

## 1.3 今後の展望・方向性

### 1.3.1 今後重要となる研究の展望・方向性

多くの分野・用途において用いられる装置・システムの機能を根幹で支えているナノテク・材料分野には、多様な社会的期待が集まっている。以下では、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、区分ごとに記述する。

#### ■環境・エネルギー応用における今後の方向性

日本政府は2050年までに温室効果ガスの実質排出量ゼロ（カーボンニュートラル）を目指すことを明言している。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ている。さらに、COVID-19やロシアによるウクライナ侵攻に端を発する天然資源のサプライチェーンの混乱が加速しており、世界的にエネルギー価格や資源価格が高騰している。このような課題を克服するため、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ますます高まっている。一方で、環境・エネルギー分野における材料・デバイス技術は新たな経済成長領域であり、各国によって大規模な研究開発や産業政策が進行している。グローバル課題解決のための国際協調と、経済成長のための競争のバランスのなかで、戦略的な研究開発が求められている。

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。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）の開発が重要になっている。特に自動車等の移動体の電化が欧州、米国、中国を中心に進んでおり、併せて蓄電池のサプライチェーンを掌握するための材料・蓄電池製造の産業政策が大規模に実施されている。日本は経済産業省「蓄電池産業戦略」を2022年に策定し、液系リチウムイオン電池の製造基盤の拡大や全固体電池等の次世代蓄電池の研究開発に取り組むことを表明しており、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。また、蓄電デバイスの市場は今後ますますと拡大することは必至であり、その際の材料・資源不足が懸念されている。そのため、車載用のハイエンドな蓄電池を大規模グリッド用のローエンドな蓄電システムにリユースするための技術開発、ハイエンド用途からハイエンド用途へのリサイクル技術開発などの研究開発に注目が集まっている。

再生可能エネルギーの利用としては、直接的に電気に変換して利用するだけでなく、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。特に再生可能エネルギー由来の電力を利用した水電解や、光触媒を用いた人工光合成によるグリーン水素製造技術の確立のための材料・デバイス研究に多くの投資が集まっている。また、同様に光・電気化学プロセスをCO<sub>2</sub>からの有用物質生産やアンモニア製造に適用しようとする研究開発も世界的に活発化している。

環境保全、省エネルギー、資源循環の視点では、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、ネガティブエミッション技術としてCO<sub>2</sub>の回収技術が求められており、高効率な濃度凝縮、回収を行うための吸収剤や膜材料開発、プロセス開発も期待されている。さらに、鉱物資源の少ない日本においては、回収された電子デバイスや蓄電デバイ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。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いるが、デバイスレベルでの国際シェアは下降している。諸外国が大規模な投資や産業政策を実行するなかで、本分野へのさらなる投資の促進や産学官が連携した技術開発、社会実装の促進、研究開発のDX化による研究加速などが一層重要になっている。

## ■ バイオ・医療応用における今後の方向性

COVID-19の世界的パンデミックを経験し、そして継続的な高齢化・超高齢化の進行が見込まれる今後の社会においては、医療やヘルスケアに求められる技術はますます多様で高度なものとなっていく。特に、一人ひとりが健康で快適さや幸せを実感できるWell-Beingな社会の実現、並びに医療費の適正化を目指すためには、健康寿命の延伸や健康格差の縮小に向けた技術革新が求められる。加えて、地球規模での持続可能な社会システムの実現に向けて、環境負荷の少ない物質・食料生産や資源利用を可能にする技術開発が喫緊の課題となっている。ナノテクノロジー・材料分野を基盤としたバイオ・医療応用に関わるテクノロジーは、上記のような社会的課題の解決を見据え、基礎的なライフサイエンス研究から実用的な材料・デバイス開発までの広範な対象に渡って貢献をしていくことが期待される。

健康寿命の延伸や健康格差の縮小を目指すためには、ポイントオブケアやセルフケアによる治療・診断ツールの充実が極めて重要である。高齢化社会が進むに従って疾病や身体的・精神的傷害をもって生きる人が増えることが予想されるが、埋め込み型・携帯型の治療デバイスの開発は、日々の生活や治療の負担軽減に大きく資するものである。身体機能の補完や、在宅治療あるいは日常生活と一体となった治療への利用のため、装置の小型化・軽量化や連続動作性の向上、インターフェースの柔軟性や生体適合性の付与、IoT技術と連携したモニタリング機能および遠隔操作性の搭載といった観点からの材料開発やシステム構築が求められる。また、身体異常・疾病の早期診断のためには、バイオマーカーとなる生体由来物質の迅速、簡便、高感度な検出が必要である。特に、非侵襲的に採取可能な生体液（唾液、尿、汗など）を検体とした検出デバイスが有用である。そこで、夾雑物中からターゲットを分離・濃縮する方法や、ターゲットを特異的に認識するセンサ材料の開発が求められる。加えて、スクリーニング検査としてのスループットを高めるため、1度に複数のバイオマーカーを測定できるセンサおよびデバイスの開発も求められる。さらに、日常的に健康状態のモニタリングを行うセルフケアツールは疾病の早期発見や予防に有効である。IoT技術と連携したウェアラブルデバイスは、既に体温・振動・血圧などの物理センシング機能を搭載したスマートウォッチなどが普及しているが、今後は、より直接的に生理状態を示すバイオ・化学情報のセンシングが可能なデバイスの開発が期待される。

損傷組織の代替・修復や生体内・外での生体模倣組織の構築を目指すバイオ材料の開発においては、元来、生体中で毒性や炎症をもたらさないとの観点での「生体適合性」が検討されてきた。しかし近年、生体における力学的な応答がその機能の発現や調整に重要な役割を果たすことが徐々に明らかとなり、材料への力学的な生体調和性の具備や、材料の力学特性を利用して細胞の機能や運命を制御することを目指した研究開発が注目される。力学的性質やメタ構造を高度に設計した材料の開発においては、計算科学との融合が欠かせない。同時に、細胞の力学応答を定量的に、高精度に、そして高い空間・時間分解能で計測できる手法の開発も必要となる。さらに、このような生体力学応答の解明・制御の追究は、1細胞レベルから多細胞、組織レベルへの発展が見込まれ、それに応じて求められる計測や材料設計の技術もますます高度なものとなっていくだろう。加えて、力学的な環境条件・入力刺激と、生体内の分子レベルの応答機構を関連付けた数理解析やモデル構築、シミュレーション技術の開拓も極めて有用と考えられる。

高度な医療技術の実現のため、ナノ粒子をキャリアに用いて薬物や診断用プローブを腫瘍組織等の疾患部位へ送達する薬物送達システム(DDS)の研究開発では、ナノテクノロジー・材料分野による牽引が一層求められるようになる。COVID-19の流行を契機としたmRNAワクチンの普及は、mRNAやナノ医薬の有効性・安全性を世界的規模で実証することとなった。今後はワクチンのみならず、がん免疫療法やCRISPR-Casを利用したゲノム編集など、より高度な治療応用のためのナノ医薬の開発が加速していくと考えられる。

そこで、医薬用要素分子をより効率的および選択的に患部へ届けるため、脂質ナノ粒子の分子設計の見直しや、実験モデル動物の選択・評価系の再構築を含めて、改良を図っていく必要がある。また、イメージング用プローブと治療薬を同時に搭載したナノ医薬などを用いて、治療と診断を一体的に行うセラノスティクス技術の拡充も、個々の疾病状態に応じた精度の高い治療の実現には有用である。さらに、分子ロボティクス分野で発展してきた、分子入力に応じて演算・出力を行う機構や、ナノ構造体の駆動力を制御する方法は、生体環境と相互作用しながら自律的に薬効を発揮する次世代のDDSの開発に寄与することが期待される。

