

ナノテクノロジー・材料科学技術 研究開発戦略 (素案)

平成30年6月
科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会
ナノテクノロジー・材料科学技術委員会
ナノテクノロジー・材料分野の
研究開発戦略検討作業部会

目次

1. ナノテクノロジー・材料分野を取り巻く状況の変化
 - (1) これまでのナノテクノロジー・材料科学技術の役割
 - (2) 研究開発環境の変化
 - (3) 我が国における政策上の位置づけ
 - (4) 我が国のナノテクノロジー・材料分野の強み
 - (5) 諸外国の動向
 - (a) アメリカ
 - (b) EU
 - (i) ドイツ
 - (ii) イギリス
 - (c) 中国
 - (d) 韓国
 - (6) 新たな未来社会等の実現に向けて
2. ナノテクノロジー・材料分野の推進に当たっての目標と基本的なスタンス
3. マテリアル革命の実現に向けた課題
4. マテリアル革命を実現するための取組
 - (1) 社会変革をもたらす魅力的な機能を持つマテリアルの創出
 - (i) 新たな切り口に基づくマテリアル機能の拡張
 - ・相反物性を内包する超複合材料
 - ・マテリアルの機能を大幅に拡張する非平衡状態・準安定構造の活用
 - ・新機能・飛躍的な機能向上の可能性を秘める生物メカニズムの活用
 - (ii) 戦略的・持続的に進めるべき研究領域
 - ・元素・物質の循環と新機能開拓に資する次世代元素戦略
 - ・分子技術
 - ・IoT/AI 時代の革新デバイス（センサ・アクチュエータ技術を含む）
 - ・バイオ材料工学
 - ・エネルギー変換・貯蔵を革新するマテリアル
 - ・革新的な分離技術を生み出すマテリアルの創出
 - ・構造材料
 - ・ロボットを革新するマテリアル
 - ・オペランド・極限超計測技術

(2) 創出された革新的マテリアルを世に送り出すサイエンス基盤の構築

(3) 研究開発の効率化・高速化・高度化を実現するラボ改革

- ・スマートラボラトリ (AI/Robot-driven Materials Research)
- ・データ駆動型研究開発
- ・データ創生の源となる計測技術開発
- ・共用設備の充実化・拠点ネットワーク化

(4) マテリアル革命を実現するための推進方策

- ・社会実装を加速するための取組
- ・中長期の人材確保・育成
- ・国際連携に向けた戦略的取組
- ・社会とともに歩むナノテクノロジー・材料

1. ナノテクノロジー・材料分野を取り巻く状況の変化

(1) これまでのナノテクノロジー・材料科学技術の役割

- ・ナノテクノロジー・材料科学技術は、エレクトロニクスや自動車、ロボット等、我が国の基幹産業を支える要であり、現状では高い国際競争力を有している。さらに、我が国が直面する資源・エネルギー制約や社会インフラ老朽化への対策等の社会的課題解決に資する鍵として、大きな期待を背負う国家基盤技術である。
- ・また、広範で多様な研究領域・応用分野を支える基盤であり、その横串的な性格から、異分野融合・技術融合により不連続なイノベーションをもたらす鍵として、科学技術に支えられる我が国の社会そのものの発展に向けた新たな可能性を切り拓き、先導する役割を担っている。
- ・例えば、セラミックス技術の進展により透明性の高い石英ガラス等を用いた光ファイバーが誕生し、情報化社会が実現・高度化した。窒化ガリウム (GaN) 発光材料の開発により、照明技術の革新が起き、低消費電力化に大きく貢献するとともに鮮やかなイルミネーションを実現し、国民生活に豊かさを与えた。さらには、加工技術の高度化やトンネル磁気抵抗効果の発見等により、高性能コンピューティングや超磁気記録密度ストレージを実現し、その結果、人工知能技術やビッグデータ技術が生まれ、新たな可能性を切り拓きつつある。
- ・さらに、我が国の「工業素材」の輸出総額に占める割合は自動車と並んで 20% を越えており、我が国が強みを有し、産業基盤を支える重要な分野となっている。
- ・このようにナノテクノロジー・材料科学技術は現代の我々の生活に必要な不可欠な技術であり、本分野の発展がその時代毎に新しい価値を創出し、社会の変化を牽引する役割を担っている。

【ナノテクノロジー・材料科学技術の貢献の事例】

- ・半導体製造技術における積層技術や薄膜製造技術の革新により、大容量メモリやイメージセンサ、液晶ディスプレイ、有機 EL が実現し、スマートフォンやセンサ等小型高性能デバイスが IoT 時代を切り拓いた。
- ・通信デバイス技術の発展がネットワーク社会を支え、半導体パワーデバイス技術で消費電力や CO₂ 排出量を大幅に低減した。
- ・ナノ構造に着目した高度なプロセス技術等から実現した超鉄鋼により、強い産業基盤を確保した。また、新軽量構造材料が自動車産業を支えている。
- ・炭素繊維強化プラスチック(CFRP)等の高分子系複合材料が、輸送機器や日用品の耐久性・安全性に革新をもたらした。さらに複合材料と最先端センサ、アクチュエータ技術が融合し、ロボットを高性能化した。
- ・金属触媒や有機分子触媒、ゼオライト、固体酸触媒等、化学合成プロセスにおける触媒技術の進歩が、多くの高機能化成品をもたらした。
- ・セラミックス技術や有機・無機ハイブリッド材料の開発で、蓄電池の主要材料（電極、電解質、セパレータ、バインダ）が日本から普及。Li イオン電池等の蓄電池は AI/IoT 時代のキーデバイスとして我が国が主導した。
- ・導電性高分子や有機 EL 等の進展が、電子材料・デバイス技術の革新に寄与し、さらにフレキシブルデバイスの実用化に貢献した。
- ・希少元素を用いない磁石材料が実用化され、ハイブリッド自動車用モーターに搭載される等、自動車産業隆盛の立役者となっている。資源制約を抱えるわが国の産業に材料技術が一つの方向性を示した。
- ・超伝導技術の進展により MRI やリニアモーターカーが誕生し、医療や人々の輸送に革新をもたらした。

(2) 研究開発環境の変化

- ・(1) で述べたように、歴史をひもとくと、材料やハードウェアの発展があらゆる科学技術の土台となり、IoT、AI、ビッグデータ社会から、環境、医療まで、発展の原動力となった。今後も、ナノテクノロジー・材料の発展は一分野にとどまらず、あらゆる科学技術分野の進展を牽引する横串的な起爆剤の役割を果たさなければならない。
- ・しかし、本分野における我が国の国際競争力は低下が懸念されている。
- ・例えば、生産年齢人口の減少に伴い、科学技術全体の若手研究者の確保が難しくなる傾向にあり、本分野でも同様の傾向が見られる。このままでは我が国は研究開発の担い手不足に陥り、次世代を担う研究開発力の維持・向上が

困難な状況に直面する。

- ・また、我が国の当該分野の論文数の国際的なシェアは 2000 年代初頭には世界第 2 位であったものの、近年では第 5 位であり、被引用度数 Top10%補正論文においては第 7 位となっている。
- ・加えて、我が国の産業界全体の研究開発投資は微増傾向にあるものの、国内における民間企業の研究開発投資効率の低下やこれまで日本企業が高い市場シェアを有していた材料において、ユーザー側の製品サイクルの短期化や市場規模の拡大に伴う新興国メーカーの参入による競争の激化等のため、市場シェアの低下と素材自体のコモディティ化が加速している。
- ・さらに、基礎研究から応用研究というリニアモデルのみでイノベーションを起こすことが困難になっており、応用から基礎に立ち返る必要性が生じている。このような産官学間のやりとりを通じて、急速に変化する社会ニーズへの対応や、新しい社会ニーズを喚起する新材料・デバイス等の開発を進めていくことが求められている。
- ・このような状況の中で、我が国におけるアカデミア・産業界の両面で当該分野の中長期的な国際競争力の向上が極めて重要な課題である。
- ・また、AI/IoT/ビッグデータのようなサイバー技術の急激な進展により、社会構造は大きく変化している。研究開発の現場においても、これらの技術を取り入れたデータ駆動型材料開発が、従来にないスピードでの研究開発を実現する新たな材料開発手法となる可能性がある。すでに成功例も出始めており、まさにゲームチェンジが発生しつつある。
- ・サイバーが社会に与える影響が大きくなればなるほど、サイバー技術の更なる発展を実現するための新材料・新デバイス技術のニーズも高まっている。

