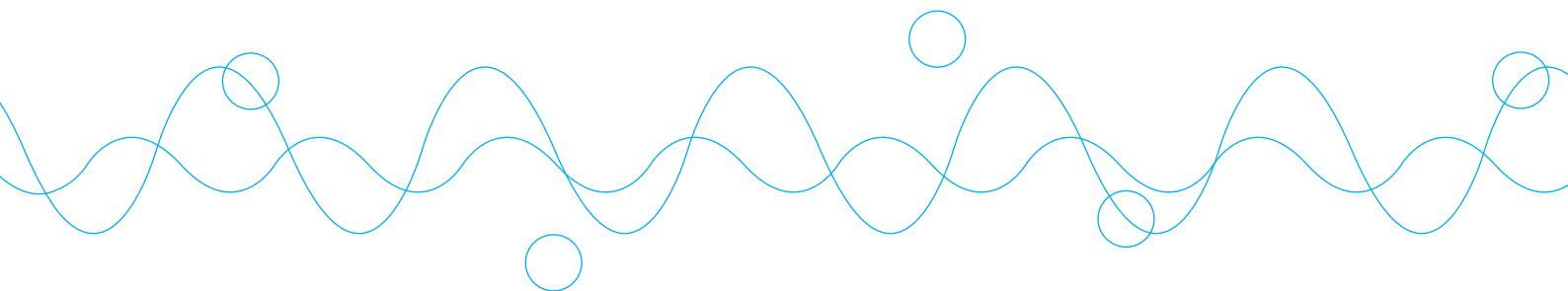


研究開発の俯瞰報告書
統合版（2019年）～俯瞰と潮流～

**Panoramic View Report (2019):
Integrated Version**



はじめに

世界は激動の最中にある。気候変動が人類の生存環境に甚大な影響を及ぼし、世界の政治・経済は不安定な状況が続き、多様な先進科学技術が人々の生活様式を大きく変えてきている。国連主導で人類を持続可能ならしめる SDGs の取り組みも始まった。我が国は高まる不確実性、理不尽な覇権主義の圧力に翻弄されてはならない。現実を冷静に直視しつつ、自らの立ち位置を見定め、確信をもって将来のあるべき姿に向かうべきである。特に科学技術は現代社会存立の基盤であるため、戦略的に適切な方向性を定めなければならない。

科学技術は精密化、高度化の一途をたどり、また知識は加速度的に累積する。一方で根本的な解決が求められる複雑系の科学ないし技術的課題は、もはや細分化した既成分野だけでは不可能であり、頭脳循環や多様な人材の集積による分野連携、融合が強く求められる。さらにイノベーションには、政治、産業経済、教育、健康福祉、食料、交通など社会の諸要素が広く関連するため、社会に実装できる形で科学技術の成果を上げていくためには、自然科学と観点を異にする人文学、社会科学の参画が不可欠である。

科学技術と社会との関係は、深く、複雑、かつ流動的である。1999 年、ブダペスト世界科学会議は科学と科学知識の利用にかかわる自らの社会的責任を宣言したものの、20 年を経て、いまだその実践は不十分と言わざるをえない。科学自体は進歩し続けるが、科学技術は「社会の意思」を踏まえて開発されてきた。その結果、社会自体が科学技術の影響を受け非線形、かつ非可逆的に変容しつつあることを注視すべきである。現代社会の要請の正当性もまた問われるところである。

この不確実な状況を踏まえて、研究開発の全体像を俯瞰し、把握し、冷静に分析、評価することが肝要である。まさに産学官およびそれらの研究開発現場までもを含む科学技術界全体が直面する問題であり、これに向き合うことなく成果が「あるべき社会」の実現に貢献することはありえない。俯瞰の対象は現在の時間的、空間的スナップショットに止まってはならず、歴史に学び、また後継世代との公平性も視野に入れるべきであろう。科学技術的、社会的な価値を相対化し、総合的に正しく評価して初めて、さらなる発展、移行段階への胎動もしくは未来の潮流の兆しが併せて見えてくるはずである。

CRDS は、現代文明社会の変化の大きなうねりを読み取りつつ、持続的発展の観点も踏まえた上で、科学技術が目指すべき方向、また発展の可能性について考えている。本報告書が新たな令和の時代の科学技術振興の一助となれば幸いであるが、読者諸氏のご意見、提言を大いに歓迎する次第である。

国立研究開発法人科学技術振興機構
研究開発戦略センター センター長

野 依 良 治

エグゼクティブサマリー

本報告書は、各分野別に発刊されている俯瞰報告書のポイントを集約しつつ、社会や政策等の動向を踏まえた上で分野を越えた全体像として捉えることを目指し作成されたものである。

世界においては、これまで米欧で育まれた民主主義、市場原理、科学技術を規範とする価値観がグローバリズムを推し進めてきたが、米国による自国第一主義、中国の台頭等により世界の政治・経済が不安定化し、その価値観に揺らぎが生じている。政治・経済の不安定化に伴う国家間競争は科学技術の世界にも波及しており、AI/IoT、量子、バイオテクノロジーなどの国の安全保障にかかわる分野における競争は、さながら国家間の技術覇権争いの様相を呈している。情報通信技術の急速な進展は産業構造等を変えつつあり、IT が企業の産業競争力を左右する状況にある。

また、社会における科学技術イノベーション（STI）への期待が高まりつつある一方、AI、ゲノム編集等に係る ELSI の問題など科学技術への懸念も増大しているが、このことは前述の科学技術に係る価値観の揺らぎを反映しているとも言える。イノベーション実現に向けた政策上の取り組みとしては、関連する諸政策をイノベーションエコシステムとして統合し、総体的に推進しようとする動きが明確になっている。

かかる情勢の下、我が国はより良い未来社会の実現に向け、「超スマート社会＝Society 5.0」の実現を目標として設定し、STI の推進に取り組んでいる。個々の研究開発分野で見れば、我が国が依然として優位性を保持している分野はもちろんあるが、マクロに見て、日本の相対的地位が低下していることが懸念されており、我が国の研究力強化は喫緊の課題である。イノベーションの実現に向けた取り組みとしては、イノベーションエコシステムの構築に向けて拠点形成型プログラム等が実施されているが道半ばであるなど、依然として課題は多い。

また、主要な研究開発分野における動向や我が国の課題についてであるが、環境・エネルギー分野では、気候変動対応、脱化石燃料化、循環型社会形成への関心が国際的に高まっている中で、ビッグデータ化やスマート化への対応等が分野を横断する大きな技術潮流となっている。特にエネルギー分野では安価かつ大量に貯めることが難しく、また変動性が高い再生可能エネルギー由来の電気を変換・貯蔵し、必要な場所やタイミングで利用するための研究開発等が、環境分野では環境ビッグデータの高度活用やモデル改良等に基づく地球観測、及び気候変動影響の予測や対策検討が盛んに行われている。我が国としては再生可能エネルギー大規模導入時代に対応するエネルギー基盤の確立、プラスチックごみ等の人工物による環境や社会への影響把握や資源循環の革新、これらを支える工学系の基礎基盤の強化などが課題である。

システム・情報科学技術は汎用的な基盤技術であり、さまざまな社会システム、産業、他の科学技術分野においてその効果を発揮し、多様な領域での課題解決や新産業創出を加速している。コンピューターが小型になり、機械学習技術が組み合わされる「スマート化」、世界中のシステムがネットワークでリアルタイムにつながる「システム化・複雑化」、人や資産までもサービスコンポーネントとして利用する「ソフトウェア化・サービス化」が技術潮流となっている。我が国としては、人工知能技術を含むさまざまな情報科学技術を活用して課題解決ができる人材の育成・確保、IT を徹底活用した社会システム・産業構造の変革、次世代 AI や量子科学技術等の先端分

野の開拓、急速な社会浸透に対応するための倫理規範整備などが課題である。

ナノテクノロジー・材料分野では、先端技術の技術覇権争いが世界全体へ波及する中、先鋭化・融合化された技術の保有とそのシステム化が市場浸透への要となっている。IoT/AI 時代を牽引する多機能・低消費電力 IoT デバイスや個別化医療応用等を目指した診断・治療・計測デバイス、SDGs に資する水・大気浄化／温室効果ガス排出量削減／資源物質循環を可能とする技術開発などが大きな潮流となっている。また、データ駆動型材料開発（マテリアルズ・インフォマティクス）が、研究成果到達を加速する材料開発の基盤技術として必須になっている。我が国としては、未来社会を見据えた魅力的な機能を有する新材料・デバイス・プロセス技術の開発や国際競争力強化につながる材料開発基盤の構築などが課題である。

ライフサイエンス・臨床医学分野では、大量の生命情報から法則を発見するというデータ駆動型の新しいアプローチにより生命現象の理解が格段に進展している。これにより精緻な理解と予測が研究の基本的な方向性となっている。また、研究対象として、研究開発の循環構造、生命の時空間階層を広く見る必要が出てきたこと、および技術進展サイクルの短縮化の結果、研究単位当たりのハイスループット化、高コスト化、つまり「ビッグサイエンス化」が急速に進展している。我が国としては、個別化・層別化医療の実現、バイオエコノミーの実現、分子・細胞・組織・器官等における生命システムの解明・活用や研究体制の拠点化とそのネットワーク化による研究エコシステム・プラットフォームの構築などが課題である。

以上の俯瞰結果を踏まえ、まずは科学技術における我が国の相対的地位が低下していることを踏まえた上で、我が国が世界の主要国と伍していくだけの研究開発力を得ることが全体としての課題と認識する必要がある。かかる認識の下、全体フレームワークをしっかりとった上で我が国の STI 政策の形成とマネジメントを行うことが重要である。また、ビッグデータや人工知能の急速な進展等に伴う研究スタイルの大きな変化への対応、基礎研究と技術基盤への持続的な支援、そして一人一人の研究者が世界観と歴史観を身に付けて分野を越えた連携に取り組むことも今後の課題である。

21 世紀に入って、科学技術政策はその地平を大きく広げている。「ブダペスト宣言」において強調された科学技術と社会の相互関係は、科学技術と政策の相互関係とも重なり合う。従来は科学技術を振興するための予算や制度等のさまざまな施策を指す「科学技術振興のための政策（Policy for Science）」が中心であったが、「政策課題解決のための科学技術（Science for Policy）」が重視されるようになった。後者はさまざまな社会的課題を解決しようとしている政策に対して科学技術が積極的に寄与することを指す。この両面を実現していくためには、政策形成から実施、評価、政策形成へのフィードバックに至るプロセスを大きく改革する必要がある、それは単に科学技術政策に限らず、産業政策、環境政策、教育政策をはじめとした全分野の政策と政策手段に関係するものである。

この報告書が、今年本格化する第 6 期科学技術基本計画の検討に資するとともに、科学技術と社会とのコミュニケーションと信頼の醸成のための基盤となり、科学技術の多様な国際協力の展開に貢献をすることを期待したい。

Executive Summary

Here we provide the Panoramic View Report (2019): Integrated Version. In this report, we aim at compiling the key points of Panoramic View Reports 2019 in each area and give the general overview with considering the situation on society or relevant policies.

In the world, the values based on democracy, market principles and science and technology (S&T), which have been fostered in the United States and Europe, have promoted globalism. However, the world's politics and economy are made unstable by the United States' nationalism and the rise of China. The values above are wavering. The international competition has spread to the fields of S&T. The keen competition is going on particularly in the fields related to national security such as AI/IoT, quantum technology, biotechnology. The rapid advancement of information and communication technology is changing industrial structure and IT is a crucial factor for industrial competitiveness of a company.

There are growing concerns on S&T such as the ELSI related to AI or genome editing while expectations for science, technology and innovation (STI) in society are also growing. This is supposed to be reflecting the fluctuation of the values mentioned above. As policy measures for realizing innovation, it is getting clear to integrate relevant S&T policies into an innovation ecosystem and promote them as a whole.

Under these circumstances, Japan is promoting STI by setting the goal of “Super Smart Society = Society 5.0” to realize a better future society. There is concern that the relative position of Japan has macroscopically declined while there are, of course, some research areas in which Japan still holds superiority. Japan's research capability has to be reinforced as an urgent issue. There are some efforts to realize innovation such as a center-based program being implemented for the creation of an innovation ecosystem, although it is still in the middle.

The global trend and Japan's issues in the major research field are as follows. In the field of Environment and Energy, one of the major global concerns is climate change and, to tackle this issue, serious discussion on decarbonization is going on. Circular economy is another major topic. From the view point of S&T, developing and operating the internet of things with advanced sensors and communication technologies, and highly sophisticated analysis by utilizing various data are major cross-sectoral technological trends. Since renewable energy such as solar power and wind power are highly fluctuated, power conversion and storage in an affordable way and at large scale are recognized as key technologies. R&Ds for such areas are actively in progress. Model evolution and refinement and utilization of big data are key issues in various areas of environmental field such as earth observation, impact assessment of climate change and development of measures for adaptation to climate change. In Japan, there are many issues to be tackled but the following items are quite important towards the development of sustainable society: management of energy network in which renewable energy

is widely introduced; quantitative assessment of the environmental and social impacts of man-made materials and its wastes such as plastic wastes; establishment of innovative circular economy; and strengthening the foundation of science and engineering for this field.

Systems and Information Science and Technology is a general-purpose basic technology. It exerts effects in various social systems, industries, and other science and technology fields. It also accelerates problem solution and new industry creation in various fields. In the field of System and Information Science and Technology, “being smart”, “being system and complex”, and “being software and service” are major technological trends. “Being smart” is a trend brought by smaller computers combined with machine learning technology. “Being system and complex” is a trend where all systems in the world are connected in real time through a network. “Being software and services” is a trend where even people and assets are utilized as service components. Japan’s issues are fostering and securing human resources capable of solving problems by utilizing various information science and technology including artificial intelligence technology, transformation of social systems and industrial structures that fully utilize IT, challenging advanced technologies like next-generation AI and quantum science and technology, and the development of ethical standards to cope with rapid social penetration of AI.

In the field of nanotechnology/materials, as the competition for dominance in developing the advanced technology spreads throughout the world, possession of progressing and fusing technologies and their systematization are key elements in market penetration. The technology development, such as multi-functional and low power consumption IoT devices, diagnosis and medical treatment devices aiming at personalized medicine application leading to the IoT/AI era, and water, air purification / greenhouse gas emission reduction / resources circulation contributing to SDGs, has become a major trend. In addition, data-driven materials development (Materials Informatics) is essential as a fundamental technology for materials development that accelerates the research achievements. For Japan, the challenges are the development of new materials, devices, and process technologies with attractive functions looking ahead to the future society, and the construction of a materials development platform that will lead to the enhancement of international competitiveness.

With respect to the life science and clinical science, data-driven science shall be the most prominent blooming new trend, where researchers work with hypothesis derived from big scale data analysis. Such a trend allows scientists to understand deeper and more precise mechanisms of wide range of biological events. As high-throughput data acquisition is vital and various levels of “omics” data have to be collected for the integrative understanding of biological events, analytical instruments have also been dramatically advanced in both its capability and prices, resulting in the transformation of biological sciences into a costly “big science”. In order to deliver our national ambitions, such as precision medicine, bio-economy,

deciphering and exploiting the biological systems from the aspect of molecules, cells, tissues, and organs, it is inevitable to establish truly multi-disciplinary and integrated research hubs which are closely networked each other.

We need to recognize that Japan's relative position in S&T has declined and it is our general issue to obtain research capability enough to compete with major countries in the world. Under this recognition, it is important to formulate and manage STI policies in Japan with a firm overall framework. In addition, we need to respond to major changes in research style associated with the rapid advancement of big data and AI, sustainably support basic research and technological infrastructure. It is also a future issue for researcher to work on cross-sectoral collaboration with view of the world and history.

In the 21st century, S&T policy has greatly expanded its horizons. The relationship between S&T and society emphasized in the "Budapest Declaration" also overlaps with the relationship between S&T and policy. In the past, the policy for promoting S&T (Policy for Science), which refers to various measures such as budgets and S&T systems, was basic idea. However, "Science for Policy" is getting important nowadays. The latter means the active contribution of S&T to the policies that aim at solving various social issues. It is necessary to greatly reform the process from policy formulation to implementation, evaluation and feedback in order to realize these two ideas. The reformation is not only related to S&T policy but policies in all areas including industrial policy, environmental policy and education policy.

We expect that this report will contribute to the discussion for the sixth Science and Technology Basic Plan which will be active this year. We also expect the report will be a base for communication and trust between S&T and society, and contribute to international cooperation in S&T.

目 次

はじめに

エグゼクティブサマリー

CRDS における俯瞰報告書の全体構成	1
1. 科学技術イノベーションの俯瞰の前提	3
1.1 グローバルトレンドと「科学と社会」.....	3
1.2 これまでの我が国の科学技術イノベーション政策の俯瞰	20
1.3 主要国の動向のまとめ	25
2. 科学技術の俯瞰	33
2.1 世界の潮流等における分野を越えた動き	33
2.2 分野別俯瞰の概要	37
2.2.1 環境・エネルギー分野	37
2.2.2 システム・情報科学技術分野	40
2.2.3 ナノテクノロジー・材料分野	43
2.2.4 ライフサイエンス・臨床医学分野	45
2.3 環境・エネルギー分野	49
2.4 システム・情報科学技術分野	59
2.5 ナノテクノロジー・材料分野	67
2.6 ライフサイエンス・臨床医学分野	77
3. 科学技術イノベーションの今後の課題	85
（付録）研究開発の俯瞰報告書（2019 年）全分野で対象としている 俯瞰区分・研究開発領域一覧	95

CRDS における俯瞰報告書の全体構成

JST 研究開発戦略センター（CRDS）は、国内外の社会や科学技術イノベーションの動向及びそれらに関する政策動向を把握・俯瞰・分析することにより、科学技術イノベーション政策や研究開発戦略を提言し、その実現に向けた取組を行っている。

CRDS は 2003 年の設立以来、科学技術分野を広く俯瞰し、重要な研究開発戦略を立案する能力を高めるべく、その土台となる分野俯瞰の活動に取り組んできた。特に近年、科学技術と社会との関係が深化する中で、図 1 に示すように科学技術分野および社会の状況を把握することに加え、分野間の融合や分野を越えた動きを捉える中から提言等を取りまとめる努力をしてきた。当然この過程において、研究開発コミュニティ、政策立案者、産業界を含めた社会のさまざまなステークホルダーと対話し、参加を得ることは、研究開発戦略を立てる上で必須の取り組みである。

本報告書、俯瞰報告書統合版（2019 年）では、図 2 に示すように各分野別に発刊されている俯瞰報告書の内容のポイントを集約しつつ、社会や政策等の動向を踏まえた上で分野を越えた全体像として捉えることを目指した。具体的な構成としては、まず本報告書の 1.において、研究分野毎の俯瞰を行うにあたって押さえておくべき前提、CRDS 内にて現時点で共有されている問題意識として、グローバルトレンド、科学と社会に係る動向、科学技術イノベーション政策の俯瞰、主要国の動向等を取りまとめた。1.を踏まえた上で 2.においては、まず 2.1 において分野融合や分野を越えた動きを含めた全体を概観し、2.2 において分野別版の俯瞰報告書の結果から、「世界の潮流」「日本の位置付け」「日本の挑戦課題」を抽出し取りまとめた。2.2 の詳しい内容については研究分野毎に 2.3～2.6 に概要としてまとめたが、より詳しくは分野別版の俯瞰報告書を参照頂きたい。最後に 3.において科学技術イノベーションの今後の課題に関して、重要と考えられるポイントについて考察を行った。

なお本報告書以外の俯瞰報告書についても簡単に説明すると、分野別版の俯瞰報告書（2019 年）では、研究分野ごとに、俯瞰対象分野の全体像（俯瞰の構造と範囲、研究開発の歴史・変遷、研究開発を取り巻く現状、今後の展開と日本の研究開発戦略の方向性）を記述するとともに、国内外の研究開発動向や科学技術的・政策的課題、日・米・欧・中・韓等の国際比較（基礎研究／応用研究・開発フェーズごとの現状・トレンド）などの情報をまとめている。これに加え、我が国における科学技術イノベーション政策の歴史的な変遷については、「日本の科学技術イノベーション政策の変遷」として、研究開発戦略を立案する際に参考になる重要な主要国の研究開発戦略については、「主要国の研究開発戦略」として、それぞれ別冊で取りまとめた。

本冊子、俯瞰報告書統合版（2019 年）でまとめた内容については、関係ステークホルダーに発信していくこととしており、また、日本の挑戦課題として浮かび上がった項目については、今後、CRDS において深掘り検討を進めていく予定としている。

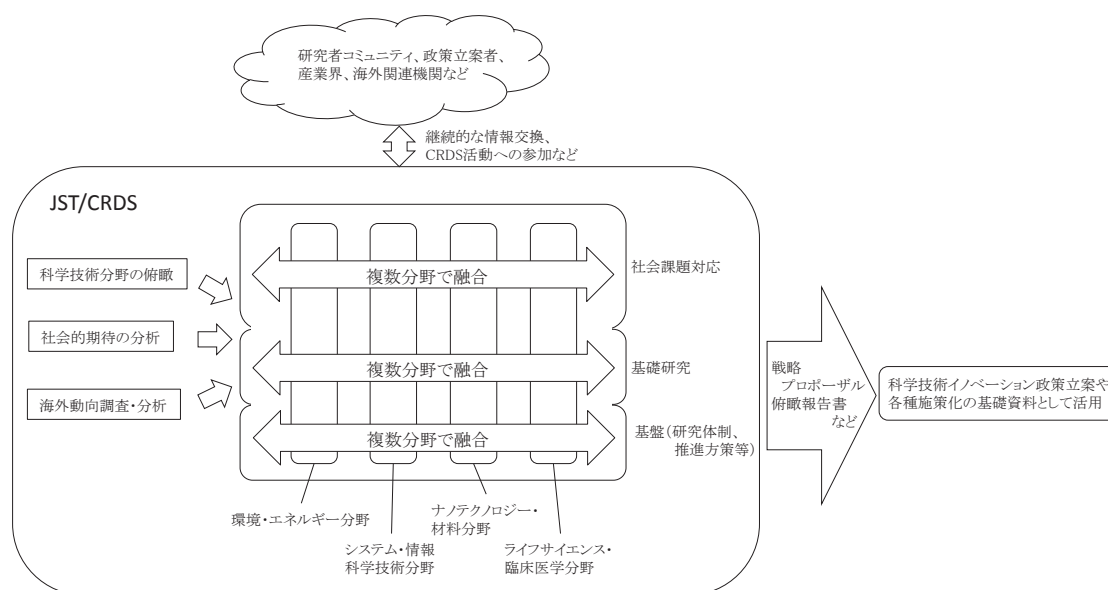


図1 CRDS の活動を概念的にまとめたもの。研究開発戦略を社会課題対応、基礎研究、基盤（研究体制、推進方策）の3つの観点から検討するとともに、各種ステークホルダーとも対話しつつ、常に複数分野を融合した内容により提言等を作成している。

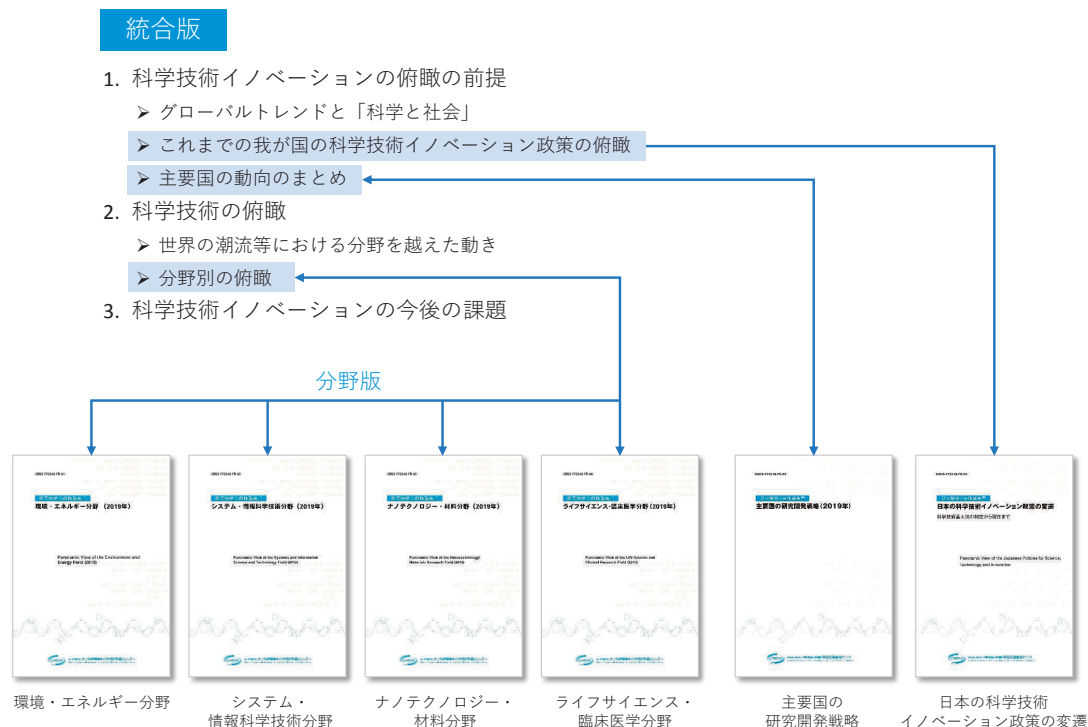


図2 研究開発の俯瞰報告書（2019 年）の構造

1. 科学技術イノベーションの俯瞰の前提

1.1 グローバルトレンドと「科学と社会」

2019年の俯瞰の前提として、2030年ごろを見据えた「グローバルトレンド」と「科学と社会」の問題意識を記す。数字を伴った予測の有効期間は前半5年くらいであると考えてほしい。

1) グローバルトレンド〔2019年から2030年ごろまでの世界と日本〕

(1) 総論、グローバリズム、地政学など

- ・ 80億人弱の人類の価値観が大きな変動にさらされているため、地政学および各国政治も世界経済、各国経済も大きな不確定要因を持っており、その意味では非常に予測の難しい、触れ幅の大きな時代を迎えている。この価値観の変動は基本的には情報発信者が一部の人に限られていたという時代からすべての人が情報発信者に容易になれるということとも関係している。現象的に言えば世界的あるいは一国内における格差の問題やその他人口増加、食糧危機など地球規模の課題が容易に解決されないという不満が背景にある。歴史的に捉えるとヨーロッパで生まれ米欧で育まれたグローバリズムという価値観（近代を成立させた価値観）の揺らぎによるものである。従って、50年ほど前に提起されたポストモダンの問題と近似の問題であるが、それがより（先進国の学者や知識人の世界ではなく）全人類的にしかも、緊急で具体的な問題を伴って現出してきているということが特徴である。また、ここでは、グローバリズムは民主主義（人権概念、個人主義などを含む）市場原理（資本主義）、科学技術などを規範とする文明潮流のことであると定義したい。
- ・ イアン・ブレマーは現代をG0の時代としているが、これは単なる米国の指導力の低下、中国の台頭というばかりではなくグローバリズムの規範の動揺という側面で捉えるのが重要である。米国を見れば分かるように理想主義的な民主主義、市場原理を強く信奉する米国の価値観が必ずしも一枚岩でなくなっていることにも象徴されよう。その結果として米国のトランプ大統領が登場するわけだが彼の打ち出した自国第一主義は世界に伝播され「規範なき世界」を増幅しているともいえる。また、国内では個々の政策レベルでは今後の米国内選挙によって変化することはあろうが米国が嘗てのメルティングポットではなくて価値観が分裂したままのモザイク社会の様相が強くなると読んだほうが正しいだろう。従って米国の理念外交の側面は後退し国益を追う外交の側面が強くなろう。トランプ大統領によって提起された米中経済摩擦は米議会においてグローバリズムに中国を抱き込もうというという考え方から中国を完全な競争相手として定着させたということによって重要な転機である。
- ・ グローバリズムに挑戦する国としての中国の近未来も重要である。中国は習近平を核

心とする政治体制が固まったが、民主主義や市場原理の考え方については世界のスタンダードとは異なっている。また、科学については自然科学や技術の発達は強烈に推進して、人文・社会科学には統制的になるという状況が続くだろう。また、米国から新たに提起された米中経済摩擦は不適切な情報の移転を含む知財権の認識という本質的な問題も抱えており、もはや経済摩擦の範疇ではなく文明史的な覇権闘争であるという見方もされている。これらの摩擦が中国の国内のガバナンスや経済成長そのものへ何らかの影響を与えることも考えられる。ただそれでも経済成長率は先進国の平均よりは高いところにあるだろうから軍事力の増大とあいまって国際的な影響力は次の5～10年も増加し続け米国の影響力に近い地位を獲得するだろう。「中国の夢」はナショナリズムと連動する政策だけに、「強い中国」政策すなわち軍事力と経済力を背景とした外交姿勢は本質的には変わりにくいと思われる。従って、米中経済摩擦を初めとしたグローバリズムとの規範に対しどこで妥協を図り、どこで独自の中国規範の世界流布を図るかという重要な10年となろう。

- ・ ヨーロッパは21世紀の初めに得た「理念や標準」を作る地域という地位（役割）をEU主導で引き続きめざすことになるだろう。ただし以下に見るような要因からその実行力はやや弱くならざるを得ないとみる。これはEUの統合力の低下は当面続き、移民問題などの扱いを巡って域内での利益の相反はむしろ激化し、域内周辺国からの不満やナショナリズムにも一定の配慮をしなければならず、EU本部やドイツ、フランスなど主要国の負担は増えていくと考えられるからである。EU統合の崇高な理念よりも「現実的な移民対策」や「EU官僚への反発」などに大きなエネルギーを使うことになるだろう。また英国のEU離脱はその成否とともに注目されるが英国、EUともに経済的損失要因であることは確実である。特に金融市場のあり方でより強い論争、対立を惹起する可能性があるだろう。（EUの金融的ヘゲモニーをどこがとるのか、シティはどの程度影響力を保持できるのか、など。）
- ・ 従ってブレマーのいうG0は一つの見解だがグローバリズムの規範をどのくらい守れるかという世界潮流の中で考えると、米欧VS中国というG2の世界が底流にあると考える見方もできる。この時代に、グローバリズム信奉国である米欧日の先進国の中からその規範を大枠で維持しつつ、新たな改革を構想する力があるかどうか、それを中国やイスラム社会がどう受け取るかということも重要である。米中EU以外に触れておくと次に世界に影響力があるのは日本、ロシア、インド、ブラジルというような国々と思われる。日本は財政健全化、少子化などの課題に挑む非常に重要な5年。新しいグローバリズムの再創造に貢献できれば存在感がでる。ロシアは政治的、軍事的問題に存在感を示そうが経済規模から言って新しい理念の提示といった役割は難しい。モディの経済改革が成功し市場原理がグローバルな水準になれば民主主義国、科学技術国としてインドの存在感は上昇。ブラジルは次の5年は中進国の罫をはじめとした国内問題の解決に専念を余儀なくされそうだ。イスラム圏はグローバリズム以外の規範

を固有に持つ。が、しかし例えばイスラム各教派の協同の難しさなどを考えるとグローバリズムの対抗軸にはなりにくい。（エジプト、サウジアラビア、トルコ、イランなどのイスラム諸国内部の関係の難しさも当面変わらない。）

- ・ 民主主義は世界的にポピュリズムの脅威にさらされている。先進国では中間所得層の分解がミイイズムを呼んでおり、自分の限られた欲求に対して投票行動を行う層が増えている。その際、排外主義や右傾化というような状況を伴うことが多い。東南アジアや中南米でもポピュリズムは今後とも伝統的な力を維持していくだろう。次の10年は民主主義に進歩、向上の工夫（例えば投票率を上げる工夫）が求められるような時代と言って良いだろう。また、社会主義という異なった体制でも、本質的にはポピュリズムの問題は見受けられる。例えば、中国の為政者は（ネットにおける）大衆の反応に非常に敏感である。
- ・ 市場原理については市場に関する本質的な課題を指摘する向きと市場へのアクセスや不正の横行を不安視する感じ方の2つが不安定要因だ。リーマンショックの直後に次のバブルをどう防ごうか、という議論があったが現在までのところ金融機関の資本増強、ファンド情報の公開、米国での商業銀行と投資銀行との線引きなどに見るべき点があったが、市場と政府の関係、市場そのものへの規制のあり方、格付け機関のあり方など宿題は残っていると考える。市場原理についてはFINTECHの進展は技術的問題については議論されているが「これは市場原理が働いているのか」というような本質的な問題は積み残されたままになっている。市場を規範と考えるグローバリズムの立場と市場を道具と考える中国の立場の違いも調整されていない課題である。
- ・ 民主主義、市場原理に対する価値観が一定しないということはグローバリズムの規範が弱まっている世界であり、従って世界は本質的な価値観を共有できないまま大国が共存せざるを得ず地域紛争が起りやすく調整しにくい世界といえる。こうした観点から見ると（一定の改善が見られる問題があったとしても）北朝鮮、ウクライナ、南シナ海、シリアなどの問題も引き続き解決は簡単ではない。中東では複雑な二国間関係の積み上げで新たな紛争を惹起する危険性もある。また、ISの制圧はほぼ達成されたがテロの危険性は減っていないと見るべきだ。北朝鮮問題においては、米朝首脳会談は行われたが核廃棄への検証可能性、具体的スケジュールはこれからの問題である。

（2）世界経済、社会の展望

- ・ 2017年の世界の経済生産規模（各国GDPの足し算）は全体で約80兆ドル。うち米国が19.5兆ドル（24.3%）、EU（英国除く）が17.3兆ドル（21.7%）中国12兆ドル（15%）日本4.9兆ドル（6.1%）となっている。（この数字は為替換算ベースであり比較生産比ベースではない。）次の5年くらいの世界経済の実質の伸びは平均すると3%程度、先進国は1～2%程度、発展途上国は4～5%程度と想定している。中国は地

方債務の問題や中進国の罫の問題（あるいは統計への不信）など不確定要因はあるが、5年平均だと実質成長は5%程度と想定。その場合、中国がGDPで2025年ごろまでに米国を抜くことは無い。

