

## エグゼクティブサマリー

本報告書では、物質・材料および様々なデバイス研究開発の最先端を担う象徴的技術がナノテクノロジーであるとの立場をとる。現在の技術は、ナノメートルの領域に踏み込んだ組織制御技術、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て、進化を続けている。これらはいずれもナノスケールの物質構造に起因する機能発現に関わるナノテクノロジーであり、分野横断のコア技術である。このような技術をベースとして、生命科学分野や臨床医学分野、環境・エネルギー分野、情報科学技術分野、社会インフラ等の多様な分野の先端を拓く、異分野融合の技術領域がナノテクノロジーである。

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、およそ15年が経過した。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なかにあり、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。米Lux Research社によれば、ナノテクによって新たに実現された製品（nano-enabled products）市場は、2012-2014年の2年間で8,500億ドル/年から1.6兆ドル/年へ急成長したとしている。今や研究開発の現場だけでなく、多くの製品あるいは産業技術として、ナノテクノロジーが実際に活用されるようになっている。

世界で最初にナノテクノロジーの国家イニシアティブ（NNI）を開始した米国では、これまでのNNIをどのように総括するかを2016年に議論した。それをもとに、今後は研究開発投資によって生み出した知見や技術を商業化していくために、あらゆる分野の連携が必要とし、社会への周知と参画、教育の充実、ナノ物質が使用された製品の健康や安全性・環境に対するリスク評価・管理、倫理的・法的・社会的課題を広く知らせるべきとした。これらによって商業化を促進し、国民が経済的な恩恵を得るようにすべきと謳っている。2017年からの新政権下でこの方向性がどのようになっていくかが注目される。他方、欧州では新たな研究枠組みであるHorizon2020が開始され、ナノテクノロジーや先端材料技術はKET's（key enabling technologies）の一つとして位置づけている。自動運転システムの将来像を象徴とし、ナノテクノロジー・材料の要素技術の統合化を掲げている。アジア地域では、中国・台湾・韓国・シンガポールを始めとして、ナノテクノロジーの研究開発拠点を築き、世界のR&Dを吸引しようとしている。特に、中国における本分野への莫大な研究開発投資は、論文動向等に結果として現れている。

産業動向に目を向ければ、Industry4.0のコンセプトがドイツから発信され、IoTやAIなどの科学技術が、世界の社会・経済に大きな影響を与え始めている。来たるIoT/AI時代に活躍するデバイスおよびその構成素材は、先端ナノテクノロジーの塊になるだろう。将来、私たちの身の回りの製品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、収集したデータを処理するコンピューティング機能、情報をクラウド側とやりとりするネットワーク機能とを持ち、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。社会生活に入り込むロボットや自動車などは、リアルタイムの情報処理やアクションが求められる。ネットワークの負荷低減のために、大量のデータ処理が必要になる。このようなとき、IoTデバイス自身

に AI を含む高度のコンピューティング機能が搭載されると考えられる。AI は従来のコンピュータでは困難な大量の画像・音声・動画の処理、自然言語処理、最適化・推論などの多様な領域で力を発揮することが期待され、従来のコンピュータの能力を補完するアクセラレータとして機能する。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・材料技術の発展によってなされることが求められている。半導体が微細化限界を迎えつつあるなかで、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。生物が行う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最適化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。これらをデバイスとして実装することが、ナノテクノロジー・材料科学技術の発展に課せられている。

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いる。日々更新され、新たに生み出される大量の実験データが蓄積されることで、そこから新材料に関する知識発見が可能となり、所望の特性を持つ材料の効率的な設計・探索、開発が可能になる。このためには材料技術と最先端の情報技術の融合が必要であり、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）と呼ばれる材料開発の新しいアプローチへの取り組みが、世界で始まっている。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ている。量子力学が支配するナノスケールの物質構造から始まり、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。

前作の俯瞰報告書 2015 年版では、環境・エネルギー分野やライフサイエンス・医療分野への応用にやや重きを置いてまとめた。今回の 2017 年版ではこれらすべての最新情報、技術進展をアップデートしつつ、IoT/AI 時代を牽引するナノテクノロジー・材料の方向性や、社会インフラに求められる構造材料、センシング、接合・接着技術等についても、十分な項数を割いて記述した。報告書第二章では、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 37 の主要な研究開発領域を抽出した。そのうえで、本分野の具体的な「10 のグランドチャレンジ」として整理した。第三章では 37 の主要研究開発領域について、各々 10 ページ程度の項数を割り、当該領域の進展に関する歴史的背景から、現在の先端技術動向、今後の科学技術的課題、政策的課題、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。これらの検討過程において、約 240 名の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。

## Executive Summary

Nanotechnology and materials continue to evolve with the core technologies such as control of nanometer-scale structures, high-resolution microscopes with a sub-Ångström resolution, prediction of material structures and functions using the first-principle calculation, and characterization of materials using simulation and modeling. They are expected to provide a cross-cutting technology, with life science and clinical medicine, energy and environment, social infrastructure, and information and communication.

