

国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau
National Diet Library

論題 Title	第1章 マテリアル科学と成長戦略
他言語論題 Title in other language	Chapter 1, Materials Science: Growth Strategy
著者 / 所属 Author(s)	関谷 毅 (SEKITANI Tsuyoshi) / 大阪大学産業科学研究所教授
書名 Title of Book	マテリアル科学—最先端と未来への選択— 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 (Materials Science: The State of the Art and Future Options)
シリーズ Series	調査資料 2023-6 (Research Materials 2023-6)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2024-3-27
ページ Pages	1-23
ISBN	978-4-87582-924-9
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	我が国のマテリアル科学力の現状、強化策及びマテリアル革新力の方向性を模索するための課題と展望を他国の政策も参考にしつつ概観した上で、我が国の成長戦略に期待されるポイントを例示する。

* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。

* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

第1章 マテリアル科学と成長戦略

【要旨】

第1章では、マテリアル科学に関する成長戦略に焦点を当てる。第I節では、国内外のマテリアル科学の流れに着目し、我が国のマテリアル科学力の現状や他国の強化例を産業と学術の観点から報告している。特に、国際的な規制の強化や経済安全保障への関連性に着目した。第II節では、我が国のマテリアル革新力の強化策について取り上げ、具体的にはマテリアル DX プラットフォーム事業や次世代半導体プロジェクトに焦点を当てた。第III節では、我が国のマテリアル革新力の方向性を模索するための課題と展望に焦点を当てた。特に、打開策として期待される、マテリアルズ・インフォマティクスの活用、グリーン・イノベーションの促進、競争が激しい分野での勝ち残り戦略を考察し、国際情勢と海外の研究開発動向から見た注目点を述べた。さらに、国民生活やビジネス展開、次世代人材育成など、様々な視点から見て、最終的には我が国の成長戦略に期待されるポイントを例示する。

はじめに

我が国の「マテリアル（材料、ナノテクノロジー、デバイスの総称）」及び「マテリアル科学（マテリアルに関する科学的な研究、試験の総称）」は、世界的な競争力を有している。このマテリアル科学のイノベーション創出力を強化することを目的に、政府は2021年に「第6期科学技術・イノベーション基本計画」（令和3年3月26日閣議決定）の下、「マテリアル革新力強化戦略」（令和3年4月27日統合イノベーション戦略推進会議決定）を策定・開始した。第5期の基本計画において戦略的に取り組むべき基盤技術と位置付けられた「人工知能（AI）」、「バイオテクノロジー」、「量子技術」などに加えて、第6期基本計画では、あらゆる技術や産業を下支えする「マテリアル」が位置付けられた。マテリアル革新力強化戦略の開始から3年度目となる現在は、内閣府を始め関係省庁の主要な研究開発施策が産学官の関連機関において精力的に実施されている。中でも、我が国の大学や国立研究所、企業におけるマテリアルに関する研究開発活動のデジタルトランスフォーメーション（DX）を促進する枠組みは、その中核にある。我が国のマテリアル研究開発基盤を世界トップレベルにするための一つのプラットフォームとしてそれを運用することで、産学官が創出する高品質なマテリアルデータの蓄積・利活用を進め、マテリアル研究開発のイノベーションを推し進めている。

マテリアルには二つの主だった特徴がある。

- ① 我が国の主要産業であり、経済力の源泉である
- ② 研究開発や人材育成に長期間を要する

我が国は歴史的に長年の蓄積を重ねて、こうした特徴を持ちながら、マテリアル科学や関連産業を発展させ、我が国社会はもとより国際社会の発展にも貢献し、現在まで一定の国際競争力を確保している。ところが昨今、先進諸国はもとより新興国における経済成長及び研究開発投資の強化を前に、我が国はマテリアル科学においても相対的にプレゼンスが低下し、岐路に立たされている。

* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、令和6（2024）年1月13日である。

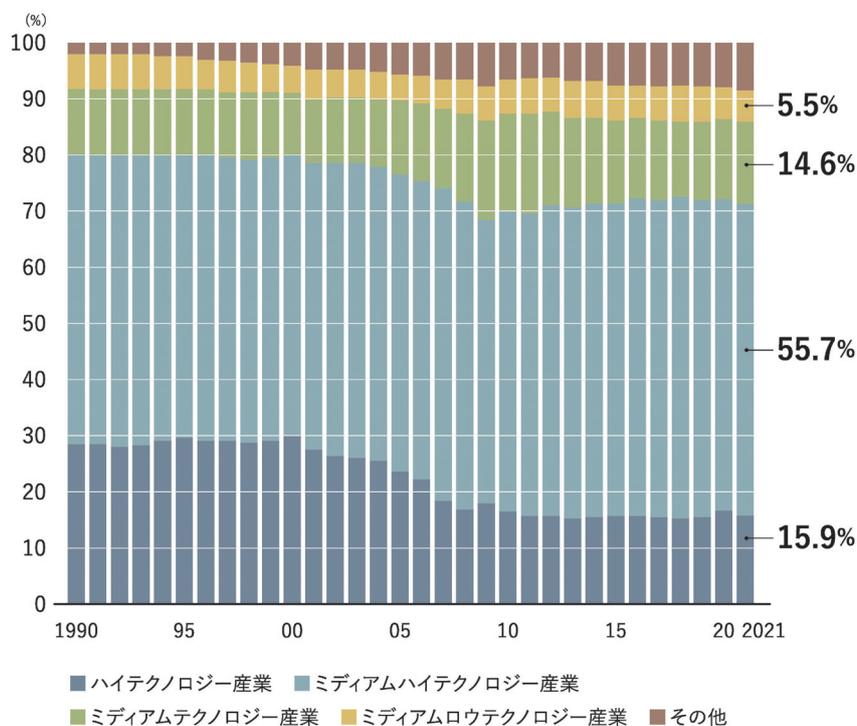
本章では、不確実性の高まる世界にあって我が国が置かれているマテリアル科学と関連産業の現状と課題、国際動向を分析し、我が国がとるべき方向性の提示を試みるものである。特に、我が国や諸外国におけるマテリアル関連施策の現状把握⁽¹⁾に基づき将来を展望し、我が国が世界の中で果たしていくべきマテリアル革新力強化の次なる方向性を考える。

I 国内外から見るマテリアル科学の潮流

1 経済／産業を支えるマテリアル

天然資源に乏しい我が国において、実体経済を支えているのは貿易収支である。文部科学省科学技術・学術政策研究所（National Institute of Science and Technology Policy: NISTEP）「科学技術指標 2022」では、主要国の貿易構造を OECD（経済協力開発機構）の定義に基づく産業分類ごとに分析している。

図1 我が国の産業貿易輸出割合



(出典) 文部科学省科学技術・学術政策研究所「科学技術指標 2022」; JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2023年)」を基に、筆者が加工・作成。

この中で、ハイテクノロジー産業及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とされる。我が国は、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55%以上を占めている(図1)。一般

(1) 本章の取りまとめに当たっては、先行文献としてマテリアル研究開発の動向を広範に分析し取りまとめている、科学技術振興機構研究開発戦略センター（JST-CRDS）の「研究開発の俯瞰報告書 2023年版（ナノテクノロジー・材料分野）」を参照し、必要に応じて引用・再構成して記述している。あわせて、上述の政府戦略「マテリアル革新力強化戦略」及び経済産業省が2022年4月に公表した「新・素材産業ビジョン（中間整理）ーグローバル市場で勝ち続ける素材産業に向けてー」等も参考とした。

的に広く知られる医薬品、電子機器、航空宇宙部品などはハイテクノロジーに分類されるが、これらの構成要素となる素材等の技術が「ミディアムハイテクノロジー」である。具体的には、化学製品や電気機器、機械器具、自動車、磁気・光学メディア、医療及び歯科用機器・備品、それらを構成する材料・デバイス等が「ミディアムハイテクノロジー」に相当する。いわばこれらの総称が「マテリアル」（材料、ナノテクノロジー、デバイス）であり、正に我が国にとって根幹を成す基幹産業である。

