

## 社会の要請・ビジョン

### ■ Society 5.0の実現

- あらゆる人・コトがつながった超スマート社会の実現により、デジタル技術に立脚したビジネス、産業構造、社会システムへの変革が期待される。クラウドのサイバー世界と人々が生活するフィジカル世界をつなぐ境界領域 (CPS) を支えるコア技術として、材料・デバイスへの期待が大きい。特に、IoTデバイス、最先端半導体、自動運転、ロボット、ポスト5G通信などに注目が集まる。

### ■ グローバルな環境・エネルギー問題の解決

- SDGsの達成、人間と地球が調和する持続的な発展への取り組みが進む。特にカーボンニュートラルの動きに呼応して世界中でエネルギー政策の見直しが進む。再生可能エネルギー大量導入に向け、発電技術、電力貯蔵技術、電力変換技術などの鍵を材料・デバイス技術が握る。
- 環境面では大量生産・大量消費・大量廃棄からの脱却を掲げた循環型社会 (サーキュラーエコノミー) への取り組みが進む。大気や土壌汚染の改善・防止技術、海洋汚染 (特にナノ粒子も含むマイクロプラスチック) の改善・防止技術がクローズアップされる。物質・材料・デバイスの研究開発において、資源循環過程を考慮した最適設計、最適製造を行うことが長期的な重要課題である。

### ■ 超高齢社会、ポストコロナ社会への適応

- 高齢人口の割合が増加するなか、健康寿命を延伸するためには「健康維持」「疾患治療」「身体機能の補修・代替・拡張」がより重要になる。
- 感染症対策、未病段階における超早期診断のための生体情報モニターや簡便な在宅医療システム、難治疾患・がん・脳疾患などの根本的治療にナノテク・材料への期待は大きい。

## 社会・経済の動向

### ■ 経済的側面

- 米中の貿易摩擦や、新型コロナウイルス感染症流行拡大などによって、従来のグローバルサプライチェーンの脆弱さが明らかとなり、わが国の重要な位置を占める部材産業の展望には不透明さが伴う。
- 日本は、高度なすり合わせを必要とするシステム化製品産業、高精度技術を必要とする製造装置産業、高性能・高信頼性を実現している部品や素材 (部材) 産業に存在感を示してきた。しかし、NAND型フラッシュメモリ、パワートランジスタ、リチウムイオン二次電池 (LIB) とその構成材料、炭素繊維などここ数年でシェアが低下しているものもみられる。
- 日本の特許国際競争力に着目すると、マイクロ構造・ナノテクノロジー、半導体、基本的な材料化学、表面技術・コーティング、光学機器、有機ファイン・ケミストリー、高分子化学・ポリマーなどナノテク・材料分野と関連深い分野で高い競争力を保っているが、近年陰りもみられる。

### ■ 社会的側面

- 欧州各国を中心に、ナノ材料の登録規制や評価基準の規定が進んでいたが、近年先端材料 (アドバンスドマテリアル) のリスク評価検討が進んでいる。
- ナノテク・材料研究への外国人人材の参画を短絡的に安全保障の危機としてとらえる議論があるが、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た体制構築が重要。むしろ基礎研究フェーズでは積極的な国際連携を図ることが望ましい。
- オープンイノベーションの時代に入り、産学連携のエコシステムのあり方も変容をせまられるなかで、知的財産をどのように戦略的に取り扱いイノベーションにつなげるか、オープン・クローズ戦略など抜本的な検討が求められる。

