

2.5 ナノテクノロジー・材料分野

ナノテクノロジー・材料分野は、物質科学、量子科学、光科学、生命科学、情報科学、数理論科学といった基礎科学をベースに、ナノスケールで生ずる現象を取り扱う科学として発展してきたナノサイエンスを土台に置いている。ナノサイエンスという土台の上に、精密機械加工や積層造形などの製造加工技術、高分解能顕微鏡などサブオングストロームの分解能におよぶ計測、第一原理電子状態計算による物質構造と機能の予測、シミュレーションやモデリングによる解析技術などを柱とした共通基盤科学技術が構築される。その技術を用いて元素戦略や分子技術、マテリアルズ・インフォマティクス、界面・空隙制御、フォノンエンジニアリングといった物質と機能の設計・制御技術が確立されている。そして、デザインされた物質・機能を組み合わせることで新たなデバイス・部素材を開発し、環境・エネルギー、ライフ・ヘルスケア、情報通信（ICT）・エレクトロニクスなどの多様な分野の先端を拓く、異分野融合の技術領域としてナノテクノロジーは特徴付けられる。

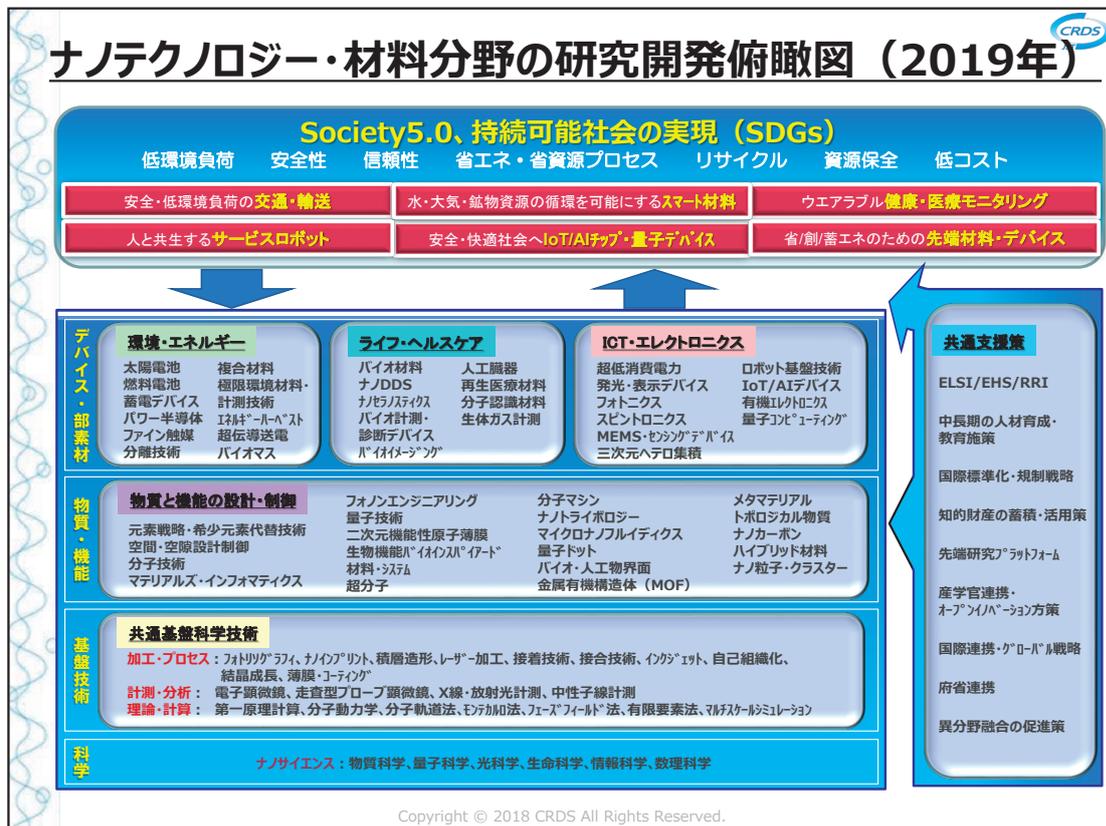


図1 ナノテクノロジー・材料分野の研究開発俯瞰図（2019年）

2000年初頭に世界各国でナノテクノロジーの国家政策が開始されてから、20年が経過しようとしている。この間、ナノテクノロジーは技術の先鋭化、融合化、そしてシステム化へと向かう流れの中にあり、2010年代以降は特に異分野技術の融合化と、製品化・社会実装を指向した技術のシステム化が強調されるようになってきた。技術進展の結果、ナノテクによって実現された多くの製品が生み出され、我々の社会に大きな便益をもたらしている。