- 世界需要の伸びは第1次オイルショック後の20世紀は約3%、そこから08年のリーマンショック直前まで約5%であり、次の5年は基本的に20世紀後半の平均成長率に戻る想定である。SDGsなどの人類的課題に対して様々な需要喚起に仕組みが試みられ一定の成果が期待できるが、前半の5年では目に見えるほどの需要喚起にはつながらない。これは先進国政府の財政的余裕が少なくなるとともに民間企業にも有効なビジネスモデルが構築しにくいことによる。ただしSDGsなどの地球的規模課題に資金が投入されるような仕組みができ新たな規範が再創造されれば後半の5年は前半より高い成長が期待できよう。そのための鍵は企業の投資がESG投資に大きくシフトし、SDGsなどの人類的課題に対しビジネスモデルが作られファイナンスの仕組みが整備される取り組みが重要である。
- 原油価格、鉱物資源価格はこの世界需要想定の下、かつ政治的危機が無い限りでは前半5年はバレルあたり45～90ドルと低中位安定。（ただし、中東の政治的不安定さが問題となり一時的にこの範囲を逸脱する可能性はある。）この価格は、再生可能エネルギーに対する民間の投資は爆発的ではないが着実に進展するというベース。特に自動車産業の脱化石燃料化のスピード（EV、PHEV、PCVの普及速度）は要注目。環境問題はトランプ政権のパリ協定離脱の表明は大きな政策変更といえるが米国内自治体、企業の動向が前向きを維持していることもあり、まだ振れ幅が大きいと考えられる。またその他の世界の環境問題に対する認識は着実に進展している。特に中国がこの面で（トランプが環境政策を変更したので）国際的なリーダーシップを果たそうとしているのは注目される。全体として温室効果ガスをはじめとした地球環境問題は先進国対途上国、自国主義と世界協調などの複雑な問題が絡むが上記の中国のリーダーシップと国際的認識の向上を考えるとトランプ政権でのブレーキが影響する向こう5年に比べその先5年はどちらかという科学的態度による世界協調の達成に期待が持てるのではないかと。
- 消費・サービスの構造は「もの」から「コト」「サービス」といった人生の時間そのものに価値をおくという考え方が先進国や新興国だけでなく一部の途上国も含めた世界的流れになってくるだろう。これは格差問題を背景にして人生の幸福を「もの」におくことによる幸福の限界が意識されてきていることも大きな要素だろう。この問題は情報化、IT化の問題と大きく関係がある。科学の問題を先取りして言えば科学の発展は（強者が科学を利用するということを通して）常に格差を助長するのではないかという疑いをかけられている、ということは指摘しておいたほうが良いだろう。
- 情報化が社会を大きく変えていく問題はほかにもある。ここではもの作り、産業構造、貿易構造、職業の変化による労働構造の変化を指摘しておきたい。もの作りはIT

の進展による標準化が進み、競争の主軸はどのような標準化をするかということと、いかにデファクト化を進めるかということになっていこう。標準化のできた製品の貿易は現地生産による代替が進むと考えられるし逆に高級品はこだわりが強い標準化からはずれたものに益々特化してこよう。この点は各国の産業政策によって大きく異なってくるが、ドイツの部品標準化とITによる製造標準化の動きは競争戦略として注目する必要がある。またよく言われるように、IT化により失われる職業が多いとの指摘は事実だろうが逆にIT化により新たに創造される職業も多いだろう。芸術や文化的分野に新しい職業が生まれることなどが予想される。「もの」は工業製品の場合、ほとんど品質と価格の間に相関関係があるが「コト」や「サービス」「情報」の場合は自分だけの価値として認識しやすいといった事とも関係があることを認識すべきだ。そうした中で、ビックデータ、IoT、人工知能の発展による倫理問題は前半5年のうちに国際的な話し合いが必要な問題を提起しよう。またGAFAと呼ばれる巨大情報企業と国家の間の軋轢も大きな問題となると考えられる。

- ・ 医療、健康分野に対する人類の関心は引き続き高くなっていくだろう。それ故、ライフサイエンス分野における科学技術の進歩と社会や個人との倫理的葛藤は強くなり、その調整メカニズムが必要になってこよう。
- ・ 軍事・安全保障の問題も重要である。グローバリズムの揺らぎの時期を迎えている現在、伝統的な抑止議論を中心とした大国間の軍事力バランスの議論が復活されるだけでなく、局地的紛争はむしろ起こりやすく、各国ではそのための軍備の問題もクローズアップされる可能性が高まっている。
- ・ 価値観の変動という意味では例えば豊かなことが幸福である、だからGDPを増やすことは幸福を増やしていることである、というような一般的認識が崩れつつある、というような点も考えておく必要がある。
- ・ この問題は「経済成長の質」という問題を2000年に世界銀行が提起したことにより、より具体的な問題提起がなされるようになってきている。その中の一つが「持続可能性」であり自然資本や人的資本を含めてバランスよく社会を設計することが重要だとみなされる傾向が出てきた。さらに、誰も積み残さない「包摂性」や危機に備える「強靱性」などの概念も価値の転換を意味する言葉として注目する必要がある。
- ・ 「包摂性」に関連して格差の問題に触れれば、一昔前までグローバリズムの規範は「自由な競争」であり「均等な機会」であったが「競争の出発点が不公平」として、いきなり「結果の均等」を求める潮流が大きくなっていることが世界的傾向として指摘されている。
- ・ このような価値観の変動にはグローバリズムの規範である民主主義、市場主義と並んで科学技術への眼差しにも含まれる。従って、科学技術の俯瞰を試みる前に「科学技術と社会の問題」を考えておくことは大いに重要なことと思う。何故なら、理性主義や啓蒙主義に根本的な疑念が向けられているというよりは「科学が社会を（不幸にせ

ずに) 幸福にできるか」という問題設定が今日的であるからである。

- ・ 日本は基本的に上記世界潮流の中にある。日本は明治維新以来、痛みを伴いながらグローバリズムの価値観にむけて邁進してきた国である。そして欧米豪州以外でそれを最も早く血肉化できた国といってもよいだろう。グローバリズムの揺らぎの時代を迎えそれを習うことの優等生であった日本は民主主義、市場主義、科学技術への向き合い方をどう再定義あるいはリデザインしていくのか、そしてそれをどう国際社会に発信していくのかが問われてもいるし期待されてもいる。その議論が確立されない限りは日本の存在感は徐々に低下していくと見たほうが良いだろう。固有の課題で最大の問題は「人口減少」と「累積財政赤字」だろう。これらの中長期課題は目先の懸案に比較されてどうしても打つ手が遅れがちであるがこの2つの問題こそが日本にとって固有の問題の本質だろう。
- ・ 次の5年平均で実質成長を2%で維持するのは難しい課題。1億総活躍、女性進出、地方創生、働き方改革など反対する人は少ないが成長を加速させることと「財政」「人口減少」問題の解決と両立するような政策立案が要請されているといえよう。
- ・ 社会保障費の増大の問題、エネルギー・ポートフォリオの問題は既得権との兼ね合いで難しい問題だが、次の5年のうちに中長期の方向性を決めるべき時だ。安全保障問題、社会インフラ老朽化、自然災害対策などの問題への対応などとならび日本産業の国際競争力維持も喫緊の課題だ。それには日本のイノベーション風土（エコシステムは制度だけでは作られない、風土の問題も重要だ）の抜本的な変革が必要だと考える。
- ・ 意思決定の方法や社会の空気そのものに課題があるという見方もある。組織はグローバリズムのガバナンスを求められる一方で古来の情緒的価値観も健在であり日本人はその価値の交錯に悩んでいるともいえる。例えば、「おもてなし」は貴重な文化だが価格転嫁できなければ、これこそが「サービス業の労働生産性が増えぬ要因」との指摘がある。これらの矛盾した課題をどう解き各人がミーイズムに陥らず新しい価値観を開拓、共有できる知的風土を持てるかが日本の将来を決めることになるだろう。
- ・ こうした課題との関連で科学技術が教育を含めてどのように設計されていくのかを考えることが重要だ。科学技術の課題は近年、「科学と社会」の視点を明確に意識することによってよりリファインされると考えられている。

2) 「科学と社会」

- ・ 「科学と社会」の関係を適切に踏まえておくことが「俯瞰」作業にも肝要である。科学技術の急速な発展が現代社会に大きな変化をもたらしており、それに伴い、社会の方からも科学技術に多くの要望が出る時代になっている。しかし、必ずしもこの関係の現状が日常的に（自然科学の）研究者の間で共有されているわけではない。そこで

「俯瞰」を作成するに際し、必要と思われる「科学と社会」に関連する視座を「俯瞰の前提」として記述した。

(1) 「科学自身の変遷（哲学・歴史）」

- ・ 「科学と社会」の問題は非常に広範な問題が含まれている。最も基層的な部分には「科学」と呼ばれている考え方の変遷がありこれらは科学哲学や科学史という学問と関係する。その中で今日の科学が置かれている状況で大掴みにつかむことがまず必要だろう。この部分に「科学自身の変遷（哲学・歴史）」というタイトルを与えておきたい。なお、「科学自身の変遷（哲学・歴史）」を基底とすると、その上に具体的な「科学と社会の諸問題」がありさらにその上に「科学と政策」があって「科学と社会」の問題は全体として3つの階層からなっていると整理しておきたい。
- ・ まず、「科学」はギリシャの自然哲学に淵源を求めるにしても16～17世紀にいわゆる科学革命が起こったこと、それを受けてScienceという言葉は18世紀になって初めて使われるようになったという比較的新しい概念であること。そして、19世紀には科学者という職業、学会などで制度化が進んだこと（第2次科学革命、科学の制度化）、第2次世界大戦前に科学と技術の融合が始まり、大戦後には科学と技術の融合はより進み国家主導によるプロジェクト達成型の科学技術開発（科学の体制化）が行われるようになる、という大きな流れを押さえたい。
- ・ その上で現代は「科学研究と技術開発の融合した発展」が「社会システム」の一部となった時代（註：野家啓一教授による）と言うことができる。
- ・ これらの流れは、科学は宗教の手に握られていた真実を人間の側に奪権したという旧来の解釈も可能だが他方ではキリスト教を含めた一神教の中に「自然は神の被造物」という考え方があり「神の御業（みわざ）」を知るために「利益を度外視して科学が成立した」という見方も提起されるなど複合的な視座が含まれていることに注意しなければならない。（中国は4大発明など技術革新の歴史を持つがついに科学に昇華しえなかったのは常に利益や利便との関係が断ち切れなかったので技術の発展にとどまったとする考え方がある。）
- ・ いずれにせよ、その歴史的生成過程はヨーロッパにおける民主主義や市場原理の発展と密接に関係しており、科学技術への信頼、ないし信仰はこれらの諸規範との関係の中で捉える事も重要である。従って、科学技術と社会の関係を考えることは現代のグローバリズムへの考察を欠かすことができない。（例えば、資本の原始的蓄積が共同体の解体、および個人の自立と密接な関係がある、自立した個人は科学技術進歩の担い手となる、また市民社会の成立と技術重視の関係は百科全書成立の過程の中で明確になっている、等々。さらに、民主主義、市場原理、科学技術の規範はこれらの生み出した経済的、軍事的パワーの行使の下にグローバル展開をしたということも紛れもない事実である。）

- ・ この意味で1960年代あたりからポストモダン（近代の超克）ということを言われ始め、全般的な価値観の見直しが進んだ中で、現代の科学が人類に幸福をもたらしているのか、デカルト以降の合理主義の考え方すなわち「分割して数学的に事象を処理する」という方法論が全体像を把握するのに最も良い方法なのか、などの反啓蒙的、反合理的な議論が出てきたのはある意味で必然的な流れであった。
- ・ 1968年のソルボンヌ大学の「デカルトを殺せ」という落書きからこの近代全般への批判が始まったと象徴的に書かれることがあるがそれを待つまでもなく、デカルトの考え方に対しパスカルが「幾何学の精神」だけでなく「繊細な精神」を重視する考え方、ヴィーコのクリティカだけに頼るのではなくトピカをそれに先立って学ぶことの重要性指摘、ベルグソンの精緻な部分の分析はそれを再構成したとき全体の認識を必ずしも進めるものではないとの考え方、さらにはアリストテレスのプロネシスの位置づけの再評価が行われている。また、鈴木大拙の禅の西洋への紹介など東洋の仏教、儒教などのものの捉え方を参考にする動きもある。
- ・ ただ注意しなければならないのはポストモダンの提起した問題は現代において尚、新鮮ではあっても「ポストモダンの科学」と称される者の中からは一定の方向に結実する新しい自然科学体系は生まれてこなかった。従って現在のこの問いかけに対する回答としては、科学の目的の再定義や（自然科学と）人文・社会科学との協同の必要性ということになるが、これは後述するブダペスト宣言によく表れている。
- ・ さらに、急速に進歩する科学技術の中で個人のレベルで「怖れ」に似た感情があることが科学観に影響を与えていることは事実で、社会としてこの「怖れ」をどのように克服しようとするか、ということが「科学と社会」の一面をより複雑にさせている。
- ・ 産業革命時の自動織機への打ちこわしからこうした流れはあると考えられるが戦後は原子力の利用を巡る議論に始まった。それに続き胚細胞やゲノム管理などの生命工学の分野への恐怖、そして最新では来るべき人工知能、ビッグデータなどの情報科学分野の科学技術進歩が不安感を醸成している。これらの問題は「生物と人工物」、「現実と仮想」、「自己と非自己」の境界を曖昧にすると感じているからである。
- ・ 個人が不安に感じているのは「生命の尊厳に侵犯が起こる」というヒューマニティそのものからプライバシーの問題など「被管理感」、職業を奪われるなどの「不利益感」など広範にわたる「疎外感」でありそれが科学技術の進歩により「不幸になる」「恐ろしい」などの感情を惹起していることに注意すべきである。「科学と社会」の問題を論じるときにこうした「人間の（将来を含めた）自己規定」（ポストヒューマニティ）の問題や科学技術によって人類が幸福になると信じていられるかといった個人の感じ方が基底に存在していることを常に意識する必要がある。
- ・ ヒューマニティの問題だけでなく科学技術の急速な進歩は「社会そのもの」に対しても大きな変化をもたらしている、またもたらそうとしている。利便性や富を生むイノベーションを加速する、という良い面だけではなく例えば科学技術の知見や手段を持

たないものが差別されるような「格差」や「支配」を助長するのではないか、などの問題提起がある。社会との関わりでの問題提起は戦後、原子力技術、生命工学、情報科学などで行われてきたが、中でも人工知能、ビックデータ、IoTなどの情報科学の進展はキャッシュレスや市場概念そのものの变化、個人の情報支配を巡る国家主権の問題など広範な問題を惹起する可能性がある。これらの問題は一旦、技術進歩が社会に取り込まれて普及し始めると問題点が表面化してもそれを止めるルールや手段がないという事態になりやすく、予め、来るべき問題を想像することの重要性が高まっているといえる。いずれにせよ、社会が科学に、科学が社会に与える影響のマグニチュードが違ってきているということは多くの人の感じていることで「科学観」「社会観」「人間観」が同時に相互侵犯的にしかも大規模に変化していることを感じるべきだろう。

- ・ さてこのような具体的な問題意識や感じ方を受けて、また「ポストモダンの科学」という考え方が現実には作り上げられなかった中で現代の科学はどのような方向に向かっているのだろうか。それは自然科学者だけで問題を解決するのではなくて人文・社会科学とも広く連携をとって物事を考えようということであった。つまりポストモダンの科学のように科学そのものを変革するというよりは諸科学間の連携・協同や場合によっては融合をはかろうとする動きであった。当初は自然科学者がその社会的応用の際に「困ったときの」人社連携という形でそれは始められたが、現代ではそうではなくて現代の持っている課題そのものが自然科学、人文科学、社会科学を総動員しないと設定できないものであり、その解決も同じような総動員が要請されている、という認識に基づいていることが自覚されている。1999年にブダペスト宣言では「科学と科学知識の利用に関する世界宣言」が出されるが、これは知識、平和、開発、社会の4つのための科学という立場を確認したものである。また2012年のビルニウス宣言では人文・社会学者がイノベーションや技術開発についても主体的な役割を果たすべきだという宣言をしている。これはEUのHorizon 2020に大きな影響を与えた。さらに国際的な学会の流れとして国際科学会議（ICSU）と国際社会科学協議会（ISSC）の統合が成立したことなどはその好例である。すなわち科学というものが「人類の幸福のためにあるべき」であり「問題解決的であるべき」だとする現代の時代認識を反映しているわけである。

（2）「科学と社会の諸問題」

- ・ 以上、科学史の中の「科学」の概念変化を「科学自身の変遷（哲学・歴史）」と呼んで大きな流れを概観した。次に現代の「科学と社会の諸問題」を概観することとした。なお、この「科学と社会の諸問題」のさらに上の階層には「科学と政策」が位置しているが、その部分は本編の「1.2 これまでの我が国の科学技術イノベーション政策の俯瞰」として語られるようになるので「前提」では補足のみ行うことにする。ま

た、さらには冊子「日本の科学技術イノベーション政策の変遷」を参照されたい。「科学自身の変遷（哲学・歴史）」はまさに科学哲学・科学史・倫理学などの分野に相当するが「科学と社会の諸問題」は公共哲学、政治学、社会学、経済学、心理学、国際情勢分析などの既存社会科学の援用をしばしば必要とする分野となろう。

① 科学者の責任の問題

- ・ まず「科学者の責任」ということから始めたい。原子爆弾を作ることにつながった原子物理学者の苦悩と社会への呼びかけであるラッセル・アインシュタイン宣言（1955年）に始まったこの動きはアシロマ会議（1975年）で生命科学者の行動基準を設定したことが大枠で現代の生命科学のコントロールに大きく関係している。今日、ほとんどの学会で研究者の倫理規定や行動規範が作られるようになったがどの学会にも通用するような一般的道徳が書かれていることも多くまた、より重大な問題は起草者の意図が世代の交代によって伝わらず後代においては「これさえ守っていれば良い約束ごと」として認識され、新しい事態が起こっても自らが前代の考え方の遺産を継承して思考できるようになっていないのではないかと危惧されている。従って、このような問題は論点や思考の枠組みが継承されていくような教育システムの存在も重要なことである。また人工知能のように（人工知能自身の再生産性を考えると）研究者規制というもののだけで本当に十分なのかという問いかけもある。この場合、原子力や生命科学と違った問題設定が必要となろう。
- ・ ELSIという考え方はこうした中で生まれた。自然科学や技術の発展に伴う倫理的、社会的、法律的問題に対して予め予算的にも知識的にも対応策を検討しておくべきだというものでヒトゲノム解析の際に有効に機能し今では自然科学・技術全般に使われる言葉になっている。自然科学者だけでは解決のつかない問題に専門家をスムーズに動員しようということだが始まりは「困った時の人社連携」のような匂いが無いわけではなくルール確立後は本質を学ばないで形だけが残る、というようなことがありうるのが注意を要する。ELSIそのものを（自然）科学者の為のリスクマネジメント概念ではなく広範なステークホルダーを巻き込んで人類に幸福をもたらす科学全般の改革であると捉える必要がある。ELSI問題を前向きに乗り越えた科学こそが競争力のある（お金が投入される）科学だという感覚が必要であろう。
- ・ もう一つ、研究者の不正という問題がある。これは研究者の社会的、名誉的、経済的な利益を優先して研究に不正をもちこむことである。かかる行為は勿論、断ぜられなければならないことだがその温床として科学界の風土や政策によって作られた制度が少しでも関係しているならば多方面からの防止アプローチが必要であろう。
- ・ さらに科学者の社会リテラシーだけでなく市民の科学技術リテラシーということも重要なテーマになってくる。市民の側から「安全・安心」を得ようとするとき、どうしてもある程度の科学技術リテラシーは必要だからだが、どこまで、どのように必須で

教育するかということは難しい問題だ。社会常識を基礎に知的好奇心を刺激する教育が最も好ましいのだろう。また、このような裾野があって優秀な先端科学者が育つと思われる。つまり、ポストモダンによって提起された近代自然科学への問いかけは、現代においては社会や個人との価値観の共有と人文・社会科学との協同という方向で問題設定がされ直している、とも考えられる。

② トランスサイエンスの問題

- ・ 社会の問題に拡大してこれを見るとき、ワインバーグが提唱した「トランスサイエンス」の問題にダイレクトにつながるだろう。トランスサイエンスは一般に「科学によって問われるが科学だけでは答えられない問題」として定義される。イタリアで地震学者が心配ないと判断した地震で実際に死者がでてしまった事件で地震学者に罪を問えるかとか、イギリスにおいて狂牛病のウィルスは人間に伝染しないとしていたのにそうでなかった、というような例題が引き合いに出される。一方では科学の知見があり、他方には行政の判断や市民の価値基準がある。3.11の東日本大震災の原発事故などもこの範疇の「科学が問われていても科学だけでは答えられない分野」であるといわれている。トランスサイエンスの問題は科学（認識）と政策や行政（価値）の問題であると同時に科学と市民の問題でもあるということから様々な取り組みがなされてきた。（トランスサイエンスの問題のうち科学と行政の問題は「政策」の問題そのものである、そこでその詳細は「俯瞰」本論に譲るものとする。）
- ・ 科学と政治の交わった部分（トランスサイエンスの部分）で科学の専門家としての科学者と政治のほうからは政治家や官僚だけでなく市民の参画が必要だという考え方が生まれてくるのは必然である。ただ、この市民という概念はなかなか難しく、誰を代表として選出するかで方向性が大きく変わってしまうという問題を常にはらんでいる。（同時に、誰が主催しているのかという問題もある。）しかし、「科学技術がもたらす利益だけではなく危険性にも着目させる」ためには市民側からの「安全」「安心」の確保とも関係があり今後とも市民参加の方法論の試行錯誤が続けられるべきだ。1960年代にアメリカでテクノロジー・アセスメントの考えが生まれ80年代にはデンマークで市民参加型テクノロジー・アセスメントが始まっている。また同様に一般市民が専門家の意見を聞くことで社会的意見の調整を図ろうとするコンセンサス会議も生まれた。市民フォーサイト、シナリオワークショップなど様々な試みが続けられていて日本でもいくつかの試みが生まれており、行政が主催する場合も出てきているが、行政と市民の役割分担が確立されているわけではなく今後課題が残っている。

③ 科学と国家の問題

- ・ 次に目をマクロに転じると前述したように科学技術の進展は他のグローバル化の規範である市場原理や民主主義と関係が深いことが分かる。しかし、科学技術の大規模

化と国家利益・目標との関係が強化されると様々な政治との関係が始まることとなった。この動きは第1次世界大戦などで加速されたが、平時における端緒は1945年アメリカのブッシュ科学研究開発局長の「科学—その果てしなきフロンティア」からと考えてよいと思われる。

- ・ 市場原理や民主主義は科学技術の進展に正の相関関係があると考えられてきたが直近の現代を見ると必ずしもそうとばかりはいえない事象も出現している。すなわち民主主義先進諸国の主として社会保障費増大による財政の逼迫、科学技術予算の伸び悩みである。マクロで見て次の5年も事態が劇的に改善する兆候は見られない。国連、世界銀行その他の国際機関も科学技術予算の増加を期待できる状況に無い。（先進国の科学技術予算はGDPの1.5%に届いていない。全部あわせて2兆ドルに届かぬ、と思われる。）他方、意思決定システムが異なる社会主義の国々は多少、弾力的恣意的な運用が可能である。中国や極端な例では北朝鮮がある。
- ・ 国家と科学を論ずる場合、当該国の実際的な社会・思潮的側面が大きく関係する。最も重要なのは安全保障（軍事含む）と社会保障（特に医療）の分野であろう。科学技術の役割は当該国の安全保障、社会保障に関する考え方に大きく依存しているのでこれらの考え方が良く議論され成熟していることが必要である。（米国におけるDARPAはスプートニク・ショックを契機として生まれたが、後に科学的発明の戦場での実験に議会の承認を必要としないほどの権限を得た。インターネットの発明や市場への開放の経緯など科学と国家に関する多くの論点を提供している。）
- ・ 最近の国家における科学技術の位置づけは「現在あるいは直近の課題を解決させる投資」に重要なものとして認識されることが多いが、それだけでなく教育と並んで「それ自身が根源的に必要な先行投資」という観点も依然として重要だと思われる。
- ・ さらに直接国家機構とのかかわりではないが国によって社会の価値観の違いがその国の科学技術水準そのものや科学技術政策に影響することにも注意が必要である。例えば脳死の判定の是非がその国の文化的伝統である死生観の違いから重大な影響を受ける、というような例を想起されたい。
- ・ 諸外国の例を見ると、注目点としてアメリカのトランプ政権の科学技術に対するリテラシーを疑問視する声もある。ただ、トランプ政権の科学技術政策の偏りは議会がそれを修正する方向で動いていると思われる。
- ・ EUでは「科学と社会」の関係を見据えた政策が作られているが、イギリスの離脱による共同研究の混乱が懸念される。またフランス・ドイツの気候変動対策やドイツのIndustrie 4.0による製造業標準化戦略は科学の国家目標及び競争力戦略に明確なリンクがなされている。他方、ドイツやフランス以外の国の中には差別化戦略が作りにくい傾向もある。
- ・ 日本においてはSociety 5.0の実際面の検討が急がれる。国家戦略とその下にある科学技術イノベーション政策、競争力強化を含む産業政策、環境政策、教育政策、安全保

障含む外交政策のわかりやすい融合と実際の社会への効用が結びつけられていない。はならない。（統合イノベーション戦略はその始まりと認識される。そのために科学者人材の養成や処遇の問題、研究開発体制や研究開発費の問題の検討が指摘されているが個別問題だけでなく広い政策統合が望まれている。）

- ・ 中国においては自然科学の進展は大きな国家目標とされているが、国家主導的な発展が加速される傾向が高い。また、他国からの知的資産の導入の方法につき疑問を持つ向きがあったがこれがトランプ政権によって米中経済摩擦という観点で提起されている。
- ・ SDGsは国連が人類的地球的課題に対し挑戦しようと提起したもので明らかに科学技術の活躍の余地があるが、現状では科学技術に研究資金をつぎ込むファイナンスがついていない。それには市場原理を有効に使い民間企業のビジネスモデルを導入し約300兆ドルといわれる民間金融資産の有効活用を目標にした問題解決アプローチが必要だろう。国家がSDGsを国家戦略にするためには民間企業のESG投資などと結びつけて競争戦略化して科学技術と市場原理・ビジネスモデルの融合を進めることが求められているのではないか。

④ 科学と産業界・民間企業（市場原理）の問題

- ・ 逆に科学技術側から見るとどのような資金を国家や国際機関から得てどのような資金を民間から得るかということを考えることは重要な視点である。この問題は「官民連携」や「産学連携」「科学技術予算」「ファンディング政策」と関係し本編で語られる。
- ・ 科学技術と民間企業の役割について触れておきたい。民間企業は現在、非常に大きな価値転換が進んでいて、それは恐らく次の5年も方向性は変わらないだろう。新自由主義に代表される考え方は企業の短期利益の推移を絶対的な評価指標として株主に対して奉仕するような考え方であったが世界の大企業には大きな価値の転換が進行している。CSVの考え方である。この考え方は、企業のステークホルダーは株主だけではなく、従業員、取引先はもとより政府や、社会そのものも含まれるとする。従って、社会のためになる本業の仕事は結局、企業の存在意義を確固たるものにするので長期的には利益も上がり企業そのものをサステナブルな存在にしていくだろうという思想である。既に株式市場ではESG投資が存在感を増しているが今後は（例えば無形資産の正当な評価など）会計制度も何らかの影響が及び、企業の価値尺度自体が変わっていく可能性も指摘される。
- ・ イノベーションが（科学）技術革命と同義ではないということ、科学技術がイノベーションの重要な一要素であることは漸く定着してきた。イノベーションがおきるためには欲求がまずあり〔人文科学〕、それらが作ることができるか〔自然科学〕、充分経済的にできるか、あるいは作るに値するか〔社会科学〕の組み合わせであり、それ

らを推進するには政策当局や大学だけでなく民間企業が重要な役割を担っている。

- ・ 民間企業の立場から言えば、価値の連鎖（バリューチェーン）を分析すればどのような場所にどのような科学技術が必要であるかがわかるはずある。科学技術が適正な価値連鎖上に効率的に達成されればビジネスモデル間の競争に勝つことができる。つまり、イノベーションは欲求とビジネスモデルと科学技術の融合である場合が圧倒的に多い、ということなのだ。産学連携や官民連携をこのように捉えてみると、科学技術政策は産業政策や教育政策と連動し、まず国全体のイノベーションの風土つまりインフラを作ることが最も重要な目標と言える。
- ・ また、そうであれば企業の科学技術R&Dを誘導（あるいは優遇）することは科学技術にとっても重要なスポンサーを獲得する事だという認識を持つことができる。企業をどのように市場原理を使って科学技術革新により多く参加させるかという政策立案が求められている。

⑤ 科学とビジネスモデル、イノベーションエコシステムの問題

- ・ 科学技術と民間企業の関係を考えるということは科学技術とビジネスモデルの問題を考えることにもつながる。資本と労働の生産性の向上を除いた生産性の向上を全要素生産性の向上と呼ぶが、この中身は科学技術革新、ビジネスモデル変革、組織改革、効率向上、規制緩和などからなっている。日本のコンビニ、宅急便システム、企画・製造・販売を一貫して行うアパレル、など日本が生み出した新技術とビジネスモデルの融合によるイノベーションは数多い。何故、最近の日本のイノベーションが停滞しているのかをこうした観点から分析する必要があるだろう。
- ・ 日本のエコシステムの弱体化が日本のイノベーションを弱らせたことは間違いないがこれをよみがえらせる道を模索しなくてはならない。制度やシステムの問題だけではなく風土の問題も考えなければいけない。早い話、もっとも足りないのは科学技術力でもなくビジネスモデル創造力でもなくアントルプルナーシップそのものだという見方もある。企業内でも「夢にこだわって賭ける」人材が少なくなっており、いわんや個人のベンチャー候補者は極端に少ないと言われている。この現状を無視して他国の成功例、例えばシリコンバレーの形だけ真似るのではなく、日本の現状を踏まえたエコシステムの立案が望まれる。
- ・ 産学連携や官民の役割分担については積極的な提言が出てきているが日本において最も足りていないのは産学官における人材の交流である。評価軸が違うから難しいのはわかるがこの間の人材移動の障壁を低くすることが連携をスムーズにいかせる最大の契機になるだろう。

(3) 科学と政策

- ・ 本編の「1.2 これまでの我が国の科学技術イノベーション政策の俯瞰」を参照。「俯

瞰の前提」として補足すれば日本の科学技術イノベーション政策はいうまでもなく国家戦略の一部を形成しており、国民の幸福と効用を最大にするべきものである。従って、国際競争戦略を含めた産業政策、環境政策、教育政策などとは密接な関係にあり平仄が合っていないとてはならない。

- ・ マリアナ・マツカートの「企業家としての国家」は国家のイノベーションにおける役割の重要性を指摘している論考である。マツカートは実際のイノベーションを実現するために国家が産業政策、一部の企業化政策を担っている場合に成功確率が高いと指摘し、成功時には政府は恩恵を受けた企業からその見返りを求めるべきだとまで言っている。日本の科学技術政策がマツカートの言い分のどこを取り上げ、どこを捨てるべきかよく吟味する必要があるだろう。

(4) 分野ごとの「科学と社会」

- ・ 現代の科学技術の俯瞰に重要なことは、以上見てきたように自然科学や要素技術の知識だけで俯瞰することが難しくなっていることである。勿論、自然科学や要素技術の全般的方向性はそれだけでも十分に議論が成り立たなくはないが「グローバルトレンド」や「科学と社会」で見てきたように多くの分野は課題の設定そのものが自然科学だけから導き出される問題ではなくなっている。
- ・ 俯瞰報告書の分野の中でも、例えばナノテクノロジー・材料分野は比較的自然科学分野から発出した安全の問題を社会の問題として議論することが比較的容易だが、例えば環境・エネルギー分野では国際的、国内的な政治・経済の動向をどう読むかによって、クローズアップされるべき要素技術の課題焦点そのものが変化してくる。従って、一つの標準前提を持って俯瞰すると同時にある程度、その前提が崩れたら科学技術の喫緊な課題がどう変わるのか、あるいはどのようなオルターナティブを考えるべきなのかということも考えておく必要があるだろう。
- ・ またこのような「科学と社会」の視点を導入することによって例えば「防災」であるとか、「土木・インフラ」、さらに「宇宙」「イノベーションエコシステム」といった新しい俯瞰分野の設定が必要というような発想も生まれるかもしれない。
- ・ 環境・エネルギー分野では気候変動の科学的根拠は整備される方向にあるが、トランプ政権の動向は要注目、またESG投資やSDGsの動向なども大きなポイントである。また、情報技術がどのように環境・エネルギー技術に影響するかということも考えておく必要がある。
- ・ 日本においては人口減少の影響、環境・エネルギー分野の国際競争力や人材育成についても定見を持っている必要がある。また原子力を含めたエネルギー・ポートフォリオについても政治、経済、社会の動向を見通しながら考える必要がある。
- ・ ライフサイエンス・臨床医学の分野では、「生命の尊厳」「人間の尊厳」といった倫理的な問題との関連が問われる。この問題は個人の宗教観などや社会の死生観などとも

関連し、同時に社会的な問題であることにも注意が必要だ。ゲノム編集、生殖医療、終末医療、認知症など精神医療、物質の人体への侵襲を伴うサイボーグ化の進展などが具体的問題である。この分野は実際的な研究、政策化は欧米が進んでいるが社会背景・文化の異なる日本からも積極的な情報発信の必要な分野である。

