

## 1.3 今後の展望・挑戦課題

### 1.3.1 今後重要となる研究の展望・方向性

多くの分野・用途において、装置・システムの機能を根幹で支えているナノテク・材料分野に対しては多くの社会的期待が集まっている。以下では、現状の日本が抱える社会的課題の解決に向けて、ナノテク・材料技術がどのような役割を果たしていくのかについて、区分ごとにまとめて記述する。

#### ■環境・エネルギー分野におけるナノテクノロジー・材料技術の今後の方向性

日本は2020年の菅首相就任演説で2050年までに温室効果ガスの実質排出量ゼロをめざすことを明言し、脱炭素社会構築へ本気で取り組むことを世界に向けて表明した。また、サーキュラーエコノミーに代表される低環境負荷の資源循環型社会への移行も求められるなかで、環境・エネルギー分野のイノベーションを支えるナノテク・材料技術の研究開発の重要性はより高まっていくのは必至である。一方で、これらの環境対策はもはや待ったなしの状態であり、基礎研究、応用研究、社会実装までをいかにスピーディーに進めるか、世界と協調した戦略的な研究開発が求められる。

太陽光や風力などの再生可能エネルギーの大量導入は上述の目標を達成するうえで不可欠であり、世界的にも研究開発が活発になっている。太陽光発電に対しては、実用化されているシリコンや化合物半導体のさらなる高効率化と低価格化とともに、中長期的には有機薄膜太陽電池やペロブスカイト太陽電池などの革新的太陽電池の実用化が期待される。また、時間変動の大きな太陽光や風力の利用においては、電力を一時的に蓄えて平準化する大型の蓄電池・蓄電システム（グリッド電力貯蔵用途）の開発が重要になり、主流になっているリチウムイオン電池だけでなく、大型のシステムに最適な電池の開発も必要であろう。さらに、急速に拡大する電気自動車用途に向けた高エネルギー密度かつ低コストな蓄電デバイスへの期待は大きい。

太陽光の利用としては直接的に電気に変換するだけでなく、特殊な触媒を用いて貯蔵しやすい水素や炭化水素などの化学エネルギーに変換する技術（エネルギーキャリア）の実現も期待される。ただし、社会実装シナリオを明確にしたうえでの製造技術、利活用技術、輸送技術等の要素技術の開発が重要となる。

エネルギーの利用側面では、省エネルギーの技術開発、具体的には固体照明、低消費電力のエレクトロニクスシステム、高効率パワーエレクトロニクス製品、断熱材料、低摩擦材料、軽量・高強度の複合材料、さらには廃熱を電気エネルギーに回生する熱電素子などの開発が必要となってくる。特に、世界のエネルギー消費に占める電気エネルギーの比率は現在25%であり年々増加傾向にあることから、電力の変換・制御に必要なパワー半導体の高効率化に関する期待は大きく、高耐圧化、低オン抵抗特性を可能とするワイドギャップ半導体パワーデバイスの進展が重要になる。

環境を守るという視点では、物質の分離技術も非常に重要となる。広く世界をみると、飲料に用いることのできる水は限られており、海水や廃水からの淡水生成、またシェールガス産出の際に大量に発生する放射性物質や有害物質を含んだ随伴水の浄化といった分離に関する技術開発は喫緊の課題であり、低コストで量産可能な吸着剤や浄化膜の開発は急務となっている。また、鉱物資源の少ない日本においては、回収されたエレクトロニクス機器からレアメタルなどの希少元素を効率的に分離する技術の開発も重要になってくる。以上、ここにあげた環境やエネルギーにかかわる社会的あるいは技術的な課題は、ナノテク・材料分野だけで解決することはできず、異なる学術分野や技術分野との連携や、制度的な改革も必要になってくる。一方で、日本

は環境・エネルギー分野にかかわる材料技術・プロセス技術で国際的な競争力を有しており、新たな材料やデバイスの開発により、優れた特性や性能を実際に示していくなかで、その他の学術分野や産業界、他国を巻き込んでいくことが可能と考えられるが、そのためには、よりスピード感のある研究開発、体制構築が求められる。その意味で、日本にとって環境・エネルギー分野で世界を先導するためにナノテク・材料技術による産業競争力強化が一層重要になっている。

### ■ ライフ・ヘルスケア分野におけるナノテクノロジー・材料技術の今後の方向性

ヒトゲノムの解読、iPS細胞の創出、ゲノム編集技術の登場にみられるように、近年のライフサイエンスの進展は著しく、ナノテク・材料技術との融合によって生まれるイノベーションへの期待は大きい。特に、世界に先駆けて超高齢社会に突入したわが国においては健康寿命の延伸が喫緊の課題であり、新しい健康・医療技術への期待が高まっている。

健康寿命の延伸による個々人のQOL (Quality of Life) 向上と、高齢者人口の増加に伴って急増が見込まれる医療費の適正化のため、本格的な医療が必要になる前に病気の兆候を検知し、早期に予防的な措置を施すことが重要である。日常的な健康モニタリングの観点から、IoT技術を活用したウェアラブルデバイスに期待が集まっているが、現状のデバイスで得られるのは物理センサによって計測される活動量、歩数、脈拍等の情報に限られており、健康・疾病の状態に直結するバイオ・化学情報を計測することが可能なデバイスの開発が望まれる。特に、採取が容易な呼気などの検体を用いて、生体由来物質 (バイオマーカ) に関するデータを連続的に取得可能な技術が求められる。また、身体異常・疾病の早期発見・早期診断のためには、血液や尿などの検体中にごくわずかに含まれるバイオマーカを簡便、迅速、高感度に検出するデバイスが必要である。夾雑物の中からターゲットを特異的に認識するセンサ材料や、ターゲットを分離・濃縮する機構の開発が求められる。さらに、新型コロナウイルス感染症の流行によって顕在化した課題として、環境中に存在するウイルスなどの病原体検出がある。水中や空気中に存在する病原体を高感度かつ簡便に検出可能な技術を開発し、環境中の状況を常時監視するシステムを構築することにより、感染症の流行を防止することが期待される。

創薬や新しい医療技術の開発においては、動物モデルを用いた前臨床試験によって有効性・安全性が確認されなければならない。しかしながら、動物実験ではヒトでの応答を正しく予測できない場合が多いことや、動物実験廃止に向かう欧州を中心とした動きから、ヒト体内における動態を *in vitro* (生体外) で正確に再現可能なモデルが求められている。近年、ES細胞やiPS細胞などの幹細胞技術の進展によって、幹細胞からさまざまな組織・臓器を構築する研究が進み、創薬のための *in vitro* モデルや再生医療への応用に期待が高まっている。また、生体外で実際の生体組織に近い3次元の組織体を構築するバイオファブリケーションの技術と、マイクロ・ナノ加工やマイクロ・ナノ流体デバイスなどの技術の融合により、チップ上にヒト組織・臓器の機能を再現する Organ-on-a-Chip の研究がさかんになっている。これらの技術を組み合わせることによって、複数の組織・臓器間における相互作用や、各組織・臓器の機能をより正確に再現することが可能になり、将来的には動物実験に替わる *in vitro* 評価系を確立し、新しい健康・医療技術の実現に大きく貢献すると期待される。

精密に設計されたナノ粒子やナノ構造体をキャリアに用いて、薬物や診断用プローブを患部等へ選択的に送達するナノ薬物送達システム (ナノDDS) の研究も重要性を増している。近年、遺伝子編集を実現する CRISPR-Cas をはじめ、医療に革新をもたらす可能性を秘めた多様な分子・材料が登場しているが、これらの医療応用には、ナノDDSの開発が欠かせない。また、新型コロナウイルス感染症に対するRNAワクチン

開発においても、抗原タンパク質を体内で発現させるためにRNAを送達する技術として、ナノDDSが重要な役割を担っている。さらに、イメージングプローブと治療薬をナノ粒子に同時に搭載したナノDDSは、診断と治療を一体化・複合化したナノセラノスティクスとして研究開発が進んでいる。量子ビーム、超音波、熱、磁場などの外部刺激に応答して病理組織そのものを改変する次世代型ナノDDSの研究開発も進み、革新的な医療技術の実現が期待される。

上述した新しい健康・医療技術の実現には、生体組織や生体を構成する成分と、それらに接して用いられる材料の間で生じる多様かつ複雑な現象を高度に制御する必要がある。材料側、生体側それぞれの因子による複雑な相互作用を体系的・統合的に理解し、材料に対する生体側の応答を精緻に予測・制御するための技術的・知的基盤の構築が求められる。

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

Society 5.0の実現に向けて第5世代通信（5G）通信、ポスト5Gインフラの導入が進み、人間が感知できないわずかな通信遅延で大量の情報をやり取りできる環境が今後整備されていくことになる。膨大な数のセンサ端末やデバイスがインターネットにつながるIoT（Internet of Things）技術が情報社会の中核となり、分散基地局に組み込まれた人工知能（AI）や、生活空間を共にするロボットで高度な情報処理が行われる。こうした未来社会の基盤となるのがナノエレクトロニクス技術であり、電荷の操作だけでなく、スピン自由度を使ったスピントロニクス、光子（フォトン）を使ったフォトンクスによる超低消費電力の情報処理技術の進展が期待される。さらに、量子情報処理が実用化されれば、古典力学系では不可能な桁違いの高速計算や、秘匿性が極めて高い安全な情報通信も実現可能となる。

