

研究開発の俯瞰報告書

統合版 (2021年)

～俯瞰と潮流～

PANORAMIC VIEW REPORT

Integrated Version (2021)

はじめに

2019年末に中国武漢で発生した新型コロナウイルス感染症は、翌年には全世界におけるパンデミックとなり、依然として人類社会に甚大な影響を与え続けている。経済構造、生活様式を含む社会環境の変化は不可逆であり、今後、人々の価値観の転換をもたらすことは間違いない。しかし、脅威は感染症にとどまらない。過剰な人間活動による地球温暖化に端を発する気候変動に基づく巨大な自然災害の頻発や、生物多様性の喪失、また天然資源の枯渇など人類は自らの生存基盤を揺るがす困難に直面している。世界は叡智を結集してこれらの諸脅威に立ち向かうが、とりわけ科学技術には大きな貢献が期待される。そのため今回の新型コロナウイルス感染症の危機を、むしろさらなる発展の機会と捉えるべきである。

鍵は「Beyond Borders」である。近年、研究が先端技術の獲得により精密化、高度化する一方で、分野は細分化の一途を辿る。自然科学は本来、あらゆる空間的、時間的制約を超えて森羅万象を対象とするため既成の「学境」を越え、「国境」を越えて多様な出会い、多国間連携を促すことが必要である。かつて科学は少数の独創的な研究者により先導されてきたが、個人の能力には自ずと限界がある。ビッグデータや人工知能などの先端技術を駆使はするものの科学はやはり人の営みであり、「個人がどれだけ賢いかではなく、どのくらい多くの人と接触するかが重要」(マーク・トーマス)とされる時代である。研究課題によっては競争が避けられないが、効果的な協調による成果の最大化が求められている。

JST 研究開発戦略センター(CRDS)は2018年にBeyond Disciplinesを上梓し、続けてThe Beyond Disciplines Collectionを公表して、科学技術分野の融合、加えて自然科学、人文学、社会科学の関係者から一般市民をも含む連携の必要性を強調してきた。なぜなら、もともと科学技術が解決すべき社会課題は人々の価値観に基づくが、逆に社会環境の変化が人々の価値観の変化を促すからである。社会の負託に応えるには、さまざまな専門研究者、科学技術コミュニティのみならず多様なステークホルダーの参画を得て取り組むことが重要である。さらに政策実現のためには合理的な目標管理の枠組とともに、個人、組織が共通目標に向かい意欲を持ち自律的に参画する機能的エコシステムが不可欠である。

CRDSは現代文明社会の変化の大きなうねりを直視しつつも、未来の持続的発展の観点を踏まえて、科学技術が目指すべき方向と発展の可能性を俯瞰的視野で捉えるべく努力を続けている。本報告書がいわゆるwithコロナ、postコロナの時代の科学技術振興の一助となれば幸いである。読者諸氏のご意見、提言を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 浩

エグゼクティブサマリー

本報告書は、各分野別に発行されている俯瞰報告書の内容を、そ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べく作成されたものである。

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に揺らぎが生じている。米中対立の激化に伴い国際協調の気運が低下しつつあり、AI（人工知能）/IoT（Internet of Things）、量子技術、バイオテクノロジーなどは産業競争力あるいは安全保障の観点から、技術覇権争いの対象となっている。かかる状況の中で発生した新型コロナウイルス感染症は社会経済活動や人々の意識を世界規模で変えたが、気候変動による温暖化を始めとした脅威も依然として存在し深刻の度合いを深めている。これら危機に対し破綻することなく、早期の復旧・復興が図られる社会（レジリエントな社会）を目指すことが科学技術イノベーションの大きな主題となっていると捉えるべきである。

より良い社会の実現に向け、社会課題解決を目指す研究開発への指向が強まっている。あるべき社会像は人々の価値観によって変わり得るが、変化する社会情勢の中で人々の価値観も変わっていく。この価値観を研究テーマの設定過程に取り込むことで、社会のステークホルダーの参画機会が増大している。EUの研究開発戦略である Horizon Europe（2021-2027）にて創設されたミッション志向型研究プログラムはそのような取り組みの一例である。また、情報技術の急速な発達に伴い、いわゆるデジタルトランスフォーメーション（DX）によ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研究開発活動自体の変革も進展している。DX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。

我が国において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」の具体化を進めつつ 2050 年までのカーボンニュートラルを目指すとしており、その実現のため社会課題解決を目指す研究開発への比重が高まっているが、多様なステークホルダーの参加を得つつ社会課題ひいては研究開発課題を設定する仕組みの実現には道半ばである。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。

次に、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簡単に述べる。環境・エネルギー分野では、新型コロナウイルス感染症の拡大防止のために社会経済活動が抑制された 2020 年においても、人為起源の温室効果ガス（GHG）排出量の減少率は限定的で、正味 GHG 排出量ゼロ社会への移行の難しさが露わとなった。各国がグリーンリカバリーを標榜する中、「社会の移行（transition）を促進する研究開発」の重要性が増している。我が国として、持続可能性と包摂性の価値観を前提として「ネットゼロエミッション社会（気候変動緩和）」、「アダプティブな社会（気候変動適応）」、「レジリエントな社会（強靱性）」、「サーキュラーな社会（循環経済）」の 4 つの方向性に向けた研究開発が重要である。

システム・情報科学技術分野では、新型コロナウイルス感染症の拡大を受け、医療感染予防をはじめとして広範な社会経済活動等における IT の重要度が増大している。技術動向としてはサイバーフィジカルシステムや Internet of Things（IoT）に代表されるデジタル化・コネクティッド化、その上での AI 技術やロボティクスの急激な発展によるあらゆるもののスマート化・自律化が大きな潮流である。また、近年では、社会的要請との整合性や、人間の主体性確保などが課題である。

ナノテクノロジーは人類の社会・文明を支えてきた材料技術とともに、テクノロジードライバーとしてほとんどすべての応用領域の下支えをしている。ナノテクノロジー・材料分野では、IoT、AI などの応用に向けて CMOS の限界を凌駕する通信・情報処理の新たなテクノロジーの模索が続いている。また、マテリアルズ・インフォマティクスなどの材料開発に機械学習を用いる流れが世界において広く認知され始めている。我が国

としては、量子状態の高度制御、ナノ力学制御によるスマート材料などが課題である。

ライフサイエンス・臨床医学分野では、「より多くの人に、より質の高い医療サービスを安定して提供する」こと、「より多くの方が、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となっており、個別化医療、バイオエコノミー等、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となっている。我が国としては、デザイナー細胞（細胞医薬）、気候変動下での環境負荷低減農業、AI×バイオなどが、また研究開発を創造的・効率的に推進するための医療研究プラットフォームやイノベーション・エコシステムの構築などが課題である。

以上の俯瞰結果に基づき、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ただ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、

- (1) 社会課題対応型研究開発において研究開発課題を設定する段階からさまざまな専門を持つ研究者のみならず多様なステークホルダーの参画を得つつ進めていくこと
- (2) 研究開発活動のDXを改革の駆動力としながら、DXのみならず、クロスアポイントメントのようなフレキシブルな雇用形態等のさまざまな側面から研究環境を構造的に変革すること
- (3) 自由な発想に基づく研究（特に基礎研究）に長期的に取り組める環境を整備すること。これを若い人から見て魅力的であるような環境とすることで、若手人材育成と一体的に進めること
- (4) 研究の進捗に伴って産学官が柔軟に連携相手を組み替えつつ相補完的に協力を行える「場」をイノベーション・エコシステムとして構築していくこと
- (5) 一人一人の政策担当者、研究者が世界観と歴史観を身に付けるとともに分野を越えた連携に取り組むこと

等が今後の課題である。

本報告書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において深掘検討を進めていく予定である。この報告書が、2021年度より開始される第6期科学技術・イノベーション基本計画等の実行に資するとともに、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することを期待したい。

Executive Summary

This report was prepared in order to consolidate the summary of the Panoramic View Reports published for each field, and to capture the overall picture across fields, taking into account trends in society and policy.

In the world, the values nurtured in the U.S. and Europe based on democracy, market principles, and science and technology have been shaken. With the intensifying confrontation between the U.S. and China, AI/IoT, quantum technology, biotechnology, and some other technologies have become targets of technological hegemony from the perspective of industrial competitiveness and security, and the momentum for international cooperation is waning. COVID-19, which appeared under these circumstances, has changed socioeconomic activities and people's awareness on a global scale. However, threats such as global warming caused by climate change still exist and are becoming more serious. The main theme of science, technology and innovation should be to create a society that can quickly recover and rebuild from these crises (resilient society) without collapse.

In order to realize a better society, there is an increasing orientation toward research and development aimed at solving social issues. The image of the ideal society can change depending on people's values, but people's values will also change in the changing social situation. The mission-oriented research program established in Horizon Europe (2021-2027), the EU's R&D strategy, is an example of such an approach. In addition, the rapid development of information technology and the so-called digital transformation (DX) are transforming society, and data-driven science and technology are transforming R&D activities themselves. The increasing penetration of DX in various research fields is not only increasing the sophistication of research methods, such as improving the speed of search, but is also causing qualitative changes by contributing to the expansion of researchers' ideas.

Toward a better future society, Japan is aiming at carbon neutral by 2050 while promoting the realization of the "super smart society = Society 5.0". In order to achieve these goals, more emphasis is being placed on research and development aimed at solving social issues. However there is still a way to go before a mechanism for setting R&D themes linked with social issues is realized with the participation of various stakeholders. In terms of individual R&D fields, there are, of course, areas in which Japan still holds an advantage, but from a macroscopic perspective, there is concern that Japan's relative position is declining, and the strengthening of Japan's research capabilities is an urgent issue.

Next, we will brief the trends in the major R&D fields and the challenges Japan is facing, as follows. In the environmental and energy field, even in 2020, when socio-economic activities were restricted to prevent the spread of COVID-19, the rate of decrease in anthropogenic greenhouse gases (GHGs) emissions was limited. That exposes the difficulty of transitioning to society with net zero GHGs emissions. As each country advocates green recovery, the importance of "research and development to promote social transition" is increasing. Based on the values of sustainability and inclusiveness, it is important for Japan to conduct research and development in four directions: net zero-emission society (climate change mitigation), adaptive society (climate

change adaptation), resilient society (resilience), and circular society (circular economy).

In the field of Systems and Information Science and Technology (IT), the importance of IT is increasing in a wide range of social and economic activities as a response to the COVID-19 pandemic, from infection prevention to digital transformation of business process. The major technological trends are digitalization and connectedness as represented by cyber-physical systems (CPS) and the Internet of Things (IoT), and the rapid development of AI technology and robotics to make everything smarter and more autonomous. In recent years, consistency with social demands and securing human autonomy are required in many areas of IT.

Nanotechnology, along with the materials technology that has supported human society and civilization, underpins almost all application areas as a technology driver. In the field of nanotechnology and materials, a seek for new technologies in communication and information processing that surpass the limitations of CMOS for applications such as IoT and AI continues. Also, the trend of introducing machine learning into materials development, such as materials informatics, is beginning to be widely recognized around the world. In Japan, there are several challenges to be solved, such as "advanced control of quantum states" and "development of smart material by nanomechanical control".

In the field of life science and clinical medicine, "to provide more people with higher quality medical services in a stable manner" and "to allow more people to obtain higher quality food in a stable manner" have become urgent issues in the world. Research and development that requires the understanding of society and the public, such as personalized medicine and bioeconomy, continues to be a major trend. In Japan, designer cell (cell therapy), agriculture that reduces the environmental load under climate change, AI x Bio, etc., as well as the construction of medical research platform and innovation ecosystem to promote research and development creatively and efficiently have been big issues.

Based on the results of the above overview, it is necessary to recognize that Japan's relative position in science and technology is declining, and that the overall challenge is for Japan to gain the R&D capability to compete with the world's major countries. We should tackle the following issues:

- (1) In the R&D to address social issues, from the stage of setting R&D issues, proceed with the participation of not only researchers with various specialties but also a variety of stakeholders.
- (2) While using DX in R&D activities as the driving force for reform, structurally reform research environments in various aspects such as not only DX but also flexible employment arrangements like cross-appointments.
- (3) Create an R&D environment where young people can engage in curiosity-driven research that is attractive to them over the long term, while linking this to the development of young human resources.
- (4) Establish an innovation ecosystem where industry, academia, and government can cooperate in a complementary manner, flexibly recombining partners as research progresses.

(5) Each policy maker and researcher should acquire a worldview and historical perspective, and engage in cross-disciplinary collaboration.

The contents of this report will be disseminated to relevant stakeholders, and the CRDS will continue to study in depth the issues that have emerged as challenges for Japan. It is hoped that this report will contribute to the implementation of the 6th Basic Plan for Science, Technology and Innovation, which will be launched in FY2021. We also hope the report will serve as a foundation for trust between science and technology and society and contribute to the development of diverse international cooperation in science and technology.

目次

	研究開発の俯瞰報告書（2021年）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	18
1.3	主要国の動向のまとめ	24
2	科学技術の俯瞰	31
2.1	環境・エネルギー分野	37
2.2	システム・情報科学技術分野	45
2.3	ナノテクノロジー・材料分野	51
2.4	ライフサイエンス・臨床医学分野	59
2.5	世界の潮流、日本の位置付け、日本の挑戦課題	63
2.5.1	分野を越えた動き	63
2.5.2	環境・エネルギー分野	64
2.5.3	システム・情報科学技術分野	65
2.5.4	ナノテクノロジー・材料分野	67
2.5.5	ライフサイエンス・臨床医学分野	68
3	科学技術イノベーションの今後の課題	69
付録	研究開発の俯瞰報告書（2021年） 全分野を対象としている俯瞰区分・研究開発領域一覧	76

研究開発の俯瞰報告書 (2021年) の全体構成

JST 研究開発戦略センター (以降、CRDS) は、国内外の社会や科学技術イノベーションの動向およ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り組みを行っている。

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0-1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、「研究開発の俯瞰報告書 統合版 (2021年)」では、図0-2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、研究開発分野ごと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」に関わる動向、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2.1~2.4において各研究開発分野における分野の全体像、俯瞰の対象となる研究開発領域の抽出の考え方等をまとめ、2.5においては、分野融合や分野を越えた動きを含めた全体を概観した上で、分野別版の俯瞰報告書から「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。各研究開発分野のより詳しい俯瞰内容については分野別版の俯瞰報告書を参照いただきたい。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 (2021年) では、研究開発分野ごとに、俯瞰対象分野の全体像 (俯瞰の構造と範囲、世界の潮流と日本の位置付け、今後の展望・挑戦課題) 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。

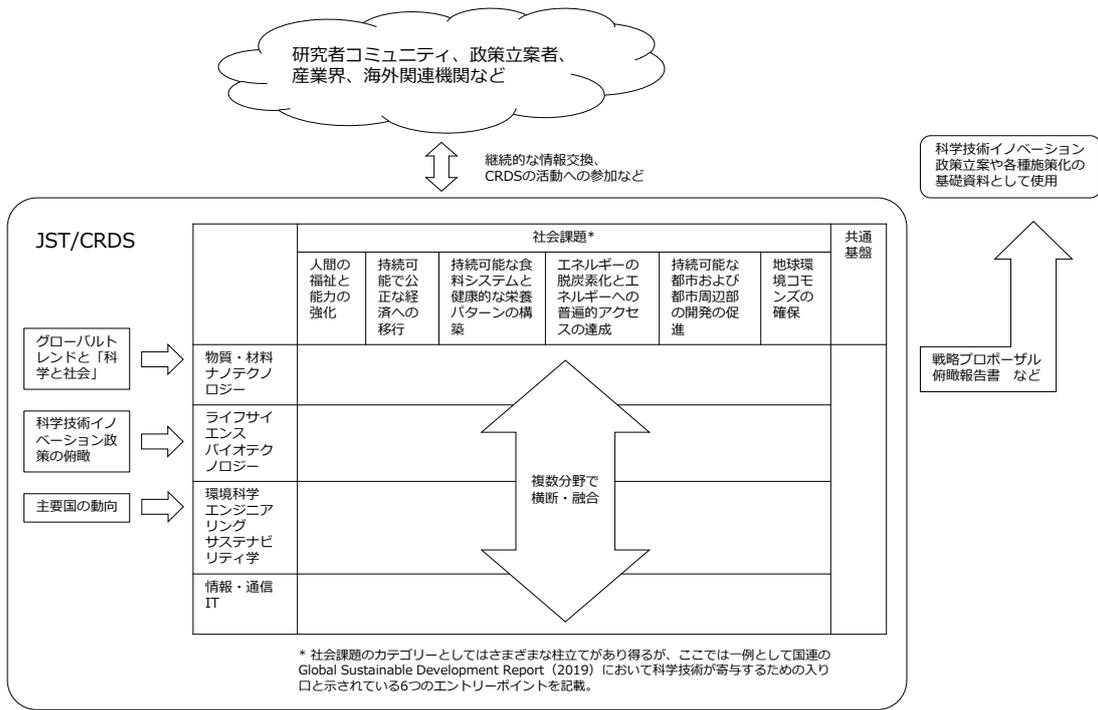


図0-1 CRDSの活動 (概念図)

統合版

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」
 - 1.2 科学技術イノベーション政策の俯瞰
 - 1.3 主要国の動向
2. 科学技術の俯瞰
 - 2.1~2.4 各科学技術分野の俯瞰
 - 2.5 世界の潮流、日本の位置付け、日本の挑戦課題
3. 科学技術イノベーションの今後の課題

分野別版



図0-2 「研究開発の俯瞰報告書」(2021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」

2021年の俯瞰の前提として、2030年こ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。2019年末に中国で発生し2020年にパンデミックとなった新型コロナウイルス感染症が世界に与えた衝撃は、短中期的なダメージも中長期的な構造転換も現時点では十分な解明あるいは予測ができる状態ではない。しかし、科学技術の研究開発の俯瞰のためにはある程度の政治、経済、社会の前提が必要であることを考えて大きな流れを叙述するものである。

(1) グローバルトレンド(次の5年)

1) 総論、グローバリズム、新型コロナウイルス感染症、地政学など

新型コロナウイルス感染症の発生以前の世界は、19世紀前半には確立されたグローバリズムの3規範、すなわち民主主義、市場原理、科学技術が経済を主因とする格差の問題(逆に経済と幸福の乖離)や進歩史観への疑義、自国第一主義などの影響で大きな動揺をきたしていた時代であった。これは米、欧、日、加、豪という規範の担い手の世界経済の中での影響力の後退(世界GDPに占める割合は2000年の5割くらいから現在は3割くらいに低下している。これは中国をはじめとする新興国の高い経済成長と米国ドルの長期的低下によるところが大きい。)という経済構造の変動という形で表れている。

新型コロナウイルス感染症の発生以前の問題意識を概観すると、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顕著で中間所得層からの脱落への恐怖は公的な理念形成よりも私的な利害に左右され、個人的な欲求がそのまま投票行動に反映する傾向が強い。その際、排外主義(移民排斥など)や右傾化という現象を伴うことが多い。東南アジア、中南米を中心に途上国でもポピュリズムの伝統的強さは温存されており、その傾向は続くだろう。また、社会主義の中国であっても本質的には大衆の動向に最も為政者が気を遣うポピュリズム的側面があることが指摘できる。

民主主義では、科学技術の進展とともに新たに民意や選挙の操作性の議論が盛んで、この問題が政治体制を考える上で大きな問題として勃興しつつあった。

同じく市場原理は、市場に関する本質的な課題と市場へのアクセスの不公平や不正を不安視する2つの課題がある。リーマンショックの直後に提起された問題のうち、金融体制の強化、プレーヤーである金融機関の強化などはなされたが、ファンドの役割、政府と市場の関係、市場そのものへの規制のあり方、格付け機関の問題などは宿題が残っている。また市場原理では、科学技術の進歩が例えば金融市場でのFintech化を生んでおり、これが「人々の思惑の集合としての市場原理に本質的に沿ったものなのか」、というような課題を抱えている。

科学技術の問題は「科学と社会」を参照していただきたいが、要約していえば、科学技術の進展が人類の幸福のためになっているのか、その恩恵を享受する人と疎外されている人がいるのではないのか、などの問題が根幹である。

このようにグローバリズムの規範として民主主義、市場原理、科学技術が機能してきたが、一つには今まで述べた内在的、本質的問題から、もう一つは異なった文明的潮流を背景に持つ中国やイスラム世界の発言権増大から、規範としての役割には揺さぶりがかかっていたという事実がある。こうした中で新型コロナウイルス感染症のパンデミックが起きた。今回のパンデミックの世界に与える影響力はその規模からいって間違いなく

1918～20年のスペイン風邪以来のものであり、ヒト、モノ、カネの移動が高度にシステム化されたグローバルリズムの中で起こったことを考えると、文明史論的にも定性的にはより深い衝撃があると予想すべきである。

では新型コロナウイルス感染症はどのような定性的変化をグローバルリズムにもたらすであろうか。接触の禁止や交通の抑制をすでにして伴っているのだから、その短期的な「人と人」「国と国」の分断は明白で、定性的な経済的、政治的、社会的、心理的影響は現象面で表れている。問題は、そのうちのどの傾向がグローバルなトレンドとなり中長期的に定着していくかということである。あるいは、定着せずにさまざまな考え方が併存する規範の定まらない混沌とした時代を迎える可能性もある。以下に、新型コロナウイルス感染症がどのような影響を与えるか、3規範ごとにチェックしておくべき傾向や要素を指摘しておきたい。総じて考えると、新型コロナウイルス感染症前の3規範の揺れをさらに助長する方向に動く可能性が高く、民主主義、市場原理、科学技術を世界の規範として維持したいのであれば それらの国々の協調と規範の実際の適用の工夫と組織的な啓蒙活動が必要になるだろう。

まず民主主義では、新型コロナウイルス対応に時間がかかって結果として危機対応に適さなかったのではないかという議論が生まれる可能性がある。中国が都市封鎖や一連の強硬措置がとれたのは、一党独裁のため、先進民主主義国（第1波では医療崩壊を見事に避けた独、比較的死者の少ない日を含め）の米英仏伊西などが死者を多く出し制圧に時間がかかっている現実がどう評価されるか。一元化された司令塔のほうが危機対応には適しているのではないか、という議論である。もともと民主主義のコストについてはアフリカ諸国から欧州は長い間、民主主義と経済発展はセットであるかのような教えを聞かされていたが、中国がそうでないことを教えてくれた、という声があるのは事実である。世界の中に民主主義は必ずしも規範ではないのではないか、という風潮が起こる可能性がある。

それとは真逆に、中国に自由な民主主義がなかったから新型コロナウイルス感染症の発生とその危険性が社会に認識されず、初動を誤った、という意見も出ている。この辺りは既に覇権争いとして米中の中で議論されてきたが、欧州主要国、オーストラリアなどが中国の不透明さに疑義を呈しており、単なる米中二国の覇権争いではなく まさに民主主義という規範の存亡をかけた争いになるかとしている点、注目される。この部分は地政学上の部分とも重複することになる。

もう一つの問題として、マスコミとSNSの国家との関係がある。民主主義国家のマスコミの役割、統制されないSNSの役割を重視するか、それとも中国のように統制するか、という議論は、上述の問題の検証とともに重大な規範問題になると考える。その際、多くの途上国がどのような判断をするのか、ということが規範の将来に大きな影響を及ぼすだろう。

次の市場原理は3つの論点があり、いずれも規範としての力を揺るがせる方向に働く可能性がある。まず第1に、新型コロナウイルス感染症によってサプライチェーンが寸断されたことにより、比較生産費説によるサプライチェーンの形成は存外、脆弱性が高く、必要なものが必要なところに届かないことが簡単に起こることを世界は知ってしまった。グローバルリズムを前提とした市場原理の思わぬ脆弱性は、国家も企業も相互依存的な自由貿易や資本移動の自由に頼ることが意外に大きなリスク要因であることに気付いたといえる。このことは、自由な貿易や資本移動そのものが安全保障の問題を有していると再認識される可能性が高い。

第2に、世界各国で行っている財政出動の問題である。この問題はリーマンショックの時も経験した。まずその国の財政赤字の解消に負担がかかるという問題がある。次に、より原理的には、たびたび市場の破綻を政府が支えるという事態になれば、市場信奉者にとって、依拠する原理の喪失感は非常に大きいと思われる。第3に、財政出動の分野や規模が各国まちまちであることから、それぞれの政府の産業、企業支援が国際的に積み上げられてきたこれまでの国際貿易ルールと軋轢を起こすことも大いに考えられる。

最後に科学技術だが、科学技術への期待感（現在でもそうだが）社会の問題解決的なものを優先させるべきだという考え方が強くなるだろう。従ってCuriosity Drivenな基礎研究を基盤とするような科学技術に

対する投資は相対的に縮小する可能性が指摘できる。もう一つの問題は国家主権との関わりである。既にウイルスワクチンの製造供給国が世界の覇権を握るといような考え方が散見され、科学技術が国家の戦略的道具である側面がより強くなる可能性がある。従って、科学的知見の国境を越えた自由な交換には規制が強まることが予想される。国際政治が科学技術の国際協力に大きな歯止めをかけうる時代になる可能性を考えておいたほうが良いだろう。

以上見たように、グローバリズムの3規範の動揺がさらに深まる世界にあって、世界のパワーバランスも対立的な状況を迎えていく。現象的には、指導力の相対的低下が目立つ米国と、国際的地位の向上を目指す中国の二大国の主導権争いが基本的な構図である。米中の経済対立は、先端情報産業での中国の不正行為や国際慣行の無視などの指摘に至り、現時点で事実上の覇権争いの様相を呈している。この背景には、グローバリズムの規範の守護者米国とその挑戦者である中国という理念上のものだけでなく、米国のトランプ元大統領による自国第一主義の標榜や、中国の習近平による国威発揚(中国の夢)戦略という、多分に国内での指導力をめぐる戦術が深く関係していることが事態をより複雑にしているといえるだろう。

新型コロナウイルス感染症のパンデミックは当面、この対立を激化させる方向で動いている。双方の相手国への非難合戦は戦術的なものも含まれ短期的評価は避けたいが、中国の新型コロナウイルス感染症の発生時に、中国が適切な情報開示と封じ込めをとらなかったのではないかとという疑問については、欧州主要国やカナダ、オーストラリアなどでも官民から同調する流れも出てきて、グローバリズムの3規範を守る側が戦線を統一しているようにも見える。ここ最近、中国の経済力の魅力の前で、こうした負の面の攻撃を控えてきた欧州の態度の微妙な変化を感じる。他方、中国は世界中にマスク外交を推し進め、実際の医療支援などで地位の確立を図っており、事実セルビアなど欧州周辺国やアフリカの一部諸国では成功している。

この大きな潮流には、二大国の国内事情も影響すると思われるが、アジア、アフリカ、中南米の途上国がどちらの国により深い共感を示すかという審判者の役割になってきているというのは極めて重要な構図である。

米国では2020年の大統領選挙の結果、民主党のバイデン大統領が2021年1月から誕生した。バイデン政権はトランプ政権に比べると3規範を守る伝統的立場に復帰すると思われるが、米国内の分裂の解消はそう簡単ではないと思われる。中国との政治、経済、あるいは人権分野における対立は、民主党政権になっても大きな考え方に変化は起きていないと見られる(2021年3月にはアラスカ州での米中外交トップ会談で激しい応酬があった。)。他方、気候変動問題などへの対応では、(中国を含めた)国際協調路線へと舵を切ると思われる。

中国は2012年に習近平が国を主導するようになってから それまでの「韬光養晦(とうこうようかい)」戦略を捨て積極外交に転じて、南沙諸島への勢力拡大、一帯一路戦略、香港民主派の排除、国際機関への戦略的アプローチなどを続けている。国内に対しては、強力な情報統制を敷いており国内政治の確かな詳細はうかがい知れないが、新型コロナウイルス感染症をめぐる問題や強権外交が、習近平路線や政権の長期化にどのような影響を与えるかが注目される。