- ・ 倫理的な問題との双璧をなす大きな問題は経済的問題だろう。何をすることが許されるか、というのが倫理的問題ならどこまでどうやってやるのかが経済的問題である。日本においても社会保障費なканずく医療費の増大は大きな問題だが、世界的に見ても医療費と効用の問題をどう考えるかということはその社会をデザインすることの大きな要素である。
- ・ システム・情報科学技術は「科学と社会」の最先端の分野である。AI、IoT、ビッグデータなど各分野は人間の社会、経済、政治行動を全般的に変革するような影響を与えている。また、他の学問分野の飛躍的発展のインフラともなっているので「科学と社会」の問題の中でも最も論争が多くまた最も喫緊の分野であるといえる。
- ・ AIの分野ではAIが将来、人類にとって深刻な脅威となるのではないかという危惧を持っている人たちが少なからずいる。先端の科学者の中でも「深刻な脅威となり得る」という人と「そんなことはない」という人が分かれるようであるが「そんなことはない」という人の根拠は、人間が設計するのだから大丈夫、スイッチは人間が握っている、囲碁AIのように単機能なものはともかく複合機能を持つものがシンギュラリティを問題にするまで進歩するにはまだ相当時間がかかる、などというものである。しかし、これらはいずれも答えになってはいない。
- ・ AIがそのAI以上に進化したAIを作り出すことができることはほぼ認められており、そうならばその基本のアルゴリズムは人知では伺い知れない。また、優秀なAIはスタンドアローンな空間に閉じ込めておくのは不可能で必ずネット上に進出するという研究もある。そうであれば初めからAIにある種の倫理機能を内製化させておくこと、それがどんな倫理機能であるのか、などを考えておくことは当然必要なことであろう。この分野の倫理も当然、地域文化による差異は否めない所以日本においても独自に研究を進めていくことが重要だ。これらの研究は例えば「自動車の無人運転」でもすぐに必要だが、その倫理の根拠がもっと普遍的な倫理ときちんと整合していることが重要である。
- ・ AIが人類にとって危険ではなくてもAIの進化により人間の役割が変わり、いわば人間の固有な「ヒューマニティ」とは何かという深刻な悩みを持つだろう。これは例えば記憶装置を人体に内装するといった問題として現れてくるかもしれない。「ポストヒューマニティ」の問題といわれている分野である。また短中期的には仕事を奪われる、とか長期的には人間は何をしたら良いのだ、というようなアイデンティティの問題としても認識されている。
- ・ AIが社会に対してどのようなインパクトを与えるのか、という問題で最も大きいのは

AIを味方につけた人が「格差を助長するのではないか」という問題であろう。その他、ビッグデータではデータの所有権が誰に属するのか、という問題をどのように解決するかという事が重要な問題になっている。これは財産権の問題もあるし、プライバシーや企業の支配・被支配関係にも大きな影響を与えるからである。また、SNSは新たな誹謗中傷などの問題や合意形成される概念の稚拙さなどが指摘されていて次世代への問題として指摘する向きもある。

- ・ AIや情報科学は国家競争戦略や安全保障戦略の部分でもインフラとなるような部分であるからまず公的なデータベースの公開や逆に利用制限などが明確な論理のもとでできていることが必要だしプライバシー問題にしても非人称部分のデータの利用が必要な場合にスムーズにできる体制が必要である。そういったインフラが整えられて初めて情報科学の戦略も意味のあるものになり、教育政策や産業構造戦略にも応用できるものになる。このように、情報産業のリテラシーの向上こそが安全で効率的な情報社会の土台でありこの意味で研究者の規制的な方向から議論が始められるような議論よりも社会的な広がりを持った俯瞰が重要である。情報科学の分野は最も動きが早くまた影響が広範囲なだけに「情報科学と社会」の接点を含めて俯瞰することが求められている。
- ・ さらに、もっと実際的问题でデータ産業におけるアマゾンやグーグルなどの独占的強さや日本の劣位の問題を見る時に、これを科学技術的観点からの劣位の分析も必要だが、日本社会のプライバシー感覚や規制の多さといったものからビジネスモデルの成立に歯止めがかかったという分析も必要だろう。
- ・ ナノテクノロジー・材料分野は、一つは人体や環境への安全問題について「科学と社会」の観点からどのような規制が必要か、それと産業政策、競争戦略との関係はどうかという問題が重要だ。
- ・ もう一つは用途の開発だろう。用途の開発は基本的には民間の企業が担うことが多いと想定されるが、その際ナノテクノロジー・材料分野における基礎研究成果が必要な企業に届くとは限らないという課題がある。この部分を考えることはナノテクノロジー・材料分野の発展について非常に重要と考える。
- ・ 以上、分野ごとに「科学と社会」の現状で提起されている課題を書いたが、俯瞰本編はこれらの課題に対するより突っ込んだ回答となっている。

1.2 これまでの我が国の科学技術イノベーション政策の俯瞰

1) 科学技術基本計画と戦略

1990 年代にバブル経済が崩壊すると、日本は長期の経済停滞期に入り、民間部門の研究開発投資が縮減していった。このような中で、産業競争力の強化のために、元々、諸外国より少なかった国の研究開発投資を拡充することを求める声が高まった。このような背景から、1995 年に議員立法によって「科学技術基本法」が制定された。これは、政府が予算を確保して科学技術を振興することを定めた初の科学技術政策に関する総合的な法律である。この「科学技術基本法」によって、科学技術の振興に関する「科学技術基本計画」を策定することが政府に義務付けられ、これまで第 5 期までの基本計画が策定されてきた¹。

2016 年度からの「第 5 期科学技術基本計画」（2016 年度～2020 年度）では、日本において科学技術の研究基礎力が弱まっている点、大学の改革等が遅れている点等を指摘した上で、産学官・国民が協力して「世界で最もイノベーションに適した国」へと導くための計画とした。

科学技術基本計画の下で短い期間内でよりダイナミックに戦略を見直す仕組みとして、2013 年に「科学技術イノベーション総合戦略」が策定され、以後毎年更新されることになった。2018 年には、さらにこれに代えて「統合イノベーション戦略」が策定された。

続いて以下に、科学技術イノベーションを推進する行政組織、研究組織の変遷をまとめた上で、重要な施策（人材育成、産学官連携等）の側面から俯瞰したものを述べる。

2) 中央省庁の再編と諮問機関の変遷

2001 年の中央省庁再編時において、「内閣府」に「科学技術政策担当大臣」及び「総合科学技術会議」が置かれた。また文部省と科学技術庁の統合により「文部科学省」が設置された。

「総合科学技術会議」は科学技術イノベーションの諮問機関として設置され、我が国全体の科学技術を俯瞰し、各省より一段高い立場から、総合的・基本的な科学技術政策の審議等を行うこととされた。2014 年には「総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）」への改組によって、司令塔としての機能強化が行われた。

2018 年 7 月には「統合イノベーション戦略」（前出）を具体的に推進するための会議体として「統合イノベーション戦略推進会議」が内閣に設置され、CSTI もその中に加わる形となった。

このような戦略と推進体制の変化は、戦略のスコープが“科学技術の振興”に加えて“イノベーションによる国力強化”に大きく拡大し、科学技術はそのイノベーションの実現に貢

¹ 第 1 期（1996～2000 年度）、第 2 期（2001～2005 年度）、第 3 期（2006～2010 年度）、第 4 期（2011～2015 年度）、第 5 期（2016～2020 年度）

献するという位置づけになった。CSTI は科学技術分野に広く目配りするという役割に変更はないものの、社会と産業への責任がいっそう増加したといえる。

3) 研究開発機関の法人化

2000 年の「行政改革大綱」に基づき、我が国の主要な研究開発機関の独立行政法人化が進んだ他、2004 年には国立大学と大学共同利用機関がそれぞれ「国立大学法人」、「大学共同利用機関法人」となり、さらに公立大学も地方公共団体の選択により「公立大学の独立行政法人化」が可能となった。

2008 年の「研究開発力強化法」（議員立法）において「研究開発法人」が定義された後、「研究開発力強化法」の一部改正（2013 年）を経て、2015 年には研究開発を主たる業務とした 31 の独立行政法人が新たに「国立研究開発法人」となった。

2016 年には「特定国立研究開発法人」が制度化され、国立研究開発法人の中から 3 機関が指定された（理化学研究所、産業技術総合研究所、物質・材料研究機構）。同様に 2017 年には「指定国立大学法人」が制度化され、6 大学が指定された（東北大学、東京大学、京都大学、東京工業大学、名古屋大学、大阪大学）。

4) 大学改革

文部科学省は 2012 年に「大学改革実行プラン」、2013 年に「国立大学改革プラン」を公表し、大学の機能強化に取り組んだ。2014 年には「国立大学法人法」の一部が改正されて、大学運営における学長のリーダーシップの確立が図られた。

2015 年の「国立大学経営力戦略」は、個々の国立大学の特徴に合わせて、重点支援を行うことを表明したものである。結果的に個々の国立大学の選択によって 86 大学が 3 つのタイプに分かれることになった。

しかし大学全体では博士課程への進学率は 10 年間で低下を続けている現実があり²、人材の処遇を根本的に改善する必要があるとされる。

5) 人材育成

研究者の育成については、特にグローバル化の時代において世界に通用する人材育成に重きが置かれてきた。優秀な人材のグローバルな流動の「環」に入り、世界中から人材が集まる開かれた研究拠点を作るための「世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）」（2007 年～）、「リーディング大学院」（2011 年～）、「スーパーグローバル大学事業」（2014 年～）が実施されている。さらに「第 5 期科学技術基本計画」からは、安定かつ自立して研究を推進できるような環境を提示しようとする「卓越研究員事業」（2016 年～）や、5 年一貫の質

² 修士課程修了者の博士課程への進学率（進学率）：7,491 人（9.8%）→ 6,674 人（9.4%）（2013 年度→2016 年度） 出典：文部科学省総合政策特別委員会（第 21 回）（2018 年 8 月 7 日）「資料 2-1 文部科学省における第 5 期科学技術基本計画の進捗状況の把握と分析結果（中間とりまとめ案）」

の高い博士課程に対して支援しようとする「卓越大学院プログラム」（2018 年～）などの事業が開始された。このようなグローバル人材育成を強化しているものの、大学等における研究者の中・長期（30 日以上）の海外への留学者数は 1995 年レベルの状況が続き、研究者の国際流動性に課題が残る³。

一方、労働人口減少の傾向の中で、多くの産業部門において高度な能力を持った理工系人材が強く求められている。「理工系人材育成戦略」（2015 年）では、産業界との対話と協働の場として産学官円卓会議を開催し、産業界の期待にこたえる大学教育のあり方を議論している。「ICT 人材育成事業」（2016 年～2017 年）、「データ関連人材育成プログラム」（2017 年～）の他に、より実践的でハイブリッドな工学系人材の養成等をめざして、「未来価値創造人材育成プログラム」（2018 年～）が始まった。

また「第 4 期科学技術基本計画」では、研究活動を高い次元で支援する「リサーチアドミニストレーター（URA）」や知的財産専門家等の展開を図ったが、なお研究支援者数は主要国と比べて少ない⁴。そのため、「第 5 期科学技術基本計画」では、プログラスマネージャー、URA や技術支援者等の人材の職種ごとに求められる知識やスキルの一層の明確化の必要性を打ち出している。

女性研究者の出産・子育て・介護等を支援する仕組みとして、個人を支援する「特別研究員－RPD 制度」（2006 年～）が設けられた以降、「ダイバーシティ研究環境実現イニシアティブ」（2015 年～）のような研究機関を間接的に支援する形で実行されている。

6）産学官連携・地域振興

日本において大学と民間企業の連携が本格化するのには、「大学等における技術に関する研究成果の民間事業者への移転の促進に関する法律（TLO 法）」（1998 年）や「産業活力再生特別措置法（日本版バイ・ドール条項）」（1999 年）の制定以降である。

その後、社会ニーズを基に研究課題を設定し大学や企業が拠点に結集することにより実現する「革新的イノベーション創出プログラム（COI STREAM）」（2013 年～）など、新たな取組が行われている。第 5 期基本計画では民間企業からの共同研究費受入額を 2013 年度比で約 5 割増加させるという目標を置いたが、現状で 1.37 倍にとどまっている⁵。

新たなベンチャー支援として、2014 年に経済産業省主導の「研究開発型ベンチャー支援事業」、JST の「出資型新事業創出支援プログラム（SUCCESS）」が開始された。産学官連携のためのプラットフォームを作ろうとする「産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム（OPERA）」（2017 年～）や、国の喫緊の研究課題に向けて中小企業の研究開発力

³ 中・長期派遣者数 3,997 人（1995 年）→7,674 人（2001 年）→4,415 人（2017 年）。『国際研究交流の概況（平成 27 年度の状況）』、文部科学省（2017 年 6 月 5 日）

⁴ NISTEP「科学技術指標 2018」（2018 年 8 月） p.105

⁵ 民間企業との共同研究に伴う研究費受入額（大学等）：39,023 百万円→ 52,557 百万円（2013 年度→2016 年度）。1 件当たりの研究費受入額が 2,182 千円→ 2,283 千円であるため、1 件当たりの額を高める必要があるとされる。前出の総合政策特別委員会資料による。

を集合させる「オープンイノベーションチャレンジ」（2017 年～）等のユニークなプログラムが開始された。

また日本における産学官連携の施策は、地域振興と深く結びついていることが特徴である。内閣府では、2014 年にまち・ひと・しごと創生本部が設立され、同年「まち・ひと・しごと創生総合戦略」の中で、地域経済、雇用対策、少子化・人材対策に向けて、地方大学等の活性化が掲げられた。2018 年には、「地域における大学の振興及び若者の雇用機会の創出による若者の修学及び就業の促進に関する法律」が制定され、地域の大学振興・若者雇用創出を目指す「地方大学・地域産業創生事業」が開始された。

7) 研究開発資金

日本の大学や公的研究機関の運営に対する公的な支援として、経常的な機関運営資金として提供される補助金（運営費交付金等）と、特定の目的や優れた研究に対して配分される競争的資金の二種類を組み合わせた「デュアルサポート」が行われている。

代表的な競争的資金である「科学研究費補助金（科研費）」は、若手研究者の支援や新興・融合領域の推進に向けた研究種目等を新設することにより、時代に沿って研究者の多様なニーズに対応した制度となってきた。2018 年度からさらに新しい制度となり、1)審査区分を大・中・小の区分に大括り化、2)研究種目の再構築、3)「学術研究助成基金」の充実等がはかられた。

一方、科研費以外の競争的性格を有する資金については、資金規模の大きい制度やイノベーションを指向した制度の創設が進んできたといえる。最近では、米国 DARPA⁶を参考とし、ハイリスク・ハイインパクトな研究開発を幅広い裁量をもつプログラムマネージャーの下で推進する「革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）」（2013 年～）、基礎から出口までを見据えた省庁・分野横断的プログラムである「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」（2014 年～）などの新制度が創設されている。「官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）」（2018 年～）は民間の研究開発投資誘発効果の高い領域（ターゲット領域）に各府省の施策を誘導し、それらの施策の連携を図るとともに、必要に応じて追加の予算を配分するものである。

以上のように科研費以外の競争的資金制度は大型化と応用研究寄りになってきているが、問題点もいくつか指摘されている。第一は、国が大型投資によって実用化を促進する反面、本来投資すべき民間企業の研究開発投資の意欲を鈍らせているという指摘である。第二は、国の投資が応用研究に偏るために、新たな発想を生み出す基礎研究に対して目配りが必要であるという点である。第三は、国からの支援金が大規模かつ長期になるほど、その支援の終了後に大学では事業の継続が難しくなるという点である。

研究開発資金における別の問題点は研究装置・施設そのものの高コスト化である。以前より高価格な研究設備については研究拠点を作り、研究者が共用利用する方法がとられてき

⁶ Defense Advanced Research Projects Agency（米国・国防高等研究計画局）

たが、国際的な競争下ではまだ十分ではないとされる。また素粒子物理学の分野では 2013 年から「国際リニアコライダー（ILC）」の建設計画が議論されている。このような特定分野の研究においては、その研究レベルは研究投資額の多寡によって直接、左右される時代になっている。

8) 科学技術と社会

「1.1 グローバルトレンドと「科学と社会」」で述べられているように、現代の科学技術は社会や国際関係の動向と切り離して考えることができない。超高齢化社会の到来や、気候変動とそれに伴う災害の多発等、内外の諸課題への対応が求められる中、科学技術が果たす役割への期待が高まっている。その一方で、人工知能（AI）や最先端の生命技術の利用による懸念も指摘されている。また、研究開発の実施にあたっては、研究プロセスや成果の利用において生じる ELSI（倫理的、法的および社会的課題）の検討や、研究者による研究倫理の遵守（研究公正）が、より強く求められるようになっている。

これらは、科学技術が社会に与える影響とそれに対する社会の反応—すなわち科学技術と社会との相互作用が、これまでになく速く、大きくなったことを反映しているといえよう。科学技術によったもたらされる利便性とリスクの双方を視野に、「社会の中の科学、社会のための科学」（ブダペスト宣言、1999 年）の理念を、科学技術イノベーションを目指す取り組みを政産学官・市民の各ステークホルダーが具体化していくことが求められている。

国際的な動向として注目されるのは、国連による持続可能な開発目標（SDGs）（2015 年採択）の達成に向けて、科学技術の果たす役割が高まっていることである（STI for SDGs フォーラム）。

同様に 1.1 章では、国家と科学の関係を論じる場合には、安全保障が大きく関係してくることを述べている。日本の科学技術においても、国際活動における安全保障貿易管理とデュアル・ユースの問題は重要である。いわゆる安全保障貿易管理の対象となるような先端技術は今やあらゆる分野にわたっているため、現場の研究者にとって、その情報管理は一段と難しくなっている。国籍の異なる共同研究者とのコミュニケーションや、国際会議での情報交換においても注意が必要とされる。また日本の研究者が外国の軍事関係機関から直接に研究費を得るような事例だけでなく、民生用に開発された技術が簡単に軍事用途やテロ用途に応用されてしまう危惧が大きくなりつつある。これらの問題は研究者個人の倫理に頼るものではなく、国としてしっかりとした対応が必要とされる場所である。

1.3 主要国の動向のまとめ

科学技術の進歩そのものが社会的な課題やグローバルなチャレンジの主要な原因要素となっている時代を迎え、科学技術イノベーション政策は、卓越した科学技術研究成果を生み出し、いち早くイノベーション創出につなげることを主目標としている。欧州各国では 2000 年代に入ってから、社会的課題やグローバルなチャレンジを解決するための科学技術にむけ、イノベーション志向が拡大し、バックキャスティングによる研究テーマを設定することで、民間企業をはじめとして参画の機会が増大してきた。結果として産学連携の動きが加速し、大学や研究機関からの技術移転をいかに促進するかに各国とも腐心している。さらに近年では特に欧州において、漸進的なイノベーションでの実績はあるものの、GAFA¹にみられるような市場創出を伴う破壊的なイノベーションの創出をどのように実現するかについて議論が盛んに行われている。

これを踏まえ科学技術の動向に目を向けると、量子や AI といった国の安全保障にもかかわるような分野では、国家戦略としてこれらを強力に推進するという流れにあり、これら重要技術が今後の国力を左右すると言って過言では無いと考えられる。また、情報通信技術の急速な発展は社会や産業の構造を変えていると言えるが、科学技術自体をも変えていく。特にデータ駆動型科学技術が各研究分野の浸透しつつあることは研究手法を大きく変えつつある。この変化は研究者の独創性を刺激し新たな発想を誘発するなど研究活動の根幹にまで及んでいる。科学技術と社会との関係が深化する中で科学技術への懸念も増大し、ゲノム編集や AI の研究活動では ELSI の問題が惹起されつつある。今後は研究活動の一環として、一般市民との対話を行い、新しい技術を社会に導入するに当たって、メリットのみならず安全性や倫理上の問題を同じ俎上に上げて議論していくことがより重要となると考えられる。

1) 欧州の動き

2000 年から 2010 年までの EU の科学技術・イノベーション関連政策の基本的な方針となっていたのが 2000 年に策定された「リスボン戦略(Lisbon Strategy)」である。リスボン戦略は、経済・社会政策に関する包括的な戦略目標で、イノベーションは経済成長の原動力であるというシュンペーター（Joseph Schumpeter）の理論を基に「2010 年までに欧州を、世界で最も競争力があり知を基盤とする経済圏として構築すること」を目指している。リスボン戦略の後継として 2010 年に策定されたのが「欧州 2020（Europe 2020）」である。欧州 2020 は 2020 年までの EU の経済・社会に関する目標を定めた戦略であり、EU および各加盟国が行うべき具体的な取り組みを提示している。リスボン戦略と欧州 2020 は連続性をもちながら、後者はより研究開発の推進が強調され、社会的な融合と環境への負荷が少ない技術を通じて経済成長を遂げるという目標が掲げられていることが特徴である。

EU の研究開発・イノベーションに関する戦略は「イノベーション・ユニオン

¹ Google、Amazon.com、Facebook、Apple Inc. の 4 つの主要 IT 企業の頭文字を取ったもの。

（Innovation Union）」と呼ばれ、欧州 2020 の各目標実現のために設定された 7 つの具体的な取り組み（フラッグシップ・イニシアティブ）の一つが Horizon 2020（2014 年～2020 年）である。Horizon 2020 の第一の柱は、「卓越した科学」である。基礎研究支援や研究者のキャリア開発支援、インフラ整備支援などを通じ、欧州の研究力を高めることを目的としたものである。第二の柱は、「産業リーダーシップ」である。これは、産業技術研究の支援、リスクファイナンスの提供、中小企業の支援などを通じ、技術開発やイノベーションを推進するものである。第三の柱は、「社会的な課題への取り組み」と位置付けられ、この柱では 7 つの社会的課題を定義し、その解決に資する様々な基礎研究からイノベーション、社会科学的な研究まで網羅する取り組みが行われているだけでなく、より市場に近いパイロットテスト、テストベッド、デモンストレーションなどにも主眼が置かれている。地球温暖化をはじめとする環境問題、水やエネルギーなどの資源問題、経済格差の拡大や、人口動態の変化といったグローバルな社会的課題を解決し、国際競争力を維持していくために質の高い研究開発を進めてイノベーションを創出し、経済成長を遂げることを目的としたイノベーション政策を科学技術基本政策にいち早く打ち込んだのは欧州連合（EU）²および欧州各国である。イノベーション政策における国家の役割は変化しており、イノベーションを創出するシステム（環境）とシステム内の能力やつながりを支援するにとどまらず、イノベーションの方向性を形作る主役としての国家に期待が高まっているというのが欧州のトレンドである。社会的な課題（Societal Challenges）や持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals: SDGs）といった大規模な「課題」志向の政策と、社会的懸案事項として具体的な社会の需要を定義した「ミッション」志向の政策の重層構造となっている。

現在 EU では、2020 年に終了する Horizon 2020 の後継プログラムとして、Horizon Europe の検討がすでに始まっている。2018 年 6 月に欧州委員会により Horizon Europe 案が提示され、欧州議会および EU 理事会との交渉が始まった。同案では、Horizon 2020 の三本柱構造が維持されているが内容は刷新されていて、卓越した科学を支援する「フロンティア研究の支援」、社会的課題の解決と産業競争力の強化を図る「オープンイノベーション」、中小企業（SME）やスタートアップの研究開発を助成する「市場創出の支援」の 3 つと定められている。第二の柱「グローバルチャレンジ/産業競争力」では、社会的課題群として 6 つのクラスターが設定され、これらクラスター群に横串を指しプログラムのインパクトを向上させる方法として、共通目標としての特定の社会課題の解決に焦点を絞った「ミッション」が議論されている。また、第三の柱は、破壊的なイノベーション創出の支援を目的とした助成機関として欧州イノベーション会議（European Innovation Council: EIC）を新設することが決まっている。

² Aho Group Report "Creating an Innovative Europe", Esko Aho et al. 2006

次に、EU 加盟国である英国、ドイツ、フランスのそれぞれの動きを示す。いずれの国も質の高い研究開発を進めイノベーションを創出することを目標としているが、それぞれの事情や過去の政策等で重点や課題が少しずつ異なっている。

(1) 英国

英国における科学技術イノベーションの主要所管省はビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）である。同省は、2016 年 6 月の EU 離脱を問う国民投票で離脱派が過半数を占めたことを受け退陣したキャメロン内閣に代わって翌 7 月に発足したメイ新内閣の下で新設された。BEIS の新設により、科学・研究・イノベーションの所管はビジネス・イノベーション・技能省（BIS）から BEIS に引き継がれたが、高等教育は BIS から切り離され教育省（DfE）に移管された。これに伴い、大学・科学担当大臣も、大学・科学・研究・イノベーション担当大臣と名前が変更され、BEIS と DfE の 2 省を兼任することとなった。BEIS から「産業戦略：将来に適応する英国の建設」が発表された（2017 年）。名称は産業戦略であるが、単なる産業振興のための施策や提言などにとどまるものではなく、2030 年までに英国を世界最大のイノベーション国家にすることを目指して科学技術政策にも注力しており、生産能力向上などの長期構想を示した内容である。グローバルな技術革命を主導できる領域として 4 つの「グランド・チャレンジ」を特定し、各グランド・チャレンジの具体的な目標として「ミッション」を明らかにした。これらミッションは特定の問題に焦点を当て、政府、産業界、様々な団体など英国内の多様なステークホルダーが団結して現実に人々の生活を変えることを目指している。

もうひとつ英国における大きな動きとして、英国研究・イノベーション機構（UKRI）の発足が挙げられる。UKRI は BEIS を所管省とし、7 つの分野別に設置され研究助成を担う研究会議、主に産業界や企業におけるイノベーション活動を支援する Innovate UK、およびイングランド地方の大学にブロックグラントを助成しているイングランド高等教育資金会議（HEFCE）が単一の法人組織としてまとめられ、2018 年 4 月に発足した英国最大の公的ファンディング機関である。さらに、従来イングランドの大学に資金を配分していた HEFCE は再編され、大学の研究評価やブロックグラントの配分、産学連携推進の機能を分離して Research England とし、これを他の研究資金助成機関と連携して運営できるように UKRI の傘下に組み込んでいる。UKRI は 9 つの構成機関の独立性や柔軟性を最大限に生かし、異分野融合や組織横断でイノベーションにつなげるファンディング実施を目指している。また、Innovate UK は、主に産学連携や企業におけるイノベーション活動を支援し、研究開発経費の助成だけでなく、傘下のカタパルト・センターなどを通じて産業界とのマッチングファンドによる産学連携の加速を図っている。その役割は、英国の成長と生産性向上に役立つ分野において技術を可能にするためのイノベーションを実現することにある、その

ための技術開発および商業化を推進している。英国の高い研究力を支えてきた複数の機関を統合し、産業につながるイノベーションの創出を図るという意図が読み取れる。

（2）ドイツ

2006 年に、連邦政府の研究開発およびイノベーションのための包括的な戦略である「ハイテク戦略（High-tech Strategy）」が発表され、ドイツの科学・イノベーション政策はこの戦略を基本計画として推進されている。ハイテク戦略は省庁横断型の戦略であり、ファンディングから研究開発システムに至るまで、幅広い施策や戦略が網羅されている。公的資金をより効率的に利用することを目指したもので、知識の創出や普及によって、雇用や経済成長を促進することを目的としていると同時に、EU 加盟国共通の目標として合意されている総研究開発費の GDP 比 3% 目標を達成するための政府の取り組みの一つでもある。2010 年には従来のハイテク戦略を更新する「ハイテク戦略 2020」が発表され、社会的な課題解決を達成するためのさまざまなニーズ・オリエンテッドな施策が盛り込まれた。さらに第三期メルケル政権発足後に「新ハイテク戦略（2014 年）」が発表された。順調に研究開発投資が増加し、景況感も悪くないことなどから、過去 8 年間のハイテク戦略を引き継ぐ形で、よりイノベーション創出に軸足を置いた政策となっている。新ハイテク戦略では、既にイノベーションの推進力が大きいと期待される分野を特定し優先的に研究を実施した。2017 年の総選挙、その後の連立政権発足を受けて、2018 年 9 月に第四期「ハイテク戦略 2025」が発表された。大きな方向転換はなく、「知識から実用」をもたらすイノベーション重視の姿勢は変わらない。変化の早い社会の情勢や、グローバルに解決が求められる社会的な課題、高まる国際競争の圧力に対応し、高い科学技術力で飛躍的なイノベーション（Sprunginnovation）を起こし、生活の質と雇用を維持しながら経済成長を続けていくために、産官学が連携して優先度の高い領域を決め、①社会的課題の優先分野、②鍵となる未来技術と人材、③研究開発の推進方法を示した。国内外ならびに産官学のステークホルダー共通の横串的な「ミッション」を定義して政策を実施する。ハイテク戦略が策定された背景は、高い科学技術力を持ち、自動車、機械、化学といった強い産業を誇るドイツでありながら、イノベーションの創出力において米国やアジア諸国に劣るとの危機感から、イノベーションのスピードを上げることにあった。優先的に実施された施策は産学連携を支援する複数のプログラムで、ドイツ国内では一定の成果を見ているとされてるものの、Google や Amazon のような新規グローバル企業の誕生には至っていないことにある。そこで「ハイテク戦略 2025」では、新たに「飛躍的イノベーション庁」を設置し、最新技術で市場を変革させるようなインパクトを持つ破壊的なイノベーションを生み出す仕組みを作ることが決められた。

(3) フランス

科学技術・イノベーション分野におけるフランスの持つ最大の強みは、基礎科学から応用に向けた伝統と、基礎研究や原子力、宇宙などの巨大技術分野を支える研究者や技術者を継続的に産み出す仕組みである。大学やグランド・ゼコールなどの高等教育の中での技術者教育の占める位置は大きく、研究開発の現場で活躍する技術者、技能者を育て、その職業的な地位を確固とするシステムが全体として整っている。しかし同時に国の主導が強いため科学技術を担う相当数の人員を国が直接抱えることを余儀なくさせられている。先端分野である IT 産業におけるフランス企業の存在感は薄く、自動車産業もドイツや日本、米国さらには中国に比較するとやや競争力で弱い感を免れない。IT 産業は、将来の雇用に大きく影響する分野であり、ここで競り負けると他の分野における競争力にも影響する恐れがある。国主導の研究開発体制を築いてきたフランスが、民間企業の主戦場とも言えるこのような先端分野で、どのような機動性を発揮できるかが大きな課題であると考えられている。フランスにおいては従来、研究・イノベーションに関する統一的な国家戦略の策定や優先分野の設定は実施されていなかったが、2009 年に「国の研究・イノベーション戦略（SNRI）」が取りまとめられた。フランスにおける現行の研究戦略はオランド政権下で 2015 年に策定された SNR France Europe 2020 である。現マクロン政権下でもこの戦略が基本となっている。さらにイノベーションが複数省にまたがる課題であるとの認識の下、高等教育・研究・イノベーション省（MESRI）大臣と経済・財務大臣が共同議長を務め、関係 4 大臣も参加して横断的な取組を強化する「イノベーション会議」を設置した。「研究から産業へのシームレスな体制」が生み出されることが期待されている。

もう一つの注目の動きは、米国や英国の有力大学に力負けしている現状を打開し大学の研究ポテンシャルの向上を図ろうとして実施されている大学再編の動きである。大学・研究機関コミュニティ（COMUE）にイニシアティブ・エクセレンス（IDEX）等のラベルを与えることや、研究大学院を設置することなどにより、大学の規模を大きくし地域毎の研究機関の連携を図って研究ポテンシャルの強化を図るサイト政策が重要視されている。

2) 米国の動き

行政権と立法権の厳格な権力分立に基づく大統領制を採っている米国では、公共政策形成において、各所に権力が分散した多元的な政治主体による「抑制と均衡」が図られ、大統領府を中心とする行政府だけではなく、予算編成権を握る連邦議会と民間の財団やシンクタンクなどの政策コミュニティが与える影響が非常に大きい。オバマ政権下では「米国イノベーション戦略」³で政策方針が示されたほか、政権任期の満了直前ながら「米

³ 2009 年 9 月、2011 年 2 月、2015 年 10 月

国イノベーション・競争力法」が成立した。これらに通底するのは基礎研究や STEM⁴教育を継続的に支援し、技術移転を促進してイノベーションを活性化させ、米国の競争優位性を確保するという姿勢である。

一方トランプ政権においては科学技術イノベーション政策としてまとまったものは示されていないが、近年、国家安全保障と国際競争力の観点から新興技術分野における優位性を確保する姿勢が強まりつつある。特に 2018 年以降、AI、量子、次世代（5G）通信、先進製造の各分野において、産官学のリーダーを集めたサミット開催や戦略計画策定など政権主導による取り組みが顕在化している。これら 4 分野は、2019 年 2 月に発表された 2020 年度大統領予算教書で「未来の産業」と位置付けられ、優先的に研究開発投資を行うとされた。他方でトランプ政権は、多額の研究開発費を持つ大手 IT 企業や先鋭的な技術力に強みのある多様なスタートアップ企業など層の厚い米国内の民間部門を念頭に、政府の投資は初期段階の研究開発と技術移転に焦点を当てるべきとも強調してきた。また前述のサミット等でも、研究開発投資のみならず、規制、データやインフラへのアクセス、人材育成など研究の基盤となるトピックが常々論点に挙げられている。こうした点も含め、国際情勢や米国全体の研究開発エコシステムを背景に連邦政府がどのような政策を打ち出していくのか、引き続き注目される。

こうした政権の科学技術政策とは別に、例えば基礎研究・学術研究活動を支援する米国立科学財団（NSF）は 2016 年に「NSF が未来に向けて投資すべき 10 のビックアイデア」を発表し、コンバージェンス（融合）型の研究推進を打ち出した。これは 2000 年代初頭からの異分野融合・連携に関するアカデミアにおける議論や、NSF における支援の取り組みを基礎とするものである。NSF によると人の健康の保護、食糧・エネルギー・水の連環の理解、宇宙の調査といった現代におけるグランド・チャレンジは、単一の分野領域のみによって解決されるものでなく、幅広く様々な分野を基盤とするアイデア、アプローチ、知識を統合させるコンバージェンスという発想法が求められ、それがイノベーションと発見を促すことにつながるとされており、科学と工学の全分野にわたる強固な連携によって、コンバージェンスを促進するための適切な措置を取る方針を打ち出している。このほか、エネルギー省（DOE）はエネルギー分野における産官学の連携を促進するために国立研究所や大学を対象としたいいくつかの研究拠点の形成を支援している。そのうちの一つであるイノベーション・ハブ・プログラム（2010 年～）は、大学、企業、そして公的研究機関から卓越した研究者をあつめ、国家にとって重要なエネルギー課題に、基礎から実用化まで一貫通貫して一つ屋根の下で取り組む、大規模拠点の形成を支援している。現在運営されている 4 つのイノベーション・ハブでは、短期間で革新的な技術を生み出し、解決策を提供することを目的に、産官学の異なる専門分野の科学者や工学者が一体となって研究に取り組んでいる。こうして世界トップの成果を生み出している米国の研究開発エコシステムにおいても常に新しい試みがなされ、改良