持続可能な社会システムの構築のため、環境負荷の少ない物質・食料生産や資源利用の実現においても、ナノテクノロジー・材料分野の貢献が期待されている。再生医療材料の開発で培われた生体組織構築技術は、培養肉製造への応用が見込まれる。また、DDSの植物や微生物への転用や、分子ロボティクスにおける人工細胞構築技術は、効率的な物質・食料生産への貢献が期待される。さらに、合成生物学の生物改変技術と組み合わせながら、生物由来物質あるいは生物自体を組み込んだ材料の開発は、効率的な資源利用のみならず、生物の持つ環境応答性や自己修復性、自己複製能力を備えた機能性材料の創出へとつながる。既に、免疫応答性物質で修飾したバイオ材料や、細胞膜成分でコーティングしたナノ粒子の開発など、生物由来物質の持つ機能を活かした新規材料が報告されている。今後は、利用可能な生物種の拡大、細胞集団としての挙動の制御、生物の長期生存に適う材料環境の確保、人工材料との安定的接触やデバイス化、改変生物の漏洩防止技術の確立、といった観点から研究開発が必要となる。このような生体物質を材料として扱う技術基盤の確立やさらなる生命機能の開拓によって、材料の多機能化ならびに医療、農業、エネルギー、インフラといった様々な分野への応用展開が期待される。

## ■ ICT・エレクトロニクス応用における今後の方向性

産業や日常生活など社会の様々なところでデジタル化が進展しているが、今後はサイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させた Society 5.0 を実現し、時間や空間、能力などに制約されない様々なサービスを提供することが期待されている。これを実現するためには、ハードウェアからソフトウェアまでの様々な技術が必要になるが、ハードウェアとしてはICT・エレクトロニクス技術の進展が不可欠である。サイバー空間では、高速な数値解析やデータ処理を低消費電力で行うための最先端のロジック集積回路や高速メモリ、大容量不揮発メモリ、膨大なデータを学習し最適な判断を行うAI処理用のアクセラレータチップ、従来のコンピュータでは何年もかかるような暗号解読、最適化問題などの複雑な問題を瞬時に解く量子計算に用いる超電導量子ビットなど量子計算回路の研究開発が求められる。また、フィジカル空間では、様々なデータ（温度、気圧、振動、汚染物質、ガス、生体物質、匂いなど）の収集を効率的に行うセンサやIoT機器の小型化・高感度化・超低消費電力化、自動車やロボットなどのリアルタイムの制御に必要なエッジコンピューティング用チップの高性能化・低消費電力化がますます重要になる。さらに、両空間を結びつける次世代の通信技術として、高速・大容量・低遅延・多接続・低消費電力・セキュアな通信を可能にする技術が求められ、光通信用トランシーバーの小型化・高速化・低消費電力化、Beyond 5G/6G/7G といった次世代の高速・大容量無線通信を可能とするミリ波・テラヘルツ波の送受信デバイス、電波の指向性を制御するフェイズドアレーアンテナ、電波の反射や透過を制御するメタマテリアルなどの研究開発が求められる。

コンピューティングに向けた最先端のロジック集積回路の研究開発としては、CMOSトランジスタのさらなる高性能化のためのGAA構造、チャネルへの二次元材料の利用が進められている。また、不揮発性メモリは、現状のフラッシュメモリの3次元積層・多値記憶のさらなる多層化・多値化、スピントロニクスを用いたMRAMや、PCM、ReRAMの高速化・大容量化とともに、深層学習AIチップの重みの記憶などへの適用が進められている。また、AIアクセラレータには、主流のCMOSデジタル回路に加え、アナログ回路、シリコンフォトリソグラフィによるフォトニクス集積回路、スピントルク発振素子などによるスピントロニクス回路などの研究開発が進められている。量子コンピュータ用のデバイス・システムでは、エラー訂正回路を含む大規模化に向け、超電導、冷却原子、イオントラップ、量子ドットなどを用いて、多量子ビット化へと進展する。



IoTに向けては、気圧、加速度、マイクなどの物理センサはMEMS技術の高精度加工、基板の大口径化により、高性能化と低価格化が進展し、光学センサはイメージセンサの高解像度化とともに、偏光を利用した新たなセンサ、LiDARなどへの利用が進んでいく。血液中の物質や呼気などを検出する化学センサは、再現性や安定性の改善、高感度化を目指した研究開発、超高感度が期待されるダイヤモンドNVセンサを利用した量子センサはその作製方法、利用分野の研究開発が期待される。

次世代通信に向けては、シリコンフォトニクスをベースに、ナノフォトニクス材料など新たな材料を導入し、新たな機能デバイス、光電融合による小型・高性能のトランシーバーなどの研究開発が進んでいく。テラヘルツ波無線技術としては、InPなどの高周波電子デバイスの高性能化に加え、光技術を利用した送受信デバイス、高周波発振回路とフェイズドアレーアンテナが一体化したチップ・モジュール、電波の反射・透過を制御するメタマテリアル、低損失の導電体・誘電体を用いた導波路などの研究開発が進展していく。さらに、量子暗号通信においては、伝送距離の延伸、伝送損失の低減、通信速度の向上、量子中継技術などの研究開発が進められていく。

### ■社会インフラ・モビリティ応用における今後の方向性

社会インフラは、道路・鉄道・航空網などの交通インフラや電力網・通信網・上下水道などの各種ライフラインなど多岐にわたる。わが国においては、阪神・淡路大震災や東日本大震災を1つの契機とし、さらに近年、頻発している水害などに対する社会インフラの安全性を担保するための課題がより顕在化している。わが国の国土には、国土交通省道路統計年報によれば65,000ヶ所を超える橋梁と1万ヶ所以上のトンネルが存在し、それらの多くが老朽化の問題を抱えている。これらの老朽化施設の補強技術や更新は喫緊の課題である。2021年度には「防災・減災、国土強靱化のための5か年加速化対策」が開始されている。

モビリティ分野は、自動車・航空機・列車など人や物資の輸送手段に関連する分野であり、環境負荷を低減するために、いずれの輸送手段においても電動化や軽量化の流れが加速している。また、AIやIoTなどの最先端技術の導入も進んでおり、20世紀初頭の自動車革命に匹敵する大きな変換期を迎えているといわれている。

社会インフラ、モビリティいずれにおいても、建物や土木、自動車などで力学的強度を保持するための構造材料や、効率的に発電し利用するための材料、エネルギー効率改善や部品・部材の長寿命化に資する材料などナノテクノロジー・材料技術の重要性が高まっている。

本分野に共通する流れとして、①カーボンニュートラルへの対応、②経済安全保障への対応、③データ駆動型アプローチの3つが挙げられる。カーボンニュートラルへの対応としては、モビリティの燃費改善のため、金属材料や複合材料の軽量・高強度化の検討や、異種材料の接着技術などの研究開発が重要である。また、モーター・発電機の効率改善のための磁石・磁性材料や、使用目的に合わせて効率よく電圧・電流を調整するためのパワー半導体材料・デバイス、機械の摩擦・摩耗の低減技術、自己修復材料の研究も重要である。また、経済安全保障へ対応するため、金属系構造材料、磁石・磁性材料において、希少金属や地域偏在している元素の使用を減らす研究が必要である。さらに、それぞれの材料では一層の性能改善と開発期間短縮の両立が重要な課題となっており、データ駆動型のアプローチの積極的活用が期待されている。

### ■ナノテクノロジー・材料における設計・制御技術の今後の方向性

「分子技術」「次世代元素戦略」「データ駆動型物質・材料開発」「フォノンエンジニアリング」「量子マテリアル」「有機無機ハイブリッド材料」などの物質と機能の設計・制御にかかわる基本概念は、マテリアル・イノベーションを創出するドライビング・フォースともいえるものである。