欧州は大きな転機を迎えている。英国の抜けた後のEUは引き続き「理念や標準」を目指すことにおいて世界の中で役割を果たそうとするだろうが 求心力よりは遠心力に注意を払うべき時期に来ている。EUの存在意義が問われるような場面が、移民・難民問題、対中国問題、南欧諸国の経済財政問題などで惹起されるような可能性がある。特にEU官僚と周辺辺境国との対立は深刻である。対中国戦略におけるバイデン新大統領との協調は、今までよりは強くなると予測されている。

世界のそのほかの国々は、基本的に米中対立の経過、欧州の発信力を見ながら自国の戦略を決めていくだろうが、その決定はグローバリズムの行方の審判者になる可能性が高い。アジアでは、韓国は米中二大勢力の双方から立ち位置を求められる状況が続くだろう。ASEANは国によって濃淡が出るが、中国への依存を適度に管理していこうとするのが大勢になるだろう。特に、インドネシアの経済進展は注目されるが、宗教問題をどう扱っていくかという国民の選択が注目される。インドは、モディ首相の経済改革は全体としてうまくい

ているが、ここも宗教問題、外交の立ち位置に難しさがある。ロシアは、資源価格低迷が予想される中、プーチン大統領の19世紀的外交の負担は大きいと思われる。ブラジルも、ボルソナロ大統領の登場もあって社会層の分裂があり大きな経済成長は望めない。

中東は、トランプ元大統領が劇的に主導したイスラエル・アラブ政策をバイデン新大統領がどう引き継ぐのか、かなりの不安定要因が認められる。サウジアラビア、イラン、トルコの動きが注目されるが、いずれもさまざまな問題を抱えており大きな経済成長は難しい。

いずれも新型コロナウイルス感染症との対峙が続いており、どの国も一瞬の油断が国内の状況を大きく変える可能性があることは間違いないだろう。

2) 世界経済・社会の展望

2019年の世界の経済規模(各国GDPの足し算)は全体で約87.6兆ドル。うち米国21.4兆ドル(24.4%)、EU(除く英)15.6兆ドル(17.8%)、中国14.7兆ドル(16.7%)、日本5.1兆ドル(5.8%)となっている。〈為替換算ベース〉

新型コロナウイルス感染症の起こる前の世界の向こう5年間の基本経済成長率は、3%程度(先進国1~2%、途上国4~5%)と予想できたが、足元の新型コロナウイルス感染症のパンデミックでどのくらいの数字になるか、現在のところ正確な予測は難しい。IMFの2020年10月の予測では2020年の世界経済成長はマイナス4.4%、2021年を5.2%と予測している。各国で始まったワクチン接種の成否が大きく影響するが、2022年には世界の多くでワクチン接種が可能として5年間平均で世界全体実質1.5~2%と置いておく。(2020年マイナス4.4%、21年5.2%、22年以降通常の3%前後。)

新型コロナウイルス感染症によって「新しい生活様式」「ニューノーマル」といった新たなライフスタイルが出現するが、それが構造転換なのか、ここ2~3年のことなのかはウイルスの残存性にもよるが、いずれにせよ世界は感染症パンデミックによる被害を知ってしまったので、多かれ少なかれ生活の仕方も働き方も変化することは間違いない。そのための工夫、技術革新、ソフト開発、投資などの需要が期待される。また、「ニューノーマル」やSDGs(Sustainable Development Goals)のような目的に到達する手段として、民間企業への投資資金を誘導するようなESG(Environment/Social/Governance)投資に似た装置を作り上げることができれば、回復時の成長スピードはさらに高く期待できるかもしれない。

原油価格や鉱物資源価格は当面、低価格推移が基本だろう。原油はもともと需要面で自動車の燃料転換が進んだことに対し、供給側の能力は過剰で、しかもしばしば産油国間の協調減産に失敗してきた。この2年くらいはバレル当たり30ドル台を基本にして上限60ドルと踏んでおけばよいだろう。

新型コロナウイルス感染症のパンデミックが、人類の価値観の変革にまで及ぶ可能性が取りざたされているが、近年の物質より精神的満足に価値を置く大きな潮流を加速する方向で働くと思われる。コロナ以前から、「経済成長の質」の議論ははっきりと持続可能性、包摂性(格差問題含む)、強靱性、説明性などの概念を優位に考えるべきだとの方向に動いており、自然資本や人的資本のバランスのよくとれた社会の設計が求められるようになってきている。格差の問題に言及すれば、自由な競争や均等な社会は実現されていないとの認識から、「機会の均等」より一挙に「結果の均等」を求める声、あるいは格差の縮小を求める声が強くなっており、この傾向は続くものと考えられる。また、GDPを測ることはそのまま幸福を測るのではない、といったより根源的な問いかけも続くと考えられる。

個人のベースで見れば、新型コロナウイルス感染症の影響によって収入減や雇用を失うという経済上の痛手を被る人が多いが、人間との距離をとらなければならない行動様式の変化は、何が幸せかという価値の問題をそれぞれに考えさせることになるだろう。消費やサービスの構造は「モノ」から「コト」「サービス」に変化していたが、新型コロナウイルス感染症のパンデミック期に必要な「モノ」の需要は増えるだろうが、押しなべて考えると、例えば「ニューノーマル」を考えて人と人のコミュニケーションを維持・促進するようなオンラインの仕組みが、途上国を含め世界中で一気に進む可能性が高いと考えられる。

情報化の問題は、人と人の接触が当面難しいパンデミック期にあっては根源的な需要となり、ビッグデータ、人工知能を含めたさまざまな技術進歩が期待される。それと同時に、プライバシーやセキュリティの問題に対しては個人、国家ともに相当の問題が山積しており、次の5年のうちに各国で国の形態に合わせた議論が進むと思われる。また、国家とGAFANAなど巨大情報産業との問題には、ソブリンに関係するような問題があり、必要な調整が今後も続くことが予想される。

気候変動を含む地球環境問題は引き続き最も重要な問題である。特に、気候の変動が台風の巨大化、気温の顕著な上昇などの人命に関わる災害を生んでいることは誰の目にも明らかで、地球環境の問題がトランスサイエンスの問題であるがゆえに、各国によって足並みが揃わないのは大きな問題といえる。米国バイデン新大統領のパリ協定復帰によって、気候変動問題は科学的検証の問題ではなく、身に迫る危険対策として足並みをそろえられる可能性が出てきている。

医療・製薬・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。特に新型コロナウイルス感染症のパンデミックは、治療薬やワクチンの開発に寄せる期待を特に大きく膨らませている。ワクチンの開発は先進民主主義国だけでなくロシア、中国でも異例の速さで進み、実行に移された。データの相互融通や国際協調が十分になされたのかは検証の必要がある。医療・製薬・健康問題では次の5年も経済および倫理との関係が重要な問題だろう。また今回のパンデミックは未知の部分が多く、科学的事実を同時進行的に獲得しなければならない動的な非常事態のトランスサイエンスの問題であり、各国で科学的解釈と政策決定の関係を日時を追って記録し、歴史を検証すべきと思われる。

軍事・安全保障の問題も重要な時期である。グローバリズムの3規範で簡単に世界が縛れなくなっている中、大国間で再び抑止論的議論や軍事バランス論が強くなっている。また、局地紛争は放置されやすい時代になっていると考えられ、そのための各国の軍備のエスカレートにも注意が必要な時期である。

日本は明治以来グローバリズムの規範を意識してきた国であり、戦後はその優等生たらしめてきた国である。グローバリズムの3規範が揺らいでいるときにそれを立て直そうとするか、あるいは東洋的価値観を加味して微修正を提案するのか、という世界史的使命があると思われる。

日本の構造的な課題は、「少子化・人口減少」と「累積財政赤字」だろう。この構造問題に加え、社会保障費増大、エネルギー問題、安全保障問題、社会インフラ老朽化の問題などがあり、これらの課題解決に民主主義、市場主義、科学技術を組み合わせるとどう回答が出せるかが、日本に突き付けられた問いである。

今回のパンデミックへの対応はなお進行中であるが、日本のもつべき科学的能力、行政的能力、ガバナンス力、そして専門能力を統合する能力、さらに果敢性や内部で論争する力、責任能力、広報・説得能力それぞれに点検すべきところが見つからないのではないだろうか。それを早急に改革すべきだという認識と機会を与えられたのではないだろうか。

(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」の一部として記述した。

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を大づか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ことができる。そして、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科学という意味で使われるようになった比較的新しい概念であること、さらに、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ない。

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) ということができる。

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行う上で欠かすことができない。(例えば、余剰生産物を蓄積することによって生まれた「資本の原始的蓄積」は貨幣の流通、マニュファクチャラーズとの関係し、結果として封建共同体の解体につながる。これは、自立した個人、都市の隆盛を生む。余剰生産物の流通は自由な市場の有効性を認知させ、利益の追求を社会善とする概念を確立する。さらに、これらの自立した個人 (都市に出れば市民) は産業資本家に転化し、絶対王権と結びつき封建制を駆逐する。百科全書成立の過程で明らかになった技術の重視は、市民社会の経済的基盤となる。自立した個人は産業発展の担い手 (産業資本家) となり科学技術の利用 (典型的には英、産業革命) の場を与える。市民勢力が台頭し、自由権や財産権 (資本主義の法的基礎) を保障する近代国家の成立に至る (典型的には仏、フランス革命)。こう考えると、民主主義、市場原理、科学技術はその発生と成長に深い結びつきがあり、重要な社会規範としてグローバルに展開していったと思われる。この規範がヨーロッパ社会で完全な意味で成立したのは19世紀の前半である。)

この流れに対する批判としては、1960年代あたりからポストモダン (近代の超克) ということがいわれ始め、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、反進歩主義的な議論が出てきた。

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」も重要だとする考え方を示し、ヴィーコはクリティカ (論理に基づく真偽の重視) だけに頼るのではなくトピカ (伝統に基づく論点の重視) をそれに先立って学ぶことが重要だと述べ、ベルクソンは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を示した。さらには、アリストテレスのフロネシス (賢慮、実践知) の位置づけの再評価も引き続き行われている。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こともある。

ただし、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なお、新鮮ではあっても「ポストモダンの科学」と称されるもの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ことである。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の打ちこわしから、こうした流れはあると考えられるが、第2次世界大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ーそのものから、プライバシーの問題などの「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。ヒューマニティーの問題では、科学技術の圧倒的進歩によって、近代の「個人が個人各々の運命を決める」というような人間中心教・人間中心主義（ユヴァル・ノア・ハラリ『ホモ・デウス』）の時代が終わり、科学に決定を委ねたり、人間体内に科学の成果を取り入れようとするような「人間の将来の姿の自己規定（ポストヒューマニティー）」の問題が既に学問として意識されていることも重要である。

ヒューマニティーの問題だけでなく、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、ビッグデータ、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変化、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、あらかじめ、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」が同時に相互侵襲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図ろうとする動きであった。当初は自然科学の予期せぬ社会的結果へのリアクションや、研究開発過程での自然科学では対応できない部分への人文・社会科学への要請として始められたが、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「科学と科学知識の利用に関する世界宣言（ブダペスト宣言）」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、2013年のビルニウス宣言では、人文・社会科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。

また、最近のデータ駆動型の進展を帰納的方法への重視のしすぎと捉えて、論理的（演繹的）であるべきはずのこれまでの科学のあり方そのものを変えることになっているのではないかと、という問題意識を持つ科学

者もいる。

新型コロナウイルス感染症のパンデミックは、科学のあり方に関してさまざまな問題提起を行うことになるだろう。その諸相については次の「2) 科学と社会の諸問題」、なかんずく「②トランスサイエンスの問題」と「③科学と国家の問題」において語られることになるだろう。

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い。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」として語られるので、1.1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い。加えて、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は将来の課題であるが）研究者規制というも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（倫理的、法的、社会的課題）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、あらかじ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ことで、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「困ったときの人社連携」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で注意を要する。ELSIそのものを（自然）科学者のため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持ちこむことである。かかる行為はもちろん、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である。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されている、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、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において、地震学者に罪を問えるかとか、英国において狂牛病の病原体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の東日本大震災における福島第一原子力発電所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、さまざま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「政策の俯瞰」(1.2)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年代に米国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さまざま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。

2020年の新型コロナウイルス感染症のパンデミックへの対応は、トランスサイエンスの問題として各国で自国の対応や動向を検証し、次代に教訓を残すべきである。今回特に強調しておかなければならないのは、以下の諸点である。第一に、これは危機対応の問題で、危機管理学の常識を踏まえなければならないということである。結果の最悪シナリオを悲観的に想定する、最悪シナリオを前提とした施策をなるべく早く果敢にとる、その説明を政府主導で一元化して行う、施策の解除は段階的に行う、などである。第二に、新型コロナウイルス感染症の科学的知見は、事態と同時進行的に積み重ねられていったことである。エビデンスのない状態で「科学的推論」に基づいて対応の検討が行われなくてはならない場面があることを意味する。「科学的推論」の部分は、科学と政策との交わりとして扱われるべき領域であり、政策側の関与が必要といえる。第三に、こうした科学的事実と社会的価値の相克の分野の問題は、理想的には専門家相互の領域侵犯になる議論と、統合知としての政治家の決断に依らなくてはならない。専門家の組織が作られた場合、科学に基づく助言組織なのか、事実上の科学と政策の交わる決定組織なのかをはっきりさせておく必要がある。第四に、科学と政策の間というだけでなく、市民感覚というもう一つのフィールドが大きく関わる。従って、国民の安心をどう確保するか、喜んで政策に同意するか、ということが非常に重要である。当然のことながら、決定された政策の市民への説明は、責任ある統合知としての司令塔（多くの場合は政治家）に一元化されていなくてはならない。

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リズム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、さまざま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年米国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、これらの考え方がよ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、直接国家機構との関わりではないが、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、注目点として米国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った。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たと思われる。また、「事実」と「フェイク」をめぐってマスコミと緊張関係にあったことも指摘しておく。バイデン新政権はトランプ政権より科学技術への親和性は高いといわれるが、実際の政策が注目される。

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、英国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、フランス・ドイツ以外の国の中には自国独自の差別化戦略が作りやすく、比較的新しい加盟国の中にはEUの政策に反発もある。

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、安全保障を含む外交政策の分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くてはならない。（統合イノベーション戦略はその始まりと認識される。そのために科学技術系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り、これが米国によって米中経済摩擦という観点で提起されている。

近年の世界的な技術覇権争い等の状況下においては、研究の自由、成果発表の自由、透明性、開放性という科学の価値の確保を踏まえつつ、知的財産や機微技術等の保護を図る必要がある。これについては現在、研究インテグリティ（研究の健全性・公正性）の概念を広げて検討されている。

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最近の対立的国際関係と科学技術の懸念

「(1) グローバルトレンド(次の5年)」で指摘したように、米中の覇権をめぐる対立が激化している。これは、本質的にはグローバリズムの規範である民主主義、市場原理、科学技術に対する中国の捉え方が、グローバリズムとは異質であることに根差している。民主主義、特に欧米の定義する個人の人権、報道・言論の自由、三権分立、野党の存在などは、中国では基本的に認められていない。また、市場原理については、中国にとって市場は道具であり、国家の市場に介入する度合いは欧米に比してはるかに高い。科学技術についても国家の強い統制のもとにあり、社会科学については事実上科学者の自由はない。

最近の米中対立はこれらの本質的対立を背景にしているものの、発端は貿易上の利害対立から経済覇権をめぐる対立に移行している。ファーウェイの米国政府による締め出しなどは、知的財産に対する中国の入手方法に対する疑義や中国企業と中国政府の間の不透明な関係を根拠としていることから分かるように、対立の焦点は理念的なものというより現実的、かつ利害的なものになっている。

この状況下にパンデミックが起こったわけで、ウイルスの起源、中国政府の初動の情報開示や鎮圧、WHOへの圧力などにつき米国側から不信が表明され、中国側は米国のウイルス鎮圧失敗を隠すための嘘であると反論している。こうした状況下では、技術情報の国家管理であっても学術的な科学情報はオープンであるという原則が守られていくのかどうかという懸念を持つ向きも出ている。

米中の対立を超えつつあるのは 新型コロナウイルス感染症に関する中国の透明性やその後の外交について、ドイツ、フランス、カナダ、オーストラリアなどのいわばグローバリズムの規範側の国々が中国批判を明確にしていること、加えてEUの中でもセルビア、ハンガリーといった国々では中国のマスク、人工呼吸器などパンデミック対応支援への謝意を表していることなどがある。アフリカにおいても、中国に対する是非それぞれの表明が行われている。もともと、アジア諸国にとって、中国の存在は経済分野の恩恵と覇権に対する警戒で成り立っていたが、その視座が米国、欧州へ拡大された状況と見ることができる。

⑤科学と産業界・民間企業(市場原理)の問題

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(Creating Shared Value、共有価値の創造)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こ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)会計制度に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ようやく定着してきた。イノベーションが起きるためには、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)、十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。

民間企業では、自らの研究開発体制を育成するには、莫大な費用と人材の投入を長期間続ける必要があるため、財政基盤があるだけでなく、経営方針がある程度の期間変更されないことが必須の条件になってくる。また、オープンサイエンスの標榜、企業間連携の推進、M&Aインフラの整備を考えると、自前で基礎研究を抱え込むことが難しくなっている時代といえよう(ただし、GAFAのような超巨大企業の場合は別。)

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によることが圧倒的であることを考えると、民間企業の科学技術研究開発進捗を誘導していくことは非常に重要なテーマといえる。その手段は税金による優遇ということよりも、緊急度や重要分野に応じた機動的な支援(例えば新型コロナウイルス感染症のワクチン開発、治療薬開発など)、その分野での官民連携、産学連携への優遇など幅広く検討していくことが求められる。こう考えると、民間企業への科学技術政策は教育政策、産業政策と連動して、国自体のイノベーション風土を作ることと関係していることが見えてこよう。

また、そうであれば企業の研究開発投資を誘導する政策は科学技術や科学者、技術者にとっても重要なスポンサーを獲得することだという認識を持つことができる。加えて、研究開発に投資する企業に国家ファンドから投資するスキームを作るなど、市場原理を応用した政策を立案することも検討に値する。

⑥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間を考えると、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。なぜ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、最も足りないのは、科学技術力でもなく、ビジネスモデル創造力でもなく、アントルプレ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いわれている。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まねるのではなく、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分かるが、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生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見えない。

現代の「科学と社会の諸問題」は、社会の側が時々刻々と変化することで問題設定それ自身もまた変化する。科学的事実と社会的価値の相克において、科学が果たし得る役割の大きさは論をまたないが、同時にさまざまな政策手段の総動員の中で、産学官さらに市民をも交えながら、常にその役割を瀬踏みして問題解決に臨む必要があるだろう。

4)「科学と社会」から見た分野ごとのトピックス

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。もちろん、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、これまで見てきたように、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。

例えば新型コロナウイルス感染症のパンデミックの進行中またはパンデミック後の世界は、「課題設定」は社会の認める「価値」と科学技術が追求する「事実」の双方が協働して設定されなければならないことがますます多くなり、しかも、課題の達成は時間軸を入れてロードマップを要求されることが多くなろう。特に、接触を忌避しなくてはならない局面がいつ、なんどき、どのくらいの期間で起こるかが予測できないので、デジタル化がますます社会の課題となり、逆にデジタル化による社会の課題も発生すると考えられる。

以下に、分野ごとに「科学と社会」の観点からトピックスを記すが、環境・エネルギー分野やシステム・情報科学技術分野では、その領域設定が既に社会課題としての側面を濃厚に持っており、逆にナノテクノロジー・材料分野は多方面に応用される可能性のある科学技術の基礎研究分野であり、ライフサイエンス・臨床医学分野はその中間的位置づけである。分野に応じたトピックスの設定があろう。また、これらの領域の融合分野、超えた分野、さらに既存だが今まで俯瞰で扱っていない「防災」、「土木・インフラ」、「宇宙」、「海洋」、「イノベーション・エコシステム」なども分野の存在も今後、俯瞰報告書の候補として考えなくてはならないかもしれない。

①環境・エネルギー分野

環境・エネルギー分野では、気候変動の科学的根拠は国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC）を中心に整備される方向にある。米国やブラジル等の一部の政治勢力内では、今なお懐疑論がくすぶるが、米国バイデン新政権の誕生を契機に、再びパリ協定を軸とした国際協調の動きの進展が見込まれる。場合によっては、将来世代の生活環境に多大な影響を与える可能性があるため、科学的予測の精査を継続し、将来世代に対し、現役世代が果たすべき責任に関する社会的共通理解を広く醸成していくことが求められる。特に、気象災害の甚大化によって危機対応の考え方を入れていく必要が高まっていると認識している。新型コロナウイルス感染症のパンデミック下での大気の浄化は、今後のデータを待たねばならないが、経済活動と地球環境の相克の問題を再びクローズアップさせよう。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問題がますます重要になり、その成果によって社会的課題が新たな展開を見せる可能性もある。(例えばデジタル技術の進展によるエネルギー問題の発生など。)

SDGsで掲げられる目標に対し、科学と政策という観点だけでなく、ESG投資のように具体的手段の検討と国際的ルール作りがますます重要になろう。気象以外にも生物多様性や水の分野が重要である。

原油の供給過剰（従って価格下落）は、新型コロナウイルス感染症のパンデミックによってさらに加速して国際経済上の波乱要因の一つになり、社会課題の設定に影響があろう。原油価格の低位安定は、米国のシェールガスの減少をもたらし、これは地政学に大きな影響を与える。また、代替エネルギー開発には、マイナスの要因となる可能性もある。日本においては人口の減少、地域コミュニティの衰退、環境・エネルギー分野の国際競争力や人材の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、科学と経済、社会、政治の問題を一步進めて議論する必要がある。

②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、同時に社会学的な問題であることにも注意が必要である。ゲノム編集、生殖医療、終末医療、認知症などの精神医療、BMI（ブレイン・マシン・インターフェイス）などの脳神経科学、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。また、治療のための技術が軍事利用される可能性も考慮しなければならない。

デジタル技術の利用拡大と、個人情報利用をどこまで許容するか兼ね合いが重要な課題となっている。新型コロナウイルス感染症でも、個人の位置や行動の情報を活用することによって感染拡大を抑制できるし、ヒト検体や電子カルテ等の利用により創薬や治療の研究につながる。規制との比較考量が今後ますます重要になる。

倫理的・社会的な問題に並ぶ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を問うのが経済的問題である。日本においても社会保障費、なかんずく医療費（創薬を含む）の増大は大きな問題だが、世界的に見ても医療費と社会的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。医療費の増大と関連し、治療だけでなく健康寿命の伸長を念頭に置いた予防に社会の関心が向いている。

新型コロナウイルス感染症のパンデミックの問題は、新興感染症に対する警戒を改めて高めた。感染症危機時での対策には、病態解明・ワクチン・治療薬創出を目指す医学・生命科学を中心とする自然科学研究に加えて、情報科学やその他の社会科学、人文科学との協働が要求されている分野である。また、国の視点から見れば、ワクチンは国民の健康を左右するという点で安全保障上の重要性も有する。

③システム・情報科学技術分野

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、各領域は人間の社会、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。この問題は短期の研究開発をしている人と中長期の技術展望を持っている人で危機感に若干の温度差があるが、「深刻な脅威となりうる」と感じている人の視点で、人間存在に対する哲学的、倫理的考察を絶えず続けていくことが重要だろう。この分野の倫理、哲学的研究は当然、地域文化による影響は否めないで、日本においても独自に研究を進めていくことが重要である。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「ヒューマニティー」とは何かという深刻な悩みを持つだろう。これは、例えば人体に通信装置を内蔵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ー」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、長期的には人間は何をしたらよいのだ、というようなアイデンティティーの問題としても認識されている。

さらに現実的課題も重要である。ICT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、ICT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こと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はフェイクニュースや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、次世代への問題となっている。AIやSNSについて利用者がリテラシーを持つことが重要である。

ICT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、明確な論理のもとで企業や社会がデータ活用できていることが必要である。プライバシーに

しても、機微でない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の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、もっと実的な問題として、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と、これを科学技術的観点からの分析も必要だが、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。

新型コロナウイルス感染症の蔓延で、日本の行政の情報システムがいかに不十分であるかを思い知らされている。その原因を探っていくと、必ずしも科学技術的観点の課題だけではなく、社会的課題が見えてくる。マイナンバーの問題、感染者追跡アプリの問題などが例に挙げられるが、これらは強制して一つの価値を上から決めるべき問題ではないから、広く国民的議論、コンセンサスが必要である。Society 5.0の実際のシステム的设计を軌道に乗せるためには、この「必要な価値選択」の問題を「見える化」して国民に分かりやすく問うことが一刻も早く行われる必要がある。自然科学、社会科学、人文科学の協働が素早く必要である。

④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、さまざまな応用を通して社会課題に間接的に向き合っており、例えば、安全保障問題や産業競争力問題として社会につながっている。

まず、倫理問題では、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が重要である。さらに、それと産業政策、競争戦略との関係はどうかという課題設定は、省庁横断的であり総合的な観点が求められる。

もう一つは用途の開発だろう。ナノテクノロジー・材料分野の応用範囲は広く、用途開発は研究者サイドだけでなく民間の企業が担うことが多いと想定されるが、その際、この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。この産学連携を考えることは、ナノテクノロジー・材料分野の発展について特に重要と考える。

他の分野と比べ、ナノテクノロジーはものづくりの根幹戦略と関係があるが、特に「すり合わせ戦略」や「知財戦略」が重要なカギを握っている。また新型コロナウイルス感染症後は研究室の体制一新も大きな課題だろう。

本分野の研究活動は、基礎研究などにおいて外国人研究者の貢献も多く、そのことをもって最先端の研究成果流出につながることを懸念する声もあるが、わが国の競争力にとっての益・不益を冷静に比較考量する議論が必要であろう。

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、分野別版の俯瞰報告書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

科学技術政策の確立と科学技術イノベーション政策への転換（歴史的変遷）

我が国の科学技術政策は、1960年代の高度成長期では欧米の技術や制度の“キャッチアップ”を国の戦略としていたが、1970年代には米国との間の貿易摩擦から「基礎研究ただ乗り」との批判が出始め、基礎研究寄りにシフトしていった。しかし1990年代にバブル経済が崩壊すると、その後遺症により経済が停滞し、知的資源を活用した新産業創出による長期的成長及び人類が直面する諸問題の解決を謳う「科学技術創造立国」論が活発になった。こうした背景から、1995年に議員立法によって初の科学技術政策に関する総合的な法律である「科学技術基本法」が、明確な法的枠組みとして制定された。

この「科学技術基本法」には科学技術の振興に関する「科学技術基本計画」の策定が規定され、これまで第6期までの基本計画が策定されてきた¹。第1期では、政府研究開発投資の拡大、研究開発システム改革、研究開発の戦略的重点化等に重きを置いていたが、第2、3期では、我が国の国際競争力を高めることを主たる目標に掲げ、重要性の高い研究領域への重点投資等を行い、科学技術の社会実装を前面に出した。第4期では、「イノベーション」を対象に加え「科学技術イノベーション政策」とし、研究開発の成果をイノベーションの力によって社会に還元し、社会変革と課題解決を核とする方向へ転換した。第5期では、情報通信技術の進展とビジネスモデルの変化、これらによる第4次産業革命とも言うべき産業への構造変化の進展を背景として、産業構造のみならず、国民にとって豊かで質の高い生活の実現の原動力にするべく、サイバー空間とフィジカル空間の融合という新たな手法に人間中心という価値観を基軸に据えた「Society 5.0」というコンセプトのもと、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。

2020年には、25年ぶりに科学技術基本法の改正が行われ、2021年4月より「科学技術・イノベーション基本法」が、また2021年度から5カ年の「科学技術・イノベーション基本計画」が始められた。

科学技術イノベーション政策の俯瞰視点

前述の科学技術・イノベーション基本法は、目的として科学技術・イノベーション創出の振興に関する施策の推進について定められたものである。科学技術イノベーション政策を、「科学技術・イノベーション創出の振興」の定義²や科学技術・イノベーション基本計画（以下、計画という）の章立てを踏まえ便宜的に、（1）科学技術の振興、（2）研究開発の成果の実用化によるイノベーションの創出の振興、また、（1）、（2）の推進体制として、（3）科学技術イノベーションの推進体制、（1）、（2）を推進する上で昨今なくてはならない視点である（4）科学技術と社会、に分けて、計画における認識も踏まえつつ、主たる施策を取り上げ俯瞰したものを述べる。

