なプログラムについて記載する。

Horizon 2020の中では、デジタル化、スマート化を強く進める大きな政策目標を掲げ、マイクロエレクトロニクス・ナノエレクトロニクスの分野の強化を図ってきた。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投資を対GDP比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とした。Horizon2020では、①Excellent science (24.4Bユーロ)、②Industrial leadership (17.0Bユーロ)、③Societal challenges (29.7Bユーロ)、の三つの優先領域で実施された。①の中では、10年間で総額1.0B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、Horizon Europeに引き継がれているが、これらはナノテクノロジー・材料分野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ユーロの予算が投じられた。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、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四つの技術分野が選ばれ推進された。

2021年から開始されたHorizon Europeでは、最先端研究支援、社会的課題の解決、市場創出の支援の三本の柱からなり、以下の予算が割り充てられている。

- (1) 第一の柱 (Excellent science) : 25.0Bユーロ
- (2) 第二の柱 (Global Challenges and European Industrial Competitiveness) : 53.5Bユーロ
- (3) 第三の柱 (Innovative Europe) : 13.6Bユーロ

第一の柱ではERC(欧州研究会議)を通じたフロンティア研究の支援やマリーキュリーアクションによる人材育成を実施する。第二の柱ではミッション志向型研究の導入や、欧州パートナーシップの実施などを通じた社会的課題解決と欧州の産業競争力強化を目指す。また、第二の柱には6つの社会的課題群(クラスター)として、「健康」、「文化、創造性、包摂的社会」、「社会のための市民安全」、「デジタル・産業・宇宙」、「気候・エネルギー・モビリティ」、「食糧・生物経済・資源・農業・環境」が設定されており、それぞれの中に個別の課題領域と産学連携の「欧州パートナーシップ (European Partnership)」が含まれている。第三の柱ではEIC(欧州イノベーション会議)を新設し、中小・ベンチャー企業支援により基礎研究の成果をイノベーションにつなげていく。これらの柱の中では、主に第一の柱と第二の柱がナノテク・材料分野に深く関わっている。

産学連携を支援する枠組みとして「欧州パートナーシップ (European Partnership)」があり、FP6から始まり、FP7、Horizon 2020、Horizon Europeでも実施されている。先に述べたようにHorizon Europeでは第二の柱に位置づけられており、この柱の予算の最大50%(=約25.0Bユーロ)が充てられる予定である。欧州委員会より提案されたパートナーシップでナノテクノロジー・材料分野に関係するものとして、デジタル・産業・宇宙クラスターの「High Performance Computing」、「Key Digital Technologies」、「AI, data and robotics」、「Photonics Europe」、「Clean Steel -Low Carbon Steelmaking」、「European Metrology」、気候・エネルギー・モビリティクラスターの「Clean Hydrogen」、「Batteries: Towards a competitive European industrial battery value chain」などがある。また、2021年5月の欧州委員会の「産業戦略」更新版の中で、欧州の開かれた戦略的自律性支援として、半導体技術に関して新たな産業

同盟を立ち上げるとしている。

電子コンポーネントとシステムにおける欧州の優位性を高めるために、産業界がリードするパブリック・プライベート・パートナーシップ (PPP) のモデルとして、ECSEL (Electronic Components and System for European Leadership) プログラムが総額約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) で進められてきた (2002~2022年)。ここでは、高いTRL (Technology Readiness Level) を狙って、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活動を展開した。このECSELの後継としてKey Digital Technologies Joint Undertaking (KDTJU) がHorizon Europeの下で行われ、これまでの事業を支援することになる。

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: International Roadmap for Devices and Systems) とともに連携している。また、産業化に結びつく研究を支援するものとして、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、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ようになっている。これは、2019年に終了したが、その後継としてASCENT+が2020年より開始されている。さらにEUより10Mユーロが投資され、15機関が参加している。利用できる施設として、CEA-Leti (FR), Fraunhofer Mikroelektronik (DE), imec (BE), INL (PT/ES), Tyndall (IE) があり、そこで蓄積されてきた知識も活用できる。また、アカデミックパートナーとしてCNRS (FR), Universiteit Gent (BE), TU Bergakademie Freiberg (DE), JKU (AT) and the University of Padova (IT) なども加わっている。さらに、ナノエレクトロニクス関係の地域クラスターでSilicon Europe Alliance members のDSP Valley (BE), MIDAS (IE), Minalogic (FR), Silicon Saxony (DE), SiNANO Institute (FR) も加わり、強力な支援・ネットワーク体制を形成している。

■研究開発プロジェクト

Horizon2020のExcellent scienceの中で進められていた、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) Flagshipsが、Horizon Europe でもFlagshipsと名称を変えて継続されている。ナノテクノロジー・材料分野に関わるものとして、2013年開始の「Graphene Flagship」、「Human Brain Project」と、2018年開始の「Quantum Flagship」がある。また、Flagshipsに類似した取り組みで、「Battery 2030+」という大型の研究イニシアティブが2019年3月にスタートしているので、これらについて簡単に紹介する。

「Graphene Flagship」には、21カ国から165のパートナー、90の関連メンバーが関わっている。研究領域としては、基礎科学、材料、健康・医療、センサー、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。2020年には3年間に150Mユーロの追加と、二次元材料のデバイス試作と応用に向けたパイロットライン (The 2D Experimental Pilot Line: 2D-EPL) の構築が決定され、imec、AIXTRONなど11メンバーの協力で2024年の稼働を目指している。

「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。これまで研究活動は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) で行われていたが、2020年からは9つのワークパッケージ (3つの科学技術、3つのインフラ、3つの包括的活動) として進められている。19カ国から154機関が参加している。また、脳科学研究と脳を模擬した技術の研究開発インフラとしてEBRAINSが構築されている。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。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) 用のチップの開発と、それを用いたシステムでのシミュレーションなどのサービスを提供してきたが、2021年からは第二世代のBrainScaleS-2/SpiNNaker-2に活動の軸足を移している。

「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ユーロの予算が投じられ、2019年にはQuantERAコンソーシアムによる20Mユーロを投じるプロジェクト公募もなされた。2021年から活動が本格化し、2022年から新しいQUCATSと呼ばれる新しいフェーズに移ることになった。量子技術の普及、協力活用に向けた取り組み、標準化やベンチマーク、量子技術に関連する人材教育や訓練の開発・評価などの活動が強化される。プロジェクトとしては現在25のテーマが実施されており、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ー、コンパクトな原子時計、量子センサーとMEMS技術による新たなセンサーなどがある。

Flagshipsに類似した取り組みで、EUの「バッテリー戦略活動計画」の一部として「Battery 2030+」という大型の研究イニシアティブが2019年3月にスタートし、Horizon 2020の予算から、2020～2023年の4年間に272万ユーロが配分される予定になっている。Battery 2030+の目的は、超高性能で安全で持続可能なバッテリーを開発することであり、研究機関、業界、公的資金提供者を結集する長期的な研究イニシアティブになっている。バッテリー技術 (特にモビリティとエネルギー分野) の飛躍的な進歩に向けて、ヨーロッパの電気化学、材料科学、デジタル技術を向上させていく。また、新しい電池の化学を探求するために、人工知能、ビッグデータ、センサー、コンピューティングなどの技術を利用する新しい科学的アプローチに焦点を当てている。2020年から新しいフェーズに入り、6つの研究プロジェクト (Battery Interface Genome (BIG)、Materials Acceleration Platform (MAP)、Sensing、Self-healing、Manufacturability、Recyclability) が進められている。

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3期となる「新ハイテク戦略 (New High-Tech Strategy)」を発表、前戦略を踏襲するかたちで、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。基幹産業である自動車・機械・化学を今後も支える「未来技術」として、マイクロエレクトロニクス（通信システム、5G通信技術）、材料（電池、3Dプリント、軽量化、製造技術、宇宙航空）、バイオテクノロジー、ナノテクノロジー、人工知能（機械学習、ビッグデータ）、量子技術といった技術領域を位置づけている。連邦政府は2019年に約200億ユーロを投資、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。ドイツの2019年の研究開発費の実績はGDP比率3.18%であり、新型コロナウイルスの状況下であっても、2025年までに3.5%とする目標を堅持するとしている。また、デジタル化やさまざま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によって、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と連動して、連邦教育研究省（BMBF）は2015年に「材料からイノベーションへ」と題したナノテク分野の基本計画⁶を発表した。

同プログラムは研究成果をより効率的に技術移転し、市場性のある製品に結びつける目的で設置されたもので、過去に実施された「ナノイニシアティブ・アクションプラン2010」、「アクションプラン・ナノテクノロジー2015」の後継と位置づけられており、現状では2024年まで、毎年1億ユーロ規模の助成を予定している。BMBFは応用分野、先端材料、バッテリー材料、デジタル技術を重点的に取り組んでいる。

応用分野としては以下を重点分野として研究開発を推進している。

- ・エネルギーおよび蓄電システム：ガス発電タービンや風力発電タービンの材料研究や、新しい電気貯蔵システム用材料。
- ・モビリティと輸送：電気自動車用バッテリー技術や水素貯蔵システム用材料。
- ・健康およびQOL（Quality of Life）：セルフクリーニング・抗菌材料や空気・水用フィルターシステムなどQOLに貢献する材料や、インプラント用材料、医薬品製剤用材料。
- ・循環型材料社会：材料利用効率の向上、希少な再生不可能な原材料の代替、リサイクル、廃棄物のリサイクル、二次原材料の使用など。
- ・建築材料：建物のエネルギー効率を改善するための断熱材、防汚性塗料、光触媒など。

革新材料研究についても、長期的視点で力を入れており、インテリジェント材料、ハイブリッド材料、炭素材料、または磁性材料に取り組んでいる。

蓄電池の研究については、ワイヤレスデバイス、グリーン発電、電気自動車などの観点から特に重視しており、材料から電池製造、リサイクルまでのバリューチェーン全体にわたる研究開発を推進している。ポストLiイオンバッテリーである金属空気電池や金属硫黄電池にも取り組んできている。また、バリューチェーン全体（原材料から部材、セルの製造、トータルバッテリーシステムまで）をドイツでカバーすることもめざしている。