一方、ナノテクノロジー・材料科学技術の進歩と実用化に伴って生み出される新規物質や新製品の健康・環境への影響、倫理面の取扱い、リスクの評価・管理、そして標準化が国際的課題になっている。新規なナノ材料は、従来の材料とは異なるナノ構造ゆえの新物性を持つことがあることから、未知のものとして適切な評価を行うことが求められている。しかしながら、従来の化学物質のように組成だけでは分類することができないため、サイズ、形状、表面状態など多岐にわたる特性を考慮する必要がある。科学的評価には膨大な時間・資金・設備等リソースを要するため、国家主導や国際協調の枠組みのもと、環境・健康・安全（EHS：Environment, Health and Safety）の科学的側面からと、倫理的・法的・社会的側面（ELSI：Ethical, Legal and Social Issues）からの取り組みがなされている。近年特にナノ材料を使用した製品の実用化が進むにつれ、各国・地域単位で規制・制度面の整備が顕在化してきている。ナノ材料とその関連製品のリスクを低減し、恩恵を社会が広く享受するためには、健全な国際市場での流通が欠かせず、そこでは、固有の用語、評価試験方法、リスク評価法などの多方面にわたる国際標準化が重要となっている。

世界で最初にナノテクノロジーの国家イニシアティブ（National Nanotechnology Initiative：NNI）を開始した米国では、これまでに270億ドルを投資している。2018年度以降、予算は減少傾向にあるものの、Nanotechnology Signature Initiatives（NSIs）をはじめとする5項目から成るプログラム構成エリア（Program Component Areas：PCA）に対して戦略的に予算配分がなされている。一方、ムーアの法則に従って高性能化を進めてきた半導体も微細化限界が顕在化してきており、微細化に頼らない新たな半導体高性能化の姿を追求するElectronics Resurgence Initiative（ERI、エレクトロニクス復興イニシアティブ）、量子コンピュータの最近の急速な研究開発の進展にドライブされ、量子技術全体の新たな可能性を追求するNational Quantum Initiative（NQI、国家量子イニシアティブ）などが立ち上がり、今後、政策として重点かされていくと予想される。欧州Horizon 2020においては、3つの優先領域（①Excellent science、②Industrial leadership、③Societal challenges）が設定されている。①の中では、10年間で総額10億ユーロが投資されるFuture & Emerging Technologies（FET）として「Graphene Flagship（2013年～）」「Human Brain Project（2013年～）」に続き2018年から「Quantum Flagship」が開始されている。②ではLeadership in Enabling and Industrial Technologies（LEITs）の中のKey Enabling Technologies（KETs）としてナノテクノロジーや先端材料技術が位置づけられている。次期フレームワークであるHorizon Europeの検討状況やBREXITの影響など、欧州の今後の動きにも注目すべきである。アジア地域では、特に産業界・学術界とも中国の台頭が目立っている。中国では、ナノテクノロジー・材料分野のほとんどの部分をカバーする10の重点分野の国内外の市場シェア獲得と部材の自国生産を目指した「中国製造2025」が推進されている。その結果、半導体、人工知能（AI）、量子技術などの最先端技術や先端材料の研究開発において、特に米中間の競争が激化している。このことはわが国における研究開発計画にも大きく影響を及ぼす可能性を秘めている。また、台湾・韓国・シンガポールを始めとしたアジア諸国においても、ナノテクノロジーの研究開発拠点を築き、世界の研究開発人材や資金を吸引しようとしている。わが国においては、これまで物質・材料研究を積極的に進めてきたこともあり、新材料の