（1）科学技術の振興

計画における主たる政策課題として、「知」を育む人材の育成や研究インフラの整備、さらには多様な研究に挑戦できる文化が不可欠との認識のもと、優秀な博士人材の確保、基礎研究・学術研究の振興のほか、

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）、第6期（2021～2025年度）

2 科学技術・イノベーション基本法（平成七年法律第百三十号）第2条第2項において、「この法律において「科学技術・イノベーション創出の振興」とは、科学技術の振興及び研究開発の成果の実用化によるイノベーションの創出の振興をいう。」とされている。

研究への専念と知の交流により、我が国の研究力強化と研究環境の向上を目指していくとされている。このほか、新しい研究の潮流を踏まえた研究システム、こうした環境を実現するための大学の改革も挙げられている。

特に研究者を取り巻く状況の悪化と研究者の魅力低下が課題であるとの認識に立ち、我が国の研究力を総合的・抜本的に強化するため、内閣府において「研究力強化・若手研究者支援総合パッケージ」を2019年度に策定し、「人材」、「資金」、「環境」の各種施策をパッケージ化している。特に若手研究者を中心とした挑戦的研究に対し、研究に専念できる環境を確保しつつ最長10年間支援する「創発的研究支援事業」(2020年～)が開始されている。

こうした課題に対応する主たる施策を簡単に歴史の変遷とともに整理する。

1) 研究人材

計画においては、博士後期課程学生の環境の改善や若手研究者のアカデミアに限らない幅広い領域でのキャリアパスの構築により、優秀な若者の博士後期課程を志す環境を実現していくとされている。

これまで研究人材については、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～)、5年一貫の質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～)が実施されている。

また、例えば、新たな研究領域に挑戦するような若手研究者が、安定かつ自立して研究を推進できるような環境の実現と新たなキャリアパスを提示する「卓越研究員事業」(2016年～)などの若手研究者の研究環境に関する事業も行われてきた。

さらに、「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³。そのため、「第5期科学技術基本計画」では、プログラムマネージャー、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。加えて、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も実行されている。

2) 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、国の財政基盤が厳しく、公的支援による研究費の調達が不安定になりつつある中で、資金調達手段の多様化が試みられている。政府は、最大10兆円規模のファンド(基金)を2021年度にも創設し将来的に年数千億円の運用益を目指すよう取り組みを進めている。その運用益により大学の研究や若手の育成を支援する用途が想定されている。また、2020年6月に大学独自の資金調達手段である「大学債」の発行条件が

3 「科学技術要覧(令和元年版)」p.67

緩和され、資本市場での資金調達が始められたほか、大学に対する民間企業や篤志家からの寄付金を得るための「ファンドレイジング」に係る活動や、研究者が市民から直接支援を受ける「クラウドファンディング」も活発になっている。

3) 大学・研究機関

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、2020年時点で9大学が指定されている。

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。また、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。

4) 研究基盤

大学附置研究所や大学共同利用機関、研究開発法人において、例えば2020年に試行的運用を開始した「富岳」など、大型研究施設が設置され、維持・運用されているほか、大型研究施設の共用促進等が規定された「研究交流促進法」(1986年)や、「特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律」(1994年)の制定、研究交流促進法を廃止し人的交流促進も含めた「研究開発力強化法」(2008年)など、法的に位置づけられることにより、大学、公的研究機関、民間企業等に広く開かれている。また、日本学術会議が大型研究計画を広く網羅し体系化している、学術の大型施設計画・大規模研究計画に関するマスタープランを2010年に初めて作成(以降2011年より3年ごとに改訂)しており、文科省ではこのマスタープランを元に、優先度を付けた「ロードマップ」を作成して予算措置を行っている。なお、国際リニアコライダー計画(ILC)を巡っては、日本学術会議では「マスタープラン2020」において、「重点大型研究計画」への格上げを見送った結果、実施主体となる高エネルギー加速器研究機構(KEK)も、「ロードマップ」への申請を取り下げている(2020年9月)。

知的基盤(研究用材料、計量標準、計測方法・機器等、データベース)の整備に関して、2001年に「知的基盤整備計画」が研究データの管理・利活用の方針・計画が策定されて以降、研究活動で生み出された大量のデータや研究活動に必要な材料・試資料等の集約及びその体系化・組織化や、様々な研究開発支援情報や大学等の研究成果情報等を広く提供するなど取り組んでいる。特に、日本全国の大学、研究機関等の学術情報基盤として、国立情報学研究所(NII)が構築、運用している情報通信ネットワークとして「学術情報ネットワーク(SINET)」(1992年~)がある。2014年頃からは欧州を中心に、我が国においても「第5期科学技術基本計画」において、論文へのオープンアクセスと研究データのオープン化によって知の創出の加速等を図ろうとするオープンサイエンスの議論が見られるようになった。国全体の研究データ管理及び利活用に関する基本方針(ナショナル・データ・ポリシー)等に関する議論や、競争的研究費制度における研究成果の共有に向け取り組みが進んでいる。

(2) 研究開発の成果の実用化によるイノベーションの創出の振興

計画においては、我が国の社会を再設計し、地球規模課題の解決を世界に先駆けて達成し、国民の安全・安心を確保することで、国民一人ひとりが多様な幸せを得られる社会への変革を目指すとされている。これに向けて、サイバー空間とフィジカル空間の融合と価値創出をもとに、地球規模課題の克服、レジリエントで安心・安全な社会の構築、イノベーション・エコシステム、スマートシティといった取り組みのほか、様々な社会課題を解決するための研究開発・社会実装の推進と総合知の活用を進めるとされている。

1) 研究開発プログラム

ハイリスク・ハイインパクトな研究開発を促進し、経済社会のイノベーションの実現を目的として、資金規模の大きく、よりイノベーションを指向したプログラム・制度の創設が進んできた。最近では、米国 DARPA⁴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～)で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。さらに「ムーンショット型研究開発制度」(2020年～)が創設され、従来技術の延長にない、より大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発が推進されている。

2) 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、新たな取り組みが行われている。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2020年度に2013年度比で約5割増加させるという目標を置き、2018年度時点で9.5割増加し目標値に到達している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。

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

5 民間企業との共同研究に伴う研究費受入額 (大学等): 452億円→882億円 (2013年度→2018年度)。
出典: 総合科学技術・イノベーション会議基本計画専門調査会 (第6回、2020年7月1日) 参考資料3

3) イノベーション人材

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」（2016～2017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。

（3）科学技術イノベーションの推進体制

1) 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。また、経済社会環境の激変に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年以降「科学技術イノベーション総合戦略」が、また、これに代えて2018年以降では、「統合イノベーション戦略」が策定されている。加えて、2021年4月には科学技術・イノベーション政策に関する複数の司令塔会議事務局を横断的に調整する司令塔機能として科学技術・イノベーション推進事務局が内閣府に新設され、CSTI事務局はその中に含まれる形となった。

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ますます増加したといえる。

2) エビデンスにもとづいた政策形成・モニタリング

1990年代後半から英国を中心として、我が国の科学技術イノベーション政策上でも「第5期科学技術基本計画」に客観的根拠に基づく政策の推進が掲げられて以降、客観的なデータと厳密な方法に基づき、政策効果や費用を分析し、政策を決定しようとする「エビデンス（客観的根拠）」にもとづく政策形成（Evidence-based Policy Making: EBPM）の動きが出始めた。2020年10月には内閣府において、政策におけるインプット（資金、人材）からアウトプット（論文、特許等）、アウトカム（経済効果、社会的効果）に至る情報を体系的に整備した「エビデンスデータプラットフォーム（e-CSTI）」が公開されるなど、分析基盤や手法の高度化のための取り組みが進められている。

3) 「総合知」を活用した政策立案の強化

計画においては、社会課題を解決するためには、従来の延長線上の取り組みのみならず、新たな価値観を示し、制度的なアプローチをとることが求められるとの認識のもと、目指すべき社会像を描きバックキャスト的アプローチと現状の把握・分析に基づくフォーキャスト的なアプローチを総合したフォーサイトを行う、とされている。また、社会との多層的な科学技術コミュニケーションの重要性に鑑み、アカデミアと政治・行政との間での科学的知見に基づく独立かつ確かな助言や提言の重要性も謳われ、具体的な仕組みの構築も検討されている。

(4) 科学技術と社会

1.1の「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、法的小および社会的課題)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一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。科学技術によって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)の理念を踏まえ、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、安全保障貿易管理とデュアル・ユースの問題は重要となっている。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。

こうしたことを含め、米国を中心に世界中で、オープンな研究システムの不当な利用による、研究システムの健全性の毀損や、技術流出等を通じた国家安全保障への悪影響について懸念が広がっている。これらの問題は、国としてしっかりとした対応が必要とされるところであるが、規制の強化が研究の開放性を損ない、ひいては研究力低下につながりうるものであり、研究コミュニティにおける研究インテグリティのあり方を見直し、強化していくことが重要となっている。

1.3 主要国の動向のまとめ⁶

主要国の科学技術イノベーション政策は、おしなべて、卓越した研究の推進、社会的課題の解決およびイノベーションの創出の3つの柱を重視したものとなっている。研究については、課題解決や出口に近い研究に偏らず、幅広い基礎研究を支援することが意識されているほか、ハイリスク・ハイインパクトの研究プログラムを創設するなど、推進方法を工夫する試みも続いている。さらに近年、地球規模の気候変動や先進国に共通の高齢化問題などが深刻化する中で、社会的課題解決のための研究開発においては、従来にないさまざまなアプローチが積極的にとられている。そのような多様な試みのうち、欧州を中心とする注目すべき取り組みが、ミッション志向型科学技術イノベーション政策である。これは、研究から市場創出に至る多段階をカバーしながら、多数の政策分野を横断し、研究に限らない多様な政策手段を動員して、野心的であるが具体的な期間を区切った目標（ミッション）を設定した取り組みにより、社会を変革して重要な課題を解決しようとする意欲的なアプローチである。

具体的な研究分野や社会との関係に目を向けると、量子やAIといった国の安全保障にも関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ないと考えられる。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つつあるが、科学技術自体をも変えていくであろうと想定される。特にデータ駆動型科学技術が各研究分野に浸透することで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、一般市民を含むステークホルダーとの対話を行い、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。さらには、そのような対話の射程には、どのような社会を実現したいのか、そのためにはどのような技術が求められるのかという本質的な問が入ってくるだろう。

各国が従前にも増して科学技術イノベーションとそれを支える研究への取り組みを強化していく中で、研究のオープン化と国際化が急速に進展している。国内的にも国際的にも開かれていることが、活力ある研究システムのために不可欠であることが今や広く認識されている。しかしながら、オープン化、国際化に伴うリスクに関する懸念も世界的に高まっており、リスクに対処するための議論や具体的な対応が進展している。オープンな研究システムが不当に利用されることにより、技術流出等を通して国家安全保障に悪影響が及ぶとともに、研究システムの健全性が損なわれているという認識が国際的に共有されつつある。このような環境の変化を踏まえて、研究インテグリティのあり方を見直し強化していくことが、研究の自由と開放性を重視しつつ研究システムの健全性を確保していくために必要となっている。

2020年初頭から次第に拡大し未だ収束を見せない新型コロナパンデミックは、各国の研究開発活動に大きな影響を与えている。中国の武漢から広まった新型コロナウイルスだが、徹底した都市封鎖措置で最初に封じ込めに成功したのも中国だった。2021年1月19日現在累計の感染者数（カッコ内死者数）⁷は、中国の9.8万人（4,798人）あまりに対し、米国2,407万人（398,980人）、英国344万人（90,031人）、ドイツ206万人（47,263人）、フランス297万人（70,826人）と欧米の方が深刻な状況が続いている。SARS-

6 2020年12月時点の記述（特記がある場合を除く）。

7 データ出典： ジョンズ・ホプキンス大学、COVID-19 Dashboard by the Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University (JHU) <https://coronavirus.jhu.edu/map.html> (2021年1月19日)

CoV-2ウイルスに直接関連するワクチン開発や治療法の研究を除き、多くの大学や研究機関が3～5月ぐらゐまで研究活動を停止したことで、プロジェクト雇用されている研究者や博士課程研究者の救済措置を早々に発表する国も多くあった。一方で、ポストコロナを見据えて早々とパンデミック後の社会構築に向けた研究開発・ビジネス投資に動き出した英国(4月)や、大規模な復興予算を組み、新型コロナ研究以外の領域への大規模な投資を発表したドイツ(6月)、フランス(6月、9月)もあった。EUは、7,500億ユーロの復興基金「次世代のEU(NGEU)」に合意、通常予算の多年度財政枠組(MFF/2021～2027年)と合わせ総額の1兆8,000億ユーロの投資を決めた。なおNGEUとMFFは全体の3割を気候関連プロジェクトと関連付けることを義務付けている。

(1) 米国

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」⁸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STEM⁹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。

2020年11月3日に実施された米国大統領選挙で共和党のトランプ大統領から民主党のバイデン氏に政権が交代する。バイデン政権の政策提案の中核に位置付けられているのが、環境・気候変動問題への取り組みである。2050年の温室効果ガス排出実質ゼロを目標に掲げ、地球温暖化対策の国際枠組「パリ協定」へ復帰するとしており、トランプ政権からは大きな路線転換となる。CO₂排出ゼロに向けた、2兆ドル規模のクリーンエネルギーインフラ整備や技術の導入促進のために4,000億ドルの政府調達を充てることなどを打ち出している。さらに国防高等研究計画局(DARPA)をモデルとした気候高等研究計画局の新設を提案するなど、環境分野のイノベーション創出を重要視していることがうかがえる。一方、トランプ政権下でも重点分野とされていた、AI、5G、先端素材、バイオなどの先端・新興技術分野へも引き続き投資を続ける方針を示している。一連の政策方針に共通するのは、国際協調と科学的知見を重視する姿勢で、地球規模課題の解決への取り組みや科学研究のグローバル化といった潮流に沿うものであり、概ね米国の科学界は新政権誕生を歓迎している。とはいえ国際協調を図る上で、トランプ政権下でこれまで強硬に臨んできた中国とどのように向き合うかは課題として残る。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のビッグアイデア」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、幅広くさまざま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かとされており、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

8 2009年9月、2011年2月、2015年10月

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

卓越した研究者を集め、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、改良が実施されている。

(2) 欧州

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。

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)¹⁰ 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。

2019年に新欧州委員長となったフォン・デア・ライエン (ドイツ) は就任を前に、「A Union that strives for more: My agenda for Europe¹¹」と呼ばれる政策ガイドラインを発表した。このガイドラインの中で、政権期間である2019~2024年の5年間で取り組む6つの優先課題を示し、中でも「欧州グリーンディール (European Green Deal)」と「デジタル時代に適合した欧州」を最優先課題と定めている。欧州グリーンディールとは、温室効果ガスの排出を実質ゼロにし、EUを世界で初めての「気候中立な大陸 (Climate-neutral Continent)」にするという目標達成に向けた、EU環境政策の全体像を示したものである。

現在EUでは、2021年から2027年までの包括的な研究開発戦略と投資を定めたHorizon Europe (ホライズンヨーロッパ、以下HEと表記) の詳細検討が行われている。2018年6月に欧州委員会によりHE構成案が提示され、その後欧州議会およびEU理事会の合意を得た。HEは、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「グローバルチャレンジ・欧州の産業競争力」、中小企業 (SME) やスタートアップの研究開発などを助成する「市場創出の支援」の3つの柱で構成されている。第二の柱では、社会的課題群として6つのクラスター (①健康、②文化・創造性・包摂的な

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

11 欧州委員会、https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/political-guidelines-next-commission_en.pdf (2021年1月)

社会、③社会のための市民安全、④デジタル・産業・宇宙、⑤気候・エネルギー・モビリティ、⑥食料・生物経済・資源・農業・環境)が設定され、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」志向型研究プログラムが導入された。ミッションは、「分野・部門を横断した、卓越性に基づく、インパクト主導の研究・イノベーション活動の総体で、一定期間内で個々の活動では達成できないような計測可能な目標を達成し、科学技術を通じて社会・政策決定にインパクトをもたらす、幅広い欧州市民に関係するもの」と定義されている。ミッションを定める対象領域であるミッションエリアとして、①社会変革を含む気候変動への適応、②がん、③海洋、沿岸および内陸水域、④気候中立・スマートシティ、⑤健全な土壌と食物の5つが設定され、各エリアで具体的なミッションを策定する動きが進んでいる。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)が新設される。

次に、EU加盟国であるドイツ、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。英国は2020年末で欧州連合を離脱したが、HEには準加盟国として参加する。

(3) 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。BEISから発表された「産業戦略：将来に適応する英国の建設」(2017年)は、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を目標と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、さまざま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。2020年7月にBEISの発表した研究開発ロードマップでは、10年程度の長期に掛けて達成する科学イノベーション戦略として「Moon-shots計画」を挙げている。これは市民・アカデミア・産業界の活性化を趣旨とし、明確な目標・時間枠と顕著な波及効果、実現可能で画期的な科学上の躍進に基づく社会的課題の解決に取り組むもので、BREXIT後も引き続き大学等の知見を活かしながら社会変革イノベーション創出を目指している。

英国研究・イノベーション機構(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た(2018年)英国最大の公的ファンディング機関である。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であり、そのための技術開発および商業化を推進している。また長期的・多角的で大きな社会課題に取り組む研究、柔軟・迅速な組織体制、失敗を許容するファンディングの実施を目指し、高リスク・高収益な科学研究振興機関として英国版ARPAの設置を計画(2020/21～24/25年度予算、8億GBP)している。

コロナ禍における新しい動きとしては、国立健康保護研究所(National Institute for Health Protection: NIHP)の設置が決まった(2021年に開設予定)。NIHPは全ての感染症、および核・化学物質・環境危機に備え、調査・研究、検査・追跡、科学的助言・科学的根拠提供、地域行政支援を担う。また、科学大臣

の2020年11月11日議会発言によると、COVID-19禍の下でのイノベーション支援対策としてBEISから7.5億GBPを投資しているとしており、コロナ禍からの「より良い復興」として、「グリーン産業革命」に注力している。

(4) ドイツ

2006年に、ドイツ初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志向の施策が盛り込まれた。その後は4年ごとの総選挙後にハイテク戦略は更新され、「新ハイテク戦略（2014年）」「ハイテク戦略2025（2018年）」が発表された。イノベーション政策として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（ドイツ語で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。もともと2006年にハイテク戦略が策定された背景は、高い基礎研究力と科学技術力を持ち、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、イノベーション創出のスピードを上げることにあった。優先的に実施されてき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ものの、GoogleやAmazonのような新たなビジネスモデルやプラットフォームを作り出すような世界的企業の誕生には至っていない。そこでドイツは、新たに飛躍的なイノベーション機構（SprinD）を設置（2019年）し、社会的な課題を最新技術で解決し、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助成を開始した。SprinDは10年間でおよそ10億ユーロの助成を計画している。

ポストコロナ対策として、次世代の基幹産業の創出に向けた「水素戦略」¹²が2020年6月に発表されている。自動車、機械、化学などドイツの主力産業に加え水素製造を新しい核とすることを目指し、輸送用、熱資源用燃料および鉄鋼・化学産業の代替で二酸化炭素の排出を抑えること、水素製造技術を最適化、欧州域内での製造を可能にして産業化、雇用の創出を図ること、水素製造技術を今後大幅にエネルギー需要増が見込まれるアフリカ等に輸出すること等が盛り込まれ、今後数年で90億ユーロの投資が決まっている。EUのグリーンディール政策と連動する形で、水素製造の産業化を加速する狙いがある。

(5) 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

12 連邦経済エネルギー省、The National Hydrogen Strategy Introduction: <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf>? (2021年1月)

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。2018年11月には、フランスをAI研究において欧州のリーダーとするとした総額6億6,500万ユーロの国家AI研究戦略を発表した。AIの研究拠点・ネットワークの整備、人材育成、スーパーコンピューターの研究開発、EUや日独との協力の促進などが柱となっている。

研究開発の基盤を拠点化して集中投資するという動きは、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実施されている大学再編のプログラムにもみられる。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。加えて、フランスでは「研究の複数年度計画法」が2021年から施行される。EUの研究開発枠組プログラム（Horizon Europe）と連動した形で複数年予算を組むことにより、本質的に長期間の投資を必要とする研究開発を確実に推進できるようにすることを目的としている。2017年に170億ユーロあまりの公的研究開発費を2030年までに250億ユーロ分を段階的に増額し、博士課程・ポストクの雇用条件改善、起業をする研究者への支援増が中心的な施策となる。

2020年9月政府主導のポストコロナ投資として、気候変動対策等を軸にした「復興計画」（1000億ユーロ、2020～2022年）が発表された。この復興計画に盛り込まれた予算のうち高等教育・研究に支出される予定の額は65億ユーロである。「復興計画」は環境、競争力、団結の3つの柱からなり2020～2022年を対象に経済を再建、雇用創出を目指す。

(6) 中国

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、さまざま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のは、「国家イノベーション駆動発展戦略綱要（2016～2030年）」（2016年）において、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として、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およ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、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。

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）、「インターネット+」（2015年）、起業支援の「大衆創業・万衆刷新」（2015年）、次世代人工知能発展計画「AI2030」（2017年）が挙げられる。中国製造2025で重点化された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で、技術のルールづくりを主導して産業競争力を高め、中国の技術を国際標準とすべく「中国標準2035」を策定中とされている。また人工知能については2030年までにAIの理論、技術、応用全てにおいて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。

2020年5月、ポストコロナ経済対策と中長期成長の基盤整備を一体化した「新基建（新型基礎インフラ建設）」と呼ばれる新型インフラへの大幅増加投資が発表された。投資対象は、AI、5G、ビッグデータ、IoT、超高送電システム、高度道路システム、電気自動車用充電スタンド整備とされ、追加投資額は2025年までに約10兆元（約160兆円）、民間からの投資を含めると17兆元（約272兆円）超の見通しである。

1

科学技術イノベーション
の俯瞰の前提

2 | 科学技術の俯瞰

本章では、2.1～2.4において4つの科学技術分野（環境・エネルギー、システム・情報科学技術、ナノテクノロジー・材料、ライフサイエンス・臨床医学）における、主要国間の国際比較を含む研究開発の現状の全体像を把握し、分野ごとに今後のあるべき方向性を展望している（俯瞰）。分野全体を俯瞰するにあたり、一定の考え方のもと当該分野の主要な研究開発領域を抽出し、当該領域ごとに研究開発動向や国際比較を行った（抽出した研究開発領域については、巻末付録参照）。また、2.5においては、科学技術と社会の関係性が密接不可分であるとの認識の下、世界の潮流やその中での日本の位置づけを分野横断的な視点と4つの科学技術分野からの視点双方から分析し、これらを踏まえて今後わが国が注力すべき課題を挑戦課題としてそれぞれまとめている。4つの科学技術分野の詳細については、分野別版の俯瞰報告書を参照されたい。

各分野における俯瞰の前提となる研究開発領域を抽出するための視点と、挑戦課題を設定するための視点を以下に示した（表2-1）。研究開発領域抽出の視点において各分野を徹底する考え方としては、社会・経済へのインパクトの大きさ、基盤的な科学技術であることなどを重視していることが挙げられる。また、挑戦課題抽出の視点において各分野を徹底する考え方としては、社会の変化への対応、産業競争力、科学技術の新しい潮流などを重視していることが挙げられる。

表 2-1 4つの科学技術分野における俯瞰の考え方

科学技術分野	環境・エネルギー	システム・情報科学技術	ナノテクノロジー・材料	ライフサイエンス・臨床医学
研究開発領域抽出の視点	<ul style="list-style-type: none"> 社会的要請・ビジョン 社会的・産業的インパクト 横断的基盤研究分野 	<ul style="list-style-type: none"> エマージング性 社会的要請・ビジョン 社会的インパクト 	<ul style="list-style-type: none"> エマージング性 社会・経済インパクト 継続性 	<ul style="list-style-type: none"> 社会的インパクト エマージング性 基幹性
抽出された研究開発領域	「エネルギー資源探査・開発技術、CCS」等30領域	「知覚・運動系のAI技術」等36領域	「次世代太陽電池材料」等31領域	「低・中分子創薬」等36領域
挑戦課題設定の視点	<ul style="list-style-type: none"> 急速に顕在化しつつあり、多方面に影響を及ぼす可能性のあるテーマ 産業界や社会における潮流やニーズに応じていくために必要なテーマ 様々な分野の科学技術の更なる進展に資する横断的なテーマ 	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 社会の変化がもたらす新たな科学技術への要請 科学技術の新たな潮流出現に伴う戦略的投資の必要性 日本の産業競争力と国家安全保障の根幹となる技術の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 社会・経済的インパクト エマージング性（科学技術の新たな潮流）
設定された挑戦課題	持続可能、包摂の価値観で、「緩和」「適応」「強靱」「循環」社会への移行を、「DX化」「人の行動や社会との関わり深化」で促進する重点テーマ	「第4世代AI」等の重点テーマ	「量子状態の高度制御」等のグランドチャレンジ	「新型コロナウイルス感染症とポストコロナに向けた研究」等7つの大きな方向性に基づく「感染症に強い研究プラットフォーム」等の課題

各分野において抽出された研究開発領域には、図2-1に示されるように、他分野の研究開発領域と相互に関連を有するものがある（表2-2）。俯瞰検討作業の過程においてこれらの研究開発領域を同定し（表2-3）、当該領域間での情報共有や議論・検討を分野横断的に行うとともに、各分野の俯瞰報告書においては、各研究開発領域の記載において、関連する他の研究開発領域名についても明記し、領域相互の関係性が分かるように配慮している。

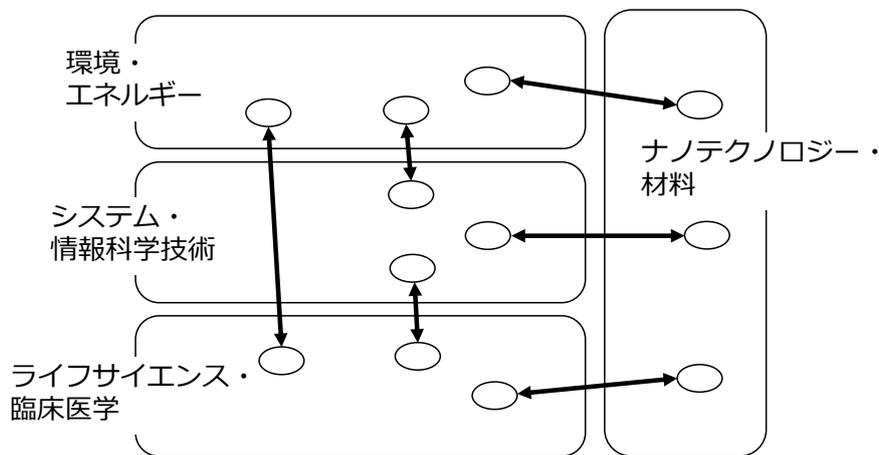


図2-1 異なる分野間の研究開発領域の相互関連

表2-2 異なる分野間の研究開発領域の相互関連の観点例

分野	研究開発領域が相互に関連する観点例
環境・エネルギー ライフサイエンス・臨床医学	気候変動と農作物の生育等の農林水産業 等
環境・エネルギー システム・情報科学技術	環境・エネルギー関連技術の社会実装とシステム・情報科学技術分野の社会システムアーキテクチャー 等
システム・情報科学技術 ライフサイエンス・臨床医学	ライフ研究へのデジタルトランスフォーメーションの導入、コンピューティングと脳研究の連携 等
環境・エネルギー ナノテクノロジー・材料	採掘からリサイクルまで含む物質・材料利用と、環境・エネルギー分野における持続性の観点 等
システム・情報科学技術 ナノテクノロジー・材料	ロボット技術とデバイス技術 等
ライフサイエンス・臨床医学 ナノテクノロジー・材料	イメージング等の計測技術 等