それぞれマテリアルは、より一層の性能向上が常に求められるだけでなく、複数機能の同時実現、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、材料開発は複合化・多元素化の方向に進んでいる。さらに、経済安全保障の観点からは、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。また、材料の使用後の劣化・分解性能まで含めた結合・分解制御技術も重要性が高まっている。

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・設計では困難になりつつある。また、ニーズの変化に迅速に対応するため、開発期間の短縮も重要な課題となっている。このため、4つの科学（実験科学、理論科学、計算科学、データ科学）を統合的に活用して、新規物質・材料の設計・探索・発見を飛躍的に加速するマテリアルズ・インフォマティクスが推進され、一定の成果を示している。今後は、材料製造プロセスを最適化するプロセス・インフォマティクスや、計測・解析を効率化する計測インフォマティクスとの連携、またそれらを支えるロボットによるハイスループット実験や、AI技術を活用した自律的最適化実験(Closed-Loop)など実験DXも重要な技術要素である。国内では、2022年よりデータ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト事業が開始されており、マテリアル研究分野における日本の国際競争力の強化に貢献することが期待される。

### 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第2章の各研究開発領域から見てくるわが国の研究開発の現状としては、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、磁石・磁性材料などの物質創製・材料設計技術が挙げられる。また、それらを支える計測・分析・評価・加工技術に関してもわが国が強みを有する技術が多く存在する。また、分子技術や元素戦略は、日本発の研究戦略コンセプトであり、現状では日本は優位なポジションを有するが、近年は米国・欧州を中心に戦略的な強化が図られている。さらに、データ駆動型物質・材料開発は、日本を含め、各国ともに政策的な強化策を掲げている領域である。

研究開発成果にもとづく技術の産業化や収益化の面では、欧米や、中韓などのアジア勢に対し劣勢となっているケースも少なくない。また、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共通支援策の整備に関しては構造的な課題が存在する。基礎フェーズ、応用・開発フェーズ、共通支援策の有機的な連携・推進の重要性が増してきている。

以下では、第2章における全29研究開発領域の国際比較表のまとめ（図1.3.2-1）にもとづいて、各区分単位で日本の研究開発の現状、諸外国に対する位置づけについて述べる。

#### ■環境・エネルギー応用における現状

この分野の研究開発領域は、再生可能エネルギー利用、効率的なエネルギー貯蔵・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大きな市場が見込まれることから、活発に研究開発が実施されている。蓄電デバイス、水素等のエネルギーキャリア技術は世界的に研究開発や産業政策による投資が強化されている。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、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ている。一方、市場の観点では太陽電池や蓄電デバイスなど材料シェアが低下している部門もあり、基礎研究から応用研究、社会実装までの展開の遅れや、他国に比べて研究開発投資が相対的に少ないことに起因すると考えられる。2021年度よりグリーンイノベーション基金が創設され、産業界を主体とした大規模な研究開発も始まっているため、国際的な産業競争力の回復に向けた取り組みが期待される。

米国は基礎研究フェーズから応用研究・開発フェーズまでいずれも上昇傾向にある。DOEを中心として政府系プログラムによって多くの研究開発を支援している。近年の動向として注目すべきは、2021年のEnergy Earthshots Initiativeの創設である。水素、蓄電池、ネガティブエミッション技術、地熱利用、洋上風力発電、産業熱利用の6つのテーマに対して、大規模な研究開発投資が進行している。

欧州は、資源循環と経済成長の両立を図るサーキュラーエコノミーの理念を実現するため、環境・エネル



図 1.3.2-1 国際比較表まとめ (第2章、29領域)

ギー分野の産業政策やHorizonの枠組みを利用した大規模な研究開発が進んでいる。欧州は、基礎研究、応用研究、社会実装を一体的に進めるコンソーシアム型の研究プロジェクトが特徴的であり、各研究領域において応用レイヤーに強みを有している。また、ルールメイキングによる産業競争上の主導権争いにも積極的であり、例えば蓄電池分野では、欧州域内で流通する製品中の各種資源の再利用率やカーボンフットプリントに対して規制を行う「欧州バッテリー規制」が2026年から本格施行されることが決まっている。

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に関する各種指標が急成長している。再生可能エネルギー利用、電気自動車や燃料電池車の普及に向けた研究開発やインフラ整備、補助金導入に力を入れており、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や革新的なデバイスの実証など、世界をリードする成果が生まれている。

韓国は蓄電池分野の産業基盤があるが、近年そのシェアを落としつつある。そのような状況を打破すべく、「Kバッテリー戦略」が掲げられ、研究開発の促進や人材育成への取り組みが進展している。また、水素社会の構築も目標として掲げており、関連分野での論文数が急速に増加している。

■バイオ・医療応用における現状

人工生体組織・機能性バイオ材料、生体関連ナノ・分子システム、バイオセンシング、生体イメージングのいずれの研究開発領域においても、日本は高い水準の基礎研究を行っている。特に生体イメージングでは、長年にわたってオリジナリティの高い優れた研究成果を創出しており、国際的なプレゼンスを維持している。また、生体関連ナノ・分子システムで扱う分子ロボティクス分野は、日本発の学問領域であり、世界に先駆けて大型研究プロジェクトが実施されてきたことから、日本が独自の強みを有する。実用化や産業化フェーズの



研究開発においては、日本の基礎研究の強みが必ずしも活かされていない状況が続いていた。しかし近年では、臨床応用や実用化を支える環境が少しずつ充実してきたことで、ベンチャー企業が増加していく見込みにある。引き続き、医工連携・異分野融合、アントレプレナーシップやレギュラトリーサイエンスの教育、事業化に向けた応用研究開発などを支援する体制の強化が求められる。

米国は、いずれの研究開発領域においても基礎研究から応用研究開発まで高い競争力を有しており、その一層の向上も見込まれる。基礎研究から社会実装までを区切りなくスピーディに展開させる研究開発体制の確立が、その強みとなっている。活発な異分野融合や高い人材流動性に加え、NIHやNSFからの研究資金も潤沢な状況にある。ベンチャー企業が数多く台頭し、その成果を大手企業が社会実装する流れが好循環を生んでいる。

欧州では、基礎研究・応用研究開発のいずれでも高い存在感を有するが、特にバイオセンシングや生体イメージング領域の基礎研究では世界をリードする成果を継続的に挙げている。資金面ではHorizon Europeが強力な後押しをしている。産業化に向けた体制が充実しており、また薬事規制のハードルや治験・薬事・品質管理に係るコストが比較的低いことも、製品展開の迅速さにつながっている。

中国は、過去10年余りに渡る精力的な資金投入、人材育成戦略の実施、研究環境の充実化を経て、現在では基礎研究において量・質ともに世界トップレベルの水準に達している。産業化においては、「製造強国」を目指した中国製造2025の方策のもと高性能医療機器の国産化が推進されているほか、自国内に大きな市場を持つことや動物実験・臨床試験の障壁が比較的低いことも産業化を加速させている。

韓国は、KAIST・ソウル大学・POSTECHを中心に、基礎研究における国際的プレゼンスを年々向上させている。また、研究開発への資金投入も増加が続いている。研究開発機関等を集約させた産学連携体制によって、今後産業化が急速に推し進められる可能性がある。