IoT時代のスマート社会を実現するうえで、ナノエレクトロニクスの果たす役割は大きく、素子の微細化極限を追求する「ナノの先鋭化」から、新材料導入による電子素子と光・スピン・バイオ・MEMSとの結合で多機能化を図る「ナノの融合化」、さらにはIoT/AI応用に適した新しい計算アーキテクチャの実現を含めた「ナノのシステム化」へと進化していくと予想される。

ロジックデバイスでは今後、Siナノシートをチャンネルに用いた構造が導入され、さらにはナノシートが縦積みされた3次元構造の時代に入ると予測されている。不揮発性メモリの代表格であるNAND型フラッシュメモリでは、すでに主力製品が3次元積層型にほぼ移行している。今後もナノエレクトロニクス技術はデバイスの3次元化の方向で進化を続けていくと考えられる。また、スピンMRAMなど電荷保持型以外の不揮発性メモリ技術の実用化が本格化し、ロジック埋め込み不揮発性メモリやインメモリコンピューティングなど、メモリを中心とする新しいアーキテクチャのシステムが発展していくとみられる。

システムレベルでは、脳神経回路などの動作にヒントを得た新しいアーキテクチャで、ビッグデータ処理の超高速・低消費電力化をめざす研究がますます活発化していくと予想される。組み合わせ回路にもとづく従来法とは全く異なる、新しい計算パラダイムを実現するさまざまなデバイスとアーキテクチャが現在検討されており、なかでも量子コンピューティングには、古典力学系では実現できない情報処理能力を実現するものとして多額の研究開発資金が投じられている。今後、量子ビットの精度向上とシステムとしてのスケールビリティを実現するブレークスルーが起これば、ICT・エレクトロニクス分野は、これまでとは一線を画す全く新しい進化軸が生まれてくると期待される。

### ■ 社会インフラ分野におけるナノテクノロジー・材料技術の今後の方向性

社会インフラの老朽化は昨今の大きな社会的課題の1つである。日本においては、高度経済成長期を中心



に作られた橋梁、トンネル、道路等のインフラの多くが老朽化している。欧米諸国でも同様の問題を抱えており、大型橋梁の崩落事故が国際的に報道されている。これら老朽化したインフラの効率的な点検・検査、および計画的な補修や更新によるインフラの長寿命化が不可欠になっている。このような社会課題に対しても、ナノテク・材料技術の視点で研究開発を行うことが重要になっている。

ここ数年来の動向として、理論計算や数値計算モデルを活用し材料工学と情報工学を融合させたマテリアルズインテグレーション (Materials Integration: MI) と呼ばれる新しい特性予測・組織設計の技術開発が進められている。国際的にホットな技術としてはハイエントロピー合金 (ハイエントロピーアロイ) や 積層造形 (Additive Manufacturing) があげられる。ハイエントロピー合金は、複数の元素で構成される固溶体を基本とする多元系合金で、原子半径比や化学ポテンシャルの差を巧みに活用して組織制御を行うもので、強度-靱性・延性バランスの高い材料などが開発され、その機構解明もさかんに行われている。基礎的な機構である固溶体強化の研究に加え、疲労などのマクロ特性を対象とする研究に展開している。積層造形は、ボトムアップ型の組織制御プロセスで、これまで主に外形制御が目的であったが、その精度が向上するに伴い金属材料が得意とする組織制御にターゲットが移行しつつある。

複合材料については、近年輸送機器への適用により炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) が注目を集めている。代表例は航空機で、例えばボーイング787の機体構造重量の約半分がCFRPである。また、持続性という観点から再生可能かつ生物由来の有機性資源であるバイオマス素材が注目されている。その1つとしてセルロースナノファイバー (Cellulose Nano Fiber: CNF) を強化繊維として用いる複合材料開発に向けた動きも活発化している。CNFは、木材などの植物中から得られるパルプをナノレベルまで解きほぐしたものであり、鉄の5倍の強度で1/5の軽さ、熱膨張率は石英ガラス並という特性を持っているため、樹脂などと複合化することで軽量高強度複合材料や軽量で熱寸法安定性の高いプリント基板への利用が期待されている。ただし、親水性が極めて高く、疎水性の石油由来の樹脂と複合化するためには表面を化学処理する必要があるため、製造コストが高いという課題が残っている。

## ■ ナノテクノロジー・材料における設計・制御技術の今後の方向性

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

近年の情報技術の進展によりナノテク・材料技術に関する研究開発の方法が大きく変わりつつある。その背景には、デバイスの性能・信頼性追及のなかで、それを支える材料には、より一層の性能向上だけでなく、複数の機能の同時実現、時には相反する関係にある機能の同時実現すら求められ、複合化・多元素化の方向に材料開発は進んでいく。さらに地球環境の持続性との視点では、これら材料に要求される機能を自然界

に豊富に存在する元素の組み合わせで実現することが求められている。対象となる物質の組み合わせは膨大であり、従来の実験的あるいは理論的手法による材料探索、設計は困難になりつつある。一方で、ここ数年の間にコンピュータの飛躍的な能力と情報技術の進展により、大規模な材料データのなかから、材料の性能、機能に関する系統的な法則を発見し、材料の探索・設計を短時間で効率的に行うアプローチが世界中で精力的に行われるようになってきている。マテリアルズ・インフォマティクスと呼ばれるこのような取り組みは、日本の産業競争力の源泉である材料開発力の維持・強化のために必須であるとの考えから、2015年に物質・材料研究機構（NIMS）内に情報統合型物質・材料研究拠点が発立されたことをきっかけに経産省やJSTにおいて関連する多数のプロジェクトで取り組まれている。また、近年は、材料の予測・設計に加えて、材料の合成プロセスの探索・最適化にデータ科学を活用するプロセス・インフォマティクスにも関心が集まっている。特に、複合化・多元素化による新材料は、既知のプロセスでは合成が難しいケースも多く、新たな合成プロセス開発技術として期待されている。これらの取り組みにより新材料の探索・設計や合成プロセス開発も含めた開発期間の短縮を実現することで、材料研究分野における日本の国際競争力の強化に大きく貢献することができると思われる。

### 1.3.2 日本の研究開発の現状と課題

上述した内容および2章の各研究開発領域からみえてくるわが国の研究開発力の現状としては、長年の技術蓄積から生まれる伝統的な強みとして、エネルギー材料、電子材料、複合材料などの物質創製・材料設計技術があげられる。また、それらを支える計測・分析・評価・加工技術に関してもわが国が強みを有する技術が多く存在する。さらに、IoT時代においては膨大なデータを効率的・効果的に処理することが求められるが、そのために必要なセンサ/アナログ機能やコンピューティング機能のヘテロ集積モジュール化技術に対して、特に基礎的な部分で、わが国は高いポテンシャルを有する。一方、技術の産業化や、研究結果の収益化の面では、諸外国、特に中韓などのアジア勢に対し劣勢となるケースも多いとの課題に加えて、データ科学、標準化・規制戦略、医工連携、産学連携、ナノ物質・新物質のELSI/EHS/RRI、ナノテク・材料分野の将来を担う人材の継続的な育成などのソフト面の整備といった課題もある。

以下では、第2章における全31研究開発領域の国際比較まとめ（図1.3.2-1）にもとづいて、各区分単位で日本の研究開発力の現状、諸外国に対する位置づけについて記述する。

#### ■環境・エネルギー分野にかかわるナノテクノロジー・材料

この分野の研究開発領域（太陽電池、蓄電デバイス、パワー半導体、エネルギーキャリア、分離技術）は、再生可能エネルギー利用、効率的なエネルギー蓄積・変換、CO<sub>2</sub>排出量削減および資源循環などと密接にかかわり、世界的にも関心が高く、活発に研究開発が実施されている。特に太陽電池や蓄電デバイス、分離技術は世界的に研究が強化される傾向にある。国別にみると、日本は全般的に基礎研究フェーズに強みを有し、特に太陽電池、蓄電デバイス、パワー半導体、エネルギーキャリアに関しては国家プロジェクトも充実し、上昇傾向にある。一方、太陽電池、蓄電デバイスなどで素材シェアが下降している部門もある。また、パワー半導体の例で特徴的にみられるように、システム全体よりもキーとなるデバイスの性能向上に力を注ぐ傾向があるため、製品普及フェーズでの競争力で後れを取るケースがある。米国は蓄電デバイス、パワー半導体に強みがあり、基礎研究フェーズから応用研究・開発フェーズまで上昇傾向にある。政府系プログラムが多くの研究開発を支援している。欧州は太陽電池、パワー半導体、分子技術に強みがある。蓄電デバイスに関しても、