デジタル技術と材料研究の関わりについては、2つの方向性を示している。1つ目は、材料革新により、プロセッサ、データストレージ、伝送技術などの情報通信技術の絶えず成長するパフォーマンスを支える研究開発であり、もう1つは、マルチスケールモデリングやシミュレーションやデジタルツイン、AIを活用したデータ科学などによる材料創製研究の革新である。

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6億5,000万ユーロを投資する予定であるが、2020年6月には未来パッケージの一部として、量子研究開発支援に20億ユーロの追加投資が発表された。量子コンピュータ、量子シミュレーション、量子ベース計測科学、量子システムの基盤技術（実験装置、プラント技術、レーザー）などを重点領域として、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、

6 <https://www.werkstofftechnologien.de/> (2022年1月13日アクセス)

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んでいる。

また、2020年には、自動車、機械、化学などドイツの従来の主力産業に加え水素製造を新しい核とすることをめざし「水素戦略2020（The National Hydrogen Strategy）」が発表された⁷。連邦経済エネルギー省（BMWi）の所掌であり、未来パッケージの一部として、研究開発とインフラ整備に70億ユーロ、海外への技術支援に20億ユーロ、計90億ユーロの投資を予定している。再生可能エネルギーのみによる電気分解で生成されるCO₂フリーな水素である“グリーン水素”の導入・普及をめざし、研究開発関連では、水素製造技術、Power-to-X技術（電力から燃料への転換技術）の商業化、水素製造・輸送・貯蔵・利用の安全性確保ならびに関連する計測技術・監視技術の革新に取り組む計画である。

さらに、2021年には、グリーン水素のドイツ国外での生産とドイツへの輸入を推進するための「H2グローバル」プロジェクトに、総額約9億ユーロの予算を拠出することが発表されている。このプロジェクトは、「水素戦略2020」に沿ったものであり、将来のグリーン水素の需要を国内生産では全て賅えないため、アフリカなど太陽光や風力によるグリーン水素生産に適した地域にドイツの技術を活用して水素製造設備などを構築し、水素を輸入するものである。

スタートアップ支援策としては、萌芽的研究を長く支援し急進的なイノベーション創出を支援するための飛躍的イノベーション機構「SPRIN-D」を設立し、2019年から助成を開始している。ドイツは漸進的なイノベーションには成果を上げているものの、新たなビジネスモデルを作るような破壊的イノベーションが生まれていないという問題意識の下、連邦教育研究省（BMBF）と連邦経済気候保護省（BMWK）の共同出資で設立された機構であり、2019年からの10年間で10億ユーロの運用を計画している。ナノテク・材料分野に関連する研究テーマとしては、「超高性能省電力アナログコンピュータ製造」「マイクロバブルを利用したマイクロプラスチック除去技術の開発」「エネルギー効率の高いAIハードウェアの設計」「高性能/低価格蓄電池開発」などに取り組んでいる。

英国

英国のナノテクノロジー・材料分野の戦略の基盤となっているのは、ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS：Department for Business, Energy & Industrial Strategy）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年に出した「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。

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

7 https://www.bmw.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?__blob=publicationFile&v=6（2023年1月13日アクセス）

円程度（2022年まで累計で300Mポンド）の大規模な研究拠点となっている。

政府が投資するナノテク・材料分野の研究費は主に、英国研究技術革新機構（UKRI）のEPSRCや Innovate UK 等から拠出されている。EPSRCは、優先研究テーマの中に「エンジニアリング」を挙げており、その関連研究分野として「材料エンジニアリング：セラミック、複合材料、金属・合金」が含まれている。

BEIS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。また、新技術とイノベーション支援への投資（2020～2021年）として、材料加工研究所（Materials Processing Institute）に22Mポンドの予算が付けられている。

英国がナノテク・材料分野で重点的に取り組んでいる研究テーマとしては、量子技術とグラフェン研究が挙げられる。量子技術に関しては、社会実装を目指して2014年からの10年プロジェクトとして進められている The UK National Quantum Technologies Programme（NQTP：産学官連携で1Bポンド）がある。2017年より開始された産業戦略チャレンジ基金（ISCF：Industrial Strategy Challenge Fund: for research and innovation）においても量子技術（20Mポンド/4年、2018年）、量子技術実用化（70Mポンド/4年、2019年）が行われた。産業界からの投資も含めると2022年までに総額494Mポンドが投入されている。また、2020年に量子技術利用の経済のための今後10年間の戦略ビジョン「UK National Quantum Technologies Programme | Strategic Intent」を公開している。このように、英国は量子技術の強化を図ってビジネスに繋げていく姿勢が明確になっている。

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（NGI: National Graphene Institute）が作られ、100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、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および他の二次元材料の応用・商業化の促進やハイテク分野における雇用の創出を目指して、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（総額61Mポンド）され、現在はパートナー企業が20社程度となっている。

フランス

フランスでは、2013年に「国家研究戦略（SNR: Stratégie Nationale de Recherche） France Europe 2020」が公表された。これは2015～2020年の期間をカバーし、中長期の展望をもって策定されているものである。EUのHorizon 2020の課題に沿うよう組み立てられており、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・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。2019年から新戦略の策定作業が開始され、2021年からの10年間の科学技術政策の基礎となる研究計画法に関して研究の複数年計画法（LPPR）が2020年12月に制定されている。同法には、大規模研究開発投資、研究者のキャリアパス改革・待遇改善、イノベーションを創出するための環境整備等が盛り込まれている。

2019年からエレクトロニクス分野の産業競争力向上を掲げる戦略「Nano 2022」が進められている。仏原子力・代替エネルギー庁（CEA: Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives）の電子情報技術研究所（LETI）、仏ソイテック社、スイス・STマイクロエレクトロニクス社の3機関に、計11億ユーロ規模（うちフランス政府からは8億8,650万ユーロ）を支援している。自動運転や5G通信分野で欠かせない次世代マイクロエレクトロニクスの研究開発拠点および製造拠点の形成を目標としている。

2021年には、産業競争力の強化と未来産業の創出に向けた新たな投資計画「France 2030」が発表された。これは、原子力、水素、航空機のほか、電子部品やディープテックなどの戦略分野に5年間で約300億ユーロを投資するものであり、そのうち、原子力・水素エネルギーを使ったクリーン電力への転換や製造業の脱炭素化に80億ユーロを充てる。原子力分野には10億ユーロを投資し、より安全な廃棄物再処理技術と小型モジュール原子炉の開発を目指す。グリーン水素製造分野では、2030年までに国内に大型製造施設を少なくとも2カ所設置する。製造業では鉄鋼、セメント、化学産業を中心に脱炭素化を進め、2030年の温室効果ガス排出量を2015年比で35%削減する。France 2030において、原材料へのアクセスは、「目標」ではなく「必要条件」と位置づけて重視されており、2021年秋以降「リサイクル・原料再利用国家戦略」にもとづき、リサイクルのバリューチェーンの様々な段階でみられる難題の解決、関係技術移転支援、リサイクルの社会経済的課題解決のための技術研究などへの投資が強化されている。また、エレクトロニクスおよびフォトン分野のイノベーション支援に2億ユーロを拠出するとともに、ナノテク研究のネットワークであるRENATECH+の研究インフラや、CEAの電子情報技術研究所（LETI: Laboratoire d'électronique des technologies de l'information）のナノテクプラットフォーム（PNFC: Plateforme de nano-caractérisation）の支援に3,900万ユーロが充てられる。

高等教育・研究・イノベーション省（MESRI: Ministry of Higher Education, Research and Innovation）（現：高等教育・研究省（MESR: Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche））は2021年に量子国家戦略を発表した。そのなかでは、量子コンピュータ、量子暗号・通信、量子センサなど7つの分野に5年間で18億ユーロを投資する。量子・古典ハイブリッドコンピューティングプラットフォームの構築に1.7億ユーロを用意しており、その第一段階として、2021年4月に量子計算プラットフォームの立ち上げに7,000万ユーロを越える投資を発表した。このプラットフォームは、CEAのVery Large Computing Center（HPC）に設置され、コンピュータ科学および応用数学を専門とするフランス国立情報学自動制御研究所（INRIA: Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique）の支援を受ける。

2005年に設立されたフランス国立研究機構（ANR: French National Research Agency）は競争的研究資金の配分を主たる業務としており、ナノテク・材料分野にも多くの研究助成を行っている。2022年7月には「2023年行動計画（Plan d'action 2023）」が発表され、2023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。これは、2021年に発表された「2022年行動計画」を継承し、人工知能、人文社会科学、量子技術、神経発達障害における自閉症、希少疾患の橋渡し研究を国の戦略的優先事項として指定しており、France 2030と連携して進められる。また、ANRは日仏の科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。この合意にもとづき、2018年よりJST戦略的創造研究推進事業（CREST）において、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。2023年度公募においてナノテク・材料分野ではJSTのCREST研究領域「未踏探索空間における革新的物質の開発」（研究総括：北川宏 京都大学 教授）で日仏共同提案が募集される。

オランダ

年間約10億ユーロの研究開発資金を配布するオランダ科学研究機構（NOW: Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek）は、3年毎に研究開発戦略を発表している。2022年7月に発表された2023～2026年の戦略“Ambitions ‘Science works!’ - NWO strategy 2023–2026 -”では、以下の4項目を研究推進に不可欠な基礎と位置付け、それらを基に38の野心的な目標を定めている。

- ・多様性と一体性、科学的誠実性、持続可能性及びオープンサイエンスといった健全な研究文化
- ・優秀な研究者に場を提供し必要な研究インフラを整備するしっかりとした資金
- ・分野や国の垣根を越えて筋の通った研究課題
- ・グローバルな課題に取り組む際のスムーズなコラボレーション