表2-3 異なる分野間で相互に関連する研究開発領域

環境・エネルギー	ナノテクノロジー・材料
エネルギー資源探査・開発技術、CCS	分離技術
火力発電	構造材料（金属）
太陽光発電	次世代太陽電池材料
バイオマス発電・利用	バイオ材料
電気エネルギー利用（エネルギーマネジメントシステム）	パワー半導体材料・デバイス

電気エネルギー利用 (電力貯蔵)	蓄電デバイス
電気エネルギー利用 (電力貯蔵)	エネルギーキャリア
化学エネルギー利用	エネルギーキャリア
化学エネルギー利用	分離技術
エネルギーシステム評価	パワー半導体材料・デバイス
トライボロジー	ナノ力学制御技術
破壊力学	構造材料 (金属)
破壊力学	構造材料 (複合材料)
計算工学	マテリアルズ・インフォマティクス
水循環 (水資源・水防災)	分離技術
水利用・水処理	分離技術
除去・浄化技術 (大気、土壌・地下水)	分離技術
有機化学物質分析・毒性評価	ナノ・マイクロマテリアルの ELSI/EHS、国際標準
無機化学物質分析・動態把握	ナノ・マイクロマテリアルの ELSI/EHS、国際標準
循環利用とライフサイクル評価	分離技術

システム・情報科学技術	ナノテクノロジー・材料
データに基づく問題解決	複雑系材料の設計・プロセス
データに基づく問題解決	MEMS・センシングデバイス
データに基づく問題解決	ロボット基盤技術
データに基づく問題解決	マテリアルズ・インフォマティクス
計算脳科学	新機能ナノエレクトロニクスデバイス
ソフトロボティクス	ロボット基盤技術
生物規範型ロボティクス	ロボット基盤技術
生活支援ロボット	ロボット基盤技術
産業用ロボット	ロボット基盤技術
IoT・制御システムセキュリティ	MEMS・センシングデバイス
プロセッサアーキテクチャー	新機能ナノエレクトロニクスデバイス
量子コンピューティング	量子情報・通信
量子コンピューティング	量子計測・センシング
IoTアーキテクチャー	MEMS・センシングデバイス

ライフサイエンス・臨床医学	ナノテクノロジー・材料
低・中分子創薬	ナノ医療システム
ヘルスケアIoT (ウェアラブル・生体埋め込み計測)	バイオ計測・診断デバイス
植物由来材料	構造材料 (複合材料)
細胞外微粒子・細胞外小胞	ナノ医療システム
構造解析	バイオイメーjing
構造解析	ナノ・オペランド計測技術
光学イメーjing	バイオイメーjing
光学イメーjing	ナノ・オペランド計測技術

トランススケールイメージング	バイオイメージング
トランススケールイメージング	ナノ・オペランド計測技術

環境・エネルギー	システム・情報科学技術
電気エネルギー利用（エネルギーマネジメントシステム）	社会システムアーキテクチャー
電気エネルギー利用（エネルギーマネジメントシステム）	ブロックチェーン
計算工学	機械学習
計算工学	データに基づく問題解決
計算工学	サービスサイエンス
気候変動観測	知覚・運動系のAI技術
水循環（水資源・水防災）	社会システムアーキテクチャー
水利用・水処理	社会システムアーキテクチャー
都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）	デジタル変革
都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）	サービスサイエンス
都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）	社会システムアーキテクチャー
都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）	メカニズムデザイン
都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）	計算社会科学
都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）	トラスト

環境・エネルギー	ライフサイエンス・臨床医学
バイオマス発電・利用	微生物分子生産
バイオマス発電・利用	植物分子生産
バイオマス発電・利用	林業
循環利用とライフサイクル評価	植物由来材料
都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）	感染症（抗菌薬・抗ウイルス薬・ワクチン等）
農林水産業における気候変動適応・緩和	植物・農業
農林水産業における気候変動適応・緩和	植物工場
農林水産業における気候変動適応・緩和	水産
農林水産業における気候変動適応・緩和	畜産
農林水産業における気候変動適応・緩和	林業

システム・情報科学技術	ライフサイエンス・臨床医学
知覚・運動系のAI技術	計測×AI
データに基づく問題解決	AI創薬・インシリコ創薬
データに基づく問題解決	計測×AI
計算脳科学	脳・神経
計算脳科学	BMI・BCI
認知発達ロボティクス	脳・神経
インタラクション	BMI・BCI
農林水産ロボット	植物工場
農林水産ロボット	林業

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が許容可能な範囲に抑えつつ持続的な発展を実現。

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・技術革新等。

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。日本の削減目標は2030年度に2013年度比26%減。

循環型経済

線形から循環型への移行。

3E+S

安全性を前提としたエネルギーの安定供給性、経済効率性、環境への負荷低減の同時達成追求。

COVID-19への対応

感染症リスクへの対応 (公衆衛生、リスクガバナンス) エネルギー需給構造の大変化

社会・経済の動向

2050年カーボンニュートラル

欧米各国が表明。日本もグリーン成長戦略を策定。

人口、石油需給

世界人口は77億人(2019年)から97億人(2050年)に*1。石油需要は約0.7億バレル/日、予想価格約\$53/バレル(持続可能シナリオ, 2040年)*2。

CO2排出量推移

2019年の人為起源CO2排出量は約390億tと増加継続*3。ただし2020年はCOVID-19の影響により減少(8%、約26億t減)見込み*2。

ESG投資

国連のイン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。2020年7月にEUタクソノミー規則の発効。

科学技術の潮流

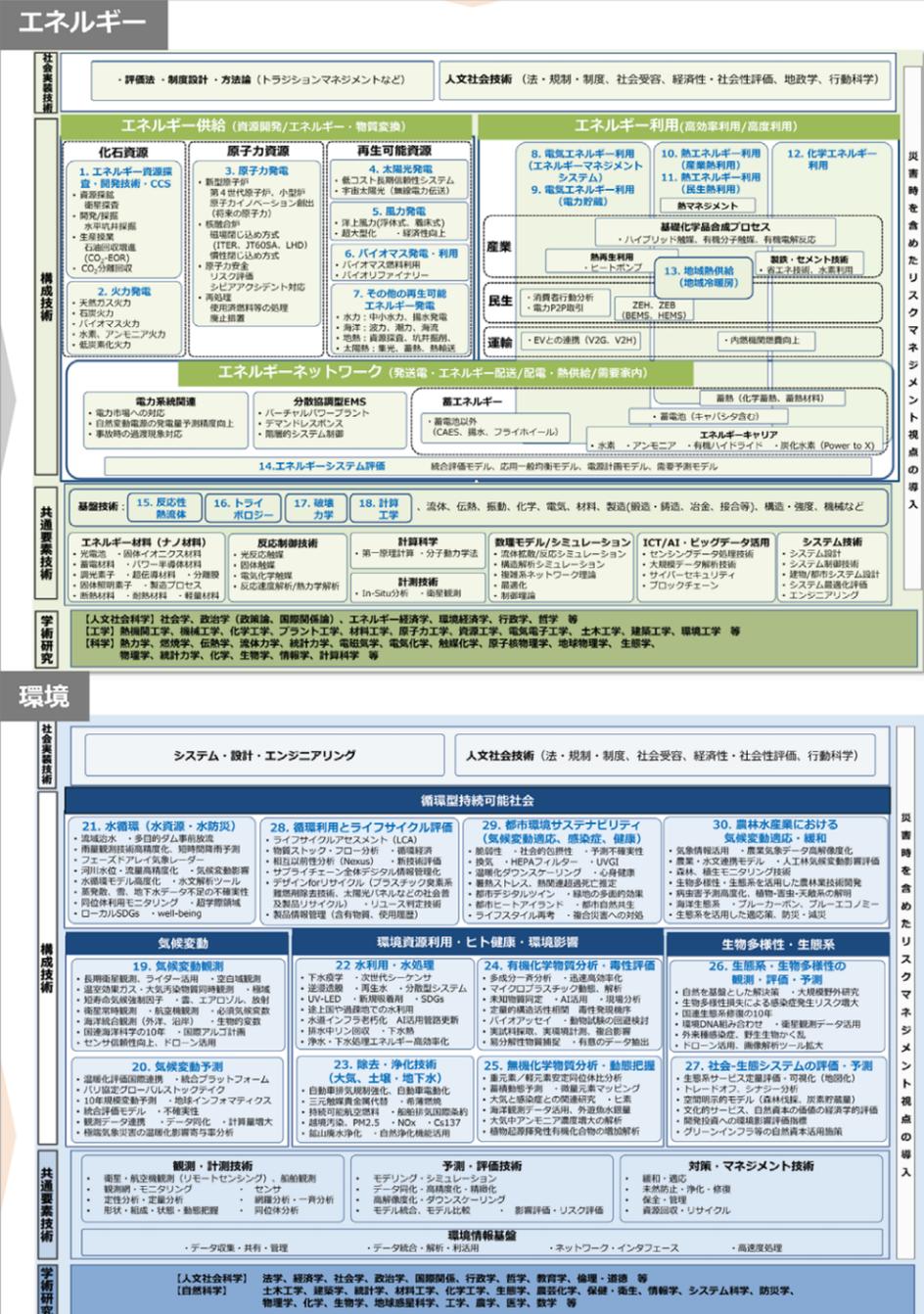
気候変動緩和への貢献：再エネ、省エネ、エネルギーマネジメント、CO2回収等。

気候変動適応への貢献：気温上昇や異常気象対応、影響の予測・評価、対策検討。

DX化：AI/IoT普及、ビッグデータ活用、無人機等でのデータ収集。サイバーフィジカルシステムズ。

金融：エネルギー技術の位置づけに関する議論。

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、母数の大きい工学系は減少幅も大きい。工学系の基礎基盤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。

研究開発動向

内は日本の状況

集中型電力供給

関連する領域：1, 2, 3] CCUを含む低炭素排出化、脱炭素燃料化や、再生可能エネルギーと相互協調した電力系統安定化などが重要課題。

火力は高い技術水準を蓄積も、石炭は国内外で社会的・政策的に厳しい状況。原子力は安全技術などで国際的に高い研究レベルだが、小型炉研究は米国などに後れ。

再生可能エネルギー

関連する領域：4, 5, 6, 7] 変動・分散型再生可能エネルギーの競争激化。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し、高精度の発電量予測、蓄エネルギー、最適制御等の研究開発が課題。

太陽光は新素材など基礎に強みを持つ。一方、応用・開発ではグローバル市場での熾烈な競争が続く。太陽光セル、風力、バイオマス燃料などで国際的な地位低下が顕著。

エネルギー利用

関連する領域：8, 9, 10, 11, 12, 13, 14] 電化推進と変動電源拡大を受け、エネルギーの貯蔵/運搬/利用のための技術開発が活発化。統合的なエネルギーマネジメント、ICTを活用した需給連携がさらに重要。

デジタル技術活用のEMS、次世代二次電池、エミッション分離・除去技術、人工光合成、水素などで、国際的に注目される基礎や、産業的に強みをもつ応用・開発が見られる。一方、地域エネルギーマネジメントに弱み。

エネルギー共通基盤

関連する領域：15, 16, 17, 18] オペランド計測、ビッグデータ・AI活用、マルチスケール解析やデータ同化等による高度数値解析、シミュレーション(デジタルツイン)などが活発。

実用燃焼機器の熱効率、エミッション低減、低摩擦技術、複合材料の破壊解析、データ同化技術の応用等が強み。欧米の研究拠点化・継続性に対し日本は個別の組織・分野依存傾向。

COVID-19関連

関連する領域：19, 22, 26, 29] 公衆衛生の観点から下水疫学研究が国内外で活発。室内における感染リスクの評価、換気・空調等によるリスク抑制、都市の意義再考などで研究課題。衛星観測データを用いた大気環境変化の解析も活発。

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。政権交代後にパリ協定への復帰を表明し気候変動対応で方針を転換。

EU及び英仏独

欧州グリーンディールを始め気候変動対応に積極的。水素戦略を掲げる。脱炭素燃料化を狙う研究開発を活発に推進。循環型経済も主導。一方で排出削減進捗には各国ばらつき。

中国

豊富な資金と人工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。

気候変動の観測・予測・評価

関連する領域：19, 20, 21, 29, 30] 更なる予測・評価精度向上のための観測強化、数値計算やモデリングの高度化、対策技術開発などが重要課題。

高精度気象予報モデル、温暖化ダウンスケーリング、全球水循環モデル、高精度の雨量観測等で高い水準の研究開発を実施。莫大な広域データの活用や総合的研究等に弱み。

環境資源の持続的利用

関連する領域：22, 23, 24, 25] 水利用では海水淡水化や再生水のための膜開発やリスク評価研究などが中心。下水処理では効率化が重要課題。大気については排出ガスの規制の強化に対応するための技術開発が課題。

水利用・水処理分野では膜除去やUV-LEDなど、除去・浄化分野ではガソリン車用三元触媒や鉱山廃水浄化などで高水準の研究や技術を有する。

生態系・生物多様性の観測・評価・予測

関連する領域：26, 27] 無人機等の小型・自律的な観測技術からのデータや長期・広域なフィールド観測等からのデータを使った統合的な解析が潮流。自然を基盤とした解決策(NbS)のための研究も活発化。人間社会と生態系の関係の評価・予測が重要課題。

国際的な研究の主導や社会・生態システムのガバナンス研究などで欧米に後れ。

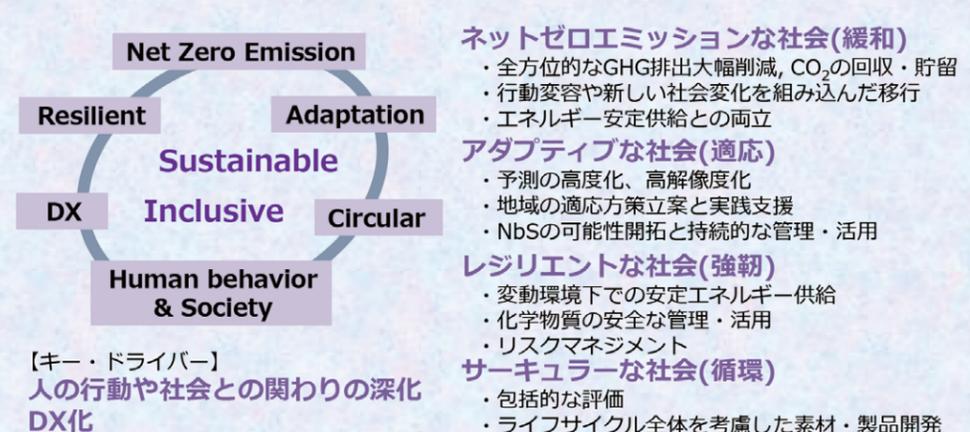
環境共通基盤

関連する領域：24, 25, 28] 環境分析はハイスループット化や未知物質同定に注力。オンサイト分析も重要課題。バイオアッセイ・毒性評価は統合的なアプローチの検討が進む。安定同位体比分析は無機物質分析の主流。LCAニーズが多方面で増加。

PM2.5に係る大気環境分析等で高い水準の研究開発を実施。LCAは総合的評価やデータベース構築戦略などで後れ。

今後の展望・方向性

社会の移行(transition)を促進する研究開発



*1 国連経済社会局 *2 国際エネルギー機関 *3 国連環境計画 *4 本表では領域単位で統合した結果を記載。本文中では一部の領域は項目を分割して国際比較を実施。詳細は本文を参照。

2.1 環境・エネルギー分野

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）は私たち人類社会の様々な側面に影響を及ぼしている。特に社会経済活動の抑制・停滞は深刻だが、一方、これに伴い、人為起源の温室効果ガス（GHG）の排出量が一時的に減少すると見込まれている。ただ残念ながらその減少量はそもそもの排出量全体から見ればごく一部に過ぎず、この苦難の時期にあっても、パリ協定の目標達成に向けた取組みが引き続き必要であることには変わりがない。それゆえコロナ禍からの復興の軸にグリーン成長戦略を掲げる国や地域もある。

パリ協定の目標達成は人類共通の課題であり世界が協調して取り組むべきものである。その反面、技術的あるいは制度的な優位性を巡る国家間の競争も激化している。GHG排出の実質ゼロ（ネットゼロエミッション）、いわゆるカーボンニュートラルな社会への移行を達成するには社会を構成する様々な要素を根本から変更していく必要がある。それは極めて困難な課題であるとともに新たな機会でもある。この新たな機会の恩恵を受け、あるいは移行に伴う損失を極力回避すべく、各国は取組みを加速しつつある。

気候変動緩和や適応への取組み以外にも、気候変動により深刻化しつつある自然災害への対応、人間活動に伴ってもたらされる様々な環境負荷や生物多様性の損失への対応など、世界が直面する重要課題は多い。またエネルギーの安全かつ安定的な供給も人類社会の基盤として不可欠な要素である。環境・エネルギー分野の研究開発には、こうした様々なリスクや社会的要請への貢献が求められている。

COVID-19は、先に述べたような社会経済活動の変化やエネルギーの需給バランスへの影響だけではなく、我々を取り巻く身近な環境とも深い関係を持っている。感染拡大に関しては、私たちの身の回りにある様々なモノ（環境表面）を介しての感染リスクをどう管理（リスクマネジメント）するかが、コロナ禍の日常を考える上での重要な視点となっている。また、室内環境における換気や空調などとの関連性も重要な視点である。感染拡大の検知については、下水疫学と呼ばれる新たな動きもある。あるいはより広域スケールで見た感染の拡がりについての解析や、都市部と郊外の役割といった都市の在り方の再考など、様々な観点から環境と感染症との関連を掘り下げる動きがある。

「研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野（2021年）」では、こうした環境・エネルギー分野を取り巻く社会経済的な動向を把握するとともに、30の研究開発領域を設定し、個別領域における研究開発動向を俯瞰した。領域を超えて共通的に見られた潮流は以下の3点である。

- ・「科学的知見や技術の総合化・統合化、技術間の協調・調和」：システムとしての高度化を目的とした個別技術の高効率化や高性能化や、技術間の協調・調和を考慮したものが多く見られた。更に理工学的な知見や技術に加え、人の行動や価値観、経済・社会システムとの関わりに関する科学的知見の必要性も増しており、知の総合化・統合化も大きな研究開発課題となっている。
- ・「観測・計測、分析、予測などの高精度化・高解像度化」：技術的發展により得られるデータは量的にも質的にも増加している。また、多様な観測・計測手段の統合的な利用や、得られたデータの統合的な解析も増加している。予測の精度や解像度を高める方向での研究開発も活発である。
- ・「DX（デジタル・トランスフォーメーション）・CPS（サイバー・フィジカル・システム）による仮想化・知能化」：多様な観測・計測から得られたデータの高度な解析が新たな発見や新たな研究アプローチの機会をもたらしている。人工知能の応用を通じた帰納法的なアプローチの導入は分野を横断して活発である。

次に個別研究開発領域の動向から見てきた日本の研究力について述べる。

<エネルギー分野>

- ・集中型電力供給分野：日本は火力発電で高い技術水準の蓄積を有しているが、昨今は石炭火力に対して国内外で社会的、政策的に厳しい状況がある。原子力発電では安全技術などで国際的に高い水準の研究が行われているが、米国などが活発に進める新型小型炉研究は国内で低調である。
- ・再生可能エネルギー供給分野：日本は太陽光発電の基礎研究で新規素材などに強みをもつ。一方、各発電方式の応用研究・開発で国際的に熾烈な事業競争が続き、太陽光セル、風力技術、バイオマス技術などで国際的な地位低下が顕著である。日本は地理・気象条件などの環境面で必ずしも恵まれた状況にはなく、それゆえ国内での応用研究・開発が進みにくい点に弱みがある。
- ・エネルギー利用分野：電気や化学、機械の基礎を背景にもつ研究開発が活発に行われ、国際的に注目される基礎研究や、産業的に強みをもつ応用研究・開発の取組みが見られる。デジタル技術を活用したEMS、電力システムの安定化、次世代二次電池、ヒートポンプ、有害排出物分離・除去技術、人工光合成、水素などの研究開発で国際的に一定の強みがみられる。一方、地域冷暖房などの分野で基礎研究者が少なく、システムとしてのエネルギー高効率化に弱みがある。
- ・エネルギーに係る基盤的分野：実用燃焼機器の熱効率、エミッション低減、低摩擦技術、複合材料の破壊解析などで強みを有する。一方、欧米の研究開発拠点と比較すると個別組織や個別分野での研究に依存する傾向が弱みとなっている。

<環境分野>

- ・COVID-19と環境に係る分野：下水疫学、衛星観測、室内換気研究、シミュレーション研究などで社会貢献につながる研究や情報発信が積極的に行われている。国際協調体制を構築する動きもある。
- ・気候変動の観測・予測・評価分野：高精度の雨量観測、気象衛星観測、海洋観測などで欧米に次ぐ水準の研究開発が進められている。独自の地球システムモデル(ESM)の開発・利用によるIPCCへのデータ提供などを通じて国際的枠組みにも貢献している。全球水循環モデルや洪水防止のためのダム事前放流支援技術、気候変動適応策の研究などで国際的に高い水準の研究が行われている。高精度の気象予報モデルや特徴的な温暖化ダウンスケーリング研究などの基礎研究にも強みを有する。
- ・環境資源の持続的利用分野：水利用・水処理では膜処理やUV-LEDなどに強みをもつ。また除去・浄化(大気、土壌・地下水)に関してはガソリン車用三元触媒や鉱山廃水浄化技術などで国際的に高い水準の研究や技術がある。一方、欧米や中国と比較して研究者総数が少なく、国際学術誌での情報発信などに弱みを持つ。国際的な規制や施策への影響力や、国際標準的機器の市場形成力などが課題となっている。
- ・生態系・生物多様性の観測・評価・予測分野：生態系・生物多様性観測では国際的な取組みに参加し東アジア地域の情報蓄積に貢献している。一方、昨今の潮流である国内外に蓄積された膨大な観測データを使った解析や各種科学的知見などを駆使した総合的な研究などは欧米が主導するケースが多い。また欧米と比較して国際的プラットフォームの構築や社会-生態システムのガバナンス研究などでも後れをとっている。社会・経済的側面からの研究や観測・シミュレーション一体での統合的研究の推進、地域での実証、社会実装、アジア・モンスーン気候に特化した国際発信力の向上などが今後の課題と認識されている。
- ・環境に係る基盤的分野：大気環境分析分野ではPM_{2.5}に係る研究で国際的に高い水準の研究や技術がある。個別物質ではマイクロプラスチックやヒ素、水銀などで高い水準の分析的研究が行われている。相対的な弱みとしては、観測体制、独自の観測機器や分析技術の国際的展開などが挙げられる。ライフサイクルアセスメントや環境影響評価では個別の製品開発や企業ニーズに対しては蓄積を有する。一方、欧米と比べて、全体システムの観点でのリスクに基づいた環境影響、環境運命の総合的評価や、環境保全のための法規制と産業振興政策の両面の観点を織り込んだデータベース構築戦略などで後れをとる。

以上の国内外の研究開発動向や社会経済動向を踏まえると、今後の環境・エネルギー分野の研究開発の展望や方向性は次のように考えられる。

研究開発として今後一層重要性が増すと予想されるのは、「社会の移行 (transition) を促進する研究開発」である。目指す社会への移行を各国が加速させる中、これに貢献することが研究開発にも求められている。

ではどのような社会を目指すのか。これは、「ネットゼロエミッションな社会 (気候変動緩和)」、「アダプティブな社会 (気候変動適応)」、「レジリエントな社会 (強靱性)」、「サーキュラーな社会 (循環経済)」の4つが主な方向性と考えられる。これらの中核にある共通の価値観は持続可能性と包摂性である。これらの方向性のうち特にネットゼロエミッション社会に関しては、2050年カーボンニュートラルという野心的な目標が設定されており、逆算すれば2030年頃には社会の中のエネルギーシステムを大きく変えていかなければならない。特定の業界や個別の技術単体で解決できる問題ではないため、分野の垣根を超えて総合的に取り組む必要がある。

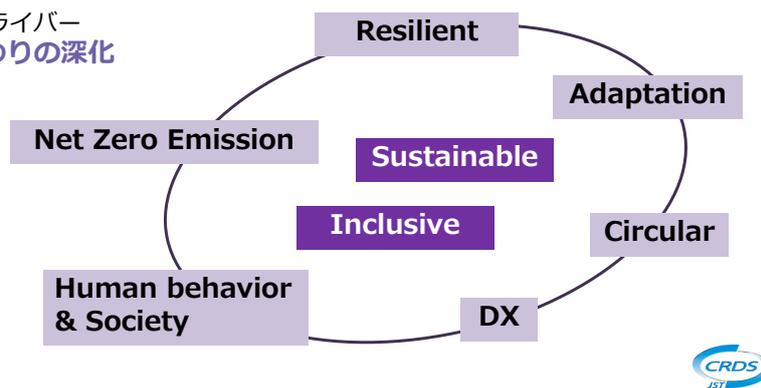
またこれらの社会への移行を促進するにあたって鍵となるのは「DX化」および「人の行動や社会との関わり」の深化である。ここでのDX化には、研究開発上のDX化のみならず、社会のDX化も含まれる。人の行動や社会との関わりについても、研究開発対象としてこれらをより深く理解するという側面と、社会実装や普及まで見据えた研究開発を進める上での多様なステークホルダーとの協働という側面が含まれる。

今後の展望・方向性

社会の移行 (transition) を促進する研究開発

- 中核となる価値観 (サステナブル&インクルーシブ) の下、
- ネットゼロエミッションな社会 (緩和) へ
 - アダプティブな社会 (適応) へ
 - レジリエントな社会 (強靱) へ
 - サーキュラーな社会 (循環) へ

- 移行を進める上でのキー・ドライバー
- 人の行動や社会との関わりを深化
 - DX化



© 2021 CRDS |



図 2.1-1 今後の展望・方向性

4つの社会への移行に向けて今後注力すべき課題は下図のとおりである。ここでは目指す社会ごとに対応関係を示しているが、相互に関連性もある。気候変動の緩和と適応は一体的に取り組むべき課題だが、気候変動適応は異常気象など自然災害との関わりも深いため、レジリエントな社会に向けた取組みとも共通する部分がある。循環経済もネットゼロエミッションやレジリエントな社会との一体的な推進が必要である。

ネットゼロエミッションの実現に向けた取組みでは、アジャイルな研究開発やインセンティブ付与などによって社会実装を加速させること、GHG排出削減の状況やそれに向けた各種の取組み状況を把握しPDCAサイクルを回すこと、分野融合的な取組みやマルチステークホルダーとの協働を可能にする横断的な取組みを行うこと、次世代の人材や技術を育成すること、次世代技術の育成や実装加速を支える基礎・基盤を強化すること、そして社会の移行を支えるというスタンスを国際的にも示すことなどが重要と考えられる。気候変動適応やレジリエントな社会の実現に向けた取組みでは、科学的知見や技術の統合化・総合化を進める体制づくり、およびそれらを社会に実装するモデルケースを創出・蓄積していくことが必要と考えられる。最後に循環経済の実現、あるいは他にも含めた4つの目指すべき社会の実現に向けて必要な横断的な取組みとしては、DXのためのプラットフォーム構築が挙げられる。地球環境の観測・計測、データ処理、解析の間の連携強化や、エネルギー関連データ基盤の構築、これらを支える人材としての技術者の確保・育成、更にはデータを利用しやすいように保持する機構などが必要と考えられる。

環境・エネルギー分野の研究開発は極めて広範囲に亘る。現在の社会の発展とともに、より良い社会と地球環境を将来世代へと引き継いでいく責務も担っている。コロナ禍に直面し、明日の生活にも不安を抱かざるを得ない状況が続いているが、この困難を乗り越えてたくましく発展していく社会を支える柱として研究開発を力強く進めていくことが求められている。