⁴ Science, Technology, Engineering and Mathematics、科学・技術・工学・数学の分野

が実施されている。

3) 中国の動き

中国は、国の発展・近代化のためには科学技術が不可欠との考えから、党・中央政府トップレベルの科学技術への関心が極めて高い。このような背景から、党・中央政府の政策に対し、政府シンクタンクや中国人民政治協商会議の科学技術分野の分科会（教育科学文化健康体育委員会）等、様々なルートでサイエンスコミュニティが政策立案に関与している。中国科学院も科学技術政策の諮問機関としての機能を有する。科学技術政策の実施主体は主に国務院傘下の科学技術部（MOST）が担っている。同部所管には、基礎研究のみならず、日本の経済産業省で所管している産業技術に係る研究領域も含まれている。

国のイノベーションシステム構築の指針となる「国家イノベーション駆動発展戦略綱要（2016 年～2030 年）」が、2016 年 5 月に国務院から発表された。これは、国家中長期科学技術発展計画綱要の後継的性格を持つ戦略で、本来であれば国家中長期科学技術発展計画綱要終了後（2020 年）に開始するものであったが、科学技術・イノベーションの重点化により産業力の向上及び総合的な国力の向上を図ることは喫緊の課題であるとの認識から、2016 年に前倒しで開始された。現在の科学技術・イノベーションの中長期計画にあたる。同綱要は、2050 年までを見据えた 15 年の中長期戦略で、第一段階で 2020 年までにイノベーション型国家の仲間入りを果たし、第二段階で 2030 年までにイノベーション型国家の上位に食い込み、第三段階で 2050 年までに世界の科学技術の中心およびイノベーションの先導者となることが目標として掲げられている。

このほか、習近平体制下でのファンディングシステム改革が実施された。複数の省庁がそれぞれの行政ニーズで多くの競争的研究資金支援プログラムをそれぞれ管理運営し、重複申請の問題や相互の関連性が薄く、イノベーションにつながっていないという課題があるとされていた。こうした問題の裏にある縦割り行政を打破するために、中国中央政府は 2015～2017 年に競争的研究資金制度の改革を行い、40 部（日本の省に相当）100 以上あったファンディングプログラムを 5 つのプログラムに統合した。

中国における注目の動きとしては産業政策としての色合いが濃いものの、「中国製造 2025」（2015 年）ならびに次世代人工知能発展計画「AI2030」（2017 年）が挙げられる。前者は、産業用ロボットや次世代通信規格「5G」のカギを握る移動通信システム設備といった分野を重点とするなど、米国が警戒を強めている。また人工知能については 2030 年までに AI の理論、技術、応用全てで世界一になるという野心的な戦略目標の下、国家主導の研究開発を推進している。

4) インドの動き

中国に次ぐ世界第二位の人口を誇るインドは ICT 産業を中心に経済が発展しつつあ

り、近年ブラジル、ロシア、中国と共に BRICs の一角として注目されている。しかしながら依然として貧困、身分（カースト）制度、インフラ整備の遅れなどさまざまな課題を抱えている。インドにおける科学技術政策は、中央政府、州政府、公共産業、民間産業、高等教育機関により構成される広範囲な組織のもとで実施されている。

都市化近代化が著しいインドは、未だ貧しい人々が多いので、テクノロジープッシュ型のイノベーションのみでは国民に広く受け入れられない点や、ハイテクイノベーションの恩恵にあずかることのない人々が食べていくための技術が必要であり、イノベーションのコストを下げて、草の根レベルで教育を行うことが重要であることが共通の理解として存在している。この背景には、民主主義が確立されているため、貧困層を常に意識した政治を行う必要があることが挙げられ、貧困や格差解消等の社会課題を抱えるインドならではの状況といえる。一番最近に実施された第 12 次 5 か年計画（2012～2017 年）には、研究開発部門への投資の対国内総生産（GDP）比率を、1%から 2%以上に拡大するとしており、そのためには政府のみならず民間部門の取り組みを拡充することを求めている。さらに基礎研究への投資に関しては、エネルギー、食料安全保障、安価な医療、水に関連する分野など、国民に関わる分野の研究に注力することに高い優先順位を付与すべきとしている。さらに、インドには保健医療、教育、スキル、農業、都市開発と農村開発、エネルギー等、様々な課題があると同時に、階級、カースト、ジェンダーといった課題もあり、イノベーションにより現状を打破することが期待されているが、社会の課題との関係上、価格の低廉性が大きなテーマとして掲げられている。

一方ハイテク分野に目を転じると、火星探査機（マーズ・オービター・ミッション）を搭載した PSLV-SL ロケットが打ち上げられ、アジアで初めて火星周回軌道への投入に成功した（2014 年）するなど、高い科学技術力を誇ることが分かる。

2. 科学技術の俯瞰

2.1 世界の潮流等における分野を越えた動き

項目	内容
世界の潮流	● 世界においては、米欧で育まれた民主主義、市場原理、科学技術を規範とする価値観がグローバリズムを推し進めてきたが、米国による自国第一主義、中国の台頭等により世界の政治・経済が不安定化し、その価値観に揺らぎが生じている。 ● 近年、科学技術イノベーションへの期待が大きく増大。例えば、国連のSDGs やパリ協定においては科学技術による貢献が謳われ、EU の経済・社会に関する戦略において研究開発・イノベーションに関する戦略（Horizon 2020）が重要と位置付け。科学技術と社会との関係が深化する中で、科学技術への懸念も増大。AI、ゲノム編集等の分野では ELSI の問題が顕在化しつつあり、GAFA の台頭により情報通信（ICT）技術が格差を助長しているとの疑念も発生。科学技術への期待と懸念がない交ぜになる中で科学技術の発展を是とする価値観が新たに問われつつある。これに対し、研究コミュニティが多様なステークホルダーとの対話を通じて、科学技術による利益と不利益の不確実性を比較考量する議論がより重要になっている。 ● ICT 技術の急速な発達に伴って社会が大きく変わる中で、データ駆動型科学技術などにより科学技術自体の変革も進展。特にデータ駆動型科学技術が各研究分野に浸透しつつあることは探索速度の向上等、研究手法の高度化のみならず、研究者の発想の拡大にも寄与するなど質的な変革を引き起こしつつある。 ● より良い社会の実現に向け、科学技術研究におけるイノベーション指向が増大。あるべき社会像に向けて議論しながらの研究テーマ設定により、社会のステークホルダーの参画機会が増大（例：欧米では科学への参加を一般市民にまで広げるシチズンサイエンスが盛ん）。社会における価値観が変わる中で科学技術コミュニティによる研究開発への取り組み方も変化（例：人社連携）。また、国際関係が多極化し競争が激しくなる中で、技術安全保障も研究テーマ設定の重要な観点。AI/IoT、量子、バイオテクノロジーなどは世界的な競争分野となっており、さながら国家間の技術覇権争いの様相。情報伝達速度の飛躍的向上に伴い、オープンサイエンスに向けて研究情報の世界的流通が進むも、米中貿易摩擦等の影響で研究に必要な

	データの移転規制が進む可能性があり、相互理解の醸成により問題解決を図ることが重要。 ● 先端科学技術分野においては、自然界を要素還元的手法により解明する活動から、自然界に存在しないものを人為的・人工的に設計・制御し作製する活動が増加（例：ゲノム編集等による合成生物、機械学習する AI）。作製したものがシステムとして機能することが必要になることから、構成する諸要素を俯瞰し統合的に把握し、デザインすることの重要性が増大（例：ヒト細胞全体システムの把握、ナノ・マイクロ集積デバイス）。 ● 自然界を理解する研究は依然として重要であるとともに、自然界の一部のメカニズムに介入しようとする研究も徐々に進展（例：CO₂を大気から収集する研究）。 ● 近年、最先端研究機器の高度化・高額化、扱うデータ量の大規模化、高度な専門による分業化とハイスループット化が進む。その結果として、進歩に多額の資金と人員を要するタイプの先端科学技術分野が台頭する傾向にある（ビッグサイエンス化）。 ● 多様化・複雑化する現代の課題を前に、個々に発展してきた学問体系を越えて新分野に取り組むことや、複数分野の連携により新たな融合領域を生み出す流れが加速。トランスディシプリナリーやコンバージェンスを指向する研究プログラムが米国や EU 諸国、中国・韓国で強化。 ● ELSI が科学技術の推進上重要な要素として位置付けられている。社会との関係深化に伴い、人社連携の重要性が増大。 ● 人材は依然として科学技術の源泉。分野、組織、国境等の壁を越えて人材が流動し、グローバルな競争環境の中で国籍、性別を問わず多様な人材が育成されることが科学技術イノベーションを牽引。 ● 科学技術イノベーション政策と他の政策との統合、連携の重要性が増大。また、人材育成、産学連携等の個々の科学技術システムが相互に関連することで機能。例えば研究成果を社会実装するための橋渡し機能においては、官民の連携、支援人材育成、知財管理等の複数の要素が連関しており、イノベーションエコシステムとして総体的に捉えることが重要になっている。
日 本 の 位 置 付 け	● 我が国はより良い未来社会の実現に向け、科学技術イノベーションに戦略的に取り組み。科学技術が社会に深く浸透しつつある状況の中で、未来社会として「超スマート社会＝Society 5.0」の実現を目標として設定。Society 5.0 と密接に関連する SDGs についても産学官等の研究開発活動を通じて貢献。 ● イノベーションを指向した研究開発としては AI 技術、バイオテクノロジー

	一、環境エネルギー等が特に取組を強化すべき分野として位置付け。 ● 研究開発投資と論文動向に関する指標では、米国と中国が世界を大きくリード。日本はいずれも停滞が続く。また、グローバルな頭脳循環に遅れている。日本の相対的地位が低下していることが懸念されており、我が国の研究力強化は喫緊の課題。 ● しかし個々の分野で見れば、重工業や電子製品製造など向けの産業用ロボット、Factory Automation システム、電気自動車向けの蓄電池部材、炭素繊維強化プラスチック等の複合・高機能材料、半導体等の製造装置、幹細胞・再生医療、抗体医薬等の高分子医薬、火力発電技術等の分野で、我が国は依然として優位性を保持。 ● AI、ゲノム編集等に関しては ELSI に関する検討が進みつつあるも道半ば。ナノ材料の評価・制度に関する取組みは欧米に後れ。 ● 大規模データを分析しその結果により探索、思考を行う等の研究手法の革新、研究の高コスト化・大規模化・ハイスループット化等に向けた取り組みはあるが、依然として研究現場は縦割りの構造となっており、分野を横断し、基礎から出口までの研究開発の循環構造を回す、といった活動が進めにくい環境・構造。今後研究において世界を先導していくためには、研究手法のみならず研究土壌までもを変革することが不可欠。 ● 博士課程入学者が減少傾向にあり、人口減少・高齢化社会の進展とも相まって、我が国研究開発人材は構造的問題を抱える。特にデータ科学系研究人材の育成は急務。また、拠点形成型プログラム等においてイノベーションエコシステムの構築に向けた取組がなされてきているが道半ば。
日本の挑戦課題	● 我が国が世界の主要国と伍していくだけの研究開発力を得ることが全体としての挑戦課題。 ● その上で、世界の潮流や社会ニーズ、我が国が置かれた状況を踏まえ、研究開発において取り組むべき課題としては、①IT を徹底活用した社会システム・産業構造の変革、②次世代 AI や量子科学技術等の先端分野の開拓、③再生可能エネルギー大規模導入時代に対応するエネルギー基盤の確立、④プラスチックごみ等の人工物による環境や社会への影響把握や資源循環の革新、⑤個別化・層別化医療の実現、⑥IoT/AI 時代をリードする技術基盤の構築、⑦新素材・デバイス・プロセス開発力の強化、⑧分子・細胞・組織・器官等における生命システムの解明・活用等が挙げられる。 ● また、研究者の自由な発想に基づく基礎研究への支援、計測や加工技術、セキュリティ等技術基盤への投資を持続していくことが課題。 ● 博士課程学生を含む若手研究者を分野、組織、国境等の壁を越えた流動の

	中で競争力ある研究人材として育成していくことは特に重要な課題。 ● 研究開発効率を最大化するプラットフォームの構築に加え、知の創出と研究成果の社会実装の循環を促進するイノベーションエコシステムの構築が課題。イノベーションエコシステムには人材育成、官民連携、知財管理などの仕組みから、若手人材を惹き付ける自由な研究環境、異分野研究者間の連携・協力を促進する雰囲気などの風土のようなものまで様々な要素が含まれ得る。 ● 科学技術と社会との関係深化が進み、AI、ゲノム編集等において倫理的問題が顕在化する中、ELSIに係る取り組みを研究開発の検討段階から社会における利活用の段階まで仕組みとして強化すること、またその際、人文・社会科学と理工学との相互発展的な連携が課題。
--	---

2.2 分野別俯瞰の概要

2.2.1 環境・エネルギー分野

項目	内容
世界の潮流	● 化石資源利用関連技術が座礁資産化するリスクへの懸念から、脱化石燃料化は引き続き世界的な潮流。ESG 投資への取組みを表明する機関投資家が増加しており、あらゆる業種が価値観の変化を迫られている。 ● 再生可能エネルギーの導入拡大が進み、過去 5 年間で発電コストの世界平均は太陽光発電で約 65%、陸上風力発電で約 15%減少。 ● 気候変動についての科学的根拠の整備は引き続き進んでいる。それによると世界の温室効果ガス排出量は現在も増加を続けており、2017 年の人為起源 CO₂ 排出量は約 326 億 t。地球上の平均気温上昇を 2℃未満に抑えるにはこれまで以上の積極的な排出削減努力が必要との認識が主流であるが、米国トランプ政権はこの認識を共有しておらず引き続き状況を注視する必要がある。 ● 海洋プラスチックごみ問題も国際的に議論や各種の動きが活発化。SDGs の海洋保全（目標 14）と持続可能な生産消費形態確保（目標 12）に強く関連。 ● 技術潮流としては、横断的に見られるのは気候変動を始めとする地球環境と人間社会の持続可能性への対応、およびビッグデータ化やスマート化への対応（利用可能になる膨大なデータの高度活用）。 ● エネルギー分野では、安価かつ大量に貯めることが難しく、また変動性が高い再生可能エネルギー由来の電気を変換・貯蔵し、必要な場所やタイミングで利用するための技術についての研究開発が盛ん。特に化学的なエネルギーの活用は活発。蓄電、蓄熱、代替燃料や化学品等の炭化水素合成、CO₂利用（Carbon dioxide Capture and Utilization）等を目指した研究開発が進展中。再生可能エネルギーの導入拡大に伴いエネルギー需給の安定性に関する懸念が顕在化。これを受けて従来の火力や原子力といった大規模発電では電力系統のレジリエンス性向上が新たな課題になっている。再生可能エネルギー自体は主力電源化の実現に向けて予測、蓄エネルギー、最適制御等に係る研究開発が課題になっている。 ● 環境分野では、様々なスケールでの地球観測ニーズが依然として高く、観測技術並びにデータ解析技術が継続的に進展。IoT/AI の隆盛から環境ビッグデータの高度活用への取組みも盛ん。気候変動の影響評価は地域レベルの防災・減災対策等への活用を目指してダウンスケーリングが進展。海洋プラスチックごみ問題への対応では、汚染状況の把握、ヒトや自然環境に対する影響評価等で調査研究ニーズが高まる。

日本 の 位 置 付 け	● 低いエネルギー自給率（8.3%）を前提に、如何にして温室効果ガス排出の大幅削減を達成しつつ、エネルギーの 3E+S（安定供給性、経済効率性、環境への負荷低減、安全性）の同時達成を追求できるかが重要課題。また関連産業の競争力強化や、海洋プラスチックごみ問題を始めとした環境問題への取組みにおける世界との協調等への取組みも重要課題。 ● エネルギー分野では、火力、原子力といった従来から強みのある分野は世界的な優位性をどうにか保持。再生可能エネルギー分野は研究の蓄積はあるものの、政策、法規制、地理的条件等の様々な制約もあり、基礎研究の成果が応用・開発、社会実装へと繋がる力強い流れは見えにくい。電力系統の安定化や ICT を活用したサービス開発の研究開発等、エネルギーマネジメント分野の研究が盛ん。化学分野も脱化石燃料化や CO₂ 排出削減の観点から基礎研究並びに応用・開発への取組みが産学官で活発。 ● 環境分野では、観測系の分野はとりわけ水の分野で欧米に匹敵。気候変動適応関連では地球システムモデルの開発とその成果活用が政策支援の下で異分野連携により進む。一方で社会と生態系の一体的な評価やガバナンスの研究は他国に比して遅れ。汚染除去関連で自動車排気後処理技術に関して世界トップ水準の研究を展開。しかし環境影響の総合評価、データベース構築、システム開発等では欧米から遅れ。 ● 研究コミュニティに関しては全体的に研究開発の国際競争力低下が顕在化。特に工学系の基盤的な分野では公的支援も明確でなく状況は深刻。
日本 の 挑 戦 課 題	● 引き続き社会からの要請に応える研究開発を進めることが必要。そのためには中長期的観点から大きな方向性を示し、それに向かう研究開発を、全体バランスを考慮しながら推進することが重要。またその推進にあたっては俯瞰的な視野を持った政策的リーダーシップの重要性がこれまで以上に大きい。 ● 今後の方向性として重要なキーワードは以下に示す 5 つ ① ゼロエミッション（Zero-Emission） 重要課題：回収 CO₂ を用いた合成炭化水素研究 ② アダプテーション（Adaptation） 重要課題：異常気象への温暖化の影響解明、異常気象による災害への対応策 ③ サーキュラー（Circular） 重要課題：マイクロプラスチックの動態解明・リスク評価・社会科学的/行動科学的方策、水循環・水利用 ④ スマート（Smart） 重要課題：エネルギーネットワーク・需要科学、再生可能エネルギー

	最適制御、データ基盤構築 ⑤ セーフティ (Safety) 重要課題：地震、エネルギー安全保障、原子力発電と安全・安心 であり、その総称は、英語表記の頭文字を並べて「ZACSS」（ザックス）。
--	---

2.2.2 システム・情報科学技術分野

項目	内容
世 界 の 潮 流	● 「スマート化」「システム化・複雑化」「ソフトウェア化・サービス化」が大きな技術トレンド。GAFA と呼ばれる Google、Apple、Facebook、Amazon など大手インターネット関連企業が世界の市場と技術開発をリード（中国を除く）。中国では盛んな研究開発投資と巨大データ集積による AI 実用化が急速に進展。 ● 人工知能（AI）は、技術自体が急激に進化。意思決定の際に考慮すべき要因・影響の膨大さや複雑さは、人間が思考できるレベルを超越。医療診断や自動運転を含む様々な AI 応用システムで、人間を上回る精度や高度プロセスの自動化が進展。機械学習を含むシステムはブラックボックスで、偏見学習、誤認識誘発攻撃等の問題が発生。ロボティクスにおいては、物理的な柔軟性（ソフトネス）を取り扱う分野が進展し、生物規範型ロボットの分野は急速に進展。 ● 人工知能や知的ロボットなど知的情報処理技術の研究開発が進展し、実社会への適用が次々と実現することに対して、倫理的・法的・社会的（ELSI: Ethical, Legal, and Social Issues） な視点での考慮が不可欠。 ● コンピューティングアーキテクチャは、データセンター、インターネットさらにモバイルネットワークによりその適用領域、連携が拡大。コンピューティングの対象も、数値データから多様なメディアに拡大。ブロックチェーンや量子コンピューターに期待が集まる。 ● 企業における情報技術の利活用を「デジタル・トランスフォーメーション」と呼び、業務プロセスや働き方、ビジネス連携などの改革を進める動きが活発化。FinTech（金融市場）、EdTech（教育市場）、AdTech（広告市場）、MedTech（医療市場）、RetailTech（小売市場） など「xTech」と呼ばれる業界を情報技術で大きく変革しようとする流れ。 ● 既存の社会システムは世の中の動向（人口動態変化、技術進歩、グローバル化、新興企業の台頭等）に追従できていない状況。Airbnb、Uber 等によるシェアリング・エコノミーなどの新たな産業の創出による労働や税などの問題に対し、制度的な対応が必要。 ● 個人情報や GAFA 等のプラットフォーム事業者に蓄積されており、欧州では、GDPR（General Data Protection Regulation: EU 一般データ保護規則） が開始され、プライバシー保護に向けた動きが活発化。 ● 米国は、質の高い STEM（Science, Technology, Engineering and Mathematics） およびコンピューターサイエンス教育の推進を重点化。

日 本 の 位 置 付 け	● 我が国のシステム・情報科学技術産業においては、産業用ロボット、FA システム、スーパーコンピューター、生体認証などの個別技術に強み。 ● しかし、かつての半導体や通信機器のようにグローバルな市場で圧倒的な強みを持ち、ビジネス展開していたような状況にはない。AI や IoT に関しては一部に強みはあるものの、産業として大きな国際的競争力を有するまでは至らず。新たなビジネスモデルの構築や新産業創出に弱み。 ● これまでユーザであった自動車産業や素材産業、サービス産業などが、デジタルトランスフォーメーションの流れや製品・サービスの進化のためにシステム・情報科学技術の研究開発、ビジネス化に取り組む。海外の技術の取り込みも盛ん。 ● データ利用のための政府方針として、統合イノベーション戦略では「Society 5.0 実現に向けたデータ連携基盤の整備」が掲げられ、法整備の面では、改正個人情報保護法により匿名加工情報の定義が明確になり、医療データについては、次世代医療基盤法も整備され、データ活用に期待。 ● また人間中心の AI 社会原則会議は Society 5.0 の実現に向け、AI の適切で積極的な社会実装を推進するために、AI 倫理に係る我が国の原則として、「人間中心の AI 社会原則」を策定。
日 本 の 挑 戦 課 題	● 日本が国際競争力を構築・維持していくため、また、国として自立した安全安心な社会を維持していくための研究開発投資戦略としての基本的な考え方は、①強い技術を核とした骨太化、②強い産業の発展・革新の推進、③社会課題の先行解決、④社会基盤を支える根幹技術確保の 4 つ。 ● 4 つの基本的な考え方に基づく我が国が推進すべき 20 の重点テーマ (1) 意思決定・合意形成（①技術、④基盤） (2) AI ソフトウェア工学（①技術、③社会） (3) 計算脳科学（①技術） (4) 統合 AI（①技術） (5) 自律・認知発達ロボティクス（③社会） (6) 生物規範型ロボティクス（②産業） (7) 人間・機械共生（①技術、③社会） (8) ビッグデータに基づく問題解決（③社会） (9) Society デジタルツイン（③社会） (10) 社会システムデザイン（④基盤） (11) RegTech（④基盤） (12) サイバーフィジカルセキュリティ（④基盤） (13) サービスプラットフォーム（③社会、④基盤）

	(14) ブロックチェーン (②産業、③社会)
	(15) データセンタースケールコンピューティング (④基盤)
	(16) 非フォンノイマンプロセッサアーキテクチャ (①技術)
	(17) 量子コンピューターサイエンス (②産業、④基盤)
	(18) リアルタイムシステム (②産業、④基盤)
	(19) データ流通・共有基盤 (④基盤)
	(20) 数学 (①技術)

2.2.3 ナノテクノロジー・材料分野

項目	内容
世 界 の 潮 流	● 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、約 20 年が経過。この間、ナノテクノロジーは技術の先鋭化、融合化、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・市場浸透が進展。 ● いよいよ全盛を迎えつつある IoT/AI 時代を牽引する多様なデバイス群を実現するのがナノテクノロジー・材料技術。エッジ/クラウド、IoT センサデバイス、自動運転、ロボット、ポスト 5G/モバイル、診断・治療・計測デバイスなど、ハード側はナノテクノロジー・材料技術が競争を左右。 ● SDGs を技術ベースで支えるのもナノテクノロジー・材料技術。水・大気浄化、温室効果ガス排出削減、資源循環、エネルギー関連デバイスなど、素材としての性能だけではなく、プロセス・エネルギーコストや環境影響まで含めた研究開発を行うことが重要。 ● 情報科学技術の進歩とコンピュータの能力向上によって、データ駆動型材料開発（マテリアルズ・インフォマティクス）が全ての材料開発の基盤技術として定着。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）への挑戦が始動。 ● ナノテクノロジーによって実現される製品（nano-enabled products）が社会に浸透するにつれ、製品の輸送、保管、販売、使用、さらには使用済製品の廃棄やリサイクルなど、製品のライフサイクル全体を対象とした、ヒトや環境への影響を明らかにする研究（ELSI、EHS 含む）への関心が増大。既に欧米を中心に、国・地域単位での規制・制度が顕在化。
日 本 の 位 置 付 け	● 米中台頭の中、我が国の生命線である輸出の約 9 割を工業製品が占めており、部品・素材のウェイトが増大。 ● 我が国は長年の技術蓄積に基づき、元素戦略、分子技術、蓄電池部材、電子材料、パワー半導体、複合材料などの物質創製・材料設計に強み。物質創製・材料設計に用いられる計測評価・分析・品質管理にも強み。これらが活きる形で省エネ・低環境負荷技術に優位性。IoT 時代に重要となるセンサ/アナログ機能やコンピューティング機能のヘテロ集積モジュール化にもポテンシャルを保有。 ● 一方、データ科学、標準化・規制戦略、医工連携、産学連携に課題。 ● ナノ材料の安全性研究やリスク評価の体制が欧米に比較して脆弱。国際的なコミュニケーションを具備するエキスパート人材も不足。

日 本 の 挑 戦 課 題	● 本分野の研究開発を進めるにあたって、 ➤ 科学技術研究の量的競争では不利な中、官民の「研究開発投資効率最大化」の実現 ➤ 異分野融合／深みのある研究開発と水平／垂直連携の両立 ➤ 府省連携・産学連携／時間ギャップを考慮した研究開発フェーズへのスムーズな移行 ➤ 複数の分野（材料科学と情報科学など）に跨がる人材の育成を図ることが非常に重要。 ● 上記を踏まえた上で、取り組むべき 6 つの社会ニーズと 10 の挑戦課題（グランドチャレンジ）は以下のとおり。 【快適・安全・安心な社会へ】 ➤ 社会ニーズ ① 安全・低環境負荷の交通・輸送 ② 安全・快適社会実現へ向けた IoT/AI チップ・量子デバイス ➤ グランドチャレンジ - i 量子状態の高度制御 - ii トランススケール力学制御 - iii センサフュージョン 【最適な医療・ヘルスケアへ】 ➤ 社会ニーズ ③ ウェアラブル健康・医療モニタリング ④ 人と共生するサービスロボット ➤ グランドチャレンジ - iv ナノ・メカ・IT・バイオ統合マニファクチャリング - v バイオアダプティブ材料設計 - vi IoT デバイス集積 【持続可能な社会へ】 ➤ 社会ニーズ ⑤ 水・大気・鉱物の資源循環を可能にするスマート材料 ⑥ 省/創/蓄エネルギーのための先端材料・デバイス ➤ グランドチャレンジ - vii サステイナブル元素戦略 - viii 分離技術 - ix 多機能・複雑系の材料設計 【上記すべての基盤となる技術】 - x オペランド計測・プロセス統合ものづくり
------------------------------	---

2.2.4 ライフサイエンス・臨床医学分野

項目	内容
世界の潮流	● 「より多くの人に、より質の高い医療サービスを、より安価に提供する」こと、「より多くの人が、より質の高い食料を安定して入手できる」ことは世界での喫緊の課題。 ● 本分野の研究開発領域の全体を見て、この2～3年の大きな技術・研究の変化、進展を以下のとおり分析。 ➢ 一細胞オミックス技術の隆盛と細胞社会・不均一性の理解や疾患の理解が進展。 ➢ クライオ電顕、超解像顕微鏡・光シート顕微鏡等イメージング技術の発展による各生体スケールの解像度が向上。 ➢ ゲノム編集技術の精度の向上による医療、食料応用への展開。 ➢ 計測技術やAI・機械学習等をはじめとする急速に発展するICT技術が、自動化、大規模化等を通じて、生命科学、臨床へ着実に浸透。 ➢ タンパク質間相互作用を阻害することによる薬効など新しい創薬等アプローチが出現。 ● 個別化・層別化医療、ゲノム医療・創薬およびバイオエコノミー等、社会の中に存在する多種多様なデータ活用を要するとともに、社会・国民の理解が必要な研究開発が引き続き大きな潮流。 ● 「仮説検証型」のアプローチに加え、大量の生命情報から法則を発見するという「データ駆動型」の新しいアプローチによる生命現象の理解が進展。これにより「精緻な理解」と「予測」が基本的な方向性。 ● サイエンスの流れとしては、これまで生体の多くの個別の遺伝子やタンパク質が同定されてきたが、その生体内での相関や時空間的挙動（ダイナミクス）はほとんど記述できていない。今後「多次元生命システムにおける時空間階層のブリッジング」を目指した相関、ダイナミクス、予測に研究が進むのは自然の流れ。 ● 近年では、研究者あるいは研究コミュニティが、研究対象として、研究開発の循環構造、生命の時空間階層を広く見る必要が出てきたこと、および技術進展サイクルの短縮化の結果、研究単位当たりのハイスループット化、高コスト化、つまり「ビッグサイエンス化」が急速に進展。これに伴い、実験デザインやデータマネジメントの重要性が増大。
日本の位置付け	● 日本は世界に先駆けて少子高齢化が進み、「健康寿命の延伸」が大きなキーワード。社会保障費の増加による国の財政の圧迫、労働人口の減少や介護等による労働力の低下といった問題が顕在化。新しい科学技術を用いた薬価の高騰による医療経済の問題もある。

	● 食料需給の視点では、日本は 2015 年の段階で、世界第 6 位の農産物の輸入国（金額ベース）であるが、農林水産物の輸出額は右肩上がりに増大。 ● 2.6 の国際ベンチマークからは、日本は「構造解析」、「細胞外微粒子」、「免疫科学」、「時間科学」、「脳神経科学」、「光学イメージング」、「核磁気イメージング」、「植物科学」、「畜産科学」、「高分子医薬」、「幹細胞・再生医療」、「オルガノイド」、「生活習慣病」、「精神・神経疾患」等における基礎研究に強み。また、「細胞外微粒子」、「水産、機能性食品」、「高分子医薬」、「幹細胞・再生医療」、「精神神経疾患」等における応用研究に強み。 ● 一方で、「遺伝子・細胞治療」や「がんゲノム医療」等、世界の大きな潮流となっている領域で後塵を拝する。 ● 論文動向を見ると、生命科学や臨床医学においても日本はこの 10 年で他の国に比べ増加率が低く、ドイツ、英国に抜かれる等相対的に順位を下げている。特に、新興・融合分野である X オーム・オミックス分野・インフォマティクス分野での劣後が顕著。 ● 日本のアカデミアは分散化・たこつぼ化が進み、世界の潮流となっている研究開発の循環構造を回す、生命の時空間階層をつないでいく、といった研究が進めにくい環境・構造。 ● ゲノム医療やゲノム編集活用作物・水畜産物、合成生物学などをイノベーションにつなげるための ELSI 研究が不足。
日本の挑戦課題	● 世界の研究開発の動向、世界の政策、日本のこれまでの政策、日本の強み・弱みを俯瞰した上で、今後国として手を打つべきテーマについて、9 つを抽出。 ➢ 「“ヒト研究”および“データ研究”の戦略的な加速（Integration of Bio-Medical Things）」 ➢ 「治療用人工細胞創出に向けた基盤技術開発と医療応用」 ➢ 「圃場の微生物・作物・環境をつなぐ物質循環の解明～真に地球環境にやさしい農業～」 ➢ 「高品質水畜産物の高速・持続可能な生産に向けた品種改良、飼育養殖手法開発」 ➢ 「機能性農産物の創出と植物による高付加価値物質生産」 ➢ 「医薬・化成品など有用物質の持続可能な生産に向けた生体分子、生命システム設計ルール解明 ～核酸、タンパク質、細胞を結ぶ、多階層横断的サイエンス推進～」 ➢ 多次元解析で紐解く生命システムのダイナミクス～オミクス×イメージング×データ・モデリングによる基盤技術の創成～ ➢ 理論的・実験的（生物学的）アプローチの融合による脳の動作原理の

	理解 ➤ アトミックセルダイナミクス～構造・機能相関予測のための細胞知の統合～ ● 研究のパラダイム変化に対応した、データ・情報統合的な研究の推進が可能な研究体制の拠点化とそのネットワーク化による研究プラットフォームの構築が必要であり、下記を意識した政策、研究環境の構築必要。 ・研究者が研究に専念できる環境構築 ・機器共用による全体コスト効率化 ・若手研究人材のスタートアップ環境整備 ・異分野融合による新しいサイエンスの創出 ・Wet/Dry 統合と人材育成 ・データマネジメントと計測技術等の標準化 ・マウスからヒトへ、ラボからフィールドへ（人材育成と研究） ・異分野（生命科学・工学・情報学・医学）の統合や産学連携による基礎研究からイノベーションまでのコスト・時間短縮 ・社会科学者や法学者等の参画による ELSI の推進
--	---

研究開発の俯瞰報告書 概要

社会の要請・ビジョン

持続可能な豊かな社会

■ 人間活動による影響を自然のメカニズムが許容可能なレベルに抑えつつ持続的な社会の発展を実現。

循環型経済

■ 循環型社会形成に向けた新たなイニシアチブ

SDGs

■ 水、生産と消費、エネルギーアクセス、気候変動、海洋、陸上生態系、まちづくり、産業・技術革新、持続可能な経済成長

パリ協定

■ 世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力を追求。
■ 日本の約束草案：2030年度までに2013年度比▲26.0%。

環境・エネルギー分野（2019年）

研究開発動向

エネルギーシステム、エネルギー利用

[研究開発領域：1, 9, 10, 15]

電化推進と変動電源拡大を受け、エネルギー製造・貯蔵/運搬・利用に関する検討が活発だが、エネルギーシステム全体を統合的に考える視点が不足。エネルギーフローの双方向化によりICTを活用した需給連携がますます重要に。