(3) 我が国における政策上の位置づけ

- ・我が国はナノテクノロジー・材料分野を第 2 期以降の科学技術基本計画上に重要な分野として位置付け、官民を挙げて研究開発を推進してきた。その結果、以下のように我が国が「強み」を有する科学技術として成長してきた。
- ・第 2 期科学技術基本計画（平成 13 年 3 月 30 日閣議決定）において、「ナノテクノロジー・材料分野」が「ライフサイエンス分野」、「情報通信分野」、「環境分野」とともに、特に重点を置き優先的に研究開発資源を配分すべき重点 4 分野の 1 つに位置付けられた。
- ・これを踏まえた「ナノテクノロジー・材料分野の推進戦略」では、この分野に対する国家的・社会的要請に応ずるための重点領域が位置づけられた。
- ・このような政策的な議論も踏まえつつ、文部科学省では具体的なプロジェクトとして「経済活性化のための研究開発プロジェクト（リーディング・プロ

プロジェクト)を実施し、「ナノテクノロジー活用新原理デバイスや半導体製造技術」、「次世代型燃料電池」、「ナノテクノロジー活用人工臓器・人工感覚」、「計測・分析・評価機器開発」を推進した。これに加え、ナノテクノロジー分野別バーチャルラボとして、3つの戦略目標の下で10領域の研究開発を実施した。さらには「ナノテクノロジー総合支援プロジェクト」によりナノテクノロジーに関する研究基盤を整備した。

- ・このように、重点分野にふさわしい重層的な研究開発投資により、本分野の研究開発が強力に推進された。

- ・第3期科学技術基本計画（平成18年3月28日閣議決定）においても、「ナノテクノロジー・材料分野」は引き続き特に重点を置き優先的に研究開発資源を配分すべき分野とされた。さらに併せて策定された分野別推進戦略では「True Nano※」に関する取組を推進することとされた。

※分野別推進戦略において、「ナノ領域で初めて発現する特有の現象・特性を生かすナノテクノロジーの中でも、(1)従来の延長線上ではない、不連続な進歩（ジャンプアップ）が期待される創造的な研究開発、(2)大きな産業応用が見通せる研究開発」と定義されている。

- ・このような議論も踏まえ、文部科学省ではナノテクノロジー・材料を中心とした融合分野の研究開発として「キーテクノロジー研究開発の推進」を実施し、「ナノエレクトロニクス領域」、「環境エネルギー領域」、「バイオ領域」が推進された。これに加え、希少元素代替等を強力に推進するために「元素戦略プロジェクト（産学官連携型）」が立ち上がった。さらに、産学連携で環境に資する研究拠点の構築を目指した「ナノテクノロジーを活用した環境技術開発」も同時期に開始した。また、大学等研究機関の先端的な研究施設・機器の共用化を進め、分野融合を促進し、研究基盤の整備強化を図る「ナノテクノロジー・ネットワーク」を実施した。

- ・第4期科学技術基本計画（平成23年8月19日閣議決定）では我が国が直面する重要課題に対応すべく、ナノテクノロジーは、社会的課題解決に必要な横断的な基盤技術として、先端材料や部材は産業競争力強化に向けた共通基盤として位置付けられた。本計画の下「元素戦略プロジェクト（研究拠点形成型）」が立ち上がり、4領域（電子材料、構造材料、触媒・電池材料、磁石材料）の研究拠点が10年間の研究開発を推進している。また、「ナノテクノロジー・ネットワーク」の後継として「ナノテクノロジープラットフォーム」を開始し、先端的設備の共用とその活用ノウハウの提供で、継続的に研究基盤を構築・発展させながら、産学官問わず幅広い研究活動を支援している。さらに内閣府において戦略的イノベーション創造事業（SIP）による革新的

構造材料の研究開発が推進され、データ駆動型の材料開発等、新たな切り口の取組も始まった。

- ・第5期科学技術基本計画（平成28年1月22日閣議決定）では、サイバーとフィジカルの高度な融合で人々に豊かさをもたらす未来社会実現に向けた取組(Society5.0)を進めている。その中でナノテクノロジーや材料は新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術として位置付けられている。これを踏まえ、文部科学省では、第4期科学技術基本計画時に立ち上げられたプロジェクトを着実に進めている。
- ・さらに、物質・材料研究機構（NIMS）が特定国立研究開発法人として新たにスタートし、我が国のイノベーションを強力に牽引する中核機関を担うこととなった。新たな役割を果たすべく、センサ・アクチュエータの研究開発を中核とした国際研究拠点の形成や、産学官連携のためのオープンプラットフォーム等による世界最先端の研究設備やデータ駆動型の材料研究開発に資する材料データベース等の研究開発基盤の整備を進めている。
- ・上記に加え内閣府では、官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）が開始され、民間の研究開発投資誘発効果の高い領域（ターゲット領域）の1つとして、フィジカル基盤技術が特定され、ナノテクノロジーや材料が重要な役割を果たすセンサやアクチュエータに関する研究開発に投資が行われている。
- ・また2015年に国連サミットで採択された持続可能な開発目標（SDGs）の達成に貢献する科学技術についても政府内で議論が進められているところである。

- ・このように、我が国の科学技術政策におけるナノテクノロジー・材料科学技術は、重点分野から基盤技術へと位置付けを変えつつ、着実に推進されている。一方で、(2)に述べた研究開発環境の変化も踏まえた新たな位置づけについて検討していく段階に直面している。

(4) 我が国のナノテクノロジー・材料科学技術の強み

- ・ナノテクノロジー・材料科学技術は、世界で勝ち抜く競争力を現時点では堅持している。
- ・例えば、我が国は優れた研究者や企業の取組とその時々施策が一体となって推進されることで、競争力が維持・向上されてきた。このような取組が優れた研究者や研究成果をより多く生み出すことにつながり、画期的な材料やデバイスの創出を実現してきた。
- ・また、先端研究設備の共用体制の全国的な展開や、スパコン「京」、SPRING-

- 8、J-PARC 等の大型研究施設の整備による強力な研究基盤がある。
- ・さらに、材料の研究開発や製造に関する優れた知識、経験、ノウハウ、勘は、研究者・技術者等に長年蓄積されてきた。
 - ・加えて、物性や材料創製プロセス等に関する良質なデータは今後のデータ駆動型の材料開発を実現する上でも鍵となる財産である。
 - ・研究機関別でも材料分野における論文被引用数の世界ランキングにおいて物質・材料研究機構は世界第9位となっており、高い研究力を有している。
 - ・産業競争力の面では、リチウムイオン電池材料や炭素繊維、液晶ディスプレイ等に用いられる電子材料・電子部品、水処理用分離膜、鉄鋼材料等において日本企業が世界市場で非常に高いシェアを獲得している品目が多数存在している。
 - ・このように、ナノテクノロジー・材料分野に関係する我が国の産業と大学等研究機関は、世界的に強みを有しており、両者が強く連携し、速やかな知識移転を達成した研究成果は世界を牽引してきた。今後もこのような実績を踏まえ、より一層の産学官の連携強化がさらなる国際競争力の確保に不可欠である。

(5) 諸外国の動向

- ・ナノテクノロジー・材料科学技術について、諸外国は産業競争力や雇用に直結する重要案件として認識し、他国の動向にも敏感に反応し、次々に手を打っている。
- ・以下では、材料科学分野の Top10%補正論文数の上位5か国について各国の取組を示す。

(a) アメリカ

- ・2001年以降3～5年毎に National Nanotechnology Initiative (NNI) 戦略プランを策定し、研究開発が進められている。ナノテクノロジーの位置づけは従来の基礎研究（ナノスケールで起こる現象の探索とその原理解明）領域から、より幅広い enabling technology と位置づけが変わってきている。
- ・2016年に策定された第6期NNI戦略プランでは5つのプログラム領域 (PCA: Program Component Areas)¹ が設定されている。PCA1では5つの戦略