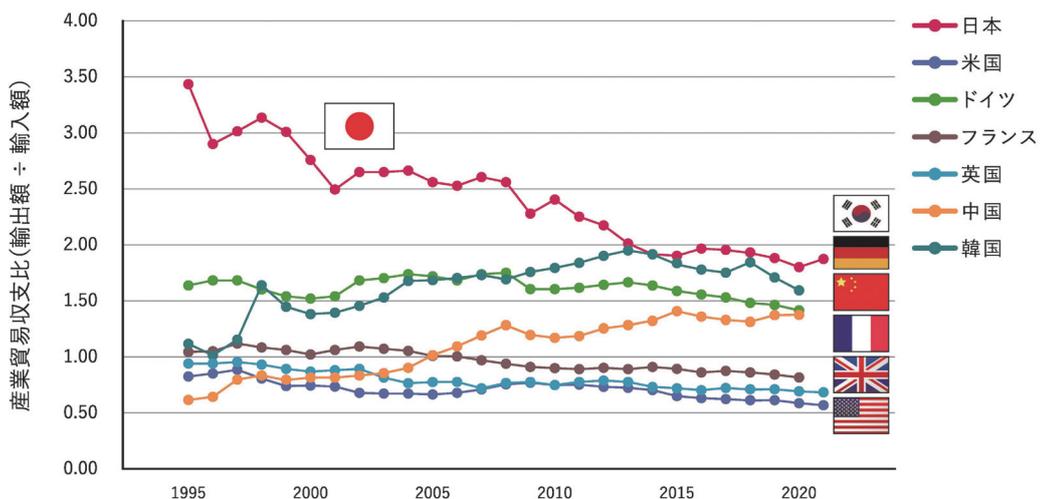
2 我が国のマテリアル科学力の低下

(1) 産業面での低下

新型コロナウイルス感染症の世界的拡大に見舞われた2021年において、我が国の輸出総額はおよそ83.1兆円であり、その約25%がマテリアル関連のミディアムハイテクノロジーとなっている。自動車産業等も含めると、ミディアムハイテクノロジー全体では輸出総額の実に55%を超すことから、関連産業のウェイトは極めて大きい（図1）。そして現時点では、このミディアムハイテクノロジーを中核とする輸出産業に匹敵する規模で外貨を獲得し得る産業は育っておらず、いかに国際競争力を強化し発展させていくかが、今後の我が国経済において極めて重要である。

デジタル技術の世界的な進展・普及を背景として、世界のミディアムハイテクノロジー市場は急激に成長しており、現在では450兆円規模に達する。特に中国、ドイツ、米国のほか、新興国含め諸外国がミディアムハイテクノロジー産業の競争力強化を図っている中、我が国の相対的なプレゼンスは低下している（図2）。しかしながら、現時点まで我が国は関連産業の輸出額において40兆円を超す規模を長年維持しており、産業の基盤として一定の規模を確保できていることも重要である。

図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合計の貿易収支比



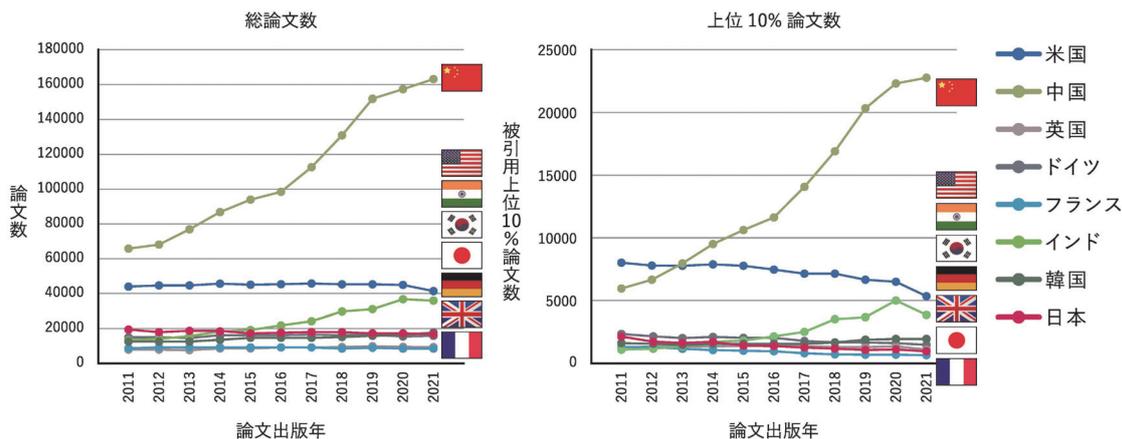
（出典）JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野（2023年）」を基に、筆者が一部加工。

(2) 学術面での低下

関連産業の相対的なプレゼンスが低下していることと同時に、我が国はマテリアル科学に関する相対的な研究力も低下傾向にある（図3、図4）。例えば、我が国の被引用度数トップ

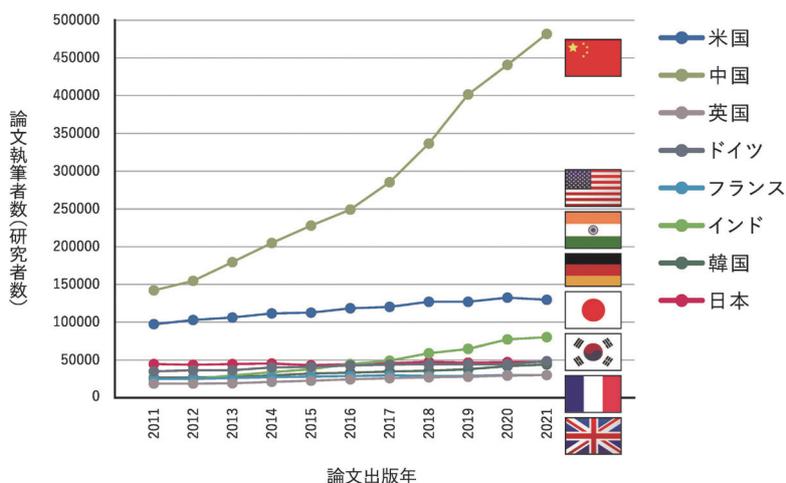
10%の学術論文数は、一定の水準を維持しており、数量的な減少傾向は見られていない。しかし、世界全体の論文総数が増加する中では、総数・高引用度数論文指標のいずれにおいても相対的な地位は低下している。すなわち我が国の研究力低下は、論文指標に表れている面のみから見る傾向としては、諸外国の著しい進展・発展のペースに追従できていないことによって、相対的な地位の低下を来していると言える。同時に、研究開発活動の絶対量が減少しているわけではないことも重要であり、世界トップ水準の研究人材及び研究成果において、一定割合は確実に存在していることを認識しなくてはならない。

図3 ナノテクノロジー・材料分野の論文数の国別推移



(出典) JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2023年)」を基に、筆者が一部加工。元データは、エルゼビア社の Scopus データを基に、同社と JST-CRDS が作成したもの。論文検索式には、Z. Wang et al., “Updating a search strategy to track emerging nanotechnologies,” *Journal of Nanoparticle Research*, Vol.21 Iss.9, September 2019. <<https://doi.org/10.1007/s11051-019-4627-x>> 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4 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) JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2023年)」を基に、筆者が一部加工。元データは、エルゼビア社の Scopus データを基に、同社と JST-CRDS が作成したもの。論文検索式には、Z. Wang et al., “Updating a search strategy to track emerging nanotechnologies,” *Journal of Nanoparticle Research*, Vol.21 Iss.9, September 2019. <<https://doi.org/10.1007/s11051-019-4627-x>> 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。

I 1 に示すとおり、マテリアルは常に産業の中核の一つであり、昨今の国際動向から見ても、マテリアルに関連する産業は中長期的に成長軌道にあるものと認識されている。そのため、それを支えイノベーションをもたらすための研究開発が一層重要視される傾向にある。

このような世界的な動きの中、我が国は関連政策をタイムリーに展開している中にある。半導体産業、量子技術、AI、バイオテクノロジー、カーボンニュートラル及びこれらに関する経済安全保障の強化策などに関連し、冒頭に述べたマテリアル革新力強化戦略は、関連する各政府戦略の成功に必須の役割を持つ戦略として位置付けられている。

マテリアル関連の世界の総論文数（図3）は年々増加傾向にあり、それは2000年代以降の中国の伸び率に大きく起因している。中国の論文数は、量だけでなく質的にも他国を圧倒している（質に関連する指標の一つとして、被引用トップ10%論文数を用いている。）。米国、ドイツ、英国の論文数は、微増又は横ばいの状況であり、我が国やフランスは、質・量ともに横ばい、あるいは若干の減少傾向にある。一方、インドや韓国は質・量ともに上昇傾向を見せている。

経済安全保障上の懸念から、産業界における国際的な技術輸出・移転に規制がかかる一方で、世界の科学技術コミュニティでは盛んな研究交流が進んでいる現状がある。特に、デジタル技術、AI、バイオテクノロジー、量子技術いずれの研究開発においても、マテリアルはその機軸を支えている。研究開発をより効果的・効率的に進めイノベーション創出の可能性を高める国際的な研究連携は、今後もますます活発化する可能性が高い。

例えば、マテリアル関連分野の国際会議である Materials Research Society（MRS）では、論文投稿数や参加人数なども過去最高である。特にバイオ関連や環境関連のマテリアル研究開発がこれをけん引する。マテリアル系論文誌のインパクトファクターは軒並み30%近い上昇率であり、この中でも特に環境・エネルギー関連の論文は、120%以上の上昇率を記録している。このように、各国のマテリアル研究者の人口が増加しているとともに、その活動も活発化している。