日本の現状➡エネルギーマネジメント分野で電力系統の安定化や新技術を活用したサービス開発のための研究等が盛り上がりを見せている。

集中電源、大規模発電

[研究開発領域：2, 4, 13, 14]

北海道におけるブラックアウトを受け、電力系統のレジリエンス性向上が新たな重要課題として認識されつつある。

日本の現状➡火力、原子力など日本が基礎及び応用・開発とも優位性を持つ分野の基礎技術の弱体化が懸念される。今後どのように研究開発を進めていくか岐路に立たされている。

化学的エネルギーの活用

[研究開発領域：3, 7, 10, 11, 12]

再生可能エネルギーの貯蔵/運搬・利用のための技術開発（蓄電、蓄熱、Power to X：炭化水素合成、CCU）が活発。

日本の現状➡化学分野は活発化しており、脱炭素燃料化やCO₂排出削減の観点から基礎研究並びに応用・開発が産学官で活発に取り組まれている。

分散電源、再生可能エネルギー

[研究開発領域：5, 6, 8]

世界各国の変動・分散型再生可能エネルギーの競争力が向上。一方で導入拡大によるエネルギーネットワークへの影響が顕在化（例：太陽光の出力制御）。予測技術の活用、蓄エネルギー、最適制御等に係る研究開発が課題に。

日本の現状➡それぞれに研究の蓄積はあるものの、基礎研究の成果が応用・開発、社会実装へと繋がっていく力強い流れは見えない。但しこうした状況には政策、法規制、地理的条件等、社会的要因や環境面の制約も大きい。

主要国の動向

米国

国家安全保障及び国内産業の保護・強化を第一優先としエネルギー分野は全方位的に研究開発を推進。気候変動対応は政策的には消極的だがアカデミア及び民間で気運を継続。

EU及び英仏独

気候変動対応でイニシアチブをとるが各国の進捗は必ずしも順調ではない状況。脱炭素燃料化を狙う研究開発は活発に推進。循環型経済も主導。

中国

豊富な資金と人的資源を背景に全方位的に研究開発を推進。政策的な後押しで市場創出も急速に進む。

環境観測

[研究開発領域：16, 18, 20]

観測技術・データ解析技術ともに研究開発が継続的に進展。IoT/AIの隆盛を受け環境ビッグデータの高度活用のための研究開発が活発化。

日本の現状➡雨量観測の高精度化、中小河川の流量予測、全球レベルの水循環や気候変動適応策の研究等、水分野で高水準の研究開発が進行。海洋観測でも国際的に重要な貢献を果たす。課題は広域のデータ統合・解析や解析に基づく大規模実証研究等の不足。気候変動観測衛星の戦略立案も停滞気味。

気候変動適応

[研究開発領域：17, 21, 26]

気候変動の影響評価のダウンスケーリングが建物レベルにまで進展（例：ヒートアイランドとの一体評価）。極端現象への温暖化の寄与を明らかにする研究（イベントアトリビューション）も活発化。

日本の現状➡地球システムモデル（ESM）の開発とその成果の活用が政策的支援の下で異分野連携によって進みつつある。一方で社会・生態系の一体的評価や、そのガバナンスに関する研究では他国に比べ遅れている。

環境分析・汚染除去/浄化・リサイクル

[研究開発領域：19, 22, 23, 24, 25]

海洋プラスチックごみ問題対応が世界的に活発化。ヒトや自然環境への影響の評価のニーズが高まる。代替材料開発の議論も再燃。

日本の現状➡水処理や汚染物質の除去・浄化分野では個々に研究が進んでいる。水インフラの老朽化及び地方自治体の体力低下は社会的に深刻な問題。自動車排気後処理技術は世界トップ水準の研究が展開されている。

日本の現状・トレンド※2

研究開発領域	基礎	応用・開発
1.エネルギー資源探査・開発技術	○→	○↗
2.火力発電	○→	◎→
3.CCU	◎↗	◎↗
4.原子力利用	○→	○→
5.太陽光発電・太陽熱発電	○→	○→
6.風力発電	△↗	△→
7.バイオマス利用	○↗	△→
8.その他の再生可能エネルギー	○↗	○↗
9.電気エネルギー利用	○→	◎↗
10.熱エネルギー利用	◎↗	○→
11.化学エネルギー利用	○↗	◎↗
12.基礎化学品合成プロセス	◎↗	△→
13.燃焼	◎→	○→
14.トライボロジー	◎↗	◎↗
15.エネルギーシステム評価	○↗	○→
16.気候変動観測	○→	○→
17.気候変動予測	◎→	○↗
18.水循環	◎→	○↗
19.水処理	○→	○→
20.生物多様性・生態系の把握	○→	○→
21.生物多様性・生態系の管理・活用	○→	○→
22.環境分析・物質動態	○→	○→
23.除去・浄化技術	◎→	◎→
24.資源・生産・消費管理	○→	○→
25.リサイクルと循環利用	△→	○↗
26.健康・都市生活	○↗	○↗

社会・経済の動向

人口、石油需給

■ 世界人口は76億人（2017年）から90億人超（2050年）に
■ 石油需要予想は約0.7～1.2億バレル/日、予想価格約64～137ドル/バレル（2040年）※1

CO₂排出量推移

■ 現在も増加を続けており2017年の人為起源CO₂排出量は約326億t ※1

ESG投資

■ 国連のイニシアチブ責任投資原則（PRI）への署名機関の増大。
■ ネガティブ・排除型スクリーニングによる投資引き揚げが化石資源利用関連技術に影響。

海洋プラスチックごみ問題

■ EU循環型経済政策、中国プラスチックごみ輸入規制。

科学技術の潮流

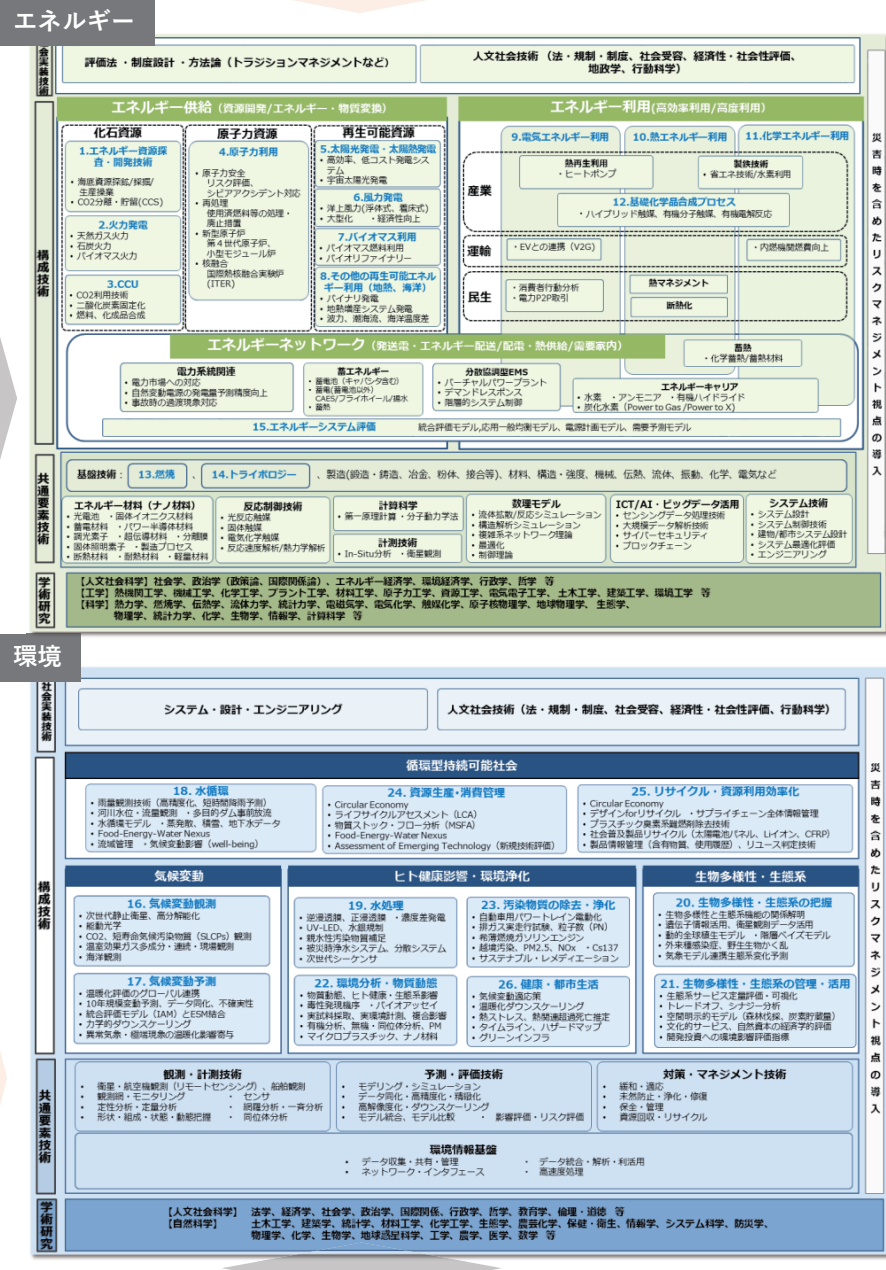
■ 気候変動への対応：緩和策と適応策。

■ 循環型社会形成：End of Pipe型に加え低環境負荷型の生産システムの構築を目指すCleaner Production型。

■ デジタルエコノミー：IoT/AIの隆盛を背景にしたビッグデータ活用、スマート化の流れ。

■ 規制開発：大気汚染物質の排出規制などに対応するための技術開発の進展。

俯瞰図



国内の研究開発コミュニティの状況

- 研究活動は米国、中国の勢いに押され、論文数では軒並み順位を落とす。
- 少子高齢化により国内の関連学協会会員数は概ね減少傾向、コミュニティが縮小化している。
- 理工系の大学院入学者数は年々減少しており、母数のかい工学系は減少幅も大きい。
- 工学系の基礎基礎研究や環境観測等の観測インフラへの公的支援が不安定で研究基盤の弱体化が懸念されている。

※1 国際エネルギー機関
※2 一部の研究開発領域について、本文中では複数の中項目を設け、その単位ごとに評価している。本表ではCRDSの判断に基づき領域単位に統合した結果のみ記載した。評価にあたり参考とした根拠等の詳細については本文を参照。

2.3 環境・エネルギー分野

世界が憂慮するグローバルリスクは幾つかあるが、その中で昨今は、異常気象、自然災害、気候変動緩和や適応への失敗といった環境・エネルギーに関わる項目が上位を占めている。化石資源由来の CO₂をはじめとする温室効果ガス（GHG）の排出により引き起こされる地球温暖化は、既に各地で影響を顕在化させつつある。また温暖化のみならず人間活動に伴ってもたらされる様々な環境負荷や資源消費の増大への懸念も依然増している。

世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2°C より低く保つためには、将来的に GHG の累積排出量に許容可能な上限が出てくるとの考え方がある。仮にそうなった場合、上限を超える化石資源は開発しても使えない資産になりうる。原油価格の中長期的な推移の予測には地政学的なリスクもあり不確実性が極めて大きい。将来的に化石資源利用関連技術が座礁資産化するリスクを踏まえると、今後、社会は脱化石資源依存の方向性を強め、新たなエネルギーシステムへの移行を一層進める可能性は十分にある。

こうした流れの中にあって、各国・地域は国際的な協調の形を模索しながら国連の持続可能な開発目標（SDGs）やパリ協定に協力して取り組み、同時に自国の発展のための安全、安定、かつ経済的なエネルギーシステムの構築や、環境の保全及び持続可能な管理・活用に取り組んでいる。またそうした国・地域は社会的な課題を解決しうる技術への投資を活発化させ、各種規制やルールの変更とも組み合わせつつ、研究開発とその成果の社会実装を促進し、産業競争力強化につなげるための技術開発を強化している。

このような社会の潮流は研究開発にも影響を及ぼしている。再生可能エネルギーの導入拡大、電力ネットワークの最適制御、再生可能エネルギー由来の電力や熱の貯蔵・輸送・利用、地球環境のあらゆるスケールでの観測・予測、温暖化影響の予測・評価、有用資源・汚染物質等の動態解明や持続的な利用等、多岐にわたる各種技術やシステムの研究開発及びその社会実装に向けた取り組みが、社会の要請に応える形で進められている。

他方、技術の側からも研究開発に影響を及ぼす潮流がある。それはデジタル化、スマート化の流れがより一層強くなっている点である。IoT や各種センサー等の技術がより高度に使えるようになってきたことにより、得られるデータが膨大になり、それらを AI や統計的解析を通じて新たな知識や情報へと変換できる機会が格段に増えてきている。そのためこれらを新たな知の発見や従来の技術やシステムの効率性や信頼性の向上等へとつなげるべく取り入れる試みが活発化している。

このような潮流を踏まえて実施した環境・エネルギー分野の研究開発動向の俯瞰概要を次頁以降に示す。

研究開発領域群*	研究開発動向からのハイライト
エネルギーシステム、 エネルギー利用	● 電化推進と変動電源拡大の流れの中でエネルギー製造・貯蔵/運搬・利用に関する検討が活発化。一方でエネルギーシステム全体を統合的に考える視点の必要性が指摘されている。その他、エネルギーフローの双方向化により ICT を活用した消費側との連携の重要性も増大。
集中電源、 大規模発電	● 北海道におけるブラックアウトを受け、電力システムのレジリエンス性向上が新たな重要課題に。
化学的エネルギーの活用	● 再エネの貯蔵・輸送・利用のための技術開発（蓄電、蓄熱、Power to X, CCU）が活発。
分散電源、 再生可能エネルギー	● 世界的に変動・分散型再生可能エネルギーの競争力が向上。一方で導入拡大によるエネルギーネットワークへの影響が顕在化（例：九州における太陽光の出力制御）。主力電源化を実現するための予測技術の活用、蓄エネルギー、最適制御等に係る研究開発が課題に。
環境観測	● 観測ニーズは高く、観測技術並びにデータ解析技術ともに研究開発が継続的に進展。IoT/AI の隆盛もあり環境ビッグデータの高度活用のための研究開発が活発化。
気候変動適応	● 気候変動の影響評価のダウンスケーリングが建物レベルにまで進展（例：ヒートアイランドとの一体評価） ● 極端現象への温暖化の寄与を明らかにする研究（イベントアトリビューション）が活発化。
環境分析・汚染除去/浄化・ リサイクル	● 海洋プラスチックごみ問題対応が世界的に活発化。ヒトや自然環境への影響の評価のニーズ高まる。代替物の議論も活発化。 ● 国内での水インフラの老朽化及び地方自治体の体力低下は深刻に。

*複数の研究開発領域をまとめたもの。その構成については研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野（2019 年）の本文 1.2.4 を参照。

昨今の環境・エネルギー分野の研究開発動向は上表の通りである。その中における我が国の状況を次に示す。

<エネルギー分野>

- 火力、原子力といった従来から日本に強みのある分野では基礎及び応用・開発において世界的にアドバンテージがある。しかし、昨今の国内外での社会的状況変化を受けて今後どのように研究開発を進めていくのか岐路に立たされている。また、それらを支える基盤技術の弱体化が始まっている。
- 再生可能エネルギー分野ではそれぞれに研究の蓄積はあるものの、基礎研究の成果が応用・開発へと進み、更に社会実装へとつながっていくといった力強い流れは見えにくい。但しこうした状況には政策、法規制、地理的条件等、社会的要因や環境面の制約も大きい。
- エネルギーマネジメント分野では、電力システムの安定化や新しい技術を活用したサービス開発のための研究等が盛り上がりを見せている。

- 化学分野は活発化しており、脱化石燃料化や CO₂ 排出削減の観点から、基礎研究並びに応用・開発が産学官で活発に取り組まれている。

<環境分野>

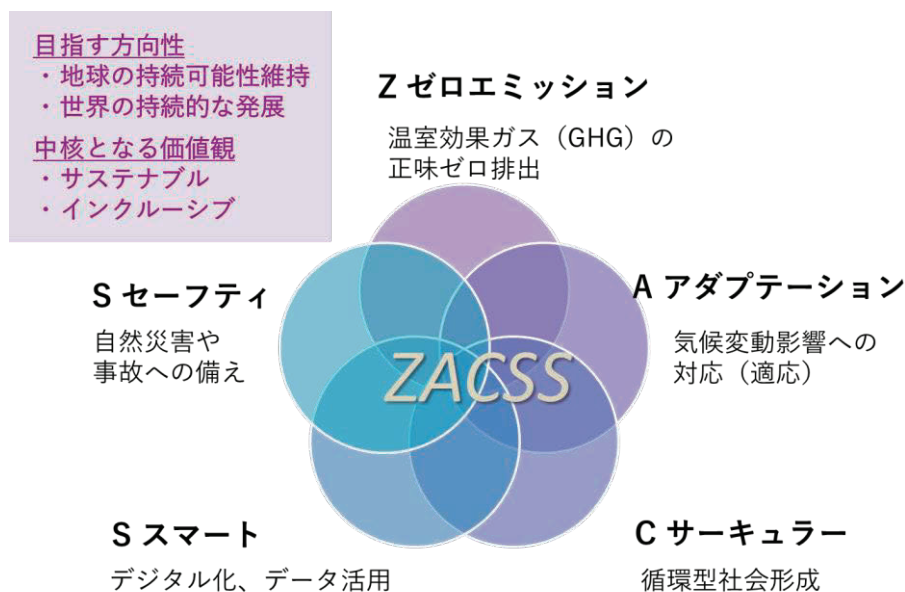
- 観測系の分野では雨量観測の高精度化や中小河川の流出予測、あるいは全球レベルの水循環や気候変動適応策の研究等、水の分野で欧米に匹敵する研究開発が進められている。また海洋観測でも国際的に重要な貢献をしている。しかし広域なデータ統合・解析、あるいは解析に基づく大規模実証研究等では遅れが見られる。気候変動観測衛星の戦略立案も停滞気味。
- 気候変動適応に関連する分野では地球システムモデル（ESM）の開発とその成果の活用が政策的支援の下で異分野連携によって進みつつある。一方で、社会と生態系を一体的に評価したり、そのガバナンスについて研究する取組みは他国に比して遅れている。
- 水処理や汚染物質の除去・浄化分野では個々に研究が進んでいる。自動車排気後処理技術は世界トップ水準の研究が展開されている。
- 環境分析や LCA、資源利用関連の分野において、企業ニーズに対応した研究は一部で活発に行われている反面、環境影響の総合評価、データベース構築、システム開発等では欧米と比べて遅れが見られる。

以上述べたように、我が国の環境・エネルギー分野の研究開発は着実に進められてきており、一部では世界的にトップ水準の取組みもある。しかしながら研究開発体制・システムに目を向けると、中国や欧米に匹敵することの厳しさが複数の領域で指摘されている。環境・エネルギー関連機器の開発・設計・製作・運用等に係る基礎基盤的な研究開発では、軍事と一体的に進める国とはナショナルレベルの研究開発体制が違い、また人員や資金の量的規模も異なるためである。加えて昨今は、これまで当該分野の研究開発を幅広く牽引してきた国内企業において、バブル崩壊後の経済低迷以降、基礎基盤的な研究を抱えきれなくなっている状況が続いていると言われる。そこで大学や公的研究機関への期待が高まるが、最先端科学研究や短期間での成果創出を求める技術開発の推進が重視される流れの中、とりわけ工学系の基礎基盤的な研究を戦略的に推進する機関や枠組みはほぼ見られない状況にある。更に日本社会全体の人口減少を背景にして、大学院進学者数の減少が続いており、大部分を占める工学系ではその減少幅も大きい。こうした状況から、我が国の産業を支える環境・エネルギー分野の研究力低下への危機感は年々強まっている。

環境・エネルギー分野において今後も引き続き社会からの要請に応える研究開発を進めていくためには、中長期的観点から大きな方向性を示し、それに向かう研究開発を全体バランスを考慮しながら推進していくことが必要である。またこれを実現するためには、科学技術の社会との関わり方の在り方への配慮や俯瞰的な視野を持った政策的リーダーシップの重要性がこれまで以上に増すと予想される。

今後の我が国における環境・エネルギー分野の研究開発の方向性として重要なキーワード

は5つある。それは、「ゼロエミッション」、「アダプテーション」、「サーキュラー」、「スマート」、「セーフティ」である。持続可能な社会の構築と発展に向け、持続可能性（サステナブル）と包摂性（インクルーシブ）を中心的な価値観として捉えた上で、これら5つを大きな方向性として掲げつつ研究開発を統合的に推進していくことが必要である。なおこれらの方向性は国際社会が目指す方向性とも概ね一致しており、自国における取組みと同時に国際的な協調も意識した対応が求められている。



以下にはキーワードごとの概説と研究開発との関連性を示す。

- 「ゼロエミッション」……最も中心的な目標の一つである。ここでいうゼロエミッションとは、人間活動に伴う大気中への CO₂ の放出を正味ゼロにするということを指す。CO₂ 排出の大幅削減が最も重要な課題になるが、より能動的に大気中の CO₂ を回収・貯留または利用しようとするアプローチも一部具体化しつつある。ネガティブエミッションとも呼ばれるが、こうした可能性も視野に入れた研究開発が必要になる。
- 「アダプテーション」……昨今その重要性がより一層増している。気候変動の影響が顕在化する中にあるのは、それらへの適応策を講じなければ社会は甚大な被害を受ける可能性がある。その一方で、社会そのものに変化を促すこととなるため、単に科学的知見を提示したり、何らかの技術やシステムを導入したりするということだけでは済まない面もある。社会と科学が一体的に検討を進めていくことが重要になる。
- 「サーキュラー」……ここでは循環型社会の形成を指す。昨今では海洋プラスチックごみの問題が国際社会の中でも極めて大きく取り上げられつつある。こうした社会からの要請に対して科学技術が応えるべき部分は大きい。例えばプラスチックの環境中での動態の解明や各種リスクの評価の他、持続的利用を実現する社会の構築に向けた技術・システムの研究開発が必要になる。

- 「スマート」……目標でありかつ手段でもある。IoT/AI の隆盛の中で、情報を如何に有効に活用するかという点は大きな課題となっている。また Society 5.0 に象徴されるように、人間社会をより創造的で効率的なものに発展させていくために、あらゆるデータを意味ある情報として活用できるような仕組みを構築していくことが求められている。
- 「セーフティ」……様々な意味での安全性を指す。日本社会は、その地理的特性上、常に自然災害による脅威の中で日々を過ごしている。加えて気候変動影響に伴う変化も今後は一層の考慮が必要になる。こうした各種の災害に対する対応力の強化は今後更に重要になってくる。また我が国は資源制約も大きい、エネルギー資源の大半を海外からの輸入に頼らざるを得ない中、エネルギー安全保障は国の生存基盤に関わる重要な課題である。

最後にこうした今後の方向性の下、当面取り組むべき重要課題の例をキーワードごとに以下に示す。

キーワード	展望および今後の重要課題例
ゼロエミッション	● 2℃目標達成のためのGHG排出の大幅削減に向け、その手段として脱化石燃料、及び再生可能エネルギー主流化が進展。 ⇒回収CO₂を用いた合成炭化水素研究 ● 従来の一方向的・大規模集中型のエネルギーシステムの中に双方向的・分散型の要素が広がる。 ⇒日本の社会システムとしてのエネルギーの研究（エネルギー構成、都市と地方）
アダプテーション	● 気候変動影響への適応がより重要に、影響予測の精度を高め、対策に繋げる。 ⇒温暖化に伴う異常気象による災害への対応（洪水・土砂災害） ⇒異常気象と温暖化影響の関連性解明（イベントアトリビューション）
サーキュラー	● 海洋プラスチックごみ問題への取組みが国際的に本格化。 ⇒環境中での物質動態、環境影響評価 ⇒行動変容（ナッジ） ● 世界的な淡水資源の枯渇、日本では水インフラの老朽化と人口減少・過疎化。 ⇒グローバル・ローカルな水循環、水利用
スマート	● データ駆動型社会が一層現実化。 ⇒エネルギー問題への適用（エネルギーネットワーク、需要科学、気象予測に基づく再エネ最適制御） ⇒データインフラの整備（共通データ基盤の構築、環境観測インフラ）
セーフティ	● レジリエントな社会構築への要請高まる。 ⇒地震による社会への影響予測と対応検討（エネルギーや水のインフラ停止） ⇒日本のエネルギー源の確保（グローバルなエネルギーサプライチェーン） ⇒原子力と安全・安心

国際比較表

＜エネルギー区分＞

研究開発領域		国・地域	日本		米国		欧州		中国		韓国	
		フェーズ	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発
1 エネルギー資源探査・開発技術*	*CCS含む	現状	○	○	◎	◎	◎	○	△	○	－	△
		トレンド	→	／	→	→	／	／	／	／	－	→
2 火力発電		現状	○	◎	◎	○	○	△	◎	◎	○	○
		トレンド	→	→	／	→	→	／	／	／	→	→
3 CCU (Carbon Capture and Utilization)		現状	◎	◎	◎	◎	○	○	△	×	△	×
		トレンド	／	／	→	→	／	／	／	→	／	→
4 原子力利用	新型炉	現状	△	△	△	○	△	○	○	◎	△	△
		トレンド	→	→	→	→	→	→	／	／	→	／
	核融合	現状	○	◎	○	◎	○	◎	○	◎	○	○
		トレンド	→	→	／	→	→	／	／	／	→	→
	原子力安全	現状	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	○	◎
		トレンド	／	／	→	／	→	→	／	／	→	／
	再処理	現状	○	○	○	△	○	△	○	○	○	△
		トレンド	→	／	→	→	→	→	／	／	→	→
5 太陽光発電・太陽熱発電	太陽光	現状	○	○	◎	○	◎	○	○	◎	△	△
		トレンド	→	→	／	→	／	／	→	／	→	→
	宇宙太陽光発電	現状	○	○	△	○	×	△	◎	◎	○	○
		トレンド	→	→	→	／	／	／	／	／	→	／
	太陽熱発電	現状	○	△	◎	◎	◎	◎	○	◎	○	×
		トレンド	／	→	／	／	／	／	／	／	→	→
6 風力発電		現状	△	△	△	×	◎	◎	△	△	×	△
		トレンド	／	→	／	／	→	→	→	→	／	→
7 バイオマス利用		現状	○	△	○	○	○	◎	△	△	△	○
		トレンド	／	→	→	→	／	／	→	→	→	／
8 その他の再生可能エネルギー (地熱、海洋)	地熱	現状	◎	◎	○	○	◎	○	○	○	△	△
		トレンド	／	／	→	→	／	／	→	→	→	→
	海洋	現状	○	○	◎	◎	◎	◎	○	◎	○	◎
		トレンド	／	／	／	／	／	／	／	／	／	／
9 電気エネルギー利用		現状	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		トレンド	→	／	／	／	→	→	／	／	／	／
10 熱エネルギー利用	蓄熱技術	現状	◎	△	○	○	◎	◎	◎	◎	○	△
		トレンド	／	→	／	／	／	→	／	／	→	→
	熱再生利用技術	現状	○	○	◎	○	○	○	△	○	△	○
		トレンド	→	→	／	→	→	／	／	／	→	→
	居住空間の 熱マネジメント	現状	◎	○	△	○	◎	○	△	△	－	－
		トレンド	／	→	→	／	→	→	／	／	－	－
11 化学エネルギー利用		現状	○	◎	○	○	○	◎	△	○	○	○
		トレンド	／	／	／	／	／	／	→	／	→	→
12 基礎化学品合成プロセス		現状	◎	△	◎	○	○	△	◎	○	○	×
		トレンド	／	→	／	／	→	／	／	→	／	／
13 燃焼		現状	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	△	△
		トレンド	→	→	→	／	→	／	／	／	→	→
14 トライボロジー		現状	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	×	△
		トレンド	／	／	→	→	／	→	／	／	／	→
15 エネルギーシステム評価		現状	○	○	△	△	○	○	○	○	－	○
		トレンド	／	→	→	→	→	→	／	／	－	／

<環境区分>

研究開発領域		国・地域	日本		米国		欧州		中国		韓国	
		フェーズ	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発	基礎	応用・開発
16 気候変動観測	衛星による観測	現状	○	○	◎	○	◎	◎	△	○	△	△
		トレンド	↘	↘	→	→	→	→	↗	↗	→	→
	大気観測	現状	○	○	◎	◎	◎	◎	○	△	○	△
		トレンド	→	→	↗	→	→	↗	↗	→	↗	→
	海洋観測	現状	◎	△	◎	◎	◎	△	○	△	○	△
		トレンド	→	→	→	→	→	→	↗	→	→	→
17 気候変動予測		現状	◎	○	◎	◎	◎	◎	△	○	△	○
		トレンド	→	↗	↘	↘	→	↗	↗	↗	↗	→
18 水循環		現状	◎	○	◎	◎	○	◎	○	○	△	△
		トレンド	→	↗	→	↗	→	→	→	→	→	→
19 水処理		現状	○	○	○	○	◎	◎	○	○	○	○
		トレンド	→	→	→	↗	→	→	↗	↗	↘	→
20 生物多様性・生態系の把握		現状	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	△	△
		トレンド	→	→	↗	↗	↗	↗	↗	↗	→	→
21 生物多様性・生態系の管理・活用		現状	○	○	◎	◎	◎	◎	○	◎	△	△
		トレンド	→	→	↗	→	↗	↗	↗	↗	↗	→
22 環境分析・物質動態		現状	○	○	◎	◎	◎	◎	○	○	△	△
		トレンド	→	→	→	→	↗	↗	↗	↗	→	→
23 除去・浄化技術	大気汚染	現状	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	△	○
		トレンド	→	→	→	→	→	→	↗	↗	→	→
	土壌・地下水汚染	現状	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	△
		トレンド	→	→	→	→	→	↗	↗	↗	→	→
24 資源・生産・消費管理		現状	○	○	○	◎	◎	◎	×	◎	△	△
		トレンド	→	→	→	↗	↗	↗	↘	↗	↘	↘
25 リサイクルと循環利用		現状	△	○	△	△	○	◎	△	○	△	△
		トレンド	→	↗	→	↗	↗	↗	↗	↗	→	→
26 健康・都市生活		現状	○	○	-	○	◎	◎	-	△	-	△
		トレンド	↗	↗	-	↗	↗	↗	-	↗	-	↗

研究開発の俯瞰報告書 概要

社会の要請・ビジョン

（1）産業構造の変革

多様なニーズ・シーズの適切なマッチングを実現するビジネス基盤システムや、透明・オープンなサービスプラットフォームなどの実現。多くの産業の効率化・省エネルギー化。

（2）社会システムの変革

最新の情報技術を使って、経済発展と社会問題解決を両立し、誰もが快適で活気に満ちた質の高い生活を送れるような社会を目指した、社会システムデザインの促進。

（3）教育・研究の変革

多様性・個性に対応した質の高い教育・訓練の提供、センシング情報やエビデンスに基づく教育プログラムの構築。新しい方法論や情報・データ共有など、ITは研究の基盤となる。

（4）知の活用の変革

知識・情報・データベース化と統合利活用、それを実現するようなプラットフォーム、そして実際の人間社会に影響を及ぼすCPSなどにより、知の発見・伝播・蓄積が加速される。

技術のトレンド

（1）スマート化

コンピュータが小型軽量高性能になり、機器のスマート化とデータのデジタル化が進み、大量のデータの収集と解析が可能に。ビッグデータと機械学習を組み合わせたサービスやアプリケーションも普及。

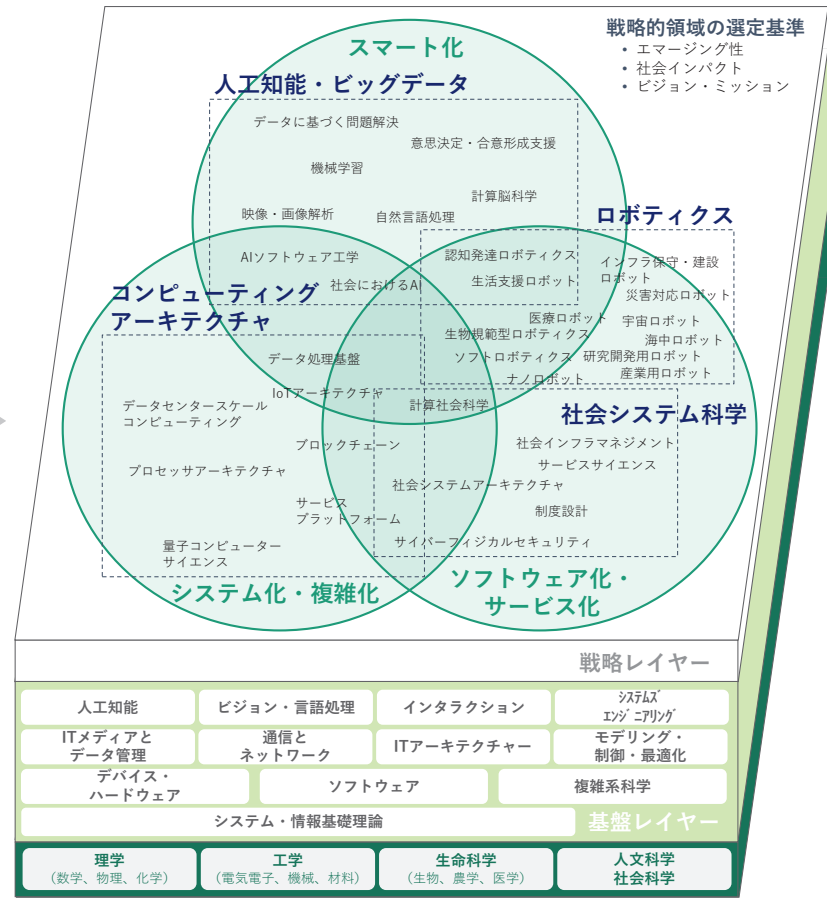
（2）システム化・複雑化

情報通信の無線化・大容量化・グローバル化は、機器や人をクラウドにリアルタイムにつなぐことを可能にした。世界中のあらゆる情報・制御システムは地球規模の複雑なシステムの一部となった。