¹ PCA1: Nanotechnology Signature Initiatives and Grand Challenges, PCA2: Foundational Research, PCA3: Nanotechnology-Enabled Applications, Devices, and Systems, PCA4: Research Infrastructure and Instrumentation, PCA5: Environment, Health, and Safety

分野²を特定した Signature Initiatives により省庁横断的な研究開発が進められているとともに、Grand Challenges として「非ノイマン型コンピュータの開発」が盛り込まれており、ナノテクノロジーは future computing の実現に必須の役割を担うと位置付けられている。

- さらに材料の基礎研究から社会への実装及び普及にいたるまでの開発期間を二分の一に短縮し、低コスト化を目指す Materials Genome Initiative (MGI) を 2011 年に発表し、その関連するプロジェクトを複数進めてきた。MGI は DOE、NSF、DOD、NIST、NASA といった幅広い機関が参画し、MGI 戦略プランを策定しつつ、5 年間で 500 百万ドル以上の投資がなされている。
- 加えて、産官学の研究者に対し微細加工や解析・計測装置等のナノテクノロジーの最先端研究設備をオープンな共用施設としての提供や、専門技術スタッフによる装置利用、技術習得、専門知見の面でのサービスの提供により、科学技術上の新発見やイノベーション創出、教育、商業化、社会的利益に貢献することを目的とした「National Nanotechnology Coordinated Infrastructure (NNCI)」に取り組み、研究環境を整備している。
- その他の取組として、CMOS より優れた性能を発揮する非従来型の低エネルギーエレクトロニクスデバイス技術を実証する「Nanoelectronics Research Initiative (NRI)」、原子・分子スケールの物質科学を、理解し、操作することによって、将来のエネルギー技術に革新を生み出すことを目的とした拠点形成政策である「Energy Frontier Research Centers (EFRCs)」により、これまでに 40 を超えるセンターが設置されている。
- このようにアメリカではナノテクノロジーや材料に関して重層的なプロジェクトを推進しており、高い国際競争力の確保に大きな成果を挙げている。

(b) 欧州

- 欧州では Horizon2020 の 3 つの優先領域（「Excellent Science」、「Industrial Leadership」、「Societal Challenges」）においてナノテクノロジーや材料に関連する取組が盛り込まれている。
- 「Excellent Science」には、Future and Emerging Technologies の一つとして、2010 年にノーベル賞を受賞したグラフェンを中心にした「グラフェンフラグシップ」を位置付けている。欧州委員会で決定された 23 か国、150 を超えるアカデミアと産業界のグループが連携した 10 年間で 10 億ユーロ規模

² Sustainable Nanomanufacturing/ Nanoelectronics for 2020 and beyond/Nanotechnology Knowledge Infrastructure/ Nanotechnology for Sensors and Sensors for Nanotechnology/Water Sustainability through Nanotechnology

のプログラムであり、経済成長と新規雇用、新たなビジネスチャンスの創出することを目的として推進している。6つの部門³で構成されており、幅広い領域でのグラフェンの活用を目指し研究が進められている。

- ・「Industrial Leadership」では、Enabling and Industrial Technologiesとしてナノテクノロジーや先端材料を位置付けている。6つのキー技術(KETs)の内4つがナノテクノロジー・材料関係(ナノテクノロジー、先端材料、マイクロ・ナノエレクトロニクス、フォトニクス)であり、7年間の合計で29億ユーロの投資が計画されている。
- ・「Societal Challenges」では社会課題である「Climate action, Resource Efficiency and Raw Materials」に対して、重要な原材料に関する経済的で持続的な供給・使用や代替材料の発見を促進することとしている。
- ・さらに、情報科学との融合という観点では、Horizon2020の「NOMAD(Novel Materials Discovery)Laboratory」において、独、英、スペイン、フィンランド、デンマーク、アイルランドが参画し、物質材料研究開発のための百科事典とビッグデータ分析と高度なグラフィックツールの開発することを目的とし、2015-2018年で約7億円(約500万ユーロ)の投資がなされている。

このように欧州全体の取組として幅広い研究開発が進められている。これらに加えて、各国においてもナノテクノロジーや材料をキーテクノロジーの一つとして独自の取組が進められている。

(i) ドイツ

- ・2014年に研究開発やイノベーションのための包括的な戦略をまとめた「新ハイテク戦略」が発表され、ナノテクノロジーや材料は分野を横断するキーテクノロジーの一つとして位置付けられている。
- ・この一環として「ナノテクノロジー行動計画2020(2016-)」が策定されており、その横断的な性質から、ナノテクノロジーと材料研究の統合や、IT技術・医療への応用、電気自動車のバッテリー研究、生物由来エネルギーへの原料転換、食品安全性研究、インダストリー4.0生産技術でのナノ材料利用等、幅広いテーマが計画されている。さらに人体や環境にリスクを与えるナノ材料の同定等も推進している。

(ii) イギリス

- ・英国ナノテクノロジー戦略(2010年)において、ナノテクノロジーは振興技術

³ Enabling Science and Materials/Health, Medicine and Sensors/Electronics and Photonics Integration/Energy, Composites and Production/Partnering Division/Administration and Services

(emerging technology)・実現技術(enabling technology)として位置付けられている。これに基づき、ビジネス・産業・イノベーション、環境・衛生・安全(EHS)研究、規制、ステークホルダーとの連携促進の4つのアクションが示された。その後の「Our Plan for Growth : Science and Innovation(2014)」では、英国が世界をリードする8つの重要な技術の1つとしてナノテクノロジーと先端材料が位置付けられている。

- 2009年には、高耐久・軽量・高性能な複合材料開発で産業競争力を高めるため「英国複合材料戦略」が発表され、国立複合材料センターを設立し、複数の大学やロールス・ロイス社等の企業も入り、大規模研究拠点が形成された。
- さらに、グラフェンの商業的利用に向けた研究開発を進めるため、グラフェン・グローバル研究技術拠点、国立グラフェン研究所といった複数の拠点を整備する等、特定材料に焦点を絞った国家プロジェクトを推進している。

(c) 中国

- 「国家中長期科学技術発展計画綱要(2006-2020)」(以下、中長期計画)において、「次世代のハイテク及び新興産業発展の重要基盤を構成し、ハイテクイノベーション能力を総合的に体現する先端技術」8分野の1つとして「新材料技術」を位置付けている。また、基礎研究分野の重大科学研究のテーマとして「ナノテクノロジー研究」が盛り込まれている。
- 第12次5か年計画(2011-2015)では「新材料」を7つの戦略的新興産業の1つとして位置づけ大きく発展させるとした上で、高性能繊維や複合材料、先進レアアース材料等の科学技術産業化プロジェクトを実施する方針や、新材料の設計や加工、高効率利用、安全使用、低コスト循環再利用等の核心技術の開発とともに、基幹材料の供給能力を引き上げ、新材料利用技術とハイエンド製造の水準を引き上げるとし、集中的な政府の支援を実施している。
- 第13次5か年計画(2016-2020)では、2030年を見据えた15の重大科学技術プロジェクトに「重点的新材料」等を指定している。
- また、北京の国家ナノ科学技術センター(NCSNT)を中心に国内で複数の研究拠点を整備し、ナノ科学技術産業化の役割を担っている。
- さらに、データ駆動型材料開発についても中国は国を挙げて中国版MGIを推進し、40プロジェクトが立ち上がっている。上海大学に「Materials Genome Institute(2015)」や「上海交通大学に「材料ゲノム共同研究センター(2016)」等の研究拠点を整備するとともに、国家重点研究開発計画の一つとして、「材料ゲノム工学のキーテクノロジーと支援プラットフォーム」(2016-2020、約50億円(3億元)/5年)を開始する等、強力に取り組みが進められている。

(d) 韓国

- 第3次科学技術基本計画（2013-2017）の「5大推進分野」のうち、「IT融合新産業」において、主要輸出産業の高度化を実現するための重点国家戦略技術として先端素材技術（無機・有機・炭素等）を位置づけている。
- ナノテクノロジーについては、ナノ技術開発促進法（2003年制定）」に基づき策定された「第4期ナノ総合発展計画（2016～2025年）」において、ナノテクノロジーを製造業のリーディング技術開発として掲げ、ナノテクノロジーベース製品のマーケットシェアを12%にすること等を目標としている。その過程で12,000人の高度ナノテクノロジー人材の育成や、ナノテクノロジー関連ベンチャーを1000社設立する等を計画している。
- また、Nanoconvergence Foundation を設立し、IT、ET と NT との統合（convergence）によるナノ統合技術と商品化を促進して新しい産業の創出を目指した「ナノ統合2020プログラム(2012-2020年)」を進めており、9年間で5億ドルの投資が計画されている。
- さらに、巨額の投資でナノテクノロジー共用施設（ナノ・ファブ・センター）が6か所設置されている。