ナノテク研究開発では、NWOに所属する9つの研究所の1つAdvanced Research Center for Nanolithography (ARCNL) において、アムステルダム大学、アムステルダム自由大学、フローニンゲン大学及び半導体露光装置の圧倒的な世界シェアを有するASML社との官民パートナーシップによる、極端紫外線 (EUV) 光を用いたナノリソグラフィの研究開発が推進されている。また、施設共用プログラム NanoLabNLは、フローニンゲン、エンスヘデ、アムステルダム、デルフト、アイントホーフェンの5都市に分散するナノテク研究施設をアカデミアや企業に共用するものである。2021年6月に公開されたNanoLabNLのマニフェスト“Unleashing the Power of Small”では、量子技術や医療等に至る幅広い分野の基礎研究から製品開発に必要なインフラの提供と人材育成の方針が示されている。NanoLabNLは、欧州域内のナノテク研究用のクリーンルーム施設を連携させた欧州横断組織であるEuroNanoLabコンソーシアム (2020年現在、フランス、オランダ、ノルウェー、スウェーデンを中心に、欧州14カ国にある44のクリーンルームが参加) にも参加している。

2019年にオランダ国内の量子技術に関する産学官のステークホルダーによってNational Agenda on Quantum Technology (NAQT) が策定され、NAQTの実施のために2020年に発足した官民基金のQuantum Delta NL (QDNL) は、2021年4月に量子ハードウェアとソフトウェアの開発、人材育成、市場創出、社会実装を目的として、国家成長基金から6億1500万ユーロの資金を得ている。この資金により、オランダの量子産業は、3万人のハイテク雇用を創出し、50～70億ユーロの累積経済効果をもたらすと見込まれている。QDNLはNWOと共同で、量子技術基盤研究の公募を2022年1月に開始した。7年間で合計4,200万ユーロが予定されている。また、2022年11月に、QDNLはデルフト工科大学の量子コンピュータの先端研究所QuTechに隣接してHouse of Quantumを開設した。House of Quantumは、オランダ国内外の企業、投資家、研究者が、量子技術関連の共同研究やビジネスの場として機能することが期待されている。

中国

■基本政策

中国の基本政策は、総合的な中長期計画のもと、5年おきに策定される中国国民経済・社会発展5カ年計画に則って遂行される。2012年、習近平国家主席は中国共産党第18回全国代表大会にて「2つの百年」を提唱した。第一の百年は、中国共産党結党100周年 (2021年) を指し、「小康社会 (ややゆとりのある社会)」を目指したものである。第二の百年は、中国人民共和国100周年 (2049年) を意味し、「現代的社会主義強国」の実現を目指すとしている。2021年3月に全国人民代表大会 (全人代) で採択された「中国国民経済・社会発展第14次五カ年計画と2035年までの長期目標綱要 (2021～2035年)」 (以下、十四五) は、第二の百年の始まりの5年に位置付けられると同時に、2035年までの長期目標も含んでいる。また、新たな発展戦略として、国内大循環を主体に、国内・国際の双循環を促進する方策が掲げられた。本綱要は全十九編六十五章から成り、その中で科学技術・イノベーション政策についても述べられている。

十四五の第二編で示される「イノベーション主導による発展」のうち、「戦略的科学技術力の強化 (第四章)」においては、まず、科学技術の資源配分の統合・最適化を目指し、フォトニクス、マイクロ・ナノエレクトロニクス、バイオメディカルなどの主要なイノベーション分野に対し国家重点実験室の再編や国家科学センターの建設をすすめている (後述)。また、先進的な科学技術力のブレークスルーの強化のため、7つの重要な先端科学技術分野、①次世代人工知能、②量子情報、③集積回路、④脳科学と脳模倣型人工知能、⑤遺伝子とバイオテクノロジー、⑥臨床医学と健康、⑦深宇宙・深地球・深海・極地探査を指定し (表1.2.4-4)、先見性と戦略性のある国家重大科学技術プロジェクトを実施するとしている。さらに、基礎研究の強化のため、「基礎研究10年行動計画」を策定予定であり、基礎研究への開発投資を8%以上に引き上げるなどとしている。

表 1.2.4-4 中国「十四五」-第四章「戦略的科学技术力の強化」で示された重要な先端科学技術分野

先端科学技術分野の重要取組	
①次世代人工知能	最先端の基礎理論のブレークスルー、専用チップの開発、ディーラーニングフレームワークなどのオープンソースアルゴリズムのプラットフォームの構築、学習・推理・意思決定、画像パターン、音声ビデオ、自然言語識別処理等の分野の革新
②量子情報	都市域・都市間、自由空間の量子通信技術の研究開発、汎用量子計算原型機と実用化量子シミュレーション機の開発、量子精密測定技術のブレークスルー
③集積回路	集積回路設計ツール、重点装備と高純度ターゲット材などの重要材料の研究開発、集積回路の先進技術と絶縁ゲートのバイポーラトランジスタ (IGBT)、MEMS等の特殊技術のブレークスルー、先進的ストレージ技術のアップグレード、炭化ケイ素、窒化ガリウムなどのワイドバンドギャップ半導体の発展
④脳科学と脳模倣型人工知能	脳の認知原理解析、脳メソスケールコネクトーム、脳の重大疾病のメカニズム・干渉の研究、児童・青少年の脳・知能の発達、脳模倣型計算とブレイン=マシン融合技術の研究開発
⑤遺伝子とバイオテクノロジー	ゲノム学の研究応用、遺伝細胞・遺伝育種・合成生物・生物薬品等の技術革新、ワクチンの革新、体外診断、抗体薬物等の研究開発、農作物・家畜家禽水産物・農業微生物等の重大な新品種創製、生物安全重要技術の研究開発
⑥臨床医学と健康	がんと心臓脳血管・呼吸器系・代謝性疾患などの発病メカニズム基礎研究、積極的健康介入技術の研究開発、再生医学・マイクロバイオーム・新型治療などの先端技術研究、重大伝染病・重大慢性非感染性疾患予防の重要技術の研究
⑦深宇宙・深地球・深海・極地探査	宇宙の起源と進化・“透視地球”(※訳註：地球深部探査)などの基礎科学研究、火星周回、小惑星巡視などの星間探査、次世代大型輸送ロケットと再使用宇宙輸送システム、地球深部探査装備、深海運行の維持保障整備試験船、極地立体観測プラットフォームと重砕氷船等の研究開発、月探査プロジェクト第四期、蛟龍深海探査二期、雪龍極地探査二期の建設

続いて第三編の「現代産業体形の構築の堅持」に関する内容では、まず、製造業の8つの中核的分野に対し研究開発・応用を推進するとしている。ナノテクノロジー・材料が関わる中核的分野として、ハイテク新材料(レアアース機能性材料、高品質特殊鋼、高純度レアメタル材料など)、スマート製造とロボット技術、航空用エンジンとガスタービン(先進航空用エンジンの基幹素材など)、新エネルギー車とインテリジェントカーなどが指定されている。また戦略的新興産業として、次世代情報技術、バイオテクノロジー、新エネルギー、新材料などが挙げられており、同産業の付加価値をGDP比の17%以上にするという目標が掲げられている。さらに、未来型産業の開拓のため、脳型知能、量子情報、遺伝子技術、水素エネルギー、エネルギー貯蔵などの最先端分野に対し、未来産業インキュベーターと加速プログラムの編成・実施に注力するとしている。

さらに、「国防と軍隊の現代化加速」(第十六編)のため、国防科学技術の自主的・独創的な革新により兵器・装備のアップグレード、スマート兵器・装備の発展を加速するとされている。また、国防力と経済力の向上を同時に図り、海洋、航空・宇宙、サイバースペース、バイオテクノロジー、新エネルギー、人工知能、量子科学技術などの分野において、軍民科学技術の連携による発展を強化するとしている。

2016年5月に中国共産党と国務院から公表された「国家イノベーション駆動発展戦略綱要(2016～2030年)」は、2050年までを見据えた15年間の中長期目標である。2030年までに、国際競争力の向上に重要な要素、社会発展のための差し迫った需要、安全保障に関する問題を認識し、それらに関わる科学技術領域を強化するとしている。そして2050年までに、世界のトップクラスの科学技術イノベーション強国となり、世界の科学技術およびイノベーションを先導する地位を実現するとしている(「中国の夢」)。

「中国製造2025」(2015年公表)は、建国100周年(2049年、第二の百年)までに世界一の「製造強国」となることを目指した産業技術政策である。本政策では、10の重点領域、①次世代情報通信技術、②先端デジタル制御工作機械・ロボット、③航空・宇宙設備、④海洋建設機械・ハイテク船舶、⑤先進軌道交通設備、⑥省エネ・新エネルギー自動車、⑦電力設備、⑧農業用機械設備、⑨新材料、⑩バイオ医薬・高性能医療機器が指定されている。中国2025は、米国との技術覇権争いの契機になったとされ、特に2019年以

降公の場合での言及がされなくなった。しかし、製造強国を目指す中国2025の精神は、前述のように十四五の中でも述べられている。また中国2025における重点領域は、十四五の中で列挙されている製造業の中核的分野や戦略的新興産業と重なるものが多い。

近年、「技術標準」は、国家主導で戦略的に獲得を図るものと認識されるようになってきている。2021年10月、中国共産党と国務院は、中国初の標準化に関する長期戦略要綱として「国家標準化発展綱要」を公表した。高品質へと転換し、「品質強国」を目指す中国経済・産業の指針となる政策である。この中で科学技術イノベーションについては、標準化と科学技術イノベーションの相互発展の促進を掲げ、(1)人工知能、量子情報、バイオテクノロジーなどの分野の標準化研究の実施、(2)次世代IT、ビッグデータ、ヘルスケア、新エネルギー、新素材などの分野について技術開発と標準化の同時展開、(3)船舶、高速道路、新エネルギー車、インテリジェントカー、ロボットなどの標準化・産業変革推進、(4)生物医学研究、分子育種、自動運転者などの分野における技術安全基準の策定、が述べられている。