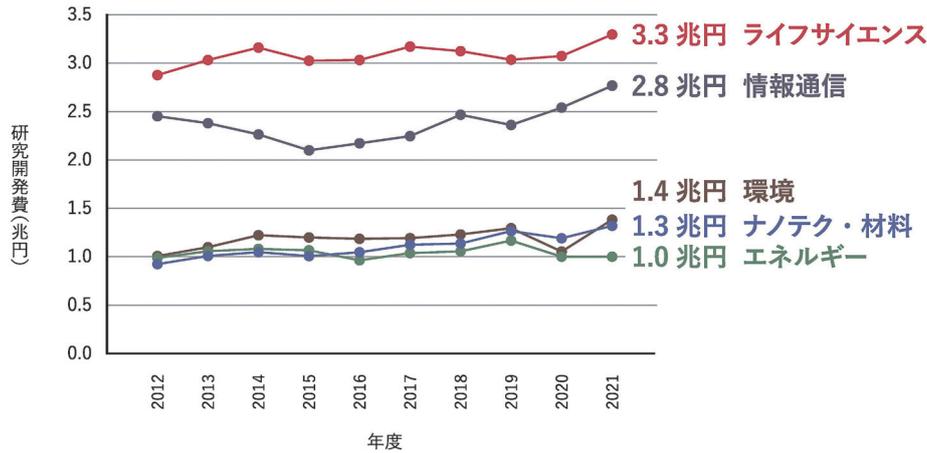
3 マテリアル科学を更に強化する各国

産業の基盤を形成するマテリアルは諸外国でも重視され、我が国を含め各国で強化策がとられている。

(1) 日本

我が国では、内閣府が統合イノベーション戦略推進会議の下に「マテリアル戦略有識者会議」を設置し、2021年3月の第6期科学技術・イノベーション基本計画の策定とともに、「マテリアル革新力強化戦略」を策定した。現在は同戦略の実行フェーズであり、内閣府、文部科学省、経済産業省の関連施策を通じ産学官が幅広く連携し、世界的に見ても極めて挑戦的な取組が行われている。図5に我が国における科学技術主要5分野の研究開発費（官民合計）を記載した。現状では、ほかの主要分野と比べても、産業構造の実態との関係においても、ナノテク・材料に関する研究開発費の割合は必ずしも高くなく、その適切性については議論のあるところだろう。

図5 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）



（出典）JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野（2023年）」を基に、筆者が一部加工。元図の出典は、総務省統計局「2022年（令和4年）科学技術研究調査」。

マテリアル革新力強化戦略でも中核を成す重要施策の一つに、文部科学省の「マテリアルDXプラットフォーム構想実現のための取組」がある。材料に関するデータの収集・蓄積・活用促進の取組の実績を持つマテリアル分野を、我が国における研究DXの活用事例にすべく、研究データの①創出、②統合・管理、③利活用までを一気通貫し、圧倒的生産性の向上とともに、革新的なマテリアルの創出を図るものである。研究を効率的に加速する全国の大学等の先端共用設備の高度化に加え、研究DXの活用事例として創出データを機関の枠組みを越えて共有・活用する仕組みを実現し、データ駆動型研究手法の全国化を目指している。また、データ駆動型研究が計算・計測手法と融合する次世代の革新的研究手法を確立し、社会課題解決につながるものとしている。①のデータ創出に関しては、大学等の先端共用設備を整備・高度化するとともに、創出データを全国で利活用可能な形式で蓄積し、提供する体制を整備する「マテリアル先端リサーチインフラ（Advanced Research Infrastructure for Materials and Nanotechnology: ARIM）」を推進している。②のデータ統合・管理に関しては、国立研究開発法人物質・材料研究機構（National Institute for Materials Science: NIMS）にデータ中核拠点を形成し、ARIMで創出されたデータを安全に保護された場で共有・活用し、AI解析までを可能とするシステムを実現するものである。③のデータ利活用は、具体的な拠点型研究プロジェクトとして「データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト（DxMT）」を実施している。従来の試行錯誤型の研究開発手法にデータ駆動型研究を戦略的に取り入れた次世代を担う拠点型研究開発プロジェクトである。さらに、NIMSにおけるデータ駆動型研究の推進や、材料のプロセスサイエンス構築を目指す研究プロジェクト「材料の社会実装に向けたプロセスサイエンス構築事業」を推進している（文部科学省概算要求資料より）。

経済産業省では、マテリアルに関連する戦略として「半導体・デジタル産業戦略」（2021年6月策定、2023年6月改定）や、「新・素材産業ビジョン（中間整理）」（2022年4月）、「蓄電池産業戦略」（2022年8月策定）などを策定している。マテリアル革新力強化戦略に関する経済産業省の中核的な取組の一つとして、「マテリアル・プロセスイノベーションプラットフォーム」がある。この施策は、国立研究開発法人産業技術総合研究所（National Institute of Advanced Industrial Science and Technology: AIST）が全国3か所のセンターに、原料から製品製造に至る

までを一気通貫、高度にシステム化された方法で高速かつ大量に製造・評価する装置群を導入し、製造プロセスデータを収集し活用するための基盤を整備するものである。インフォマティクスによる各地域の特色に応じた材料の設計、一連の装置群を用いた一気通貫での製造・試作、最先端の分析・評価装置の利用を可能としている。産業界におけるデータ駆動型研究開発を加速するための基盤整備と、製造プロセスの高度化・スケールアップにおける課題解決の支援を通じ、マテリアル関連企業の競争力強化、地域産業の活性化を図るものである。企業におけるデータ駆動型研究開発を支援し、プロセス・インフォマティクスにかかる基盤技術開発に取り組んでいる。これらにより、マテリアル産業の競争力強化、イノベーションの創出、地域産業の活性化の実現を図っている。

また、マテリアルに深く関連する政策として、量子技術の三つの戦略「量子技術イノベーション戦略」(2020年策定)、「量子未来社会ビジョン」(2022年策定)、「量子未来産業創出戦略」(2023年策定)や、「革新的環境イノベーション戦略」(2020年策定)及びこれを具体化した「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」(2021年策定)などがあり、これらが掲げる政策目標の実現には、マテリアル革新力強化戦略の研究開発基盤が整うことが欠かせないとして位置付けられている。同様に、文部科学省が官民連携により整備している次世代高輝度放射光施設「ナノテラス」が2024年の運用開始を控えていることや、大型放射光施設「SPring-8」の大幅改修(2029年運用開始)が計画されており、諸外国でも戦略的整備が進むマテリアル研究の基盤インフラの強化が重要課題となっている。

以下に、主要国のマテリアル関連の政策について概略を記述する。

(2) 米国

米国における本分野の基本政策としては、2001年から現在まで長期に続く国家ナノテクノロジーイニシアチブ(National Nanotechnology Initiative: NNI)と、情報工学を活用したマテリアル創出を狙って2011年に開始されたマテリアルズ・ゲノムイニシアチブ(Materials Genome Initiative: MGI)の二大イニシアチブが推進されている。さらに近年はマテリアルに関連の深い政策として、「半導体・科学法2022」⁽²⁾や、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」⁽³⁾が存在する。

NNIでは戦略計画を5年ごとに更新しており、現在の計画は2021年度に策定されたものである。同戦略計画ではナノテクノロジーの研究開発、産業化、研究インフラの構築・運営、責任ある開発の推進を、NNIに参画する20省庁及び関係機関が支援するために設定したゴールに基づいて維持し、教育と労働力の創出に新たなフォーカスをしている。また、NNIの開始から20年以上を経た現在、ナノテクノロジーの成熟を背景とし、大統領科学諮問会議(President's Council of Advisors on Science and Technology: PCAST)がNNIの根拠法「21世紀ナノテクノロジー研究開発法」⁽⁴⁾の見直しと今後へ向けた提言を出した(2023年)。MGIについては、バイデン(Joe Biden)政権下においてMGI戦略計画2021が策定されており、材料データの力を活用することが強く打ち出されている。半導体・科学法2022に関しては、米国における半導体

(2) CHIPS and Science Act of 2022, P.L.117-167. CHIPSはCreating Helpful Incentives to Produce Semiconductorsの略。

(3) Executive Order 13817 of December 20, 2017, A Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals.

(4) 21st Century Nanotechnology Research and Development Act of 2003, P.L.108-153.