開発では世界に先行する場面も多く、部素材の基幹産業を支え、新しい産業を生み出してきた歴史がある。光触媒、リチウムイオン電池、永久磁石、青色LED、ハードディスクの磁気ヘッドなど、わが国が材料・デバイスの重要な発明に深く関わった事例が多数存在している。

そのような背景もあり、わが国の部素材産業では、機能性材料分野を中心に市場規模が小さくて世界的に高いシェアを確保している製品を多数有する。部素材産業全体を面で見ただけの場合には大きな市場を獲得し、競争力を維持していると言え、今後も部素材に対する基礎研究から開発・製品化まで力を入れていくことが望まれる。一方で、従来はわが国に強みがあった液晶用フォトレジストやカラーフィルムなど一部の液晶ディスプレイ材料やリチウムイオン電池に関しては、中韓の急迫により大きくシェアを低下させていることにも目を向ける必要がある。

一般に、物質・材料の発見から応用技術が開発され、試作品の完成、信頼性の確保、量産化技術の開発を経て世に出るまでには通常15～30年といった長い年月を要するが、グローバルな開発競争が激化している昨今、研究開発のスピードが要求される場面が多くなっている。その中でわが国がこれまでのように先導的な役割を果たせるかどうかは余談を許さない状況になっている。その意味では、計算科学や情報科学を駆使して物質・材料の設計を効率的に進めようとするマテリアルズ・インフォマティクスが今後も材料開発においては重要な基盤技術になると予想される。

いよいよIoT/AI時代が全盛を迎えようとしている中、サイバーフィジカルシステム(CPS)におけるサイバー空間のソフトウェアとフィジカル空間(現実空間)のハードウェアの両者の融合が重要になるが、サイバー空間の重要な構成要素である高性能コンピュータ、大容量情報ストレージ、さらにはフィジカル空間との接点となるセンシング、ネットワークは、半導体を中心とするナノエレクトロニクス機器によって構成されている。我々の身の回りの機器に埋め込まれるIoTデバイスは、多様なセンシング機能と情報をクラウド側に送信するためのネットワーク機能、また使われる場面によっては自らを動作させるための電力をその場で獲得するエネルギーハーベスト機能を具備する。ロボットや自動車などは即時の情報処理やアクションが必要である。また、ネットワークの負荷低減のために、大量のデータ情報の事前処理が必要な場合もある。このようなときはIoTデバイス自身にAIをも含む高度のコンピューティング機能が搭載されるようになる。AIは従来のコンピュータでは困難な大量の画像・音声・動画処理、AR/VR、自然言語処理、最適化・推論などの領域で力を発揮する。これらの領域におけるAIへの要求は高まり続け、これまでのフォン・ノイマン型のコンピューティングを超える新たなアルゴリズム、それを実行するハードウェアへの期待が世界的に高まっており、この解決がナノテクノロジー・材料技術の発展に求められている。これまでこれらの進展を支えてきた半導体の微細化が限界を迎えつつある中で、ポストムーア時代を担う新技術体系の必要性は広く認識されている。生物が実現している低エネルギーでの情報処理の仕組みを取り込もうとするニューロモルフィックコンピューティングや、量子力学の原理に則り基本素子を動作させ、現状のコンピュータでは実質的に解く事が難しい複雑な問題に解を与える量子コンピューティングなどがその候補とされる。特に、ここ数年の間に前述の米国NQIをはじめ、量子コンピューティングに関する国家戦略や大型プロジェクト

が世界各国で立ち上がる中、ナノテクノロジー・材料科学技術からの同分野への寄与に対する期待も高まっている。

一方、ビッグデータを活用した情報科学技術の進展は、ナノテクノロジー・材料の研究開発方法自体にも大きな影響を与え始めており、米国の **Materials Genome Initiative** に代表されるデータ駆動型材料設計（マテリアルズ・インフォマティクス）はもはや全ての材料開発の基盤技術として定着し、最近ではデータ駆動型プロセス設計（プロセス・インフォマティクス）への挑戦も始まりつつある。近年のコンピュータの能力向上は、材料、部品、さらには複合システム品の設計開発を行うシミュレーション技術の可能性を大きく広げ、量子力学が支配するナノスケールの物質構造から最終製品に近いマクロスケールの複合システム品までを一貫して設計するマルチスケールシミュレーションが徐々に実現してきている。さらに、これらデジタル化された設計データを基に、目的の構造物を自在に作製する 3D プリンティング技術の進歩も著しく、情報科学技術の進展がナノテクノロジー・材料技術を含むものづくり全般に革新をもたらし始めている。