2022年10月には中国共産党第二十回全国代表大会(共産党大会)が開催され、習近平総書記(国家主席)による大会報告がなされた。「社会主義現代化国家」の建設を目指すことを改めて強調した上で、2035年までの発展目標として、経済力・科学技術力・総合国力の大幅な向上や、文化・環境・軍備の現代化の実現などが掲げられた。科学技術イノベーションに関しては、「製造強国・品質強国」・「デジタル中国」の構築の加速、戦略的新興産業(次世代情報技術、人工知能、バイオテクノロジー、新エネルギー、新素材など)の融合発展の推進、科学教育興国戦略による人材の育成・確保・適材適所の徹底、科学技術イノベーション体制の整備、カーボンニュートラルの実現、などが示された。

■研究開発プロジェクト

中国では、2014年以降、効率的な研究資金管理を目的に既存のプログラムの統廃合が進められ、現在、「国家自然科学基金」、「国家科学技術重大プロジェクト」、「国家重点研究開発計画」、「技術イノベーション誘導計画」、「研究拠点と人材プログラム」の5つに集約されている。

国家自然科学基金では、基礎研究、応用研究への助成から、人材育成、拠点形成への助成を含む種々のプログラムを提供している。2021年の実績では、17プログラム、48,788件の課題に対して、直接費用で約313億元(約7,460億円)を支援している。ボトムアップ型の「一般プロジェクト(面上項目)」における全19420課題(直接経費総額約110億元(約2,200億円))の内、数学物理分野は1778課題(約10億元(約200億円))、化学分野は1897課題(約11億元(約220億円))、工学・材料分野は3309課題(約19億元(約380億円))であった。また、国家戦略上タイムリーに必要な研究を実施する「特別プロジェクト」として、2022年には「マイクロプラスチックの環境化学的挙動と影響」、「サブナノメートルスケールの物質の凝集と相互作用の調節」、「国家デュアルカーボン戦略を支援する政策モデリングと戦略研究」、「「未病」の生物学的基礎と数学的表現」などのテーマが公表されている。

国家科学技術重大プロジェクトは、国務院が所管する国家の競争力向上のための課題解決型プログラムである。「国家イノベーション駆動発展戦略綱要(2016~2030年)」のもと、「科技创新2030」の中で16のテーマが進行している。ナノテクノロジー・材料分野が関わるテーマとしては、「量子通信および量子計算」、「脳科学および脳型研究」、「ビッグデータ」、「スマート製造とロボット」、「重点新材料の開発および応用」、「次世代AI」などがある。

国家重点研究開発計画は、従来各省庁が配分していた「国家重点基礎研究発展計画(973計画)」及び「国家ハイテク発展計画(863計画)」など100余りの課題解決型研究費助成が集約されたプログラムである。農業、エネルギー資源、環境、ヘルスケアなどの長期的に重要な分野の研究に集中して支援を実施している。2020年の研究費配分総額は約290億元(約5,800億円)であった。また、2022年に公募された国家重点研究開発計画のうち、ナノテクノロジー・材料分野に関わるものとしては、「マイクロ・ナノエレクトロニクス技術」、「戦略的鉱物資源の開発と利用」、「診断機器とバイオメディカル材料」、「水素エネルギー技術」、「高

性能製造技術と主要設備]、「再生可能エネルギー技術」、「レアアース新素材」、「触媒科学」、「アディティブマニファクチャリングおよびレーザー製造」、「スマートセンサー」、「情報光技術」、「ハイエンド機器とスマートマテリアル」、「高度複合材料」、「新しいディスプレイと戦略的電子材料」、「物質の状態規則」、「ナノフロンティア」などがある（十三次五カ年計画（2016～2020年）からの継続分も含む）。

十四五では、北京（怀柔）、上海（張江）、安徽省合肥、広東大湾区などに総合性国家科学研究センターを設置するとしている。総合性国家科学研究センターは、主に基礎研究に関する施設を整備し、先進的で独創的な成果の創出を目指すプラットフォーム（大規模科学技術クラスター）である。「国家重大科学技術インフラ整備中長期計画（2012～2030年）」や先の5カ年計画で建設、整備された国家重大科技施設の活用も合わせて推進される。各国家科学研究センターに設置される、ナノテクノロジー・材料分野に関わる重要施設を運用開始時期と併せて挙げる。

- ・ 国家ナノテクノロジーセンター（2003年、北京）
- ・ ナノエネルギー・システム研究所（2020年、北京怀柔）
- ・ 高エネルギーシンクロトロン光源施設（HEPS）（2025年、北京怀柔）
- ・ 上海放射光実験施設（2009年、上海張江）
- ・ 軟X線自由電子レーザー装置（SXFEL）（2018年、上海張江）
- ・ 硬X線自由電子レーザー装置（SHINE）（2025年、上海張江）
- ・ 超電導トカマク型核融合装置 EAST（2006年、合肥）
- ・ 核融合炉主要システム総合研究施設 CFETR（※ EASTの後継炉）（建設中、合肥）
- ・ 定常強磁場実験装置（SEMFF）（2017年、合肥）
- ※ 452,200 Gaussの定常磁場を生み出し、2022年8月12日世界最高記録を更新
- ・ 量子情報科学イノベーション研究院（2016年、合肥）
- ・ 合肥マイクロスケール物質科学国家研究センター（2018年、合肥）
- ・ 大電流重イオン加速装置（HIAF）（2024年、惠州）
- ・ 瀋陽材料科学国家研究センター（2017年、瀋陽）

また十四五では、企業を主体として、市場に向けた産学研用（企業・大学・研究機関・ユーザー）の融合による技術イノベーションシステムの構築を目指すとしている。具体的な方策は現時点で示されていないが、国家重点実験室（中国科学院、教育部、工業情報科学部、科学技術部などが特定の重要テーマの研究を企業・大学・研究機関に委託している）の再編に加え、国家工程研究センター、国家技術イノベーションセンターなどのイノベーション拠点の最適化を推進するとしている。

さらに、米国のMGI（2011年）に追随して、中国では2015年に国家重点研究開発計画「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」が立ち上げられ、研究資金としては2016年から2021年の間に約8億元が投じられた。マテリアルゲノム工学に関する拠点形成も進められており、上海大学にMaterials Genome Institute（2014年）、上海交通大学に材料ゲノム連合研究センター（2016年）、北京科技大学に北京材料ゲノム工学イノベーションセンター（2017年）、そして最近では中国科学院物理研究所にCenter for Material Genome Initiative（2021年）が設置されている。また2019年には、the Chinese Society for Testing and Materials（CSTM）が材料ゲノム工学に関する標準委員会を立ち上げ、初めてとなる材料ゲノム工学に特化した国際規格を発表した。データ駆動型材料研究の広範な応用展開のための基盤と成り得るものである。

■トピックス：科学技術研究における中国の国際的な立ち位置

中国科学技術情報研究所が2021年末に発表した科学技術論文統計によると、科学計量学的手法により選択した、国際的な平均を超える国際論文及び国内各分野のトップ1割に相当する国内論文（「中国卓越科技論文」）は、2020年には計46.38万本となり、2019年比の19.8%増であった。また、科学技術の管理部門

や研究者の関心を、論文の数量から質や影響力へと変えることを重視するとしている。2011年から2021年までの被引用回数について、中国は材料科学、化学、エンジニアリング、計算機科学の4分野で世界第1位、農業科学等の10分野で世界第2位であった。2011年から2021年9月までの各分野の被引用回数世界トップ1%の論文について、中国の論文は42,920本であり世界の24.8%を占めた。

さらに、中国の科学技術ジャーナルは増加傾向にあり、世界での存在感を強めている。“Nanoscale”は、著名なナノテクノロジー分野の研究者である白春礼（元中国科学院 院長）が2009年に英国 Royal Society of Chemistryと共同で発刊した国際学術誌であり、2021年のインパクトファクター（IF）は8.307となっている。その後、関連の“Nanoscale Horizons”（2016年～、2021年IF 11.684）や“Nanoscale Advances”（2019年～、2021年IF 5.598）が発刊されている。また“Nano Research”（2021年IF 10.269）は清華大学がSpringer社と共同で創刊したナノサイエンス、ナノテクノロジーに関する国際学術誌である。2022年6月には、姉妹誌として、新エネルギー関係分野にフォーカスしたオープンアクセス英字ジャーナル“Nano Research Energy”が創刊された。

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。

2021年8月には、今後5年間を方向付ける「第5期科学技術基本計画（5th Science and Technology Basic Plan）（2023～2027年）」の策定に向けた方向性を最終決定したとの発表があり、2022年中に最終版を作成することを計画しているとされているが、本報告書の執筆時点（2022年11月）では、第5期科学技術基本計画は発表されていない。

韓国のナノテク政策は「ナノ技術開発促進法（2003年制定）」にもとづき、「第4期ナノ技術総合発展計画（2016～2025年）」を運営している。ここでは、ナノテクの競争力について、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分野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。

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。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）：さまざま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

2018年7月には、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、センサー、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。「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、ナノ材料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、ナノ材料、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。

地球温暖化対策に関しては「2050年カーボン・ニュートラル」を2020年10月に宣言し、長期温室効果ガス低排出開発戦略 (Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategy : LEDS) を2020年12月に国連機構変動枠組条約 (UNFCCC) に提出している。この中で、エネルギーの供給、産業、運輸・交通、建設、廃棄物、農業・畜産・水産それぞれの部門でのビジョンと考慮すべき技術開発・手段を提示している。

水素経済関連では、「水素経済活性化のためのロードマップ」(2019年1月)、「水素R&Dのロードマップ」(2019年10月)を策定し、「水素経済法」(2020年2月)の制定によって、水素の専門企業の育成、水素確保のための海外プロジェクトの発掘などに乗り出している。また、従来、韓国は燃料電池やFCVなどの水素活用分野に重点を置いていたが、今後、水素生産や貯蔵・輸送などのインフラ技術などのR&D投資への投資を拡大する方針を示しており、韓国における水素関連の研究開発が活発化している。また、2021年10月には水素インフラの構築と水素サプライチェーンの基盤強化のための「水素先導国家ビジョン」を策定、公表している⁸。