Nearly fifteen years have passed after initiation of national policies on nanotechnology in many countries. During these years nanotechnology has been conducted along the stream heading to pursuit of the technological limits, the technology fusion, and the systemization. Particularly after 2010, the fusion between different technologies and systemization directing to the industrialization and the social implementation has been accelerated. According to the report of Lux Research Incorporated, the market size of new products commercialized by nanotechnology (nano-enabled products) expanded rapidly from 850 billion US\$ to 1.6 trillion US\$ during two years of 2012-2014. Nowadays, nanotechnology is widely used not only in the R&D field but also in diverse commercial products and various industries.

In the United States discussions were made in 2016 to review the National Nanotechnology Initiative (NNI), the world's first national program to coordinate the multiagency efforts in nanoscale science, engineering, and technology. The review led to the conclusions that the collaboration among every industrial sectors is required to commercialize knowledges and technologies generated by the R&D investments for the nanotechnology and that the dissemination of those knowledges and technologies, EHS of products using nanomaterials, ELSI of nanotechnology should be made to public. It was also concluded that the commercialization of nano-enabled products should be promoted through these actions and the economic benefits should be provided to the general public. It is now being carefully watched whether these conclusions are kept or changed from 2017 under the new US government. On the other hand, a new technological framework, Horizon 2020, was launched in Europe, where nanotechnology and advanced material technology is positioned as one of the key enabling technologies (KET's). The future view of autonomous driving systems is raised as a symbol of the integration of elemental technologies of nanotechnology and materials. In Asian region such as China, Taiwan, Korea, and Singapore, R&D facilities for nanotechnology were formed to attract the world's R&D. In particular, we can see that the huge R&D investment to this field in China is reflected in the recent rapid increase of academic papers.

When we turn our eyes to the industrial trends, it is seen that the concept of Industry 4.0 was launched in Germany, and the ICT-related technology such as IoT or AI are influencing greatly the society and economy over the world. Devices and

component materials which will play a key role in the coming IoT/AI era would be made of a lump of nanotechnology. IoT devices embedded in the products in our surroundings possess capabilities of various sensing, computing to process collected data, networking to communicate data with cloud sides, and energy-harvesting to acquire the electric power needed to drive themselves on site when needed. Real-time information processing and actions are required in the automobiles and robots entering in our life. Massive data processing technologies are also required to reduce loads in the network. In these situation, high computing-capability including AI will be incorporated in the IoT. AI is also expected to exert its power in various fields, such as massive image, voice, and video data processing, natural language processing, optimization, and reasoning which are hard to be executed in the conventional computers, and thus to work as an accelerator to complement the conventional computers. New algorithms exceeding the potential of the von Neumann architecture and hardware to operate the new algorithms are highly required world-wide and the progress of nanotechnology and materials is expected to provide the way to fulfill those requirements. The necessity of a new technology playing a substantial role in the post-Moore era is widely recognized. Neuromorphic computing incorporating the mechanism of ultra-low energy computing executed in a biological system including human being and quantum computing operating under the principle of quantum mechanics and providing the solutions for optimization problems which are hard to be solved substantially by present computers are the candidates to provide the new technology. The progress of nanotechnology and materials is highly expected to implement those computing schemes as devices.

On the other hand, the progress of information technology utilizing big data begins to influence the way of executing R&D on the nanotechnology and materials. The accumulation of massive experimental data generated newly and renewed continuously enables the discovery of knowledges on new materials and the efficient design, search, and development of materials with desired characteristics. In order to make them possible, the fusion of material technology and advanced information technology is needed, and a new approach for the material development named data-driven material design (Materials Informatics) begins to be tried world-wide. The recent increase of computing power expands dramatically the potential of computer simulations to design and develop the materials, components, and even complex systems. Multi-scale simulations to design consistently the macro-scale complex systems close to final products from the beginning of nano-scaled material structures governed by the quantum mechanics are becoming to be feasible. Furthermore, the 3D printing technology to manufacture target structures flexibly based on these digitalized design data is making rapid progress, and the progress of information technology is bringing the revolution of manufacturing in various aspects including nanotechnology and materials.

In the previous panoramic view report of the nanotechnology/materials field



in 2015, emphasis was placed on the nanotechnology applications for energy and environment areas, and also for life science and medical areas. In this 2017 version, latest information and technical progress of the nanotechnology and materials is updated in every area. In addition, the direction of the nanotechnology and materials to drive the IoT/AI era is described with sufficient pages together with a new technical description on structured materials, sensing technology, and bonding and adhesive technology used for social infrastructures. In the second chapter of this version, whole view of the R&D trends both inside and outside Japan and its prospect, particularly Japan's issues and grand challenges in the field of nanotechnology and materials are summarized comprehensively based on the information gathered through the related workshops held in CRDS and interviews with professionals. The panoramic view for the nanotechnology and materials was reviewed and revised, and 37 major R&D areas and ten concrete grand challenges were extracted through these reviewing processes. In the third chapter of this report, the overview of historical background about the progress of each technical area, current technical trend in its front-end, scientific and technological issues, political issues, and the result of global comparison (Japan, USA, Europe, China, and Korea) on its R&D are described with about 10 pages for each technical area. This report describes CRDS's comprehensive views of nanotechnology and materials produced by collecting information and opinions and discussing in the workshops and others through the collaborations of 240 professionals from industry, academia, and government.