（3）ソフトウェア化・サービス化

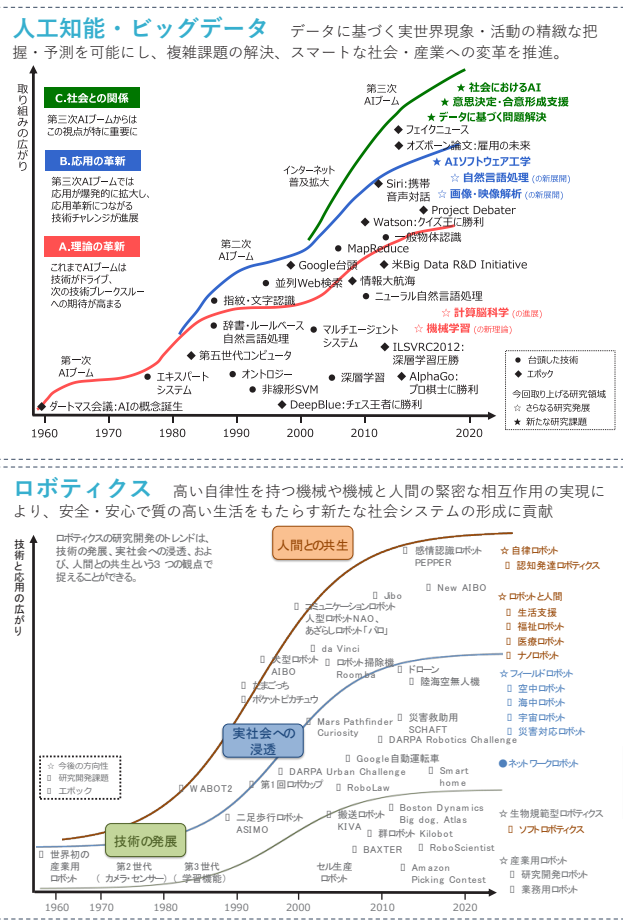
仮想化の考え方がハードウェアの隠蔽・共有からソフトウェアやサービスのコンポーネント化・再利用に広がり、新たなIT活用技術を実現。人や資産をサービスコンポーネントとして共有するサービス形態も出現。

分野の俯瞰と戦略的研究開発領域



システム・情報科学技術分野（2019年）

俯瞰区分と研究開発領域



社会・経済の動向

世界

- 世界経済成長は年3-4%と低成長、需要拡大の妙手なし
- 中国経済変動の影響大
- 民主主義の揺らぎ
- 地球規模・一国内での格差問題の提起、SDGsニーズ市場化、貧困、食料偏在化
- 市場主義の揺らぎ、特に金融市場主義への反発
- 中国・ロシア・イスラム世界など地政学リスク高水準
- 温暖化、都市化、地球環境リスク、自然災害リスクの増加
- 産業・労働構造、人間行動、意思決定システム等の変化
- 先進国、新興国の消費・サービス構造の変化

日本

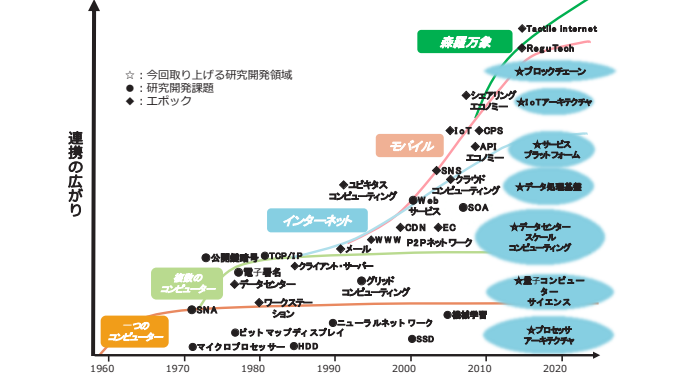
- 少子高齢化(役割担い手の減少)
- 経済低成長と財政の行き詰まり
- 社会インフラ老朽化
- 原発の位置づけとエネルギー問題
- 自然災害の脅威
- 地方創生への期待
- 社会保障費の増大、介護・教育・安全安心への期待
- 働き方の変革、一億総活躍

システム・情報科学技術との関連

- ITが本来持つオープン性や公平性への挑戦
- 格差・飢饉・貧困の低減への期待
- 新たな市場原理の構築の期待
- 危機回避、リスク対策への期待
- 予防、予知、減災への期待高まる
- IT利活用の推進によるIT投資拡大、依存度が高まる危機
- サービス化がさらなる高度なITを要請
- ロボットや知的処理などによる労働力の代替
- IT・ロボット産業拡大、社会コスト削減への期待
- インフラ再構築、コスト削減への期待
- リスク検知・オペレーション最適化のためにIT活用
- ITによる物理的制約の超越と地場産業興隆
- 生涯健康管理システムの構築
- ワークシェア、人間機械共存社会
- 皆が働ける社会の実現

コンピューティングアーキテクチャ

サイバー世界とフィジカル世界が高度に融合するSociety 5.0を実現するための情報通信・処理の基本的な機能、多様な応用を実現するためのプラットフォーム、それらを活用するためのサービス構築技術など。



戦略の基本的な考え方

①技術：強い技術を核とした骨太化

既に保有している、あるいは、育ちつつある強い技術を足掛かりとして、技術の国際競争力を骨太化する作戦・シナリオである。国の研究開発プロジェクトなどで生み出した中核技術に、周辺技術をかけあわせて、強みを出させる技術領域を拡大・強化するといった作戦・シナリオがその一例である。

②産業：強い産業の発展・革新の推進

既に保有している、あるいは、育ちつつある強い産業を足掛かりとして、国際競争力のある技術群を育てる作戦・シナリオ。日本に強みのある産業において、現存する課題や将来直面する課題を見極め、それらを解決するための技術開発を推進し、その成果を産業に投入していくことで、その産業とそれを支える技術群の競争力を育成・拡大する。

③社会：社会課題の先行解決

課題先進国として、先端技術の社会受容性で先行できることを活かして、国際競争力を構築する作戦・シナリオ。社会課題解決のための先端技術導入・環境変化に対する社会受容性の面で、他国に先行できるチャンスがあり、社会課題の先行解決ができれば、それを他国に事業展開していくことが狙える。

④基盤：社会基盤を支える根幹技術確保

社会基盤を支える根幹技術は、国として保有・強化しなくてはならないという考え。今日、あらゆる技術を自前開発でそろえることは不可能であり、オープンイノベーション、他国からの技術導入も組み合わせて、バランスよく技術開発・活用を進めることが必要となる。



推進すべき重点テーマ

意思決定・合意形成支援 ①技術, ④基盤

多様な価値観が混在・対立し、フェイクニュースが社会問題化しつつある複雑社会において、個人・集団が主体性や納得感を持って意思決定できるよう、ITを活用したより良い仕組みの実現を目指す。（2.1.5）

AIソフトウェア工学 ①技術, ③社会

データの例示によってシステムの動作を帰納的に定義するシステム開発の新パラダイム。安全性・信頼性を確保したAI応用システムの効率のよい開発方法論・技術体系の確立と社会実装をねらう。（2.1.4）

計算脳科学 ②技術

脳を情報処理システムととらえた研究分野で、深層学習・強化学習をはじめAIの基本メカニズムとの関係が深まっている。Neuroscience-Inspired AI、計算機による全脳シミュレーション、社会脳科学等の進展からAI技術への示唆が見込まれる。（2.1.7）

統合AI ②技術

第2次・3次AIブームの先はトップダウンとボトムアップの統合（機械学習＋記号推論、帰納型＋演繹型）へ向かう。自然言語処理の分野で深層学習との統合が見られ、さらなる発展が見込まれる。（2.1.3）

自律・認知発達ロボティクス ③社会

人間の学習のように認知機能を学習・創発する仕組みをロボットに与え、認知機能の研究とロボットへの応用をはかる。（2.2.1）

生物規範型ロボティクス ②産業

物理制約による歩き方の効率的学習など、様々な面で生物を規範とするロボティクス技術の開発。ソフトロボティクスも含む。（2.2.9）

人間・機械共生 ①技術, ③社会

レベル3自動運転やRPAとの協調など、人間と機械の協力作業にかかるシステム・情報科学技術。技術的側面だけでなく、PL法やソフトウェア品質標準など、法制的な側面の課題も含まれる。（2.2.2）

ビッグデータに基づく問題解決 ③社会

トリリオンセンサー時代の計測によって作り出されるビッグデータを、社会経済システムおよび人間行動に活かすための研究開発。（2.3.1）

Societyデジタルツイン ③社会

実際の社会現象の情報をIoTなどから入力し、リアルタイムで情報を更新する「社会のシミュレーター」実現に必要な、数理モデリング、複雑系科学、シミュレーション・データ同化技術など。（2.3.1）

社会システムデザイン ④基盤

強靱かつ柔軟で効率的な社会システム実現のための基盤技術の研究開発。継続性・可用性確保のための社会システムの構造設計。（2.3.4）

RegTech ④基盤

特許や法律などの文章を機械可読とし、テキストマイニングや機械学習の利用により、人間の作業を支援する技術の開発。（2.3.5）

サイバーフィジカルセキュリティ ④基盤

情報・システム・デバイスセキュリティにわたる、CPS全体の安全性の確保に必要な、技術・人材・法制度の研究開発。（2.3.3）

サービスプラットフォーム ③社会, ④基盤

Reality2.0 実現基盤としてのプラットフォームの構築をめざす。エッジからクラウドに至るCPSアーキテクチャの最適化を含む。（2.4.5）

ブロックチェーン ②産業, ③社会

ネットワーク上の複数のノード間で共有されつつ同期されることで同じ状態が保たれるデータの集合である分散管理台帳を実現する技術の基盤構築と応用開拓。（2.4.7）

データセンタースケールコンピューティング ④基盤

データセンター規模での計算機システムアーキテクチャの研究開発。（2.4.3）

非フォンノイマンプロセッサアーキテクチャ ②技術

ニューロモーフィック、量子計算、近似計算、アナログ計算などを含む新しいコンピューティングパラダイムの探求と実装実証。（2.4.1）

量子コンピューターサイエンス ②産業, ④基盤

アルゴリズムの要求と現状のハードウェア性能の間のギャップを埋めるコンピューター科学・工学の学際的な研究開発テーマ。（2.4.2）

リアルタイムシステム ②産業, ④基盤

ポスト5Gの高速・大容量・超低遅延通信をねらうICTシステムアーキテクチャの研究開発を行う。低遅延ネットワークの実現による感覚・体験を共有するサービスなど新産業の創出も見据える。（2.4.6）

データ流通・共有基盤 ④基盤

政府や行政機関が持つビッグデータの流通・共有を円滑に行うためのデータベース基盤の構築。共通語彙、API整備、プライバシーや情報セキュリティなど法制度やガイドラインなどの課題解決。（2.4.4）

数学 ①技術

数学や数理科学と情報科学の連携・融合による新しい理論・技術の構築を目指すテーマ。とくに、データ駆動型のアプローチである情報科学と数理モデル型アプローチの数理科学との連携を重視する。

2.4 システム・情報科学技術分野

システム・情報科学技術は汎用的な技術分野であり、他のさまざまな分野においてその効果を発揮し、多様な領域の問題解決や新産業創出を加速する。エネルギー・交通などの社会インフラや行政・住民サービスといった社会システムを改善し、情報通信産業のみならず、製造業やサービス業、農業などの効率化・高付加価値化を実現する。さらに、エネルギー・環境、ナノテクノロジー・材料、ライフサイエンス・臨床医学、人文社会科学などの発展にも大きく寄与する。

本俯瞰報告書では、Society 5.0 の実現にむけシステム・情報科学技術が目指すべき「産業構造の変革」「社会システムの変革」「教育・研究の変革」「知の活用の変革」の 4 つのビジョンと、システム・情報科学技術の進化における「スマート化」「システム化・複雑化」「ソフトウェア化・サービス化」といった技術トレンドとの両方の観点から、当該分野における研究開発を俯瞰した。

当分野の俯瞰は、基盤レイヤーと戦略レイヤーの 2 層で捉え、戦略レイヤーに含まれる研究開発領域として「エマージング性」「社会インパクト」「ビジョン・ミッション」の 3 点を選定基準に、戦略的に重要度が高い 33 の研究開発領域を特定した。CRDS では、この 33 の研究開発領域を先述の 3 つの技術トレンドにマッピングした上で、「人工知能・ビッグデータ」「ロボティクス」「社会システム科学」「コンピューティングアーキテクチャ」の 4 俯瞰区分にまとめた（図 1）。

「研究開発の俯瞰報告書（2017 年）」からの主な更新点として、戦略的研究開発領域の刷新とともに、俯瞰区分を 6 区分から 4 区分に見直した。また、区分ごとの俯瞰図についても、前回版の区分俯瞰図の更新に加えて、歴史的背景や動向・トレンドが判断しやすいよう時系列の区分俯瞰図を新たに作成した。

社会・経済の動向を含めたわが国の置かれた環境、現在の日本の取り組み状況やポジションを踏まえると、単に技術発展の世界的な方向性だから取り組むというのではなく、国際競争力を構築・維持するための作戦・シナリオや、国として取り組むべき意義を明確に持った研究開発投資戦略が必要である。本俯瞰報告書では「強い技術を核とした骨太化」「強い産業の発展・革新の推進」「社会課題の先行解決」「社会基盤を支える根幹技術確保」の 4 つの基本的な考え方を提示した。また、研究開発の現状の全体像を把握・分析・可視化することに加え、CRDS が考える今後のあるべき方向性・展望を顕在化させるため、上記の 4 つの考え方に基づいて国として推進すべき 20 の重点テーマを抽出した（表 1）。

システム・情報科学技術分野の研究開発戦略の立案には、技術トレンドだけでなく、さまざまな形で、社会とシステム・情報科学技術との相互作用を理解する必要がある。とくに、科学技術の進展と雇用の関係、技術的格差の経済的格差への影響、科学技術がもたらす倫理的・法的・社会的な問題を常に意識すべきである。これらの動向に対してシステム・情報科学技術が適切な発展を遂げ、健全で持続可能な社会を構築するためには、多様な観点からの想像力ある検討が必要である。本俯瞰報告書はそのために必要な

いくつかの視点を調査・分析によって中立的な立場から提供するものである。

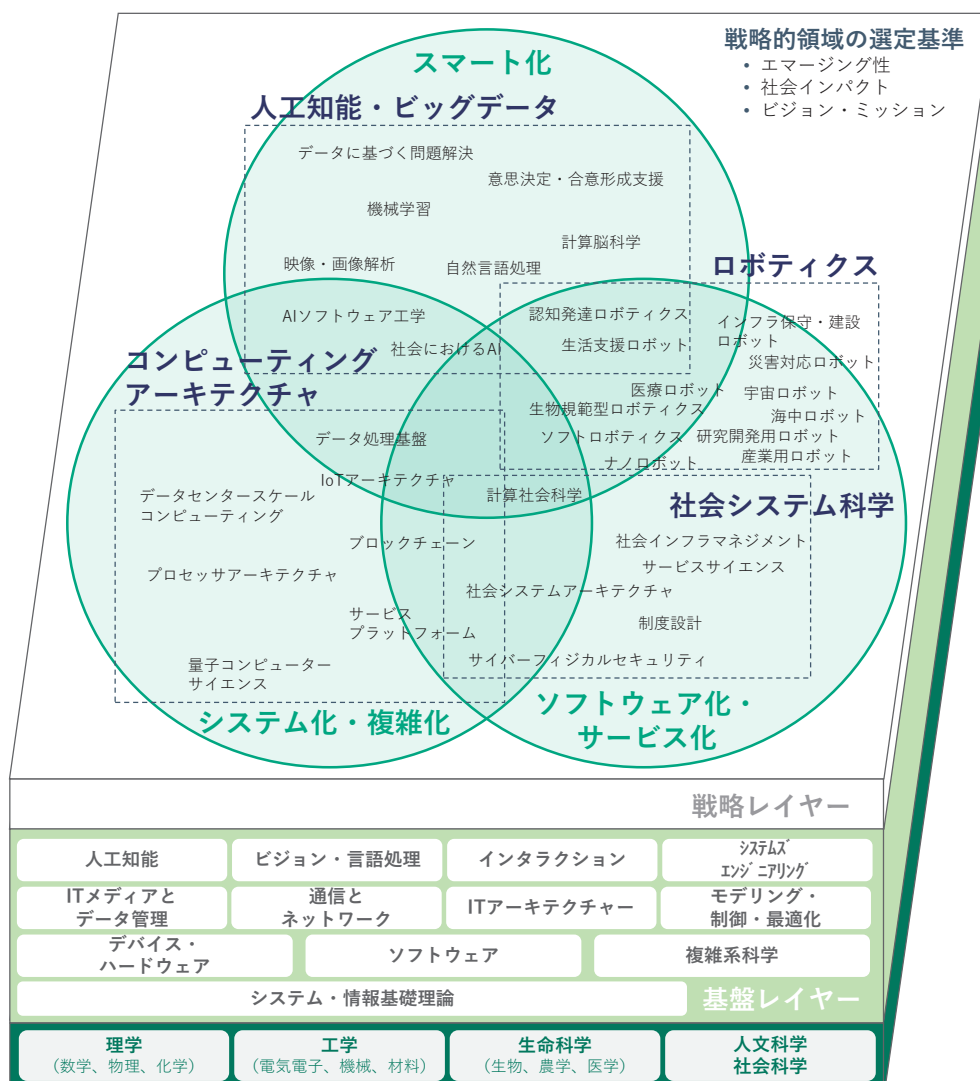


図1 システム・情報科学技術分野の俯瞰

表 1 重点テーマの抽出

重点テーマ (関連研究開発領域)	狙い・概要	戦略の 4 つの基本的な考 え方*			
		(1)技術	(2)産業	(3)社会	(4)基盤
意思決定・合意形成支援 (2.1.5)	多様な価値観が混在・対立し、フェイクニュースが社会問題化しつつある複雑社会において、個人・集団が主体性や納得感を持って意思決定できるような、情報科学技術を活用したより良い仕組みの実現を目指した研究開発テーマ。	○			○
AI ソフトウェア工学 (2.1.4)	データの例示によってシステムの動作を帰納的に定義するシステム開発の新パラダイム。安全性・信頼性を確保した AI 応用システムの効率のよい開発方法論・技術体系の確立と社会実装をねらうテーマである。	○		○	
計算脳科学 (2.1.7)	脳を情報処理システムととらえた研究分野で、深層学習・強化学習をはじめ AI の基本メカニズムとの関係が深まっている。Neuroscience-Inspired AI、計算機による全脳シミュレーション、社会脳科学等の進展から AI 技術への示唆が見込まれる。	○			
統合 AI (2.1.3)	第 2 次 AI ブームはトップダウン型 AI (ルールベース)、第 3 次 AI ブームはボトムアップ型 AI (機械学習) が主流だったが、その先はトップダウンとボトムアップの両者の統合 (機械学習+記号推論、帰納型+演繹型) へ向かうと考えられる。元来、記号処理系である自然言語処理の分野で深層学習との統合が見られ、さらなる発展が見込まれる。	○			
自律・認知発達ロボティクス (2.2.1)	人間の学習のように認知機能を学習・創発する仕組みをロボットに与え、認知機能の研究とロボットへの応用をはかる研究開発テーマ。				○
生物規範型ロボティクス (2.2.9)	生物の身体構造の物理制約による歩き方の効率的な学習など、様々な面で生物を規範とするロボティクス技術の開発。ソフトロボティクスも含む。		○		
人間・機械共生 (2.2.2)	レベル 3 自動運転やロボティクス・プロセス・オートメーション (RPA) との協調作業など、人間と機械の協力作業にかかるシステム・情報科学技術を扱う。技術的な側面だけでなく、製造物責任法 (PL 法) やソフトウェア品質標準など、法制度的な側面の課題も含まれる。	○		○	
ビッグデータに基づく問題解決 (2.3.1)	トリリオンセンサー時代の計測によって作り出される多様なビッグデータを、社会経済システムおよび人間行動に活かすための研究開発。			○	
Society デジタルツイン (2.3.1)	実際の社会現象の情報を IoT などから入力し、リアルタイムで情報を更新する「社会のシミュレーター」実現に必要な、数理モデリング、複雑系科学、シミュレーション・データ同化技術などを含むテーマ。			○	
社会システムデザイン (2.3.4)	強靱かつ柔軟で効率的な社会システムを実現するための基盤技術の研究開発。継続性・可用性確保のための社会システムの構造を設計する。				○
RegTech (2.3.5)	特許や法律などの文章を機械可読とすることで、テキストマイニングや機械学習を使って利用しやすくし、人間の作業を支援する技術を開発するテーマ。				○
サイバーフィジカルセキュリティ (2.3.3)	情報・システム・デバイスセキュリティにわたる、サイバーフィジカルシステム全体の安全性の確保に必要な、技術・人材・法制度の研究開発。				○
サービスプラットフォーム (2.4.5)	Reality2.0 実現基盤としてのプラットフォームの構築をめざすテーマ。エッジからクラウドに至る CPS アーキテクチャの最適化を含む。			○	○
ブロックチェーン (2.4.7)	ネットワーク上の複数のノード間で共有されつつ同期されることで同じ状態が保たれるデータの集合である分散管理台帳を実現する技術の基盤構築と応用開拓。ブロックチェーン利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化。		○	○	
データセンタースケールコンピューティング (2.4.3)	データセンター規模での計算機システムアーキテクチャの研究開発。				○
非フォンノイマンプロセスアーキテクチャ (2.4.1)	ニューロモーフィック、量子計算、近似計算、アナログ計算などを含む新しいコンピューティングパラダイムの探求と実装実証をねらう。	○			
量子コンピュータサイエンス (2.4.2)	量子アルゴリズムの要求と現状の量子ハードウェア性能の間にある大きなギャップを埋めるコンピューター科学・コンピューター工学の学際的な研究開発テーマ。		○		○
リアルタイムシステム (2.4.6)	ポスト 5G の高速・大容量・超低遅延通信をねらう ICT システムアーキテクチャの研究開発を行う。低遅延ネットワークの実現による感覚・体験を共有するサービスなど新産業の創出も見据える。		○		○
データ流通・共有基盤 (2.4.4)	政府や行政機関が持つビッグデータの流通・共有を円滑に行うためのデータベース基盤の構築をめざすテーマ。共通語彙や API 整備など技術面の他、プライバシーや情報セキュリティなど法制度やガイドラインなどの課題解決も求められる。				○
数学 (基盤レイヤーのため、対応節なし)	数学や数理論理学と情報科学の連携・融合による新しい理論・技術の構築を目指すテーマ。とくに、データ駆動型のアプローチである情報科学と数理モデル型アプローチの数理科学との連携を重視する。	○			

* (1)技術：強い技術を核とした骨太化、(2)産業：強い産業の発展・革新の推進、(3)社会：社会課題の先行解決、(4)基盤：社会基盤を支える根幹技術確保。

国際比較表

【人工知能・ビッグデータ】

		機械学習		画像・映像解析		自然言語処理		AI ソフトウェア工学		意思決定支援		データに基づく問題解決		計算脳科学		社会における AI	
国・地域	フェーズ	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	△	↗	△	↗	○	↗	×	→	△	→	○	→	○	→	△	→

【ロボティクス】

		認知発達 ロボティクス		生活支援 ロボット		医療ロボ ット		海中ロボ ット		宇宙ロボ ット		インフラ 保守・建設 ロボット		災害対応 ロボット システム		ソフトロ ボティク ス		生物規範 型ロボテ ィクス		産業用ロ ボット		研究開発 用ロボッ ト		ナノロボ ティクス	
国・地域	フェーズ	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	△	↘	×	→	○	→	△	→	△	→	△	↗	△	→	×	→	△	→	△	→	-		△	→
ロシア	基礎									◎	→														
	応用・開発									◎	→														
カナダ	基礎									○	→														
	応用・開発									○	→														
インド	基礎									○	↗														
	応用・開発									○	↗														

【社会システム科学】

		計算社会科学		社会インフラ マネジメント		サイバーフィジカル セキュリティ		社会システム アーキテクチャ		制度設計		サービスサイエンス	
国・地域	フェーズ	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	○	↗	○	→	—	→	△	→	△	→	×	→

【コンピューティングアーキテクチャ】

		プロセッサ アーキテクチャ		量子コンピュ ターサイエンス		データセンター スケール・コンピ ューティング		データ処理 基盤技術		サービスブラッ クプラットフォーム		IoT アーキテクチャ		ブロック チェーン	
国・地域	フェーズ	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	△	→			○	→	△	→			○	↗	△	→
カナダ	基礎			○	↗										
	応用・開発			○	↗										

研究開発の俯瞰報告書 概要

社会の要請・ビジョン

IoT/AI時代のCPS（Society5.0）への期待

- いよいよ全盛を迎えるIoT/AI時代においては、エッジ/クラウド、IoTセンサデバイス、自動運転、ロボット、ポスト5G/モバイル、診断・治療・計測デバイスなど、ハード側はナノテク・材料技術が競争を左右

複雑化、深刻化する環境・エネルギー問題と科学技術への期待

- 太陽光や太陽熱エネルギーの電力変換技術、風力発電技術、そして電力系統間での負荷変動を吸収する蓄電池技術や、EVに代表される輸送機器の蓄電池技術はいずれもナノテク・材料・デバイス技術が鍵を握る。あらゆる素材・デバイスの作成・使用過程において、資源制約への対応技術と省エネ技術は経済的にも環境的にも極めて重大な課題に
- 環境面では、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）がクローズアップ。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、いかに考慮して最適設計、最適製造を行うかが、長期的には最重要課題。水・大気浄化、温室効果ガス排出削減・転換、資源循環など、プロセス・エネルギーコストや環境影響まで含めた研究開発を行うことが重要

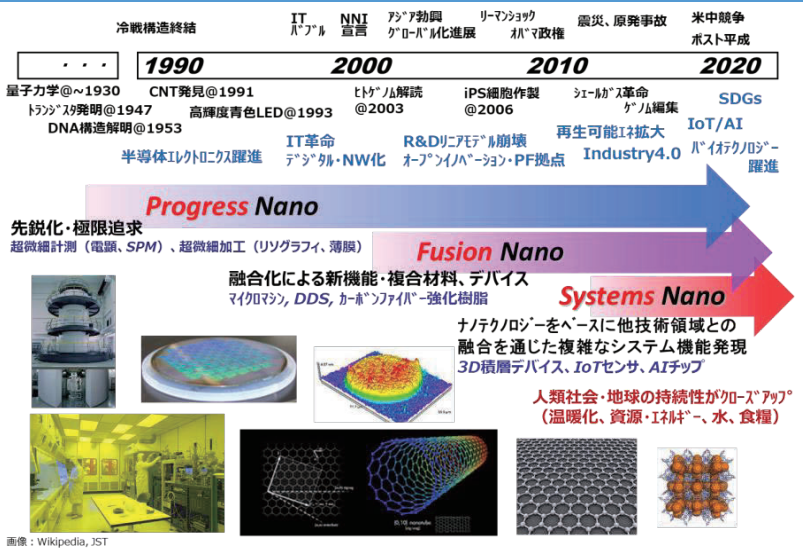
超高齢化社会・人口減少時代のヘルスケア・医療への期待

- 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。
- 未病段階における超早期診断、健康状態把握に直結する生体情報モニター、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、機能を失った臓器を代替・修復する技術など、ナノテクノロジー・材料の貢献が期待される多数の医療・健康ニーズが存在

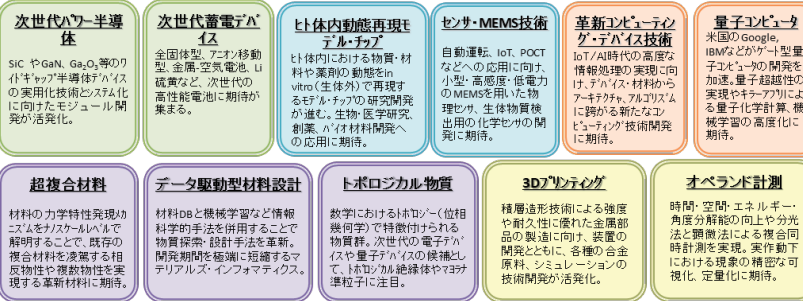
社会・経済の動向

- SDGs（持続可能な開発目標）達成、Society5.0実現を見据えた研究開発が主流になり、価値形態が変化（所有からシェアへ、大量生産から個別生産/カスタマイズへ）
- デジタルトランスフォーメーションを牽引するGAFAなどの巨大IT企業が、自動運転、ロボット、ドローン、スマートホーム、AR/VRなど、CPSを実現するハードウェア技術へも参入。
- 簡単なアセンブリによる大量生産の製造が先進国からより多様な国・地域へ。半導体回路のように最先端の高度な加工技術に巨額の設備投資が必要な製品は限られた企業に集約。中国やインドが台頭
- 日本は、高度なすり合わせを伴うシステム化技術が必要とする産業、高精度技術を要する製造装置産業、高性能・高信頼性を実現している部品や素材（部素材）産業に存在感

科学技術の潮流・変遷



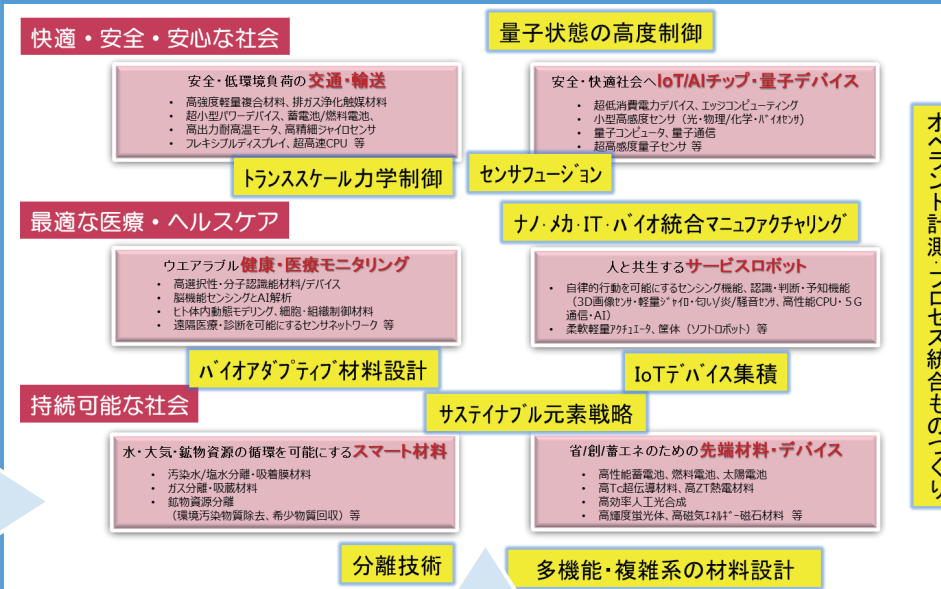
世界的な研究開発トレンド・技術開発の潮流



ナノテクノロジー・材料分野（2019年）



6つの社会ニーズと10のグランドチャレンジ



ナノテクノロジー・材料分野 研究開発俯瞰図2019



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を4代の政権に渡って継続。AI/IT/ロボティクスや量子の新たなイニシアティブと接続
- 欧州Horizon2020は、ナノテク・先端材料をKET's (key enabling technologies) として位置づけ。Graphene Flagship、Human Brain Projectに続きQuantum Flagshipを開始。次期Horizon Europeの準備が加速。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ち、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。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を吸引
- 異分野融合の象徴としてのナノテクは、方向性が各国で多様化するなか、素材・デバイス技術の競争力のエンジンに

日本の位置づけ

- 元素戦略、分子技術、蓄電池部材、電子材料、パワー半導体、複合材料などの物質創製・材料設計技術に長年の技術蓄積にもとづく強み
- そこで用いられる計測評価・分析・品質管理にも強み。これらが活かせるかたちで省エネ・低環境負荷技術に優位性
- 一方、データ科学、標準化・規制戦略、医工連携、産学連携に課題がある。これらは研究開発の枠組みを構築して実行するまでの問題の共有や意志決定スピードに課題。また、ナノテクのELSI・EHSは制度化が進む世界の流れから遅れ

快適・安全・安心な社会

社会ニーズ

- ① 安全・低環境負荷の交通・輸送
事故や渋滞を激減し、安全で快適な移動空間としての自動車や、燃料効率が高くCO₂排出量が抑制された航空機などの交通・輸送機器の実現

- ② 安全・快適社会実現へ向けたIoT/AIチップ・量子デバイス
ビッグデータを高速かつ低消費電力で処理した結果生まれる新たな情報をベースに人間が安全・快適に暮らす豊かな社会を実現するための材料・デバイス

グランドチャレンジ

i 量子状態の高度制御

電子、光子、スピン、フォノンなどの個々の量子状態およびそれらの相互作用がもたらす物理現象を理解し、さらにトポロジーといった新しい概念を導入することによる新しい量子状態の実現と、これらの高度制御

ii トランススケール力学制御

航空機・自動車におけるCO₂排出量的大幅削減、摩擦など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修復など、持続可能な社会実現に貢献する材料・デバイスの創製

iii センサフュージョン

物理センサおよび化学センサを統合的に用い、老朽化や災害時における橋梁やトンネルなどの社会インフラの異常検知、日常生活における病気の検出につな

最適医療・ヘルスケア

社会ニーズ

③ ウェアラブル健康・医療モニタリング

疾患の早期診断や健康状態・生体情報のモニタリングを実現するウェアラブル（もしくはインプラント型）な健康・医療モニタリング技術の構築

④ 人と共生するサービスロボット

負担の少ない高齢者介護、持続可能な社会インフラ保守管理、災害やテロに対するセキュリティ強化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・拡張するなど、人と共生するサービスロボットの活用

グランドチャレンジ

iv ナノ・メカ・IT・バイオ統合マニファクチャリング

生物が実現する巧みな構造や機能、低エネルギーで実現する動作や物質生産に学び、人工的な材料・デバイスの生産システムとして再構築

v バイオアダプティブ材料設計

生体環境に適合した材料の探索という従来の概念から脱却し、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

vi IoTデバイス集積

IoT/AI時代に求められるセンシング、エッジ・コンピューティング、ネットワーク等の多機能をヘテロ集積モジュール化した安価な電子システム、新アーキテクチャ（ニューロ、量子）による高性能コンピューティングの開発

持続可能な社会

社会ニーズ

- ⑤ 水・大気・鉱物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、CO₂・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/蓄エネルギーのための先端材料・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/創/蓄エネルギー用材料・デバイス