また、半導体に関して2021年5月に「K-半導体戦略」を発表している。K-半導体戦略は、システム半導体発展戦略 (2019年4月)、AI半導体戦略 (2020年10月) に次ぐものであり、急変する国際的な半導体市場の情勢の中で総合半導体強国を目指す半導体国家戦略である。K-半導体戦略では、半導体サプライチェーン安定化のための「K-半導体ベルト」構築、半導体製造中心地への飛躍のためのインフラ支援拡大、

8 https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_03_korea_202203.pdf (2023年1月16日アクセス)

人材・市場・技術確保などの成長基盤強化などを挙げている。

「K-半導体ベルト」には、半導体供給網の安定化のため、製造、素材・部品・装置、パッケージング、ファブレスなどの企業を集積した融合団地を形成し、短期的には韓国国内での技術確立が難しいEUV（極端紫外線）露光や、先端エッチング、素材分野の韓国国内への直接投資の誘致も拡大する。

インフラ支援としては、税制メリット、金融支援、規制緩和により投資拡大を図るとともに、半導体関連のR&Dへの税制支援を行うとしている。また、1兆ウォン以上の「半導体等設備投資特別資金」を新設し、8インチウエハラインのファウンドリ増設、素材・部材・設備および先端パッケージング施設への投資を支援する。

人材育成については、半導体に係る学科新設と定員拡大を通じて、2022年～2031年の10年間に半導体産業人材3万6,000人を育成することを目指している。

さらに、尹錫悦政権の下、2022年7月には「半導体超強大国達成戦略」を発表している。半導体エコシステムの強化に向けた施策パッケージとして、バッテリー、ディスプレイ、未来モビリティ、ロボット、バイオなどの「半導体プラス産業」も加えた総合的な競争力強化を目指す戦略を示している。

半導体産業団地の拡大に向けて2026年までの5年間で340兆ウォンの投資を計画するとともに、労働・安全面に関する規制緩和を進めるとしている。また、半導体人材としては、今後2031年までに15万人以上の追加人材が必要と見込んであり、半導体協会、企業および政府が共同で「半導体アカデミー」を2022年内に設立し、人材育成の司令塔を担うとしている。

さらに、半導体開発分野では、パワー半導体、車載半導体、AI（人工知能）半導体に重点的に投資し、2030年の（非メモリ）システム半導体の市場シェアを現在の3%から10%まで引き上げることを目指している。

二次電池に関しては、2030年に2次電池の分野で世界トップを目指す「K-バッテリー発展戦略」を2021年7月に発表している。官民による大規模R&Dの推進、グローバル先導基地構築のためのサプライチェーン構築、市場拡大のための多様な分野の用途創出の3つの戦略を示している。

大規模R&Dの推進としては、次世代2次電池の早期商用化と、リチウムイオン電池の高性能化・安全性向上を推進するために、5億ウォン以上を投資し「次世代バッテリーパーク」を造成し、大型R&D事業を推進、研究・実証評価・人材育成などを総合的に支援することを目指している。また、2次電池の安定的なサプライチェーン構築のため、海外からの原材料の確保とともに、国内でのリサイクル技術を強化の重要性を挙げている。さらに、使用済み2次電池のリサイクル市場の創出や、ドローン・船舶・公共分野の蓄電池など、2次電池を活用した新規産業の創出を積極的に推進することが示されている。

これら戦略に合わせて、韓国電池メーカーと素材・部品企業は、2030年までにR&Dと設備投資に合計40兆ウォンを投資する方針が示されている。

2022年5月に発足した尹錫悦政権が示した国政ビジョンでは、経済と安全保障に重点をおき、半導体、人工知能（AI）、車載電池などを未来戦略産業と位置づけて育成することを方針としている。また、当該分野で米、欧との連携強化を目指すとしている。

具体的には、半導体設備投資時のインセンティブ提供や申請の迅速処理、半導体・バッテリー・ディスプレイ等の産業エコシステム構築、R&D・国際協力などの総合な支援などを挙げている。また「国家先端戦略産業法」整備などの支援体制の整備も掲げている。

人材育成面では、未来戦略産業をリードする人材養成エコシステムの拡充策として、半導体特化大学の指

定や関連学科定員拡大、契約学科⁹、産学連携プログラムなどの推進などの施策を挙げている。

これらにより、2027年の半導体輸出額を2021年に対して30%以上拡大することを目指している。また、バッテリー世界市場シェア1位、ロボット世界3大強国飛躍を目指すとしている。

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た。産業化振興策を含め、インフラへの計画投資（全国10カ所）、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きた。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、2つのタイプの研究プロジェクトを実施している。1つ目は、「Innovation and Application Project」と呼ばれる「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TRL1～4に相当）を促進するプロジェクトである。2つ目は、2021年から新設された「Advanced Nanotechnology Research Project」である。こちらはより最先端の科学的知見の創出を目的としている。これらの2つのプロジェクトを推進することで、社会的課題の解決や産業発展に貢献するナノテクノロジーの創出を目指している。

また、人材育成の観点では、2021年に「国家重点領域産学協力および人材育成革新条例（The act of “National Key Fields Industry-University Cooperation and Skilled Personnel Training”）」が公布、施工されている。本法律は、半導体等のハイテク産業が集積する一方、当該産業への人材供給不足が深刻化している状況への対処策として講じられたものである。国立大学に国家重点領域研究学院を設け、大学と産業界との連携および人材育成強化を図ることを目指している。同法律にもとづき、国立台湾大学（NTU）、国立陽明学園大学（NYCU）、国立清華大学（NTHU）、国立成功大学（NCKU）、国立中山大学（NSYSU）の5拠点に半導体関係の研究開発拠点が設置されている。

台湾はナノマテリアルのELSI/RRIや国際標準化にも力を入れている。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）」システムは、2003年に創設された世界初のナノ製品認証制度である。ナノマークは信頼性の高い認証制度を通じて消費者の権利と利益の保護、企業の持続的な発展や国際競争力の強化に貢献してきた。

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、アジアナノフォーラム（ANF）の代表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。

シンガポール

シンガポールは、1991年より5カ年ごとに科学技術計画を作成しており、着実かつ持続的な研究開発投資を進めている。2011年からは「研究、イノベーション、商業化（Research, Innovation and Enterprise:」

9 契約学科：韓国政府が進める優秀人材教育制度の1つで、選抜試験に合格した者に生活費支援や就職を保証する仕組み。契約学科専攻生は、企業が指定した教科課程、現場プロジェクト実習などを経て専門性を積むことにより、卒業後ただちに競争力を発揮する人材となることができる。企業にとっては求める人材を即戦力として確保でき、学生にとっては就職が保証されるメリットがある。優秀な学生は大学院へ進学する道も開かれている。

RIE) 」へと戦略を拡張し、基礎研究の質の向上、イノベーション駆動型経済への転換が図られてきた。その結果、被引用数Top10%等の論文指標では国際的に高い水準を維持している。2021年に策定されたRIE2025では、2021年から2025年にかけて250億SGDの投資が計画されている。これはシンガポールのGDPの約1%に相当する。RIE2025では、科学的基盤の充実を重点領域として掲げている。基礎研究分野への強力な投資を継続するとともに、気候変動などの複雑な社会課題のための学際研究の強化、マテリアルズ・インフォマティクス、ナノエレクトロニクス、エピジェネティクスなどの新興分野の研究強化を図る計画である。マテリアルズ・インフォマティクスに関しては、A*STARの「Accelerated Materials Development for Manufacturing」プロジェクトが発足しており、実験と特性評価技術のハイスループット自動化や機械学習技術の援用により、材料開発を10倍以上加速させることを目標としている。また、製造業のレジリエンスや持続可能性の強化の取り組みとして、付加製造 (AM: Additive Manufacturing) 技術の強化を掲げている。National Additive Manufacturing Innovation Cluster (NAMIC) は、公的研究機関から産業界へのAM技術の移転の加速を目的として2015年に設立された研究機関であり、1800以上の組織と連携している。NAMICはこれまで培ったAM技術に対して、AIとロボット工学を組み合わせさせたソリューションを開拓することによって、さらなる製造革新を目標に掲げている。

シンガポールは量子分野でも精力的な研究開発投資を進めている。2007年にシンガポール国立大学 (NUS) に量子技術センター (CQT) が設立されて以来、CQTは量子技術の世界トップの研究拠点と発展し、量子情報、光学、通信、暗号化等の分野で存在感を発揮している。さらに2018年からは量子技術の研究開発および商業化支援のための量子工学プログラム (QEP) が発足している。QEPは、2022年に量子コンピューティング、量子通信、量子デバイス製造に関する3つの国家プラットフォームを立ち上げている。具体的には、シンガポール国立大学 (NUS)、シンガポール南洋工科大学 (NTUS)、A*STAR、国立スーパーコンピューティングセンター (NSCC) を基盤として、以下の産官学連携の研究開発体制を構築している。

- ・ National Quantum Computing Hub : 産業界との連携により、量子コンピューティング能力の向上と応用の開拓を進める
- ・ National Quantum Fabless Foundry : 量子デバイスの微細加工技術や実現技術の支援
- ・ National Quantum-Safe Network : 重要インフラのネットワークセキュリティ強化を目的とした量子安全通信技術の全国的な実証実験