世界を代表するナノテクノロジー・材料に関する大型の研究機関の例

◆IMEC(ベルギー)

・ナノエレクトロニクスの国際的な研究請負機関で、オランダ、台湾、中国、インド、アメリカ、日本等に研究・マーケティング拠点を構えており、国際的なプレゼンスも高い。年間予算は約3億ユーロ、450 mmの研究開発ラインを持つ。個々の企業では投資規模が大きすぎて対応が難しい最先端半導体微細加工技術でリーダーシップを発揮し、世界の名だたる企業・研究機関が参画・活用している。IMECにおける技術開発が実用・量産化への近道であるとする世界のトップ機関を惹きつけている。近年では、成長が著しいエネルギーやバイオテクノロジーの分野に強い関心を示し、アメリカのジョンズ・ホプキンス大学等と提携することで、同分野における拠点の競争力強化を目指している。また、欧州における研究者向け人材育成の一大拠点へと成長しており、2013年に新たに『IMEC Academy』を創設した。

◆MINATEC(フランス)

・フランス政府や地方自治体の主導で創設された、欧州屈指のナノテクノロジー研究開発拠点。年間予算は約3億ユーロで、スタッフ規模は4500人を超え、ここに23,000名を超える研究者が世界中から集まっている。3つの機能（①マイクロ・ナノテクノロジー分野における科学・技術教育の提供、②技術や知財を蓄積するための基礎・応用研究、③産業界に向けた技術移転・起業支援）を有する。MINATECには6つのプラットフォーム（ナノエレクトロニクス、ナノ計測、システムインテグレーション、フォトニクス、化学、生物医学）があり、IoTセンサ技術の開発にも力をいれている。CMOSとMEMSの200 mm、300 mmのプロセスラインを持ち、バイオエレクトロニクスを強化している。近年では、フォトニクス研究ラボの建設や、次世代半導体研究開発の刷新・継続が決定している。また、EUのグラフェンフラッグシップとは別に、2次元材料全般をカバーするプロジェクトも推進している。

以上のように、各国が政策文書においてナノテクノロジーや材料を重要なキーテクノロジーと位置づけるとともに、従来からの取組を戦略的・継続的に実施し続けている。また、グラフェンやナノテクノロジーを活用した水に関する研究等、新しい切り口での研究開発プロジェクトも積極的に進められている。さらに、AIやビッグデータ時代の到来を踏まえ、様々な国においてデータを活用した材料開発手法そのものの革新を目指した取組も進められている。このように、各国がナノテクノロジー・材料分野に対し積極的に研究開発を推進しており、我が国としても独自の視点と戦略が求められる。

(6) 新たな未来社会等の実現に向けて

- ・我が国や国連で掲げられている Society5.0 や SDGs 等の実現に向けて、様々な課題が顕在化している。
- ・Society5.0 の実現に向けて、AI/IoT/ビッグデータといったサイバー面の研究開発が重要視され、研究開発が盛んに行われている。しかし、ムーアの法則の限界や大量のデータ取得に必要な革新的センサの開発等、近年ではハード面の研究開発が律速となり、総体としてのデジタルイノベーション創出の大きな壁となっている。このような壁を打破するためには、材料やデバイスの革新が必要不可欠である。
- ・SDGs の達成に関しても、例えば「目標 6. 安全な水とトイレを世界中に」では革新的な分離材料の開発やそれを活用したシステム化技術が必要不可欠である。「目標 11. 住み続けられるまちづくりを」に関しては強靱で長寿命な構造材料の開発が鍵となる。また「目標 7. エネルギーをみんなに。そしてクリーンに」では、太陽電池や環境発電等の再生可能エネルギーの更なる効率的な利用に向けた取組が重要である。さらにクリーンなエネルギーを達成することにより、気候変動や海・陸の豊かさを守ることにつながる等、個別目標の達成は別の目標にも大きく影響してくる。このようにナノテクノロジー・材料科学技術は個々の目標達成はもちろんのこと、多くの目標達成に影響を与える必要不可欠な科学技術である。
- ・このような未来社会等を実現していく上で直面する壁は、サイバー空間技術のみで乗り越えることは難しく、フィジカル空間技術の中核となる物質・材料・デバイス（以下、本戦略ではまとめて「マテリアル」と記載）そのものの発展とその創出を支える基盤的な技術の革新が、将来における国際競争力の確保・維持に必要不可欠である。
- ・ナノテクノロジー・材料分野は、産学官のこれまでの努力により我が国が「強み」を有する技術となった。一方で、諸外国においてもその重要性が認識され、強力に研究開発を推進している。また新材料の創出のみならず、AI やビッグデータを活用した材料開発手法の変革に向けた取組も加速しており、これまでにない脅威となっている。このままでは我が国の国際競争力の基盤である本分野の「強み」が失われてしまう恐れがあり、早急な対応と戦略が求められる。
- ・そこで、ナノテクノロジー・材料科学技術を今後も我が国の「強み」としていくべく、2030 年以降に向けて我が国が推進すべき当該分野の研究開発戦略をまとめるとともに、本議論を第 6 期科学技術基本計画の検討にも活用していく。

2. ナノテクノロジー・材料分野の推進に当たっての目標と基本的なスタンス

- Society5.0 や SDGs 等の実現に向けて直面するであろう多くの壁を次々と打破し、産業振興と人類の「幸せ」の両方に貢献する。
- その壁の打破するために、これまでにない機能や従来品を置き換える機能といった、社会が応援したくなる魅力的な機能を持つ材料の創出を推進する。
- これらの取組を通じて、社会の変革を強力に牽引する「材料による社会革命（材料革命）」を実現する。
- 材料革命の実現に向けて、魅力的な機能を持つ材料の創出に加えて、創出された革新的材料を世に送り出すサイエンス基盤の構築・技術への昇華や研究現場の生産性を向上させる「ラボ改革」等の材料開発基盤技術の向上も実現していく。
- 「魅力的な機能」の創出には、新規材料の創出のみならず既存材料の別用途への展開、融合・統合・システム化といった様々な手段を用いていく。そのためには新たな取組にも着手しつつ、従来からの取組も戦略的に継続する。
- 諸外国の研究開発動向に注目し、情報収集を継続的に行うとともに、世界に先んじた次世代の研究開発を進め、我が国の国際的なプレゼンスを維持・向上させていく。
- 将来の担い手となる若者や社会全体を惹きつけるため、材料の魅力や重要性をわかりやすく発信していく。

なお、本研究開発戦略は最新の科学技術動向や国際状況を捉えるため、2年に1度を目安に更新し、進化する研究開発戦略となることを目指す。

※魅力的な機能を有する材料の例

- 自己修復する等、メンテナンスフリーでコストを低減する耐久性が高い材料
- 硬くてしなやかといったトレードオフとされる物性を有する材料
- サイバーとフィジカルの高度な融合を実現する機能を有する材料（超高速処理デバイス、低消費電力デバイス、超高感度・高選択性・超小型センサ、アクチュエータ・モータ・表示デバイス等）
- 循環型社会を実現する機能（リサイクル特性、環境調和性等）を有する材料
- 生体と人工物の相互作用を自在に制御し、人間の能力を拡張する材料
- 再生可能エネルギー大量導入時代に求められる超高効率エネルギー変換・利用や貯蔵等を実現する材料