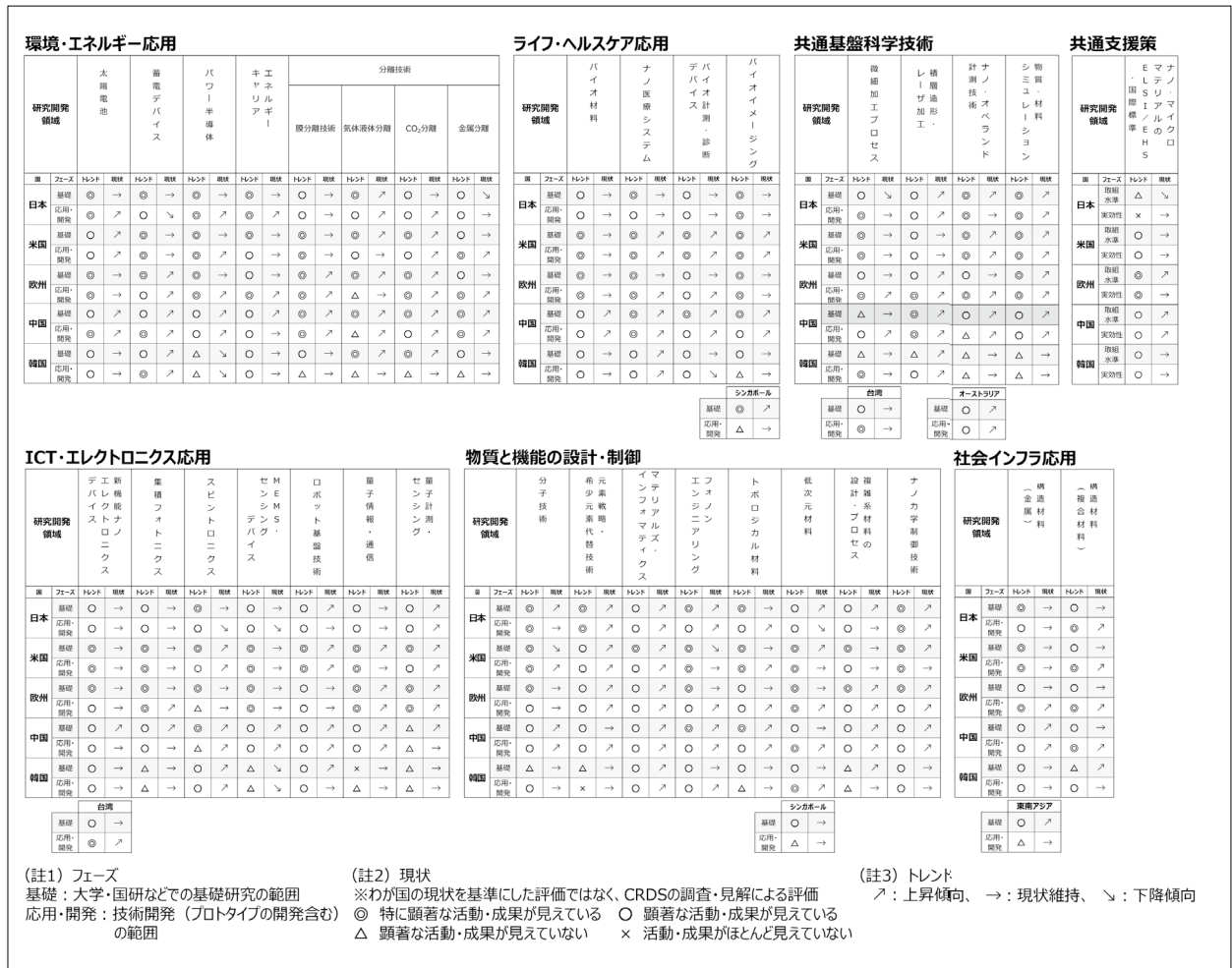


図 1.3.2-1 国際比較表まとめ (第2章、31 領域)

自動車の電動化を背景に、基礎研究から応用研究・開発まで強化が進められている。中国は全体的に上昇傾向にあり、豊富な人材や資金力をもとに論文の数や質が急成長している。特にシリコン系太陽電池では産業としての急速な発展とともに基礎研究としても最高効率の実証など、世界をリードする成果が生まれている。韓国は太陽電池、蓄電池が基礎研究フェーズから応用研究・開発フェーズにかけて上昇傾向にあるが、その他の領域では応用研究・開発フェーズでの活動が停滞気味である。

■ ライフ・ヘルスケア分野にかかわるナノテクノロジー・材料

バイオ材料、ナノ DDS 等のナノ医療システム、バイオ計測・診断デバイス、バイオイメージングなど、いずれの領域においても日本はレベルの高い基礎研究を行っているものの、基礎研究の強みが産業化フェーズの競争力につながっていない。医工連携・異分野融合が不十分であることや、安全性評価・承認取得の難しさ、リスクを嫌う大企業の参入不足、ベンチャー企業を支える環境の不足などが、これらの領域共通の要因としてあげられる。ナノテク・材料分野の基礎研究と、ライフ・ヘルスケアにかかわる応用研究・開発をつなぐための支援体制構築も課題である。

米国は基礎研究から産業化のフェーズにいたるまで強い競争力を維持している。応用研究・開発フェーズ



において、ベンチャー企業を中心に多様なプレイヤーが存在し層が厚い。NIH、FDAによる支援体制も整備されており、基礎研究からライフ・ヘルスケア分野の産業化へのスピードが速い。

欧州は基礎研究で高いレベルを維持するとともに、応用研究・開発フェーズで異分野連携、産学連携を積極的に進めており、産業化フェーズでは米国に次ぐ競争力を維持している。

中国は、かつては欧米、日本のキャッチアップ研究が目立ったが、現在は世界トップレベルの研究が多くみられる。主要雑誌において論文数、被引用回数ともに米国を抜いて世界1位になっている。莫大な研究開発投資の下、自国内に大きな市場を持つことや、臨床研究の障壁が低いことを背景に産業化も加速している。

韓国は海外との連携に積極的に取り組んでおり、ナノDDS・ナノ医療で競争力を増している。

バイオイメージングに関しては、シンガポールに存在感がある。世界中から優秀な研究者を集め、世界最高レベルの基礎研究を推進している。

### ■ ICT・エレクトロニクス分野にかかわるナノテクノロジー・材料

この分野の日本の技術トレンドは、新機能ナノエレクトロニクスデバイス、集積フォトニクス、スピントロニクス、MEMS・センシングデバイス、ロボット基盤技術、量子情報・通信で現状維持が多く、量子計測・センシングのみが基礎研究と応用研究ともに上昇トレンドにある。

新機能ナノエレクトロニクスデバイスに関しては、ロジック関連技術では急峻スロープ特性をめざしたデバイス開発、新チャネル材料トランジスタの開発で学術的に深みのある研究が行われており、不揮発性メモリ関連でもフラッシュメモリ、スピンMRAMを中心に継続的な学会発表が行われるなど、基礎研究では世界で一定の存在感を示している。応用研究では、キオクシアがNAND型フラッシュメモリの3次元積層化を推進しており、また韓国SK-Hynixと共同でスピンMRAMの開発を進めるなど、不揮発メモリ技術で最先端を牽引している。日本の産業界には厚い技術・人材蓄積があるが、近年、その蓄積が急速に散逸し失われつつあるため、この傾向を食い止め、人材や設備等を有効活用する仕組みが必要である。

集積フォトニクスに関しては、ハイブリッド集積技術や、光パスゲートコンピューティングなどの光情報処理技術の研究が進んでおり、また産総研でシリコンフォトニクス・コンソーシアムのシャトルサービスが始まるなど応用研究のインフラ整備が進められている。

スピントロニクスに関しては、トポロジカルスピントロニクスなど新概念にもとづく研究開発が成果をあげるなど、基礎研究では強みを発揮し続けている。一方、実用化に向けた本格的な研究開発は減少しており、企業のより一層の寄与が期待される。

MEMS・センシングデバイス関連では、主要国際会議における大学からの論文数は多いが、産業技術から離れつつあり、企業からの基礎的な研究報告が減少している。日本のセンシングデバイス・モジュールメーカーの実力は高く車載センサなどで強みがあるが、製品化に向けた研究開発が低調になっている。

ロボット基盤技術に関しては、ソフトロボット関連の論文数が指数関数的に増大しており、新学術領域研究「ソフトロボット学の創成」の発足、複数の大学発ベンチャーの登場など、盛り上がりを見せている。ただし、手術支援ロボットについては、海外で実用化フェーズに入っているのに対してわが国の動きはやや弱い。

量子情報・通信に関しては、量子技術イノベーション戦略が策定され、基礎研究から実用化へとつなぐ戦略と体制が構築された。以前の停滞期に比べて上昇傾向にあるが、海外の加速度に比べると規模は大きくない。量子計測・センシングに関しては、Q-LEAP量子計測・センシング領域をはじめ複数のプロジェクトによって研究開発が進んでおり、特に日本初の光格子時計技術で世界をリードしている。一方、研究開発投資の増え方は海外と比べて十分とはいえない。