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) があり、政府のナノテクノロジー施策の中核研究機関として責任を負う。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。また、近年高等教育科学研究イノベーション省を新設し、高等教育科学研究イノベーション戦略 (2020-2027) を発表している。従来の科学技術政策に加えて高度人材育成、産業競争力の向上、社会課題解決といった観点がより強調されている。重点課題としては、資源・環境・農業、高齢化社会、生活の質 (QOL) とセキュリティが掲げられている。特に資源・環境・農業については、資源枯渇、環境破壊、プラスチック廃棄物などのテーマが取り上げられ、環境技術や再生可能エネルギー利用、スマート農業技術などのイノベーションが期待されている。このような社会背景もあり、タイは従来からナノ安全に関しては積極的に取り組んでおり、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国家計画を持つ。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、仕組み・ソフト面が非常に充実している。2017年以降、毎年「ナノ安全に関する欧州アジア対話 (EU-Asia Dialogue on Nanosafety)」に参画している。このようなナノ安全に関する取り組みの結果として、2021年に「ナノ構造の製造・加工による廃棄物の処理・管理のガイドライン」を策定している。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入るほどに躍進している。

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として独立している。

2022年末時点でのANFのメンバーは、アジア・太平洋地域の10経済圏の各主要研究機関から構成されている。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。

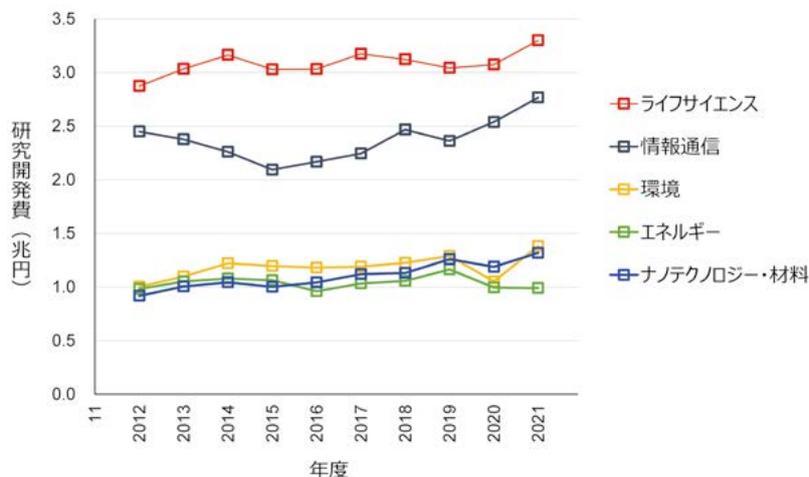
ANFの主な活動内容は、毎年のサミット会議 (ANFoS) および実行委員会 (ExCo) 開催による各国の情報交換、テーマ別の4つのワーキンググループ活動 (ナノテクノロジー標準化、施設利用ネットワーク、ナノ安全・リスクマネジメント、ナノ商業化) である。

1.2.5 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への大規模な国家投資戦略がスタートした。わ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1つに「ナノテクノロジー・材料」分野を指定し、「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を行った。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）へと舵が切ったが、「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うえ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づけ、戦略的投資が続いている。さらに第6期（2021～2025年度）では、材料やデバイスなどを「マテリアル」とまとめた上で、2021年に策定された「マテリアル革新力強化戦略」に基づき、戦略的な研究開発等を推進している。

総務省統計局「2022年（令和4年）科学技術研究調査結果の概要」によると、2021年度の我が国の科学技術研究費（以下、研究費という）は19兆7,408億円（前年度比2.6%増）、研究費の国内総生産（GDP）に対する比率は3.59%（0.01ポイント上昇）である。研究費の研究主体別の内訳は、企業が14兆2,244億円（同2.6%増）、大学等が3兆7,839億円（同2.9%増）、非営利団体・公的機関が1兆7,324億円（同1.9%増）となっている。また、図1.2.5-1に主要5分野「ライフサイエンス」「情報通信」「環境」「エネルギー」「ナノテクノロジー・材料」に使用した研究費の推移を示す。2021年度における「ナノテクノロジー・材料」の研究費は1兆3,184億円（前年度比10.9%増）であり、このうち「ナノテクノロジー」のみでは2,660億円（同42.7%増）となっている。「ライフサイエンス」は3兆2,994億円（同7.3%増）、「情報通信」は2兆7,655億円（同9.0%増）、「環境」は1兆3,807億円（同31.2%増）、「エネルギー」は9,904億円（同0.5%減）である。「ナノテクノロジー・材料」分野の研究費はこの10年微増傾向にあり、継続的に1兆円以上となっている。さらに、第6期科学技術・イノベーション基本計画に掲げられている政府が戦略的に取り組むべき基盤技術3分野「AI」「バイオテクノロジー」「量子技術」について2021年度の研究費をみると、「AI」が1,744億円、「バイオテクノロジー」が2,482億円、「量子技術」が1,168億円となっている。その研究主体別の内訳は、「AI」及び「バイオテクノロジー」で企業が多く（それぞれ923億円、1,538億円）、「量子技術」では非営利団体・公的機関（857億円）が多い傾向にある。



総務省統計局「2022年（令和4年）科学技術研究調査」を基にJST-CRDSが作成

図1.2.5-1 日本における科学技術主要5分野の研究開発費（官民合計）

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。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2023年度予算は19.9億ドル(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前項「1.2.4 主要国の科学技術・研究開発政策の動向」を参照されたい。

■学会の動向

図1.2.5-2に、日本、米国及びドイツのナノテク・材料分野に関する主要学会の、近年の会員数の変遷を示す。日本、ドイツでは会員数は減少傾向にある。日本化学会では、この10年間で約6500人（2014年比で2割超）、15年間で約9300人（2007年比で約3割）会員数が減っている。他の学会も、この10年間で1～3割程度、15年間で1.5～4割程度会員数が減少している。これは、国立大学法人への国からの運営費交付金の削減に伴う国立大における人件費削減や、企業のコスト削減などが背景にあると見られる。ドイツ物理学会も、2014年と比べて2割弱の会員数が減っている。米国のAmerican Chemical Society及びAmerican Physical Societyでは、会員数は横ばいあるいは微増が続いていたが、最新の値(2022-2021年)では減少に転じている。Material Research Societyは、この10年で会員数の減少が続いており、2013年と比べて最新の会員数は約2.5割減となっている。

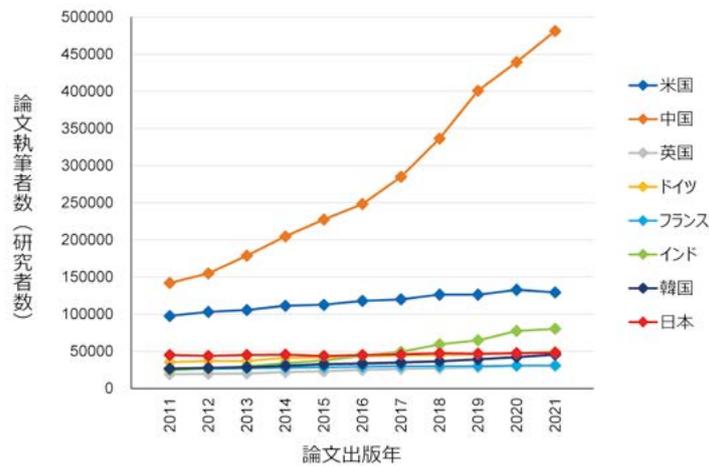
国	学会名	最新	2020-2019	2018-2017	2016-2015	2014-2013	2008以前
日本	日本化学会	23,182 (2022.2)	25,487 (2020.2)	27,469 (2018.2)	28,653 (2016.2)	29,722 (2014.2)	32,447 (2007.3)
	日本物理学会	15,270 (2021.12)	15,540 (2019.12)	16,338 (2017.12)	16,332 (2015.12)	16,620 (2013.12)	18,321 (2007.3)
	応用物理学会	17,641 (2021.12)	18,991 (2019.12)	19,616 (2017.12)	19,937 (2015.12)	21,033 (2013.12)	23,273 (2007.12)
	高分子学会	7,984 (2022.3)	9,152 (2020.3)	10,111 (2018.3)	10,505 (2015.3)	11,283 (2014.3)	13,334 (2007.3)
米国	American Chemical Society	>151,000	約163,000 (2019)	約150,000 (2017)	約157,000 (2015)	161,000 (2013)	158,422 (2005)
	Material Research Society	>12,000	14,092 (2019)	約14,000 (2017)	約16,000 (2016)	16,600 (2013)	約16,000 (2008)
	American Physical Society	49,446 (2021)	54,069 (2019)	55,368 (2017)	53,099 (2015)	50,578 (2013)	46,269 (2008)
ドイツ	German Physical Society	52,200 (2022)	55,051 (2020)	61,954 (2018)	62,656 (2016)	63,012 (2014)	53,449 (2007)

括弧内は会員数確認時点の年、月を表す

図1.2.5-2 ナノテクノロジー・材料分野に関連する主要学会の会員数動向

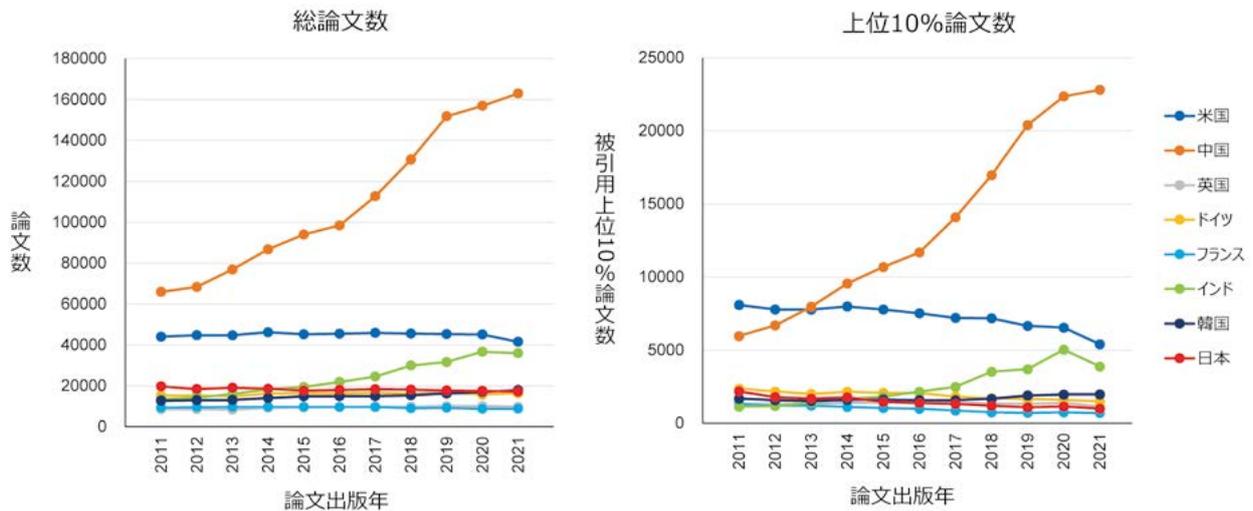
■論文から見る研究コミュニティの動向

図1.2.5-3に、主要国のナノテク・材料分野における論文執筆研究者数の推移を示す。論文執筆数は、各年に1報以上論文を発表した執筆者の数を整数カウントで算出したものである。2021年に日本において論文を執筆した研究者数は約4万8千人であり、中国、米国、インド、ドイツに次ぐ世界第5位であった。2011年の数と比較すると1割弱の増加となっている。中国では、2011年からの10年間で約3.5倍に増しており、2021年においては約48万人と他国を圧倒している。また、近年インドが急激に増加しており、2021年では約8万人となっている。そのほか、欧米諸国や韓国は、過去10年で1.2～1.7倍に増加している。なお、抽出対象とした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。