グランドチャレンジ

vii サステイナブル元素戦略

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

viii 分離技術

化学プロセス分離工程の省エネ化、環境汚染物質除去、来たる水素社会に向けたガス分離・吸蔵、鉱物資源分離、医療など広範な分野において分離・吸着機能材料・システムの研究開発

ix 多機能・複雑系の材料設計

様々な機能材料のさらなる高性能化には結晶構造の多元素化や複合化が避けられず多様な結晶構造が可能になるなか、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、さらにはオランダ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

上記すべての基盤となる技術

x オランダ計測・プロセス統合ものづくり

反応プロセス中の物質・材料もしくは実動作下の材料・デバイスを対象にオランダ計測を実行し、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実現

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。

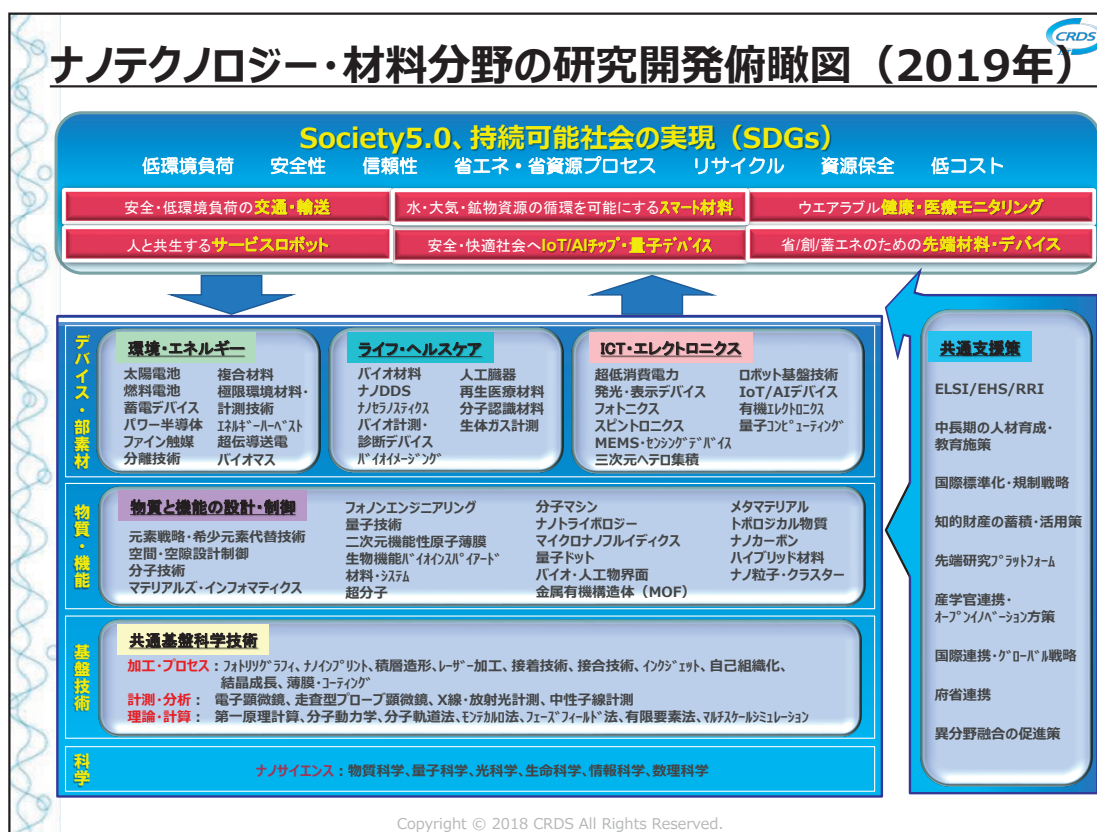


図1 ナノテクノロジー・材料分野の研究開発俯瞰図（2019 年）

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リソグラフ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、ネットワーキングは、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 ページ程度を割き、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>

		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			
								C1ケミストリー		人工光合成		気体と液体の分離技術		CO ₂ 分離技術		金属分離				宇宙分野		原子力分野	
国	フェーズ	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>

		バイオ材料		ナノテクノロジー		診断バイオ計測		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＞

	フェーズ	超低消費電力 （ナノエレクトロニクス）		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		三次元集積		ロボット基盤技術	
		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＞

	フェーズ	空間制御・空隙設計		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		二次元機能性原子薄膜		生物機能性・バイオシステム材料	
		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 >

		加工・プロセス						計測・分析		理論・計算	
		微細加工 プロセス		積層造形・ レーザー加工		接着技術		ナノ・計測 技術		物質・材料 シミュレーション	
国	フェーズ	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 >

		ナノテクノロジーの E L S I / E H S、国際標準	
国	フェーズ	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	○	↗

研究開発の俯瞰報告書 概要

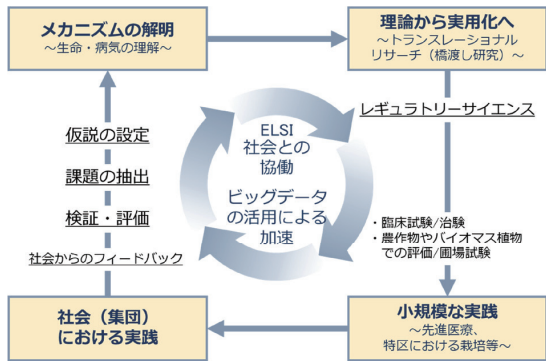
社会・経済動向（期待・要請）

世界的に「より多くの人に、より質の高い医療サービスを、より安価に提供する」ことが求められている。また世界の人口は増加の一途をたどっており、「より多くの人が、より質の高い食料を安定して入手できる」ための、食の安全、食料確保の問題は喫緊の課題となっている。

日本の課題

- 少子高齢社会（労働人口減）
- 医療費の高騰（国の財政問題）
- 人口増加や気候変動による食料問題
- 産業構造の変化
- 情報技術・社会の加速度的進展

ICT 技術の進展等によって、社会の中に存在する多種多様なデータの活用が現実的になりつつある。社会からのフィードバックを研究のきっかけとして活用することが技術的にも可能となり、改めて研究開発の循環構造（下図）の重要性が認識されている。社会・国民を巻き込んだ研究開発が大きな潮流となってきた。昨今世界的な大きなトレンドとなっている個別化医療やバイオエコノミーはその最たる例である。



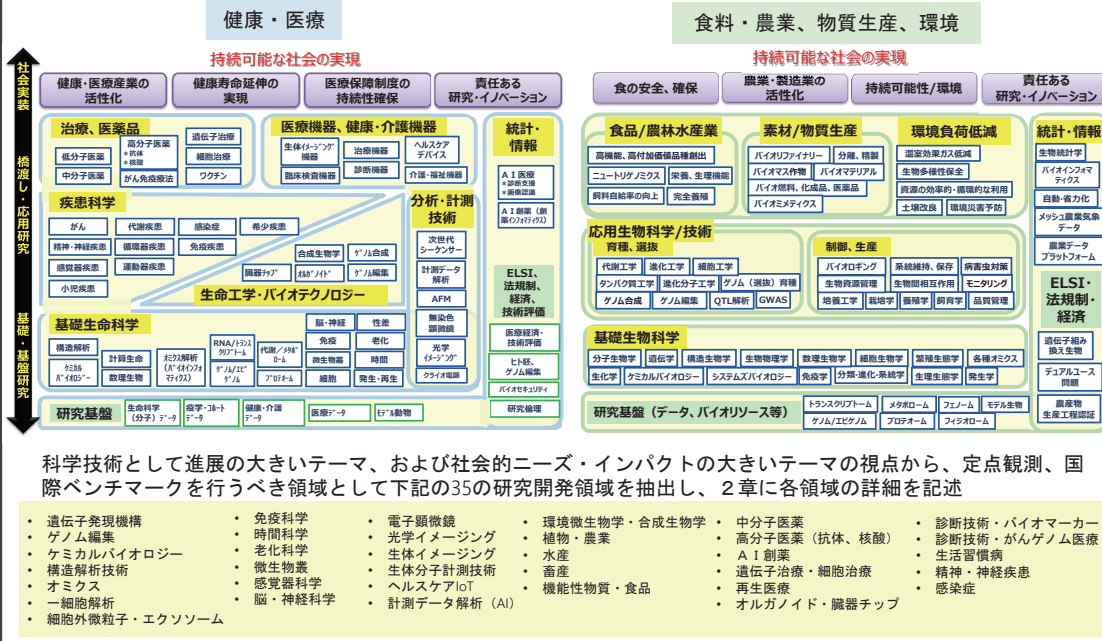
ライフサイエンス・臨床医学分野（2019年）

JST研究開発戦略センター
ライフサイエンス・臨床医学ユニット



ライフサイエンス、健康・医療、食料・農業、物質生産等の研究開発の俯瞰図

研究開発動向の概観を把握するため、健康・医療分野と食料・農業、物質生産、環境（グリーンバイオ、ホワイトバイオ）分野の各々について基礎から出口までを軸とした俯瞰図（研究構造のスナップショット）を設定



ライフサイエンスの研究スタイルの変化

- 「データ駆動型」の新しいアプローチによる生命現象の理解が進展し、今後「精緻な理解」と「予測」が大きな方向性となる
- 研究者あるいは研究コミュニティが、研究対象として、研究開発の循環構造を意識し、生命の時空間階層を広く見ることができるようになった（見ていかなければならなかった）
- 技術進展サイクルの短縮化の結果、研究単位当たりのハイスループット化、高コスト化、つまり「ビッグサイエンス化」が急速に進展
- 今後ますます実験デザイン（データの取り方と解析）が重要に
- ブロード研究所（米国）、フランスクリック研究所（英国）など各ラボと技術コアによる協働を前提としたオープンなアンダーワンループ型の大規模研究所が誕生

日本の研究開発推進体制の課題と方策

下記を実現する研究プラットフォーム（拠点化とネットワーク化）の構築と研究者のマインド、科学研究文化の変革

- 研究者が研究に専念できる環境構築
- 機器共用による全体コスト効率化
- 若手研究人材のスタートアップ環境整備
- 異分野融合による新しいサイエンスの創出
- Wet/Dry統合と人材育成
- データマネジメントと計測技術等の標準化
- マウスからヒトへ、ラボからフィールドへ（人材育成と研究）
- 異分野（生命科学・工学・情報学・医学）の統合や産学連携による基礎研究からイノベーションまでのコスト・時間短縮
- イノベーションのCo-driverという認識の下、ELSI/IRI

世界の研究開発政策の潮流

- 健康・医療分野
 - ・ ゲノム医療、個別化・層別化医療（がんを中心に）ヘルス・メディカルインフォマティクス、AI医療、AI創薬
 - ・ 創薬：がん免疫、中枢神経系、感染症大規模な官民パートナーシップによる産学協働型研究
 - ・ 細胞治療・遺伝子治療
 - ・ 脳神経研究（長期的研究）
- 食料・農業分野
 - ・ 持続可能、気候変動、循環型、スマート
- 物質生産分野
 - ・ 合成生物学の取組（米英中を中心に）

国・地域	概要・特徴
米国	テーマ 脳、プレジジョンメディシン、がん、再生医療、薬物治療の5つのイニシアチブ、官民創業ファンド、NIHの基礎研究では、クライオ電顕、ゲノム編集、分子・細胞アトラス、4D スケルモームなど、DARPA、DOEによる微生物など物質生産プログラム、NSF未来に向けて投資すべき10のビッグアイデア「生命法則の理解：表現型予測」、NIHが莫大な投資（約3兆円）で全分野基礎から応用まで全方位。研究は私立大学、ブロード研究所、ジャネリア研究所など複合研究所、ベンチャーの存在盛大。寄付・チャリティー（財団）の存在盛大。
EU	テーマ 社会課題型研究として個別化医療、産業技術としてバイオテクノロジー活用、創薬、農業、物質生産など。未来研究としてヒト脳プロジェクト、官民パートナーシップの医薬品イニシアチブ。
	システム 人材育成、個別先端研究、インフラ整備も重視。政府、産業界、アカデミアが一体。
英国	テーマ 100,000 Genomes Project (NIHR)、ヘルス・インフォマティクス・リサーチ（医療バイオインフォマティクスイニシアチブ、MRC）。トップダウン型は創薬研究に重点化。
	システム 生物学、医学、工学分野ごとのマルチファンディング、基礎研究のプレーヤーは大学（国立）が中心。ウェルカムトラストなどチャリティーの存在盛大。製薬産業の存在盛大。カブリルトや産業戦略チャレンジャー基金で橋渡し研究・拠点を強化。MRC主導で大規模融合拠点Francis Crick Instituteを設立。
ドイツ	テーマ 個別化医療として、メディカルインフォマティクス・イニシアチブ。がん、成人病などの主要な疾病研究（67健康研究センターによる強化）。
	システム 地域クラスター化や国研（研究協会）の役割・機能分担によるエコシステムの構築。基礎研究のプレーヤーはマックスプランクとヘルムホルツが中心。ヘルムホルツと大学病院によるTR。プレゼンツやシーメンス等医療機器も強い。
中国	テーマ 脳科学と応用研究、育種技術、精密医療、生殖医療。研究は全包围網。
	システム 科学技術部はトップダウンの競争的資金「国家重点研究開発計画（プログラム）」に加え「国家自然科学基金委員会（NSFC）」も管理することになり、テーマの運動を意識。中国科学院は以前独立組織として存在。104の研究所と年間1兆円弱の予算。ウミガメ戦略による人材育成、研究力強化。近年、独自研究も増加。NGSやクライオ電顕などインフラ豊富。

技術トレンド 直近2~3年の大きな技術・研究の変化、進展

- 一細胞オミクス技術の隆盛と細胞社会・不均一性の理解や疾患の理解
 - クライオ電顕、超解像顕微鏡・光シート顕微鏡等イメージング技術の発展による各生体スケールの解像度の向上
 - ゲノム編集技術の精度の向上による医療、食料応用への展開
 - AI・機械学習の生命科学、臨床への着実な浸透
 - 新しい創薬等アプローチの出現
 - 個別化・層別化医療、精密医療、ゲノム医療・創薬およびバイオエコノミー等社会・国民の理解が必要な研究開発の大きな潮流の継続
- 計測技術やAI・機械学習等をはじめとしたICT技術の急速な進展は、分野の研究のあり方や手法のパラダイムを変えつつある。自動化、大規模化という流れは今後も続いていく。

第三・四世代DNAシーケンサ 2014	ゲノム編集技術 2013	クライオ電子顕微鏡（単粒子解析法） 2012
✓1000万ゲノム達成後もより短い時間で連続的に数千塩基の読み取りができる様々な技術が進展 ✓生命科学から臨床や民生利用へ展開 ✓これまで機器は単光を読み取る方式であったが、英Oxford Nanopore Technologies社が製品化した電気信号を検出する方式の「MinION」は外付けHD程度の大きさを実現 ✓生命科学・創薬・医療のあり方を大きく変える技術として国内外の産・学で注目	✓[CRISPR/Cas9]システムが登場、圧倒的な簡便さ、自由度の高さから、幅広い研究者層へ普及 ✓生命科学、医療、食料 ✓生命科学・医療技術開発を大きく変える技術として国内外の産・学で注目 ✓2016年中国でヒト胚への臨床応用開始 ✓食料に向けて、ゲノム編集活用新品種（作物・動物）の開発が盛んに ✓ELSIの観点からの検討も必須（デザイナーベビー等）	✓X線構造解析では結晶化が必須だが、本技術では結晶化が不要 ✓2017年ノーベル化学賞 ✓計測装置（CMOSセンサ）と画像処理技術の高度化で、近年顕著な成果 ✓生命科学・創薬のあり方を大きく変える技術として国内外の産・学で注目
一細胞オミクス解析技術 2010	人工知能技術 2012	超解像顕微鏡技術 2010
✓DNAおよびRNAなど核酸ベースの一細胞レベルでの網羅的解析化が急速に進展 ✓細胞～個体のマルチスケールでの生命現象の理解を可能にする革新的な実験技術 ✓一度に解析できる細胞の個数も当初の数十から数万人に ✓RNAとエピゲノムなど複数のオミクスを解析する技術や空間情報を保持した単万単位の細胞を一度に解析する技術など新しい技術が急速に進展。 Human Cell Atlasにつながる。	ディープラーニングなどの第三世代人工知能技術 ✓ゲノムと疾患の相関、医療画像解析、創薬など医療への応用に加え、計測データの解析など広く活用されている。特に、レンズによる結像を行わず、非結像イメージング・コンピュータビジョンイメージング等がイメージング技術として注目 ✓生命科学・創薬・医療のあり方を大きく変える技術として国内外の産・学で注目 ✓データを蓄積・共有する仕組みの検討が必要	光学顕微鏡の回折限界を越えた分解能での観察可能な技術（200nm⇒20nm） ✓2014年ノーベル化学賞 ✓生命をライブ（生きたまま）で可視化可能であるが、「形態を見る」技術だけでなく、今後は更に「動態も見る」ことが期待 ✓日本をはじめ、技術開発が急速に進展。格子光シート顕微鏡は高精度な三次元画像を実現
オルガノイド技術 2010	遺伝子改変免疫細胞治療技術 2011	光分子操作・制御技術 2011
Body on a Chip バイオプリンティング技術 人工的にin vitroで二臓器を作出する技術。ヒトに近い実験系として、生命現象の解明ツールや、創薬のモデル系として期待 ✓2008年度井芳樹（理研）が大脳皮質オルガノイドを報告 ✓2013年、2015年に脳オルガノイド構築に成功 ✓わが国が強みを有するIPS技術を展開可能	腫瘍免疫回避機構に打ち勝つための遺伝子操作が加えられた免疫細胞を用いた治療法 ✓2011年慢性リンパ球白血病を対象として第2世代の抗CD19CAR-T療法との臨床試験で有効性を示すデータ発表 ✓2017年米国FDAは、CD19標的CAR-T療法である「キムリア」を、続いて「Yescarta」を承認 ✓次世代がん医療を担う技術として国内外の産・学で注目	特殊な薬品（抗体）と外部からの近赤外線を用い局所的にがん細胞を破壊する光免疫治療 ✓2011年米国国立がん研究所（NCI）の小林久隆らの研究グループが発表（医療） ✓2015年米国でヒト臨床応用開始。2018年日本でも国立がん研究センターで治療を開始 ✓次世代がん医療技術として国内外の産学で注目 ✓マイクログ波や中性子でも研究が進み、光遺伝学（オプトジェネクス）も含め外部からの刺激による生体内分子制御技術、及びその応用研究

国際ベンチマーク（技術）から見た日本の位置づけ

日本が強みを有する領域（基礎研究）
構造解析、細胞外微粒子、光学イメージング、核磁気イメージング、免疫科学、時間科学、脳神経科学、植物科学、畜産科学、高分子医療、幹細胞・再生医療、オルガノイド、生活習慣病、精神・神経疾患
日本が強みを有する領域（応用研究）
細胞外微粒子、水産、機能性食品、高分子医療、幹細胞・再生医療、精神・神経疾患
世界の潮流だが日本が後塵を拝する領域
遺伝子・細胞治療、がんゲノム医療

今後の方向性

社会課題解決型、産業競争力強化型

健康医療分野	食料・農業、物質生産分野
世界の展望：個別化・層別化医療 ■ [Integration of Bio-Medical Things]“ヒト研究”および“データ研究”の戦略的な加速 ✓ 健康・医療データ収集・構造化・利活用基盤の整備 ✓ non-MD研究者における“ヒト研究”推進支援（学部・大学院時代からの医学教育の実施など） ■ 治療用デザイナー細胞（微生物）創出に向けた基礎技術開発と医療応用	世界の展望：バイオエコノミー ■ 圏場の微生物・作物・環境をつなぐ物質循環の解明 ～真に地球環境にやさしい農業～ ■ 高品質水畜産物の高速・持続可能な生産に向けた品種改良、飼育養殖手法開発 ■ 機能性農産物の創出と植物による高付加価値物質生産 ■ 医薬・化成品など有用物質の持続可能な生産に向けた生体分子、生命システム設計ルール解明 ～核酸、タンパク質、細胞を結び、多層階層的サイエンス推進～

サイエンスフロンティア型

世界の展望：多次元生命システムにおける時空間階層のブリッジング
■ アトミックセルゲイナミクス ～構造・機能予測のための細胞知の統合～
■ ライセルアトラス ～多様・複雑な細胞社会の動的ネットワーク構造を多次元解析により理解～
■ 理論的・実験的（生物学的）アプローチの融合による脳の動作原理の理解
✓ 階層性（脳全体・個別領域・カラム・細胞・シナプス・分子）と時空間的な同期性のスケール

共通して、データ・情報統合型の研究が必要になってきている。そのため、数理・情報の研究者を巻き込み、各研究者からのデータ・情報を集約・統合するプラットフォームを作り、モデリングをしていくことが必要となる。

2.6 ライフサイエンス・臨床医学分野

ライフサイエンス・臨床医学分野における研究対象はミクロなスケール（原子、生体分子）からマクロなスケール（集団、社会）まで多岐にわたり、医学、生物学、自然科学のみならず工学や人文社会系科学の諸領域をも包含する極めて広範な分野である。基礎研究の成果は健康・医療、食料、環境等の社会基盤の形成に広く役立てられる。従って、当該分野の研究開発は、本来、基礎研究から見出された知見や技術シーズが実用化と小規模な実践を経て社会へ実装されたのち、改めて社会の中でその意義や効果が評価・検証され、新たな課題の抽出、仮説の設定へとつながり、それらが再び基礎研究へと還元されるような循環構造を持っている（図 1）。

ICT 技術の進展等によって、社会の中に存在する多種多様なデータの活用が現実的になりつつある昨今は、社会からのフィードバックを将来の研究のきっかけとして活用することが技術的にも可能となり、改めて研究開発の循環を回す重要性が認識されつつある。昨今世界の大きな潮流となっている個別化医療やバイオエコノミーはその最たる例である。

このような時代には、科学技術それ自体を社会・国民の文化として涵養していくことが求められる。多様で独創的な最先端の「知」の資産を創出し続けるとともに、社会・国民との対話により相互にフィードバックしながら、社会として科学を発展させていく文化の形成である。当然これは大学等だけで解決する問題ではなく、循環型のエコシステムを構築すべく政策立案者、産業界、科学界で連携・分担して当たらなければならない。

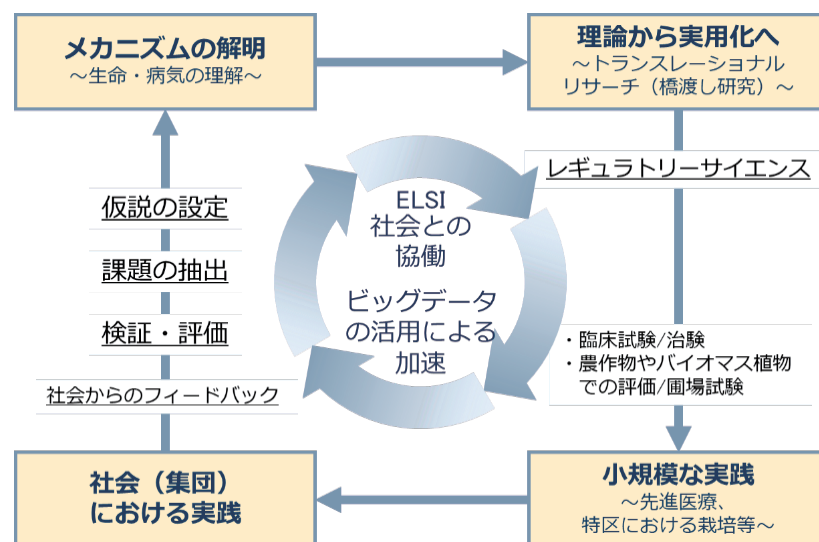


図 1 俯瞰図（研究循環エコシステム）

計測技術や AI・機械学習等をはじめとした ICT 技術の急速な進展は、分野の研究のあり方や手法のパラダイムを変えつつある。自動化、大規模化という流れは今後も続いていくと思われる。

前回 2017 版では、「仮説検証型」のアプローチに加え、大量の生命情報から法則を発見するという「データ駆動型」の新しいアプローチによる生命現象の理解が進展、これからは「精緻な理解」と「予測」が大きな方向性になる、とまとめた。

今回 2019 版では、その発展系として、研究者あるいは研究コミュニティが、研究対象として、研究開発の循環構造、生命の時空間階層を広く見ることができるようになった（見ていかなければならなくなった）こと、および技術進展サイクルの短縮化の結果、研究単位当たりのハイスループット化、高コスト化、つまり「ビッグサイエンス化」が急速に進展していることを挙げたい。

サイエンスの流れとしても、これまで生体の多くの個別の遺伝子やタンパク質が同定されてきたが、その生体内での相関や時空間的挙動（ダイナミクス）はほとんど記述できていない。今後も特定因子の発見よりも相関、ダイナミクス、予測に研究が進むのは自然の流れである。もう一つは、ゲノム医療に代表されるように、従来の物理化学的な計測に加え、社会の様々な状況や変動を大量のデータから観察・解析する「社会計測」という概念も必要になっている。

世界の先端の研究所を見ると、ある意味二極化している。米国ジャネリア研究キャンパス、英国 MRC 分子生物学研究所やドイツのマックス・プランク研究所のように手厚い公的な基盤的経費でサイエンスを深く掘り下げていく方向と、米国ブロード研究所、英国フランシス・クリック研究所、ドイツがん研究センター（DKFZ）のように大規模な「オープンサイエンス、コラボレーション（生物学・医学＋工学＋情報学、生命科学＋医科学＋病院、産＋学、国際）」体制によって基礎からトランスレーションまでワンストップで研究を進めて行く方向である。

これらに共通して、欧米では、先端的な新興融合研究、オープンサイエンス、コラボレーション型の研究を進める土壌として、コアファシリティとファシリティスタッフ（テクニシャン）がまさに核となっている。欧州では、研究所レベル、国レベル、欧州レベルにわたって、大規模のみならず中小規模機器までを対象にした多階層のインフラ・プラットフォーム戦略が構築されている。そのため研究環境に研究支援体制（アドミニ、橋渡し、機器管理・開発等の人材）文化が根付いている。

日本のアカデミアは分散化・たこつぼ化が進み、こうした研究開発の循環構造を回す、生命の時空間階層をつないでいく、といった研究が進めにくい環境・構造になっている。また誰が深い基礎研究を担い、誰が大規模な基礎から応用までの研究を担うのか、エコシステムがうまく構築できていない。次世代シーケンサやクライオ電顕の導入が世界から後れを取っていることもシステムの不備である。

ライフサイエンス・臨床医学分野の論文動向を見ると、生命科学や臨床医学においても日本はこの 10 年で他の国に比べ増加率が低く、ドイツ、英国に抜かれる等相対的に順位を下げている。特に、新興融合分野である X オーム・オミックス分野・インフォマティクス分野の論文を見ると世界についていけないことが明確となっている。

日本でもデータ・情報統合的な研究の推進が可能な研究体制の拠点化とそのネットワーク化による研究エコシステム・プラットフォームの構築が必要であり、政策立案者や研究コミ

ユニティは以下を意識したプログラム・プロジェクトの立案を検討すべきである。

- 研究者が研究に専念できる環境構築
- 機器共用による全体コスト効率化
- 若手研究人材のスタートアップ環境整備
- 異分野融合による新しいサイエンスの創出
- Wet/Dry 統合と人材育成
- データマネジメントと計測技術等の標準化
- マウスからヒトへ、ラボからフィールドへ（人材育成と研究）
- 異分野（生命科学・工学・情報学・医学）の統合や産学連携による基礎研究からイノベーションまでのコスト・時間短縮

以下において、世界と日本の動向（現状と課題）を踏まえ、日本が取り組むべき研究の方向性についても検討する。

この 5 年の世界の政策の大きな潮流を以下のとおりまとめた。

健康・医療分野では、下記が多くの人に共通の優先項目となっている。

- ゲノム医療、個別化・層別化医療（がんを中心に）
 - ヘルス・メディカルインフォマティクス、AI 医療、AI 創薬
- 創薬：がん免疫、中枢神経系、感染症
 - 大規模な官民パートナーシップによる産学協働型研究（特に感染症や精神神経疾患等）。
- 細胞治療・遺伝子治療、再生医療
- 脳神経研究（長期的研究）

グリーン・ホワイトバイオ分野では、気候変動やバイオエコノミーといった国際課題に加え、技術的にはゲノム編集と AI・機械学習の進展を受けて、食料・農業分野は持続可能、気候変動、循環型、スマートといったキーワードで研究が実施されていることが見て取れる。物質生産分野は合成生物学の取組が米英中を中心に推進されている。

以上のように、研究投資対象となっている研究テーマは世界的に共通するところが多い。個別化・層別化医療やバイオエコノミーに代表されるように社会・国民を巻き込んだ研究開発が大きな潮流となってきている。

2 章に掲載した 35 の研究開発領域の全体を見て、この 2～3 年の大きな技術・研究の変化、進展を以下のとおり分析した。

1. 一細胞オミックス技術の隆盛と細胞社会・不均一性の理解や疾患の理解
2. クライオ電顕、超解像顕微鏡・光シート顕微鏡等イメージング技術の発展による各生体スケールの解像度の向上
3. ゲノム編集技術の精度の向上による医療、食料応用への展開
4. AI・機械学習の生命科学、臨床への着実な浸透

5. 新しい創薬等アプローチの出現
6. 個別化・層別化医療、精密医療、ゲノム医療・創薬およびバイオエコノミー等社会・国民の理解が必要な研究開発の大きな潮流の継続

また、同じく 2 章の国際ベンチマークからは、日本は「構造解析」、「細胞外微粒子」、「免疫科学」、「時間科学」、「脳神経科学」、「光学イメージング」、「核磁気イメージング」、「植物科学」、「畜産科学」、「高分子医薬」、「幹細胞・再生医療」、「オルガノイド」、「生活習慣病」、「精神・神経疾患」等において基礎研究に強みを有する。また、「細胞外微粒子」、「水産、機能性食品」、「高分子医薬」、「幹細胞・再生医療」、「精神神経疾患」等において応用に強みを有する。

一方で、「遺伝子・細胞治療」や「がんゲノム医療」等世界の大きな潮流となっている領域で後塵を拝する。

以上の通り、世界の研究開発の動向、世界の政策、日本のこれまでの政策、日本の強み・弱みを俯瞰した上で、今後国として手を打つべきテーマについて、9 つを抽出した。

社会課題解決型、産業競争力強化型

健康医療分野

世界の展望：個別化・層別化医療

- 【Integration of Bio-Medical Things】“ヒト研究”および“データ研究”の戦略的な加速
 - ✓ 健康・医療データ収集・構造化・利活用基盤の整備
 - ✓ non-MD 研究者における“ヒト研究”推進支援（学部・大学院時代からの医学教育の実施など）
- 治療用人工細胞創出に向けた基盤技術開発と医療応用

食料・農業、物質生産分野

世界の展望：バイオエコノミー

- 圃場の微生物・作物・環境をつなぐ物質循環の解明～真に地球環境にやさしい農業～
- 高品質水畜産物の高速・持続可能な生産に向けた品種改良、飼育養殖手法開発
- 機能性農産物の創出と植物による高付加価値物質生産
- 医薬・化成品など有用物質の持続可能な生産に向けた生体分子、生命システム設計ルール解明 ～核酸、タンパク質、細胞を結ぶ、多階層横断的サイエンス推進～

サイエンスフロンティア型

世界の展望：多次元生命システムにおける時空間階層のブリッジング

- アトミックセルダイナミクス～予測のための細胞知の統合～
- ライブセルアトラス～多様・複雑な細胞社会の動的ネットワーク構造を多次元解析により理解～
- 理論的・実験的（生物学的）アプローチの融合による脳の動作原理の理解
 - ✓ 階層性（脳全体・個別領域・カラム・細胞・シナプス・分子）と時空間的な同期性のスケール

図 2 今後の研究の展望・方向性（日本）

これらに共通して、データ・情報統合型の研究が必要になってきていることがいえる。そのためには、数理・情報の研究者が先導して、各研究者からのデータ・情報を集約・統合するプラットフォームを作り、モデリングをしていく体制を構築していくことが必要となる。

また、ELSI がイノベーションの Co-driver という認識の下、社会・国民とのコミュニケーションが求められるプログラム・プロジェクトには、社会科学者や法学者等の参画を必須とし、Responsible Research and Innovation を研究文化として、ひいては科学を国の文化として根付かせることが求められる。

国際比較表

< 基礎基盤科学技術（分子・細胞、組織） >

		遺伝子発現機構		ゲノム編集		ケミカルバイオロジー		構造解析技術		オミクス （プロテオミクス、 メタボロミクス、 多層オミクス）		細胞オミクス、 細胞系譜・地 図技術		細胞外微粒子・ エクソソーム		免疫科学		時間科学 （体内時計）		老化科学		微生物叢 （マイクロバイ オータム）		感覚器科学		脳・神経科学	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
日本	基礎	◎	↗	○	↗	○	→	◎	→	○	→	○	→	◎	↗	◎	↘	◎	↗	○	→	○	↗	○	→	◎	→
	応用	○	→	△	→	○	→	△	↘	○	→	△	→	◎	↗	○	→	○	→	○	→	△	→	○	↗	○	→
米国	基礎	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→
	応用	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→
欧州	基礎	◎	→	○	↘	○	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	○	→
	応用	○	→	○	→	○	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	○	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	○	→
中国	基礎	○	↗	○	→	○	↗	◎	↗	△	↗	○	↗	○	↗	◎	↗	○	↗	△	↗	◎	↗	○	↗	△	↗
	応用	○	↗	◎	↗	○	→	△	→	△	↗	○	↗	○	↗	○	↗	×	↗	△	↗	-	-	△	↗	△	↗
韓国	基礎	○	→	○	↗	○	→	△	→	△	→	△	→	○	↗	○	↗	△	→	△	↗	○	↗	○	→	△	↗
	応用	○	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	○	↗	△	→	△	↗	○	→	-	-	△	→	△	↗