## ■ ICT・エレクトロニクス応用における現状

この分野の研究開発領域では、基礎研究、応用研究ともに欧米が優位性を持っているが、最近では中国の追い上げが激しくなっている。わが国も量子コンピューティングやスピントロニクスの基礎研究など、これまでも世界初の多くの成果を出して世界をリードしている領域もあるが、全体的には研究開発環境は厳しい状況にある。わが国の半導体製造産業や情報通信産業が世界的な優位性を発揮できなくなって以来、先端技術に対する研究開発投資が増加せず、企業の研究開発成果が減少してきたことや、若手研究者への魅力が低下したことなどが原因と考えられる。このような状況を打開するためには、経済産業省が半導体産業支援政策を進めていることに歩調を合わせる形で、先端技術・革新技術に挑戦する魅力的な施策を充実させることが重要と考えられる。また、先端のプロセス装置・評価装置により、様々な機関の研究者が新材料創製、デバイス作製、プロセス技術開発などで利用できる共用施設の充実も不可欠と考えられる。

革新半導体デバイスにおいて微細化・高性能化を進めるためには、二次元物質、磁性材料、強誘電体材料などの新たな材料を導入するためのプロセス開発が必要である。ロジック用デバイスの構造としては、ゲート長短縮に必要なチャンネルの薄膜化に対応するため、Siナノシートや二次元物質の成膜技術・プロセス技術の研究開発が重要になっている。

脳型コンピューティングデバイスの課題としては、膨大なデータを必要とする学習の効率化やエッジでの学習を可能とする新たな回路・アルゴリズムと、それを効率的に実行できるデバイスの開発などが挙げられる。

フォトリソ材料・デバイス・集積技術の課題としては、シリコンフォトリソのチップと様々な機能材料・デバイスをモジュールとして集積する技術、外部と光集積回路との光接続部分などの実装技術、システム的な視点での研究開発などが挙げられる。

IoTセンシングデバイスにおいては、小型・高性能な物理センサを実現するためのMEMS技術や3次元集積回路技術の高度化、化学センサの安定性・再現性の向上、量子センサの高感度化や集積化技術の開発などが必要である。

量子コンピューティングの課題としては、量子ビットの精度向上、誤り耐性の向上、従来技術と組み合わせたシステム設計などがある。また、実装面で材料科学、デバイス技術、実装技術、高周波制御回路など様々な技術レイヤーの協力や、利用面で従来技術・コンピュータとのハイブリッド化などを進めていく必要がある。量子通信では、実用化に向けた伝送損失の低減による伝送距離の延伸、通信速度の向上、量子中継技術などの課題がある。

スピントロニクスの課題としては、応用に向けた材料・デバイス特性の向上、様々な専門分野の専門家や産業界を巻き込んだ連携の強化などがある。スピントロニクスはMRAMのようなメモリ集積回路利用だけでなく、HDDなどの磁気記録、熱電変換、センサ、AIなどの応用が期待されているが、まだ基礎研究レベルのものが多いため、デバイスの性能向上や実用化の指針を示す取り組みが重要である。

## ■社会インフラ・モビリティ応用における現状

この分野の研究開発領域（金属系構造材料、複合材料、ナノ力学制御技術、パワー半導体材料・デバイス、磁石・磁性材料）は、道路・鉄道・航空網などの交通インフラや電力網・通信網・上下水道などの各種ライフラインなどの社会インフラや、自動車・航空機・列車など人や物資の輸送手段であるモビリティ分野を支える技術分野であり、近年その重要性を増している。いずれの研究開発領域も、日本は高い研究レベルを保っている。

金属系構造材料では、水素社会に向けての重要課題としての水素脆化への対応が注目されている、日本でも文科省 元素戦略プロジェクトやデータ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクトにおいて基礎的な研究が進んでいるが、欧米は実用化に向けた検討という意味で先行している。また、3D積層造形（Additive Manufacturing）では、これまでは欧米や中国が先行していたが、正確な寸法で部品を作るための研究から、金属組織を制御して本来の性能を発現させることに研究の中心が最近では移ってきており、メタラジー制御に強みを持つ日本の追い上げが期待される。

複合材料としては、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）、セラミックス基複合材料（CMC）が代表的であり、日本でも、経産省、NEDO、内閣府SIPなどのプロジェクトで実装にむけた研究開発が活発に推進されている。欧米や中国においても同様に、応用研究・開発は活発である。日本では、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セルロースナノファイバー（CNF）を用いた複合材料の開発研究が活発である。

ナノ力学制御技術は、文部科学省の戦略目標のもとでJSTのCREST、さきがけが実施され、接着・摩擦・摩耗、自己修復などが取り組まれている。ナノスケールでの観察・分析・計算を活かして、マクロな挙動の制御につなげるのが共通アプローチであり、ナノスケールでの科学的知見をマクロな挙動の制御技術につなげるところが今後の課題である。欧米でも、摩擦・摩耗や接着に関する基礎研究が盛んになりつつある。

パワー半導体材料・デバイスは、高効率の電力変換を可能にするための半導体材料・デバイスであり、日本企業のシェアが高い分野である。今後も日本の強みを維持していくために、個別半導体デバイスとしての性能向上、個別デバイスからモジュール・システムへ集積化、需要拡大に対応する量産化技術などの課題に取り組むことが重要である。次世代パワー半導体として有望なGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は、日本発の新材料であり、大学発ベンチャーなどでの研究が行われているが、海外、特に米国でも注目され、この分野の研究ファンド、研究者人口が増えている。

磁石・磁性材料では、文部科学省 元素戦略プロジェクトにおいて永久磁石に関する研究が活性化し、世界でもその研究レベルはトップクラスであるといえる。NIMSと国内磁石メーカーとのオープンプラットフォーム型連携研究が2022年4月から開始されている。海外では、欧州でのシミュレーション技術が高いレベルにある。また、中国は、基礎研究分野で大学等の研究設備面で日欧米と同等であり、また研究者人口が急増しており、近い将来、脅威になる可能性がある。



## ■ナノテクノロジー・材料における設計・制御技術の現状

ナノテク・材料分野の核をなす分子技術、次世代元素戦略、データ駆動型物質・材料開発、フォノンエンジニアリング、量子マテリアル、有機無機ハイブリッド材料が含まれる研究領域である。

日本は、JSPSの学術変革領域研究やJSTのCREST・さきがけ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。データ駆動型物質・材料開発は、米国の2011年の発表「Material Genome Initiative (MGI)」が引き金になったこともあり、米国の取組みがリードしていたが、日本においても精力的に研究が進められてきている。2022年からは文科省 データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクトとして、さまざまな材料において、ロボットなどによるハイスループット実験や、AI技術による自律的最適化手法を活用した実験DXを活用したデータ駆動型物質・材料開発を推進している。分子技術、次世代元素戦略はともに日本発の研究戦略コンセプトであり、日本は優位なポジションを有しているが、近年は米国・欧州を中心に戦略的な強化が図られている。フォノンエンジニアリング、量子マテリアル、有機無機ハイブリッド材料に関しては、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でも顕著な活動・成果がみえている。日本では基礎研究を中心に検討されており、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 によるファンディングを中心に英国、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、多く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の有能な研究者を招聘することにより、強化を図っており、基礎研究フェーズおよび応用研究・開発フェーズともに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Material 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る。また、関連する論文数、特許出願数も急増しており、今後の動向に注視が必要である。

## ■ナノテクノロジー・材料の共通基盤科学技術の現状

ナノテクノロジー・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・三次元集積)、「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」のシングルナノメートルレベルの微細加工技術及び三次元集積技術は、最先端半導体デバイス製造を支える重要な技術領域である。また、半導体デバイス分野にとどまらず、ナノフォトニクス、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。シングルナノメートルレベルの微細加工技術では、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いる中で、2021年6月の経産省の「半導体戦略」や2022年5月の日米の「半導体協力基本原則」合意に沿って、2022年度より次世代半導体プロジェクトとしてRapidus社による量産製造拠点と技術研究組合最先端半導体技術センター (LSTC: Leading edge Semiconductor Technology Center) による研究開発拠点整備が進められることになった。Rapidus社はNEDO「ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業/先端半導体製造技術の開発(委託)」において「日米連携に基づく2 nm世代半導体の集積化技術と短TAT製造技術の研究開発」が採択されるなど、2027年に2 nmノードチップの量産化という目標に向けて、海外との連携及び人材確保等を進めている。三次元集積技術に関しては、材料メーカー主体のコンソーシアムJOINT2が2021年度から2.5D実装や3D実装などの次世代半導体の実装技術や評価