他

3. マテリアル革命の実現に向けた課題

- Society5.0 や SDGs 等の実現に向けて、要求されるマテリアルはますます高度になっていく。今後は新分野をいかに生み出すかについて検討していくとともに、既存の取組も我が国が強みを有する大事なことは終わらせないような仕組みの構築が必要である。
- マテリアルの研究開発は長期に及ぶため、プロジェクト期間中に実用化の目途をつけることが難しい。重要な技術については、プロジェクト終了後も継続して取組を支援する仕組みを導入することが重要である。
- データ駆動型の材料開発手法が研究現場に実装されていくにつれて、データの量・質の確保とともに、いかにデータベース化して利活用していくかを検討する必要がある。
- 政府の厳しい財政事情や、世界人口が増えていく中で我が国では少子化等により研究開発人材不足が懸念されており、研究の担い手の確保や国際競争力の維持・向上が困難になっていく。このような状況の中で産学官問わず研究者を確保し、育成していくことや研究開発の生産性を高めていく必要がある。
- 大学等の研究室と民間企業のスケールの差やコスト面等の課題により、民間企業への引き渡しに大きな壁が生じている。得られた成果をいかに民間へ橋渡ししていくかを検討する必要がある。
- 研究開発の長期性、マテリアルと最終製品の距離、社会ニーズ・技術シーズの多様化・複雑化により、基礎から応用という従来のリニアモデルでのイノベーション創出は困難となっている。今後は、社会実装に向けた研究開発と基礎研究とが相互に刺激し合いスパイラル的に研究開発を進めていくことが重要であり、産業界が抱える基礎フェーズへの課題にも対応していく必要がある。
- 一人の研究者が基礎研究の段階から材料の用途イメージを持つことやコスト・大量生産性を意識することは困難であるため、研究者のサポート体制の整備や新たな用途のひらめきを誘発するような仕組みが必要。
- マテリアルのプロセス技術等、論文を書きにくい技術領域が国際競争力の根幹にかかわるケースも多々ある。このような技術開発に対して論文以外の評価軸により評価していくことが重要である。

4. マテリアル革命を実現するための取組

国内外の動向や AI 技術等の進展によるパラダイムシフトを踏まえ、ナノテクノロジー・材料分野の研究開発の考え方を一新することが必要である。そこでサイバー技術やロボット技術等を研究現場に取り入れたラボ改革や創出された革新的マテリアルを世に送り出すサイエンス基盤の構築に取り組み新たな

な時代に対応できる人材の育成を推進していく。加えて、Soceity5.0 や SDGs 等の未来社会の実現にはこれまで以上に高度な機能を持つ魅力的なマテリアル創出に向けて新たな切り口の導入による研究開発や戦略的かつ継続的な研究開発の実施に対応していく。

(1) 社会変革をもたらす魅力的な機能を持つマテリアルの創出

(i) 新たな切り口に基づくマテリアル機能の拡張

魅力的な機能を創出するためには従来からの取組に加え、新しい切り口や異分野融合を誘発するような研究開発領域を設定し、推進していくことが重要である。また、開発された材料は様々な用途に展開される可能性を秘めているため、特定の領域に限定されない横串的な領域を設定することにより、戦略的に分野融合や新たな用途を誘発していく。以下に具体的な研究領域を示す。

・相反物性を内包する超複合材料

製品の軽量化や強度・耐熱性の向上等の複数の機能を同時に実現するため、複数の異なる材料を一体的に組み合わせて材料の性能を高める複合材料の重要性が高まっている。材料が有する魅力的な機能を融合させて使うための科学技術により、単一の素材では実現し得ない価値を生み出す取組を推進すべき。機能性材料、構造材料、もしくは、高分子・金属・セラミックスといった材料の区分けを廃して、特筆すべき機能を出す構造材料や、これまで構造材料として扱われていたものが新しい機能材料として実現する等、両者の境界を取り払い融合分野として推進することが重要。

・マテリアルの機能を大幅に拡張する非平衡状態・準安定構造の活用

これまでのマテリアル設計は最安定構造を中心に技術開発されてきた。しかし、非平衡状態・準安定構造をもつ材料も研究開発の主戦場の一つとなつつある。非平衡状態・準安定構造をとる物質の数は安定構造の物質より圧倒的に多いため、新機能発現の可能性を飛躍的に高め、魅力的な機能の創出を促進することができる。さらに、データ駆動型材料科学により準安定構造の探索が進展し、マテリアル創製の活発化が期待される。また非平衡状態・準安定構造は、より低温での合成によるエネルギー消費抑制の可能性があることや、高い反応性を有するため資源の再利用への道筋がつけ易く、循環社会に貢献し得るという特徴も有する。それに加え、電場等の外場印加、階層構造、高エントロピーの活用や材料設計指針に時間軸を導入する等により機能が多様化する。電池反応、触媒反応、薬剤、自己修復材料、金属ガラス等、多様な領域で関連研究が進展しつつある。

- ・新機能・飛躍的な機能向上の可能性を秘める生物のメカニズムの活用

生物はこれまでの材料では再現できない多くの魅力的な機能を有している。このような機能をマテリアルとして実装すべく生物模倣（バイオミメティクス）が行われてきたが、その多くは生物の構造の模倣に限定されていた。一方で魅力的な機能の創出には、環境適応や自己修復、検知機能や運動機能、常温反応、複雑な物質の生産等の生物が持つメカニズムをマテリアルに取り込むことが重要である。このように従来のバイオミメティクスの範疇を越え、例えば一分子認識をも可能とする超高感度の化学物質センサや、低エネルギーで環境にやさしい条件下での物質生産等の実現に向けたバイオインスパイアードのマテリアル・プロセス開発を推進することが強く望まれる。

上記の他、新たな切り口に基づく研究開発領域について、今後も引き続き科学技術動向を調査・分析し、研究開発戦略の改定に反映させていく。

（ii）戦略的・持続的に取組を進めるべき研究領域

我が国が強みを有する研究開発領域については今後も引き続き研究開発を推進することで、国際競争力を高めていくべきである。また Society5.0、SDGs 等の実現に必要不可欠であり、そのために求められる機能を見据えて今後伸ばしていくべきナノテクノロジー・材料科学技術について戦略的・継続的に育成していくことも重要である。以下に具体的な研究領域を示す。

- ・元素・物質の循環と新機能開拓に資する次世代元素戦略

これまで推進されてきた「元素戦略」は、SDGs やデータ駆動型研究開発等の世界的な研究開発の流れを先導する取組であった。ここでこの先導をさらに加速するため、元素・物質の循環やサステナビリティを前面に出し、そのための未開拓の新機能の追求と創出を行う。有限である資源の効率的利用のための元素の潜在機能開拓とともに、サイエンスに基づいた物質・材料・元素の循環・再利用・再生産・リサイクルの研究開発を進めなければならない。持続可能な形で資源を循環させながら材料を利用する社会を目指す取り組みは、特に EU 等の施策で顕著に表れており、我が国発の元素戦略の後追いから、世界を先導する状況へと変化している。世界情勢と、我が国における研究成果を鑑み、元素・物質循環と未開拓新機能創出に資する取組を推進することが重要である。

・分子技術

環境・エネルギーや情報、健康・医療分野に革新をもたらし、社会的問題を解決するために、分子を自在設計・制御することで新機能を創出する「分子技術」が推進されてきた。分子技術は、物理学・化学・生物学・数学等の科学的知見を基に、分子の特性を生かして設計、合成、操作、制御、集積することによって、目的とする機能を創出し、応用に供するための一連の技術である。我が国発の取組であり、世界へ展開する動きにもなっている。これまで創出されている多くの成果と、我が国発のコンセプトをさらに高めて世界を先導していく。さらに、幅広い社会ニーズに応えるため分野融合及び産学官連携を進め、「分子技術」による物質・材料開発へのブレークスルーを志向して、新たな視点を加味しながら推進し続けることが重要である。

・IoT/AI 時代の革新デバイス（センサ・アクチュエータ技術を含む）

Society5.0 実現のために、サイバー空間とフィジカル空間を繋ぐセンサ・アクチュエータ技術の重要性が高まっている。トリリオンセンサ時代の到来が謳われる中、あらゆる人やモノがつながるためには、高耐久性や耐環境性を有するマテリアル、フレキシブル基板の作製技術、エネルギー供給システムの刷新・通信の省エネ化を実現するマテリアルが必要になる。またこれまで十分活用できなかった化学情報等を得るためのセンサの開発も重要な課題となる。更にこうした情報に効率的に対応するためにも、ナノレベルから巨大構造物までの各サイズを対象とし、様々な状況や環境の変化に対応できるインテリジェントなアクチュエータの開発も重要である。