< 基礎基盤科学技術（分析・計測技術） >

		電子顕微鏡		イメージング 光学		イメージング 生体		生体分子計測		ヘルスケアIoT		計測データ解析 (AI)	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
日本	基礎	○	→	◎	→	◎	↘	△	→	○	→	○	↗
	応用	○	→	○	→	○	→	○	→	○	↗	△	→
米国	基礎	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	応用	○	↗	○	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗
欧州	基礎	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	→	○	↗
	応用	○	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	→	○	↗
中国	基礎	◎	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	◎	↗
	応用	△	→	△	↗	○	↗	○	↗	○	↗	◎	↗
韓国	基礎	△	→	△	↗	○	→	○	→	◎	↗	△	→
	応用	×	→	△	→	△	→	○	→	△	→	△	→

<食料・農水産業、生物生産>

		環境微生物・合成生物学		植物・農業		水産		畜産		機能性物質・食品	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
日本	基礎	○	↗	◎	↗	○	↗	◎	↗	○	→
	応用	○	↗	○	→	◎	↗	○	↗	◎	↗
米国	基礎	◎	↗	◎	→	○	→	◎	→	○	→
	応用	◎	↗	◎	↗	○	→	◎	↗	◎	→
欧州	基礎	○	↗	◎	→	◎	↗	◎	→	○	→
	応用	◎	→	○	→	◎	↗	○	→	○	↗
中国	基礎	○	↗	○	↗	○	→	◎	↗	○	→
	応用	○	↗	○	↗	○	→	◎	↗	○	→
韓国	基礎	○	→	△	→	○	→	○	→	○	→
	応用	○	→	△	→	○	→	○	→	○	↗

<健康・医療>

		中分子医薬		高分子医薬 (抗体、核酸)		創薬・インフォマティクス・AI シリコン創薬		遺伝子治療・細胞治療		再生医療		オルガノイド・臓器チップ		診断技術・バイオマーカー		診断技術・がんゲノム医療		生活習慣病 (CKD, COPD, NASH)		神経疾患・精神		感染症 (ワクチン・アジユバント・抗ウイルス薬)	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
日本	基礎	○	↗	◎	→	○	↗	△	↗	◎	→	◎	↗	○	↗	△	→	◎	→	◎	↗	○	→
	応用	○	↗	◎	↗	○	↗	△	↗	◎	↗	○	↗	○	↗	△	↗	○	↘	◎	↗	○	→
米国	基礎	◎	→	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	→
	応用	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	→
欧州	基礎	○	→	○	→	◎	→	◎	↗	○	↗	◎	↗	○	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	○	→
	応用	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	○	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→
中国	基礎	×	→	○	→	◎	↗	○	↗	○	↗	△	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	△	↗
	応用	×	→	○	↗	◎	↗	◎	↗	○	↗	△	↗	○	↗	△	↗	○	↗	△	→	△	↗
韓国	基礎	×	→	○	→	○	→	×	→	△	↗	△	↗	○	→	×	↗	△	→	△	↗	△	→
	応用	×	→	○	↗	△	→	△	↗	○	↗	△	↗	△	→	△	↗	△	→	△	→	○	→

3. 科学技術イノベーションの今後の課題

この章では、第1章（俯瞰の前提）で見てきた世界全体の動きと、第2章で見てきた各研究開発分野の動向を合わせて、今、置かれている現状を再確認するとともに、今後の我が国の科学技術イノベーションを議論する上で、重要と考えられるポイントを考察してみたい。

1) 社会の変化と科学技術の理念の変化

ここでは第1章に述べたことの中から、特に「ブダペスト宣言」による21世紀の科学技術の理念転換と、それを具現化する大目標として「持続可能な開発目標－2030年アジェンダ」（SDGs）に注目することにする。

平成の時代が始まった1989年にベルリンの壁が崩れて東西冷戦が終わり、3年後の1992年にインターネット・サービスが一般に開放され、世界の政治・経済・技術の基盤が大きく変わった。続く30年間に、気候変動、大災害、エネルギー・資源、健康・医療、人口・食料、新技術と雇用、格差の拡大、情報セキュリティ等、社会的経済的な難問が噴出してきた。第1章で詳しく述べたように、近代社会の規範である民主主義、資本主義、科学啓蒙主義は大きく揺らぎ、今や世界中で国際協調主義と一国主義の衝突、技術覇権争いが起こっている。

インターネットがインフラとして社会経済と生活に深く組み込まれていく一方で、AIやゲノム等の新技術と人間が共生していくことが、21世紀社会にとって最大の課題の一つとなっている。このように先端技術がたちまちのうちに社会の中に溶け込んでいく時代になっていることを背景として、科学技術が社会から独立した存在ではなく、社会と相互に影響を与え合う関係にあり、科学技術が社会に対する責任を負うという認識が生まれてきた。

1999 年の「ブダペスト宣言¹」は「知識を生産すれば社会の進歩につながる」という、単純な啓蒙思想に基づいて価値観とシステムを築いてきた近代科学技術に歴史的な転換を

¹ 1999 年 6 月、ハンガリーのブダペストにおいて、ユネスコと国際科学会議（ICSU）によって開催された世界科学会議で発表された。この会議は 21 世紀の科学技術や科学のあり方を科学者の側から問い直した世界的な転機となった。従来の「知識のための科学（進歩のための知識）」だけでなく、「平和のための科学」、「開発のための科学」、「社会の中の科学、社会のための科学」の 4 つを柱とする理念が掲げられた。ブダペスト会議以降、科学と社会のあり方について「世界科学フォーラム（World Science Forum, WSF）」で議論が続けられている。今年（2019 年）11 月、WSF ではブダペスト会議 20 周年を記念して、「科学の倫理と責任」をテーマとして、この 20 年間の社会と科学の急激な変容を踏まえて、ブダペスト宣言の再検討について議論が行われる予定である。

迫るものであった。しかし、この「ブダペスト宣言」の理念を研究現場で実践するための目標や方向は十分具体化されてこなかった。

次の転換点は2015年である。この年に国連の全加盟国が一致して、21世紀の人類と地球の共通ビジョンとして「持続可能な開発目標－2030年アジェンダ」（SDGs）を決議した。ここで設定された17ゴールと169の目標の達成と課題解決に向けて、世界中で科学技術に対する期待はきわめて大きい。さらに最近では2050年を視野に入れたゴール設定も話題になっている²。ここに来て、ようやく「ブダペスト宣言」の理念が具体的な行動と結びつく機会が生まれたと言える。

2) 科学技術コミュニティはどう変わりつつあるか

SDGsのような社会に直結した課題解決にあたっては、広い視野で人間と社会や環境との関わり合いを観る、人間の内面にまで思慮を払う、関係者の間の対話と信頼の醸成、異なる分野の研究を組み合わせしていく等のアプローチが欠かせない。

ここで、SDGsの国連決議の副題「Transforming our world」に注目したい。現在の経済産業構造、地域の政産学官システム、人々のライフスタイル、価値の評価方法等を抜本的に変革（transform）して、SDGsゴールの達成を目指すという世界全体の強い意志の表れとみることができる。この中には、科学技術、大学、教育の方法の改革も含まれる。内外の科学技術コミュニティは過去2世紀にわたって形成されてきた近代科学技術の価値観とシステムに対して、「ブダペスト宣言」に沿った価値とシステムの転換を行う絶好の機会と動機付けを与えられていると認識して、具体的な行動が求められよう。

少しずつではあるが変化も現れ始めている。理工系の国際協議会と社会科学系の国際協議会の合併³、Global Research Council（GRC）⁴でのSDGsの検討、国内のいくつかの大学でのSDGs対応の本部設置等の動きである。

上で述べたように、SDGsのような高いビジョンを現実の社会や人々のニーズ、希望に具体化し、アジェンダ設定や技術の社会的影響評価等を行うには、理工医系だけでなく、経済学、心理学、歴史学、文化人類学等人文・社会科学分野との協働が必須となる。多様でローカルな社会課題を扱うには、普遍性を重視してきた科学技術の方法に新しい仕組みと評価軸をとり入れる必要もある。

² TWI2050 報告：SDGs は 2030 年の 17 つのゴールを示しているが、2018 年秋にウィーンの IIASA を中心に世界中の専門家が協働してまとめた、2050 年の世界のゴールを示した“The World in 2050 (TWI2050)”が、大きな反響を呼んでいる。次の 6 つが主な変革として強調されている。“Digital revolution”, “Human capacity and demography”, “Smart cities”, “Consumption and production”, “Food, biosphere & water”, “Decarbonization & energy”。

³ 2018 年 7 月、国際科学会議（ICSU）と国際社会科学協議会（ISSC）が合併して国際学会会議（ISC）が誕生した。

⁴ 世界中の主なファンディング機関や研究機関により構成されている団体。

3) 各国の科学技術政策の転換

今や、SDGsは企業、特に発展途上国を含めて展開しているグローバル企業や、自然環境に依存することが多い環境・エネルギー分野の企業にとっては戦略上の不可欠な要素になっている。現実にはSDGsはESG投資⁵のように投資家の巨額の投資判断にも影響を与えるようになっている。当然、各国の産業振興政策、輸出戦略、外交戦略の方向付けにおいても、SDGsは重要なウェイトを占めるようになっている。

世界の各国では、このような時代の急速な変化と、それぞれの国情に合わせて、科学技術が果たす役割の再認識がおこなわれている。ある発展途上国にとっては、科学技術は自国民に安全な水、食料、医療を提供するために必須のものであるだろうし、ある先進国にとっては科学技術とは最先端技術をいち早く実現して、その知的財産によって世界から富を得る手段となるであろう。

各国にとって、それぞれの事情に応じて科学技術に対する公的資源配分の増減とそのバランスを取ることが重要な政策課題になっている。さらに、その政策と資源投入を実効あるものにするために、関係の組織や施策、評価法等について、証拠や経験に基づいてトップダウン（政策から研究開発現場へ）とボトムアップ（現場から政策へ）の議論を積み重ねて各ステークホルダーの信頼と合意を得ながら、政策手段の再設計とマネジメントの改良を進めていくことが重要となっている。

21世紀に入って、科学技術政策はその地平を大きく広げている。「ブダペスト宣言」において強調された科学技術と社会の相互関係は、科学技術と政策の相互関係とも重なり合う。従来は科学技術を振興するための予算や制度等のさまざまな施策を指す「科学技術振興のための政策（Policy for Science）」が中心であったが、「政策課題解決のための科学技術（Science for Policy）」が重視されるようになった。後者はさまざまな社会的課題を解決しようとしている政策に対して科学技術が積極的に寄与することを指す。この両面を実現していくためには、政策形成から実施、評価、政策形成へのフィードバックに至るプロセスを大きく改革する必要がある、それは単に科学技術政策に限らず、全分野の政策と政策手段に関係するものである。

上述したように、科学技術政策が、新しい知識の生産に加えて社会課題解決のために知識を活用する方向に拡大している現在、その守備範囲は、国家の経済産業、国土計画、交通運輸、健康、労働、環境、農業、地方等の各政策に重なるため、各政策との協働による価値の創造が重要になっている。2018年に内閣府がまとめた「統合イノベーション戦略」は、我が国として初めて科学技術政策の地平をその方向に大きく広げたものと理解できる。このような潮流は、EUの科学技術政策（“Horizon 2020”やその後継の現在策定中の“Horizon Europe”）をはじめ、世界的なものとなっている。

⁵ 機関投資家の投資意志決定プロセスに、環境（Environment）、社会（Social）及び企業統治（Governance）の要素を組み入れること。2006年、国連が提唱した「責任投資原則」において取り上げられた。

4) 新しい時代に合ったイノベーション・エコシステムの構築

科学技術の研究開発は、大学や国だけでなく、民間企業（産業）の役割も重要である。

先進国においては、科学技術振興に振り向ける国家予算の規模に比べて、民間企業が投資している研究開発費の総額ははるかに大きい。たとえば、日本の研究開発費総額18.4兆円（2016年）のうち、政府負担は約15%、企業負担は約78%である⁶。これを見れば、国だけでなく、民間の研究開発活動を含めて一体のものとして捉える重要性がわかる。

研究開発を一つの流れとして見ると、通常、国がもっぱら投資している「基礎研究⁷」フェイズと、産学官連携で推進することの多い「応用研究⁸」フェイズと、各企業の個別投資による「開発研究⁹」フェイズがあり、最終の開発研究フェイズで生み出されたモノやサービスが市場や社会につながっていく。イノベーション実現のためには各フェイズが相互にしっかりとつながることが何よりも重要であり、かつ「開発研究」から「基礎研究」に立ち返る必要のある研究課題も存在することをしっかり認識した上で、現場での研究開発がマネジメントされる必要がある。

このように眺めると、国が基礎・基盤研究を持続的にしっかりと支えるということと、民間企業が開発研究より上流にも目を向けるとともにそれらの成果を取り入れ、いち早く差異化と先行者利益を確保することがあらためて重要点として浮かび上がる。ベンチャーの重要性もここにある。産学官がエコシステムを形成して我が国全体の持続的発展を協働して支えることを、再認識する必要がある。

民間企業の研究開発に対して、最近ではさらに「ESG投資¹⁰」という外部視点の影響も加わるようになった。環境、社会に配慮した製品やサービスを生み出そうとする企業には機関投資家の注目が集まる。そのような企業は資金調達も有利となり、研究開発もスピードアップできる。このように一国の産学官連携の枠を大きく越えたグローバルな枠組みも、イノベーション・エコシステムを考えるには重要となる。

このエコシステムは人材の面でも同じである。研究開発者が基礎研究～開発研究の各フェイズに閉じこもっているだけでなく、フェイズをまたがる移動も必要であろう。研究開発のスピードが速い人工知能やロボット等の分野では、大学発ベンチャーの活発な起業に見られるように、フェイズをまたがる人材の還流はすでに始まっている。この他の研究分野も含めて、民間企業、大学、公的研究所等の間で人材の循環が容易に行えるような仕

⁶ NISTEP「科学技術指標 2018」（2018 年 9 月）による。欧米諸国も政府負担割合はおおよそ 20～30%程度である。

⁷ 総務省科学技術研究調査における「基礎研究」の定義「特別な応用、用途を直接に考慮することなく、仮説や理論を形成するため又は現象や観察可能な事実に関して新しい知識を得るために行われる理論的又は実験的研究をいう。」に拠った。

⁸ 総務省科学技術研究調査における「応用研究」の定義「特定の目標を定めて実用化の可能性を確かめる研究や、既に実用化されている方法に関して新たな応用方法を探索する研究をいう。」に拠った。

⁹ 総務省科学技術研究調査における「開発研究」の定義「基礎研究、応用研究及び実際の経験から得た知識を活用し、付加的な知識を創出して、新しい製品、サービス、システム、装置、材料、工程等の創出又は既存のこれらのものの改良を狙いとする研究をいう。」に拠った。

¹⁰ 2018 年 4 月時点で、署名機関 1,900 以上、運用投資高 19.1 兆米ドルに達している。

組みや組織風土が求められる。

特定の研究開発分野においては、その分野の産業自体が経済的・社会的な構造変化の影響を受けることもある。我が国の情報通信業界は国を越えて活動するGAFAに代表されるプラットフォームによる市場寡占に、また電機業界は製品のコモディティ化に直面して、かつてのような勢いが見られない。また、環境・エネルギー分野においては、もともと軍事と一体的に進めることの多い他国とは人員や資金の量的規模も大きな差がある上に、バブル崩壊以降は基礎基盤的な研究と技術を企業内に抱えきれなくなっている状況が続いているため、人材が集まらない、基盤的な技術と施設の維持が困難等、という悪循環に陥りがちという。このように、産業界が資金や人材の十分な後ろ楯になれない状況では、学术界の活力も低下し、若い人材の参入も危ういという点は認められることである。

逆に、たとえば人工知能、特に「深層学習」というブレイクスルーが、沈滞気味であったソフトウェア分野を活気づかせ、さらに自動車の自動運転という巨大市場を形成するに至っているのも最近のことである。このように基礎研究の成果によって、新旧の産業が一気に活性化することもまた事実である。

5) 人と社会と科学技術

東日本大震災（2011年3月11日）とそれに伴う原子力発電所事故によって、我が国の科学技術や研究者・技術者に対する社会の信頼が失われたことを背景として、現在の第5期科学技術基本計画（2016年～20年）では、計画の推進に当たっての重要事項として「科学技術イノベーションと社会との関係深化」が強調された。すなわち、イノベーションの創出には、多様な価値観を持つ市民（ユーザーやステークホルダー）からの理解、信頼、支持を獲得することが大前提となるため、科学技術と社会の関係を再考するとともに、社会の多様なステークホルダーとの対話と協働に取り組むことが明記されている。

このことを科学技術にたずさわる者が真摯に受け止め、研究開発のあらゆる局面で常に社会との関係を意識することが必要である。その際には、研究自体の健全性を確保する研究公正から、ELSI¹¹とRRI¹²の視点、さらにはより良い世界の実現を目指すSDGsの視点までももたげて考えなければならない。

我が国の科学技術と社会の関係において、もう一つ重要な柱は「地域」である。少子高齢化や産業縮小の現実直面している地域社会の持続的発展に対して、SDGsやSociety 5.0のコンセプトを踏まえて、科学技術が寄与することへの期待は高い。たとえば、都市部をどのように再デザインするか、過疎地の交通手段や医療手段をどうすべきか、人手不足の農作業をどのように機械が代替できるか等、具体的かつ喫緊のニーズと課題は豊富に存在する。そのように地域に焦点を当て、その社会的問題に現実に対応し、持続可能な地域を

¹¹ Ethical, Legal and Social Issues. 科学技術における倫理的・法的・社会的問題。

¹² Responsible Research & Innovation. 責任ある研究とイノベーション。

形成していくことは、科学技術に期待される重要な役割であるだけでなく、ローカルからグローバルへ、世界にインパクトのある特長あるイノベーションをも起こせる可能性を持つ。

6) 課題として浮かび上がってきたもの

(1) 日本のSTI政策の形成とマネジメントの体系化

科学技術に対する基本理念を転換させた「ブダペスト宣言」では、科学を「進歩のための科学」、「平和のための科学」、「開発のための科学」、「社会の中の科学、社会のための科学」という4つに分類した。これらは日本のSTI政策に対応付けると、さしずめ「基礎研究」、「個々の分野での実用化研究」、「（社会の）課題解決のための研究開発」に対応するであろう。日本においてもそれぞれに応じて制度上、資金上の支援が行われてきている。

しかし、これらの相互バランスはどうあるべきか、どのタイミングで方針の見直しを行うか等について、全体像が描かれていないのではあるまいか。たとえば、基礎研究に対して国の資金をどれだけ割り当てるのが妥当であろうか。また課題解決型研究開発やスタートアップ支援等、他の研究開発資金も合わせて日本全体のポートフォリオを十分な検討を踏まえて組む必要がある¹³。また、こうした政策を証拠に基づいてマクロに俯瞰する方法の開発や、関連する人材の確保も重要な課題である。

もう一つの懸念は、施策の実施結果に対する評価が十分行われずに次の施策に移ってしまい、実施段階で得られた多くの知見や教訓が蓄積され、関係組織の間で共有されていないのではないか、という点である。

たとえば、「研究評価の大綱的指針」（2012年改訂版）の中では「プログラム評価」の重要性が強調されたが、現状ではまだ十分実行されていない状況である。STI政策は、通常、「政策・施策」レベルで決定された戦略・方針の下で、具体的に資金が投入される「プログラム」が設定され、その下で「プロジェクト」が複数実施される多層構造を持っている。我が国の現状は、現場活動である「プロジェクト」のモニタリングや事前・事後評価等はしっかりと行われている反面、その上位にある「プログラム」の設定段階では事前評価と関係者間の合意と信頼の形成が不足していると言える。「プログラム」の実施状

¹³ 参考対象として EU の競争的研究資金の状況を取りあげる。Horizon 2020（2014 年～20 年）は 7 年間で総額 770 億ユーロの予算を持つ。そのうち最先端研究と研究基盤の強化を目指す「卓越した科学」領域には 242 億ユーロ、産業強化を目指す「産業技術リーダーシップ」領域に 165 億ユーロ、「社会的課題への取組み」領域に 286 億ユーロを割り当てている。また後継の Horizon Europe（2021 年～27 年）では総計 920 億ユーロのうち、「卓越した科学」領域に 258 億ユーロ、「社会的課題の解決」領域に 527 億ユーロ、スタートアップの支援等を含む「市場創出の支援」領域に 135 億ユーロを割り当てる（2018 年 6 月時点の案）。
https://ec.europa.eu/research/horizon2020/pdf/press/fact_sheet_on_horizon2020_budget.pdf,
https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/budget-may2018-research-innovation_en.pdf（2018 年 12 月 20 日閲覧）

況の評価とマネジメントの変更、プログラムの再設計には、ほとんど関心が寄せられず、その活動への人材と資金投入が十分なされていない。そのため、「プログラム」の設計からマネジメントにかけての経験を蓄積・活用しないまま、次の新たな「プログラム」を大急ぎで立ち上げるということを繰り返して、本質的な改善ができない。

これが、研究資金の効果的・効率的な運用、当初目標に沿った成果の形成を阻害し、内外へのプログラム全体の発信力等を低下させている大きな原因ではあるまいか。本来、我が国の中には将来性のある研究テーマや研究人材が多く存在するにもかかわらず、不十分なプログラム設計とマネジメントによって、研究者が疲弊し、研究成果の質・量に悪影響を及ぼしてはいないだろうか。

今後、SDGs時代、第4次産業革命時代を迎えて、研究の対象や研究の手法にも大きな変化が生じてくる。その一方で、我が国の研究者人口は大きく減少し、研究環境の維持や研究の質そのものの維持も難しくなってくるであろう。そのような時こそ、その研究活動を国として支える「プログラム」の設計とマネジメントを常に見直し、改善することが、我が国全体の研究の質と効率を高め、科学技術イノベーションの力を強化することにつながる。

（2）研究スタイルの大きな変化

第2章で述べられている各研究開発の俯瞰報告では、情報通信、特にビッグデータと人工知能の急速な進展によって、研究開発のスタイル自体が変貌していることが特に強調されている。

たとえばナノテクノロジー・材料分野では国際的な競争が激化しているために、物質・材料の発見から量産化技術の開発までのスピードアップが要求されている。そのために情報科学を用いて材料設計を効率化するマテリアル・インフォマティクスのような新しい技術が基盤となるだろう。

またライフサイエンス分野でも、自動化、大規模化の流れが見られる。そこでは数理・情報の研究者が先導して、各研究者からのデータ・情報を集約・統合するプラットフォームを作り、モデリングをしていくような体制が主流になると言われる。一方、このような新しい研究分野では、誰が深い基礎研究を担い、誰が大規模な応用から実用化までの研究を担うのか、日本全体でエコシステムがうまく構築できていないことも指摘されている。これもまた全体フレームワークの欠如と言えよう。

我が国の学术界や産業界がこのような研究スタイルの劇的な変化に追従できるか危ぶまれている。またその変化に向けて変革しようとする学术界や産業界を、国が資金面、制度面で適切に支援することが必須である。

このような研究スタイルの変化に伴って、言語や文化的背景の異なる異分野の研究者、海外研究者との協働もこれまで以上に増えてくるはずである。こうした中で、科学技術の

質（Quality）と健全性（Integrity）を維持することが、あらためて重要となる。そこでは競争と協調、チームサイエンス¹⁴や集合知の知見が重要になる。また海外との交流が活発になるとともに、安全保障貿易管理への目配りも必要になる。このような“オープン”と“クローズ”をバランス良く使い分けることも、我が国の研究者と科学技術コミュニティーにとって研究スタイルの変革になる。

（3）基礎研究と技術基盤への持続的な支援

SDGs に代表されるように、21世紀の社会経済が直面する課題を克服するために科学技術の知識や経験の活用への期待はたいへん大きい。

一方で、長い年月を要して生み出してきた科学技術の「果実」をひたすら刈り取ることにだけ目を向けているうちに、次世代の種蒔きがおろそかになる危険があることも事実である。種から芽が出て、しっかりとした成長の軸が形成されるまで、安定的に支援する条件や体制を整えることが不可欠である。当然ながら、蒔いた種がすべて芽を出すことはない。さらにそれが成長して果実となり、実社会に有用であると分かるまでには相当の期間を待たなければならない。

基礎研究と人材育成のための投資には、そのような不確実性が常につきまとう。このようなリスクは国レベルで負わざるを得ない。基礎研究と課題解決型研究への投資のバランス問題は、財政状況の厳しい下で各国の為政者は厳しい判断を求められる。

たとえば、国連の STI for SDGs の議論の場で繰り返し強調されているのは、「SDGs への科学技術の対応は課題解決型だけでは持続しない、良い成果は上がらない」という点である。科学技術への公的投資全体の20～30%程度を、基礎研究と人材の分厚い基盤の持続的形成と維持に当てる必要があるとの意見もある。その出口は、課題解決のための新しい知識の発見であり、技術の飛躍的発展のこともあるし、将来のノーベル賞にもつながるであろう。そして若い人にとって魅力ある職業にもなる。

また、科学技術における、計測や加工技術、セキュリティ等の基盤技術と人材確保への持続的投資は、地味で軽視されがちであるが、一国の産業と安全の基盤であるという認識を改めて確認する必要がある。国の科学技術基盤は、プロジェクト型の研究開発だけで支えられるものではない。多様な基礎研究と基盤技術への持続的な投資について、国民を含めてしっかりしたコンセンサスを形成することが必須である。

たとえばEUのHorizon 2020や次期計画のHorizon Europeの枠組みにおいては、基礎研究と基盤整備に対して予算枠をあらかじめ30%前後に設定している¹⁵。基礎研究や基盤整

¹⁴ 複数人による研究活動全般を指す。それを対象として 1970 年代から社会学者によるラボラトリ研究がおこなわれてきた。米国では 2000 年以降、「チームサイエンスの科学」（SciTS）の活動も行われている。

¹⁵ Horizon 2020 では「卓越した科学」領域には総額 770 億ユーロ中、244 億ユーロを割り当てている。また後継の Horizon Europe では 920 億ユーロのうち、最先端研究の支援に 258 億ユーロを割り当てる予定である（2018 年 6 月時点の案）。

備に対する投資効果を事前に予測すること自体が困難である以上、あらかじめ一定の枠を決定して、安定的に確保することが重要である。それは、研究の現場活動と人材のキャリアパスにおける心理的ストレスの緩和にも効果があるはずである。

(4) 分野を越えた連携とそのための素養の涵養

現在の第5期科学技術基本計画は「Society 5.0」をビジョンに掲げ、SDGs と歩調を合わせて、AI・ビッグデータ時代に経済だけでなく社会的・公共的価値の創出、人間重視をめざす野心的な試みといえる。その意味で、今は科学技術政策の大きな転換点とみることができる。では、Society 5.0 や SDGs のビジョンを研究現場の実行と動機付けにどう結び付けるのか。

まず、政策を策定する側と科学技術活動の現場とが、相互に信頼しながらトップダウンとボトムアップの率直な意見交換を継続的に行うプラットフォームを構築すること、各省・各ファンディング機関を横断した水平連携等が必要であろう。

また AI、ビッグデータ、ゲノム編集といった、人類の生存と日々の生活に直接インパクトを与える新しいフロンティア技術の開発と利用、将来方向の検討に当たって、第1章（俯瞰の前提）で強調したように、一人一人の研究者も世界観と歴史観を身に付けて活動することが求められる。世界水準の研究開発を実施する上でも、そうした思考の枠組みと素養が必要となっており、その涵養のために若手世代向けの教育研究環境を早急に整えていくことが大切である。

7) 最後に

これまで述べてきたように、最近の世界動向や科学技術動向を見ると、科学技術が社会に及ぼす影響はその規模と速度を急拡大しており、今や科学技術を論じるためには社会そのものを論じなければならず、またその逆も成り立つ。教育、科学、技術、企業、イノベーション、経済、金融、社会、市民、政策等は切り離せるものではなく、総体として議論しなければならない。

また、限られた資源をどのように配分するかを具体的に議論するためには、将来、日本をどのような国にしてゆきたいかという大きなビジョンを持つことが前提となるだろう。少子高齢化の進行や自然災害が多発するという環境の下で、どのような社会的課題を科学技術によって優先的に解決してゆくか、衰えた産業をこれからどのように支えていくのか、あるいは基礎研究にどの程度の投資を行うかは、そのビジョンと国民の合意と覚悟がなければ決定することはできない。将来を担う若者が希望と夢を持って科学技術に参画し、関心を持ってほしい。このようなとき求められるのは、俯瞰的な視野を持ちながら、研究開発現場の実情をよく把握理解し、実際に施策を設計し、実行に移せる政策的リーダー

ーシップではないだろうか。

CRDS俯瞰報告書2019は、第1章（俯瞰の前提）で強調した大きな時代の転換期にあつて、科学技術の研究者、技術者、政策担当者、マネージャーなどが、時代の変化を共有し、科学技術の動向を俯瞰的に把握し、自らの位置を認識した上で、それぞれの役割と責任を果たし、分野や組織を越境して、よりダイナミックに拡大し、次の世代へ科学技術の魅力を継承し、拡大していく大きな刺激と知識を提供するものと期待している。

また、この報告書が、今年本格化する第6期科学技術基本計画の検討に資するとともに、科学技術と社会とのコミュニケーションと信頼の醸成のための基盤となり、科学技術の多様な国際協力の展開に貢献をすることを期待したい。

（付録）研究開発の俯瞰報告書（2019 年）全分野で対象としている 俯瞰区分・研究開発領域一覧

1. 環境・エネルギー分野（CRDS-FY2018-FR-01）

俯瞰区分	研究開発領域
エネルギー	エネルギー資源探査・開発技術
エネルギー	火力発電
エネルギー	CCU（Carbon Capture Utilization）
エネルギー	原子力利用
エネルギー	太陽光発電・太陽熱発電
エネルギー	風力発電
エネルギー	バイオマス
エネルギー	その他の再生可能エネルギー（地熱、海洋）
エネルギー	電気エネルギー利用
エネルギー	熱エネルギー利用
エネルギー	化学エネルギー利用
エネルギー	基礎化学品合成プロセス
エネルギー	燃焼
エネルギー	トライボロジー
エネルギー	エネルギーシステム評価
環境	気候変動観測
環境	気候変動予測
環境	水循環
環境	水処理
環境	生物多様性・生態系の把握
環境	生物多様性・生態系の管理・活用
環境	環境分析・物質動態
環境	除去・浄化技術
環境	資源・生産・消費管理
環境	リサイクルと循環利用
環境	健康・都市生活

2. システム・情報科学技術分野（CRDS-FY2018-FR-02）

俯瞰区分	研究開発領域
人工知能・ビッグデータ	機械学習
	画像・映像解析
	自然言語処理
	AI ソフトウェア工学
	意思決定・合意形成支援
	データに基づく問題解決
	計算脳科学
	社会における AI
ロボティクス	認知発達ロボティクス
	生活支援ロボット
	医療ロボット
	海中ロボット
	宇宙ロボット
	インフラ保守・建設ロボット
	災害対応ロボット
	ソフトロボティクス
	生物規範型ロボティクス
	産業用ロボット
	研究開発用ロボット
	ナノロボット
社会システム科学	計算社会科学
	社会インフラマネジメント
	サイバーフィジカルセキュリティ
	社会システムアーキテクチャ
	制度設計
	サービスサイエンス
コンピューティングアーキテクチャ	プロセッサアーキテクチャ
	量子コンピューターサイエンス
	データセンタースケールコンピューティング
	データ処理基盤
	サービスプラットフォーム
	IoT アーキテクチャ
	ブロックチェーン

3. ナノテクノロジー・材料分野（CRDS-FY2018-FR-03）

俯瞰区分	研究開発領域
環境・エネルギー応用	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
ライフ・ヘルスケア応用	バイオ材料
	ナノ DDS・ナノセラノスティクス
	バイオ計測・診断デバイス
	バイオイメージング
ICT・エレクトロニクス応用	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
	フォトニクス
	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
	ロボット基盤技術
物質と機能の設計・制御	空間空隙設計制御
	分子技術
	元素戦略・希少元素代替技術
	データ駆動型物質・材料開発（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
	二次元機能性原子薄膜
	生物機能インスパイアード材料・システム
共通基盤科学技術	微細加工プロセス
	積層造形・レーザー加工
	接着技術
	ナノ・オペランド計測技術
	物質・材料シミュレーション
共通支援策	ナノテクノロジーの ELSI/EHS、国際標準

4. ライフサイエンス・臨床医学分野（CRDS-FY2018-FR-04）

俯瞰区分	研究開発領域
基礎基盤科学技術	遺伝子発現機構（エピゲノム、RNA）
	ゲノム編集
	ケミカルバイオロジー
	構造解析技術
	オミクス（プロテオミクス、メタボロミクス、トランスオミクス）
	一細胞オミクス技術、細胞系譜・地図技術
	細胞外微粒子・エクソソーム
	免疫科学
	時間科学（体内時計）
	老化科学
	微生物叢（マイクロバイオーーム）
	感覚器科学
	脳・神経科学
分析・計測技術（医療機器）	電子顕微鏡
	光学イメージング
	生体イメージング（MRI、PET/SPECT、NMR）
	生体分子計測技術
	ヘルスケア IoT（バイオ計測、センサー、ウェアラブル）
	計測データ解析（AI）
ホワイート・グリーンバイオ技術 （食料・農水産業、生物生産等）	環境微生物学・合成生物学
	植物・農業
	水産
	畜産
	機能性物質・食品
創薬・診断・医療技術	中分子医薬
	高分子医薬（抗体、核酸）
	AI 創薬・創薬インフォマティクス・インシリコ創薬
	遺伝子治療・細胞治療
	再生医療
	オルガノイド・臓器チップ
	診断技術・バイオマーカー（リキッドバイオプシー、疾患オミクス）
	診断技術・がんゲノム医療
	生活習慣病（CKD、COPD、NASH）
	精神・神経疾患
	感染症（ワクチン・アジュバント・抗菌薬・抗ウイルス薬など）

CRDS-FY2019-FR-01

研究開発の俯瞰報告書

統合版（2019年）～俯瞰と潮流～

Panoramic View Report (2019): Integrated Version

令和元年 7 月 July 2019 初版発行
令和 2 年 1 月 January 2020 第 2 版発行

ISBN-978-4-88890-646-3

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町
電 話 03-5214-7481
E-mail crds@jst.go.jp
https://www.jst.go.jp/crds/
©2019 JST/CRDS

許可無く複写／複製をすることを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.
Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any questions must be appropriately acknowledged.