米欧中を中心として、ここ数年で、IoT/AI 時代を支配する AI・半導体・量子技術などの技術覇権争いが顕在化している中、それらを支えるナノテクノロジー・材料分野に対する社会的期待は益々高まりつつある。今回の 2019 年版では、前作 2017 年版の「IoT/AI 時代を牽引するナノテクノロジー・材料」という立場を踏襲しつつ、最新情報や技術動向をアップデートし、SDGs に代表される持続可能社会実現に向けてナノテクノロジー・材料技術がどう貢献できるのかの視点も含めて記述した。報告書第 1 章では、こうした内外の研究開発動向の全体像と将来の展望、特にこの分野における日本の課題とグランドチャレンジについて、CRDS における関連ワークショップやインタビュー調査にもとづき俯瞰的にまとめている。ナノテクノロジー・材料の研究開発俯瞰図を新たに見直し、そこから 32 の主要な研究開発領域を抽出した。そのうえで、現代社会にとって重要な 6 つの社会的ニーズの特定、およびそれらのニーズを解決するために戦略的に取り組むべき「10 のグランドチャレンジ」について記述した。第 2 章では 32 の主要研究開発領域について、各々 10 ページ程度を割り、当該領域の意義、歴史的背景から現在の先端技術動向、今後の科学技術的課題、国際比較（日米欧中韓）の結果についてそれぞれ概略をまとめている。本報告書は、検討過程において総勢 170 名を超える産学官の専門家の協力によって、情報・意見を収集し、ワークショップ等での議論を重ねた上で、CRDS の視点から見解をまとめたものである。

国際比較表

<環境・エネルギー応用>

国	フェーズ	太陽電池		蓄電デバイス		パワー半導体		ファイン触媒				分離技術						複合材料		極限環境材料・計測技術							
		現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド		
日本	基礎	◎	→	◎	↗	◎	→	○	→	◎	→	◎	↗	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	◎	→
	応用・開発	◎	↗	○	→	◎	↗	○	→	◎	→	○	↗	◎	→	○	→	◎	↗	△	↗	○	↘	○	↘	○	↘
米国	基礎	○	↗	○	→	◎	↗	○	→	○	↘	◎	↗	◎	↗	○	→	○	→	○	→	◎	↗	○	↘	○	↘
	応用・開発	○	↗	△	→	◎	→	◎	→	△	↘	○	→	○	→	○	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗
欧州	基礎	◎	→	○	→	◎	→	○	→	○	↘	◎	↗	○	→	○	→	○	→	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	→
	応用・開発	◎	→	○	↗	◎	↗	◎	→	△	↘	△	→	○	→	◎	↗	◎	↗	○	↗	○	↘	○	↘	○	↘
中国	基礎	○	↗	△	↗	○	↗	◎	↗	○	↗	◎	↗	◎	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	△	↗
	応用・開発	◎	↗	◎	↗	○	↗	◎	↗	△	→	△	↗	○	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗
韓国	基礎	○	↗	◎	↗	△	↘	△	→	△	→	◎	↗	△	→	○	→	△	→	○	→	△	→	△	→	△	→
	応用・開発	○	↗	◎	↗	△	↘	△	→	×	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→

<ライフ・ヘルスケア応用>

国	フェーズ	バイオ材料		ナノDDS・ テイクラス		診断デバイス		バイオイメージング	
		現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	基礎	○	→	◎	→	○	→	◎	→
	応用・開発	○	→	○	↗	○	→	◎	→
米国	基礎	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	応用・開発	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗
欧州	基礎	◎	→	◎	→	○	→	◎	↗
	応用・開発	◎	→	◎	↗	○	→	◎	↗
中国	基礎	○	↗	◎	↗	○	↗	○	↗
	応用・開発	○	↗	○	↗	○	↗	△	↗
韓国	基礎	○	→	○	↗	○	→	△	↗
	応用・開発	○	→	○	↗	○	→	△	→
シンガポール	基礎							◎	↗
	応用・開発							△	→