一方、今日の情報処理デバイスでは集積回路が微細化の限界に直面しており、従来の CMOS ロジック回路によるフォン・ノイマン型のコンピューティング技術だけではさらなる性能向上は困難になってきている。Society5.0 時代の高度なサイバー・フィジカルシステムの実現には、これまで以上の高速化・低消費電力化とともに、リアルタイム性やロバスト性、認識・判断といった高度な情報処理が求められている。そのためには、こうしたデバイスに用いられる半導体、MEMS/NEMS や量子科学技術といった先端技術の飛躍的な進展に必要なマテリアルの革新を推進することが重要である。

このような、今後求められる革新的な情報処理デバイス、MEMS/NEMS デバイス等の分野では、微細加工技術の更なるブレークスルー、微細化だけに頼らない新たなアプローチ、さらにはプリントドエレクトロニクスや三次元積層造形技術に代表される、多品種少量生産等の新たなニーズに応える加工プロセス技術の開発推進も必要である。微細部品の集積や加工には、材料の接着や濡れ特性などの新規な制御法が求められている。集積回路チップの開発においても、

さらなる高機能化・小型化・低消費電力化のために、マルチコア・ヘテロ三次元集積技術が必要とされている。このような微細加工・三次元積層技術は革新的デバイスの実現の可否を握る核となる技術であり、積極的に推進することが重要である。

・バイオ材料

高齢化は今後世界の多くの国が直面するグローバルな課題である。中でも我が国においては 2030 年に世界に先んじて高齢化率が 30%を越えると予想される課題先進国となっており、健康寿命の延伸が大きな社会課題である。こうした課題に対して、最近では、各個人の日常生活や医療現場等の様々な情報を収集してビッグデータ化し、AI により解析することが課題解決のための強力な手段の一つとして注目されている。このようにサイバー技術は Society5.0 時代において大きな期待が寄せられており、精力的な研究開発が進められている。

一方で、健康寿命の延伸を実現するためには、サイバー技術のみならず、マテリアルによるフィジカル面での研究開発が不可欠である。例えば生体情報をモニタリングするための新しい技術としてウェアラブルデバイスが注目されているが、生体と長時間、安全に接触し正確な情報を収集するためには生体負荷の少なく、生体と一体化するようなマテリアルが必要である。サイバー技術の進展に伴い、膨大なデータの取得が求められるようになるにつれ、それに応えるマテリアルの創出は近い将来、健康寿命延伸の実現に向けた要となるだろう。

さらに革新的なマテリアルは、健康長寿のための新しい解決方策を切り拓く可能性を持つ。例えば、足場材料により炎症等の生体现象をコントロールし、細胞の増殖分化能力を高め自然治癒を促すようなバイオマテリアルの研究開発が進められている。また、様々な機能を内包したナノマシンの創成により従来難しかった血液脳関門を突破する革新的な治療技術も生まれつつある。このように革新的なマテリアルと医療の融合が実現することで、ナノ医療、再生医療、ナノ診断等の先進医療技術の飛躍的な進歩も期待される。

このような技術の実現に向けては、これまでのような生体に悪い影響を与えないという消極的な生体適合性のみならず、積極的に炎症のような生物学的現象に対してアプローチし、生物の持つ生理的な自然治癒を促すために細胞の周辺環境を整備するマテリアルの開発が求められる。近年の生物に対する理解の深化は、生命現象が化学的な現象のみならず周辺環境等の空間によっても大きな影響をうけることを明らかにしつつある。すなわち薬剤等による分子レベルでのアプローチにとどまらず、材料による空間制御まで含めたアプローチが次世代技術の鍵を握る。しかし計測機器等の課題から従来のバイオマテリアルの研究開発では定量的な分析が不十分であり、多様な生体環境に対する応答メカ

ニズムと材料特性の関係が十分に明らかになっていない。そこで、近年の計測技術の進歩と革新的な材料創製技術、更には生物アッセイ技術を活用することで、人工材料と生物現象に関するサイエンスを構築し、材料の化学的・物理的な特性をデザインすることで生物学的な現象にアプローチする学問「バイオ材料工学」を確立し、それに基づいて新たなバイオ材料を創出していくことが重要である。このような学問が構築されることにより、バイオ材料を動物や植物等へ展開することも可能となり大きな波及効果が期待できる。加えてバイオ材料の研究開発においては、医療行為等に該当する場合であれば医療関係者と、基礎生物学等を出口として目指す場合には生物、分子生物学者と有機的に連携していくとともに、実環境に近い状況での評価を可能にするような新たな基盤技術の開発等にも取り組むべきである。

・エネルギー変換・貯蔵・高効率利用を革新するマテリアル

Society 5.0 に向けて、急速に進化しているウェアラブル電子機器の普及や、無数のセンサデバイスによる IoT の拡大等が進められており、多種多様なニーズに応える魅力的な電子デバイスが強く求められている。一方で、このようなデバイスを時間・場所問わず使うためには、エネルギー源をいかに確保し、有効に活用するかという共通の壁が存在している。この壁は電子デバイスのみならず、次世代モビリティである電気自動車やドローンなどの飛行物体、今後ますます社会での活躍が期待されるロボット等の実現・普及にも大きな障壁となっており、様々な場所・用途に対応できる電源技術やエネルギー高効率利用デバイスが求められる。一方で技術開発を進めていくためには、SDGs にも掲げられているとおり、クリーンなエネルギーの活用をはじめとした持続可能性も踏まえる必要がある。

我が国は、電気自動車用リチウムイオン二次電池で高い技術力を背景に世界市場で大きなシェアを獲得してきた。また、太陽電池モジュール開発では長年日本がリードしてきた分野である。次世代技術においても全固体電池や日本発のペロブスカイト型太陽電池等、優位性を持つ技術がある。さらにはリチウムに依存しない新たな電池の開発も強力に進められている状況である。このような強みをさらに伸ばしていくためにも、2030 年に向けてエネルギー関連の研究開発を継続していくことが重要である。

具体的には、エネルギー変換・貯蔵・効率的な利用等で、高性能化や新機軸に関わるマテリアルの創出が一層求められる。例えば、所望のエネルギー機能を実現させる材料の設計・制御手法の確立や、電池材料や電解液等の個別要素技術のみならず、それをシステム化した際の性能向上を目指した基礎基盤的な研究開発、機械等におけるエネルギー効率の飛躍的な向上をもたらす摩擦制御

等が重要である。加えて、SDGs を実現するために、希少元素依存からの脱却・将来の再生可能エネルギー大量導入時代・低炭素社会を支える新しい材料科学技術の芽の創出を推進することが重要である。

さらに、最新の動向として量子現象も活用した新規なエネルギー変換原理の探索によるサイエンスも誕生しつつあり、新局面を拓く方向性も重要となる。このような萌芽的なサイエンスについても積極的に研究開発を進めるべきである。

・革新的な分離技術を生み出すマテリアルの創出

自然界から有用物を見出し、人間社会が製品として活用し、それをリサイクルあるいは適切な形態で自然界と人間社会との間を長期的に循環させることは、持続可能な生態系・社会の実現へ向けて必須のプロセスである。物質・材料はとかく合成することに目が向けられがちであるが、その一連の過程において必須になり且つ革新が求められるのが分離の操作である。混合物から目的物質だけを取り出す、あるいは不要物を除く分離操作を、従来に比して格段に低エネルギー且つ高精度に行うことは、マテリアルの研究開発が力を発揮でき、社会への貢献度も非常に高い領域である。例えば、今後予想される世界の人口増による著しい水資源の不足に対処するために、廃水処理や海水淡水化では分離技術は必須になっている。こうした課題において、わが国が膜材料等で高い技術を有しており、持続可能な発展を実現する上で、国際的に大きく貢献できる領域と言える。

