

1 | 俯瞰対象分野の全体像

1.1 俯瞰の範囲と構造

(1) 研究開発領域の定義

まず、本報告書におけるナノテクノロジーおよび材料の定義とその特徴を述べる。

■ナノテクノロジーの定義と特徴

ナノテクノロジーの“ナノ”は、国際単位系 (SI) 接頭辞である $n (=10^{-9})$ に由来するもので、対象物の長さスケールがナノメートルで記述されることを意味している。1ナノメートル (nm) の長さは、物質の最小構成単位である原子を数個並べた程度になる。一般的にナノサイエンスあるいはナノテクノロジーでは、1ナノメートルから100ナノメートル程度の範囲の世界を対象としているので、3次的に原子が数個から数百万個集まった分子や原子団がこの領域に入る。ナノテクノロジーの特徴を明確に表現するため、ナノテクノロジーを以下のように定義する。

[ナノテクノロジー]

概ね1ナノメートルから100ナノメートルの領域において、物質を成長させ、加工し、そしてそのサイズのバルク・表面・界面の構造や、そこで生ずる諸現象を原子・分子レベルで観測し、理解し、制御し、それら諸要素を組み合わせることで、あるいは他の知識・技術と組み合わせることにより、新しい知と機能を創出しようとする学術的・技術的領域。

上記の定義にかかわる学術領域はすべてナノテクノロジーとして融合の対象となることから、異分野の融合はナノテクノロジーのもっとも大きな特徴であり、融合によって新しい技術領域が生まれる。正確には、学術的領域をナノサイエンス、技術的領域をナノテクノロジーと呼ぶべきであるが、一般的に両方をあわせてナノテクノロジーと称することが多く、本報告書でもこの考え方を採用する。

ナノテクノロジー (以降ナノテクと略記) の特徴が顕著に表れる事例として、ナノスケールでの材料プロセスをとりあげる。材料プロセスには、代表的な2つのアプローチがある。1つは、超LSI (大規模集積回路) などの基本的な微細加工技術であり、バルク材料や薄膜材料を削り込んで所望のナノ構造を得る「トップダウン・ナノ加工」、もう1つは、原子や分子あるいはカーボンナノチューブや微粒子などのナノ材料から出発して所望のナノ構造を自己組織的に形成する「ボトムアップ・ナノ形成」である。後者が実現できれば、ナノテクの究極の形成・加工プロセスとなりうる。自己組織化は、前者の限界を克服、あるいは前者を補完する後者の鍵となる概念である。そして、2つのプロセスの融合も重要となる。

これらによって形成・加工される「ナノ構造」の具体例としては、金属や半導体の超微粒子、ロタキサンなどの超分子、ゼオライトなどナノ空間・空隙を利用した材料、そして、0次元、1次元、2次元のカーボンナノ構造体としてのそれぞれ C_{60} (フラーレン)、CNT (カーボンナノチューブ)、グラフェンがある。ロタキサンは、2016年ノーベル化学賞の受賞対象となった「分子機械」を構成する物質として記憶に新しい。また、バイオの世界に目を向ければ、生体物質はさまざまな「ナノ構造」で構成され、その機能はナノ構造自体やナノ構造間の複雑な相互作用を介して発現している。

ナノスケールの物質構造の最大の特徴は、①サイズ効果としての量子効果、②原子より10~100倍程度大きいナノ単位格子の繰り返しから生じる量子波効果、③表面・界面の原子の数が物質内部の原子の数に比較して無視できないほどに相対的に増えることから生じるナノ界面・表面効果などにあり、これらが通常にみら

れる物性とは全く異なる「ナノ物性」を生み出す。例えば、多様な触媒効果や、物質定数から解放されて自在に変化する電子的・磁氣的・光学的・機械的・熱的特性である。今後、注目されるのは、物質内にデザインして作り込むナノ空間・空隙内を利用した電子、光子、スピン、フォノン、イオン、分子の多様な輸送現象であり、その制御法や実現法は、IoTに代表される第4次産業革命や、エネルギー分野、ライフサイエンス・医療分野において必須の技術と期待される。

■材料の定義と特徴

材料とは何らかの有用な機能を有する物質であり、材料技術は、物質科学をベースに工学的応用を図る技術である。工業で用いられる材料は、元の原料によって大きく次の4つに分けられる。

(1) 金属材料

鉄やアルミニウムなどの金属、ステンレスなどの合金、アモルファス合金、あるいは、金属ガラスなど。

(2) 無機材料

セラミックスやガラス、非金属元素単体または金属元素と非金属元素の化合物、金属間化合物など。

(3) 有機・高分子材料

炭素を主要元素として、酸素、水素、窒素原子などで構成される物質の総称。これはプラスチックのような高分子化合物による樹脂、繊維や有機ELなどの電子材料、自己組織化を利用した超分子集合体やゲル、固体と液体の中間的な性質を持つ液晶等を含む。

(4) 生物材料

生物に由来する材料。主にタンパク質や核酸、糖鎖など。

他の分類としては有機材料（生物材料を含む）と無機材料（金属材料を含む）の2つに区分することも一般的である。近年は、目的とする機能や特性を得るために上記材料を組み合わせた炭素繊維強化プラスチックなどの複合材料や、ナノレベルで複合化したハイブリッド材料が多数登場している。

また、重視される性質によって、力学特性（強度・靱性・延性）が主に要求される「構造材料」と、力学特性以外の機能を持つ「機能材料」に分類することもできる。機能材料については、導電性に注目して、超伝導体、導体、半導体、絶縁体という分類、磁性に注目して、強磁性体、反強磁性体、常磁性体、反磁性体という分類などがある。

今日において材料技術は、ナノメートルの領域にまで踏み込んだ組織制御技術、高分解能電子顕微鏡・走査型プローブ顕微鏡などのサブナノメートルに及ぶ高精度計測、第一原理電子状態計算による構造および機能の予測、シミュレーションによる解析技術を柱として、さらに進化し続けている。

よってナノテクと材料との関係は、ナノテクはトップダウンあるいはボトムアップでナノスケールの構造を形成することにより新機能を発現する技術であり、さまざまな新材料を開発するための横断のコアテクノロジーとみられることもできる。