## ■社会インフラ分野にかかわるナノテクノロジー・材料

金属材料、複合材料ともに日本の研究レベルは高く、特に複合材料の主役である炭素繊維の生産については、日本は世界市場で圧倒的な強さを維持している。また、主に自動車向けにNEDO「革新的新構造材料等研究開発」(2014～2022年度)、航空機向けに内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的構造材料」(2014～2018年度)において成形技術等の研究開発がなされている。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)においては、上記SIP「革新的構造材料」で開発してきたマテリアルズインテグレーションの素地を活かし、欲しい性能から材料・プロセスをデザインする「逆問題」に対応した次世代型MIシステムを世界に先駆けて開発している。今後も高い競争力を維持・向上させるためには、構造材料のさらなる性能向上は不可欠であり、今後の国力維持のための大きな柱の1つとして一層注力すべき領域である。

米国では、Materials Genome Initiativeとして実部材の製造をめざした展開が開始され、新材料の設計で進展がみられる。また、航空機用エンジン部品に使用されるセラミックス基複合材料(CMC)の広範な技術分野での研究開発を行っている。

欧州は自動車の電動(EV)化のトレンドが世界でもっとも進んでいる地域の1つで、これに関連する産学官連携が活発に行われている。特に研究が進展しているドイツでは、すでにCF/SiC CMCを軽量耐摩耗材料として自動車やオートバイのブレーキローターに使用している。また、自動車メーカーが主な実施者となって、自動車のマルチマテリアル化研究開発を国家プロジェクトとして進めており、マルチマテリアルによる軽量化で世界をリードしている。英国も航空機向けに特化して、産学官コンソーシアムを形成している。

一方、アジアでは中国、韓国が近年、世界の炭素繊維市場に進出しつつある。中国においては、複合材料や極限環境材料・計測技術はキャッチアップの段階を通過し、今後、航空宇宙を含め、基礎研究フェーズ、応用研究・開発フェーズとも強化される可能性を秘めている。また、日本の自動車メーカーが電磁鋼板の一部を中国の鉄鋼メーカーから調達するなど、応用研究・開発の向上が著しい。韓国は2006年に政府主導で本格的な炭素繊維開発に入り、2013年に商用化にいたっている。一方で大きな国家プロジェクトはなく、力点を置いたMg板材の開発では経済的に大きな成果をあげられず、方針転換を迫られている。

## ■ナノテクノロジー・材料における設計・制御技術

ナノテク・材料分野の核をなす分子技術、マテリアルズ・インフォマティクス、フォノンエンジニアリング、トポロジカル材料、低次元材料、複雑系材料の設計・プロセス、ナノ力学制御技術が含まれる研究領域である。

日本は新学術領域研究や戦略的創造研究推進事業などのファンディング制度を活用して、基礎研究フェーズで活発な研究が行われている。また、応用研究・開発フェーズにおいても上昇傾向のトレンドを示す研究開発領域が多いが、現状では欧米と比較するとやや劣勢にあるといえる。マテリアルズ・インフォマティクスにおいては、米国の取り組みがリードしているが、日本もNIMSを研究開発拠点とするMI<sup>21</sup>を中心に精力的に研究が進められてきた。また、フォノンエンジニアリング、トポロジカル材料、低次元材料に関しては、米国と欧州の研究開発が活発であり、一部の分野では中国に顕著な活動・成果がみえている。日本では基礎研究を中心に応用研究へ向けた重点化が図られ始めている。

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

欧州においては、Horizon 2020による支援を中心に英国、ドイツ、フランス、オランダなどで活発に研究



開発が展開され、基礎研究フェーズでは強みを有する研究開発領域が多い。応用研究・開発フェーズにおいても、ほとんどの研究開発領域で他国と比べ優位性を保っている。

中国においては、膨大な科学研究予算を投資し、欧米での留学経験のある若手研究者の登用や欧米の有力大学から有能な研究者を招聘すること等により、基礎研究フェーズおよび応用研究・開発フェーズともほぼ全ての研究開発領域で上昇トレンドにある。マテリアルズ・インフォマティクスにおいても中国版 Materials Genome Initiative (MGI) の下、国家重点研究開発計画に指定されるなど、基礎研究フェーズで活発な動きがみられ、また関連特許の出願数も増加傾向にあり、今後の動向に注視が必要である。

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

### ■ナノテクノロジー・材料の共通基盤科学技術

ナノテク・材料分野の基礎および応用を支える「共通基盤科学技術」区分には、「加工・プロセス」(微細加工プロセス、積層造形・レーザ加工)、「計測・分析」(ナノ・オペランド計測)、および「理論・計算科学」(物質・材料シミュレーション)が含まれる。

「加工・プロセス」のなかでも微細加工プロセスは、ナノメートルレベルの加工といった側面でナノテク・材料分野を支える重要な技術領域である。最初に発展した半導体デバイス分野にとどまらず、ナノメカニクス、スピントロニクス、バイオナノテクノロジーなどへの波及が進んでいる。日本はレジスト材料技術や欠陥評価技術などで産業的に優位性を維持している。一方で、10 nmノード以降の微細加工プロセスを有している半導体メーカーが米国、台湾、韓国などの海外企業に限られてきているなかで、どのようにして微細加工プロセス技術の開発を進めていくのか、難しい状況にある。海外のコンソーシアムとの差別化や連携も含め、研究開発の戦略を多面的視点から検討していく必要がある。原子層堆積 (ALD) では、国内企業が高誘電率 (High-k) ゲート絶縁膜などを含む金属材料の熱ALD技術で世界的なシェアを有する。原子層エッチング (ALE) でも、国内企業が異方性ALE (絶縁膜) の量産適用を世界に先駆けて実現するなど、当該分野をリードしている。

積層造形・レーザ加工では、樹脂や金属などを3次的に積層して構造体を作製する積層造形 (または Additive Manufacturing (付加製造)、3D プリンティング) と、高出力のレーザを用いた金属、セラミックス、ガラス、樹脂などの複雑な切断、穴開けなどの加工を高い精度で実施する技術を調査対象として取り上げている。いずれもデジタル・マニファクチャリング技術であることから、IoTやAIとの整合性が極めて良く、次世代のものづくりにおける重要な加工技術の1つとなっている。米国、欧州、中国などでは、積層造形の研究開発が実用化段階を迎えている。日本では、TRAFAMやNEDO、SIPプロジェクトなどにより、溶融凝固現象の解析やシミュレーション技術の開発など、学理にもとづいた積層造形・レーザ加工条件に関する基礎研究が実施され、成果が現れ始めている。さらにサイバーフィジカルシステム (CPS) を取り入れたレーザ加工技術開発 (SIP、Q-LEAP プロジェクト)、マテリアルズインテグレーション (MI) の3次元積層造形への展開 (SIPプロジェクト) など、新しい技術開発への挑戦が進んでいる。

「計測・分析」では、材料やデバイスに対する実使用下での時間分解計測により測定対象のナノスケール構造と機能との相関を見出すことを目的としたナノ・オペランド計測を調査対象として取り上げる。主な計測技術としては、走査プローブ顕微鏡 (SPM)、透過型電子顕微鏡 (TEM)、放射光X線、中性子線、レーザなどが利用されている。応用分野の大きなトレンドとしては、二次電池 (特にLiイオン電池) があげられるが、

それ以外にも、触媒分野、エネルギー変換デバイス（太陽電池、燃料電池など）、生命科学分野（生きた細胞、生体関連分子など）にまで測定対象が広がってきている。欧米はTEM、X線、中性子線の新たな利用技術やオペランド測定用の専用特殊ホルダーの開発などで先行している。日本も、SPMによるオペランド計測分野でリードし、また走査型TEMでの微分位相コントラスト（DPC）法の開発、放射光X線での高分解能タイコグラフィーXAFS、パルス中性子を用いたストロボスコピック計測法の開発など顕著な成果が出ている。蓄電池関連の国家プロジェクトには、電子顕微鏡や放射光、中性子など高度計測を担う研究チームが組織されており、その連携も活発になっている。

「理論・計算科学」の物質・材料シミュレーションは、物質・材料科学の基礎を支える重要な科学技術で、量子力学や統計力学の諸知見を活かし、物質の構造、物性、材料組織、化学反応機構などを高精度に解析・予測する技術の確立をめざす研究領域である。欧米各国と並んで分野を牽引する日本は、個々の研究者のレベルが高く、研究の独自性やプログラムに実装した手法の多様性でも引けを取らない。ナノテク・材料分野におけるグローバルな研究開発競争が激化するなか、日本では大型プロジェクトが物質・材料シミュレーションの応用研究を牽引しており、計算、実験、計測、データ科学の合同プロジェクトによる出口を見据えた応用研究の取り組みが強化されている。世界的な開発競争が始まった量子コンピュータを利活用する量子化学計算でも、日本は先頭集団に位置している。

### 1.3.3 国として推進すべき重点テーマ

ここまで述べてきたことを踏まえ、今後国が推進していくべきナノテクノロジー・材料分野の研究開発テーマ（グランドチャレンジ）を、図1.1.3-1に示した俯瞰図の中の上部にある6つの社会ニーズごとに分類して述べる。1つのテーマが複数のニーズに応える場合には、もっとも関連の深い項のところで述べることにする。

