

社会の要請・ビジョン

社会を支える先端テクノロジー

- 私たちの生活を支える様々な素材・製品やシステムに、ナノテクノロジーや先端材料技術が利用されている。
- 米中の技術覇権争い、COVID-19パンデミック、ロシアによるウクライナ侵攻などに起因するグローバルサプライチェーンの変動により、先端技術の国内確保が求められる。(先端半導体技術など)
- 技術競争力の下支えとして企業や学術における基礎研究の精査と維持が必要。

カーボンニュートラルの実現

- SDGsの17の目標達成に向けた取り組みが続く。このうち、エネルギー、持続可能な消費・生産、気候変動対策は、カーボンニュートラルの動きにも呼応して、世界各国で対応が進む。
- 化石燃料代替のエネルギー利用手段（太陽電池、蓄電池）、省エネルギーを旨とした各種デバイス・システム（パワー半導体、モータ用磁石・磁性体）、CO₂吸収や利用手段としての各種電気化学セルや分離膜などについて、特にナノテク・材料技術の貢献が期待される。

超高齢社会、多様化する医療・ヘルスケア

- 超高齢社会の進行を背景に、健康寿命の延伸のため「疾病の超早期診断」や「身体機能の修復・代替・拡張」がより重要に。
- COVID-19パンデミックを契機に、感染症対策やポイントオブケア、セルフケアに関するヘルスケアニーズが多様化。
- COVID-19 mRNAワクチンで成功を収めたナノ医薬は、その製造上の利点もあり、今後も多様なワクチンや医療目的に向けた開発が期待される。

社会・経済の動向

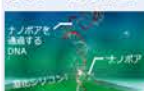
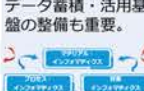
経済的側面

- 米中貿易摩擦などによる地政学的リスクや全世界的な健康リスクが顕在化。
- 経済安全保障の重要性が高まり、製品の原材料や製法を含むバリューチェーンの再検討が必要に。日本が強みを有する部素材産業の展望に不透明さが伴う。
- 日本は、研究開発主導型のハイテクノロジー産業やメディアムハイテクノロジー産業の割合が高い。ナノテク・材料分野に関連する自動車、機械装置、電子機器、電気機器、化学製品の合計の産業貿易収支比（輸出額÷輸入額）は主要国中第1位を維持しているが、近年低下傾向にある。