1.1.1 社会の要請、ビジョン

(1) 世界と日本

世界は今、社会・経済的にも地球・自然環境の面でも、そして地政学的にも、大きな変化のなかにある。

VUCAの時代 (Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity)、平成から令和へ、そして21世紀に入って20年の節目を過ぎたが、20世紀型の価値観は転換を迫られて久しい。新型コロナウイルス感染症の世界的猛威によって、さらに不可逆な転換を迫られたとみるべきだろう。多様化・複雑化する社会にあって、人類・社会に求められる、あるいは問題とされる事象の多くは、歴史的な学問の体系にもとづき深く専門・細分化された単一学問分野では対処することが難しくなってしまった。SDGsの17の目標はその典型だが、科学技術が現代のさまざまな問題と向き合うには、これまで個々に発展してきた学問体系を越えて新しい分野を定義し取り組む、または複数の分野が連携することにより、新たな融合領域を生み出して取り組むことが求められている。そうすることで、既存の分野であっても新たな発見・進歩が誘発されることも期待できる。現代は多様な価値観が存在する。次なる変化を予測することは難しく、変化にいち早く適応するか、自ら変化を生み出し挑戦することが、未来社会を生きる将来世代に対する責任と結びついている。そのような中、日本は歴史的な転換点を迎えた。過去、資源制約のなか工業立国として製造業を生命線としてきた日本だが、サービス産業の成長、そして近年のデジタル技術に立脚したビジネス・産業構造の変革、グローバル化を進める産業がある一方で、互いの国を意識してより国際化を進めていく流れ、そして新型コロナウイルス禍と、対応を迫られる課題は目白押しである。他方では、いくつかの国・地域にみられるポピュリズムの台頭や、米中に端を発する貿易戦争・技術覇権争いを前にした複眼的な対応が求められている。わが国は人口減少に伴う少子高齢化の回避が難しく、社会保障費の上昇は未だ歯止めがかからない。各地の一次産業だけでなく、二次産業・三次産業もコロナ禍で多大な影響を受けている。一方で要請の高いハイテク産業を担う人材は不足している。日本は国のあり方、社会・行政・教育・福祉・経済、防災、感染症対策、あらゆる面で、従来の延長線ではない考えと行動が必要とされる。内外の環境変化に対応しながら、将来にわたり持続的な発展をするためいかなる方策をとるかが決定的に重要な局面にある。しかし、各種の統計指標で語られる日本の科学技術力の相対的な低下や人材不足等の諸問題への解は、見出されていない。さらに、国民生活にとっての生命線は、自国で必要最低量をまかなうことのできないエネルギー、資源、医薬品・医療機器、そして食糧の輸入であろう。2018年のわが国の輸入総額は約80兆円/年で、石化製品を含むエネルギー・資源関係がおよそ半分を占める。一方、現在の輸出は約81兆円/年で、自動車、機械・精密機器・電子部品、素材、が大半を占める。この輸出入の「入り」と「出」を使いながら、内需の産業と生活が実体経済として回っている(わかりやすさのために金融収支等を除いている)。すなわち、多くは工業製品の輸出によって、エネルギー・原材料の輸入がまかなわれているという大局的構造は、現時点でも続いていることは認識しておく必要がある。輸出を担う主要産業は、すり合わせ技術の集大成から生まれる自動車産業、機械・製造装置産業、長年の技術蓄積が必要な素材産業であり、その源泉にあるのが企業や大学等の研究開発である。世界中でモジュール化が進んできた今は、電気自動車用の蓄電池、自動運転用のAI/システム技術、5Gサービスの拡がりなどが、デジタルトランスフォーメーションの潮流とともに大競争を迎えている。わが国はこれらに活路を見出すことができるかどうかは全く予断を許さない状況にある。AIに代表されるICT関連産業は重点化され投資が拡大しているものの、米中から台頭したGAFAMやBATX等のプラットフォーマー企業への比肩を期待できる日本からの兆しはなかなか見つかからない。サービス産業は日本のGDPの大半を占め、多様なサービスが日本企業により運営されているが、ICT関連産業においては海外企業の占めるウェイトが大きい。

今、AIのソフトウェア・プログラマー人材やデータサイエンティストが注目されているが、さらに着目すべきは、クラウドのサイバー世界と、素材・デバイスのフィジカル・現実世界との境界にまたがる領域にある。いわゆるサイバー・フィジカル・システム(CPS)の世界であり、Society 5.0を実現するうえでのコア技術が位置する概念である。この領域が、5Gやさらにその先の6Gの新市場を牽引していくと考えられる。CPS

領域で活躍する人材はわが国においては圧倒的に不足しており、特に高度なテクノロジーを備えた人材への需要はしばらく止まないだろう。CPS実現の要はAIとIoT、そしてロボティクスであり、AIの技術開発では米中が世界で圧倒するが、IoTやロボティクスに関しては日本にも大きな可能性がある。産業や生活空間におけるあらゆる物理的・化学的・生物学的なアナログ情報を、デジタル化してサイバー空間とつないでいこうとする大きな流れがあるが、技術的ボトルネックとなるのはサイバーとフィジカルのインターフェース、すなわち情報を取得し信号変換するセンシングデバイスと処理デバイス、それらを統合するシステムにあるといえる。アナログ情報をデジタルへ信号変換すること自体は容易だが、問題はIoTで得ようとしている多様なアナログ情報の多くが、微小・微弱であり、バラつき・ノイズが大きく、センサ材料・デバイス技術がボトルネックとなることである。しかし、これらには日本の産学が長年培ってきた技術的蓄積による基盤がある。今後のIoTデバイスはサービスが多様になるために、求められるデバイスも多様化し、ある特定の製品だけが他をすべて駆逐して“勝者総取り”とはならない。製品を出荷しているメーカーには大きなビジネスチャンスがあり、IoT機能を製品・サービスに付加することで、製品単体の売切り型から、製品ライフサイクルを通じたサービスビジネスへと変わっていく。IoTではコストと機能が優先されるため、高コストの最先端微細加工半導体だけではなく、多様な半導体へのニーズが生まれている。電子部品、センサ、アクチュエータなどの異種機能を集積化して実現する半導体が肝となる。すでに多くの競争力ある企業（ロボット、自動車、機械、電子部品）が日本には集まっており、日本の半導体ウェハ生産能力も、最先端の口径300mmのラインだけでなく200mm以下も含めると世界的にトップクラスを維持している。今後、製造業、部品・部材・デバイス・機械産業の技術的・人的蓄積と、大学や国立研究機関などからの新しい技術提案とが噛み合っ、IoT展開の可能性を追求していくことが日本再生の鍵となろう。

地球全体に目を向ければ、国連サミットでSDGsが採択され、人間と地球が調和する持続的な発展へ向け取り組む流れはより強力になっていく。特に、境界条件が明らかになってきた地球環境と人間活動とを調和させ、そして誰一人取り残さない社会をどうすれば実現できるのかという、社会にとって多くの困難を伴うであろう大目標へと向かっている。大気・海洋・河川・土壌・森林の持続性や、生態系・動植物の多様性確保、貧困の撲滅、農業・食糧生産の持続性、教育や医療への公平なアクセス、感染症対策、温暖化の影響にも関連する災害対応・防災など、これらはいずれも一国だけでは成しえない目標であり、日本にとっても重要な検討課題である。例えば、再生可能エネルギーの導入拡大や、サーキュラーエコノミーの実現およびカーボンニュートラルの鍵とされる水素の利活用方策、マイクロプラスチックによる海洋汚染対策、AIやロボティクスを用いた先進医療技術などさまざまな挑戦が始まっており、これらの重要なドライバーの1つが、先端材料やナノテクによる革新であり、またそれを有効に動かすデジタルトランスフォーメーションである。

(2) 私たちの生活に直結するテクノロジー

先端材料やナノテクは、私たちの生活を取り巻くさまざまな素材や製品の開発に用いられている。一般消費者が手にする製品であれば、日用品や衣料品、スマートフォンなどだが、これらは一見ただけではどんな素材でできているのか、どんな先端技術が活かされているのかはわからない。ましてこれほど普及したIT機器を構成する素材には、気を留める消費者はほとんどいないだろう。しかし、熱を発する人工繊維でできた衣服や、皆が楽しむ色鮮やかなSNS写真を生み出すディスプレイやスマートフォンのカメラ、さらには、排気ガスをほとんど出さない車や自動運転車など、社会が求める機能を次々に実現していく源泉には、いつも新材料や新デバイスがある。2014年のノーベル物理学賞の対象となった青色LEDも、材料のイノベーションを成し

遂げた研究者・技術者たちによってもたらされた。次に期待されるのは、抗ウイルスの表面機能を持った衣料素材の開発や、希少資源に頼らない環境に優しい材料、患者への負担が少ない治療や診断を実現する素材や機器、再生可能エネルギーを生み出したり貯めたりするデバイス、そして世界中の子供たちに夢を与えるような、あっと驚く機能を発揮するような新材料・新デバイスを用いたサービスであろう。さらに、廃水を綺麗にする材料や、災害に強い材料、壊れても自己修復する材料、光、電気、磁気、熱、音などのエネルギーを自在に制御して相互に変換する材料、危険を予測・検知するセンサなど、イノベーションが求められる領域は広がっており、そのための技術シーズへの期待は高い。こうした新材料・新デバイスのイノベーションを牽引している1つが、今も進化を続けているナノテクだと考えることができる。ナノテクは一般に1nmから100nm程度の範囲の微小世界を対象としているが、3次元で考えれば原子が数個から数万個集まった分子がこの領域に入る。物質が発現する多様な機能はこのスケールで生み出される。人間の目で観察できるサイズの世界では、人工物と生体は全く異質でつながらないものだが、ナノレベルの世界では共通の原子が見えて、類似の分子が確認できるようになる。つまり、人工物と生体との融合は「ナノの視点」を持って初めて可能になる。事実、ナノバイオテクノロジーという融合領域の研究が世界で進み、新たながん治療技術や、生体信号センサへの応用開発などにつながっていく。今般のような感染症ウイルスの分析デバイス開発にも、ナノテクは1つの鍵になっている。