技術の確立を目指している。さらに、NEDO「ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業/先端半導体製造技術の開発(助成)」において半導体デバイスのさらなる集積化・高性能化を可能とする3Dパッケージ技術の開発が、TSMCジャパン3DIC研究開発センターを中心に実施されることになり、今後の研究開発の加速が期待される。

「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・オペランド計測が重要性を増している。対象は、全固体リチウムイオン電池、触媒分野、エネルギー変換デバイスだけでなく生命科学分野(生きた細胞、生体関連分子など)にまで広がり、研究に欠かせないツールとなっている。欧米では、ナノ・オペランド計測のハードウェア、ソフトウェアの進展とともに、速やかにデータを共有するインフラが形成されつつある。また、超解像度の生体イメージングによる創薬や、全固体リチウムイオン電池を含むエネルギー貯蔵材料のオペランド計測が盛んである。日本は走査型プローブ顕微鏡(SPM)によるオペランド計測分野で優位性を維持している。さらに、JSTのCREST・さきがけ複合領域「計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測・解析手法の開発と応用」(2016～)で、情報科学・統計数理による測定データ解析手法とオペランド計測技術が開発されている。CREST研究領域「社会課題解決を志向した革新的計測・解析システムの創出」(2022～)では、計測技術と数理モデリング・機械学習を組み合わせる計測技術の深化による社会課題解決を目指している。JSTのERATO研究領域「柴田超原子分解能電子顕微鏡プロジェクト」(2022～)では、極低温から高温までの温度領域において原子スケールの構造および電磁場分布を同時に観察する技術開発が進められている。文部科学省世界トップレベル研究拠点(WPI)プログラム「金沢大学ナノ生命科学研究所(NanoLSI)」(2017～)では、三次元原子間力顕微鏡(3D-AFM)によって細胞内部を観察するナノ内視鏡技術を開発している。さらに、次世代放射光施設NanoTerasuが2024年より利用可能となる予定であり、コヒーレント軟X線をプローブとするナノ・オペランド計測が様々な材料開発に活用されることが期待される。このように、日本は独自の計測技術や大型研究施設を有していることに強みがある。一方、計測分野における日本の地位は低下してきており、新しい計測原理の創出、計測と情報の融合、マルチモーダル計測、等、計測・分析を革新する取り組みの強化が必要である。

「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。ナノテクノロジー・材料分野において物質・材料シミュレーションを活用したグローバルな研究開発競争が激化するなか、日本では、フラッグシップスーパーコンピュータ「富岳」による超大規模計算・データ解析環境、マテリアルDXプラットフォーム構想によるデータ有効活用環境などのインフラの整備だけでなく、JSTのERATO研究領域「前田化学反応創成知能プロジェクト」(2019～)、JSTのCREST研究領域「実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新」(2017～)等、物質・材料シミュレーションの応用研究を牽引するプロジェクトが進行している。さらにJSTの「科学技術人材育成のコンソーシアムの構築事業」などによってハイパフォーマンスコンピューティング技術を駆使して物質科学分野の課題に取り組む人材の育成が推進されている。

### 1.3.3 わが国として重要な研究開発

本項では、国内外の社会・経済の動向や研究開発の現状、今後の展望などを俯瞰した中から見えてきた、わが国として今後重要となる研究開発について記述する。

#### ① 重要な研究開発

以下の3つの観点から、重要な研究開発を特定した。一番目の観点は、「社会の変化がもたらす科学技術への要請」である。カーボンニュートラルに代表されるように、国際的に合意された大きな流れを具現化するために、必須となる科学技術である。国際的な連携や国際的な優位性確保の観点からも日本が積極的に取り

組むべき研究開発が含まれる。二番目の観点は、「科学技術の新たな潮流出現に伴う戦略的投資の必要性」である。直近の発見やブレークスルーによって急激に研究開発が進展しており、将来的に新たな科学分野の創出や大きな応用につながる可能性が期待される研究開発である。その進展も早いと、早期から機動的に推進すべき研究開発が含まれる。三番目の観点は、「日本の産業競争力と安全保障の観点で重要な技術の確保」である。経済安全保障や国家安全保障など、わが国が直面している国家的課題に対処するために必要となる科学技術からなる。一番目の観点がグローバルな視点における社会からの要請であるのに対し、この観点は国家視点からの要請である。

図1.3.3-1には、以上の観点により特定した12の研究開発と、それらが3つの観点のどれと関連が深いかをリストにしている。以下、それぞれの研究開発の内容を説明する。

研究開発	キーワード	特定上の観点*		
		社会の変化	科学技術の潮流	産業/安全保障
1 先進半導体材料・デバイス技術	低次元材料、三次元集積、先端プロセス適応	○	○	○
2 量子特有の性質の操作、制御、活用	量子コンピューティング、古典インターフェース、トポロジカル材料、スピントロニクス		○	○
3 電気-物質エネルギー高度変換技術	蓄電デバイス、水素製造、燃料電池	○	○	○
4 マルチスケール熱制御技術	フォンエンジニアリング、熱-量子カップリング、IC放熱、断熱・蓄熱材料	○		○
5 資源循環と炭素循環を両立する材料技術	元素戦略、LCA (カーボンフットプリント、マテリアルフロー)	○		○
6 生体適合性の拡張的理解と制御	免疫回避から免疫寛容へ、細胞力学応答の検出と制御、ウェアラブル/埋め込みデバイス	○	○	
7 生物機能を活かすハイブリッド材料	生体物質表面修飾、細胞センサー、微生物内含治療薬、微生物融合自己修復建材	○	○	○
8 ナノスケール高機能材料	ナノカーボン、二次元材料、MOF、超分子、有機無機ペロブスカイト、準安定材料	○	○	
9 極限環境下の高信頼性材料	高温耐性 (航空・プラント)、超軽量 (航空、車載)、対放射線	○		○
10 マテリアルDX基盤技術	計算物質科学、データ科学、ハイスループット実験、データ共用ルールデザイン		○	○
11 オペランド・マルチモーダル計測	オペランド計測、マルチスケール計測、マルチモーダル計測、非破壊計測		○	
12 新物質・新材料の戦略的ガバナンス	リスクマネジメント・ELSI/RRI/国際標準	○	○	○

\* 社会の変化：社会の変化がもたらす科学技術への要請、科学技術の潮流：科学技術の新たな潮流出現に伴う戦略的投資の必要性、産業/安全保障：日本の産業競争力と安全保障の観点で重要な技術の確保

図 1.3.3-1 重要な研究開発

### (1) 先進半導体材料・デバイス技術

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ー採用が、本格的に求められている。2 nm 世代あたりで登場予定のシリコン系のナノシートを、その先の世代で置き換えることが期待される二次元材料、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重要である。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次元的、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る技術の開発も注目を集めている。



## (2) 量子特有の性質の操作、制御、活用

ここで扱う量子特有の性質とは、半導体物理のような多数の電子による統計的な量子の性質ではなく、少数の量子が示す「状態の重ね合わせ」や「量子もつれ」のような性質を指している。そのような性質を動作原理として利用した量子コンピューティング、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化が今後とも求められている。さらに、そうした量子特有の性質の舞台となる物質や、その性質を使える形で制御したり引き出したりすることも重要な研究開発課題となる。トポロジカル物質やスピントロニクス材料、さらに、低温動作のCMOSを介した接続や量子と古典とのインターフェースなどがそうした例にあたる。また、いわゆる量子技術そのものではなくとも、量子特有の性質を顕在化させ、操作、制御、活用するための、高周波技術や低温技術などの周辺技術の工学的完成度を高めていくことも重要な要素となっている。