図1.1.3-1は、6つの社会ニーズ（ピンク）と13のグランドチャレンジの関係を示したものである。見てわかるように、社会ニーズとグランドチャレンジはほとんどの場合、多対多の対応関係にある。社会ニーズはあるべき3つの社会像、「安全・安心で豊かなデジタル社会」、「健康で幸せな生活が可能な社会」、「低環境負荷で持続可能な社会」に各々2つの社会ニーズがカテゴライズされる。また、それらに加え、すべてに共通した基礎である「共通基盤技術」も1つのカテゴリーととらえることができる。以下、これらのカテゴリーごとに、それとつながりの深いグランドチャレンジを説明する。

#### 【社会像Ⅰ．安全・安心で豊かなデジタル社会】

##### ニーズ① コンピュータ革新を支えるIoT/AI/量子デバイス

デジタル社会においては、車や家などの生活空間、オフィス・工場や街中などの社会空間のあらゆる場所にさまざまなセンサがあまねく設置され、人々の暮らしを豊かにするために使われる多種大量のデータが集められてくる。それらのセンサ群に加え、ムーア則の終焉がみえてきた昨今では、集められた膨大な情報を少ないエネルギーで処理するために、コンピューティングの革新が必要になる。それを可能にするデバイスとしてIoT/AI/量子デバイスへの期待が高い。具体的には、情報収集のために小型高感度の光・物理/化学・バイオセンサや超高感度の量子センサ、安全で高速の情報伝達のために量子通信や超高速のモバイル/光通信デバイス、またその場での高速の情報処理のために超低消費電力デバイスによるエッジコンピューティング、飛躍的な情報処理能力の向上のために量子コンピューティングなどの研究開発が活発化している。



図 1.3.3-1 6つの社会ニーズと13のグランドチャレンジ

ニーズ② 安全低環境負荷の輸送と低消費電力・大容量の通信

人や物などの物理的実体を安全に送ること（リアル）、大容量の情報を遠隔地に送ること（サイバー）がインフラとしての輸送・通信の役割である。リアル・サイバーいずれの世界でも送達には、大量のエネルギーが必要となっており、低環境負荷の輸送・通信機器に対するニーズが高まっている。これらを実現するうえで、デジタル技術が重要になってくるが、それに伴い必要な材料・デバイスへの要求も拡大しており、安全で低環境負荷の輸送には、高強度軽量複合材料、排ガス浄化触媒材料、超小型パワーデバイス、蓄電池/燃料電池、高出力耐高温モータ、高感度ミリ波・近赤外レーダ、超高速・低消費電力のCPUが、低消費電力・大容量通信には、ミリ波・テラヘルツ波・光通信用デバイス、Si フォトニクス、ミリ波・テラヘルツ波領域での誘電率透磁率制御材料、アンテナ技術、メタマテリアル、などが要求される。

・取り組むべきグランドチャレンジ

(1) 量子状態の高度制御

電子、光子、スピン、フォノンなどの量子状態を自在に制御し、それらの相互作用がもたらす物理現象を使って、センシング、通信、コンピューティングなどに応用する。さらに電子の波動関数における位相のトポロジーといった新しい概念を導入することで、新しい量子状態を実現し、これまでにない量子物性の高度制



御を可能にする。これによってシリコンテクノロジーだけでは実現できない量子による新たな機能を創出・付加し、量子コンピュータやスピントロニクスなどへの応用展開を加速させる。

## (2) ポスト5Gデバイス・材料基盤

現在の移動体通信では不可能な大容量通信を提供する6G通信網は、あらゆる場所に多くのIoTデバイスが配置される時代に求められる低消費電力で高速かつ高信頼な通信を与えてくれる待望の技術であるが、それ以前の世代で使われていた周波数よりも高いミリ波やテラヘルツ波の周波数帯を使う必要があるなど、使われる材料・デバイスなどに対してこれまでよりもはるかに厳しい性能が要求される。ここで使われるデバイスには、デバイスの構造・設計のみならず、誘電率・透磁率といった材料物性のレベルからの革新が求められる。

## (3) IoTデバイス集積

様々な種類のセンサとデータ処理・通信を行う半導体チップ、エネルギーハーベスタなどの電源を組み合わせたモジュールにより、老朽化する社会インフラの異常検知、車の自動運転、人の健康状態の変化の察知などを行うことを可能にする。これを実現するためには、低消費電力・高処理能力のプロセッサ、通信用チップや、様々な物理・化学・生化学センサ、設置場所に適した発電を行うための様々なエネルギーハーベスタなどのデバイスと、それらを組み合わせて最適なモジュールにするための設計基盤が必要である。また、センサモジュールのハードウェアだけでなく、様々なセンサから得られる多様な情報を組み合わせ、単独のセンサでは得られない高付加価値の情報を導出するマルチモーダルセンサネットワークが機能するためのアーキテクチャの開発なども必要となる。

## (4) ナノ力学制御によるスマート材料

航空機や自動車等におけるエネルギーロスの原因である摩擦や振動を大幅低減した機械装置や、社会インフラ材料の超長寿命化や修復などを可能にする先進材料といった持続可能社会に貢献する材料・デバイスを創製するために、ナノスケールにおける力学現象の理解から、マクロな力学特性を理解・解明し、「接着・接合・剥離」「摩擦・摩耗」「自己修復」といった力学特性を自在に設計・制御する技術開発が必要である。

## 【社会像 II . 健康で幸せな生活が可能な社会】

### ニーズ③ 健康・医療・生産システムを支えるバイオ技術

超高齢社会に突入したわが国では、健康寿命の延伸が喫緊の課題であり、疾患の超早期診断や、健康状態・生体情報のモニタリングを実現するウェアラブル（またはインプラントラブル）デバイス、身体の機能低下を補ったり損傷部位を補修したりする材料やデバイスなどが求められている。また、細胞や微生物を活用したバイオ技術による食料生産（培養人工肉、他）なども、途上国の人口増大とそれに伴う食糧問題を解決するために必要とされている。これを実現するうえで必要な材料・デバイスとして、具体的には、高い選択性を持って分子認識が可能な材料・デバイス、脳機能センシングとAI解析、細胞・組織制御材料、遠隔医療・診断を可能にするセンサネットワーク、手術用ロボット、高精細ディスプレイなどの開発が必要である。

### ニーズ④ 人と共生するロボット

少子高齢化が進む今後の日本社会において、負担の少ない高齢者介護、持続可能な社会インフラ保守管理、災害やテロに対するセキュリティ強化などの課題の解決のため、人間が苦手な作業の代行や人間の作業能力

を補強・拡張するなど、人と共生するロボットの活用が望まれている。それを実現するために必要な材料・デバイスとして、具体的には、自律的行動を可能にするセンシング機能（3D画像センサ、軽量ジャイロ、匂い/炎/騒音センサ、五感センサ）および認識・判断・予知機能（高性能CPU、5G通信、AI）、動力源を構成する小型大変位高出力アクチュエータ、レオロジカル材料による人工筋肉、柔軟で軽量のソフト材料による筐体などの開発が必要である。

#### • 取り組むべきグランドチャレンジ

##### (5) ヘルスケアIoT

IoTを活用したヘルスケアを実現するうえで、真に必要なデータを取得するための技術を開発する。現状のウェアラブル機器によるヘルスケアサービスで活用されているのは物理センサによって得られる活動量、歩数、脈拍等の情報に限られ、健康・疾病の状態に直結するバイオ・化学情報の取得は難しい。未病の検知に必要な極微量の生体由来物質（バイオマーカ）の検出技術、モニタリング技術の開発が求められる。また、感染症の流行を未然に防ぐため、環境中に存在するウイルス・細菌などの病原体を検出・モニタリングする技術の開発も必要である。

##### (6) バイオインスパイアード材料・システム

生物が有する巧妙な構造や機能、生物が低エネルギーで実現する動作や低環境負荷の物質生産に学んだ、材料・デバイス、生産システムを人工的に再構築するバイオインスパイアード技術への期待が高い。3Dプリンティングなどを使った3次元組織体の形成、合成生物学の進展による人工肉などの新たなタンパク質の合成など、医療分野に留まらず、新たな物質生産の分野にまでバイオ技術の可能性が広がっている。

##### (7) バイオアダプティブ材料

生体環境に適合した材料の探索という従来の概念を超えて、生体との相互作用を積極的に活用して能動的に制御する機能をもつ材料を設計・創製する。生体との相互作用を積極的に活用することで初めて実現可能な機能を持つ材料、具体的には、生体現象を高度に制御する機能を持つ材料や、現状の網羅的探索の延長では達成不可能な極めて高い生体適合性を有する材料の創出基盤を構築することをめざす。これにより健康維持、疾患治癒、身体機能の補修代替などの医療・健康ニーズに応えていく。