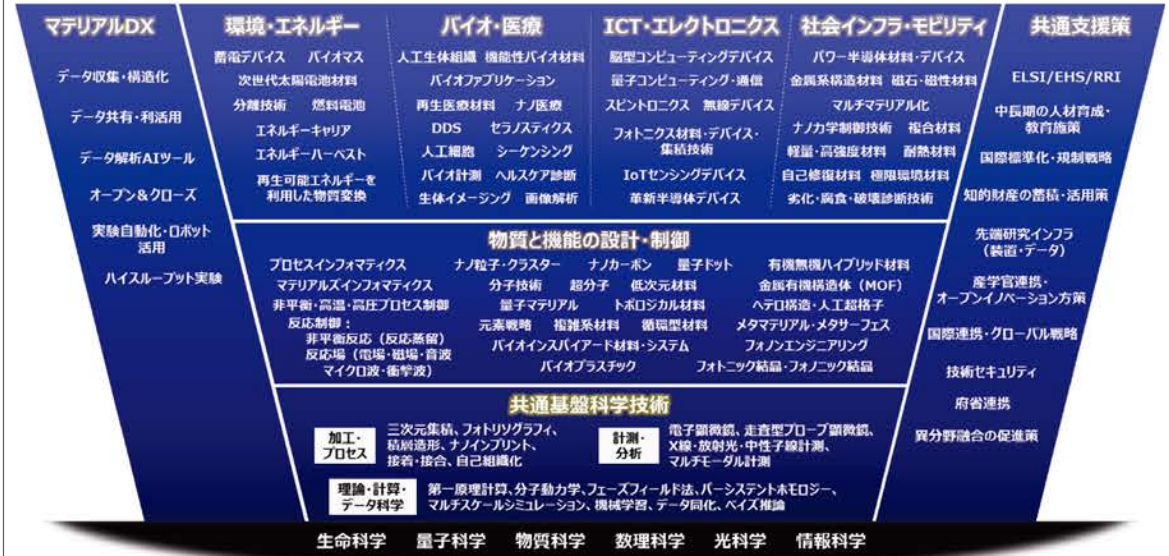
社会的側面

- 経済安全保障の4つの柱（①サプライチェーン確保、②重要インフラとデータ保護、③重要技術の流出防止、④重要技術の開発強化・支援）について、日本を含む各国が取り組みを始めている。
- 欧州を中心にナノ材料の登録規制や評価基準の規定が進み、対象が先端材料（アドバンストマテリアル）まで広がる。当該材料・製品の輸出入に影響を与え得る。
- 経済安全保障を背景に、アカデミアで国際連携や高度外国人人材の活用に慎重になるケースが見られる。研究開発のフェーズ、秘匿区分に応じた情報管理、輸出管理などに配慮しつつ、国際協力を図っていくことが必要。

世界の研究開発トレンド

蓄電デバイス 全固体型、金属-空気など次世代リチウムイオン電池が進展。Naイオン、多価イオン、Li-Sなど革新電池にも期待。  全固体電池 (LIBTEC)	再生可能エネルギーによる物質変換 再生可能エネルギーを用いた水素等の燃料・化成品合成技術が進展。高効率プロセスのための触媒、電解質探索が加速。  大型水電解システム (触化成)	mRNAナノ医薬 様々な感染症に対するmRNAワクチンや、がん免疫療法、ケム薬治療などに向けたmRNAナノ医薬の開発が加速。  多様な医薬ナノ粒子 (東大)	生体分子シーケンス 核酸配列に加え、タンパク質配列や分子の高分次構造・修飾などを検出する技術が発展。特に1細胞・1分子レベルの検出へ。  ナノポアDNAセンサー (阪大)	先端半導体 CMOSを超える新構造・新動作原理のデバイスを開発し、超高速・超低消費電力でデータ処理する集積システムの実現へ。  FETの構造
脳型AIチップ 低消費電力のAIチップ開発で、デジタル・アナログNN回路、コンビューテインメモリ、ニューロモルフィックなどが進展。  DNN推論アクセラレータ (東工大)	量子コンピューティング 超伝導量子ビット数拡大、周辺エレクトロニクス、古典とのハイブリッドなど、実用的な量子計算実現への開発が活発。  量子コンピュータ (© RIKEN Center for Quantum Computing)	次世代パワー半導体 SiC、GaNが実用化。デバイス高性能化、ウェハの大口径化へ、Ga ₂ O ₃ などワルトラワイドバンドギャップ半導体の開発が活発化。  Ga ₂ O ₃ トランジスタチップ (NICT)	データ駆動型材料設計・創製 データ科学と実験科学・計算科学・理論科学の連携で物質設計・創製を革新。データ蓄積・活用基盤の整備も重要。  ML, PI, 計測インフォを連携	低次元・トポロジカル材料 低次元性やトポロジに起因する特徴的電子状態を活かし、次世代の電子デバイスやエネルギー変換デバイスとして期待。  トポロジカル光電発光素子 (理研)

ナノテクノロジー・材料分野 研究開発俯瞰図



日本の現状・課題

総論

- エネルギー材料、電子材料、複合材料などの材料設計・製造で長年の技術蓄積による強みがある。
- 精密機械・計測・分析・評価・加工技術に関しても、強みを有する技術が多数存在する。
- 基礎研究の強みを国際的に競争力のあるビジネスへ展開できない傾向が見られる。
- データ科学、標準化・規制戦略、産学連携、ナノ物質・新物質のELSI/EHS/PRRI、人材育成に課題。

環境・エネルギー応用

- カーボンニュートラル、資源循環型社会の実現の鍵となる分野であり、日本は長年の技術蓄積による強みがある。
- 日本は、太陽電池、蓄電池、水素等の分野で高い基礎研究レベルにあり、近年GI基金等で応用研究も加速。
- 世界的に研究開発が活発化しており、相対的なプレザンスの低下が懸念される。