## (3) 電気-物質エネルギー高度変換技術

カーボンニュートラル社会の実現には、再生可能エネルギーの電力を高度に活用する必要があるが、現有のテクノロジーの自然な発展だけでは21世紀半ばでのカーボンニュートラル実現は困難だと考えられている。求められているのは、再生可能エネルギーとして生み出される電力を、社会基盤と整合する形で最大限有効活用する技術である。次世代蓄電デバイスとして、全固体型に代表されるリチウムイオン電池 (LIB) や、リチウム空気電池、リチウム硫黄電池、リチウム以外のアルカリ金属や多価イオンを使った電池などが活発に研究開発がされている。また、電力と物質の化学エネルギーを相互変換することにより、電気エネルギーの蓄積・放出を行う、水電解、燃料電池などの技術の深化や、電力を用いて二酸化炭素や窒素から、炭化水素やアンモニアを直接合成する技術も注目に値する。

## (4) マルチスケール熱制御技術

高機能化するIT機器においてデバイスが発生する熱の処理は大きな問題になっており、エネルギー有効利用の観点からも200°C以下の低温排熱の有効利用は社会的に大きなニーズがある。こうした課題やニーズに応える技術として、熱を精密に制御するフォノンエンジニアリングと総称される技術群がある。これまでは、ナノスケールで発生する熱 (フォノン) をナノ構造を用いて制御するような研究開発が進展してきたが、今後はこのような方法論をメソ~マクロスケールまで拡張し、マルチスケールに熱流を効率的に制御するための技術開発が求められる。半導体デバイスの発熱領域からの効果的な放熱や、熱電変換デバイスの熱伝導の抑制、熱流計測などの幅広い応用を持っている。さらに、エネルギー有効利用に関して重要な蓄熱技術にもつながるため、熱を「流す」「せき止める」「貯める」を制御する技術として注目されている。

## (5) 資源循環と炭素循環を両立する材料技術

古くからの課題である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CO<sub>2</sub>二酸化炭素削減は、ともに、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ようとするものである。これまで日本が国家的に遂行してきた元素戦略は、特に前者に関して包括的に取り組んできたものであり、数多くの課題に貢献をしてきた。また、今後は、炭素循環を取り込みながら、その取り組み範囲を広げていく必要がある。具体的には、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り、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である。また、さらに必要となるのが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、LCA (Life Cycle Assessment) 的な視点であり、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である。様々な分野の専門家が結集して取り組むことが必要となる。

## (6) 生体適合性の拡張的理解と制御

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。また、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、埋め込み型・ウェアラブルデバイスなど、多様化が進んでいる。そこで、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）を回避する材料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、さら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材料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た。材料と生体との相互作用を多面的に、かつミ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。

### (7) 生物機能を活かすハイブリッド材料

非生物起源の材料と生物由来材料を合わせることで、生物機能を備えた、あるいはそれを効率的に引き出した人工材料の創出が求められている。具体的には、表面を生物由来の物質で修飾することで酵素活性や生体適合性等を付与した材料、環境刺激に応じて薬用物質を生産する微生物を含有した治療薬、微生物や酵素を使った燃料電池、微生物を組み込んだ自己修復材料などが特に注目されている。医療・ヘルスケアだけでなく、エネルギー生産、環境浄化、構造材料など幅広い応用に期待がされている。

### (8) ナノスケール高機能材料

その構造がナノメートルスケールで人為的に設計・制御された物質群は、バルク材料では得られない特異な性質を示すことから、様々な分野でその性質の応用が検討されている。半導体デバイスのようなトップダウン構造作成ではなく、分子・原子のレベルからボトムアップ的に形成された構造物である。具体的には、フラーレン、グラフェン、ナノチューブなどのナノカーボン、遷移金属カルコゲナイドに代表される二次元物質、MOF (Metal Organic Framework)・超分子・有機無機ペロブスカイトなどの複数のユニットからなる構造物や、原子や分子が数十～数百ナノメートルサイズに集まったナノ粒子などがある。また、ナノスケールの準安定構造をもつ材料も興味を集めている。物質の吸着・分離やエネルギー変換などを始めとしたさまざまな応用が検討されている。

### (9) 極限環境下の高信頼性材料

ジェットエンジンやガスタービンなどに使われる高温・高強度材料や、航空宇宙用途に使われる高比強度（軽量高強度）材料の他、腐食性の強い環境、強い放射線が存在する環境などに使われる材料を指す。古くから研究対象とされてきたが、エネルギーの効率利用、新しいエネルギーインフラの登場、社会インフラのリプレイスや長寿命化の要請などから、材料面での改善が強く望まれている。これら極限環境材料は、国の重要なインフラで利用される局面が多いため、安全保障の観点から重要性が高まっている。また、新たな材料ニーズとして、電磁閉じ込め型核融合の炉壁や炉内構造物向けの材料、水素社会実現に向けた耐水素脆化材料なども求められている。

### (10) マテリアルDX基盤技術

膨大なデータを活用する材料開発は、材料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な手法開発がある。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る。

### (11) オペラント・マルチモーダル計測

物質材料科学の進化は、観測データの高度化や充実が引き起こしてきた。より微細なものが、より高い時間分解能で観測できることによって、材料・デバイスの改良や新規開発の指針となる。また、最近の計測ニーズは、動作中のデバイスや生物を動作したままあるいは生きたままで観測することに集まってきており、特別な試料調整や特殊環境の利用をしなくてもよいオペラント計測に期待が高まっている。さらに、物理的に一つのプローブだけでは必要な情報が得られない場合も、電子と光といった複数のプローブで同時計測することで情報量を増やし必要とする知見を与えてくれるマルチモーダル計測にも注目が集まっている。計測手法の開発にはハードウェアの開発に加え、データ科学を駆使したデータ処理手法の開発も極めて重要である。

### (12) 新物質・新材料の戦略的ガバナンス

欧州を中心に先端材料、特にナノマテリアルの安全性確保に係るアプローチや規制の枠組み構築等が進んでいる。こうした動きは日本企業が海外へ材料を輸出する際に影響を受ける。日本で開発が盛んなナノ粒子やナノファイバー等に関しては、欧州が安全性評価ツールの開発に先行する。国際的に安全性検討が進められる一方で、国内関係者・開発者は対応に必要な基本的な知識・ノウハウが不足している懸念がある。安全性に対する活動の低下を防ぎながら、海外への輸出・ビジネスの国際展開に際し、対象国・地域の規制対応を適切に行うことが求められる。日本では、毒性学者や国際標準化活動を担う専門人材・組織が特に限られている。社会実装に際してのリスクを最小限にするためには、研究開発段階から大学や国研の毒性研究者が参画した安全性評価研究が重要となる。また、産業界の状況をおさえた戦略的な国際標準化提案や審議対応には、関係する国内審議委員会等が横断的に連携・調整することが重要である。日本のナノマテリアルの安全性対応や評価データの蓄積、社会との対話・コンセンサス形成に、産官学が協調して臨むことが重要となる。