##### (8) 脳型AI・スマートロボット

工場のような閉じられた環境ではなく、常に変化する開かれた環境の中で、人間と一緒に連携して作業できる自律・共生型のスマートロボットを実現する。変化する環境をマルチモーダルなセンシング機能で的確に状況を把握して、一緒に作業する人間や他のロボットの行動を予測するとともに、次にとるべき行動を自律的に瞬時に判断し、人間と同じかそれ以上の速さで行動できることが求められる。これには、人間の脳の特徴である経験に即した高度な認識・判断を高いエネルギー効率で行う脳型AIチップと、人間の五感と同等な感度・精度を持つマルチモーダルセンサ、小型高出力の柔軟アクチュエータ、およびこれらを統合するソフトロボティクスが必要である。

**【社会像 III. 低環境負荷で持続可能な社会】****ニーズ⑤ 水・大気・資源の循環を可能にするスマート材料**

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

**ニーズ⑥ 省/創/蓄エネのための先端材料・デバイス**

地球温暖化の影響による台風の大型化、山林火災の頻発など自然災害の深刻度は増大する一方である。このような環境のもと、脱化石燃料依存、温室効果ガス排出削減と、経済的発展を両立するためには、省/創/蓄エネルギーのための材料・デバイスの高機能化が必須となっている。具体的には、高性能蓄電池、燃料電池、太陽電池、高 $T_c$ 超伝導材料、高ZT熱電材料、グリーン水素・燃料（人工光合成、水電解）、熱エネルギー制御材料（断熱、耐熱、蓄熱、冷熱）などの技術開発が求められている。

**・取り組むべきグランドチャレンジ****(9) サステナブル元素戦略**

厳しい資源制約のあるわが国においては、材料・デバイスにおける新機能の追求と同時にそこで使用される元素・物質の循環をも考慮した材料創製が必要になってくる。そのためには、これまで材料研究開発の世界的な流れを先導してきた「元素戦略」をさらに進化させ、新機能の追求と同時に希少資源の極限的な回収や、プラスチック素材の再資源化など、限りなく「ゼロ・マテリアル・エミッション」に近づけることをめざす必要がある。材料の原料調達から、創製、リサイクル、廃棄までのライフサイクル全体を考慮した材料設計指針の確立が重要である。

**(10) カーボンニュートラル基盤**

化石燃料の利用を減らし、再生可能エネルギー利用割合を増やすために、各種デバイス（蓄電池、燃料電池、太陽電池）と、それに用いられる材料の開発を継続して行う。また、グリーン水素の利用技術や、熱エネルギーの有効利用のため高性能な各種熱エネルギー制御材料（耐熱、冷熱、蓄熱、高熱伝導）の探索・開発を行う。

**【共通基盤技術】****・取り組むべきグランドチャレンジ****(11) 多機能・複雑系の材料設計**

蓄電池や燃料電池の構成材料、超伝導材料、磁性材料、触媒材料などでは相反する機能や複数の機能を同時実現することが求められ、その高性能化には材料の多元素化や複合化が避けられない。このような複雑な材料システムでは多様な結晶構造が可能になり、要求に対し最適の特性を有する結晶構造（結晶の安定相）をどのように設計するか、どのようなプロセスで実現するかが材料開発の鍵を握っている。グローバルな開発競争が激化している現状においては、従来のような試行錯誤的な材料開発から脱却し、進展が著しいシミュレーションやデータ科学、さらにはオペランド計測を駆使した精緻な材料設計、プロセス設計手法を確立することで、ハイスループットな材料創製を実現する。また、これまでに積極的に用いられていなかった、あるいは



はむしろ邪魔ものであった、材料中の欠陥を積極的に制御・利用する欠陥エンジニアリングや、近年、著しい発展を遂げている二次元材料の組み合わせ積層による新物質開発などを追求していく。

## (12) 材料合成プロセス設計基盤

材料やデバイスを合成・作製するプロセスについては、その多くが試行錯誤の末に見出されたもので、材料製造プロセスを理論的に組み上げていく方法論は存在しない。このため、機能の高い材料が理論的に予測されてもそれを有効に合成するプロセスが見つからず、現実的には活用できなかったり、プロセスフロー中のたった1つの特定のプロセスによって使用できる材料が大きく制限されるために材料の選択範囲が狭められたりするケースも多い。データ科学を用いて最適プロセスの発見を行うプロセス・インフォマティクスなどの設計基盤の構築が望まれる。

## (13) 次世代オペランド計測

反応プロセス中の物質・材料もしくは実動作下の材料・デバイスを対象にオペランド計測を実行し、得られた計測結果に対してデータ科学的手法も駆使して高速・高効率なデータ解析を行うことが、今後の新物質・材料開発には欠かせない。解析結果をただちに合成プロセス条件やデバイスの動作条件にフィードバックすることで、それらの機構解明が進み、より高品質な物質・材料創製データ科学を活用しつつ、計測とプロセスを一体化したものづくり技術の開発が今後重要となる。

### 1.3.4 研究開発体制・システムのあり方

ナノテク・材料分野の研究開発の最先端においては、原子分子スケールの微小な領域の観測、評価、加工、制御を通じて、過去には想像もできなかったほど精緻で高度な材料・デバイス機能を引き出せるようになってきている。これは、多くの専門分野にまたがる叡智の多年にわたる結集により可能になってきたことである。しかし、これをさらに進めていくために、すべての専門領域をカバーする研究者集団、高額な実験装置と、装置をフル活用できる技術専門家を個々の研究機関や企業で確保するのは、どの国にとっても困難である。

一方で、研究開発競争はグローバルなスケールで激化し、開発スピードへの要求は高まり続けているため、以下のようなメリットを享受できる拠点型のオープンイノベーションへの取り組みが世界的に実践されている。

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

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

### ■世界のナノエレクトロニクス大型研究拠点

ナノエレクトロニクスの研究開発拠点は、ベルギーのIMEC、フランスのMINATEC、米国のAlbany Nano Tech (ANT) など、限られた拠点到集中している(図 1.3.4-1)。これらの拠点到には、デバイスメーカー、装置メーカー、材料メーカーなどが集まり次世代のデバイス、プロセス研究開発のエコシステムを構築し、先端半導体研究だけでなく、半導体を活用した研究、最先端の設備と研究開発プログラムを通した人材育成が行われている。

IMECは、今年創立35周年を迎えるナノエレクトロニクスの国際的な研究請負機関であり、2019年の収入は6.4億ユーロ(2018年の5.83億ユーロから約1割増収)である。約2割がベルギー・フランダース地方政府からの助成金だが、1984年の創業以来、収益は毎年伸びている。IMECの伝統的なビジネスモデルは研究協業(受託研究)であるが、中小企業向けのファウンドリサービスも行っている。200mmもしくは300mmの試作ラインを活用して、CMOS、光デバイス、化合物パワー半導体、太陽電池、イメージセンサ、MEMSなどを提供している。さらに、IMECが複数の中小企業をまとめてTMSCのようなメガファウンドリへの製造委託も行っている。2016年9月に、フランダース地方政府における科学技術振興政策強化の一環として、同地方のデジタル技術研究機関でありインキュベーションセンターでもあったiMindsを吸収合併したことで、従来からの強みであったハードウェアとiMindsのソフトウェアを融合させ、広範囲のIoTアプリケーション開発(スマートヘルス、スマートモビリティ、スマートシティ、スマートインダストリー、スマートエネルギー)の研究を促進し始めている。その結果、研究協業先も半導体関連産業にとどまらず、健康、医療、自動車、エネルギーなどに広がりを見せている。2019年の組織の構成員は4,500名を超え、そのうちの500~600名が世界中の研究委託企業から派遣されている研究者(給与は派遣元の企業が負担)、同じく500~600名が博士号取得のための研究を行う大学から派遣されてきた学生である。また、試作製造だけでなく、デバイス設計の受託や、IMECでの研究成果で起業しようとするスタートアップの支援も行っている。日本からも東京エレクトロンやSCREENをはじめとする製造装置メーカーに加えて、住友化学、JSR、富士フイルム、カネカなどの材料メーカーも参加している。

MINATECは20万平方メートルの敷地に研究者3,000名、学生1,200名、産業界の技術移転専門家600名を集め、13,000平方メートルのクリーンルームを持つ、グルノーブルの産学独集積クラスターの中心である。