産業の競争力確保・強化を目的として、科学技術だけでなく、産業基盤や安全保障の強化など広範な対象に及ぶものとなっている。希少鉱物に関する戦略については、経済・国家安全保障上の観点から35種の希少鉱物リストを作成し、政府機関全体の行動計画を含む希少鉱物供給確保戦略を発表している。その上でトランプ（Donald J. Trump）政権下の2020年に、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」⁽⁵⁾を発出、バイデン政権下に入ると新たな大統領令⁽⁶⁾により、産業のサプライチェーンを包括的に見直し、国内生産や回収・リサイクルの処理能力の拡大、備蓄強化などを掲げている。

(3) 欧州

EUでは、製品、素材、資源の価値を可能な限り長く保全・維持し、廃棄物の発生を最小限化する経済システム「循環経済（サーキュラーエコノミー）」を域内で実現していくことを掲げ、関連規制の策定を国際的にリードする形で政策展開をしている。科学技術イノベーション政策に関しては、EUの包括的なフレームワークプログラムが7年ごとに更新・推進されている。2021年から始まったHorizon Europeは、最先端研究支援、社会的課題の解決、市場創出の支援の3本の柱から成っており、マテリアルに関する研究開発も各柱の下で広範に実施されている。中でも、Flagshipsという巨額のプログラムが実施されており、2013年開始のGraphene Flagship、Human Brain Project、さらに2018年開始のQuantum Flagshipの各フラッグシップ研究プロジェクトが推進されている。また、Flagshipsに類似した取組で、蓄電池に関するBattery 2030+という大型の研究イニシアチブが2019年3月から開始している。近年の動きとしては、米国の半導体・科学法2022に類似する欧州版の「欧州半導体法」⁽⁷⁾が2023年9月に成立・発効した。半導体のEU域内生産拡大や研究開発強化を図る「欧州半導体イニシアチブ（Chips for Europe Initiative）」設置のほか、安定供給確保のための新たな支援枠組み設定、半導体サプライチェーンの監視と危機対応の3本柱で構成されている。現在10%程度であるEUの半導体生産における世界市場シェアを、2030年までに20%に倍増することを目指し、関連のマテリアル産業及び研究開発の強化も謳（うた）われている。このほか、フランスを中心とする原子力（核融合含む。）や、オランダに代表される農業・食品関連の研究開発も活発に行われており、いずれもマテリアル関連の研究開発と深い関連をもって推進されている。また、欧州ではEUレベルのプログラム・プロジェクトとともに、各国単位で独自の研究プロジェクト・研究拠点構築が進んでおり、例えば、ベルギーの半導体開発拠点Interuniversity Microelectronics Centre（IMEC）や、英リバプール大学に開設されたMaterials Innovation Factoryなど、国際的に注目されるハブ機能を持った研究拠点が形成され、世界から投資と人材を吸引している。

(4) 中国

2021年3月採択の「中国国民経済・社会発展第14次5か年計画と2035年までの長期目標綱要」では、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」と

(5) Executive Order 13953 of September 30, 2020, Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain From Reliance on Critical Minerals From Foreign Adversaries and Supporting the Domestic Mining and Processing Industries.

(6) Executive Order 14017 of February 24, 2021, America's Supply Chains.

(7) European Chips Act (Regulation (EU) 2023/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 establishing a framework of measures for strengthening Europe's semiconductor ecosystem and amending Regulation (EU) 2021/694).

の方策が掲げられた。科学技術関連では、フォトニクス、マイクロ・ナノエレクトロニクス（半導体）、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とした。また、次世代人工知能、量子情報、集積回路、脳科学、遺伝子・バイオテクノロジー等を先進的な科学技術力のブレークスルーの強化のため指定した。マテリアル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）、新エネルギー車とインテリジェントカーなどを指定している。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、新材料などを挙げ、同産業の付加価値をGDP比の17%以上にする目標を掲げている。さらに、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している。

「中国製造2025」（2015年公表）は、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。同政策では、次世代情報通信技術、先端デジタル制御工作機械・ロボットなどのほか、新材料を重点分野に指定している。技術覇権争いの契機になったとされたことで中国製造2025は公の場で言及されなくなったが、前述の計画のように製造業の中核的分野や戦略的新興産業で引き継がれている。2022年10月の中国共産党第20回全国代表大会（共産党大会）において、習近平総書記は科学技術イノベーションに関し、「製造強国・品質強国」・「デジタル中国」の構築加速、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、新材料など）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を示した。中国では米国MGIに追随し、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」を策定、マテリアルズ・インフォマティクスの拠点形成を国内複数の研究機関において進めており、データ駆動型材料研究の国家的研究基盤を構築している。

(5) 韓国

韓国は「ナノテクノロジー開発促進法」（2002年制定、2003年施行）に基づき、「第4期ナノテクノロジー総合発展計画（2016～2025年）」を運営している。ナノテクノロジーの競争力強化及び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%と置いたときに、92%のレベルに到達することを目標にした計画となっている。また、「K-半導体戦略」や「K-バッテリー発展戦略」といった各戦略を2021年から開始している。K-半導体戦略は、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国家戦略である。サプライチェーン安定化のための「K-半導体ベルト」を構築し、半導体製造中心地への飛躍のためのインフラ支援拡大、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。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（自社で製造工場を持たず、委託により生産を行うビジネスのこと）などの企業を集積した融合地域を形成し、短期的には国内での技術確立が難しい極端紫外線リソグラフィ（Extreme ultraviolet lithography: EUVL）や、先端エッチング、マテリアル分野の韓国内への直接投資の誘致を拡大する。さらに尹錫悦（ユン・ソンニョル）政権の下、2022年7月に「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。「K-バッテリー発展戦略」では、2030年に2次電池の分野で世界トップとなることを目指し、官民による大規模研究開発の推進、グローバルサプライチェーン構築などの戦略を策定している。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「次世代バッテリーパーク」を造成し、安定的なサプライチェーン構築のため、原材料の確保とともに、国内でのリサイクル技術強化の重要性を掲げ推進している。

4 マテリアル科学をめぐる国際状況の変化

(1) 国際的な規制の強化

マテリアルは、部素材・デバイスを通じて幅広い応用に資するため、社会・生活と多様な接点を有している。その際、環境や人・生物相に影響を及ぼすこともあり得る。新規物質や新製品の健康・環境への影響、倫理面の取扱い、リスクの評価・管理、標準化は、国際的な課題である。ナノテクノロジーに代表される新興技術・新規マテリアルは、従来の材料とは異なる微小構造ゆえの新物性を持つものがあることから、未知のものとして適切な評価や管理を行うことが必要になる。組成だけで分類することができず、サイズ、形状、表面状態など影響する因子が多岐にわたり、科学的評価研究には多くの時間・資金・設備等を要する。このことから、国や国際協調の枠組みの下、世界の産官学が協調して取り組んでいる。リスク評価手法・管理手法の確立に関する科学的再現性の担保や、医学・疫学的評価、評価結果の知識基盤整備、社会への情報提供とコミュニケーションの仕組み構築、産業界や社会における情報の活用システム、合意形成と意思決定の在り方など、責任ある研究・イノベーション (Responsible Research and Innovation: RRI) の観点から多様な課題が存在する。倫理的・法的・社会的側面 (Ethical, Legal, and Social Issues: ELSI) からと、環境・健康・安全 (Environmental Health and Safety: EHS) の科学的側面からの取組があるが、近年特にナノマテリアルを使用した製品の実用化の進展や、海洋マイクロ・ナノプラスチック、PFAS⁽⁸⁾などに対し、各国・地域単位で規制・制度面の整備が顕在化してきている。有用技術・材料のリスクを適切に管理し、恩恵を社会が広く享受するためには、健全な国際市場での流通が欠かせず、固有の用語、評価試験方法、リスク評価法などの多方面にわたる国際標準化が重要となる。

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」(昭和48年法律第117号。「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EUのRoHS⁽⁹⁾指令やREACH⁽¹⁰⁾規則を通じて有害物質の使用を制限したり、登録・開示を義務付けたりする方策がとられており、EUがリードする形で国際的な規制や標準化へと発展している。ナノマテリアルについては、一般的に1次元の大きさが100nm以下で人工的に製造された材料を指すが、生体において組織浸透性が向上することに加え、実効的な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するなど、特異な機能が発現する。RoHS指令で指

(8) Per- and polyFluoroAlkyl Substances の略。パーフルオロアルキル・ポリフルオロアルキル化合物：工業的に作られる有機フッ素化合物の総称。

(9) Restriction of Hazardous Substances の略。RoHS 指令は電気電子機器に含まれる特定有害物質の使用を制限する。

(10) Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals の略。REACH 規則は化学品の登録、評価、認可及び制限に関する規則。