こうした応用を実現するために欠かせない技術が、物質や材料を精密に制御・加工して、デバイス・製品を製造する技術である。その代表格が半導体プロセスにおける微細加工技術である。物体を削りながら構造形成する“トップダウン”の加工技術であり、半導体チップに用いられる最先端微細加工プロセスは、近年シングルナノ（10nm未満）世代の回路を構成するにいたり、極端紫外線（EUV）光を用いることで究極の微細加工技術として2018年に実用化された。現在の最新スマートフォンには7nm世代と呼ばれる技術が実装され、さらに今、5nm、3nm世代の開発が進んでいる。微細加工プロセスに実に20年ぶりの技術転換が起こった衝撃は大きく、今後しばらくは、5G～6G通信用半導体チップ製造や、AIを構成するコンピューターチップ製造のコア技術の1つであり続けるだろう。一方、生命の根源であるDNAからアミノ酸→タンパク質→細胞→組織→個体と“ボトムアップ”に形態を構成していく生体は、DNAらせん構造の直径が4nmほどであることから、微細加工技術が到達する極微スケールとほぼ同じサイズから始まる。そして自己組織化によってメートルスケールの構造を実現している。今、最先端のナノテクを駆使して、DNAやその関連分子をパーツとして複雑な構造物を人工的に合成する研究開発も行われている。ウイルスのワクチン開発に用いる技術の1つとしても期待が集まる。また、電子顕微鏡の分解能は0.039nm（2018年時点の世界記録）に達し、ナノからさらに2桁も小さな極微世界を観察できる究極的な技術にまで到達している。2017年のノーベル化学賞の対象となったクライオ電子顕微鏡の登場によって、生体内で重要な働きをしているタンパク質を3次元構造として観察することもできるようになってきた。原子分子のレベルまで見えるようになると、これを活用して生命の仕組みを解明することで、新たな医薬品や診断技術の開発、生体機能を制御・修復する材料の開発、新しいエネルギー変換技術や優れた材料の合成技術、さらには脳を模倣した人工知能型デバイスの開発などが視野に入ってくる。これらはまさに、先端科学技術の研究開発と、製品・サービスをデザインしていくビジネスによって初めて可能になるもので、多様なバックグラウンドを持つ専門家の協働と異分野融合が肝となる。

(3) 次世代へ向かう変化の視点

日本の失われた30年とともに社会を取り巻く産業構造は様変わりしているが、情報機器のデジタル化によっ

て目に見えないサイバー空間は拡大し、市場を大きく牽引している。サイバー空間の構成要素であるインターネットもAIも、そこにある膨大なデータも際限なく拡大し、ICT産業やサービス産業を通じて使用される情報機器の進展と相まって、見えないサイバー空間を増幅させている。これらサイバー空間を実現する機器とその素材には、常にイノベーションが要請されている。上述のナノテクに関していえば、当初に期待された技術のいくつかは実現してきたといえるが、一方でまだ、自己組織化によって優れた材料が原子・分子から自動的に組み上がったり、複雑な機能を持ったナノマシンが大活躍したりといったことには距離がある。世界中で今も挑戦は行われているが、熱力学的な限界も明らかになり、2000年代初期の一種のフィーバーとは異なる、冷静で着実な研究開発が継続しているとみるべきだろう。同時に進むのが、先端技術のELSI/EHSの側面である(ELSI: Ethical/倫理的, Legal/法的, and Societal/社会的 Issues、EHS: Environmental, Health, and Safety)。ブダペスト宣言以来「社会における、社会のための科学」が国際的な共通項となったが、日本では自然科学と人文社会科学との間にある隔たりや、先端科学技術と企業経営との乖離に課題があり、私たちは今、大きな問いを投げ掛けられている。

図1.1.1-1はSociety 5.0で掲げられるビジョンの実現に際し、その基盤となるナノテク・材料技術の例を示すものである。社会の変化とともに求められる応用技術は変化していくと考えられるが、その基盤となる技術群を磨き続け、社会とともにその新たな方向性を見出していくことが一層重要であろう。