出典：エルゼビア社のScopusデータを基に、同社・JST-CRDSが作成。
論文検索式には、“Z. Wang, et al., *J. Nanopart. Res.* **21**, 199 (2019).”で報告されているナノサイエンス・ナノテクノロジー分野を定義する検索式に、Scopusの「材料科学」分野を加えたものを使用。
2021年はデータ最終年のためデータ数が少なくなっている。

図 1.2.5-3 ナノテクノロジー・材料分野の論文執筆者数の国別推移



出典：エルゼビア社のScopusデータを基に、同社・JST-CRDSが作成。
論文検索式には、“Z. Wang, et al., *J. Nanopart. Res.* **21**, 199 (2019).”で報告されているナノサイエンス・ナノテクノロジー分野を定義する検索式に、Scopusの「材料科学」分野を加えたものを使用。
2021年はデータ最終年のためデータ数が少なくなっている。

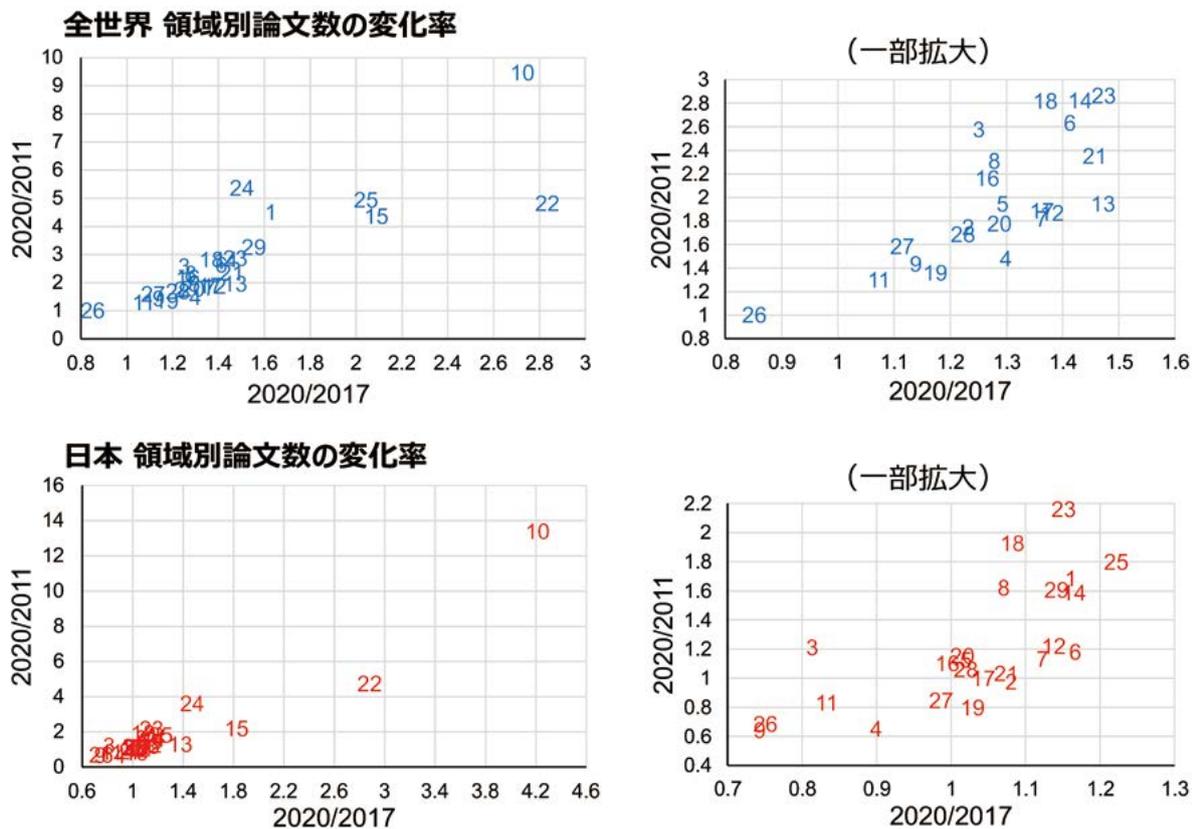
図 1.2.5-4 ナノテクノロジー・材料分野の論文数の国別推移

■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・材料分野における論文数の推移を図1.2.5-4に示す。論文数は分数カウント（共著者数で除して計算する方法）で算出したものである。世界全体の総論文数は年々増加傾向にあり、これは2000年代以降の中国の伸び率に大きく起因している。中国の総論文数は、2000年代後半に世界トップとなった以降も増加が続いており、2010年代に入ってから、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）そのプレゼンスは揺るぎないものとなっている。米国、ドイツ、英国の論文数は、微増あるいは横ばいの状況である。日本及びフランスは、質・量ともに横ばい、あるいは若干の減少傾向にある。一方で、インドや韓国の論文数は着実に増加傾向にあり、近年では質・量ともに他先進国に匹敵している。特にインドは、数年先には米国に追いつくほどの勢いを見せている。

続いて、本俯瞰報告書で扱う研究開発領域別の論文数動向の分析結果を図1.2.5-5～1.2.5-7に示す。

図1.2.5-5は、各領域（領域番号をNo. 1～29と付与）の論文数の変化率を、世界全体（上段、青字）および日本（下段、赤字）について示したものである。2017年及び2011年の論文数に対する2020年の論文数の比をそれぞれ横軸、縦軸としている。各年の論文数は、過去2年の論文数と合わせた3年分の平均として算出した（ただし、2020年については2019年との2年分の平均とした）。図中の右に行くほど近年での論文数増加率がが高く、上部に行くほど長期的な論文数増加率が高いことを意味する。世界全体では、およそ全ての領域で論文数の増加が見られる。日本では、各領域の論文数変化の傾向は世界全体とおおよそ類似しているものの、論文数増加率は全体的にやや低めであり、一部の領域では短期的にも長期的にも論文数が減少していることが分かる。ナノテクノロジー・材料分野において特に近年の論文数増加率が高い領域としては、「蓄電デバイス (No.1)」、「脳型コンピューティングデバイス (No.10)」、「金属系構造材料 (No.15)」、「データ駆動型物質・材料開発 (No.22)」、「量子マテリアル (No.24)」、「有機無機ハイブリッド材料 (No.25)」、「ナノテク・新奇マテリアルのELSI/RRI/国際標準 (No.29)」などがある。



- | | | |
|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| No. 領域名 | | |
| 1 蓄電デバイス | 11 フォトニクス材料・デバイス・集積技術 | 21 次世代元素戦略 |
| 2 分離技術 | 12 IoTセンシングデバイス | 22 データ駆動型物質・材料開発 |
| 3 次世代太陽電池材料 | 13 量子コンピューティング・通信 | 23 フォノンエンジニアリング |
| 4 再生可能エネルギーを利用した燃料・化成品変換技術 | 14 スピントロニクス | 24 量子マテリアル |
| 5 人工生体組織・機能性バイオ材料 | 15 金属系構造材料 | 25 有機無機ハイブリッド材料 |
| 6 生体関連ナノ・分子システム | 16 複合材料 | 26 微細加工・三次元集積 |
| 7 バイオセンシング | 17 ナノカ学制御技術 | 27 ナノ・オペランド計測 |
| 8 生体イメージング | 18 パワー半導体材料・デバイス | 28 物質・材料シミュレーション |
| 9 革新半導体デバイス | 19 磁石・磁性材料 | 29 ナノテク・新奇マテリアルのELSI/RRI/国際標準 |
| 10 脳型コンピューティングデバイス | 20 分子技術 | |

出典：エルゼビア Scopusカスタムデータを基に、JSTが集計、作成。各研究開発領域の論文検索式はJST-CRDSにて定義。

図1.2.5-5 ナノテクノロジー・材料分野の研究開発領域別の論文数動向

次に、図1.2.5-6に各研究開発領域における日本の論文数シェア（対世界全体）の推移を示す。各年の論文数の算出法は上述と同様である。全体として、中国の論文数増加に押され、日本の論文数シェアは減少傾向にある。各領域における日本の優位性は図1.2.5-5の論文数動向と併せて考える必要があるものの、2020年時点で日本が比較的高い論文数シェアを有している領域としては、「生体イメージング（No.8）」、「スピントロニクス（No.14）」、「パワー半導体材料・デバイス（No.18）」、「磁石・磁性材料（No.19）」、「分子技術（No.20）」、「量子マテリアル（No.24）」、「微細加工・三次元集積（No.26）」などがある。