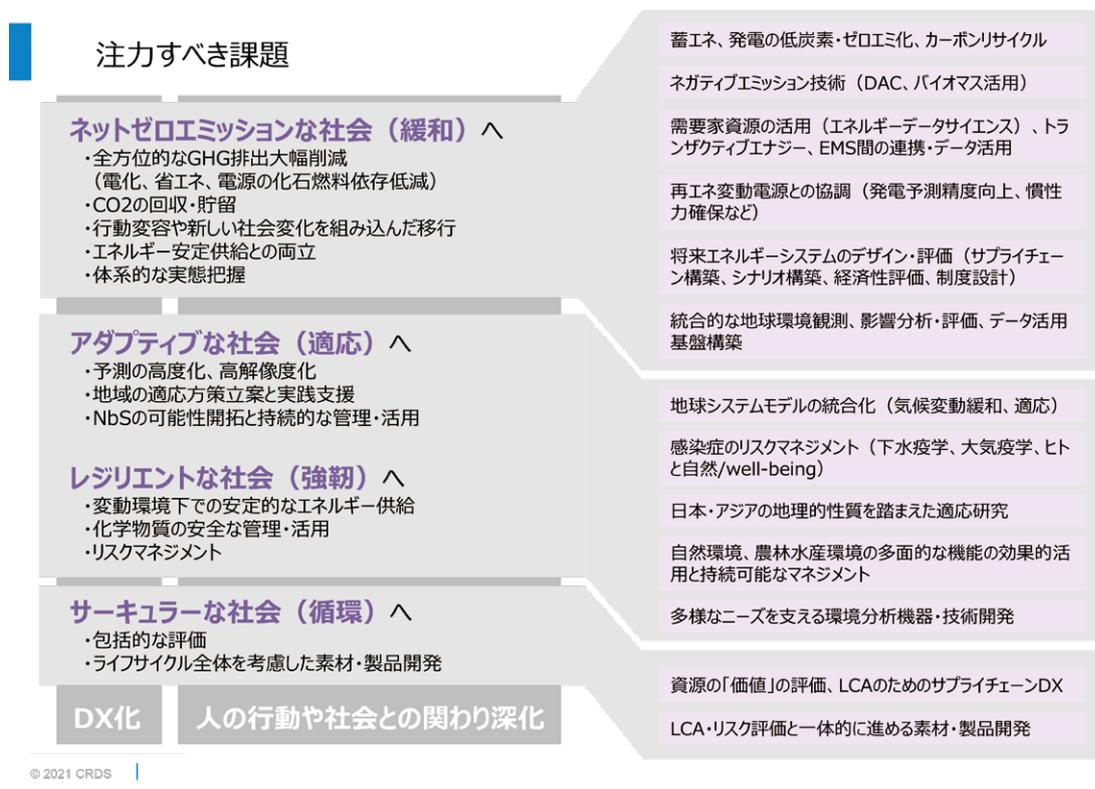


図 2.1-2 注力すべき課題

表 2.1-1 研究開発状況の国際比較 (環境・エネルギー分野)

<エネルギー区分>

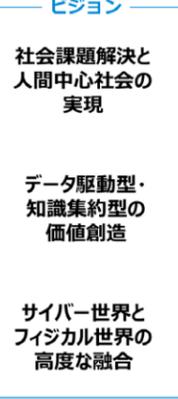
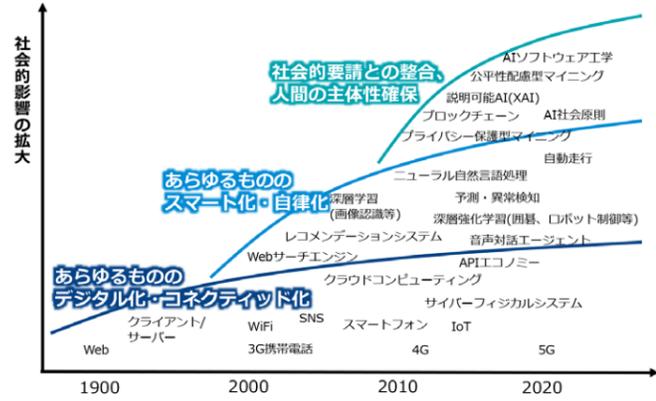
	国・地域	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	フェーズ	基礎	応用								
エネルギー資源探査・開発技術、CCS	環境保全技術	◎↗	○↗	◎→	◎↗	◎↗	○↗	△↗	○↗	--	△→
	CO ₂ 分離回収	◎→	◎→	◎→	◎→	○→	◎→	○↗	○↗	○→	△↘
火力発電		○→	○→	◎↗	◎→	○→	○→	◎↗	○→	△→	○→
原子力発電	新型炉	△→	△→	△→	○↗	△→	○→	○↗	◎↗	△→	△↘
	核融合	○→	◎→	○↘	◎→	○→	◎↗	○↗	◎↗	○→	○→
	原子力安全	○↗	◎↗	◎→	◎↗	◎→	◎→	○↗	◎↗	○→	◎↗
	再処理	○→	○↘	○→	△→	○→	△→	○↗	○↗	○→	△→
太陽光発電	太陽光	○→	○→	○→	○→	◎↗	○↗	○→	◎→	△→	△→
	宇宙太陽光	○→	○→	○→	○↗	△→	△→	◎↗	◎↗	○→	○↗
風力発電		△↘	△→	×↘	×↘	◎→	◎→	×→	×→	×↘	×↘
バイオマス発電・利用		○↗	△→	○→	○→	○↗	◎↗	△→	△→	△→	○↗
その他の再生可能エネルギー発電 (水力、海洋、地熱、太陽熱)	水力	△→	△→	△→	△→	○↗	○↗	○↗	◎↗	△→	○↗
	海洋	○→	○→	◎→	◎→	◎↗	◎↗	○→	◎→	○→	◎↗
	地熱	○→	◎→	◎↗	◎→	◎→	◎→	○→	○→	-↘	-↘
	太陽熱	○→	△↘	◎↗	○→	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	△→	△↘
電気エネルギー利用 (EMS)		○→	◎↗	○↘	○↗	◎↗	◎↗	○→	◎↗	○↗	△→
電気エネルギー利用 (電力貯蔵)		◎→	◎↗	◎→	○↗	◎↗	○↗	○↗	◎↗	○→	◎↗
熱エネルギー利用 (産業熱利用)	蓄熱	◎↗	△→	◎↗	○↗	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	○→	△→
	熱再生	◎→	◎→	△→	○→	○→	○→	◎↗	○→	△→	△→
熱エネルギー利用 (民生熱利用)		○→	◎↗	◎↗	◎↗	◎→	◎↗	○↗	○↗	--	--
化学エネルギー利用		◎↗	◎↗	◎→	◎→	○↗	◎↗	○↗	○↗	○→	○↗
地域熱供給 (地域冷暖房)		△↘	○→	--	○-	◎↗	◎↗	--	△→	--	○→
エネルギーシステム評価		○→	○→	△→	△→	○→	○→	○↗	○↗	△↗	○↗
反応性熱流体		○→	◎→	◎→	◎→	◎→	◎↗	○↗	○↗	○↗	△→
トライボロジー		◎↗	◎↗	◎→	◎→	◎↗	◎→	◎↗	○↗	△→	○→
破壊力学		△↘	○→	◎↗	○→	○→	○→	◎↗	◎↗	×↘	×↘
計算工学		○↗	○↗	◎↗	○↗	○↗	○↗	--	--	--	--

<環境区分>

	国・地域	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	フェーズ	基礎	応用	基礎	応用	基礎	応用	基礎	応用	基礎	応用
気候変動観測	衛星	○↓	○↓	◎→	○→	◎→	◎→	△↗	○↗	△→	○→
	大気・陸域	○↗	○→	◎↗	◎→	◎↗	◎↗	○↗	△→	○↗	△→
	海洋	○→	△→	◎→	◎→	◎→	△→	○↗	△→	○→	△→
気候変動予測		◎→	○↗	◎→	◎↓	◎→	◎↗	△→	△↗	△↗	○→
水循環(水資源・水防災)		◎→	○↗	◎→	◎↗	○→	◎→	○→	○→	△→	△→
水利用・水処理		○→	○→	○→	○→	◎→	◎→	○↗	○↗	○↓	△↓
除去・浄化技術(大気・土壌・地下水)	大気	◎→	◎→	◎→	◎→	◎→	◎→	○→	○↗	△→	○→
	土壌・地下水	◎→	◎→	◎→	◎→	◎→	◎↗	◎↗	◎↗	○→	△→
有機化学物質分析・毒性評価		○→	○→	○↓	◎→	◎→	◎→	◎↗	◎↗	○→	△→
無機化学物質・動態把握		○→	○→	◎→	◎→	◎→	◎→	○↗	○↗	△→	△→
生態系・生物多様性の観測・評価・予測		○→	○→	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	○→	△→
社会-生態システムの評価・予測		○↗	○↗	◎↗	◎→	◎↗	◎↗	○↗	◎↗	△↗	△→
循環利用とライフサイクル評価		○→	○→	○→	◎↗	◎↗	◎↗	×↓	◎↗	△↓	△↓
都市環境サステナビリティ(気候変動適応、感染症、健康)	気候変動適応	◎→	○→	○↗	○↗	◎↗	◎↗	○↗	○↗	○↗	○↗
	感染症	△↗	○↗	○↗	◎↗	○↗	○↗	◎↗	△-	--	--
	健康	○↗	○→	◎↗	○→	◎↗	◎↗	○↗	○↗	○-	○-
農林水産業における気候変動適応・緩和	農林業	○→	○↗	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	○↗	◎↗	△→	△→
	水産業	○→	△↗	◎↗	○↗	◎↗	○↗	△↗	--→	--→	--→

[注] 研究開発領域毎の状況を相対比較した結果(記号は現状を、矢印はトレンドを表す。詳細は俯瞰報告書に記載)を並べたものであり、ある国・地域について研究開発領域間の状況を比較・集計したものではない。

技術トレンドと社会の要請・ビジョン



サイバー世界とフィジカル世界の高度な融合
Internet of Things (IoT) やサイバーフィジカルシステム (CPS) は、社会生活を支える基盤となる。

データ駆動型・知識集約型の価値創造
知識・情報・データベース化と統合的活用、それを実現するプラットフォームや人工知能技術、実際の人間社会に影響するCPSなどにより、データ駆動型・知識集約型の価値創造が加速される。

社会課題解決と人間中心社会の実現
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システムデザインが促進される。

社会・経済の動向

- 世界
・新型コロナウイルス感染症の蔓延。社会の分断、経済活動の後退
・世界経済成長は年3-4%と低成長、民主主義の揺らぎ
・格差問題、SDGsニーズの市場化、無くならない貧困、食料偏在化
・市場主義の揺らぎ、金融市場主義への反発
・地政学リスク高水準、テロ増加
・温暖化、地球環境リスク、自然災害リスクの増加
・産業構造、労働構造、人間行動の変化、意志決定システムの変化、教育への期待の変化
・先進国、新興国の消費・サービス構造の変化

- 日本
・新型コロナウイルス感染症による社会経済活動の後退
・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

分野の俯瞰と戦略的研究開発領域

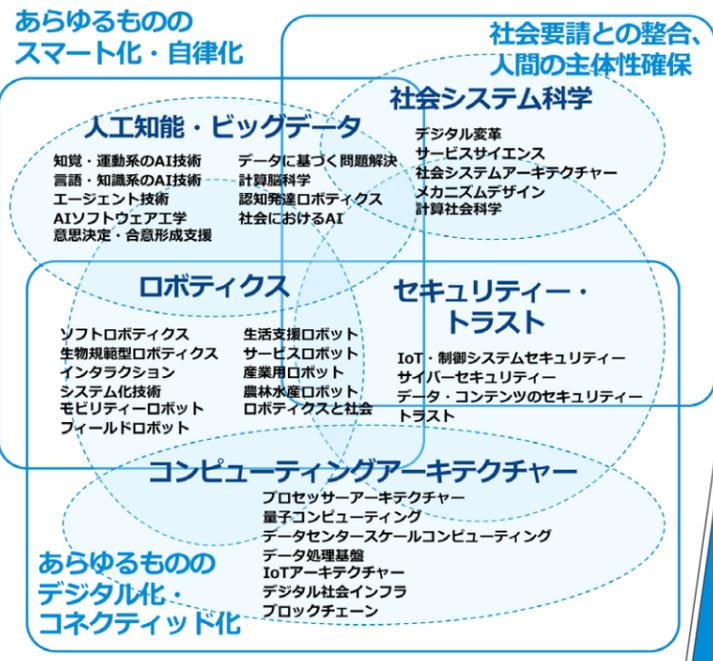
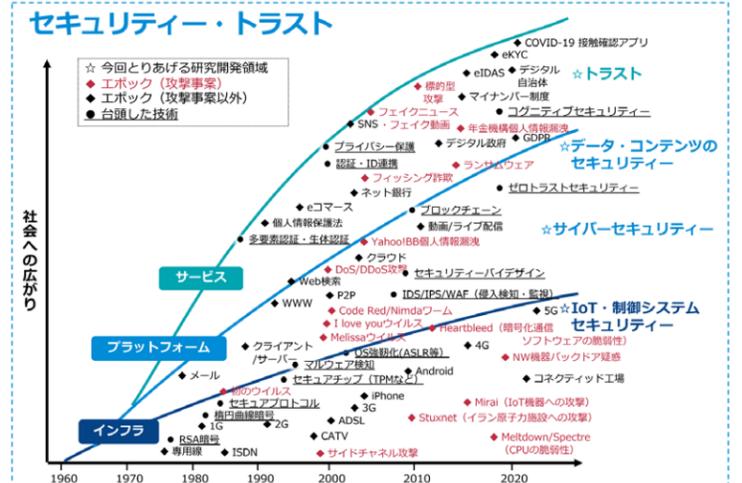
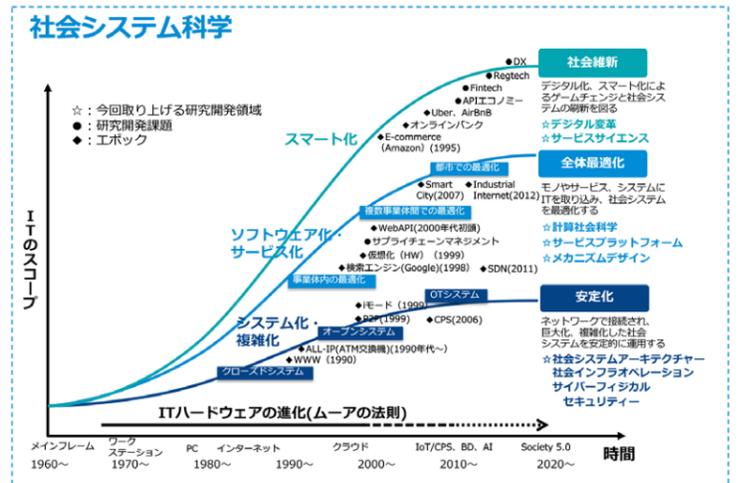


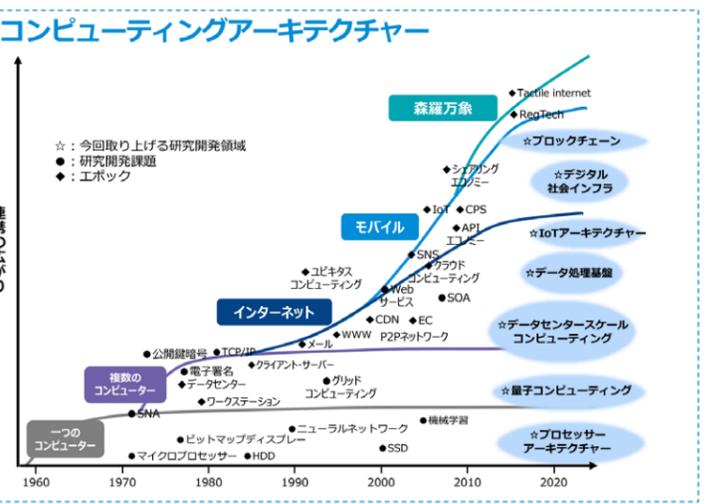
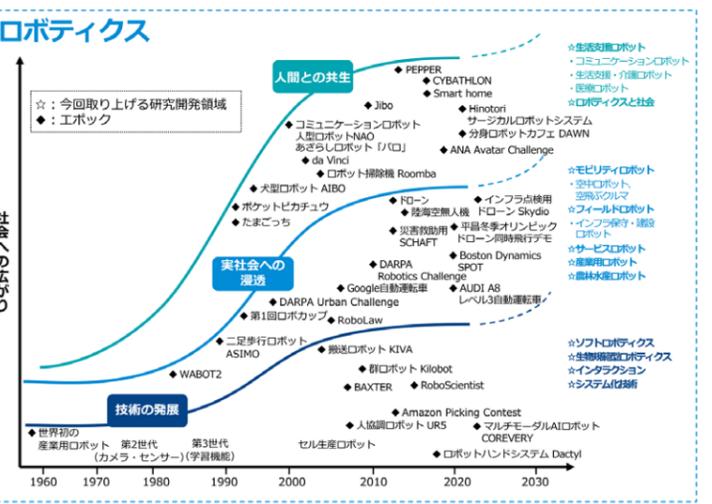
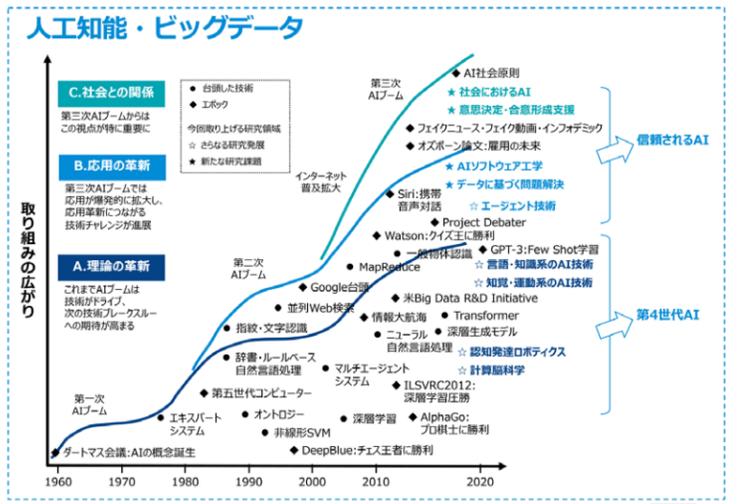
Table with 4 columns: 人工知能, ビジョン・言語処理, インタラクション, システムズ エンジニアリング. Includes sub-tables for System/Information Theory and Basic Layers.

俯瞰区分と研究開発領域



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
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



推進すべき重点テーマ

第4世代AI ④技術
深層学習と知識・記号推論を融合することで、人間と親和性が高く、実世界で発達・成長するAIの実現を目指す。

AIと科学 ④技術, ④基盤
AI・データ駆動型科学によって科学的発見・理解を拡大・加速する。

Society デジタルツイン ④社会
IoT等のセンシング技術で取り込んだ実際の社会活動データを解析し構築された社会モデルを利用し、社会現象を模擬する社会シミュレータ。

ブロックチェーン ④産業, ④社会
信頼性を担保した分散管理台帳技術の基盤構築と応用開拓に関する研究開発を行う。

リアルタイムシステム ④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ーの研究開発を行う。

2.2 システム・情報科学技術分野

システム・情報科学技術（IT）は汎用的な技術分野であり、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。新型コロナウイルスの感染拡大に際しては、デジタル革新の有効性が世界各国で実証され、ITの重要度は増すばかりである。ITによる変革は、ナノテクやライフサイエンスなどの科学技術の発展にも大きく貢献している。

「研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野（2021年）」（以下、分野別版報告書）では、システム・情報科学技術が目指す「サイバー世界とフィジカル世界の高度な融合」「データ駆動型・知識集約型の価値創造」「社会課題解決と人間中心社会の実現」の3つのビジョンと、システム・情報科学技術の進化における「あらゆるもののデジタル化・コネクティッド化」「あらゆるもののスマート化・自律化」「社会要請との整合、人間の主体性確保」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」「社会の要請・ビジョン」「社会インパクト」の3点を選定基準に、戦略的に重要度が高い36の研究開発領域を特定した。CRDSでは、この36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」「セキュリティー・トラスト」「コンピューティングアーキテクチャー」の5俯瞰区分にまとめた（図2.2-1）。

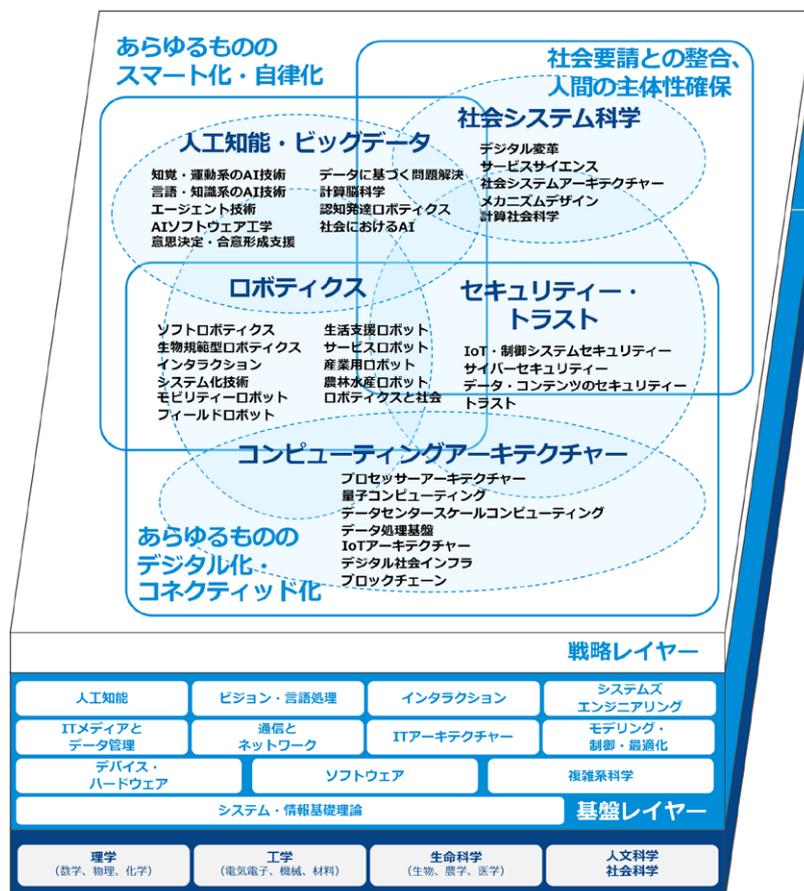


図2.2-1 システム・情報科学技術分野の俯瞰

「研究開発の俯瞰報告書 (2019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、別の俯瞰区分にあったセキュリティーに関連する研究開発領域を集めた新しい俯瞰区分を新設し5区分とした。俯瞰区分ごとの俯瞰図については、2019年版と同様に、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。分野別版報告書では「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つの考え方に基いて国として推進すべき21の重点テーマを抽出した (表2.2-1)。

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、さまざまな形での、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。特に、科学技術の進展と雇用の関係、技術導入の差異が経済的格差に与える影響、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。分野別版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。

表2.2-1 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*			
		技術	産業	社会	基盤
第4世代AI	深層学習と知識・記号推論を融合することで、現在の深層学習の課題を克服し、人間と親和性が高く、実世界で発達・成長するAIの実現を目指した研究開発テーマ。	○			
信頼されるAI	AIのブラックボックス問題、差別・偏見問題、脆弱性問題、品質保証問題、フェイク問題等の解決という社会的要請を充足し、信頼される高品質なAI (Trusted Quality AI) を実現するための研究開発テーマ。		○		○
AIと人間の共進化	専門家等の高度なスキルをAIが学習し、より幅広い層の人々がそれを活用できるようにすることで、人間とAIの協調活動をレベルアップする研究開発テーマ。	○		○	
社会システムを支えるAIアーキテクチャー	AI技術がさまざまな社会システムに組み込まれて動作する世界 (ユビキタスAI) において解決すべき技術課題として、多数のAIシステム/エージェント間の交渉・協調・連携や望ましいメカニズムデザイン、社会システムスケールの効率的な分散協調AIアーキテクチャー (AI向けチップから計算機クラスターやエッジ・クラウドまで総合的に捉えて) 等に取り組む研究開発テーマ。				○
AIと科学	AI・データ駆動科学によって科学的発見・理解を拡大・加速するための研究開発テーマ。	○			○
AI×ロボット融合	人工知能研究とロボット研究を融合的に取り組み、両分野のシナジェティックな進展を狙う研究開発テーマ。	○	○		

社会的に成長するロボット	人間の社会的行動を理解し、自らも社会的・道徳的規範に基づいた社会的行動をとることができるロボットの実現を目指す研究開発テーマ。		○	○	
テレプレゼンス	遠隔操作するロボットを介して、周辺環境を知覚し、自由に行動するなど、あたかもその場にいるような体験ができる技術の実現を目指す研究開発テーマ。		○	○	
チームロボティクス	複数のロボットをチームとして再構成し、協調して行動することにより、様々な複雑なタスクに対し柔軟に対応できるロボットの実現を目指す研究開発テーマ。	○	○		
Society デジタルツイン	社会課題解決を支援するために、IoT等のセンシング技術で取り込んだ実際の社会活動データを解析し構築された社会モデルを利用し、社会現象を模擬する社会シミュレーター実現に必要な研究開発テーマ。			○	
コグニティブセキュリティ	人間の認知や思考、意思決定などに悪影響を与える攻撃からの防御に関する研究開発テーマ。			○	○
トラスト基盤	情報社会における安心・信頼の確保を目指す総合的な研究開発テーマ。				○
Society 5.0プラットフォーム	サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会課題解決を両立するSociety 5.0のプラットフォーム構築を目指す研究開発テーマ。			○	○
ブロックチェーン	信頼性を担保した分散管理台帳技術の基盤構築と応用開拓に関する研究開発テーマ。		○	○	
データセンタースケールコンピューティング	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ーの研究開発。				○
非フォンノイマンコンピューティング	ニューラルネットワークや組合せ最適化を高速に実行するハードウェアや、そのための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研究開発テーマ。	○			
量子コンピューティング	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	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ーの研究開発を行うテーマ。		○		○
データ流通・共有基盤	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を目指すテーマ。				○
数学と情報科学	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。	○			
ニューノーマルとDX	生活様式の変容が求められる中、仕事、学校、政府などのオンライン化やデジタルトランスフォーメーション(DX)により高まるITへの社会的期待に応えるための研究開発テーマ。			○	○