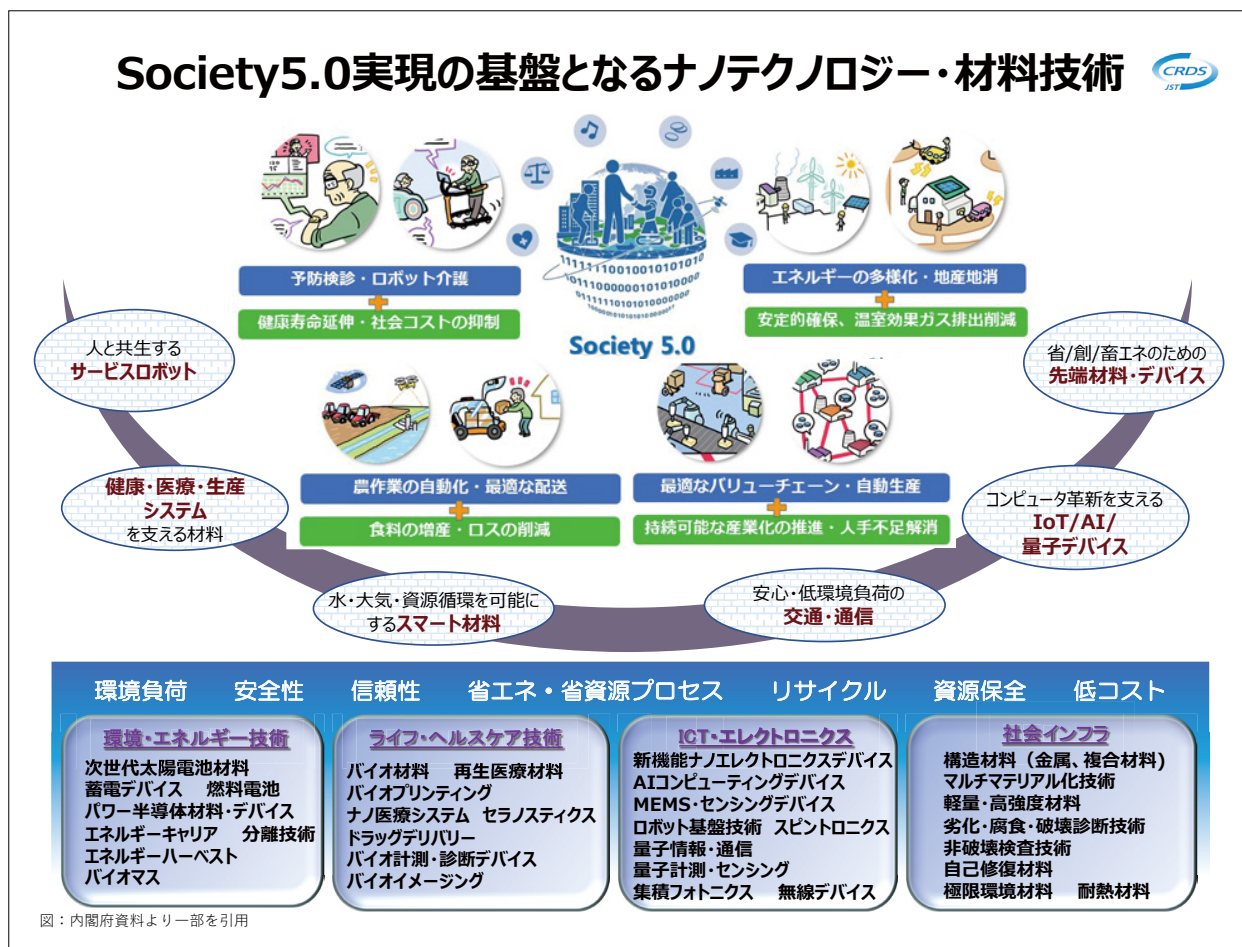


図1.1.1-1 Society 5.0 実現の基盤となるナノテクノロジー・材料技術

1.1.2 科学技術の潮流・変遷

本項ではまず、材料とナノテクのそれぞれの観点から技術進化の歴史の変遷を概観したうえで、今起きつつある技術的な潮流を述べる。

(1) 材料科学技術の進化の歴史

金属、プラスチック、セラミックス、半導体など、多様な材料が新たに出現することにより社会の変革がもたらされてきた。鉄鋼を中心とする構造材料が18世紀の産業革命を支え、ジュラルミンなど軽量合金が航空機時代をもたらした。ナイロンの発明は日常生活、とりわけ衣料・服飾界に革命を招来し、半導体をはじめとする電子材料は情報通信の飛躍的発達をもたらした。材料科学技術が、新しい機能を持つ材料や飛躍的な性能向上をもたらす材料を生み出し、時代を切り拓いてきたといえよう。日本はこれまで、物質・材料研究を積極的に進め、新材料技術の開発では世界に先行する場面が多く、部素材の基幹産業を支えながら新しい産業を生み出してきた。以下、これまでを振り返り、材料の発展に対する日本の貢献についていくつかの例をあげる。

1980年にJ. B. Goodenoughと水島公一（当時、Oxford大学）により、リチウムイオンを吸蔵するリチウム遷移金属酸化物を電池の正極に使用する電池が提案された。1980年代には、負極に炭素、正極に LiCoO_2 という正負極材料を組み合わせた現在のリチウムイオン電池の原型にあたる基本構造が吉野彰（当時、旭化成）により考案され、1986年に実用的なプロトタイプが完成した。1991年に実用化され、その後ノートパソコンや携帯電話のようなポータブル電子機器に広く使用できるようになった。リチウムイオン電池の大型化が進み、電気自動車の蓄電池や非常用電源、さらには気象条件によって時間的に出力が変動する太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの定置用蓄電池としても実用化が加速している。リチウムイオン電池を開発した一人として吉野彰は2019年にノーベル化学賞を受賞した。繰り返し充電可能かつ軽量で高出力なリチウムイオン電池はワイヤレス機器普及の基盤となり、こうした機器は生活に欠かせないものとなった。今後さらなる普及拡大が予想され、化石燃料に頼らない社会の実現可能性を高めたことによる貢献は、ノーベル賞受賞理由において「人類に最大の恩恵を与えた」として高く評価されるにいたった。

1917年に本多光太郎が初めて人工的に合金で構成される永久磁石KS鋼を開発したが、永久磁石でもっとも強力とされているネオジウム磁石は、1984年に住友特殊金属（現：日立金属）の佐川真人によって発明された。その後改良が重ねられ、現在、ネオジウム磁石は電気自動車、風力発電、ハードディスクやMRIなどさまざまな分野で利用されている。その生産量は年々上昇を続け、焼結製品だけでも世界で年産13万トンに達している。

1968年の本多健一と藤嶋昭（当時、東京大学）による酸化チタンを用いた光電気化学（ホンダ-フジシマ効果）の発見は、その後数十年を経て、耐候性に長けた汚れのつかないセルフクリーニング（光触媒コーティング）技術として1,000億円規模の産業を生み出すにいたり、また人工光合成という究極のクリーンエネルギー技術に挑戦する研究開発では、日本が世界の最先端をリードしている。

1986年には、赤崎勇と天野浩（当時、名古屋大学）により窒化ガリウムの高品質な単結晶膜形成等の研究成果が生まれ、1993年に中村修二（当時、日亜化学工業）らにより InGaN （窒化インジウムガリウム）を用いた高輝度の青色LEDが開発された。その後1996年には、量子井戸構造を用いた青色LEDおよび青色レーザーが世界で初めて実用化された。この青色LEDと蛍光体を組み合わせることで白色LEDが実用化された。白色LEDの実現により、液晶ディスプレイのバックライト光源、高効率な一般照明、車載ヘッドランプなどとして世界的に普及が進んでいる。高輝度で省エネルギーの白色光源を可能とする青色LEDの発明に対して、赤崎・天野・中村の三氏は2014年にノーベル物理学賞を受賞した。さらに今、コロナ禍において屋内の

ウイルスを不活化する紫外線LEDランプに展開し、ウイルス防護・対策の手段として普及拡大が期待されている。

1995年に、ハードディスクに情報を高密度に書き込み、その記録を高速に読み取る磁気ヘッドに関して、宮崎照宣（東北大学）らが室温で有為な大きさ（20%）の磁気抵抗比を持つトンネル磁気抵抗素子（トンネル障壁材料は AlO_x ）を開発した。その後、2004年に湯浅新治（産業技術総合研究所）らは、トンネル磁気抵抗素子のトンネル障壁材料を酸化マグネシウムに置き換えることにより、磁気デバイス応用の鍵を握る磁気抵抗比の大幅向上を達成した。2007年に実用化され、現在の大容量ハードディスクの磁気ヘッドとして世界中で使用されている。

1994年、細野秀雄（東京工業大学）らによって発見された、TAOS（透明アモルファス酸化物半導体）は、アモルファス相でも高い電子移動度を有する透明な酸化物半導体である。この一種であるIGZO（In-Ga-Zn-O）を半導体材料として用い、ディスプレイ応用などで低消費電力化が可能な薄膜トランジスタ（TFT）としての動作を2004年に実証した。現在スマートフォンやタブレット端末をはじめとした製品にディスプレイとして組み込まれている。

ナノスケールの特徴的な構造を持つナノカーボン材料においても日本の貢献は大きい。その代表例の1つであるフラーレン（ C_{60} ）は、1984年にクロトー（英）、スモーリー（米）、カール（米）によって発見されたが、炭素の6員環と5員環からなるサッカーボール構造については、1970年、大澤映二（当時、北海道大学）が構造モデルを発表している。同じく、代表的なナノカーボン材料であるカーボンナノチューブ（CNT）は、1991年、飯島澄男（当時、NEC）が発見し、炭素6員環ネットワークが筒状になった構造モデルを発表している。1970年代から炭素繊維を研究していた遠藤守信（信州大学）は、その後、気相法によるCNTの成長技術を開発し、量産化技術へと発展させた。このように日本が主導してきたナノカーボン材料は、2004年に登場した炭素の2次元原子層であるグラフェンへと発展し、特異な電気的、機械的、化学的性質を有することから、電子デバイス、スーパーキャパシタ、ディスプレイ、強靱な複合材料、医療・バイオ用材料などの工学的応用への期待が高まっている。日本が世界市場の過半を有する複合材料の代表である炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は、1961年における進藤昭男（産総研）らによるPAN系炭素繊維の製法開発とそれに続く日本の企業による長年の製品開発の結果、高品質の軽量高強度材料として量産化が可能となり、航空機や自動車への採用が進むにいたっている。図1.1.2-1に日本が誇る材料研究による社会的・経済的なインパクトとして主要な事例をあげておく。以上の例も含め、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は通常、15～30年といった長い年月を要する。近年はグローバルな開発競争が激しくなっており、研究開発から実用化までのスピードが要求され、日本が先導的な役割を果たせるかは予断を許さない状況になっている。その意味で、進展の著しい計算科学やデータ科学を駆使することによる、物質・材料に関する未知の知識発見や最適化を高効率に行おうとするマテリアルズ・インフォマティクスの研究開発アプローチが世界的に拡大している。