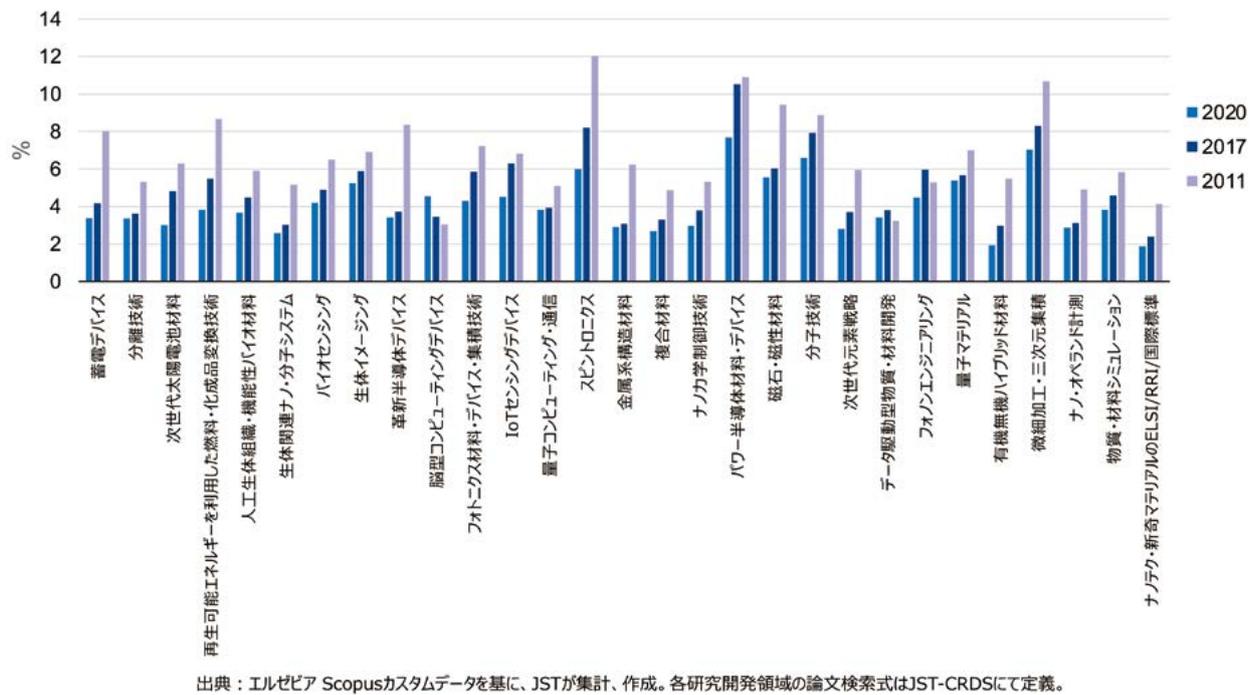


図1.2.5-6 ナノテクノロジー・材料分野の研究開発領域別の日本の論文数シェア

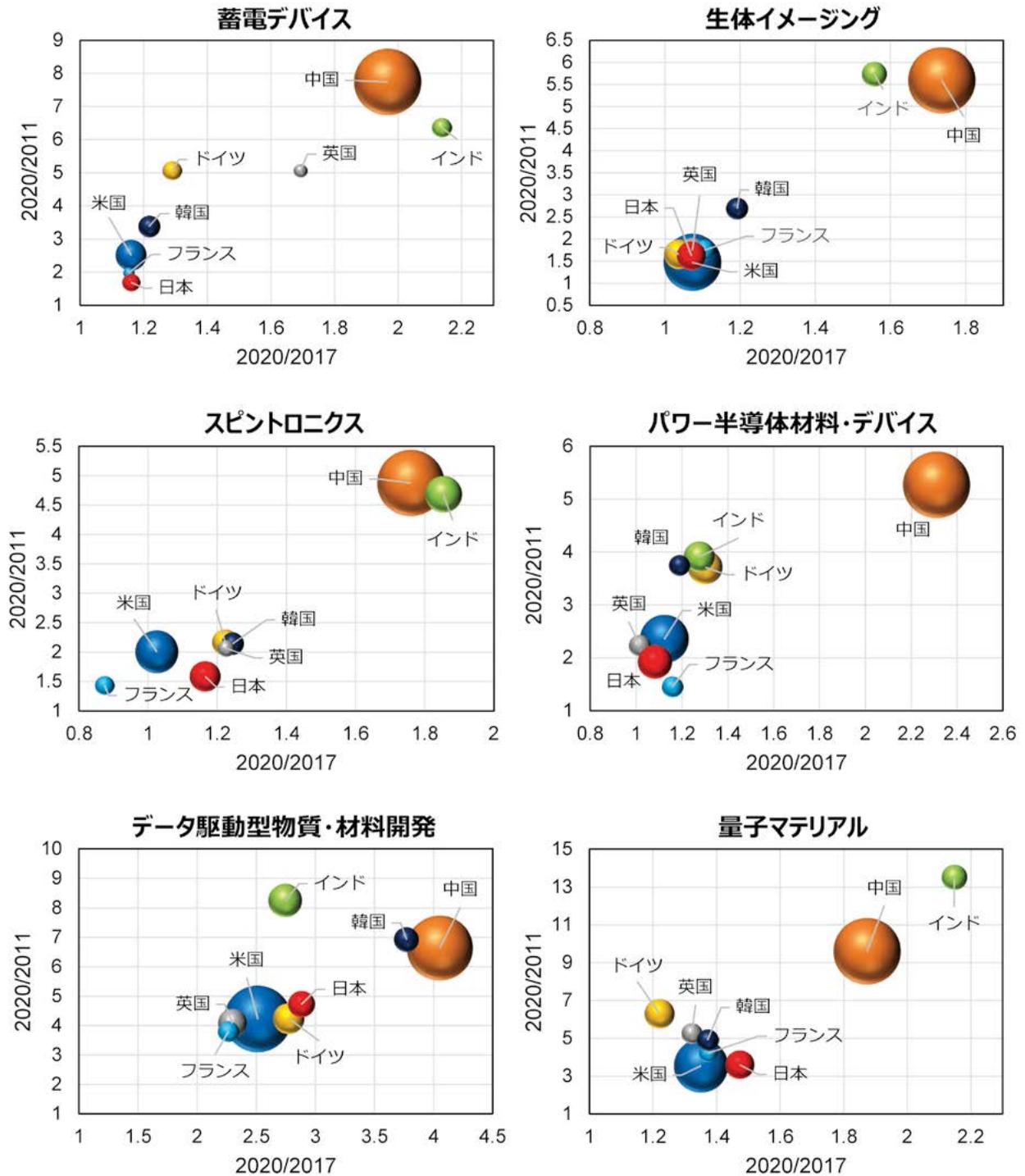
最後に、先に挙げた論文数増加率の高い領域および日本の論文数シェアの高い領域のうち、「蓄電デバイス（No.1）」、「生体イメージング（No.8）」、「スピントロニクス（No.14）」、「パワー半導体材料・デバイス（No.18）」、「データ駆動型物質・材料開発（No.22）」、「量子マテリアル（No.24）」について、国別の論文数動向を図1.2.5-7に示す。横軸・縦軸は2017年および2011年の論文数に対する2020年の論文数の比、バブルサイズは2020年の各国の論文数を相対的に表している。

「蓄電デバイス」領域では、全世界的に継続的な論文数増加が見られるが、中でも中国が論文数の増加率およびシェアともに突出している。インドは近年の論文数増加率が最も著しい。韓国でも継続的な論文数の増加が見られ、2020年における論文数は、中国、米国に次ぐ世界第3位となっている。日本は、論文数では2020年時点で世界第6位に付けているものの、論文数の増加は他国と比べると低調となっている。

「生体イメージング」領域では、世界全体として論文数は増加しているものの、日本や欧米では近年横ばいの傾向にある。中国は近年急激に論文数を伸ばした上、米国を抜いて世界第1位となっている。2020年における日本の論文数は、中国、米国、ドイツに次ぐ世界第4位であり、国際的なプレゼンスを維持している状態と言える。インドや韓国が著しい論文数増加率でもって徐々に存在感を増してきている。

「スピントロニクス」領域では、中国とインドを代表格として、全世界的に論文数は増加傾向にある。日本も着実に論文数を伸ばしており、2020年の論文数は中国、米国、インドに次ぐ世界第4位であった。ドイツ、英国、韓国の論文数も増加傾向にあり、今後も成長が見込まれる。米国の近年の論文数は横ばいだが、論

※バブルサイズ：2020年の論文数



出典：エルゼビア Scopusカスタムデータを基に、JSTが集計、作成。各研究開発領域の論文検索式はJST-CRDSにて定義。

図1.2.5-7 各研究開発領域（抜粋）における論文数の国別動向

文数は世界第2位とプレゼンスを維持している。

「パワー半導体材料・デバイス」領域では、全世界的に論文数が増加する傾向の中で、特に中国の論文数増加が著しく、近年における論文数は世界第1位となっている。日本と米国は、長期にわたって論文数を伸ばしつつ国際的なプレゼンスを保持している状況にある。ドイツは近年の成長が著しく、2020年における論文数は、中国、米国、日本に次ぐ世界第4位であった。また、インドの近年の急激なプレゼンスの上昇も注目

される。

「データ駆動型物質・材料開発」領域は、世界全体で近年最も論文数が増加している領域の一つである。米国が当該分野を牽引してきており、2020年の論文数は世界第1位であった。また、中国は米国に追いつくほどの論文数増加を見せている。日本においても論文数は著しく増加しており、2020年における論文数は、米国、中国、インド、ドイツ、英国に次ぐ世界第6位であった。

「量子マテリアル」領域は、過去10年ほどの長期にわたって特に論文数が増加している領域の一つである。中でも、中国の論文数増加が顕著であり、その論文数は近年世界第1位となっている。次ぐ米国も、長期的に高いプレゼンスを維持している。日本は継続的な論文数増加を見せており、2020年の論文数は、中国、米国、ドイツに次ぐ世界第4位である。インドは最も顕著な論文数増加率を示しており、2020年の論文数は世界第5位であった。