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

表2.2-2 研究開発状況の国際比較（システム・情報科学技術分野）

	国・地域	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	フェーズ	基礎	応用								
人工知能・ビッグデータ	知覚・運動系のAI技術	○↗	○↗	◎↗	◎↗	○→	○↗	○↗	◎↗	△→	△↗
	言語・知識系のAI技術	○↗	○→	◎→	◎↗	○→	○→	◎↗	◎↗	△→	○↗
	エージェント技術	○→	○↗	◎→	◎→	◎→	○→	○↗	○↗	△→	△→
	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	◎→	○→	◎→	◎→	◎→	◎→	◎↗	○↗	○→	○→
ロボティクス	認知発達ロボティクス	○↗	○↗	△→	△↘	○→	○→	△↘	△↘	△↘	△↘
	社会におけるAI	◎→	○↗	◎→	◎→	◎→	◎→	△→	△↗	△→	△→
	ソフトロボティクス	○→	○↗	◎↗	◎↗	○→	◎↗	○↗	○↗	○→	△↗
	機構・生物規範型	○↗	○→	◎↗	◎↗	○↗	○→	○→	◎↗	○→	△→
	インタラクション	○↗	○↗	◎→	◎→	◎→	○↗	×→	○→	△→	○↗
	システム化技術	○→	◎↘	◎→	◎→	○→	○↗	○↗	◎↗	△↗	△→
	モビリティロボット	○↘	○→	◎→	○↗	◎→	○→	◎→	◎→	○→	○→
	フィールドロボット	○→	○→	○→	◎↗	○→	◎↗	-	-	-	-
	介護・医療ロボット（コミュニケーション）	◎→	◎→	◎↗	◎↗	○↗	△↗	△↗	○↗	○→	△→
	介護・医療ロボット（生活支援・介護）	◎↗	◎↗	◎→	○→	◎→	◎↗	△↗	○↗	○→	△→
	介護・医療ロボット（医療）	○→	○↗	◎→	◎→	◎↗	○→	○↗	○↗	○→	○→
	サービスロボット	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	○→	×↘	○↗	◎↗	△↗	○→
	産業用ロボット	○→	○↘	○→	◎→	○→	○→	○↗	◎↗	○→	△→
農林水産ロボット	○→	◎↗	◎→	◎↗	○→	◎↗	◎↗	△→	○→	◎↗	
社会システム科学	デジタル変革	○→	○↗	○→	◎→	○→	○→	○→	◎→	○→	○→
	サービスサイエンス	○→	○→	◎→	◎→	○→	◎↗	○→	-	-	△↗
	社会システムアーキテクチャー	○→	○→	◎→	◎↗	◎→	◎↗	○→	○↗	○→	△→
	メカニズムデザイン	○↗	△→	◎↗	◎↗	◎↗	○↗	○↗	△→	△→	△→
	計算社会科学	○→	△↗	◎↗	◎↗	◎↗	○↗	○→	◎↗	○→	○↗
セキュリティ・トラスト	IoT・制御システムセキュリティ	○→	○↗	◎↗	◎↗	○↗	◎↗	○↗	○↗	△→	△→
	サイバーセキュリティ	○↗	○→	◎→	◎→	○→	○↗	◎↗	△↗	○→	○→
	データ・コンテンツのセキュリティ	○→	○→	◎↗	◎↗	○→	◎↗	○↗	○↗	○→	△→
コンピューティングアーキテクチャー	プロセッサアーキテクチャー	△→	△→	◎→	◎→	○→	○→	◎→	◎↗	○→	△→
	量子コンピューティング	○↗	△→	◎↗	◎↗	◎→	△↗	○↗	△↗	--	--
	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	○→	○→	◎→	◎→	◎→	○→	◎→	◎→	○→	△→
	IoTアーキテクチャー	△↘	○↘	◎→	◎→	○→	○↘	◎↗	◎↗	△→	○→
	デジタル社会インフラ	○→	○→	◎↗	◎→	◎→	○→	◎↗	◎↗	△→	○→
	ブロックチェーン	○→	○→	◎→	◎→	○→	◎↗	○→	◎↗	△→	△→

[注] 研究開発領域毎の状況を相対比較した結果（記号は現状を、矢印はトレンドを表す。詳細は俯瞰報告書に記載）を並べたものであり、ある国・地域について研究開発領域間の状況を比較・集計したものではない。

社会の要請・ビジョン

■ Society 5.0の実現

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

■ グローバルな環境・エネルギー問題の解決

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

■ 超高齢社会、ポストコロナ社会への適応

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

社会・経済の動向

■ 経済的側面

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

■ 社会的側面

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

世界の研究開発トレンド

次世代パワー半導体 SiC, GaNが実用化フェーズにSiの高性能化も着実に進む。Ga ₂ O ₃ 、ダイヤモンドなどウルトラワイドギャップ半導体への関心が高まる。	次世代蓄電デバイス LIBの着実な高性能化が進む中、全固体型、金属-空気、多価イオン、リチウム一硫黄などの革新電池の研究にも進展。一部のギャップ半導体への関心が高まる。	バイオファブ리케이션 細胞からなる3次元組織体を生体外で構築する技術が進む。組織・臓器再生、創薬などの医療用途に加えて、培養肉製造への応用にも期待。	集積化 3次元チップ AI等による危険予知や状況認識には、多種多様な情報（データ）が必要。信頼性が高く、様々なデータを取得可能なマルチモーダルセンサに期待。	脳型AIチップ 次世代人工知能技術に要求される特徴的な電子状態の実現に向け、脳構造・機能にヒントを得た情報処理技術とそのチップ化に期待。	量子コンピュータ 米国Google、中国科大が量子優位性を発表、と相次いで発表。米国IBMも量子ビットの高集積化に向けた開発を進めるなど、競争が白熱。
循環可能な材料設計・創製 材料の使い捨てから再利用へのシフトに関心が高まりつつあり、材料における結合・分解の精密制御による循環可能な材料の設計・創製への期待が高まる。	多機能・複雑系材料設計・プロセス 高性能化、多機能化、相反する機能の共存などを表現する複雑な組成や構造を有する新材料の設計とプロセス技術に期待。	データ駆動型材料設計・創製 機械学習などデータ科学的手法により物質設計・創製を革新。ロボットによる自律的探索や合成プロセスを活用。材料開発期間を大幅短縮。	低次元・2次元材料 低次元性やトポロジに起因する特徴的な電子状態を活かした次世代の電子デバイスやエネルギー変換デバイスの候補として、低次元材料やトポロジカル材料に注目。	3次元微細加工 セルフアライメント化と高アスペクト比化が先端半導体プロセスの重要な進化軸。選択的ALDや、超高選択比加工を可能にするALEへの期待が高まる。	オペランド計測 材料の合成過程やデバイスの動作状態の動的計測を通じて機構を解明。高機能材料・デバイスの開発を支援。

ナノテクノロジー・材料分野（2021年）

ナノテクノロジー・材料分野 研究俯瞰図



日本の現状・課題（俯瞰区分ごと）

- 総論**
 - 長年の技術蓄積により、エネルギー材料、電子材料、複合材料などの物質創製・材料設計技術に伝統的に強み。
 - 上記を支える計測・分析・評価・加工技術に関しても、強みを有する技術が多数存在。
 - IoT社会実現に向けたセンサ・コンピューティングのヘテロ集積モジュール技術等に強み。
 - データ科学、標準化・規制戦略、医工連携、産学連携、ナノ物質・新物質のELSI/EHS/RRRI、人材育成に課題。
- 環境・エネルギー分野**
 - 再エネ利用、CO₂削減、資源循環の観点から世界的に研究開発が活発化。
 - 日本は、太陽電池、蓄電デバイス、パワー半導体、エネルギーキャリアで国プロが充実し基礎研究フェーズに強み。
 - キーデバイスの研究開発に注力しすぎること、システム全体を含めた製品普及フェーズでの後れが懸念。
- ライフ・ヘルスケア分野**
 - 日本は、バイオ材料、ナノDDS等のナノ医療システム、バイオ計測・診断デバイス、バイオイメージングなど基礎研究のレベルは高い。
 - 医工連携・異分野融合が不十分。安全性評価・承認取得の難しさ、ベンチャー支援制度の不足など、応用研究・開発へつなぐための支援体制の構築が課題。
- ICT・エレクトロニクス分野**
 - 日本は、新概念にもとづくエレクトロニクスの基礎研究では存在感を発揮。
 - 従来産業界に蓄積された技術・人材の散逸を防ぎ、有効利用するための仕組みが課題。
 - 量子技術分野では国家戦略が策定され強化されつつあるが、他国と比較すると予算規模・増え方は十分とはいえない。
- 社会インフラ分野**
 - 日本は、金属材料、複合材料ともに研究レベルが高く、炭素繊維の生産は市場的にも圧倒的にシェアが高い。
 - SIPで開発してきたマテリアルズインテグレーションによる材料設計を活かした材料機能の高性能化が期待される。
 - 中国・韓国における基礎研究、応用・開発研究が活発化してきており、競争力の維持が課題。
- 物質と機能の設計・制御**
 - ナノテク・材料分野の中核をなす研究領域が含まれ、日本の競争力の源泉であり、活発な基礎研究が進む。
 - 応用研究・開発研究では、低次元・トポロジカル材料など欧米と比較して劣勢にある研究領域も存在する。
 - マテリアルズ・インフォマティクスが世界的に活発化。特に中国での論文・特許数の上昇傾向が著しい。
- 共通基盤科学**
 - 日本は、微細加工関連技術では、半導体素子製造材料、欠陥評価技術で産業優位性を維持。積層造形・レーザ加工へも力を注ぐが、欧米中が先に実用化段階にある。
 - オペランド計測分野で新規計測手法の開発に貢献。
 - 理論・計算では、量子コンピュータを活用した量子化学計算で先頭集団を維持する。

主要国におけるナノテク・材料科学技術の基本政策・国家戦略動向

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

めざす社会像

6つのニーズ、13のグランドチャレンジ

■ 安全・安心で豊かなデジタル社会

- ① コンピュータ革新を支えるIoT/AI/量子デバイス**
生活空間、社会空間に張りめぐらされたセンサ群から得られるビッグデータを安全・高速・低消費電力で情報処理する革新的なコンピューティングデバイスの実現。
- ② 安全低環境負荷の輸送と低消費電力・大容量の通信**
人や物などの物理的実体（リアル）や大容量の情報（サイバー）のいずれも低環境負荷かつ安全に輸送、送達するインフラの実現。

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

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

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

4. ナノ化学制御によるスマート材料
輸送・交通におけるCO₂排出量の大幅削減、摩擦によるエネルギー損失を大幅低減した機械機器、社会インフラ材料の超長寿命化や易修復などを実現する材料・デバイスの創製。

■ 健康で幸せな生活が可能な社会

- ③ 健康・医療・生産システムを支えるバイオ技術**
健康寿命の延伸等に資する疾患の超早期診断やヘルスマニタリング、身体機能の補助を行う医療デバイス等の実現。細胞や微生物を活用したバイオ技術による食料生産（人工培養肉ほか）。
- ④ 人と共生するロボット**
負担の少ない高齢者介護、安全な社会インフラ保守管理などの課題の解決のため、人間が苦手な作業の代行や人間の作業能力を補強・拡張可能な共生ロボットの活用。

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

6. バイオインスパイアード材料・システム
生物が有する巧妙な構造や機能、生物が低エネルギーで実現する動作や低環境負荷の物質生産に学んだ材料・デバイス、生産システムを人工的に構築。

7. バイオアダプティブ材料
生体環境に適合した材料の探索という従来の概念を超え、生体との相互作用を積極的に活用して能動的に制御する機能をもつ材料の設計・創製。

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

■ 低環境負荷で持続可能な社会

- ⑤ 水・大気・資源の循環を可能にするスマート材料**
世界の人口増による著しい水不足や海洋汚染、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/蓄エネのための先端材料・デバイス**
再生可能エネルギーを持続的かつ効率的に導入するために必要な省/蓄エネルギー用材料・デバイス。

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

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

■ 上記すべての基盤技術

- 11. 多機能・複雑系の材料設計**
機能性材料の高度化に多元素化や複合化などの複雑化が避けられないなか、絨毯爆撃的な材料設計から脱却し、進展が著しいシミュレーションやデータ科学、さらにはオペランド計測を駆使した精緻な材料設計、プロセス設計手法の確立。
- 12. 材料合成プロセス設計基盤**
材料やデバイスを合成・作製するプロセスについて、データ科学を用いて最適プロセスの発見を行うプロセス・インフォマティクスなどの設計基盤の構築。
- 13. 次世代オペランド計測**
反応プロセス中の物質・材料もしくは実動作下の材料・デバイスを対象に動的計測を実行し、得られた計測結果に対してデータ科学的手法を駆使して高速・高効率なデータ解析を実現。計測とプロセスを一体化したものづくりのための基盤技術を構築。

2.3 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、数理科学といった基礎科学をベースに、ナノスケールで生じ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。ナノサイエンスの土台の上には、たゆまず進展してきた微細加工技術や、材料プロセスと成形が一体化した積層造形などの製造技術、高分解能顕微鏡などサブオングストロームの分解能におよぶ計測、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、データ科学などを柱とした共通基盤科学技術が構築され、そうした基盤技術を利用することで、元素戦略や分子技術、マテリアルズ・インフォマティクス、界面・空隙制御、フォノンエンジニアリングなどの物質と機能を結ぶ設計・制御技術が構築されている。そして、これら物質・機能を組み合わせることで部素材、あるいはデバイスが構築され、それら多様な部素材・デバイスは応用目的に応じて、環境・エネルギー分野、ライフ・ヘルスケア分野、ICT・エレクトロニクス分野、社会インフラ分野の最先端を拓く技術が生み出される。下の俯瞰図には、以上述べた分野の構造が示されている。



図 2.3-1 ナノテクノロジー・材料分野の研究開発俯瞰図 (2021年)

人類の文明は、古くから、その時代に利用できる材料と深く関係しており、材料技術の発展が社会や人々の暮らしのあり方を規定してきたといっても過言ではない。21世紀に入ってから、それまで材料技術が担っていたテクノロジードライバーとしての役割を、ナノテクノロジーがともに担うようになった。ナノテクノロジー

は、材料技術と協調しながら社会や暮らしの変化をより一層加速し、異分野技術の融合、技術のシステム化を通して、現代社会の著しい変化をその根本で支えている。

一方で、ナノテクノロジー・材料科学技術が、社会の中で非常に幅広い領域で使われているという特性のために、それらが人体や環境に対して負の影響を与える可能性への懸念も増えている。世界が工業化し始めた初期から、工業廃棄物による各種公害、食品添加物や医薬品による食害・薬害などの人体や環境に対する安全性の問題は生じていたが、ナノスケールの大きさを持つナノ材料の場合には、事情はさらに複雑である。新規なナノ材料は、従来の材料とは異なる新物性を持つことがあり、従来の化学物質のように組成から大まかなリスクを推定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総合的に考慮する必要がある。こうしたリスクの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（Environment, Health and Safety：EHS）の科学的側面からと、倫理的・法的・社会的側面（Ethical, Legal and Social Issues：ELSI）からの取り組みがなされている。また、ナノ材料が、広く国際市場で流通するためには、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。

ナノテクノロジーを世界で最初に国家イニシアティブ（National Nanotechnology Initiative：NNI）として立ち上げ、世界中の研究開発戦略に大きな影響を与えた米国の公的投資は2001年以降の累計で300億ドル以上の規模に上る。トランプ政権以降、NNIの予算は減少に転じているが、2021年1月には、NNIをさらに次の10年間へ向けてどのように展開するかを議論する「ステークホルダー・ワークショップ」をNNCO（National Nanotechnology Coordination Office）が開催するなど、バイデン政権下での動きが注目される。NNI予算の96%は、NIH、NSF、DOE、DOD、NISTの5省庁・機関で占められている。一例をあげるとNSFの2020年予算の合計には、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）に対応した研究開発のためのCARES法（Coronavirus Aid, Relief, and Economic Security Act）にもとづく資金提供1,430万ドルが含まれており、ワクチン、センサ、マスク、フィルタ、抗菌性コーティング等が対象となっている。欧州はフレームワークプログラム「Horizon 2020」（2014年～2020年、74.8Bユーロ/7年）の枠組みの中で、ナノテクノロジー・材料分野の強化を図ってきた。Horizon 2020の3つの優先領域、①Excellent science（24.4Bユーロ）、②Industrial leadership（17.0Bユーロ）、③Societal challenges（29.7Bユーロ）のうち、①の中で、10年間で総額1.0BユーロのFuture & Emerging Technologies（FET）テーマとして、「Graphene Flagship」、「Human Brain Project」、「Quantum Flagship」の3つのプロジェクトが推進されてきた。2021年からは新たなプログラム「Horizon Europe」（2021年～2027年、95.5Bユーロ/7年）が開始される。その詳細は今後明らかになっていくが、これまでのHorizon 2020と同様に、ナノテクノロジー・材料に関する科学技術投資も強化されると考えられる。2020年7月の時点では、Horizon Europeは3つの柱、（1）第一の柱（Excellent science）：24.9Bユーロ、第二の柱（Global Challenges and European Industrial Competitiveness）：53.8Bユーロ、（3）第三の柱（Innovative Europe）：13.4Bユーロが割り当てられている。アジア地域においては、産業界・学術界のいずれにおいても、中国の台頭が著しい。2016年に「科学技術イノベーション第13次五カ年計画（2016～2020年）」では、中国政府が科学技術と経済、科学技術とイノベーションを直結させ、研究・開発から産業化までのイノベーション創出の全過程を視野に入れていることが示されている。13次五カ年計画で目標とされたほとんどの指標は、当初予定通りか前倒しで実現されていることから、中国の科学技術力の進展が著しいことがわかる。さらに、2020年10月末に開催された中国共産党第19期中央委員会第5回全体会議において、科学技術を含む中国全体の2035年までの中長期計画および第14次五カ年計画の大枠が発表された。イノベーション主導の開発を中核に据え、科学技術を通じて国を強化することが強調されており、人工知能、量子情報、集積回路、ライフ・ヘルス、脳科学、生物育種、航空宇宙、深海などの先端分野がプロジェクトの対象としてあげられている。2015年に発表された国家戦略「中国製造2025」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めざした施策が推進されている。

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。さらに、2019年末に中国で最初に確認された新型コロナウイルス感染症の世界的な大流行と、それによる世界の経済・産業の混乱はこの傾向に拍車をかけている。このことはわが国における研究開発計画にも影響を及ぼす可能性を秘めている。また、台湾・韓国・シンガポールをはじめとしたアジア諸国においても、ナノテクノロジー・材料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。

日本は材料・素材分野で基礎・応用ともに高いポテンシャルを有している。これは、長年、物質・材料研究を積極的に進めてきたことに起因しており、磁石、リチウムイオン電池、青色LED、光触媒、炭素繊維などのように、日本で発明、産業化された事例も多い。また、1980年から90年代に日本の電機産業が世界を席巻した背景には、それらの機器に使われた安価で高品質な部品・素材を供給する国内の大企業から中小企業までの部素材産業や製造装置産業企業群の存在があった。それらの企業群が提供する機能性材料・部品・装置の多くは、電機産業の多くが昔の勢いを失った現在でも世界的に大きなシェアを持ち続けている。個々の部素材においてわが国が占める市場の規模はそれほど大きくないが、部素材産業全体を面で見ただけの場合にはわが国は大きな市場を有し、競争力を維持しているといえる。しかし、一方で、リチウムイオン電池の電極材料、液晶製造用フォトレジストやカラーフィルムなどの一部の液晶ディスプレイ材料、パワートランジスタといった、売り上げ規模や今後の市場成長が見込めるために新規参入/投資インセンティブの高い分野では、諸外国の急迫によってシェアの低下傾向が見取れることには注意が必要である。これまでの材料開発では、1つの新材料を生み出すために10年以上の開発期間がかかることもまれではなかったが、このようなグローバル競争の下ではこれまで以上に材料開発のスピードを上げることが課題である。

ナノテクノロジーの重要性が認識され始めた2000年前後には、現在世界の情報産業で支配的な地位にあるGAFA(Google, Apple, Facebook, Amazon)はいずれも、上場企業として存在しないか、数ある情報機器メーカーの1つに過ぎなかった。これらの情報処理産業の巨人達を育てたゆりかごは、その時点を挟む前後それぞれ20年の間、ムーア則に従い指数関数的に半導体の微細化が進み、それにより高性能化を実現し続けた電子機器である。これらを支えてきたのはナノテクノロジー・材料技術の進化といえよう。この先の20年、同じようなスピードで技術が進化を続けていくためには、情報通信技術のソフトウェアと並んで、ハードウェアの発展が必要であることは論をまたないであろう。これまで半導体の進化を支えてきた微細加工が限界に近づいていることは周知であり、ポストムーア時代を担う新技術体系に対する要求は高まりつつある。脳に学ぶことで、柔軟で低エネルギーの情報処理を実現しようとするニューロモルフィックコンピューティングや、量子力学原理を用いてある種の問題を高速に解く量子コンピューティングなどの革新的技術をはじめとした、新たな情報処理技術の研究開発を続けていくことが必要となっている。

以上の背景を踏まえて、「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野(2021年)」(以下、分野別版報告書)第1章では、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動向調査にもとづき俯瞰的にまとめている。また、先に示した俯瞰図から、31の主要な研究開発領域を抽出し、今、社会が要求する重要な6つのニーズの特定、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「13のグランドチャレンジ」について記述している。領域抽出に当たっては、「その技術が急激な進展を示し始めている(エマージング性)」、「その技術が社会や経済に与える影響が大きい(社会・経済インパクト)」、「技術的に重要で継続的に注視し続ける必要がある(継続性)」の3つの視点を重視した。これらの視点に立つことで、新たに出現する重要な領域の見落としや、技術的にも産業的にも重要性を失った領域の技術調査を避けることができる。また、この分野の挑戦課題であるグランドチャレンジの設定には、「社会の変化がもたらす新たな科学技術への要請」、「科学技術の新たな潮流出現に伴う戦略的投資の必要性」、「日本の産業競争力と国家安全保障の根幹となる技術の確保」を考慮した。これらの考え方は互いに相補的であるため、明確なターゲットを持った戦略的研究開発と、知的好奇心に駆動される新しい学

術領域を開拓する基礎研究の両方を、挑戦課題にとりあげることができる。また、第2章においては、抽出した31の主要研究開発領域について、各々10ページ程度を割り、当該領域の意義、歴史的背景から現在の先端技術動向、今後の科学技術的課題、国際比較（日米欧中韓）の結果についてそれぞれ概略をまとめている。分野別版報告書は、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うえで、CRDSの視点から見解をまとめたものである。

表 2.3-1 研究開発状況の国際比較 (ナノテクノロジー・材料分野)

	国・地域	日本		米国		欧州		中国		韓国		
	フェーズ	基礎	応用	基礎	応用	基礎	応用	基礎	応用	基礎	応用	
環境・エネルギー応用	次世代太陽電池材料	◎→	◎↗	○↗	○↗	◎→	◎→	○↗	◎↗	○→	○→	
	蓄電デバイス	◎→	○↘	◎→	◎→	◎↗	○↗	○↗	◎↗	○↗	◎↗	
	パワー半導体材料・デバイス	◎→	◎↗	◎→	◎↗	◎→	◎↗	○↗	○↗	△↘	△↘	
	エネルギーキャリア	◎→	◎↗	◎→	○→	○→	◎↗	○↗	○→	○→	○→	
	分離技術	膜分離技術	○→	○→	◎→	◎→	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	○→	△→
		気体液体分離	◎↗	○↗	◎↗	○→	◎↗	△→	◎↗	△↗	◎↗	△→
		CO ₂ 分離	○→	○↗	◎↗	○↗	◎↗	◎↗	◎↗	○↗	◎↗	△→
金属分離		○↘	○→	○→	◎↗	○→	◎↗	◎↗	◎↗	○→	△→	
ヘルスケア・ライフ・アプリケーション	バイオ材料	○→	○→	◎→	◎→	◎→	◎→	○↗	○↗	○→	○→	
	ナノ医療システム	◎→	○→	◎↗	◎↗	◎→	◎↗	◎↗	◎↗	○↗	○↗	
	バイオ計測・診断デバイス	○→	○→	◎↗	◎↗	○→	○↗	◎↗	○↗	○→	○↘	
	バイオイメージング	◎→	◎→	◎↗	◎↗	◎→	◎→	◎↗	○↗	○→	△→	
ICT・エレクトロニクス応用	新機能ナノエレクトロニクスデバイス	○→	○→	◎→	◎→	◎→	○→	○↗	○→	○→	○→	
	集積フォトニクス	○→	○→	◎→	◎→	◎→	◎↗	○↗	○→	△→	△→	
	スピントロニクス	◎→	○↘	◎↗	○↗	◎→	△→	◎↗	△↗	○↗	○↗	
	MEMS・センシングデバイス	○→	○↘	◎→	◎→	◎→	◎→	○↗	○↗	△↘	△↘	
	ロボット基盤技術	○↗	○→	◎↗	◎↗	○→	○→	○↗	○↗	○↗	○→	
	量子情報・通信	○→	○→	◎↗	◎→	◎↗	◎↗	○↗	○↗	×→	△→	
	量子計測・センシング	○↗	○↗	◎↗	○↗	◎↗	◎↗	△↗	△→	△→	△→	
社会インフラ応用	構造材料(金属)	◎→	○→	◎→	◎→	○→	◎↗	○↗	○↗	○→	○→	
	構造材料(複合材料)	○→	◎↗	○→	◎↗	○→	◎↗	○→	◎↗	△↗	○→	
物質と機能の設計・制御	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	◎↗	○↗	◎↘	◎→	◎→	○↗	◎↗	○↗	○→	○↗	
	トポロジカル材料	◎→	○↗	◎→	◎↗	○→	○↗	◎↗	○↗	○→	△→	
	低次元材料	○↗	○↘	◎↗	◎→	◎→	◎↗	○→	◎↗	○→	◎↗	
	複雑系材料の設計・プロセス	○↗	○→	◎→	○→	◎↗	○↗	○↗	○↗	△↗	△→	
	ナノ力学制御技術	◎↗	◎↗	◎↗	◎→	◎↗	○↗	○↗	○↗	○→	○→	
共通基盤科学技術	微細加工プロセス	○↘	◎→	◎→	◎→	○→	◎↗	△→	○↗	△→	◎→	
	積層造形・レーザ加工	○↗	○↗	○→	○→	○↗	◎↗	◎↗	◎↗	△↗	○↗	
	ナノ・オペランド計測技術	◎↗	◎→	◎↗	◎↗	○→	◎↗	○↗	△↗	△→	△→	
	物質・材料シミュレーション	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	○↗	○↗	△→	△→	
フェーズ		取組	水準	取組	水準	取組	水準	取組	水準	取組	水準	
共通支援策	ナノ・マイクロマテリアルの ELSI/EHS、国際標準	△↘	×→	○→	○→	◎↗	◎→	○↗	○↗	○→	○→	

[注] 研究開発領域毎の状況を相対比較した結果(記号は現状を、矢印はトレンドを表す。詳細は俯瞰報告書に記載)を並べたものであり、ある国・地域について研究開発領域間の状況を比較・集計したものではない。

社会・経済動向 (期待・要請)

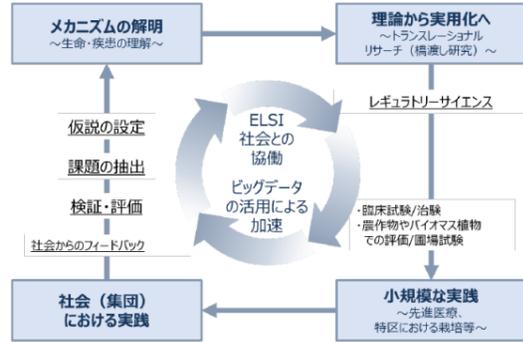
世界的に「より多くの人に、より質の高い医療サービスを、より安定して提供する」ことが求められている。また世界の人口は増加の一途をたどっており、「より多くの人々が、より質の高い食料を安定して入手できる」ための食料安全保障は喫緊の課題となっている。

COVID-19対応の課題

- 病原体に対する幅広い基礎研究の推進とそこから得られる知識の統合
ヒトを対象とした宿主 病原体研究推進のための研究基盤の構築
加速的な診断・治療・予防法開発と実用化を可能とする多分野融合・産学連携研究構造の整備
自然・人文・社会科学の統合知による感染症対策関連研究基盤の構築
保健 医療体制・感染症検査体制の強化に資する研究領域の活性化

研究循環エコシステム

当該分野の研究開発は、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実装される。これはリアモデルではなく、社会における展開の中でその意義や効果が検証され、新たな課題の設定、仮説の抽出を行い、基礎研究に還元されるという循環が重要となる。社会実装後に行なわれる社会からのフィードバックを基礎研究に還元するにはELSI など科学と社会の関係強化が必要である。



国際ベンチマークから見た日本の強み

基礎研究の強み

- 高分子創薬 (抗体)、再生医療・幹細胞治療
植物工場、水産、畜産
生体時計・睡眠、脳・神経、臓器連関
細胞外微粒子・細胞外小胞、オプトバイオロジー、ケミカルバイオロジー、合成生物学
構造解析、光学イメージング、トランススケールイメージング

応用研究の強み

- 再生医療・幹細胞治療
植物由来材料、植物・農業、植物工場、水産
細胞外微粒子・細胞外小胞

今後の方向性と挑戦課題

世界の研究開発の潮流および日本の強み・弱みを総合的に勘案して、今後10年を見越した社会・経済的インパクト、エマージング性の観点から研究の方向性と日本の挑戦課題を設定した。