(2) ナノテクノロジーの進化の歴史

20世紀後半は科学技術の進歩によって、驚異的な経済発展が遂げられた世紀である。その先駆けとなったのが量子力学の登場である。量子力学をベースに物理や化学に大きな発展があり、特に第二次世界大戦後はそれら学問を基盤にした工学が発展し、新技術が生まれ、多くの産業が開花した。とりわけ半導体産業は、1947年のBardeen、Brattain、Shockleyらによるトランジスタの発明を起点に興り、後にムーアの法則と呼ばれる半導体技術の微細化ロードマップに従う形で集積回路チップ上の素子の微細化と高集積化が進み、電子機器の飛躍的な性能向上と普及につながっていった。

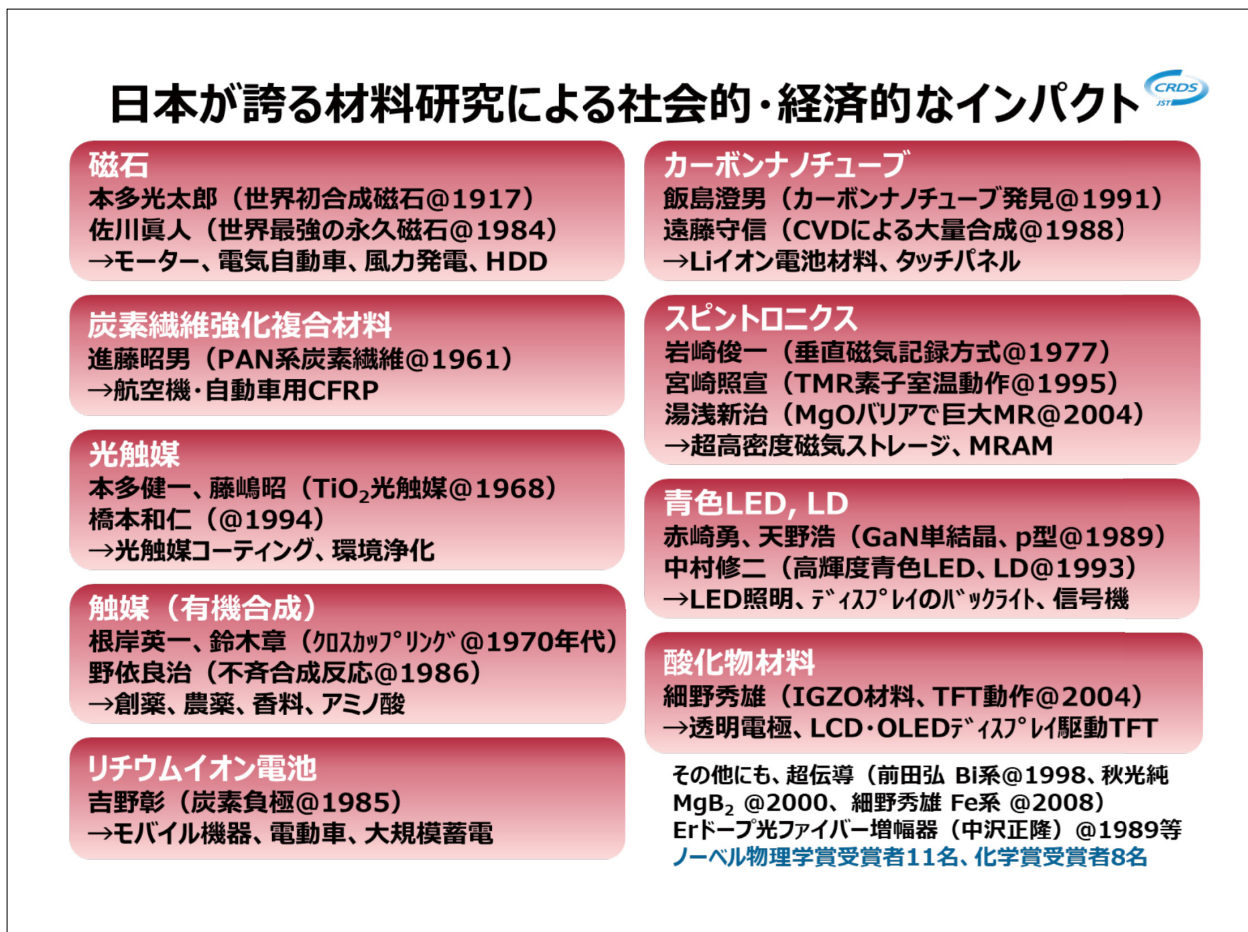


図 1.1.2-1 日本が誇る材料研究による社会的・経済的なインパクト

このような先端技術の流れのなかで、後のナノテクノロジーの興隆を予見した言葉として、ノーベル物理学賞を受賞した米国のFeynmanのコメントが良く引用される：“There's a plenty of room at the bottom”。1959年、米国物理学会の講演で原子分子レベルの現象を扱う科学技術の可能性を予告したものである。その3年後の1962年、久保亮五（東京大学）は金属微粒子における量子サイズ効果を理論的に計算し、ナノサイズになると通常のバルク材料とは異なる性質が現れることを示した。これは、ナノスケール効果の最初の具体的理論予測といえる。他にも1960年代には、日本の大きな貢献として、トンネルダイオードでノーベル物理学賞を受賞した江崎玲於奈の半導体超格子の提案と実験（当時、米国IBM研究所、1969年）がある。1974年の生産技術国際会議において、谷口紀男（当時、東京理科大学）が初めて「ナノテクノロジー」という言葉を用いて、技術の概念提唱を行っている。

図 1.1.2-2 は社会・産業の変遷とともに、ナノテクノロジーがどのように進化してきたのかを示したものである。図に示すように、1990年代になると、半導体のLSIがコンピュータや通信機器をはじめ多くの電子機器に広く使われるようになり、電子機器のデジタル化が急速に進んだ。一方、東西冷戦の終結以降、米国において軍のなかに閉じ込められていた多くの先端技術が民間に開放され、積極的に民用展開が図られていく。GPSやARPANET (Advanced Research Projects Agency Network) などの通信ネットワーク技術がその代表例であろう。やがて、ARPANETはインターネットに進化して人々の生活に大きな影響を与えるように