ICT・エレクトロニクス応用

- デジタル化社会を支える技術分野であり、欧米がリードし中国の追い上げが激しいが、日本もスピントロニクスや量子技術などの基礎研究で高いレベルにある。
- 先端的な半導体デバイス・製造技術の獲得、研究開発力の強化、半導体人材の育成が日本の課題である。
- 半導体産業強化政策に歩調を合わせた長期的な研究開発施策、先端技術開発が可能な共用施設が必要である。

物質と機能の設計・制御

- ナノテク・材料分野の中核をなす研究領域が含まれ、日本は長年の技術蓄積による強みを有する。
- 日本は基礎研究では活発な研究が行われているが、応用研究・開発では欧米と比較するとやや劣勢にある。
- データ駆動型物質・材料開発の動きが世界的に高度化・活発化している。特に中国の上昇傾向が著しい。

バイオ・医療応用

- 超高齢社会に突入し、ヘルスケア・医療ニーズの多様化・高度化に応じた技術の開発と実装が求められる。
- 日本はバイオ材料、ナノ医薬、バイオ計測、生体イメージングなどの分野で高い基礎研究レベルにある。
- 実用化研究では遅れをとる傾向もあったが、近年支援体制が充実してきており、今後の伸びに期待。

社会インフラ・モビリティ応用

- 交通インフラや電力・通信網、上下水道など社会インフラやモビリティを支える技術分野であり、近年重要性を増しており、日本は高い研究レベルを保っている。
- 材料の長寿命化、システムの省エネ化、地域偏在元素の使用削減などが共通する課題である。
- 日本は基礎研究で優位性を維持しているものの、応用研究・開発では欧米中にやや劣勢にある。

共通基盤科学技術

- 材料、製造装置等の強みを生かした海外との連携による最先端の微細加工・半導体製造技術の再構築に期待。
- 次世代放射光施設NanoTerasu等、最先端計測技術開発が研究力・産業競争力強化の源泉となっている。
- 富岳の大規模計算や先端共用設備から生まれる高品質データ等を活用するための基盤整備が進められている。

主要国における基本政策・国家戦略動向

米国 国家ナノテクイニシアティブ (NNI) を20年以上継続。NNI戦略計画2021では、教育・人材拡大・パブリックエンゲージメントの取り組みを強化。MGI (Materials Genome Initiatives) 戦略計画2021では全金属材料データネットワークの構築を掲げる。The CHIPS and Science Act (2022年) により半導体関連研究開発に投資。重要鉱物を含むサプライチェーンの見直しに関する大統領令を発表し (2021年)、重要鉱物サプライチェーン研究施設開発を発表 (2024年)。

欧州 Horizon 2020の後継としてHorizon Europe (2021~2027年) を開始。Graphene Flagship、Quantum Flagshipを継続中。Battery 2030+イニシアティブが2019年から始動。2022年に「半導体法 (A Chips Act for Europe)」、2024年に「Advanced Materials for industrial Leadership」を発表。ナノマテリアルのELSI/RRRI/国際標準化を先導。

中国 第14次五力年計画 (2021~2025年) に基づく科学技術政策を開始。基礎研究投資を拡充し、研究センター等を重点整備。中国製造2025、国家標準化発展要綱など「製造強国」「品質強国」を目指した戦略的産業振興を掲げる。

アジア 韓国は第5期科学技術基本計画 (2023~2027年) を掲げる。ナノテク政策では第4期ナノ技術総合発展計画 (2016~2025年) を運営中。K-半導体戦略 (2021年)、半導体超強大國達成戦略 (2022年)、K-バッテリー発展戦略 (2021年) を発表。台湾では半導体研究開発の5拠点を設置。ナノマテリアルのELSI/RRRI/国際標準化にも注力。シンガポールでは、RIE2025で科学的基盤を重点化。付加製造技術や量子技術の研究拠点が進展。

わが国として重要な研究開発

「社会の変化」、「科学技術の潮流」、「産業/安全保障」の3つの観点から、今後重要な研究開発を特定した。

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/AI機器などに向け、従来よりも格段に高速・大容量・低消費電力に動作する半導体デバイスを実現する新しい材料や回路アーキテクチャー、チップ構成技術を開発。