コロナ禍に限らず多くの社会的課題は膨大な数の要因の複雑な相互作用から生ずる。法則性を見出すことは容易でないが、多彩な情報を収集・分析し、現象の背景を分析しなければならぬ。「必然性の追求」としてのメカニズム探究に加えて「偶然性の制御」、すなわち数理・統計学、AIの両者が必要。

新型コロナウイルス研究とポストコロナ

- リサーチトランスフォーメーション
感染症に強い研究プラットフォーム
予防・個別ヘルスケア
【IoBMT】“ヒト研究”および“データ研究”加速
デジタル医療・ヘルスケア基盤

医薬モダリティの多様化

- “デザイナー細胞” (改変細胞医薬)
分子モダリティの新展開
次世代細胞初期化・分化誘導技術の確立

バイオエコノミーの実現に向けて

- 気候変動下の環境負荷低減農業
高品質水畜産物の高速・持続可能な生産
ファイトケミカル生成原理

複雑生命システム理解のための多様な研究の連関

- 4次元セローム~細胞内機能素子
“ライブセルアトラス”多次元解析
生体分子、生命システム設計ルール解明
4次元生体組織リモデリング
微生物叢 (マイクロバイオーム) 研究
生体感覚システムと末梢神経

研究のデジタルトランスフォーメーション

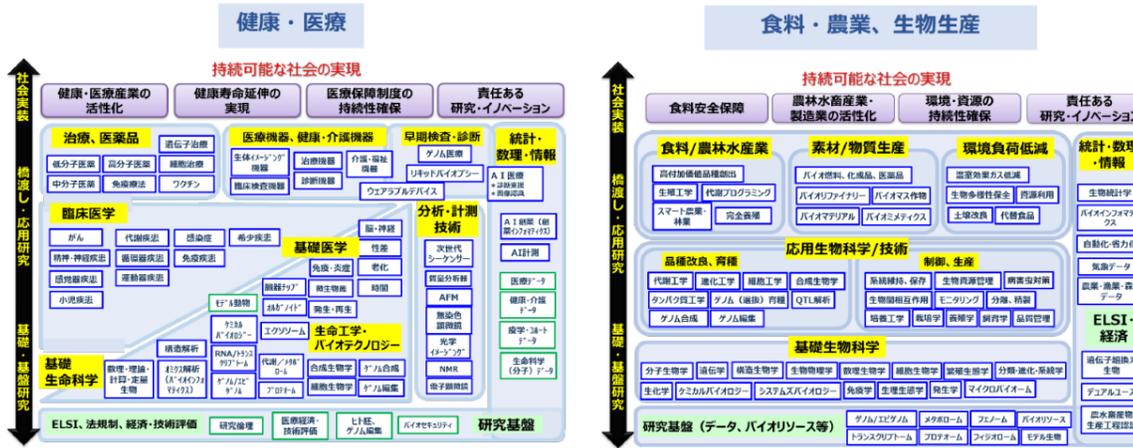
- AI×バイオ
ドライ・ウェット脳科学
【IoBMT】“ヒト研究”および“データ研究”加速

研究システム (土壌) の改革

- 研究開発体制・システムのあり方 (右記)

ライフサイエンス、健康・医療、食料・農業、生物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・医療と食料・農業、生物生産 (バイオエコノミー) 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



科学技術として進展の大きいテーマ、および社会的インパクト、エマージング性、基幹性の観点から、定点観測、国際ベンチマークを行うべき領域として下記の36の研究開発領域を抽出し、2章に各領域の詳細を記述

- 遺伝子発現機構
細胞外微粒子・細胞外小胞
一細胞オミクス
ゲノム編集・エピゲノム編集
オプトバイオロジー
ケミカルバイオロジー
合成生物学
免疫
生物時計・睡眠
老化
マイクロバイオーム
感覚器
脳・神経
臓器連関
構造解析
光学イメージング
感染症
トランススケールイメージング
計測×AI
BMI・BCI
微生物分子生産
植物分子生産
植物由来材料
植物・農業
植物工場
水産
畜産
林業
低・中分子創薬
高分子創薬
感染症
AI創薬・インシリコ創薬
再生医療・幹細胞治療
細胞治療・遺伝子治療
ゲノム医療
バイオマーカー
リキッドバイオプシー
ヘルスケアIoT

技術トレンド

直近2~3年の大きな技術・研究の変化、進展

- 核酸ワクチン、改変免疫細胞治療、治療アプリ、光子操作・制御、プロテインノックダウン創薬、リキッドバイオプシーなど新しい予防・診断・治療モダリティが出現。
オルガノイドを用いた生命システムの理解や機能評価研究が進展。
一細胞オミクス解析の高度化、一細胞レベルでの生命の理解や疾患の理解が進展。
de novoタンパク質設計による新たな構造と活性をもつタンパク質創成技術が進展。
クライオ電子顕微鏡や光学イメージング技術の発展による可視化技術の時間・空間分解能が向上。ロングリードNGSによりゲノム解析能力が向上。
日本では2020年に薬理治療用の国産治療アプリ【CureApp SC】が上市・保険収載された。
改変免疫細胞治療 (CAR-T等)
遺伝子改変により抗腫瘍活性を大幅に高めた免疫細胞を投与する治療法。血液がんにおける開拓が先行。
2017年、CAR-T製品【キムリア】のFDA承認後、市場が急拡大。海外では巨額の研究開発投資が始まっている。
日本では2019年に【キムリア】が上市、国産シーズの開発も進行中。
幹細胞を用い、試験管内でミニ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、創薬のプラットフォームとして期待
多様な細胞系からなるオルガノイド作出ほか、ヒト再現性の高い研究開発が活性化
マイクロ流路を設計したチップ上にて臓器細胞を搭載したorgan-on-a-chip技術が開発中

mRNAワクチン

- 抗原タンパクのmRNAやDNAを投与し免疫系を誘導することで予防、治療をおこなう新たなDNAワクチンが臨床試験開始
リキッドバイオプシー
血液・尿中のctDNA、miRNAなどに着目した診断・予測
がん診断技術としての開発が盛ん。2020年にゲムプロファイリング検査を目的とした技術がFDA承認 (Guardant360® CDxなど)
日本では、国立がん研究センターなどが乳がんマーカーとして血中miRNAの大規模臨床試験を開始

治療アプリ (デジタル治療)

- 患者の行動変容をサポートする、スマホ・タブレットなどで提供されるアプリ
糖尿病、物質使用障害、うつ病、統合失調症、肺がん、高血圧などにおける開発・上市が続く
日本では2020年に薬理治療用の国産治療アプリ【CureApp SC】が上市・保険収載された

改変免疫細胞治療 (CAR-T等)

- 幹細胞を用い、試験管内でミニ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、創薬のプラットフォームとして期待
多様な細胞系からなるオルガノイド作出ほか、ヒト再現性の高い研究開発が活性化
マイクロ流路を設計したチップ上にて臓器細胞を搭載したorgan-on-a-chip技術が開発中

リキッドバイオプシー

- 血液・尿中のctDNA、miRNAなどに着目した診断・予測
がん診断技術としての開発が盛ん。2020年にゲムプロファイリング検査を目的とした技術がFDA承認 (Guardant360® CDxなど)
日本では、国立がん研究センターなどが乳がんマーカーとして血中miRNAの大規模臨床試験を開始

プロテインノックダウン創薬

- 化合物や抗体を用い、標的タンパク質を分解誘導するメカニズムを活用した新たな治療モダリティ
プロテアソーム系を活用した技術 (PROTAC)、オートファジー系を活用した技術の開発などが進行中
分子量1000程度で細胞内への移行性が高いものが多く、経口剤化が可能

オルガノイド・バイオプリント

- 幹細胞を用い、試験管内でミニ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、創薬のプラットフォームとして期待
多様な細胞系からなるオルガノイド作出ほか、ヒト再現性の高い研究開発が活性化
マイクロ流路を設計したチップ上にて臓器細胞を搭載したorgan-on-a-chip技術が開発中

一細胞オミクス解析

- 1細胞レベルでのDNA/RNAなどの解析による、生命現象の再定義が加速。組織・臓器・個体レベルの細胞レベルの解析に挑む国際プロジェクト (HCA) が進行中
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状態での解析技術などが進展

ロングリードNGS

- 1分子シークエンス技術によるロングリード型次世代シークエンサーが登場。2015年頃より実用レベルへ
従前のショートリードシークエンス技術の弱点であった反復配列領域やゲノム構造異常、未知遺伝子の探索・同定をはじめ、新たな解析が可能に

クライオ電子顕微鏡

- タンパク質構造解析における新たな方法論として急拡大
X線結晶解析が困難なタンパク質についても解析が進む
英国MRCとThermo社のグループが原子分解度1.22Åを達成 (放射光施設とほぼ同等)
構造ベース創薬を加速させる手法として注目
2017年ノーベル化学賞

ゲノム編集

- CRISPR/Cas9登場以降、幅広い研究者層へ普及
遺伝子治療においてゲノム編集を実装した研究開発・臨床試験の開始もみられる
多様な種 (作物・動物) 作出の法規制の議論が進み、商品開発が活性化 (日本ではゲノム編集トマトが商品化)
生命倫理の観点からの検討が必須 (デザイナーベビー等)
2020年ノーベル化学賞

光子操作・制御

- 光スイッチタンパク質などに活用した、外部からの光刺激による生体内分子制御技術とその応用
基礎神経科学領域でオプトジェネティクスが幅広く活用
NIH-NCIの日本人研究者が開発した修飾抗体と近赤外光を用いた、がん免疫療法が承認 (アキアレルクス)

人工知能 (AI)

- ディープラーニングなどの第三世代AI技術の基礎科学~創薬、機器開発~医療提供への幅広い実装
COVID-19治療の探索においてAIが活躍
DeepMind社による蛋白構造予測の精度が単粒子解析法により得られた構造の精度に近接

BMI・サイバニクス

- 脳の機能をリアルタイムに読み取りモデル化し脳と機械を相互作用させ、心身機能の補綴や改善や拡張
脳の感覚処理と媒介したロボットアーム技術や感覚補綴技術、失われた神経ネットワークを再建する人工神経接続技術などの実用化が進む
日本ではCyberdyne社が医療用HALの機器承認取得

ロボット等による研究の自動化

- 2018年頃から、化合物合成や代謝工学などにおいて、実験の自動化、ハイスループット化の成果報告が盛ん
AIを用いた高精度化・ハイスループットなセルソーティングが実現。実用化が進む
海外メカファーマの多くが研究所の自動化を推進

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
実験デザイン (データの取り方と解析) の重要性が増大
研究者あるいは研究コミュニティが、研究対象として、生命の複雑系 (時空間階層) を見る事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」が加速
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
ボストン、ロンドン・ケンブリッジ・オックスフォード (医療)、オランダフドバレー (農業) では大学に知識・技術を集結させ、産学官の異分野人材が集まりイノベーションを創出

世界の科学技術政策の動向

- 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)
がん
脳神経
創薬: がん免疫、中枢神経系、感染症
細胞治療・遺伝子治療
全身細胞地図 (一細胞医療)
食料・農業分野
持続可能、気候変動、循環型、スマートがキーワード
生物生産分野
合成生物学の取組みが加速 (米英中を中心に)

研究開発体制・システムのあり方

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の整備
機器共用による全体コストの最適化
若手人材のスタートアップ環境の整備
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
イノベーションの確率の向上
ELSI/RRIをイノベーションのco-driverとの認識の醸成

- イノベーションエコシステムの確立
医療研究プラットフォームの構築
新しい科学技術の潮流を生み出す異分野連携拠点の構築
知の集積に向けた大学等の土壌改革

2.4 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マイクロなスケール（原子、生体分子）からマクロなスケール（集団、社会）まで多階層にわたり、また生物学をはじめとする自然科学、医学のみならず工学や人文・社会科学までを包含する極めて広範囲に及び、基礎研究の成果は健康・医療、食料、農業、環境等の社会基盤の形成に広く役立てられる。

当該分野の研究開発は、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実装される。ただし、これはリニアモデルではなく、社会における展開の中でその意義や効果が検証され、新たな課題の設定、仮説の抽出を行い、基礎研究に還元されるという循環が重要となる（図2.4-1）。

昨年来のコロナ禍は、デジタルトランスフォーメーションへの対応の遅れをはじめとした問題点を浮かび上がらせた。デジタルトランスフォーメーションの効用の一つは付加価値にある。速やかに情報（データ）を収集し、研究開発の成果物（学術論文、特許、医薬品・医療機器・農水畜産物ほか）を差別化することにより、付加価値を増大させることの重要性を強く認識する必要がある。コロナ禍をはじめとした社会課題の解決には、社会に存在する多種多様なデータから法則を発見する「データ駆動型」のアプローチが必要になるが、これは必ずしも決定論的世界ではなく、誤謬も生じる確率論的世界である。そのため、「必然の追求」としてのメカニズム探究に加えて、誤謬を低減させる「偶然性の制御」に向けた統計学やAIの活用、さらに新しい数学が求められる。これは社会課題だけでなく、基礎研究においても同様である。また、データ活用においては社会の理解が必要であり、研究成果は、市民の自律的な生活（自律的な社会）に還元されなければならない。社会実装後に行なわれる社会からのフィードバックを基礎・応用研究に還元する循環にはELSI等、科学と社会の関係強化が欠かせない。大学等においては、科学技術にはリスクがあることを認識した上で、意識改革、横断的研究の推進、人材流動化のための改革などが求められる。

一般のコロナ関係の課題の他に、世界の科学技術に関する政策の潮流を整理すると、健康・医療分野では、「ゲノム医療、個別化・層別化医療」、「がん」、「脳神経」、「創薬：がん免疫、中枢神経系、感染症」、「細胞・遺伝子治療」、「全身細胞地図（一細胞医療）」が共通の重点項目となっている。これを反映して、欧米を中

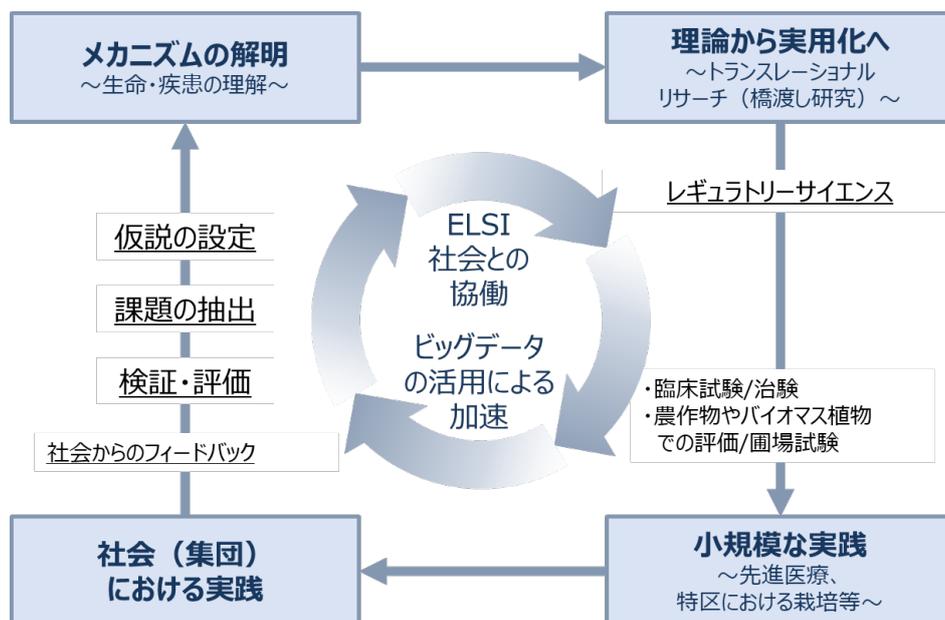


図2.4-1 俯瞰図（研究循環エコシステム）

心に、「がん」、「神経科学」の論文数の増大が認められる。

食料・農業分野では、気候変動やバイオエコノミーという国際課題に加え、ゲノム編集、AIの技術的進展を受けて、「持続可能性」、「循環型」、「スマート」というキーワードで研究が実施されている。生物生産分野では、合成生物学の取組みが米英中を中心に加速している。

こうした状況を踏まえ、CRDSでは、社会・経済的インパクト、エマージング性、基幹性の観点から36の研究開発領域を抽出し、トレンド、トピックス、国際ベンチマークをまとめた。2年前に取りまとめた（俯瞰報告書2019年版）との違いは次の通りである。

- ・バイオエコノミーの潮流を踏まえ、食料・農業、生物生産などを拡充し、「植物分子生産」、「植物由来材料」、「植物工場」、「林業」を追加。
- ・デジタルトランスフォーメーションの進展を踏まえ、ITや機械分野も重視し、「ヘルスケアIoT」、「AI創薬・インシリコ創薬」、「植物工場」、「計測×AI」、「BMI・BCI」等を追加。
- ・神経、免疫、消化器、代謝などは相互に強く関連している（神経免疫、免疫とマイクロバイオーム（腸内細菌など）、がん代謝など）ことから「臓器連関」を追加。
- ・生物、化学、物理、情報、工学等の学体系を超えて連携する必要があることから「トランススケールイメーシング」を追加。

全体を俯瞰して、この2～3年の大きな技術・研究のトレンド（変化、進展）を次のとおり分析した。

- ・核酸ワクチン、プロテインノックダウン創薬、改変免疫細胞治療、光分子操作・制御、治療アプリ（デジタル治療）、核酸バイオマーカー（リキッドバイオプシー）など新しい予防・診断・治療モダリティが出現
- ・de novoタンパク質設計による新たな構造と機能をもつタンパク質の創成技術が進展
- ・一細胞オミクス解析の高度化、一細胞レベルでの生命の理解や疾患の理解が進展
- ・オルガノイドを用いた生命システムの理解や機能評価研究が進展
- ・クライオ電子顕微鏡や光学イメージング技術の発展による可視化技術の時間・空間分解能が向上、ロングリードNGSによるゲノム解析能力が向上
- ・AI・機械学習、BMI・サイバニクス等のデジタル技術が社会に浸透。ロボット等による研究の自動化の動きが進展
- ・生物（生命科学・医科学）分野は研究の細分化が著しいが、研究のトレンドは複雑系を対象とし、異分野連携でないと解明できない課題が増加

国際ベンチマークの視点からは、米国が全領域にわたって基礎から応用まで圧倒的に強く、欧州も英国の生物医学、ドイツの計測技術等を中心に全体的に存在感を発揮していることが示された。日本は基礎研究では、「高分子創薬」、「再生医療・幹細胞治療」、「植物工場」、「水産」、「畜産」、「生体時計・睡眠」、「脳・神経」、「臓器連関」、「細胞外微粒子・細胞外小胞」、「オプトバイオロジー」、「ケミカルバイオロジー」、「合成生物学」、「構造解析」、「光学イメージング」、「トランススケールイメージング」において強みを有する。また応用研究では、「再生医療・幹細胞治療」、「植物由来材料」、「植物・農業」、「植物工場」、「水産」、「細胞外微粒子・細胞外小胞」において強みを有する。

米国等では基礎研究と開発研究の循環系が駆動しているのに対し、日本はそのような体制の構築・推進に向かっていけないという環境的（構造的）課題が存在すると見受けられる。

研究開発においては、何をやるかはもちろん大事だが、組織を超えてあるいは国・地域としてどのように推進するかという研究システム（土壌）が今後ますます重要となると考え、イノベーションエコシステムの調査・

分析を実施した。米国ボストン、英国ロンドン・ケンブリッジ・オックスフォードにおける医療分野の研究開発、オランダ・フドバレーにおける農業分野の研究開発では、高い研究力をもつ世界有数の大学に知識・技術を集結させ、それを中心にスタートアップ・ベンチャー企業、支援機関、大手企業まで多様な異分野人材が集まり、イノベーションを創出している。

また新しい科学技術を生み出す研究システムとして、欧米の先端的な新興融合研究を見ると、アンダーワンルーフ・異分野連携型の研究を進めている。顕微鏡、質量分析計、シーケンサー等のハイテク機器をコアファシリティに統合し、専任スタッフを置くことで、効率的な機器へのアクセスと幅広い専門知識の提供が可能となっている。一方、日本ではコアファシリティの整備が遅れ、超高額かつ熟練した技術・ノウハウが求められる最先端機器を活用した研究が進めにくい環境になっている。これが生命科学や臨床医学における論文数の伸び悩みを招き、特に新興融合分野での存在感が希薄になっている要因となっているものと考えられる。

以上のような研究開発の俯瞰を踏まえて、今後10年を見越した社会・経済的インパクト、エマージング性(科学技術の新たな潮流)の観点から、世界的な7つの研究の方向性とその下における日本の挑戦課題を設定した(表2.4-1)。

表 2.4-1 今後の研究展望と日本の挑戦課題

世界的な展望・方向性	日本の挑戦課題
1. 新型コロナとポストコロナ	<ul style="list-style-type: none"> ■ リサーチトランスフォーメーション (2021) ■ 感染症に強い研究プラットフォーム (2020)
2. 予防・個別ヘルスケア	<ul style="list-style-type: none"> ■ 【IoBMT】“ヒト研究”および“データ研究”加速 (2018) ■ デジタル医療・ヘルスケア基盤 (調査中)
3. 医薬モダリティの多様化	<ul style="list-style-type: none"> ■ “デザイナー細胞” (改変細胞医薬) (2020) ■ 分子モダリティの新展開 (調査中) ■ 次世代細胞初期化・分化誘導技術の確立 (調査中)
4. バイオエコノミーの実現に向けて	<ul style="list-style-type: none"> ■ ファイトケミカル生成原理 (2021) ■ 気候変動下の環境負荷低減農業 (2019) ■ 高品質水畜産物の高速・持続可能な生産 (2018)
5. 複雑生命システム理解のための多様な研究の連関 (階層・機能連関と計測連関)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 4次元セローム～細胞内機能素子 (2019) ■ “ライブセルアトラス”多次元解析 (2018) ■ 生体分子、生命システム設計ルール解明 (2018) ■ 4次元生体組織リモデリング (2017) ■ 微生物叢 (マイクロバイオーム) 研究 (2016) ■ 生体感覚システムと末梢神経 (調査中) ■ 先制的治療モダリティ～代謝・栄養創薬～ (調査中)
6. 研究のデジタルトランスフォーメーション (AI・データ駆動型、データ基盤整備)	<ul style="list-style-type: none"> ■ AI×バイオ (2020) ■ ドライ・ウェット脳科学 (2019) ■ 【IoBMT】“ヒト研究”および“データ研究”加速 (2018)【再掲】
7. 研究システム (土壌) 改革	<ul style="list-style-type: none"> ■ 大学・国研における研究システムの国際ベンチマーク (2019) ■ 医療研究開発プラットフォーム (2017) ■ 海外のイノベーション・エコシステム (調査中)

これら挑戦課題に共通して、AI・データ駆動型研究が重要性を増している。数理・情報系研究者をはじめとした異分野研究者が集結できる体制を構築することが重要である。健康・医療分野では、疾患を理解しているMDとPhDの連携、農業分野では、農業科学者と植物科学者が連携できる環境整備が求められている。

イノベーション創出プロセスは、従来のリニアモデルから、基礎・応用研究と事業化が同時並行的に進むコンカレントモデルへの変化が加速し、AIやゲノム編集などでは、新たな発見や極めて基礎的な研究段階の知見が短期間で実用化に直結する事例も生まれている。ここでは社会が蓄積した知を価値に変換させる触媒となるスタートアップ・ベンチャー企業の役割が重要である。日本においても、大学・国研が、企業、行政、起業家や投資家などと共に推進していくイノベーションエコシステムの構築・推進が喫緊の課題である。

表 2.4-2 研究開発状況の国際比較（ライフサイエンス・臨床医学分野）

	国・地域	日本		米国		欧州		中国		韓国	
	フェーズ	基礎	応用								
健康・医療	低・中分子創薬	○↗	○↗	◎→	◎↗	◎→	◎↗	△→	△↗	×→	△→
	高分子創薬（抗体）	◎↗	○↗	◎→	◎→	◎↗	◎↗	◎↗	○→	○↗	○↗
	感染症（抗菌薬・抗ウイルス薬・ワクチン等）	○→	△↗	◎→	◎→	○→	◎↗	△↗	△↗	△↗	△↗
	AI創薬・インシリコ創薬	○→	○→	◎→	◎↗	◎→	◎↗	○↗	◎↗	△→	△→
	再生医療・幹細胞治療	◎→	◎↗	◎↗	◎↗	○↗	◎↗	○↗	○↗	△↗	○↗
	細胞治療（CAR-T等）・遺伝子治療	△↗	△↗	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	○↗	◎↗	×→	△↗
	ゲノム医療	○↗	○↗	◎↗	◎↗	◎↗	○→	○↗	△↗	×→	△→
	バイオマーカー・リキッドバイオプシー	○→	○→	◎↗	◎↗	○↗	○↗	◎↗	◎→	○→	△→
	ヘルスケアIoT（ウェアラブル・生体埋め込み計測）	○→	○→	◎→	◎↗	◎→	○→	○↗	◎↗	○→	○→
バイオエコノミー	微生物分子生産	○→	○↗	◎↗	◎→	◎→	◎↗	○↗	○↗	△→	△→
	植物分子生産	○→	○→	○→	◎↗	○↗	◎↗	○→	△↗	○→	◎↗
	植物由来材料	○↗	◎→	○↗	○↗	◎↗	○↗	○↗	○↗	○→	○↗
	植物・農業	○→	◎→	◎→	◎→	○→	○→	△↗	△↗	△→	△→
	植物工場	◎→	◎↗	○↗	○↗	△↗	△↗	○↗	○↗	△→	△→
	水産	◎→	◎→	○↘	△→	○↗	◎↗	○↗	△→	○→	○→
	畜産	◎↗	○↗	◎→	◎↗	◎↗	○→	◎↗	◎↗	○→	○→
	林業	○→	○↗	◎→	◎↗	◎→	◎↗	○↗	○↗	○→	△→
基礎基盤科学技術（組織）	免疫	○↘	○→	◎↗	◎↗	◎→	◎↗	◎↗	○↗	○↗	△→
	生体時計・睡眠	◎↗	○→	◎↗	◎↗	◎↗	○↗	○↗	×↗	△→	△↗
	老化	○↗	○→	◎↗	◎↗	◎→	◎→	△↗	△↗	△↗	△→
	マイクロバイオーム	○↗	△→	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	--	○↗	--
	感覚器	○→	○→	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	△↗	△→	○→	△→
	脳・神経	◎→	○→	◎→	◎→	○→	○→	△↗	△↗	△↗	△↗
	臓器連関	◎↗	○↗	◎↗	○↗	○↗	△→	○↗	△↗	△↗	△→
基礎基盤科学技術（分子・細胞）	遺伝子発現機構（RNA・エピゲノム・クロマチン）	○→	○→	◎→	◎→	◎→	○→	◎↗	○↗	○→	△→
	細胞外微粒子・細胞外小胞	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	◎→	◎↗	○↗	○↗	○→	○↗
	一細胞オミクス	○→	△→	◎↗	◎↗	◎↗	◎↗	○↗	○↗	△→	△→
	ゲノム編集・エピゲノム編集	○↗	△→	◎↗	◎↗	○→	○→	○→	◎↗	△→	△↘
	オプトバイオロジー	◎↗	○↗	◎↗	◎↗	○↗	○↗	○↗	○↗	○↗	○↗
	ケミカルバイオロジー	◎→	○→	◎→	◎→	○→	○→	○→	○→	○→	△→
	合成生物学（人工生体高分子・人工細胞合成）	◎↘	○→	◎→	◎→	◎↗	○↗	△→	○↗	△↗	△→
基礎基盤科学技術（計測技術）	構造解析	◎→	○→	◎→	◎↗	◎↗	○↗	◎↗	△↗	△→	△→
	光学イメージング	◎↘	○↘	◎↗	○↗	◎→	◎↗	○↗	△↗	△→	△↗
	トランススケールイメージング	◎↗	○↗	○↗	◎↗	◎↗	◎↗	○↗	○↗	○→	△→
	計測×AI	○↗	○↗	◎↗	◎↗	◎→	○→	◎↗	◎↗	○↗	△↗
	BMI・BCI	△→	○↗	○↗	○→	○→	○→	△↗	△↗	△→	△↗