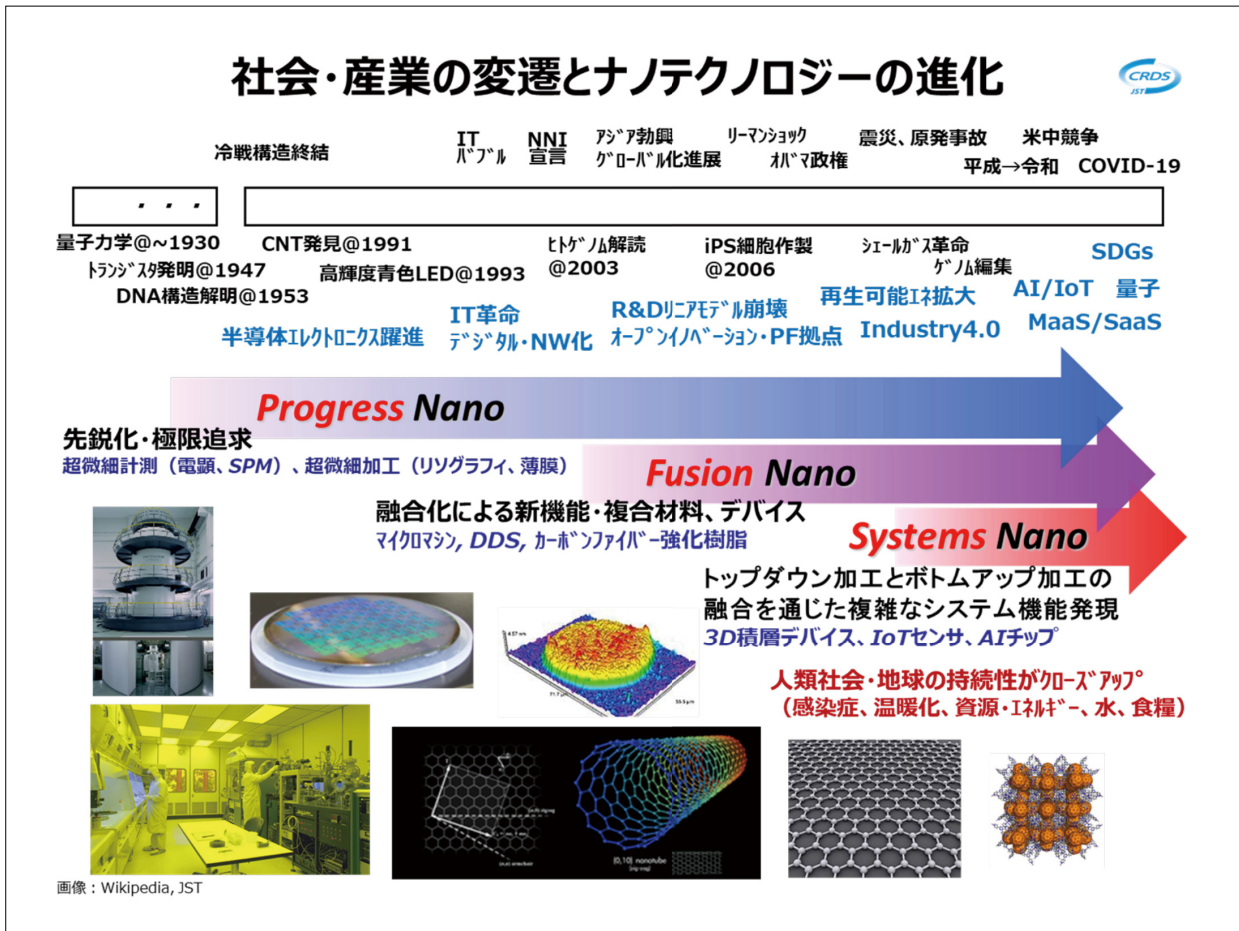


図 1.1.2-2 社会・産業の変遷とナノテクノロジー・材料の進化

なる。先に述べた半導体の微細化技術の進展により、電子機器のデジタル化が進むとともに、インターネットを中心に進展する情報のネットワーク化が、その後のIT革命を牽引した。1990年代後半以降、半導体の微細化限界が顕在化するにつれ、それを突破する技術革新（3次元積層技術やEUV極短紫外線露光技術）が求められるようになる。同様にハードディスクなどのストレージの世界でも半導体のムーアの法則を上回るスピードで、記憶セル領域の微細化、記憶容量の大規模化が進み、技術革新が常に求められた。これらがナノテックの研究開発をドライブし、IT革命を支えるナノエレクトロニクスの研究が時代の中心的テーマでもあった。

2000年代に入ると、米国が「国家ナノテクノロジーイニシアティブ (National Nanotechnology Initiative: NNI)」を開始する。米国は当時のIT革命を支える情報通信技術やソフトウェア技術で、またバイオテクノロジーの分野で他国の追随を許さず、それらの技術が生み出す産業分野で独走状態にあった。一方で、21世紀の先端技術産業を展望すると、物質科学に裏打ちされたナノスケールの物質制御技術の重要性がクローズアップされつつあった。当時、すでに物質科学をベースとする新しい技術として、CNTやGaN青色発光素子などが日本で生まれており、21世紀も米国が経済的、軍事的な覇権を握るためには物質科学をベースとするナノテックの技術開発競争で世界をリードすべきとの強い危機意識が、NNIにつながったとみられる。

同じく2000年頃から、生命科学分野でも技術の大きな躍進がみられる。きっかけはヒトゲノムの解読技術

や遺伝子組み換え技術に代表されるバイオテクノロジーである。生命科学の躍進に対して、多くの情報科学者やナノテク・材料研究者が生命科学・バイオテクノロジーとの境界領域の研究開発に参入した。その後の進歩は著しく、ES細胞研究やiPS細胞の創出をはじめ、ゲノム編集のような新技術の獲得が次々と起こり、まさに100年前の量子力学が創生期から実用へと徐々に向かった様を彷彿とさせる。現在の先端技術産業を支える物質科学の源に量子力学のベースがあることを考えると、生命科学分野の膨大な知の蓄積が人類にもたらす恩恵は計り知れないが、同時に倫理的な側面や安全性についても社会的な合意形成やルール作りが必要になっている。量子力学という新しい学問分野の出現からそれを産業として現在まで発展させるのに人類は100年余を要した。しかしこれまでに物質科学をベースに発展してきた分子・原子レベルの計測技術、シミュレーション技術、データ科学、ナノスケール微細加工や物質合成技術といったナノテクが強力なツールとして機能することで、はるかに短い期間で、生命科学における知の蓄積が、医療・診断・健康といった社会・産業技術として開花するものと期待される。事実、遺伝子、RNA、タンパク質、代謝産物等から得られる生体情報を数値化・定量化するための技術やデバイス・装置のほとんどが、ナノテクや材料技術の寄与なくしては実現不可能なものである。ナノ粒子をキャリアとした薬物送達システム（ナノDDS）は、疾患部位へ効率的に薬物を到達させ、薬効を制御するとともに副作用の低減を可能にした。温度感受性ポリマーは細胞培養基材に応用され、生体に移植可能なシート状の細胞集合体形成を可能としている。

デジタルテクノロジーの恩恵を受けながらこの20年間に私たちの生活は驚くほど豊かになった一方で、SDGsのような人類社会の持続性にかかわる重大かつ根源的な課題に直面している。化石資源から発せられるCO₂をはじめとする温室効果ガスに起因する地球温暖化問題、世界全体での人口増大や経済活動の拡大に起因する、エネルギー、水、食糧、資源の不足・枯渇、環境汚染や感染症対策などである。この解決には科学技術の総力をあげた取り組みが不可欠であり、なかでも物質科学をベースに情報科学や生命科学を融合した領域でのイノベーションが求められており、ナノテクの進歩は欠かせない要素である。

ここまで、ナノテクを取り巻く環境の歴史的変遷を述べたが、時代の要請、技術の進展に伴って、ナノテクの役割は進化していった。その進化の過程は技術の先鋭化→融合化→システム化と3つのステージをたどっていくものとして国際的に認識されているが、新しい技術の登場、新しい社会的課題の顕在化によって、上記の過程は繰り返され、それらは重層的、階層的に世代推移をしている（ナノテクの進化過程については俯瞰報告書2017年版を参照）。

(3) 現在の技術潮流

■ Society 5.0の実現

Society 5.0の実現には、コンピューティング技術の向上がボトルネックになる。その性能向上の担い手である集積回路は微細化の限界に直面しており、従来のCMOSロジック回路によるノイマン型のコンピューティング技術だけではさらなる性能向上が困難になってきている。電子機器の発展において、半導体、特にCMOSの微細加工技術の進展が果たしてきた役割は非常に大きい。インテル社創業者の一人であるゴードン・ムーア氏提唱の「ムーアの法則」をよりどころに、IBM社のロバート・デナード氏による「スケーリング則」の設計指針もあり、3年または2年で4倍の集積度と20～30%の動作速度向上および低消費電力化を達成してきた。半導体産業は微細化による技術革新で電子機器の高性能化と製造コスト低減を可能にし、その適用対象を大型計算機からパーソナルコンピュータ、デジタル家電、モバイル、クラウドサーバへと変えながら、電子機器産業全体を牽引してきた。