<ICT・エレクトロニクス応用>

国	フェーズ	超低消費電力 (ナノエレクトロニクス デバイス)		発光・表示 デバイス		フォトリソ		スピントロ ニクス		MEMS・セン シングデバイス		三次元ヘテロ 集積		ロボツト基盤 技術	
		現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	基礎	○	→	◎	→	○	→	◎	→	○	→	◎	↘	○	→
	応用・ 開発	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	◎	→	○	→
米国	基礎	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗
	応用・ 開発	◎	↗	○	→	◎	→	○	→	◎	↗	◎	↗	◎	→
欧州	基礎	○	↗	◎	→	◎	→	◎	→	○	→	◎	→	○	→
	応用・ 開発	○	↗	○	→	○	↗	△	→	◎	↗	◎	→	○	→
中国	基礎	◎	↗	◎	↗	○	↗	◎	↗	○	↗	×	→	△	→
	応用・ 開発	○	→	○	↗	○	↗	△	↗	○	↗	×	→	△	→
韓国	基礎	○	↗	○	→	△	→	○	↗	△	↘	△	↘	○	↗
	応用・ 開発	○	↗	◎	→	△	→	○	↗	△	→	◎	↗	○	→
台湾	基礎	○	→									○	↘		
	応用・ 開発	◎	↗									◎	→		

<物質と機能の設計・制御>

国	フェーズ	空間 制御 設計		分子 技術		元素戦略・希少 元素代替技術		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		量子技 術		二次元機能 原子薄 膜		生物機能 インス パイアード材 ・システ ム材料	
		現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	基礎	◎	→	◎	↗	◎	→	○	↗	◎	↗	○	→	○	↗	◎	↗
	応用・ 開発	○	↗	◎	→	◎	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	→	○	↗
米国	基礎	◎	↗	◎	↘	○	↗	◎	↗	◎	↘	○	↗	◎	↗	◎	↗
	応用・ 開発	◎	↗	◎	↗	○	↗	○	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→
欧州	基礎	◎	↗	◎	→	○	↗	○	↗	○	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	応用・ 開発	◎	→	○	→	○	↗	○	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→
中国	基礎	◎	↗	○	↗	○	→	◎	↗	◎	↗	○	↗	○	↗	◎	↗
	応用・ 開発	◎	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	◎	→
韓国	基礎	○	→	△	→	△	→	○	↗	○	→	×	→	○	→	○	→
	応用・ 開発	△	→	○	→	×	→	×	→	○	↗	△	→	◎	↗	△	→

< 共通基盤科学技術 >

国	フェーズ	加工・プロセス						計測・分析		理論・計算	
		ブ 微 細 加 工 セ ス		積 層 造 形 加 工		接 着 技 術		ナ ノ 計 測 技 術		物 質 シ ミュ レ ー シ ョ ン レ ー テ ィ ア	
		現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	基礎	◎	→	◎	↗	◎	↗	○	↗	◎	↗
	応用・開発	○	↘	○	↗	○	↗	○	→	○	↗
米国	基礎	◎	→	○	→	◎	→	◎	↗	◎	↗
	応用・開発	◎	→	◎	→	○	→	○	↗	◎	↗
欧州	基礎	○	→	○	→	◎	→	◎	↗	◎	↗
	応用・開発	◎	↗	◎	↗	◎	→	○	→	◎	↗
中国	基礎	○	↗	◎	↗	○	↗	△	→	○	↗
	応用・開発	○	↗	○	↗	○	↗	△	→	○	↗
韓国	基礎	○	→	△	→	○	→	△	→	△	→
	応用・開発	◎	↗	△	→	○	→	△	→	△	→
台湾	基礎	△	→								
	応用・開発	◎	↗								

< 共通支援策 >

国	フェーズ	ナノテクノロジーの E L S I / E H S、国際標準	
		現状	トレンド
日本	取組水準	△	→
	実効性	×	→
米国	取組水準	◎	→
	実効性	○	→
欧州	取組水準	◎	↗
	実効性	◎	↗
中国	取組水準	○	↗
	実効性	○	↗
韓国	取組水準	○	↗
	実効性	○	↗