定される鉛、カドミウム、水銀などは、それら元素を含む化合物を規制すればよかったことに
対し、ナノマテリアルは原料や組成だけからは、影響を事前に計り知ることができない。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ているため、人へ
の曝露（ばくろ）機会は多く、今後も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、生体や環境への影響評価を、サイズ・表面性状を始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。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、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によって進んでいるが、科学的データの共有は十分に進んでいない。

世界的には、EU や米国がナノマテリアルの登録制度を開始する中、実際にどのようにリス
ク評価を行うのかの観点で検討が進む。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、ナノマテリアルが新たにリスク評価・管理の対象となった。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。ISO（国際標準化機構）では、物質標準や計測標準のルール形成が進んでいる。

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、相互作用の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 RRI の考え方が国際的に広
がっている。ナノマテリアルはその代表例と言えるが、ナノカーボンやナノスケールの銀、酸
化チタン、酸化亜鉛等に関する、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っている。一方、有害性やリ
スクを評価する科学的データはいまだ十分ではなく、更なる研究が必要と指摘されている。こ
れらの例では RRI の考えに基づき、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示すことで、信頼を獲得していくことが重要となる。

我が国は厚生労働省が、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。しかし労働現場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、「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5年4月1日に施行（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となった。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、従業員の曝露対策を
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が、科学的評価に関しては産学官
の投資面を含めた研究協力と情報共有の仕組み構築が重要となる。マテリアルに対する国際
的な規制は欧米がリードするが、我が国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かかわらず、この方面への我が国の対応は十分とは言えない。欧米に
おいて様々なルールセッティングが進展している状況と比較し、社会・環境への安全性と公平な
国際競争との両面を踏まえた戦略的対応の体制が整っておらず、評価手法等の検討にとどまっ

ている。我が国では、毒性学や科学的リスク評価に関する研究者や、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立研究開発法人などの研究者が参画した評価研究等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活動のリードは、我が国が今後も重要マテリアルを世界に届け続ける上での課題である。

(2) 経済安全保障とマテリアル

近年の米中の技術覇権争い、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。グローバリズムの3規範（民主主義、市場原理、科学技術）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志向してきた。生産地のグローバル最適化を続けた結果として、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。「経済合理性による適地生産」の選択を世界各国とグローバル企業が行った結果、ハードウェアの生産はアジアに集中した。

この状況で起きた昨今の国際情勢の混乱は、世界中を萎縮（いしゆく）させ、逆回転の動きを見せることとなった。現在、各国は経済安全保障対策の最重要課題として、供給元が限られ将来的に要衝となり得る資源や工業製品のリストアップ、重要技術の特定及び対応策の検討を急ピッチで進めている。経済安全保障における四つの柱（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、マテリアル分野に関連が深いのが、①、③、④である。欧州や米国は、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。これに対応・対抗する形で、中国も希少鉱物資源の輸出禁止・制限等の措置を講じている。

また、先端半導体に関してはこれまで最先端ロジックのプロセス開発競争から撤退し、海外製造業者からの調達に舵（かじ）を切っていた我が国も方針を見直した。「半導体・デジタル産業戦略」を策定し、国内研究開発拠点や製造会社の設立、台湾メーカーの国内誘致、人材育成拠点の設立等の施策を次々と打ち出し、矢継ぎ早に強化策を立ち上げている。半導体は回路の線幅が細くなるほどに処理速度や電力効率が上がり高性能化する。そして開発競争の最前線にあるのが2nm世代である。新たに発足した半導体製造企業 Rapidus 株式会社（ラピダス）は、我が国が過去に量産を断念した20nm世代～5nm世代までを全て飛び越えて、2nm以降世代の量産を狙う。先端半導体の海外調達が困難になることへの備えは、国際情勢の急速な変化により先鋭化している。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、将来の産業や防衛面での競争力につながる新興技術や、一部の基礎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。

我が国の大学や国立研究所では、外国人学生や海外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、2022年度において2万人程度の外国人留学生がい

るが、卒業後に日本国内でポスドクなどの研究職に就く者も多い。外国人研究者は我が国の研究を支えており、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困難となるケースもある。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、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。一般に、マテリアル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、仮に外国人研究者を通じて技術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、広く知れわた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。しかし、最新の ICT 機器においては民生用と軍事用の境界がないものもあり、最先端の民生品が軍事転用される例も散見されることから、基礎研究においても研究の健全性・公正性（研究インテグリティ）が重要となっている。急速に性能向上が進む AI 技術や先端半導体に比べると、マテリアルの性能進化は緩やかである。このため、基礎研究段階ではオープンであることが望ましいとされてきた。しかし、電池、先端半導体、希少鉱物資源などに関する技術は経済安全保障の点で重要性が高まり、国際的にオープンな研究は難しくなりつつある。一方、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につながるため、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上で、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。また先端領域を切り開いていく上で、優秀な海外の研究者との国際共同研究は重要となっている。その上で顕在化する経済安全保障に対応するには、適切な開示と秘匿に関するルールと運用方法を構築し、共有することが求められる。また、根本には、マテリアル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背景がある。少子化の影響分以上に、マテリアル分野の日本人研究者が減っているのかについての適切な統計はないが、実態を把握し原因を分析した上で対応策が必要となろう。

II 我が国のマテリアル革新力の強化

国際競争力を有している我が国のマテリアル科学ではあるが、各国が大型の研究予算を用いてマテリアル科学に投資している現状や持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals: SDGs）への意識の高まりが相まって、「マテリアル革新力強化戦略」が我が国においても策定された。

1 マテリアル DX プラットフォーム

その中核を成す取組が、「文部科学省マテリアル DX プラットフォーム」である。これは、前述の ARIM の各機関や、DxMT の各研究拠点から創出される研究データを利活用しやすい形の構造化データとし、データ駆動型研究を促進することで、新しい知見を獲得し、これを基に新しいマテリアルを創るプラットフォーム構想である。

本件の具体的取組については、第2章で詳述する。

2 次世代半導体プロジェクト

デジタル技術が生活基盤のあらゆる側面を支える時代に入り、半導体製造の重要性が増して

いる。次世代半導体の製造を担う Rapidus 株式会社と、半導体産業の人材育成を担う技術研究組合最先端半導体技術センター（Leading-edge Semiconductor Technology Center: LSTC）が立ち上がり、次世代の半導体産業を支える枠組みが、国内大学との包括的な連携により開始された。

半導体デバイスの性能向上は、微細化と高度集積化にある。そのため我が国では、2nm 世代の微細化技術を実現するための取組が進んでいる。これを実現するために必要となる技術要素が、半導体ウェハに光を照射して回路パターンの微細構造を焼き付ける工程で対になる「光源（露光機）」と「光感光材料（レジスト）」である。

露光機については、オランダにある ASML 社（エーエスエムエル）が世界に先駆けて13.57nm の波長を出すことができる EUVL を実現し、微細加工のボトルネックであった光源の課題を克服することに成功した。なお我が国では、微細化技術の重要性を認識し、35年前に世界に先駆けて次世代露光機の研究開発が国家プロジェクトとして進められてきたが、途中で断念した歴史がある。

一方で、もう一つの重要な技術がレジストである。このレジストに関しては、現在のところ日本企業が国際的な競争力を有しており、半導体製造企業の多くが、日本製のレジストを用いて微細加工を行っている。

しかし今後、EUVL の普及が進むとこの優位性は失われていく可能性がある。実際、13.57nm の極端紫外線は、非常に弱い光であるため、これを高効率（ $20\text{mJ}/\text{cm}^2$ 以上）で光吸収できるレジストの開発が重要となってくる。

有力なレジスト材料として有機金属錯体が検討されており、世界各国でレジストの開発競争が進んでいるため、我が国においても重要な局面に差し掛っている。

Ⅲ 我が国のマテリアル革新力強化の次なる方向性を探る

1 課題と展望

COVID-19 パンデミックやロシアのウクライナ侵攻に伴い浮き彫りとなった、経済安全保障やグローバルサプライチェーンの根本的再考が世界で急速に起きており、この視点から我が国のマテリアル技術の展開を改めて見直す必要がある。ミディアムハイテクノロジーを活用した産業・経済規模は世界的に増加の一途をたどり、マテリアルは各国の競争政策とも直結している。このような状況下において、必須の資源や工業製品のリストアップ、重要技術の国内生産の回帰などの対応が求められている。

(1) マテリアルズ・インフォマティクスの活用

マテリアルの研究開発や人材育成には長い時間を要する特徴がある。この中でも国際競争力を確保するためには、技術的進歩・先端技術の獲得において諸外国との間で時差を構築する必要がある。そのために必要なことのひとつが、研究開発に要する期間（時間）の短縮である。マテリアルは研究から開発、実用化に至るまで一般に 20 年程度を要する。とりわけ、材料そのものや生産プロセスにおける基礎レベルでの研究開発は、長期間の試行錯誤によって技術を少しずつ成熟させることで最適化が図られるものである。今、この期間を短縮する手立てとしてマテリアルズ・インフォマティクスへの挑戦が世界的に進むが、その際にも、適切な国際協力により早期の社会実装や国際的優位性を確保する動きがある。事実、マテリアルに関する国際