これら12の研究開発を図1.1.3-1 俯瞰図にマップしたものが、図1.3.3-2である。

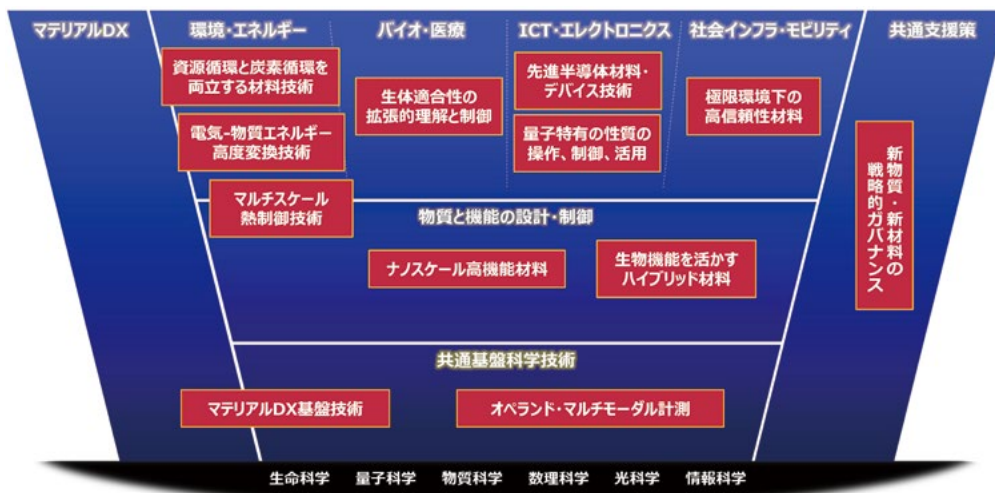


図1.3.3-2 重要な研究開発マップ



## ② 研究開発体制・システムのあり方

### (1) 大型研究開発拠点

ナノテク・材料分野の研究開発の最先端では、観察・評価・加工・制御のすべてのフェーズにおいて、分子・原子スケールの微小領域までをその対象範囲としている。そこに必要となる技術はかつてないほど精緻で大きかりなものとなっており、これらを可能にしたのは、多くの専門分野にまたがる叡智の多年にわたる結集である。これほどの広い専門性をカバーする研究者集団、高額な装置と、その性能を最大限に引き出せる技術スタッフを、単独の研究機関や企業で確保することは、いずれの国であろうとも困難な事業となる。

一方で、これまでに述べてきたように最先端の研究開発は世界的な大競争の状態にあり、開発スピードへの要求は高まり続けている。そこで、大規模かつ持続的な投資が必要でありながらも、以下のようなメリットを享受できる大型研究開発拠点を活用したオープンイノベーション指向の研究開発が実施されている。

#### 【大型研究開発拠点のメリット】

- ・ 複数企業・研究機関の参画により、コストやリスクの分散が可能。
- ・ 多様な専門性を持つ研究者集団が形成される。
- ・ 特定法人だけでなく共用の利用環境とすることで、中立性・公平性が高まり、国家計画等と歩調を合わせることや、具体的な研究開発プログラムへの参画など、活動の発展性が見込める。
- ・ 知財の相互利用や持続的な蓄積の仕組みを作ることができる。

世界の大型ナノテク研究開発拠点としては、欧州のIMEC (Interuniversity Microelectronics Centre)、MINATEC (Micro and Nanotechnology Innovation Centre)、北米のAlbany Nanotech Complex (ANT)、中国の蘇州工業園区 (SIP) などがある。これらの拠点では、大学・国立研究機関と、デバイスメーカー、製造装置メーカー、材料メーカーなどが集結し、次世代のデバイスやプロセスを開発するためのエコシステムを形成している。当初のターゲットであった先端半導体デバイスから、エネルギーデバイス、人工知能向けデバイスなどの新たな研究開発プログラムを次々と立ち上げ、世界中から参加者と投資を募って活動している。

以下、代表的研究拠点の概要を記す。

IMECは、1984年に設立されたナノエレクトロニクスの国際的な研究請負機関である。世界90か国から、4000人以上の研究者が集まって最先端テクノロジー開発を行っているが、それぞれの参画団体が対等な立場で協業する水平分業型の性格を持つ。

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。元々は、先端半導体の微細化を目指す研究テーマが主であったが、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、以後、研究対象分野を大きく広げている。以前からの強みであったデバイス製造技術とiMindsのソフトウェアを融合させ、AI、車載、健康・医療、エネルギー、スマートシティなどの用途向けデバイス開発まで幅幅広い活動を展開している。

日本からは、東京エレクトロンやSCREENをはじめとする製造装置メーカーの他、住友化学、JSR、などの材料メーカーも参加している。また、2022年には、新興のLSI製造ベンチャー RapidusもIMECと協業することを発表した。

MINATECは2006年6月に、フランス原子力委員会電子情報技術研究所(CEA Leti)とグルノーブル工科大学(Université Grenoble Alpes)とのパートナーシップとして発足した。20ヘクタールの敷地に研究

者3000名、学生1200名、産業界の技術移転専門家600名を集め、13000平方メートルのクリーンルームを持つ、グルノーブルの産学官集積クラスターの中心である。イノベーションキャンパスには、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。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、①International visibility、②Ecosystem generation、③Economic impact、の3つを重視しており、これらを高めていくための運営に集中している。

Albany Nanotech Complexの母体の一つにSEMATECHがある。SEMATECHは、日本が1980年代に実施した超LSI技術研究組合の成果により半導体産業の競争力を増したことに学び、日本に対抗できる技術力を得るために米国商務省と国防総省の補助金により設立された。当初は、米国内の主要半導体企業14社によって構成されたロードマップ策定と日本に遅れを取っていたCMOS製造技術開発を目的としたコンソーシアムであった。その後、1990年代には米国の半導体企業は競争力を取り戻し、SEMATECH設立当初の目的は果たされたことや、主要企業の一翼であったインテルが抜けたことなどで、SEMATECHの運営形態は第二フェーズに移った。産業界はIBMが実質的な中心となり、運営をニューヨーク州が引き受けると同時に海外企業の参画も見とめるようになった。ANTが置かれるSUNY-CNSE（State University of New York - College of Nanoscale Science and Engineering）は、2002年の建設開始以降、総額80億USドル以上を投資して現在に至る。参画企業からの要請に応えるかたちで年々拡大した13000㎡規模のクリーンルームを筆頭に、雇用者の人件費を含めた年間の維持費は毎年200億円以上とされる。NY州政府が約半分を支出し、企業が半分を拠出している。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、プロトタイプ作製、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。IMECとは性格が異なり、ANTはIBMを頂点とする垂直統合型の研究開発拠点で、最近でも、世界に先駆けて2 nm世代のナノシート構造FETを実証するなど、活発な研究開発を行っている。日本のRapidusもこの技術を元にした開発を行う。

アジアにおいては中国の動きが活発である。蘇州において、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区（SIP）が、周到な都市計画の元で作り上げられてきた。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他、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きている。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。また、量子技術への投資も積極的に行っており、2017年には、量子技術の中心的な研究開発拠点として安徽省合肥市に総工費70億元（約1280億円）もいわれる「量子情報科学国家実験室」を建設する計画が発表され、同年7月には、合肥研究拠点の中核施設として「量子情報・量子科学技術イノベーション研究院」が安徽省と中国科学院によって設立された。中国はこの他にも中国科学技術大学や清華大学にも量子関連の研究センターを設立し、量子コンピューティング、量子暗号・通信、量子情報の研究を盛んに行っている。

日本の研究開発拠点としては、つくばイノベーションアリーナ（TIA）がある。2010年に、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）」が母体となり、ここに2016年度に東京大学が参画し活動範囲を広げるとともに、名称をTIAと変更した。主な活動としては、ナノエレクトロニクス、パワーエレクトロニクス、MEMS、ナノグリーン、光量子計測、バイオ・医療などの研究開発事業と、人材育成、共用施設ネットワークなどがある。また、また、2016年度より中核5機関の研究者が連携して将来のイノベーションに繋がる新たな研究領域の探索を行うために、TIA連携プログラム探索推進事業「かけはし」を開始している。2022年度には、医療・バイオ、エレクトロニクス・デバイス、グリーン、計測、材料・加工、基