1998年から国際半導体技術ロードマップ（International Technology Roadmap for

Semiconductors : ITRS) が発行されるようになり、ムーアの法則を堅持する課題を国際的に共有する活動へと発展し、国際学会でも新たなデバイス構造や材料適用の提案が相次いだ。ITRSは2017年以降、IRDS (International Roadmap for Devices and Systems) に衣替えし、半導体からより広がって次世代コンピューティングデバイス・システムのロードマップを公表している。現在はIRDSの2020年版ロードマップが公開されており、次世代AIデバイス、脳型コンピュータ、量子コンピュータ、これらを実現するデバイス新構造や新材料など、より広範な新デバイス・新材料が取り上げられている¹⁾。

半導体の微細化限界を突破するためには3つの方向性があるとされる。1つ目は、さまざまな機能のデバイス (CMOS、スピンドバイス、フォトニックデバイスなど) を3次元的に集積化する流れである。2つ目は、ニューロモルフィックコンピューティング、量子コンピューティングなどに代表される、新計算原理・新アーキテクチャを取り入れるアプローチによるものである。3つ目は、デバイスを構成する材料そのものを見直そうとするものであり、近年ではトポロジカル絶縁体やグラフェンのような新物質の持つ電子的特性を活かし、消費電力低減と超高速化を同時に実現する革新デバイスの創製をめざす流れである。EUVやナノインプリントリソグラフィなどの露光技術や3次元化集積技術の導入により、今後も微細化・集積化は当面続くものと予想されるが、集積回路の性能向上、消費電力低減の傾向は確実に鈍化している。IoTの進展やビッグデータなど、巨大で複雑なデータ処理への要請が高まり続けていることから微細加工だけによらない性能向上をめざす動きは活発化してきている。すでにメモリでは3次元に積層することでスケーリングを実現するデバイスが量産され、ロジックデバイスでもチップを積層する技術が導入されている。今後はシステムレベルで新たなアーキテクチャが展開されることが重要になる。Society 5.0の実現に向けては、新しいコンピューターシステム、アルゴリズム、アーキテクチャ、デバイス・材料などの技術レイヤー全体を含むコンピューティング技術の革新が望まれている。

一方、ビッグデータを活用したCPSの進展は、ナノテク・材料の技術開発そのものにも大きな影響を与え始めている。日々更新され、新規に追加される大量の材料データが蓄積されることで、そこから新たな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探索、開発が可能になる。材料科学技術と情報科学技術の融合が必要であり、データ駆動型材料開発、材料研究開発のDX化の取り組みは、世界的な競争領域であり進展への期待は大きい。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広げている。量子力学が支配するナノスケールの構造から始まって、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の研究開発も進む。さらには、これらのデジタル化された設計データをもとに、目的の構造物を自在に作成可能な3Dプリンティング技術の進歩も著しく、情報科学技術に牽引されるCPS、DXの進展が、ナノテク・材料・デバイスの製造技術を含む、ものづくり技術全般の革新をもたらしている。

■ポスト/withコロナ時代のヘルスケア・医療に求められる新たなナノテクノロジー・材料

コロナ禍によって、わが国の社会保障・ヘルスケア・医療体制は本報告書執筆の2021年初頭段階で重大な局面が続いている。逼迫する医療資源のみならず、感染の日常的な予防技術やその仕組み、より正確な診断・分析技術、重症化の抑制、ワクチン開発などに、新たなナノテク・材料科学技術の適用とそれらの早期実用化が求められている。コロナ禍以前から、わが国では平均寿命が年々延び、1975年に女性77.35歳、

1 IRDS 2020 Edition, <https://irds.ieee.org/editions/2020> (2021年2月16日アクセス)

男性72.15歳だったものが、2019年には女性87.45歳、男性81.41歳と、10年近く延びている。一方で健康寿命と平均寿命には10年程の開きがあり、この差はなかなか縮まらない。人生における不健康な期間をできる限り短縮し、健康寿命を延ばすことは、QOL (Quality of Life) 向上による活力ある社会の実現と、医療や介護にかかる社会保障費抑制の観点から喫緊の課題である。できるだけ病気になること (健康維持)、罹患した病気を治すこと (疾患治癒)、身体の機能低下・損傷部位を補うこと (身体機能の補修・代替) が必要となる。未病段階における超早期診断、健康状態に直結する生体情報のモニター、簡便な診断技術・システム、難治疾患・がん・脳疾患・感染症等の根本的治療、機能を失った組織を代替する技術など、多数の医療・健康ニーズが存在する。これらの医療・健康ニーズに応える技術への要請は年々高まっており、例えば、生体成分やウイルスの高感度検出・分析技術、無炎症・無感染の埋め込みデバイス・ウェアラブルデバイス、組織・臓器再生、ヒト組織・生体環境モデルによる試験研究環境、in vivo 診断・治療などの研究開発が期待されている。

感染症をはじめとする諸課題に対応するこれら技術の実現には、生体と物質の間で生じる諸現象を制御する材料・デバイスが必須である。例えば、生体組織が再生し機能を発揮するように細胞を誘導する材料や、生体と物質・情報をやりとりすることで検査・診断・治療を行う材料・デバイス、体外で細胞の3次元組織化を実現しモデル組織を構築する材料などが該当する。一方、生体組織や細胞、体液などの生体を構成する成分に接して利用される「バイオ材料」は、機能発現の以前に生体から異物認識されない生体適合性を有することが不可欠であり、そのためには多様な生体環境に対する適合性の発現メカニズムを解明することが鍵になる。

医薬品の開発は、長期にわたり多額の投資を要するが、新規医薬品 (低分子化合物) 開発の成功率は0.004%と極めて低く、また、臨床試験に入ったものであっても承認にいたる確率は40%程度である。これは前臨床試験において動物で確認された効果がヒトでは得られないこと、いわゆる種差によるところが大きい。動物実験の削減・撤廃に向かう世界的な動きへの対応と、ヒトの薬物動態評価をin vitroで行うことが可能な評価系の確立が求められている。このことが、医薬品開発の高速化・効率化へ結びつく。

■大転換に向かう環境・エネルギー政策、産業と科学技術への期待

今、世界の環境・エネルギー政策は大転換に向かっている。サーキュラーエコノミー、カーボンニュートラル、水素社会、再生可能エネルギーの急拡大など、産業界におけるESG投資の拡大とDXの進展・浸透とともに、各国の環境・エネルギー政策は大幅な転換を求められている。日本の原発事故に端を発した原子力エネルギーに対する見直し、あるいは国・地域によって方向性が分かれてきた原子力や化石資源への依存度合に関する政策変化は、各国の安全保障政策と深く関係し、地政学的な変動が起きている。同時に、SDGs、温暖化・気候変動、生物多様性確保、食糧生産、大気・土壌・海洋汚染・水資源不足など、複雑な地球的問題との連関のなか、各国は中長期的なエネルギー政策の検討を進めている。

再生可能エネルギーに関しては、太陽光や太陽熱エネルギーを利用した発電や風力発電の出力変動と需要家側の負荷変動の影響をバッファする大型の蓄電池や、電気自動車 (EV) に代表されるモビリティ用の蓄電池などを普及させていくためにナノテク・材料・デバイス技術の革新が欠かせないと認識されている。発電技術そのものに関しては、電力変換効率とともに耐久性・安定性へのニーズが特に高まっており、また蓄電池に関しては、コバルト等の偏在希少資源依存への対策・代替だけでなく、これまで注力されてきた容量と出力密度向上に、急速充電特性を兼ね備えることへのニーズが特に高まっている。モバイルやIoT、EV、ドローンなどの用途には、蓄電池の性能向上はまさに核となる課題であり、世界的な大競争となっている。日本は世界に先駆けてリチウムイオン二次電池の技術開発を行い、技術的には、これまでずっと世界のトップを走り

続けてきたが、産業の面では近年、中国・韓国をはじめとする国々が市場シェアを拡大しており、日本は厳しい競争にさらされている。特に競争の激しくなっている電池を構成する主要材料（電極、電解質、セパレータ）だけでなく、EVへの実用化が期待される全固体蓄電池で、競争力強化につながる技術革新が求められている。