革新的な分離技術が求められる領域は化学物質、希少元素、生体物質・医薬成分まで多岐にわたる。液体や大気中における汚染物質の除去や分解、温室効果ガスや水素の選択分離、低品位化傾向にある希少鉱物資源や工業製品からの有用元素の抽出分離、特に資源制約のあるわが国では、工業製品から有用元素をリサイクルする技術で競争力を保持することが極めて重要な意味合いを持つ。石油化学産業ではエネルギー消費のおよそ 40%を蒸留操作占めると言われており、分離や精製に多くのエネルギーとコストがかけられている状況である。エネルギーコストが普及に見合うレベルでの新しい分離技術を実現するマテリアルが創出されれば、多くの産業分野に革新がもたらされる可能性がある。革新的な分離技術を生み出すマテリアルとしては、例えば廃水や海水に含まれる不純物・有害物質・ウィルス等を選択的に除去できる革新的な水処理膜や、今後エネルギー資源の主力となるガス燃料において、酸素、二酸化炭素、メタン、水素などの気体を選択的に分離可能とする多孔性配位高分子 (PCP) やゼオライトなどの多孔性材料が挙げられる。分離技術の革新は産業的な課題と SDGs の達成の双方に貢献しうるものであることから、分離の鍵を握るマテリアルの

研究開発は、引き続き進めていくべき重要な研究領域である。

・構造材料

人類が社会生活を営む上で構造材料は必要不可欠であることは言うまでもない。SDGsにも住み続けられるまちづくりが掲げられており、特に、震災や台風などの自然災害が頻発する我が国においては、さらなる国土強靱化が安全保障上の重要課題の1つである。老朽化した橋梁などの建築物の補強・再建は各自治体の重要課題であり、特に首都圏においては、1964年の東京五輪の際に建設された社会インフラの老朽化が著しい。これらの課題に応える高性能材料（高強度、高靱延性、高信頼性、高防食性等）の開発が急務である。

また、エネルギーの高効率化は地球規模の課題としてますます重要になっており、自動車、航空機などの輸送機材料の軽量化に資する高強度材料、発電プラントやジェットエンジンなどに使用される高温材料の高性能化（高温、長寿命、高信頼性）が求められる。さらには、従来の金属系材料に加えて、セラミックス、CFRPなどの多様な材料開発とそれらの接着・接合技術の高度化により、構造物のマルチマテリアル化ニーズに応える必要がある。今後、これらの技術開発を進める上ではナノスケールで材料の表面や界面を制御し、ナノの特性をマクロにつなげていくことや情報科学の活用が重要である。

我が国の経済においては、長きにわたって鉄鋼などの金属素材とそれらを用いた一般機械や輸送機などの輸出額が全体の約40%を占めてきた。アジア諸国の追い上げが厳しい昨今、今後も当該技術が我が国経済を支えるためには、高付加価値化による国際競争力の維持・強化に取り組む必要がある。

・ロボットを革新するマテリアル

分野融合、技術統合、システム化が結実した成果の一つが各種モビリティやロボットである。特に、1980年代に産業用ロボットとして実用化され日本がトップの座にあるロボットは、今後は製造分野だけでなく様々な分野へ適用されることで、市場規模は1.6兆円(2015年)から9.7兆円(2035年)へと大幅な伸びが予測されている。このため、ロボットはSociety5.0時代に製造、農林水産業、福祉、社会インフラ、サービスなど様々な分野で作業の効率化や生活の質の向上をもたらす重要な技術として期待されている。

このようなロボット技術開発の中で、日本が強みを有するマテリアルは競争力を左右する重要なキーテクノロジーである。例えば、少子高齢化・労働力人口減少が進むこれからの社会において、高齢者介護、障がい者の自立支援、災害救助等人間が苦手な作業の代行や人間の能力強化等のサービス分野のロボットは、人間との共生が前提となるため、人に危害を加えない安全性や環境変

化にも対応できる機能が求められる。これには、自律・協調動作を可能とする人工知能技術に加え、ナノレベルから巨大構造物までのサイズに応じた軽量で柔軟かつ環境の変化に対応した動作が可能なアクチュエータや、柔らかく強度の高い人工皮膚・筐体、軽く強靱な構造材料、多様な臭い物質の検知や皮膚表面での圧力検知が可能なインテリジェントセンサ、長時間動作を可能とする電池、遠隔から電力を供給する技術、電力高効率利用や動作信頼性向上のための潤滑材料、人間と円滑にコミュニケーションするためのデバイス等の新たなマテリアルの開発が重要である。今後のモビリティやロボットの研究開発の推進には、マテリアル技術開発とメカニクス、ICT 分野や医療・介護等の分野との横断、統合、システム化を行うことが必須であり、ナノテクノロジー・材料分野が多分野の結節点となり先導して進めることで競争力が増し、横断的な推進が加速すると考えられる。

・オペランド・極限超計測技術

革新的なマテリアルの創出には、計測技術が必要不可欠である。計測は mother of science とされ、研究開発を支える基盤であるとともに新たな成果を創出する牽引役でもある。分析機器への研究投資は研究開発・製造業市場に波及し、非常に高い投資対効果が期待できる。特にナノテクノロジー・材料分野の研究開発に関する計測・分析機器は最先端の技術を要するため、材料開発との両輪で推進していく必要がある。今後求められる分析機器技術は、2017 年ノーベル化学賞のクライオ電子顕微鏡のような革新的デバイス（線源や検出器等）や、トポロジカル量子やフォノンといった現在十分にその状態を捉え切れていない現象の測定で新たな科学領域の開拓に資する計測、生体物質・細胞内外の物質の反応・変化過程の計測、各研究室レベルでの高度な（実環境における）その場観察（オペランド計測）、材料の劣化や耐久性・反応性等の時間変化を考慮した 4D（高時間分解能）計測等である。加えて、センシング技術や測定データ処理技術は、技術的に複合していくと考えられる。究極的には、いつでも・どこでも・その場で使える測定デバイスによる、超高度・超高性能な複合センシング・計測技術・システムへ向かう道筋をつけることが重要である。

（2）創出された革新的マテリアルを世に送り出すサイエンス基盤の構築

革新的なマテリアル創出は、社会に新たな価値を与え、未来社会の実現に向けて新たなブレークスルーを起こす可能性を秘めていることから非常に重要である。一方で、魅力的な機能を有するマテリアルが必ずしも社会実装されるとは限らず、研究室内で生み出されては、死蔵してしまうケースも多々ある。社会実装されるマテリアルとなるためには、スケラブルであることや簡便な

創製プロセス、大型化やシステム化といった実際に使われる形においても魅力的な機能が発揮される等の条件を満たす必要がある。このような条件を克服するために、いわゆるエンジニアリングと呼ばれる領域について、技術者が有する様々なノウハウを駆使することにより、多くの壁を突破してきた。しかし、マテリアルの複雑化に伴い、これまでのエンジニアリングだけでは対応しきれない段階に突入している。さらに経済的な制約のみならず、SDGsの達成に向けて、例えば低環境負荷、省エネルギー、資源制約からの解放といった持続可能性を追求することも求められており、より複雑な条件を達成することが課せられつつある。

そこで、革新的なマテリアルを死蔵させることなく社会実装につなげるためには、エンジニアリングをさらに深く追求し、学理・サイエンス基盤の構築とその知見に立脚した新たな設計・開発指針を生み出していく必要がある。このような研究開発領域は、学術的にレベルの高い基礎研究が求められ、アカデミアの果たす役割は大きい。さらに、本領域に対する研究活動により得られたサイエンス基盤を産学官が連携して技術として昇華させることで、これまでの材料創製プロセスやノウハウに対するブレークスルーを引き起こし、革新的なマテリアルを世に送り出していくことが重要である。また、科学的知見に立脚することで、従来のノウハウと呼ばれていた技術等の数値化が可能となり、これをデータ駆動型の研究開発やロボット技術に応用することで、後述するラボ改革の効果を飛躍的に高めることが可能となる。当該領域はこれまで国策としての投資が十分ではなかったが、マテリアル革命を実現するために産学官がより強固に連携していく必要があることから、国として積極的に推進すべきである。一方で、本領域は一般的に論文を書きにくいということが指摘されることから、新たな評価軸を取り入れる等、マネジメントの観点も重要である。