盤の分野で52の課題が活動している。2020年には東北大学が参画するとともに、「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。この中では「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 中核機関に留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している。

また2021年から、TIAが管轄するつくば産総研西のSCR (スーパークリーンルーム) において、政府からの委託を受けたNEDOが民間企業や研究機関、大学などへ委託する形で事業を推進する「ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業 — 先端半導体製造技術の開発」が推進されている。その中においては、SCRで行われる2 nm世代以降のロジックICを対象とした前工程プロジェクトと、SCR棟に隣接して建設した高機能IoTデバイス研究棟で行われる3D ICを対象とした後工程プロジェクトが並行して進められることとなっている。参画する事業主体が異なるため両工程のプロジェクト間で直接の協業はないが、近接した場所で研究開発を行うことで今後の協力体制への期待もかかる。

これまでの日本の拠点運営は、国内のイノベーションハブとしての機能が徐々に高まってきているものの、IMEC、MINATECなどに比べて教育・人材育成の面の弱さ、コア技術開発が日本企業だけで多様性が不足、海外からのユーザー・ニーズが取り込めない、産業界に対するPRが弱い、といった課題も指摘されてきた。しかし、かつて課題とされていた、最先端の半導体製造設備がなく既存設備も老朽化しているといった指摘は、「ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業」の中で解消され、さらに、同プログラムに海外企業の参画も予定されているため、今後は違った形の発展が期待できる。TIAが世界の強力な半導体開発拠点に伍してどこまで競争力を持ち得るのかは、国のエレクトロニクス研究開発政策の位置づけにも依存し、各セクターの意志と行動にかかわる課題である。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する長期的なエコシステムにしていく必要がある。

## (2) ナノテクノロジーのプラットフォーム

米国、韓国、フランス、ドイツ等は、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)、韓国のKAISTを中心に全国6箇所に設置されているナノ総合技術院 (旧ナノファブ・センター) はオープンな研究開発インフラとして課金制や国際対応がほぼ完成している。また、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。

日本においては、2012年度から10年間の計画で開始した文部科学省のナノテクノロジープラットフォーム (以下ナノプラ) が、それ以前の10年間に行われた拠点形成事業に見られた多くの課題を解決し、ユーザの成果に大きく貢献した。課題を持つ産官学のユーザに対して、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、技術代行、技術補助、機器利用、技術相談などのサービスを有償で提供した。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による連携・融合を進め、新しい科学技術やビジネスが生まれる構造を醸成することにつながった。ナノプラの利用件数は、COVID-19の感染拡大前に年間3000件程度、行動制限等もとも厳しかった2020年においても2500件程度をキープしており、ナノテク・材料研究における基本的なインフラとして定着していることがわかる。最終的に10年間で、延べ27000件の利用研究課題があり、利用を通じて創出された9500報の論文、28000件の口頭発表、700件の特許出願へ貢献している。

2022年からは文部科学省のマテリアルDXプラットフォーム構想において、マテリアル先端リサーチインフラ (ARIM : Advanced Research Infrastructure for Materials and Nanotechnology in Japan) が活動を始めた。ARIMはナノプラの機能を引き継いだうえで、装置利用から生まれたマテリアルデータを利活用可



能な形式で蓄積・提供（広域シェア）する機能を担っている。

ARIMは、センターハブの物質・材料研究機構と、東北大学、東京大学、名古屋大学、九州大学、京都大学の5つのハブ機関に加え、ハブと連携してARIMの機能を担う19のスポーク機関による、全国25法人で構成される。ハブ機関は、政府の材料革新力強化戦略にもとづく7つの重要領域「高度なデバイス機能の発現を可能とするマテリアル（東北大学）」、「革新的なエネルギー変換を可能とするマテリアル（東京大学）」、「量子・電子制御により革新的な機能を発現するマテリアル（物質・材料研究機構）」、「マテリアルの高度循環のための技術（物質・材料研究機構）」、「次世代バイオマテリアル（名古屋大学）」、「次世代ナノスケールマテリアル（九州大学）」、「マルチマテリアル化技術・次世代高分子マテリアル（京都大学）」を担当している。

ナノプラ10年の経験・ノウハウを活かし、共用設備をユーザの利便性を最大にすべく運用しながら、マテリアルDXプラットフォーム構想のデータを基軸としたマテリアル開発にも重要な役割を果たすべく、機能改良を通じた体制強化が続く。

### (3) 研究開発のDX化

ようやく終息に近づいたかに見えるCOVID-19パンデミックは世界経済に大きなダメージを残したが、各方面のDXを急速に進展させた契機ともなった。ビジネス活動の中には、実際に人や物が移動しなくても問題なく進む部分があることが露わに示され、パンデミック終息後にも、対面に戻さない方が効率的な業務はリモート化されたままである事例も多い。研究開発に関しても、パンデミックの最中からDX化への切り替えが急速に進み、それによって向上した利便性は、コロナ禍終息後も研究開発効率の向上に貢献している。

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、COVID-19による研究開発環境の変化を、進化・高度化としてとらえるべきであることを述べた。多くの学会・研究会がハイブリッド化され参加者の利便性が上がったことや、国内外とのオンラインミーティングが距離を気にせず気軽に行えるようになったことなどは、情報の共有やオープンサイエンスの促進に役立っている。また、実験装置の自動化や遠隔制御の進展は、実験を含む研究効率向上にも役立っている。

また、前述のマテリアルDXプラットフォームが行う「データを基軸としたマテリアル研究」は、ハイスループット実験や高速な物質科学計算から得られるデータをAIやデータ科学により解析して、研究開発の効率化・高速化・高度化を行い、これらを通じた研究開発環境の利便性を向上させることを目指している。データ利用により見い出された、新奇で画期的なマテリアル創出の具体的事例を増やしていくことが重要である。

### (4) 研究開発人材の確保

研究開発人材の不足は、現在学生に人気の高い一部の分野を除く、ほとんどすべての研究開発分野で起きている。博士取得者が豊かなキャリアパスを描けるようにする方策、理工系学生の博士進学率を上げる方策、諸外国に比べて極端に女性比率が低い状態を改善する方策、初等教育の段階から児童・生徒に対して理工系への興味を引き付ける方策など、様々な年代、様々な角度からの支援策が、検討、あるいは実行に移されている。博士を取得して研究者として活躍する人材が、諸外国に比べて少ないというデータから、こうした取り組みはその効果を適切に評価しながら今後も進めていく必要がある。

一方、研究者を指向する人材だけでなく、研究開発の現場を支える技術者等の育成確保もまた重要な課題である。研究者向けの人材育成策だけでなく優秀な技術者・技能者も同時に育成していく必要がある。

前述の、ナノプラの成功を支えた大きな要素として、技術専門人材が多く参画している点がある。最新の機器を備え、それをユーザ研究者が自由に使えるだけでは成果を創出するプラットフォームとしては機能しない。事業参画人員の過半数を技術専門人材が占めていたナノプラにおいては、技術者が継続的にユーザの研究開発課題をサポートしていくことで、技術者個々人の中に高度なスキルが蓄積され、そのスキルがさらに高度な

サポートを可能にするというフィードバックがうまく回ったといえる。技術者のスキルが上がるごとにインセンティブとなるキャリアパスについても制度的に考えられていたことが、成功の鍵であった。ARIMにおいても、同様な技術者が中心となって活躍する体制および育成の制度は引き継がれている。

このような研究開発人材のポートフォリオを考慮した、人材育成策がより深く論じられ、ダイバーシティに富んだ、理工学人材プールを作ることが、ナノテク・材料分野の研究開発には特に重要であろう。