2. 量子特有の性質の操作、制御、活用

「状態の重ね合わせ」や「量子もつれ」など、量子特有の性質を動作原理と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を高性能化。性質の顕在化や操作・制御・活用のため、トポロジカル材料や周辺の高周波/低温技術の開発も重要。

3. 電気-物質エネルギー高度変換技術

再生可能エネルギーを最大限有効活用するため、リチウムイオン電池をはじめとする次世代の蓄電デバイスを開発。電力と物質の化学エネルギーの相互変換技術として、水電解・燃料電池や、電力を介した二酸化炭素や窒素から有用物質への化学合成にも注目。

4. マルチスケール熱制御技術

デバイスの使用で生じる低温排熱の有効利用や蓄熱などの観点から、熱を精密に制御する技術が重要。特に、従来のナノスケールでの熱制御を図る方法論をメソ〜マクロスケールまで拡張させ、マルチスケールに熱流を制御する技術を開発。

5. 資源循環と炭素循環を両立する材料技術

希少資源の代替/使用量削減/分離・回収に関する技術、ならびにその基礎としての易分解材料、固・液・気相での分離技術などを開発。また、Life Cycle Assessmentの視点から、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を確立。

6. 生体適合性の拡張的理解と制御

医療・ヘルスケアに利用される材料・デバイス用途の多様化、ならびに新規な材料-生体相互作用の発見により、材料の「生体適合性」を多面的かつマルチスケールに捉えることが重要。特に、生体の力学的応答も踏まえた材料・デバイス設計を展開。

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組み合わせ、生物機能を具備あるいは効率的に引き出した機能性材料を創出。高度な生体適合性や環境応答性を付与した医用材料・治療薬、生物を利用したエネルギー生産技術や自己修復性構造材料など、多様な応用に期待。

8. ナノスケール高機能材料

原子・分子からボトムアップ的に形成したナノスケール構造を有する物質は、バルク材料にない特異な性質を示し、物質の吸着・分離やエネルギー変換などへ応用可能。ナノチューブなどを含むナノカーボン、二次元物質、MOF、超分子、ナノ粒子など。

9. 極限環境下の高信頼性材料

航空・宇宙用途の高強度材料、耐腐食性・耐放射性材料など。新しいエネルギーインフラの登場や、社会インフラの長寿命化、安全保障の観点からも重要性および材料面での改善の要請が高まる。

10. マテリアルDX基盤技術

膨大なマテリアルデータの活用により、材料開発のスピードアップおよびマテリアル産業の競争力を底上げ。マテリアルに特化したデータ科学/計算科学手法およびハイスループット実験技術を開発。データの管理方法・共有ルールの確立も必須。

11. オペランド・マルチモーダル計測

デバイスの動作中や生物が生きた状態で観測を行うオペランド計測の要請が高まる。電圧や光など複数のプローブで同時計測し情報量を増やすマルチモーダル計測にも注目。計測ハードウェアに加え、データ処理手法の開発も重要。

12. 新物質・新材料の戦略的ガバナンス

ナノマテリアルの安全性確保に係るツール開発や規制構築などが欧州を中心に進展。国際的ビジネス展開に必要な知識の獲得および安全性評価研究が必要。戦略的な国際標準化提案や審議には、産学官の協調が重要。

研究開発体制・システムのあり方

大型研究開発拠点

複数企業・研究機関の参画でコスト・リスクを分散、多様な専門性の研究者を集結、共用利用環境を提供、知財の相互利用やノウハウの蓄積により研究開発を効率的に推進。日本ではつくばイノベーションアリーナ (TIA)。

ナノテク・材料の先端研究インフラ

各国・地域で先端研究インフラのプラットフォームを形成。日本では文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム (2012~2021年) および後継のマテリアル先端リサーチインフラ (2022年~)、NIMSデータ中核拠点のDICE (2021年~)。

研究開発のDX化

研究開発情報の共有・オープンサイエンスの促進、実験装置の自動化/遠隔制御の進展。マテリアルDXによる研究開発の効率化・高速化・高度化。研究開発環境の利便性向上。

研究開発人材の確保

博士課程学生・ポスドク・女性・技術専門人材など、様々な年代・角度から研究開発人材のポートフォリオを考慮し、ダイバーシティに富んだ人材プールを構築。