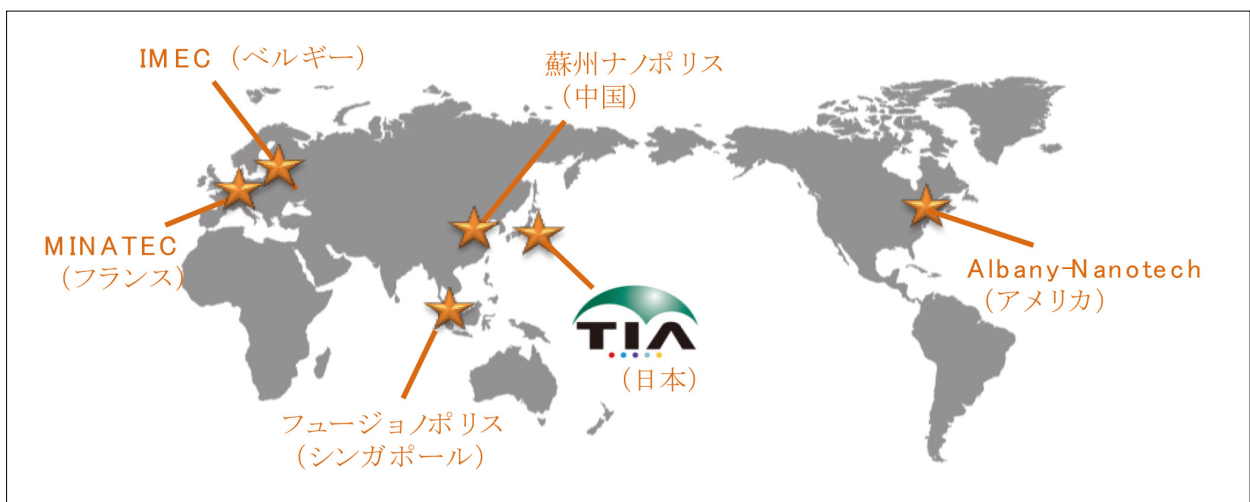


図 1.3.4-1 世界のナノエレクトロニクス大型研究拠点

ここには、基礎研究を行っている研究所 (INAC、FMNT) に加え、応用研究を行う電子情報技術研究所 (CEA Leti) がある。また、大きな国際研究施設 (欧州シンクロトロン放射光研究所 (ESRF)、ラウエ・ランジュヴァン研究所 (ILL)、欧州分子生物研究所 (EMBL)) とも近接するという、有利な立地条件を有している。年間予算は約3億ユーロ (うち、5千万ユーロは設備投資費)。毎年約350件の特許が出願され、1,600件以上の研究論文が発表されている。また、多岐にわたる分野 (オプティクス、バイオテクノロジー、部品・設計回路、センサなど) で多くのスタートアップを設立している。MINATECでは自己評価の指標として、①国際的存在感、②エコシステム形成、③経済的インパクト、の3つを重視しており、これらを高めていくための運営に集中している。

ANTは、戦略的な提携関係にある企業や公的研究機関は200社近くにのぼる。その中で中心的研究機関の1つであるSEMATECHは2013年にニューヨーク州と5年間の研究協力契約を締結し、Phase 3のステージを行った。ANTに勤務している企業人は約3,000名である。ANTのあるSUNY-CNSE (State University of New York - College of Nanoscale Science and Engineering) は、2002年の建設開始以降、総額80億ドル以上を投資して現在にいたる。参画企業からの要請に応えるかたちで年々拡大した13,000m<sup>2</sup>規模のクリーンルームを筆頭に、雇用者の人件費を含めた年間の維持費は毎年2億ドル規模とされる。NY州政府が約半分を支出し、企業が半分を拠出している。コンソーシアムへの累積投資48億ドルは主に民間資金からであり、NY州政府も4億ドルを拠出している。ANTでは、再生可能エネルギー技術研究開発にも力を入れており、2015年には1.9億ドルを投じた、ZEN (Zero Energy Nanotechnology) 棟が開所している。2019年には、中核テナントのIBMが、20億ドル以上を出資して、人工知能に特化したコンピューターチップの研究開発、プロトタイプ作成、テスト、シミュレーションを行う「AIハードウェアセンター」をニューヨーク州立工科大学に設けることを発表した。CNSEの教員・アドミニストレーターは約150名、大学院生200名が所属する。4つの学科、ナノサイエンス、ナノエンジニアリング、ナノバイオ、ナノエコノミクスがある。なかでも特徴的なのはナノエコノミクス学科であり、ナノテク産業化の強化に関する教育・人材育成をメインミッションとしている。CNSEでは博士号を取得でき、また、SUNYのメインキャンパスと共同してMBAを取得できるようにもしている。

アジアでは特に中国の存在感が増している。たとえば、蘇州においては1994年から中国とシンガポールの政府の合併により蘇州工業園區 (SIP) が、周到な都市計画のもとで作り上げられている。ここには、韓国のサムスン電子、ドイツのシーメンス、オランダのフィリップスなどの海外ハイテク企業が誘致されたほか、世界各国の多くの企業が、製品の生産輸出拠点として進出するようになっている。また、中国の3大IT企業である百度 (バイドゥ)、アリババ集団、騰訊控股 (テンセント) なども進出しており、技術開発のためのスマートシティのモデルともいわれている。蘇州工業園區の商品・サービス生産額は2016年の実績で334億ドルと前年比7.2%の増加となっている。アジアのシリコンバレーとも呼ばれる深センは、バッテリーとEVメーカーのBYD、通信機器のファーウェイ、SNS大手テンセントなどの有力企業を輩出し、今も拡大を続けている。2020年にはデジタル人民元の実証実験の舞台としても選ばれ、中国のハイテク産業の中心となっている。また、シンガポールにはフュージョノポリスが国際拠点となっている。このように、韓国、中国、台湾に加え、南アジア、東南アジアではシンガポールを中心にハブ化が進みつつある。

日本での取組としては、産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、筑波大学、高エネルギー加速器研究機構が中核となり、日本経済団体連合会 (経団連) とも連携して2010年にスタートした「つくばイノベーションアリーナナノテクノロジー拠点 (TIA-nano)」がある。先端ものづくり国家としてのわが国の繁栄とともに世界的に魅力あるナノテクノロジー研究拠点を造り上げようとしたものである。2015年には第2期として今後



5年間の行動体系を示した「TIA-nanoビジョン (2015～2019年度)」を打ち出し、オープンプラットフォームの構築に向けた活動を明確にしている。2016年度から新たに東京大学が加わり、ナノバイオやデータ駆動科学などの新たな取り組みも進めていくことから、名称をTIA-nanoからTIAに変更して活動を広げている。

TIAでは、3つのプラットフォーム（システム化プラットフォーム、先進材料プラットフォーム、共通基盤プラットフォーム）に分けて研究開発を推進している。システム化プラットフォームには、ナノエレクトロニクス、パワーエレクトロニクス、MEMSの研究領域、先進材料プラットフォームにはカーボンナノチューブ、ナノグリーンの研究領域が含まれ、それぞれ企業と連携して関連するプロジェクトを推進している。共通基盤プラットフォームには、光・量子計測、人材育成、共用施設ネットワークがあり、計測技術の高度化、研究者の能力向上・キャリアアップ、研究の支援などを行っている。また、2016年度より中核5機関の研究者が連携して将来のイノベーションにつながる新たな研究領域の探索を行うために、TIA連携プログラム探索推進事業「かけはし」を開始している。バイオ・医療の研究領域は主にこの「かけはし」で支援されている。2018年度までの3年間の活動で、予想以上の興味深い新たな研究テーマが提案されており、それらの中には具体的な研究プロジェクトに移行したものもあり、今後は企業も含めた形でのさらなる展開が計画されている。TIAが世界に注目される研究拠点になるには、TIA独自の強い研究領域を形成する必要があり、従来の国家プロジェクト中心の研究だけでなく、「かけはし」から新たな融合研究領域が生まれ、世界に注目される活動に育つことが渴望される。2020年には東北大学が参画することで中核6拠点体制に増強するとともに、「TIA VISION 2020-2024」を発表し、イノベーションシステムのさらなる深化拡充の計画を発表した。この計画では「半導体 (IoT/AI プロセッサ・センサ等)」「物質・材料データプラットフォーム」「光・量子計測」等の研究開発テーマに重点的に取り組んでいく。研究開発の体制構築にあたっては、現行のTIA中核機関にとどまらず連携体を拡充させ、社会や時代のニーズに柔軟に対応して産業化を実現するプラットフォームへと発展させていくとされている。

これまでTIA拠点を活用して内閣府のFIRST、SIP、ImPACTや文部科学省、経済産業省、NEDOなどさまざまな国のプロジェクトが進められ、多くの成果が創出されている（第1期 [2010-2014年度]：33プロジェクト、第2期 [2018年度まで]：45プロジェクト）。2018年度におけるTIA連携企業は171社、外部から640名の研究者が集まっていることから、イノベーションハブとしての機能は徐々に高まっていることがわかる。オープンイノベーションを促進すべく、公的資金のみならず、企業会員からの資金も得ながら、持続・自律的な拠点経営を実践している例が出始めている。そのような例としてナノグリーン領域におけるNOIC (NIMS Open Innovation Center) や、パワエレ領域におけるつくばパワーエレクトロニクスコンステレーション (Tsukuba Power-Electronics Constellations: TPEC) があげられる。また、企業主体の新事業創出を促進するために、単層カーボンナノチューブや複合材料の提供や技術相談・共同研究を行う「CNTアライアンス・コンソーシアム」の活動も行われている。

一方で、IMEC、MINATECなどに比べて教育・人材育成の面が弱い、コア技術開発が日本企業だけで行われており、海外からのユーザー・ニーズが取り込めない、産業界に対する情報発信が弱い、28 nm世代以降の最先端の半導体製造設備が用意されておらず、先端デバイスの試作ができない、また、既存の設備も老朽化しているといった指摘もある。産業界へのPR活動の1つとしてつくばエリア見学会なども開催されるようになってきているが、このような地道な勧誘活動を続けていくことや、企業にとって魅力的なコア技術を蓄積して、利用しやすい制度、他にない装置・設備の拡充などが期待される。