(3) 研究開発の効率化・高速化・高度化を実現するラボ改革

厳しい財政事情や少子化等による研究の担い手の不足が懸念される中で、国際競争力を維持・向上させていくことは大きな課題である。これを達成するためには、研究者の創造力を最大限発揮させる環境の整備や研究開発の効率化を実現していくことが重要である。そこでAI/IoT/ビッグデータ等のサイバー技術やロボット技術の研究現場への取り込み（最適化・自動化）及びそれらのシェアリングによる研究開発探索空間の拡張や共用設備の充実化等を通じて研究開発の高度化・効率化・高速化を実現し、若手の教育も含めた研究者の創造力（Creativity）を最大限発揮させる環境を整える。

- ・スマートラボラトリ (AI/Robot-driven Materials Research)

厳しい国際競争に晒されているナノテクノロジー・材料分野の研究開発においては、研究者の創造力 (Creativity) を最大限発揮するための時間を確保する環境を整備し、研究開発の生産性を飛躍的に高めていく必要がある。さらに、生産年齢人口の減少により研究開発の担い手が不足することへの対応やデータ駆動型材料開発に必要とされる質の高いデータ蓄積への対応が急務である。

これらに対応するためには、AI や IoT、ロボット技術等を活用しつつ、研究室における研究の生産性を大幅に向上させる取組を推進することが重要である。これにより、現在の研究環境で研究者が担う「繰り返しの単純作業」をAI や IoT、ロボット技術等に任せ、研究者は付加価値がより高い仕事に注力することで研究開発の高度化・効率化・高速化を実現することが可能となる。

さらに、AI/Robot 技術の活用により、人間が実行するには極めて困難を伴う物質合成の高速化や合成条件探索範囲の飛躍的拡大や材料作製装置等の共有化・ネットワーク化 (シェアリング)、下記の「データ駆動型材料開発」と「計測技術開発」の組み合わせによる「材料ビッグデータの集積化」を進める等を通じて、研究開発における革新を図り、マテリアル革命を実現していく。

- ・データ駆動型研究開発

データ駆動型の研究開発はマテリアル創出の高速化が期待されており、諸外国においてもその重要性に着目し、国家プロジェクトが進められている。データ駆動型の研究開発には、質の高いデータを利活用しやすい形で大量に蓄積していくことが重要であり、各研究機関が保有するデータが十分に利活用できるようなデータベースを整備すべきである。また、集めたデータを利活用するためのアプリケーションの開発も不可欠であり、欲しい機能から候補物質の探索やプロセス条件の確定といった逆問題を解くアプローチを実現する革新的な材料開発手法の開発を推進することが重要である。なお、継続的な利活用ができるような仕組みづくりを検討していくことが必要である。

- ・データ創生の源となる計測技術開発

今後ますます進展していくデータ駆動型の研究開発には、十分な量の質の高いデータが必要不可欠である。そのため、データ駆動型の研究開発に使われることを前提とした計測機器やソフトウェアの開発が必要不可欠である。具体的には、例えば時間変化を伴う種々のイメージングデータ (多次元データ) を高感度・高分解能・高速で取得し、かつデータ解析用コンピュータとの通信において通信量の爆発を防ぐための処理機能を内包した、インテリジェントな検出

デバイスの開発が望まれる。それに加え、AIによる自動データ解析を前提としたデータフォーマットの標準化や解析ソフトウェアの開発が挙げられる。

- ・ 共用設備の充実化・拠点ネットワーク化

我が国のマテリアル開発の基礎力引上げとイノベーション創出に向けた強固な研究基盤を形成するために、ナノテクノロジー・材料に関する最先端設備の有効活用、今後を見据えた更新・導入、及び相互のネットワーク化を引き続き促進する。運用に当たっては、産業界を含め産官学の幅広い利用者のニーズに応じて、共用拠点ネットワークの強化等を行う。また、施設共用の視点のみにとどまらず、研究施設及び設備を共用する際の多様な支援形態に対応可能な研究者及び技術者の育成、そしてイノベーション創出に寄与する次世代の若手利用者の育成にも貢献する。これらの共用の活動を通じて、我が国のナノテクノロジー・材料研究の研究開発投資効率と成果の最大化に資する。この他、大学共同利用機関法人や共同利用・共同研究拠点、SPring-8 やスパコン「京」等の大型共用研究施設・設備等、他の共用のフレームワークも一層積極的に活用し、ナノテクノロジー・材料分野の研究開発を推進する。

一方で、ラボと共用施設の利用において、得られたデータのフォーマット等の統合・標準化や、ユーザーがデータの取得場所・方法によらずデータを利活用できる環境を整える等の取組が必要である。

(4) マテリアル革命を実現するための推進方策

産学官の協働により、社会実装の壁を打破するための技術基盤を生み出す「場」の構築や AI やロボット技術等を巧みに使いこなす人材や異分野融合により新たなマテリアルを創出する優れた人材の育成等の取組を推進する。戦略的な国際連携の実現に向けた調査・分析も重要である。

- ・ 社会実装を加速するための取組

材料の研究開発は長期間にわたることや、材料が最終製品になることが少ないため、ニーズの把握が困難といった独特の課題が生じている。その結果、アカデミアの研究成果が民間企業における実用化に向けた研究開発につながっていないケースが多々ある。

このような課題に対応するため、これまで以上に産学官の接点を増やし、社会が必要とする「魅力的な機能を有するマテリアル」を察知する機会を創出し、オープンイノベーションを促していくことが必要である。その際には、新しいマテリアルの研究開発段階からの綿密な連携や協調領域と競争領域を明確に区別し、それぞれの特性に応じたマネジメント体制のもとで産学官が協働して

研究開発を進めていくことも効果的である。加えて、アカデミアの成果の事業化や企業が有するマテリアルの新たな用途展開を誘発するためのサポート体制を構築していくことも重要である。

・中長期の人材育成

Society5.0 や SDGs 等の未来社会の実現に向けて、要求されるマテリアルの高度化や研究開発の長期性といった課題への対応、創出されたマテリアルを死蔵させずに社会に送り出す科学技術を推進していくことが重要である。一方で生産年齢人口の減少に伴い研究の担い手不足に陥っており、持続的な研究力の維持・向上が困難となっている。

そのような課題を克服するため、将来を見越して魅力的な研究開発領域を設定し、マテリアル分野の人材の活性化やその周辺領域の人材を呼び込んでいくといった戦略的な人材育成が不可欠である。具体的には、今後研究現場にデータ駆動型の材料開発やロボット技術がますます導入されることが予想されることを踏まえ、これらの科学技術を十分に使いこなすことができる人材や今後はマテリアルを世に送り出すための基盤となるサイエンスに取り組む人材の育成が急務である。また、魅力的な機能を有するマテリアルの創出に向けて、従来の延長にはない切り口での研究開発領域を設定し、異分野融合を促す等の取組を通じて研究者・技術者を育成していくことが重要である。

・国際連携に向けた戦略的取組

ナノテクノロジー・材料科学技術は激しい国際競争に晒されている。2017年12月には米国大統領令として各省庁に希少元素対応方策のレポート作成するよう指示を出す等、国際競争力の強化に向けた検討が急速に進められている。一方で SDGs といった世界共通の目標が設定され、その達成に向けて、国際的な協力も求められている。そのような状況を踏まえ、我が国のプレゼンスを今後も発揮し、世界をリードしていくための取組が必要である。

そのためには、テーマに応じて戦略的な国際連携や、グローバルでのオープンな取組への参画を進めることが重要である。具体的には、日本が学ぶべき仕組みや技術を有する国・地域との積極的な研究開発の連携、国際的な枠組みや国際研究拠点への参画・活用の促進、標準化や規制等に関する戦略的な国際連携、新興国との将来を見据えた技術・人材交流を推進等である。このような取組を効果的に進めていくためには、国際戦略に関する政策的議論をさらに深掘りして進めていくことが必要となることから、国際動向を継続的に調査・分析していく。

・社会とともに歩むナノテクノロジー・材料

ナノテクノロジー・材料研究開発には、常に未知・新規のナノ物質や新デバイスの登場が伴う。これらの社会実装に向けては、社会に与える影響を推定・評価し、分野や世代を超えてコンセンサスを形成していくことが重要である。

そのためには、社会的にオープンな議論の場を構築し、責任ある研究・イノベーション (Responsible Research & Innovation: RRI) の在り方に関する議論や科学技術の知識の蓄積・流通・継承を促す環境を広く社会と共に構築していくことが世界の中の日本として求められる。