会議における学术界の研究交流活動は活発化しており、マテリアル関連分野の国際学会の会員数や参加人数、論文数は急増している。

(2) グリーン・イノベーションの促進

SDGsの達成に向けて多くのイノベーションが起きていることも見逃せない。地球規模での気候変動、水・衛生、エネルギーなどの諸課題を前にして二酸化炭素などの温室効果ガスの排出をいかに削減するかの方法、再生可能エネルギーの利活用や省電力の技術、二酸化炭素の回収・捕捉、利活用、素材の開発効率を上げる方法、リサイクル・リユースを高効率に行う方法など、一個人や一企業ではなく、国・地域単位での法整備や体制強化が求められている。これらの新たな取組に加えて、産業界で既に最適化済みと考えられていた材料やその生産技術の再考も必要になっており、国際的なルール形成や、各国単位での法整備、促進策が求められている。

(3) 研究開発競争の激しい分野での勝ち残り

マテリアル分野の中でも、世界で進展著しい研究開発としては、蓄電デバイス、水電気分解を行う材料、mRNA（メッセンジャーRNA）技術などを活用した医薬品、生体材料ヘルスケア医療、先端半導体や脳型チップに用いられるエレクトロニクス、量子コンピュータ、トポロジカル材料（III3(4)で後述）などエマージング技術、データ駆動型の材料開発、低エネルギー低環境負荷のもの作り、そしてマテリアルの合成・反応に関わるプロセス技術などが挙げられる。世界各国でこれらの技術の覇権争いが激化しており、我が国においても最前線で活躍する研究者の育成が求められている。

以下に、①国際情勢、②海外の研究開発動向、③国民生活、④我が国の弱点と⑤我が国の成長戦略の五つの視点から見た急所を整理する。

2 国際情勢から見た急所

世界規模の趨勢（すうせい）として、気候変動、水・衛生、資源及びエネルギー需給、イノベーションエコシステムの構築など、その多くはSDGsと符合している。また、我が国ではサイバー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、ニーズは複雑化・高度化する方向で常に変化しており、それらへ迅速に応えるためにも、研究開発から成果創出に至る道のりを加速する要請が高まり、研究開発のDXが進む。

世界的な気温上昇を抑えるための目標として掲げられる「2050年カーボンニュートラルの実現」には、二酸化炭素排出量削減のための、二酸化炭素捕捉・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、既に確立・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、米中の技術覇権争いや貿易摩擦、ロシアによるウクライナ侵攻などの地政学的リスク、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、安全保障及び経済安全保障の観点から、サプライチェーンの強靱（きょうじん）化や重要技術の確保を目指す動きが顕在化している。先端半導体や蓄電池、高機能マテリアルなど、重要な材料・デバイスの中には、希少鉱物資源や地域的に偏在する原料を使用しているものが多く、これらに付

いては豊富で無害な元素によって目的とする機能を実現させることが求められている。このような元素戦略の観点では、原材料や製法の再検討が重要となり、新たな材料・デバイス技術の創出によってこれを克服できる可能性がある。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一時的に停滞したこともあり、研究開発のDXへの取組が格段に進んでいる。今後は、データ駆動型の研究開発を軸に、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。

また、新たな材料やそのプロセスに関する研究では、最先端の計測技術やシミュレーション、データ科学等を活用した多様な専門家による国際共同研究や、国際会議等を通じた学術的なコミュニケーションが一層重要となっている。世界のマテリアル関連学会の会員数や、主要国際会議の参加者数、投稿論文数は継続的に増加しており、研究領域の開拓や拡大の傾向が続いている。

3 海外の研究開発動向から見た急所

(1) 蓄電デバイスや水電解などのエネルギー関連技術

リチウムイオン電池などの蓄電池は、スマートフォンやノートパソコンなどのモバイル機器のほか、再生可能エネルギーの導入が進むグリッド（電力網）における中間の電力貯蔵、電気自動車などに使用され、私たちの生活に不可欠なものとなっている。特に、蓄電池を用いたエネルギー貯蔵システムや、電気自動車への転換が世界中で進んでおり、関連する世界市場は急拡大することが予測されている。研究開発の方向性としては、高エネルギー密度化、用途に応じた出力密度、充電時間の短縮、長寿命化と低コスト化、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が、急拡大する需要に対し資源の供給が追いつかない可能性が懸念されている。リサイクル技術の開発や、リチウムを使わない次世代電池の研究開発が活発化している。特に希少資源代替を志向した高性能な正極材料の開発が急がれる。一方、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基づく電解液の探索や、分解のおそれのない固体電解質の研究開発が進んでいる。

また、再生可能エネルギーを活用した物質変換によるエネルギー貯蔵・輸送が注目される。再生可能エネルギーによる電力を化学エネルギーに変換し、物質として貯蔵・輸送するものである。水電解や光触媒による水素製造（人工光合成）など、グリーンな水素製造技術の研究開発が活発化している。グリーン水素が生産されれば、アンモニアなどのエネルギーキャリアに変換し、貯蔵・輸送に活用できる。また、水素との反応により二酸化炭素を還元し、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、二酸化炭素排出量削減の切り札と考えられている。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二酸化炭素の還元、アンモニア及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。

(2) mRNA ナノ医薬、生体材料などのヘルスケア・医療関連技術

新型コロナウイルス感染症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 ワクチンが承認され、世界各国で使用された。この基になる基礎研究成果が、2023年のノーベル生理学・医学賞の受賞対象ともなった。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マテリアル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、新たな分子設計及び材料探索を目指した研究を活発化させている。

また、生体と材料の間の相互作用について、次々と新しい現象や関係性が見いだされている。材料が生体に応用される場面も、従来の損傷組織の修復のみならず、体内に導入する薬剤の担体、埋込み型・ウェアラブルデバイスなど、多様化が進んでいる。これまでの生体適合材料開発が目指してきた、望ましくない免疫応答（異物認識による炎症反応）を回避するマテリアルの探索という概念を超えて、様々な観点から生体適合性を捉え、更には生体との相互作用を積極的に活用してそれを能動的に制御するマテリアルの創出が求められている。特に近年、生物学的（酵素・受容体・抗体認識など）あるいは化学的応答のみならず、力学的応答が生体活動に影響することが明らかとなってきている。材料と生体の間の相互作用を多面的に、かつマイクロからマクロなスケールにわたって理解し、最適な材料設計にフィードバックすることが重要となる。ヘルスケアや医療機器などに使われる材料・デバイスの一層の高機能化によって、疾患の超早期診断、健康状態・生体情報のモニタリング、身体の機能低下や損傷の補修・治癒促進などに貢献することが期待されている。

(3) 先端半導体・脳型チップなどのエレクトロニクス関連技術

ポスト 5G の通信機器、大規模データを高速に処理する IT 機器、自動運転を始めとする AI 機器など、現在のものよりも、格段に高速・大容量・低消費電力動作の半導体デバイスが求められている。ムーアの法則⁽¹¹⁾に沿った素子サイズ縮小による集積度向上が限界を迎える中で、半導体デバイスへの、新しい材料の利用や新しい回路アーキテクチャ⁽¹²⁾採用が、本格的に求められている。演算を担うロジックデバイスの構造は、3nm 世代までが現行の FinFET 構造⁽¹³⁾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、それを更に 3 次的に積層していくことで集積化を図るとされている。2nm 世代に適用されると見込まれるシリコンナノシートを、更にその先の世代で置き換えることが期待される 2 次元材料、アナログ的な機能を取り入れることにより脳の動きを模倣して計算の電力効率を上げようとする脳型チップ（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デバイス）、現在では別の機能ユニットで担われている演算機能と記憶機能を融合させるインメモリコンピューティングなどの研究開発が注目される。また、異なるプロセスで作られた半導体チップ（チップレット）を 3 次的、あるいは、同一パッケージ内の近接位置に配置し、チップ間を高密度な配線で接続することで全体としての機能を構成す

(11) 1965年にゴードン・ムーア（Gordon Moore）が示した「半導体の性能が18か月で2倍になる」という経験則。

(12) コンピュータ（特にハードウェア）における基本設計や設計思想などを総称する。

(13) Fin Field Effect Transistor. 構造が魚のひれ（Fin）に似ているので FinFET（フィンフェット）と呼ばれる。

る技術の開発も注目を集めている。我が国では半導体戦略とともに、AI戦略を策定しており、AIの社会実装や利活用に重きを置いた戦略も多数関係している。情報・システム科学の領域と、マテリアルとの融合領域として、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。