今後TIAが、世界の強力な半導体開発拠点に伍してどこまで競争力を持ちうるのかは、国のエレクトロニクス研究開発政策の位置づけにも依存し、各責任機関の意志と行動にかかわる問題である。拠点は国際的に

開かれた組織とし、他国のネットワークとも接続し、アジア諸国や世界からの人材の誘引を試みる必要がある。

### ■世界のナノテクノロジー研究開発インフラ・プラットフォーム

米国、韓国、フランス、ドイツ等は戦略的に公的資金を投入（ナノテクノロジー国家投資額の5%～10数%を研究開発インフラ・プラットフォーム・拠点形成に配分）し、充実した先端研究インフラのプラットフォームを構築している。特に、米国のNational Nanotechnology Coordinated Infrastructure（NNCI）やNetwork for Computational Nanotechnology（NCN, NSF）、韓国ナノ総合技術院の6つのセンターはオープンな研究開発インフラとして課金制や国際対応充実している。欧州や台湾も、国・地域単位でナノテクノロジー研究インフラのプラットフォームやネットワークが形成されている。

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

日本は、過去、文部科学省のナノ支援（2002～2006年度）、ナノネット（2007～2011年度）の両プログラムを実施、この経験を踏まえ2012年度から10年間の計画で本格的にスタートしたナノテクノロジープラットフォームでは、課金制度や国際化対応を導入するなど、諸外国のナノテク研究共用インフラ事業との比較においても引けをとらない先進的なプラットフォームを構築した。先端装置類を地域単位で集中配備してオープンにすることで、ユーザーの研究開発投資の効率を上げるばかりではなく、そこに集まった異分野の人材が知識やアイデアを交換し合うことで連携・融合を進め、新しい科学技術やビジネスが生まれるきっかけを生み出すことが起きている。画期的な材料・デバイス開発に挑む産学官からの利用者に対して、プラットフォームでは3つの技術領域（微細構造解析、微細加工、分子・物質合成）を提供し、全国25法人、37実施機関が参画している。それぞれ共用を担う実施機関およびその代表となる代表機関が緊密に連携し合いながら、利用者に対して最適な場所で高度な技術サービスを提供する体制を構築している。また、プラットフォーム全体の支援機能の高度化や利用促進を図るために、センター機関（NIMS、JST（JSTは2017年度まで））を設置し、全国の若手研究者や地域の中小企業など潜在利用者と、プラットフォームとをつなぐ窓口・コーディネート機能を担っている。

現在は、プラットフォームの年間利用研究課題は約3,000件あり、利用研究者は延べ2万人を超える。文部科学省の事業予算とユーザーからの利用料収入、そしてプラットフォーム機能を提供する事業参画法人による自己負担とが合わさり、プラットフォーム全体が運営されている。そのなかで、産業界に対する具体的な研究開発支援や、大学研究者に対する高度設備の利用・技術支援、技術代行等により、専門技術者のスキルと知識・ノウハウへのアクセスを可能としている。利用者の持つ課題・目的に対してレバレッジを効かせた具体成果を上げるなど、研究開発の新しいエコシステムが育ちつつある。こうしたプラットフォームの構築により、ユーザーが課題を最初に持ち込んだ先の機関では対応できない課題も、プラットフォームを介して他の機関へと課題が移り、そこに持ち込むことで解決できるケースが生まれている。これは海外にはない日本の特徴的な仕組みである。設備、技術などのサービス提供のみならず、技術の知識、事例、解決策などの蓄積自体がプラットフォームの強みであり、価値創出の源泉たるストックとなっている。特にwebサイトを充実させて、利

用事例や、設備情報をデータベース化して公開することなどがポイントになっている<sup>1</sup>。本事業は、外部委員による中間評価で高く評価されているが、同時に、科学技術や産業を取り巻く状況の変化に即した対応技術領域の強化と、先端機器・技術専門人材の強化拡充、適切な利用課金体系の充実、国際化など、より持続的な運営形態をめざして発展・成長させていくべきとの総括がなされている。

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

上記の成果や課題を踏まえて文部科学省は、2021年の政府におけるマテリアル革新力強化戦略の策定に伴い提起された「マテリアルDXプラットフォーム構想」実現の一翼を担う新事業「マテリアル先端リサーチインフラ」を開始した（2021年3月）。ナノテクノロジープラットフォームの最終年度である2021年度末を待たずして開始した本事業は、全国各地に整備し蓄積してきたナノテクノロジープラットフォームの優良な研究基盤を引き継ぎ、新たに導入する最先端・ハイスループットの設備を活用することで、産学官の多様な利用者からの先端設備の共同利用を可能とする環境や、利用者に対する課題解決への最短アプローチの提供を図りつつ、高品質なマテリアルデータの創出が可能な共用基盤を整備する。わが国がデータ駆動型の研究開発をさらに加速すべく、高品質なマテリアルデータを産学官から効率的・継続的に創出・共用化するための仕組みの構築が計画されている。また、そのようなマテリアルデータを戦略的に収集・蓄積・流通・利活用できる仕組みを持つ、マテリアル研究インフラのプラットフォームとなることが謳われており、ナノテクノロジープラットフォームの基盤をベースに、マテリアルデータ利活用研究基盤へ発展させようとするものである。

本事業は、大学・国立研究開発法人等において、広範に充実した最先端設備群および技術・ノウハウを有する6つの「ハブ機関」と、一定の領域で特徴的な設備・技術を有する19の「スポーク機関」からなる全国25法人による体制「ハブ&スポーク」で構成される。ハブ&スポークの体制により、各機関が保有する設備・技術・ノウハウ・データを外部共用することで、わが国におけるマテリアル研究開発を先導し支える研究インフラ・プラットフォームをめざす。ナノテクノロジープラットフォームで端緒を開いた研究設備共用の文化を根付かせることや、ここから新たな研究文化を構築していこうとすることを、より一層確実なものとするべく臨むことが肝要となる事業であろう。

マテリアル先端リサーチインフラの各ハブ機関は、データを収集、蓄積するためのデータ管理システムを構築し、各ハブおよびスポーク機関の利用研究課題を通じて創出されるデータを集約するとともに、高品質で膨大なデータ群を利活用可能なデータセットに変換する。さらに、利用者に対するデータ利活用環境の構築、提供を図り、さらなるデータ活用型研究に供する。蓄積したデータのうち一部は、国立研究開発法人物質・材料研究機構が構築するデータベース（データ中核拠点）へ登録することにより、上述のマテリアルDXプラットフォーム構想下で、最先端のデータ基盤及びデータ利活用環境を構築する10年計画の事業である。

1 文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム、共用設備利用案内サイト, <http://nanonet.mext.go.jp/yp/> (2021年2月17日アクセス)



## ■ポストコロナの研究開発の変革

2019年末に発生した新型コロナウイルス感染症（COVID-19）は、世界中のほとんど全ての社会活動に大きな衝撃を与え、その影響は短中期的なダメージのみに留まらず、中長期的な社会構造の転換さえも引き起こしかねない状況となった。これまでに述べてきたように、ナノテク・材料分野が、人類の活動の多くの場面とかかわっている、まさにその特性のために、当分野の研究開発は新型コロナウイルス感染症そのものや、それにより引き起こされる社会の変化によって強い影響を受けると予想される。

CRDSでは、ポスト/withコロナ時代におけるこれからの研究開発の新しい姿へ向けた調査報告書<sup>2</sup>を発行した。その中では、研究開発活動の変革を指す語として「リサーチトランスフォーメーション（RX）」を提唱し、新型コロナウイルス感染症による研究開発環境の変化を、進化・高度化の機会としてとらえるべきであると述べている。人と人、人と物の距離が変わってくる新しい生活様式（ニューノーマル）のなかで、ナノテク・材料に関する研究、人材育成をどう変えていくべきかに関して、実験装置の自動化や遠隔化、遠隔会議やオンライン授業といった、以前から提唱されているDXの推進だけでなく、コロナ禍中で経験したことやそこで得た知見を活かして、研究開発のやり方を根本のレベルからリエンジニアリングしてみるチャンスでもあるととらえるべきである。2020年末の時点で、新型コロナウイルス感染症は収束の兆候をみせていないが、ワクチンの接種が各国で始まり、1～2年のうちには、以前のような生活が行えるようになるかもしれない。人々や社会に内在する「何かが変わることを拒む傾向」（Inertia）に鑑みると、以前と異なった状態を強制されているこの時点にこそ、研究開発手法を刷新する最大のチャンスが訪れているといえる。

2 JST CRDS 調査報告書「リサーチトランスフォーメーション（RX）ポスト/withコロナ時代、これからの研究開発の姿へ向けて（CRDS-FY2020-RR-06）」、<https://www.jst.go.jp/crds/report04/CRDS-FY2020-RR-06.html>