## 世界の研究開発トレンド

<b>次世代パワー半導体</b> SiC、GaNが実用化フェーズに。Siの高性能化も着実に進む。Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、ダイヤモンドなどウルトラワイドギャップ半導体への関心が高まる。	<b>次世代蓄電デバイス</b> LIBの着実な高性能化が進む中、全固体型、金属-空気、多価イオン、リチウム-硫黄などの革新電池の研究にも進展。一部のメーカーから量産のアナウンス。	<b>バイオファブ리케이션</b> 細胞からなる3次元組織体を生体外で構築する技術が進む。組織・臓器再生、創薬などの医療用途に加えて、培養肉製造への応用にも期待。	<b>集積化</b> AI等による危険予知や状況認識には、多種多様な情報 (データ) が必要。信頼性が高く、様々なデータを取得可能なマルチモーダルセンサに期待。	<b>脳型AIチップ</b> 次世代人工知能技術に要求される高度な情報処理の実現に向け、脳構造・機能にヒントを得た情報処理技術とそのチップ化に期待。	<b>量子コンピュータ</b> 米国Google、中国科大が量子優位性を実現、と相次いで発表。米国IBMも量子ビットの高集積化に向けた開発を進めるなど、競争が白熱。
<b>循環可能な材料設計・創製</b> 材料の使い捨てから再利用へのシフトに関心が高まりつつあり、材料における結合・分解の精密制御による循環可能な材料の設計・創製への期待が高まる。	<b>多機能・複雑系材料設計・プロセス</b> 高性能化、多機能化、相反する機能の共存などを實現する複雑な組成や構造を有する新材料の設計とプロセス技術に期待。	<b>データ駆動型材料設計・創製</b> 機械学習などデータ科学的手法により物質設計・創製を革新。ロボットによる自律的探索や合成プロセスへデータ科学を活用し、材料開発期間を大幅短縮。	<b>低次元・2D材料</b> 低次元性やトポロジに起因する特徴的な電子状態を活かした次世代の電子デバイスやエネルギー変換デバイスの候補として、低次元材料やトポロジカル材料に注目。	<b>3次元微細加工</b> セルフアライメント化と高アスペクト比化が先端半導体プロセスの重要な進化軸。選択的ALDや、超高選択比加工を可能にするALEへの期待が高まる。	<b>オペランド計測</b> 材料の合成過程やデバイスの動作状態の動的計測を通じて機構を解明。高機能材料・デバイスの開発を支援。

## ナノテクノロジー・材料分野 研究俯瞰図



## 日本の現状・課題 (俯瞰区分ごと)

### ■ 総論

- 長年の技術蓄積により、エネルギー材料、電子材料、複合材料などの物質創製・材料設計技術に伝統的に強み。
- 上記を支える計測・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。
- IoT社会実現に向けたセンサ・コンピューティングのヘテロ集積モジュール技術等に強み。
- 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/RRRI、人材育成に課題。

### ■ 環境・エネルギー分野

- 再エネ利用、CO<sub>2</sub>削減、資源循環の観点から世界的に研究開発が活発化。
- 日本は、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で国プロが充実し基礎研究フェーズに強み。
- キーデバイスの研究開発に注力しすぎること、システム全体を含めた製品普及フェーズでの後れが懸念。

### ■ ICT・エレクトロニクス分野

- 日本は、新概念にもとづくエレクトロニクスの基礎研究では存在感を発揮。
- 従来産業界に蓄積された技術・人材の散逸を防ぎ、有効利用するための仕組みが課題。
- 量子技術分野では国家戦略が策定され強化されつつあるが、他国と比較すると予算規模・増え方は十分とはいえない。

### ■ 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、日本の競争力の源泉であり、活発な基礎研究が進む。
- 応用研究・開発研究では、低次元・トポロジカル材料など欧米と比較して劣勢にある研究領域も存在する。
- マテリアルズ・インフォマティクスが世界的に活発化。特に中国での論文・特許数の上昇傾向が著しい。

### ■ ライフ・ヘルスケア分野

- 日本は、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基礎研究のレベルは高い。
- 医工連携・異分野融合が不十分。安全性評価・承認取得の難しさ、ベンチャー支援制度の不足など、応用研究・開発へつなぐための支援体制の構築が課題。

### ■ 社会インフラ分野

- 日本は、金属材料、複合材料ともに研究レベルが高く、炭素繊維の生産は市場的にも圧倒的にシェアが高い。
- SIPで開発してきたマテリアルズインテグレーションによる材料設計を活かした材料機能の高性能化が期待される。
- 中国・韓国における基礎研究、応用・開発研究が活発化してきており、競争力の維持が課題。

### ■ 共通基盤科学

- 日本は、微細加工関連技術では、半導体素子製造材料、欠陥評価技術で産業優位性を維持。積層造形・レーザ加工へも力を注ぐが、欧米中が先に実用化段階にある。
- オペランド計測分野で新規計測手法の開発に貢献。
- 理論・計算では、量子コンピュータを活用した量子化学計算で先頭集団を維持する。

## 主要国におけるナノテク・材料科学技術の基本政策・国家戦略動向

- 米国では、国家ナノテクイニシアティブ (NNI) を20年間にわたり継続し、AIエレクトロニクスや量子イニシアティブに接続。データ駆動型材料設計を目的としたMaterials Genome Initiative (2011~2016年) の後継プロジェクト化に向けた動きが加速。また、希少鉱物資源対策に関する大統領令を受けCritical Materials Instituteが2018年より継続。
- 欧州はHorizon 2020において、ナノテク・先端材料をKET's (key enabling technologies) として位置づけている。Graphene Flagship、Human Brain Project、Quantum Flagshipを大型予算 (1Bユーロ) で推進。2021年に開始されるHorizon Europeの準備が進む。サーキュラーエコノミーへの移行、グリーン水素など環境・エネルギー関連の取り組みで世界を牽引。またナノELSI/EHSで世界のリーダーに。
- アジアでは中国の台頭が目立つ。中国製造2025など製造技術・材料デバイス技術の覇権獲得に向けた国家的取組が活発化。蘇州市などを中心とするナノテクイノベーション特区の整備により世界各国の企業、投資家の誘致にも力を入れる。台湾・韓国・シンガポールなどもナノテクの先端研究開発拠点を築き、世界のR&D、製造拠点を吸引。