また、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の高度化要求が高まっている。現在のパワー半導体は、主にシリコン半導体がい用いられており、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、シリコンウェハ（半導体集積回路を配置する基板）の直径が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。しかしシリコンの材料定数（主に誘電率）に依存するデバイス性能の限界から、駆動電圧が高い用途では、高電圧耐性化とエネルギーの低損失化（低イオン抵抗化）の両立に優れた炭化ケイ素や窒化ガリウム、そして将来的なものとして酸化ガリウムやダイヤモンドを用いる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、シリコンウェハの大口径化、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二酸化炭素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。そして、これら半導体デバイス及びその加工工程で用いられる先端マテリアルは、レジストや特殊ガス、洗浄剤、成膜・コーティング材料など、我が国のマテリアル産業が国際的なシェアを保持し、不可欠な要素である産業構造を築く上でも極めて重要な製品群となっている。

(4) 量子コンピューティングやトポロジカル材料などのエマージング技術

電子や光子などの量子性を積極的に活用して、既存のコンピュータでは実現できない情報処理が実現できる量子コンピュータの研究開発が活発化している。様々なタイプのある量子コンピュータの中でも、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や新材料の開発などに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、超電導量子ビット、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、トポロジカル量子ビット等の様々な方式が提案されており、研究開発が進んでいる。これらの開発に用いられるマテリアルは、量子マテリアルとして、極めてエマージングな研究領域となっている。量子マテリアルにおける「状態の重ね合わせ」や「量子もつれ」のような性質を動作原理として利用することで、量子コンピューティングのみならず、大容量かつ高速演算や高速通信が可能となる量子暗号・通信、量子センシングなどの高性能化に向けた技術の進歩が期待されている。量子マテリアルでは、特有の光学特性や磁気・スピン特性などを利用することで、大容量、高速、低消費電力での演算や通信が可能となる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、2次元の原子層から成るマテリアルを積層することによってトポロジカルな性質を発現させるトポロジカル材料や、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る研究開発が進んでおり、これらは適切な組合せを選ぶことで有用な機能を出すことが可能とされている。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、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ある。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の期待を集めている。トポロジカル物質群の中核を成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、表面にトポロジに特徴付けられた特異な金属状態が実現している物質である。このように、量子特有の性質が発現する物質系や、その性質を実用に向けて制御したり引き出したりする研究開発が進む。トポロジカル材料やスピントロニクス材料は、それらの代表例である。

(5) データ駆動型マテリアル研究開発など先端材料科学の方法論刷新

マテリアル開発に対する要求がますます高度化している中、そこで用いるマテリアルは多元素化・複合化や準安定相の利用などの方向に向かっており、材料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のマテリアル開発が必須とされ、世界的に急ピッチで研究開発が進められている。

膨大なデータを活用するマテリアル開発は、開発のスピードを上げ我が国のマテリアル産業の国際的競争力を底上げするものとして期待されている。そこに求められる技術としては、まず、マテリアルデータから新物質の発見や物質の性能改善指針を導き出すためのデータ科学的手法開発がある。データ駆動の科学が本領発揮するためには多くのデータが必要であるのに対して、マテリアルデータは量的に不十分なことが多く、その特徴に対応できるマテリアル分野に特化したデータ科学手法の開発が望まれている。また、データ科学手法に投入するデータ量を確保するため、正確で高速な計算物質科学の手法や超高速に実験データを集めるハイスループット実験技術なども、多くの対象マテリアルに対して開発・改善が求められている。さらに、集められた大量のデータのマネジメント方法や、利用のための様々なインターフェース、公開・非公開を含めた共用ルールの確立も必要であり、これらはいずれも国際的な競争領域となっている。我が国ではこれらに対し、前述のマテリアルDXプラットフォームの構築へ向け精力的な研究開発を進めている。

(6) 低エネルギー／低環境負荷のモノづくりに資する材料、プロセス技術

マテリアル産業は従来、その合成や廃棄に多くのエネルギーを使用し、また二酸化炭素を排出してきた。しかし今、資源枯渇や鉱物資源の偏在への対応と、環境問題の本丸である大気中二酸化炭素削減が求められている。そのためには、人類にとって重要な元素の循環を、コストエフェクティブに実現しなければならない。これまで我が国が取り組んできた元素戦略では数多くの課題に貢献してきたが、今後、炭素循環も含めた形で、その取組範囲を広げていく必要がある。具体的には、低エネルギーでの希少資源代替／使用量削減技術や、分離・回収関連の技術である。炭素繊維強化プラスチックに代表される高分子・無機複合材料における分離・再利用技術などが課題となっている。そのための基礎技術としての、易分解材料、固・液・気相での分離技術などが重要となる。また、マテリアル産業全体を考えたときの、カーボンフットプリントやマテリアルフローを意識した、ライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment: LCA）の視点が重要であり、製品ライフサイクル全体での環境負荷を定量的に評

価する手法の確立が課題とされる。既存の産業構造・システムの変革を伴う挑戦であるため、様々な分野の専門家が結集して取り組まなければ実現できない課題である。

4 国民生活から見た急所—日常生活を支えるマテリアル—

先端的なマテリアルは、社会を取り巻く様々な素材や製品に用いられ、私たちはそれによって便利な生活を享受している。スマートフォンやパソコン、テレビなどのエレクトロニクス製品、保温性や抗菌性を有する衣類・繊維、省エネのLED照明、再生可能エネルギーを生み出す発電機器や電池などがまず挙げられるが、このような目に見える製品だけではない。枯渇が危惧される希少資源への依存度合いを減らした、環境にやさしい素材、がんや脳疾患などにおける患者への負担が少ない予防・早期治療・診断の機器や素材、COVID-19のmRNAワクチンなどのナノ医薬品などに用いられている。ほかにも、水を浄化するためのシステムを構成する分離膜材料、災害に強いインフラを構成する材料、色鮮やかで長持ちする染料・顔料、身の回りの様々な危険を察知するセンサーなどの、目に見えない形で私たちの暮らしを支えている製品まで、ありとあらゆるところでマテリアルは人類・社会に関わっている。

そして今、クラウド上のサイバー（仮想世界）と、マテリアルやデバイスのフィジカル（現実世界）との境界にまたがるような領域として、サイバーフィジカルシステム（Cyber-Physical System: CPS）が市場の成長をけん引している。サイバーフィジカルシステムを実現する技術の中核には、AI技術やIoT⁽¹⁴⁾・ロボティクスの技術がある。AIの技術開発では米・中が世界を圧倒しているが、IoTやロボティクスに関しては我が国が強みを持ち、善戦している。産業や生活空間における、あらゆる物理的・化学的・生物学的なアナログ情報を、デジタル化してサイバー空間とつないでいこうとする潮流の中で、技術的ボトルネックとなるのはサイバーとフィジカルのインターフェース、すなわち情報を取得するセンサーデバイスと情報処理デバイスになる。実世界におけるアナログの情報を、デジタルに信号変換する際に、IoT機器を通じて得ようとしているアナログ情報の多くは、微弱な信号で、バラつきやノイズが大きいことが課題とされる。そのため高性能なセンサーが求められているが、多くのデータを取得しようとすると、それだけ多くのセンサーを配置しなければならず、高性能センサーの価格を抑える技術開発もまた課題となっている。今後のIoTデバイスは、取得するデータの対象が多様化していくため、求められるデバイスも多様化し、限られた特定の技術・製品だけでカバーされるものではない。そのため、高度な製品技術を持つ我が国の産業界にとって特に重要な領域となる。こうした付加価値を生む製品は、IoT化することで、単体の製品としてだけでなく製品ライフサイクルを通じたサービスへとビジネスモデルの重心が移っている。IoTでは、コストと機能が優先されるため、電子デバイス、センサーなどの多様な部品を実現する半導体と合わせた集積化が重要となる。

5 我が国の弱点から見た急所

(1) ビジネス展開する機動力と資金

我が国のマテリアル産業は、世界各国からの厳しい品質要求・価格要求に応える中で、高い競争力を保持してきた。諸外国との競争が激化する中、今なお多くの製品群において、品質、

(14) アイオーティー、Internet of Thingsの略。モノのインターネットをいう。

価格、省エネルギー・環境対応等の点において高い競争力を有しており、国際的に高いシェアを誇るものが数多く存在する。今後も国際市場で求められ持続的に成長していくためには、イノベーションを創出し続けるための大胆な投資を通じて、マテリアル産業の変革を遂げていくことが求められる。そのためには研究開発だけでなく、知的財産に代表される無形資産のより戦略的なマネジメント、そして原料調達から事業化、市場創出・市場形成、サービス産業としての付加価値創出、リサイクルや廃棄といった循環を含めた、サプライチェーン全体で不断の見直しを行い、国際競争をリードするスピード感が求められる。