また、より大きな規模で、各国のエネルギーミックスを再生可能エネルギー中心に変えていくことを考えたときにも、風力、太陽光、熱、地熱、海洋などのさまざまな自然エネルギーから電気エネルギーへの変換、エネルギー採取適地から大規模消費地へのエネルギー貯蔵・輸送のため電気エネルギーと化学エネルギーの間の変換などにも、材料技術の発展は大きく関与することになる。高効率な太陽電池、風力発電用モータや構造材料、炭化水素やアンモニアなどのエネルギーキャリア技術、燃料電池、人工光合成技術などがそうした技術要素となる。

利用可能なエネルギーを生み出す技術だけでなく、社会が生産・消費するさまざまなものを、原料から製造し、使用後に廃棄するまでのすべての過程でのエネルギー消費を削減するためにも材料技術の発展が求められる。あらゆる素材・デバイスの作成・使用過程において、省エネ技術は経済的にも環境的にも極めて重大な課題となっている。

環境面では、大気や土壤汚染の改善・防止技術、河川・海洋汚染（特にナノ粒子も含むマイクロプラスチック）、そして建築物を含む社会インフラの持続性がクローズアップされる。サーキュラーエコノミーの観点から、物質・材料・デバイスを、原料段階から、製造・加工、使用・消費、廃棄、リサイクルの循環まで、科学技術と社会制度・法規制の変革によっていかに実現させるかが、長期的な重要課題となる。もっとも多く使われる主原料である鉄、炭素、水素、酸素、窒素、リンをはじめとして、その他の鉱物元素や生物資源など、あらゆる資源の利用が持続可能となるような技術が強く求められている。同時に、生態系・生物多様性への影響を最小限に抑えることが求められており、自然環境への影響や相互作用が考慮されるものでなければならない。すなわち、環境への影響を考慮しながら、物質資源と生物資源の適切な利活用を実現していくことが、未来を見据えた世界共通の課題である。究極的には、製品として使用したすべての資源を、合理的に再利用するプロセスを実現することが目標となるだろう。そのための要素技術として、例えば、希少資源の低エネルギーな抽出・分離や、採掘・精錬時の環境影響の解決（不要物質や汚染物質を出さない技術）、代替技術、バイオマスの高効率生産、新素材として注目されるセルロースナノファイバーなどを用いることによる、石化製品の代替が期待されている。普及には素材としての性能だけでなく、プロセス・エネルギーコストや、原料資源を大量生産・消費した際の環境影響を、経済性を両立させながら抑えることができるかどうかにかかっている。

1.1.3 俯瞰の考え方（俯瞰図）

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。その土台の上に、作成・合成、評価・分析、解析・設計を行うための基盤技術が構築され、その技術を用いて具体的な物質・機能の設計・制御が実現される。そして、デザインされた物質・機能をデバイス・部素材に適用し、最終的に環境・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、社会インフラなどの分野に対し、横断的に革新をもたらすイノベーション・エンジンとして機能する。これらの全体像を俯瞰図として図1.1.3-1に示す。

ナノサイエンスの土台の上には、たゆまず進展してきた微細加工技術や、材料プロセスと成形が一体化した積層造形などの製造技術、高分解能顕微鏡などサブオングストロームの分解能に及ぶ計測、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、データ科学などを柱とした共通基盤科学技術が構築される。そうした基盤技術を利用することで、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などの物質と機能を結ぶ設計・制御技術が構築されている。

これら物質・機能を組み合わせることで部素材、あるいはデバイスが構築され、それら多様な部素材・デバイスは応用目的に応じて、エネルギー・環境分野、ライフ・ヘルスケア分野、ICT・エレクトロニクス分野、社会インフラ分野に貢献することになる。個々の部素材・デバイスの中には、複数の分野で役割を果たすものも多く存在するが、図1.1.3-1では代表分野に集約して記載する。

これら部素材・デバイスは最終的にはシステムとして組み上げられ、低環境負荷、安全性、信頼性、レジリエンス、省エネ・省資源プロセス、リサイクル、資源保全、低コストといった特性も加味されたうえで、持続可能社会の実現（Society 5.0の実現、SDGsの達成）へとつながる様々な社会ニーズに解決策を与える。

また、科学技術が市場あるいは社会に浸透するかどうかを判断する際には、倫理的受容性・持続可能性・社会的要請といった観点からの検討も必要となり、ELSI（倫理的・法的・社会的課題）、EHS（環境・健康・安全）、RRI（責任ある研究・イノベーション）といった考え方にもとづいて、自然科学者と人文社会科学者の対話も必要となる。さらに、研究・技術開発を進めるうえでは施策として重要となる、人材育成策、知財・



図1.1.3-1 ナノテクノロジー・材料分野の研究開発俯瞰図 (2021年)



主要な研究開発領域 (31領域)

俯瞰区分	研究開発領域	俯瞰区分	研究開発領域		
環境・エネルギー応用	次世代太陽電池材料	物質と機能の設計・制御	分子技術		
	蓄電デバイス		元素戦略・希少元素代替技術		
	パワー半導体材料・デバイス		マテリアルズ・インフォマティクス		
	エネルギーキャリア		フォノンエンジニアリング		
	分離技術		トポロジカル材料		
ライフ・ヘルスケア応用	バイオ材料		低次元材料		
	ナノ医療システム		複雑系材料の設計・プロセス		
	バイオ計測・診断デバイス	ナノ力学制御技術			
	バイオイメージング	加工・プロセス	微細加工プロセス		
ICT・エレクトロニクス応用	新機能ナノエレクトロニクスデバイス		積層造形・レーザ加工		
	集積フォトニクス	計測・分析	ナノ・オペランド計測技術		
	スピントロニクス		理論・計算	物質・材料シミュレーション	
	MEMS・センシングデバイス	共通基盤科学技術		共通支援策	ELSI・EHS
	ロボット基盤技術				ナノ・マイクロマテリアルのELSI/EHS、国際標準
	社会インフラ応用	量子情報・通信			
		量子計測・センシング			
	構造材料 (金属)				
	構造材料 (複合材料)				

図 1.1.3-2 主要研究開発領域

標準化戦略、融合連携促進策やインフラ整備などの共通課題を、俯瞰図面右側に「共通支援策」としてまとめて記述してある。特に、ナノ物質においては同一分子式・重量であっても、形状や表面状態などにより機能活性や有害性が大きく変化するため、健康・環境への影響やリスク評価・管理の検討が重要であり、近年国際的にもナノテクのELSI/EHS/RRIが大きな課題として取り扱われている。

ナノテク・材料分野は、この俯瞰図に示す階層を形成しながら、社会におけるほとんどすべての分野のあらゆるニーズに関係している。現代は、社会の変化スピードが著しく速く、複雑で予測しにくい時代である。俯瞰図上では社会ニーズとして「安全低環境負荷の輸送と低消費電力・大容量の通信」「コンピュータ革新を支えるIoT/AI/量子デバイス」「健康・医療・生産システムを支えるバイオ技術」「人と共生するロボット」「水・大気・資源の循環を可能にするスマート材料」「省/創/蓄エネのための先端材料・デバイス」の6つをあげているが、これらのニーズも時代の変化とともに変わりうる。しかし、このニーズがどのように移り変わろうとも、図1.1.3-1の下側に示したナノテク・材料に関する科学技術が、変化する社会ニーズに追従し、解決していく/いかなければならないことは間違いない。

本報告書では、国内外の研究開発動向、マクロ環境などを総合的に把握したうえで、ナノテク・材料分野において少なくとも今後10年間程度は定常的に注視すべき研究開発領域として、31領域を抽出した(図1.1.3-2)。これら個々の領域の研究動向や方向性、国際比較について第2章に記載している。