## めざす社会像

### 6つのニーズ、13のグランドチャレンジ

#### ■ 安全・安心で豊かなデジタル社会

- ① コンピュータ革新を支えるIoT/AI/量子デバイス**  
生活空間、社会空間に張りめぐらされたセンサ群から得られるビッグデータを安全・高速・低消費電力で情報処理する革新的なコンピューティングデバイスの実現。
- 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 (リアル) や大容量の情報 (サイバー) のいずれも低環境負荷かつ安全に輸送、送達するインフラの実現。

#### 1. 量子状態の高度制御

量子物性の高次制御によって新たなセンシング、通信、コンピューティングを実現。トポロジー等の新概念を導入することで従来エレクトロニクスを超える新機能を創出。

#### 2. ポスト5Gデバイス・材料基盤

完全自動運転などの実現を支えるポスト5G通信技術で求められるミリ波・テラヘルツ帯の高周波域で動作する材料・デバイスの革新。

#### 3. IoTデバイス集積

物理センサ、化学センサ等を統合的に用いたマルチモーダルセンサネットワークの構築による高付加価値情報の創出。

#### 4. ナノカスケードによるスマート材料

輸送・交通におけるCO<sub>2</sub>排出量の大幅削減、摩擦によるエネルギー損失を大幅低減した機械機器、社会インフラ材料の超長寿命化や易修復などを實現する材料・デバイスの創製。

#### ■ 健康で幸せな生活が可能な社会

#### ③ 健康・医療・生産システムを支えるバイオ技術

健康寿命の延伸等に資する疾患の超早期診断やヘルスマニタリング、身体機能の補助を行う医療デバイス等の実現。細胞や微生物を活用したバイオ技術による食料生産 (人工培養肉ほか)。

#### ④ 人と共生するロボット

負担の少ない高齢者介護、安全な社会インフラ保守管理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・拡張可能な共生ロボットの活用。

#### 5. ヘルスケアIoT

疾患の存在を示す指標 (バイオマーカー) を検出・モニタリングする技術、環境中に存在するウイルス・細菌などを検知する技術など、ヘルスケアに必要なデータを取得するための技術開発。

#### 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實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構築。

#### 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、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の設計・創製。

#### 8. 脳型AI・スマートロボット

常に変化する開かれた環境の中で、人と一緒に連携して作業する自律・共生型のスマートロボットを實現。そのための高度な認識・判断を高エネルギー効率で行う脳型AIチップや小型高出力アクチュエータ、さらにこれらを統合するソフトロボティクスの開発。

#### ■ 低環境負荷で持続可能な社会

#### ⑤ 水・大気・資源の循環を可能にするスマート材料

世界の人口増による著しい水不足や海洋汚染、CO<sub>2</sub>・大気汚染問題、および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機や偏在性から生ずる価格高騰のリスクを解決するために必要な材料・デバイス。

#### ⑥ 省/創/蓄エネのための先端材料・デバイス

再生可能エネルギーを持続かつ効率的に導入するために必要な省/蓄エネルギー用材料・デバイス。

#### 9. サステナブル元素戦略

グローバルな課題解決に資する魅力的な機能を持った材料・デバイスの継続的創出のため、新機能の追求と元素・物質循環に代表されるサステナビリティを重視した材料創製を可能にする強固な材料開発基盤の構築。

#### 10. カーボンニュートラル基盤

化石燃料利用の削減、再生可能エネルギー利用の増大のための継続的な材料・デバイス群の研究開発。蓄電池、燃料電池、太陽電池、グリーン水素利用技術、熱制御材料など。

#### ■ 上記すべての基盤技術

#### 11. 多機能・複雑系の材料設計

機能性材料の高度化に多元素化や複合化などの複雑化が避けられないなか、絨毯爆撃的な材料設計から脱却し、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、プロセス設計手法の確立。

#### 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、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。

#### 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・デバイスを対象に動的計測を実行し、得られた計測結果に対してデータ科学的手法を駆使して高速・高効率なデータ解析を實現。計測とプロセスを一体化したものづくりのための基盤技術を構築。