マテリアルの中でも、基礎石油化学製品に代表される汎用品は、国際的な価格競争にさらされている。省エネ・低コストで製造してかつ高い供給能力を持つ国・企業が優位に立つビジネスであり、その意味で、中国がシェアを大きく拡大してきた。一方、高付加価値・高機能の化学品に関しては、複雑なビジネスモデル・バリューチェーンの中で、例えば少量・多品種といった多様なニーズに的確に対応する中で、技術・製品としての模倣困難性を築き、ユーザー側の成長軌道に伴走していくことが鍵となる。このような高付加価値・高機能品は、これまで我が国やドイツ、米国の主要企業や新興ベンチャーが強みを有してきた。しかし今、世界的なエネルギー価格の高騰に伴う電気料金の高止まりや、希少鉱物資源や主要原料価格の高騰、円安の進む為替動向、事業の国際的な再編を伴うダイナミズム、標準化や健全なビジネスに必要な規制等の国際ルールの形成、そして全産業で進むDXに対し、遅れることなく適時・迅速な対応を先んじて取ることが求められている。

我が国は人口減少に加え、マテリアル産業の世界的な拡大の中で、内需の減少傾向と外需の拡大傾向が見込まれる。国内製造・生産の再編とともに、需要マーケットに近い地域で製造能力を確保することとともに、地政学的リスクの高まりや経済安全保障をめぐる情勢変化に応じ、国民生活への影響を踏まえたサプライチェーンの確保・強靱化が課題となる。さらに、2050年カーボンニュートラルの国際的な目標へ向けては、中長期的な生産プロセスの転換が課題となる。日本の二酸化炭素排出量の中で、マテリアル産業はおよそ4分の1を占める。マテリアル産業をカーボンニュートラルに適応させていくためには、原料調達段階から、製造・生産プロセスの省エネルギー転換・再生可能エネルギーの活用、そしてプラント・工場の建設・改修・再編やDX、製品リサイクル・廃棄にかかる省エネ・二酸化炭素排出を含めて、サプライチェーン全体にわたっての排出削減効果を希求していくことが必要となる。特に製造・生産プロセスの転換に関しては、膨大な熱エネルギーを必要とする従来プロセスに対し、反応器への新技術の開発・導入や、中低温域の活用、廃熱の利用量・利用率を上げるためのニーズ創出や集約化、バイオマスの利用やバイオ生産技術及びバイオ由来マテリアルの活用など、様々な方策を組み合わせることが求められる。言わずもがな、こうしたカーボンニュートラルの実現には数々のイノベーションを生み出していくことが欠かせず、そのためには国際的にも見劣りすることのない、大胆な研究資源投資ができるようにしていくことも必要となる。

世界のマテリアル産業は、政策的なリーダーシップも伴いながら、大学・公的機関が生み出す新たな技術シーズを基に、ベンチャー・スタートアップを育て、技術移転やM&Aによってビジネスを構築していくイノベーションのエコシステム形成を進めている。マテリアル産業はIT産業等とは異なり、研究開発から市場形成まで一般に20年単位の時間がかかる。その間も、技術開発のフェーズに応じた適時・適切な規模の、絶え間ない投資が必要となる。その場合、一般的なベンチャーキャピタルによる10年未満の投資回収のモデルだけでは成立しにくい製

品・業態でもあるため、諸外国では官民の投資連携や、従来の金融・投資機関とは異なる財団・寄付等によるより機動的かつ長期の投資、社会・市民が方向性作りに参画するようなクラウドファンディングや非中央集権型の資金調達・研究開発投資・成果マネジメントの仕組みを生み出す試行錯誤が行なわれている。我が国のマテリアル産業に関わる関連ステークホルダーは、そうした動きも捉えながら、世界標準のスタートアップエコシステムをまずは構築することを目指しつつも、我が国産業が育んできた長期の技術継承による強みを失わないイノベーションのエコシステムを築き上げることが課題である。

(2) 次世代人材育成

マテリアルに関わる研究開発人材の不足は、ほかの多くの分野と同様に起きている。大学院教育を経て博士号を取得する人材がキャリアパスを描けるようにすることや、諸外国に比べてダイバーシティや女性比率の低さを改善すること、海外留学者数を増加させること、初等・中等教育の段階から理工系への関心を長く持ち続けられるようにするための方策など、様々な観点と世代について取り組むべき課題がある。研究者を志向する人材だけでなく、マテリアル研究開発に必須の先端装置等を扱う技術者や、研究成果を社会課題解決へとつなげていく人材、知的財産や国際標準・ルール形成を担う人材の育成も含めて総合的に対策を立てることが必要である。我が国のマテリアル科学は、新しい分野の開拓や融合領域の創出に課題があるとされる。先進・高度化する計算科学やデータ科学、微細構造解析等の計測技術や微細加工プロセス等の半導体技術、生命科学や環境科学、エネルギー科学など、異分野の連携・融合を率先して進めていく人材を厚くしていくことが求められる。

また、マテリアル産業においても人材の確保と育成は重要課題となっており、工場等生産現場における効率化等を担う人材のみならず、新たな価値創造や新規事業創出・サービス展開も含めたマテリアルビジネスを担う人材が求められている。そのためには、マテリアルに関する設計やプロセスに関する専門性と、AIやデータ科学を活用した研究開発・生産技術に関する専門性がともに必要であり、未来のマテリアル産業を担う人材の解像度をより明確にしていく必要がある。大学等高等教育機関では、学部・大学院教育を通じてそうした人材需要を先んじて捉えた、基本的な学術知識・研究経験・技術を学んだ人材を育成することが重要である。また、産業界では、マテリアル産業に携わることの社会的な意義・魅力の発信や、国際社会及び我が国の国民から幅広く意見を取り入れ賛同を得ていくといった活動を通じ、外国人材の活用も含め、マテリアル産業に携わる人材が活躍する活気ある業界を形成していくことは特に重要である。

6 我が国の成長戦略から見た急所

我が国政府は、2050年カーボンニュートラルに向けてグリーン成長戦略に基づいた研究開発や、マテリアル革新力強化戦略の下でデータを基軸としたマテリアル研究開発のプラットフォームを構築する「マテリアルDXプラットフォーム」、量子技術イノベーション戦略の将来像「量子未来社会ビジョン」に向けた研究開発などの主要施策を精力的に推進している。

また、半導体・デジタル産業戦略に基づき、半導体製造の前工程・後工程、製造装置、材料開発の全方位に対して積極的な研究開発投資を行うとともに、海外企業の工場・研究所誘致や、国内に工場を持つ企業への開発費支援策なども加わり、国内半導体産業の再興・活性化を

目指している。

我が国のマテリアル科学及び関連産業における現状と課題、国際的な潮流に焦点を当て、その展望を分析した。我が国は歴史的に豊富な経験と高度な技術を有する一方で、新興国の台頭や先進国の競争激化に直面し、マテリアル分野での国際競争力を維持するための課題に直面している。

おわりに

我が国の経済は、マテリアル関連のミディウムハイテクノロジーへの依存が高まり、特に新型コロナウイルスの影響と社会の急速なデジタル化により、その重要性が一段と際立っている。この傾向は我が国に限らず、多くの国が同様にマテリアルに焦点を当てた戦略を推進している。その中で我が国の相対的なプレゼンスが低下している。経済だけでなく学術面でも、他国に比べて我が国の研究力が低下している。

それに対して、我が国が既に有する卓越したマテリアル科学及びそれと関連産業の連携をデジタル技術の駆使によって更に強化するための着実な基盤が築かれ始めている。今後は、このマテリアル DX 基盤を強化し、国際競争においても優位性を保つために、研究開発への支援と人材育成への投資が不可欠である。

国際的な動向を見ると、デジタル技術及びバイオテクノロジーの進展においても、マテリアルが中心的な役割を果たしていることが明確になった。この中で、国際的な研究連携の必要性が一段と増している。我が国はこれらの分野で積極的な国際協力を進め、お互いに補完しあう力を発揮することが求められている。

最後に、政府が進めている「マテリアル革新力強化戦略」の導入は、国内のマテリアル関連研究開発を促進するための重要な指針となっている。これを具現化するためには、産学官一体の協力の下で DX をいかし、高品質なマテリアルデータの蓄積・活用を進めることが必要である。総じて、将来への展望を前にして課題が山積みであるが、我が国のマテリアル科学と関連産業はその卓越した基盤をいかし、持続可能な未来の構築に欠かせない存在であると認識されている。国内外との協力を深め、次世代人材育成とともにマテリアル技術と知識の発展に邁進（まいしん）していくことが必要である。

執筆：大阪大学産業科学研究所 教授 せきたに 関谷 つよし 毅