[注] 研究開発領域毎の状況を相対比較した結果（記号は現状を、矢印はトレンドを表す。詳細は俯瞰報告書に記載）を並べたものであり、ある国・地域について研究開発領域間の状況を比較・集計したものではない。

2.5 世界の潮流、日本の位置付け、日本の挑戦課題

2.5.1 分野を越えた動き

項目	内容
世界の潮流	<ul style="list-style-type: none"> 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に揺らぎ。特に米中対立の激化に伴い国際協調の気運が低下。AI/IoT、量子、バイオテクノロジー、蓄電池などは産業競争力あるいは安全保障の観点から、技術覇権争いの対象となっている。研究に必要なデータの移転規制が進む可能性があり、オープンサイエンスが阻害される懸念がある中で、相互理解の醸成により問題解決を図ることが重要。 新型コロナウイルス感染症は社会経済活動や人々の意識を世界規模で変えた。研究開発のテーマ設定においても、感染症を含む社会への脅威をコントロールし、社会の強靭さ・レジリエンスを強化させる視点が増大。新型コロナウイルス感染症ワクチンの国際調達枠組みであるCOVAXファシリティにおいて国際協調の取り組みがある一方で、自国で開発したワクチンを途上国へ広く提供して、間接的に自国のアピールに利用しようとする動きも見られる。 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る等、科学技術イノベーションへの期待は引き続き大きい。他方、科学技術と社会との関係が深化する中、科学技術への懸念も増大。AI、ゲノム編集等の分野ではELSIの問題が顕在化しており、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拡大していくことが重要。近年、一部に科学的知見を尊重しない人々が顕在化していることも留意すべき。 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。あるべき社会像は人々の価値観によって変わり得るが、変化する社会情勢の中で人々の価値観も変わっていく。この価値観を研究テーマの設定過程に取り込むことで、社会のステークホルダーの参画機会が増大。また、研究開発は社会課題解決に向けた多数の取り組みの一部分であるという認識の下、取り組み間での連携を取ることが重要。 <hr/> <ul style="list-style-type: none"> ICT技術の急速な発達に伴い、いわゆるデジタルトランスフォーメーション（DX）によ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。DX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。 ヒト等の生命システムから環境・社会システムまで、複雑系を研究対象とすることが増加。複雑系は確率論で論じることが合理的であることから、データ駆動型、デジタル技術と相性が良く、今後もこの方向は進展していくと予想。 査読前論文をオープンアクセスで公開するケースが増加。論文投稿から公開までの時間が短縮できる一方で、論文の質をどう保つかが課題。 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。 <hr/> <ul style="list-style-type: none"> 人材は依然として科学技術の源泉。若手研究者を惹き付けるとともに、分野、組織、国境等の壁を越えて人材が流動する研究環境の構築が重要。加えて、高度化・高額化する最先端研究機器および高度研究支援人材を整備することが研究システムとして重要。 ELSIが科学技術の推進上重要な要素として位置付けられ、人社連携の重要性が増大。主として研究成果を社会と共創していく観点で重要であるが、例えば個人情報の利用の可否は研究自体にも影響を及ぼし得る。 科学技術イノベーション政策と他の政策との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、官民の研究者だけでなく、技術支援人材、知財管理や法務等の専門家など多様な職種が協働する必要があり、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。
日本の位置付け	<ul style="list-style-type: none"> 「サイバー空間とフィジカル空間の融合」という手段と「人間中心の社会」という価値観を前提とし、我が国が目指す社会としてのSociety 5.0の具体化を推進。また、2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにすること（カーボンニュートラル）を政策目標として設定。 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、量子技術、マテリアル、環境エネルギー、安心・安全等を特に取組強化すべき分野として位置付け。 <hr/> <ul style="list-style-type: none"> 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。日本は諸外国と比較して、相対的・長期的に地位が低下。我が国は国際共著論文数の割合が相対的に低く、国際頭脳循環の流れに出遅れ。 しかし個々の分野で見れば、CO₂変換技術、自動車排気物質除去、産業用ロボット、スーパーコンピュータ、蓄電池部材、分子技術、再生医療・幹細胞治療、細胞外微粒子・細胞外小胞等の分野で、我が国は依然として優位性を保持。

	<ul style="list-style-type: none"> ・ ムーンショット型研究開発制度をはじめとして社会課題解決を目指す研究開発への比重が高まっているが、多様なステークホルダーの参加を得つつ社会課題ひいては研究開発課題を設定する仕組みの実現には道半ば。 ・ ビッグデータとAIの活用により探索、思考を行う等の研究手法の革新、高価なハイテク研究機器を技術スタッフとともに共用する等の取り組みに遅れ。これにより特に新興・融合分野において存在感が低くなっている。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をも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俟って、我が国研究開発人材は構造的問題を抱える。また、DX化に向けデータ科学系研究人材の育成は急務。
<p>日本の挑戦課題</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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、気候変動緩和、気候変動適応、信頼されるAI、Society 5.0プラットフォーム、量子状態の高度制御、ナノ力学制御によるスマート材料、感染症に強い研究プラットフォーム、AI×バイオ等が挙げられる。 ・ AI、ビッグデータ等を駆使し研究の高効率化にとどまらず発想、仮説設定等にまで活用範囲を拡げること、良質なデータの収集および社会におけるデータの活用、データ取得・データ処理のための基盤技術の高度化等に研究開発活動のDX化として一体的に取り組むことが課題。また、このDX化を改革の駆動力としながら、クロスアポイントメントのようなフレキシブルな雇用形態、研究開発費における財源の多様化等、DX以外の様々な研究環境をも合わせて構造的に変革することが課題。 ・ 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。 <hr/> <ul style="list-style-type: none"> ・ 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、官民連携などの仕組みから、研究課題設定において自由な発想を尊重する、異分野連携・協力を促進する、失敗を許容する等の雰囲気、風土のようなものが含まれる。 ・ 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、多様なステークホルダーの参画を得つつ研究開発の初期段階からELSIの検討を行うこと、またその際、人文学・社会科学と自然科学との相互発展的な連携が課題。

2.5.2 環境・エネルギー分野

項目	内容
<p>世界の潮流</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 感染症、異常気象災害に関連する環境分野の研究開発への関心が増大。 ・ 換気、下水処理などの役割の再評価。リスク、行動変容、社会とのコミュニケーション、科学対話、科学的評価などのより良いあり方に対する関心の増大。 ・ ESG投資、さらには持続可能な経済活動に関する分類・定義、タクソノミー等の枠組みができてつつある。COVID-19パンデミックからのBBB (Build back better、より良い復興) の一環として環境保全活動を一層推進する思惑と、経済合理性の観点から活動を後退させる動きとが錯綜し不確実性が増大。 ・ COVID-19パンデミック等によるエネルギー資源価格の不確実性の継続。 ・ 発展途上国のエネルギー使用量の増加速度の不確実性の高まり。 ・ 感染症拡大対策のための各国経済活動縮退から見えた、経済と環境保全の両立性の困難さの顕在化。 ・ 医療従事者防護具や包装容器などの安全・衛生面の社会的価値の見直しに伴うプラスチックの価値の再評価。 ・ エネルギー利用におけるビッグデータ・スマート化、AI利用の加速的進展。 ・ エネルギー分野：再生可能エネルギー由来エネルギーの貯蔵、変換技術についての研究開発が盛ん。エネルギーネットワークのレジリエンスに関する課題がますます顕在化。 ・ 環境分野：環境ビッグデータ、IoT/AI応用に関する研究が活発。永久凍土・高山氷河の融雪、野火、水災害頻発化などの世界各地での異常気象発生による危機感から地球温暖化影響への関心がより増大。気象災害への温暖化影響の貢献割合、変動幅等の詳細を分析する研究への関心が増大。大気汚染物質や環境浄化技術等への関心も増大。
<p>日本の位置付け</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2050年までにカーボンニュートラル (温室効果ガス排出量の正味ゼロ) の達成を目指すとの政策目標が示され、排出量の大幅削減に向けた関連府省の動きが一層活発化。 ・ エネルギー分野：電力貯蔵、熱エネルギー利用、化学エネルギー利用、トライボロジーでは優位性を維持。

	<p>エネルギーマネジメントシステム、民生熱利用、反応性熱流体の応用に強み。原子力安全は継続的に強化がなされている。</p> <p>二酸化炭素分離回収、産業熱利用の蓄熱における基礎研究は活発。</p> <p>再生可能エネルギーなどで社会実装に向けた力強い流れが見えにくい。</p> <p>エネルギー機器を支える破壊力学など工学基盤分野の衰退傾向がみられる。デジタル化などの新規展開を取り込んだ強化策が重要。</p> <p>政策主導による全方位的な研究開発強化の動きは持続している。</p> <ul style="list-style-type: none"> 環境分野： <ul style="list-style-type: none"> 自動車排気物質などの除去・浄化では優位性をかろうじて維持。 水循環、気候変動予測の基礎では少数だが世界的水準の研究を展開。 気候変動観測、気候変動適応、土壌・地下水汚染物質の除去・浄化、環境分析、生態系などでは部分的には日本独自の研究開発などはみられるものの、全体として欧米に遅れをとる。分野横断研究や統合化研究を促す国の体制づくりや産学官民連携を促す土壌作りなどが不足している。
<p>日本の 挑戦課題</p>	<ul style="list-style-type: none"> Sustainability (持続可能性)、Inclusion (包摂性) を前提とした価値観を引き続き最重視。その価値観をもとに、より良く社会の移行を促進する研究開発 (Transition) という挑戦課題が一層重要になっている。感染症、気象災害、国際的覇権争い、ポピュリズムによる混乱など、絡み合う厄介な問題 (Wicked problems) により、不確実性が高止まりする情勢下、環境・エネルギー分野の研究開発は短期観点だけでなく中長期観点も踏まえた方向性を示すこと、俯瞰的視野に立ち花形的研究だけでなく基盤的研究をバランスよく推進する必要性がますます高まっている。 今後の方向性として、以下の4点のキーワードが浮かびあがっている。 <ul style="list-style-type: none"> Net Zero Emission: 気候変動緩和。2050年のGHG正味排出ゼロ目標に向けた再生可能エネルギー導入、エネルギー高効率利用、GHG吸収、行動変化、体系的実態把握 Adaptation: 異常気象災害や感染症などの脅威の対応策、既に顕在化している温室効果ガスによる気候変化への適応策、地域での実践、自然を活用した課題解決策 Resilience: 安全 (Safety) を含む。自然災害 (地震、豪雨、感染症等) からの回復力、複合災害への備え、リスクマネジメント、変動環境下でのエネルギー安全保障、原子力発電 Circularity: ライフサイクル全体を考慮した開発、包括的評価、有限な地球環境資源の循環、持続的な活用、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 Transitionを促進する鍵として、2点のキーワードが浮かびあがっている。 <ul style="list-style-type: none"> DX (Digital Transformation): エネルギーネットワーク・需要科学、再生可能エネルギー制御、データ基盤構築、データ高度活用 Human behavior & Society: 世界の多様な背景やコミュニティに根ざした多様な価値観 (Various Values)、社会との親和性をふまえた科学技術、社会実装、リスクコミュニケーションの浸透 <p>※Wicked problems絡み合う厄介な問題: 解くことができる慣れた問題 (tame problems) の対義語。単純問題 (simple) に対する複雑問題 (complex) とは別の視点での問題の定義。複数要素で相互連関性があり、唯一の解が存在しない。代表例が気候変動や廃棄物NIMBY問題 (Not In My Back Yard) など。多くの個人が傍観者の振る舞いをする問題 (Elephant in the room)。科学的理解の開拓、普及に加え、政策や社会、人々の行動なども求められる。</p>

2
科学技術の俯瞰

2.5.3 システム・情報科学技術分野

項目	内容
<p>世界の潮流</p>	<ul style="list-style-type: none"> 「あらゆるもののデジタル化コネクテッド化」「あらゆるもののスマート化自動化」「社会的要因との整合、人間の主体性確保」が大きな技術トレンド。 米中の技術覇権争いが激化する中で、GAFAとも呼ばれるGoogle、Apple、Facebook、Amazonなど大手IT企業が世界の市場と技術開発をリード。中国では盛んな研究開発投資と巨大データ集積による人工知能 (AI) 実用化が急速に進展。 新型コロナウイルスの世界的な感染拡大を受け、医療感染予防や社会経済活動の促進でITの重要度が増大。すなわち、これまでの社会経済活動の前提や基盤となってきた物事がそのままでは機能しなくなった。「ニューノーマル」「新しい生活様式」へのシフトが強く求められており、その実現でもITは重要な役割を果たすと期待されている。 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。偏見学習、誤認識誘発攻撃等の問題が顕在化し、社会との関係も新しい局面を迎えている。 深層学習が広まったが課題も見えてきた。深層学習から次のフェーズへ。第3の波。 ロボティクスでは、IT、特に人工知能技術との融合により、ロボットの自律化による適用領域の拡大、ネットワーク化やシステム化による多様なサービスへの組み込みが進みつつある。この波及効果は研究開発活動自体にも拡がり、研究開発のDX化が進展。

	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 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) に追隨できていない状況。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。 ・ セキュリティー・トラスト分野については、システムセキュリティーの重要度が高まっている。ITは社会インフラであるため、技術的な課題に加えて、社会から信頼を得ることが重要。例えば、監視とプライバシーについて問題意識が高まっている。 ・ コンピューティングアーキテクチャーは、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。 ・ 5Gの商業利用が始まり、Beyond 5Gの検討も始動。 ・ 企業における業務プロセスや働き方等に情報技術を活用する「デジタルトランスフォーメーション (DX)」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。 ・ 個人情報GAFAs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。
<p>日本の位置付け</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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があったが、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。 ・ これまでユーザー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。 ・ 新型コロナ流行を前にして、マイナンバーカードの低い交付率を始めとして、日本社会のDXの遅れを一般の人が実感した。政府におけるデジタル庁創設の動きなど、政府の電子化の遅れを挽回するための動きが活発化。 ・ 統合イノベーション戦略ではデータ利用のための政府方針として「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。また個別分野の戦略としてAI戦略、量子技術イノベーション戦略が策定された。 ・ 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。
<p>日本の挑戦課題</p>	<p>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。</p> <p>4つの基本的な考え方に基づく我が国が推進すべき21の重点テーマ</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 第4世代AI (2) 信頼されるAI (3) AIと人間の共進化 (4) 社会システムを支えるAIアーキテクチャー (5) AIと科学 (6) AI×ロボット融合 (7) 社会的に成長するロボット (8) テレプレゼンス (9) チームロボティクス (10) Societyデジタルツイン (11) コグニティブセキュリティー (12) トラスト基盤 (13) Society 5.0プラットフォーム (14) ブロックチェーン (15) データセンタースケールコンピューティング (16) 非フォンノイマンコンピューティング (17) 量子コンピューティング (18) リアルタイムシステム (19) データ流通・共有基盤 (20) 数学と情報科学 (21) ニューノーマルとDX

2.5.4 ナノテクノロジー・材料分野

項目	内容
<p>世界の潮流</p>	<ul style="list-style-type: none"> 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。ナノテクノロジーは、それまでも人類の社会・文明を支えてきた材料技術とともに、テクノロジードライバーとして、ほとんどすべての応用領域の下支えをしている。 最初にナノテクノロジーの重要性を国家戦略として示した米国は、国家イニシアティブ（National Nanotechnology Initiative: NNI）に投資を継続。欧州も Horizon 2020の枠組みの中で行ったナノテクノロジー・材料への投資を、後継の Horizon Europe で継続する見込み。アジアでは、中国の突出した投資額と技術進展の速さが目立つが、韓国・台湾・シンガポールなどの国々でもナノテクノロジー・材料の研究開発拠点を築き、大規模な研究開発が行われている。 ムーア則の終焉も迫っている一方で、IoT、AIなどの応用においては、ICT技術に一層の発展が強く望まれている。ポストムーア時代を担う通信・情報処理の新たなテクノロジーの模索が続いている。 マテリアルズ・インフォマティクスなどの、材料開発に機械学習等のデータ科学を用いる流れが、広く認知されている。 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。すでに欧米を中心に、国・地域単位での規制・制度が顕在化。
<p>日本の位置付け</p>	<ul style="list-style-type: none"> 米中台頭のなか、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・製造装置にも強み。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。しかし、一部の先端材料分野では中韓の急進により競争力を失いかけている部分も見られる。 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。
<p>日本の挑戦課題</p>	<ul style="list-style-type: none"> 3つの社会像、取り組むべき6つの社会ニーズ、13の挑戦課題（グランドチャレンジ）は以下のとおり。 【社会像Ⅰ. 安全・安心で豊かなデジタル社会】 ▷社会ニーズ <ul style="list-style-type: none"> (1) コンピュータ革新を支えるIoT/AI/量子デバイス (2) 安全低環境負荷の輸送と低消費電力・大容量の通信 ▷グランドチャレンジ <ul style="list-style-type: none"> ①量子状態の高度制御 ②ポスト5Gデバイス・材料基盤 ③IoTデバイス集積 ④ナノ力学制御によるスマート材料 【社会像Ⅱ. 健康で幸せな生活が可能な社会】 ▷社会ニーズ <ul style="list-style-type: none"> (3) 健康・医療・生産システムを支えるバイオ技術 (4) 人と共生するロボット ▷グランドチャレンジ <ul style="list-style-type: none"> ⑤ヘルスケアIoT ⑥バイオインスパイアード材料・システム ⑦バイオアダプティブ材料 ⑧脳型AI・スマートロボット 【社会像Ⅲ. 低環境負荷で持続可能な社会】 ▷社会ニーズ <ul style="list-style-type: none"> (5) 水・大気・資源の循環を可能にするスマート材料 (6) 省/創/蓄エネのための先端材料・デバイス ▷グランドチャレンジ <ul style="list-style-type: none"> ⑨サステナブル元素戦略 ⑩カーボンニュートラル基盤 【共通基盤技術】 ▷グランドチャレンジ <ul style="list-style-type: none"> ⑪多機能・複雑系の材料設計 ⑫材料合成プロセス設計基盤 ⑬次世代オペランド計測

2.5.5 ライフサイエンス・臨床医学分野

項目	内容
<p>世界の潮流</p>	<ul style="list-style-type: none"> 世界の人口増、SDGs等の要請から「より多くの人に、より質の高い医療サービスを安定して提供する」こと、「より多くの人々が、より質の高い食料を安定して入手できる」ことが世界での喫緊の課題。 コロナ禍は、デジタルトランスフォーメーション、つまり社会に存在する多種多様なデータから法則を発見する「データ駆動型」アプローチの重要性、およびELSI等の科学と社会の関係深化を再認識させた。 個別化医療、バイオエコノミー等、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。「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」を目指したダイナミクス、予測に向けた研究が進展。 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。 <ul style="list-style-type: none"> ▷核酸ワクチン、プロテインノックダウン創薬、改変免疫細胞治療、光分子操作・制御、治療アプリ（デジタル治療）、核酸バイオマーカー（リキッドバイオプシー）など新しい予防・診断・治療モダリティが出現 ▷de novoタンパク質設計による新たな構造と機能をもつタンパク質の創成技術が進展 ▷一細胞オミクス解析の高度化、一細胞レベルでの生命の理解や疾患の理解が進展 ▷オルガノイドを用いた生命システムの理解や機能評価研究が進展 ▷クライオ電子顕微鏡や光学イメージング技術の発展による可視化技術の時間・空間分解能が向上、ロングリードNGSによるゲノム解析能力が向上 ▷AI・機械学習、BMI・サイバニクス等のデジタル技術が社会に浸透。ロボット等による研究の自動化の動きが進展 ▷生物（生命科学・医科学）分野は研究の細分化が著しいが、研究のトレンドは複雑系を対象とし、異分野連携でないと解明できない課題が増加 欧米では、新しい科学技術を生み出す研究システムとして、ハイテク機器をコアファシリティに集結させ、異分野連携により新興融合分野での研究を進展させている研究拠点が注目される。 医療分野や農業分野では、大学の知識・技術の集積に多くの企業などから異分野人材が集まり、イノベーションを創出するというイノベーションエコシステムが成立している事例が見られる。
<p>日本の位置付け</p>	<ul style="list-style-type: none"> 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による労働力の低下といった問題が顕在化。農業就業者の減少・高齢化は続くが、大規模農業経営体は増加。 製薬産業、医療産業とも強い部分を有するものの全体として輸入超過。 論文動向を見ると、基礎生命科学や臨床医学において相対的順位を下げている。 2.6の国際ベンチマークからは、基礎研究では「高分子創薬」、「再生医療・幹細胞治療」、「植物工場」、「水産」、「畜産」、「生体時計・睡眠」、「脳・神経」、「臓器連関」、「細胞外微粒子・細胞外小胞」、「オプトバイオロジー」、「ケミカルバイオロジー」、「合成生物学」、「構造解析」、「光学イメージング」、「トランススケールイメージング」において強みを有する。また応用研究では、「再生医療・幹細胞治療」、「植物由来材料」、「植物・農業」、「植物工場」、「水産」、「細胞外微粒子・細胞外小胞」において強みを有する。米国は基礎研究と応用研究がほぼ同時的に進行するのに対し、日本は基礎研究が強くてもなかなか応用に向かっていかないという環境（構造的課題）が存在すると考えられる。 研究拠点を整備する動きはあるものの、人材・知識、技術・機器、データの集積が不十分である。 ゲノム医療、ゲノム編集技術・合成生物学などをイノベーションにつなげるためのELSIをはじめとした社会との関係構築が十分でない。
<p>日本の挑戦課題</p>	<ul style="list-style-type: none"> 世界の研究開発の動向、世界の政策、日本の政策、日本の強み・弱みを俯瞰した上で、世界的な研究の方向性とその下における日本の挑戦課題を設定した。研究の方向性としては以下の7つを設定。「新型コロナとポストコロナ」、「予防・個別ヘルスケア」、「医薬モダリティの多様化」、「バイオエコノミーの実現に向けて」、「複雑生命システム理解のための多様な研究の連関」、「研究のデジタルトランスフォーメーション」および「研究システム改革」 「新型コロナとポストコロナ」の挑戦課題として、「感染症に強い研究プラットフォーム」や「研究スタイル・研究環境の変革（リサーチトランスフォーメーション）」を提言してきた。「医薬モダリティの多様化」では「“デザイナー細胞”（改変細胞医薬）」を、「バイオエコノミーの実現に向けて」は「気候変動下の環境負荷低減農業」、「高品質水畜産物の高速・持続可能な生産」等を、「複雑生命システム理解のための多様な研究の連関」では「4次元セローム～細胞内機能素子」、「“ライブセルアトラス”多次元解析」、「ドライ・ウェット脳科学」等を、「研究のデジタルトランスフォーメーション」については、「AI×バイオ」等を掲げた。 これらの研究開発を創造的・効率的に推進する上では、イノベーションエコシステム、医療研究プラットフォーム、異分野連携・機器共用プラットフォーム、データエコシステムを構築することが喫緊の課題となっている。

3 | 科学技術イノベーションの今後の課題

この章では、「1 科学技術イノベーションの俯瞰の前提」で見てきた世界全体の動きと、「2 科学技術の俯瞰」で見てきた各研究開発分野の動向を踏まえ、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) 課題を考察する上での背景

2019年末に中国で発生し2020年にパンデミックとなった新型コロナウイルス感染症は、人類社会に不可逆な変化を与え続けている。また、気候変動による温暖化、近年頻発している気象災害、人口爆発による食糧難・資源枯渇をはじめとして、人類の生存を脅かすとされてきた諸々の危機はその深刻さを増している。さらに、米国と中国の対立に起因する不安定な国際関係が国家間の分断を招き、国際協調に悪影響を与えている。このように人類社会は新型コロナウイルス感染症も含めて多くの危機にさらされながら営みを続けている。科学技術と社会との関係が深化しているといわれる今日において、これら危機に対し破綻することなく、早期の復旧・復興が図られる社会（レジリエントな社会）を目指すことが科学技術イノベーションの大きな主題となっていると捉えるべきである。これは我が国においては、第5期科学技術基本計画以降掲げてきた Society 5.0をレジリエントな社会に向けてリデザインしつつ、具体化を進めていくこととも言える。

1999年の「ブダペスト宣言」に象徴されるように、21世紀において科学技術は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。2015年には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のゴールと169の目標の達成と課題解決に向けて、科学技術が果たす役割は大きいものと期待されている。一方で、大量生産・大量消費等を特徴とする現代社会の基盤には科学技術の発展があり、結果として気候変動をはじめとする多くの社会課題を引き起こしているという負の側面にも目を向けなければならない。SDGsのような社会に直結した複雑な課題の解決にあたっては、科学技術の正負両側面を捉える広い視野で、自然科学だけでなく、経済学、心理学、歴史学、文化人類学等、人文・社会科学分野との学際的連携と、アカデミア以外の多様な関係者との共創的価値の創出といった学際共創研究(トランスディシプリナリー研究)のアプローチが不可欠になっている。

このような時代の急速な変化に伴い、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科学技術イノベーション(STI)政策が拡大している。2018年以降、毎年内閣府がまとめている「統合イノベーション戦略」は、我が国の科学技術政策が産業競争力、環境、教育等の他の政策分野への貢献を通じて相互の整合性を強め、我が国全体として政策の効果を挙げようとしているものと理解できる。このような科学技術政策と他の政策との連関は、世界的な潮流となっている。例えばEUの科学技術政策である Horizon Europe(2021~2027年)では欧州域内の共通課題である気候変動対策とデジタルトランスフォーメーション(DX)を最優先課題と位置づけている。

(2) 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

我が国のSTI政策については、科学技術・イノベーション基本法のもと、科学技術・イノベーション計画等においてその基本方針が打ち出され、その中では社会変革実現への貢献、イノベーションの創出、研究力強化、研究人材・資金、等各種の政策が記載されている。まずSTI政策に関する基本認識として、個々の政策は単

独で機能しているわけではなく、相互に関連して全体として一つのシステムを形成していると捉えることが重要である。それを踏まえた上で、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。例えば、短期的な経済社会へのインパクトが測定しづらい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中長期的視点での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。我が国の財政が厳しい中で、国の科学技術イノベーションへの投資を増やす主張を行うためにもこのポートフォリオが必要である。また、かかる主張を裏付けるためにも、STI政策に関する調査や分析、研究が一層活発に行われるべきである。

科学技術と社会との関係が深化し、社会からの科学技術への期待が増大する中で社会課題の解決を目指す研究開発が増加しているが、その変化の中でどのように研究開発を行うか（How）が大きく変化している。例えば、解決すべき社会課題は人々の価値観によって変わり得るが、変化する社会情勢の中で人々の価値観も変わっていく。従って、社会課題対応型研究開発においては研究開発課題を設定する段階からさまざまな専門を持つ研究者のみならず多様なステークホルダーの参画を得て、共創による社会課題解決を目指すことが重要である。このとき、ELSI/RRIの観点も含めた議論も重要となる。また、ほとんどの社会課題は社会制度の見直し等研究開発以外の取り組みと連携して初めて解決に向かうため、これらの連携を取る方法論や調整システムの開発が必要となる。さらに、研究者レベルでの研究開発の実施方法においてもデジタルトランスフォーメーション（DX）を最大限活用した変革が進んでいる。このように、STI政策の形成においては、社会の変化に柔軟に対応し、これまでの経験から得られる教訓を着実に積み上げた上で、既存の政策の維持にとらわれない視点で、研究開発のHowを検討していかなくてはならない。さらに、科学技術と社会との関係が深化していることは、STI政策にとどまらない幅広い政策の形成過程において科学技術の果たすべき役割、言い換えれば科学的助言の役割が拡大していることを示している。直近では2020年の始めより我が国政府の新型コロナウイルス感染症対策について専門家会議が医学的な見地から助言を行ったことが記憶に新しい。しかし科学的助言については、専門家と政治・行政との関係をはじめとして課題が多く、新型コロナウイルス感染症を契機に助言が建設的に機能するための仕組みを検討することが必要である。

もう一つ、実際の施策レベルの問題として、施策の実施結果に対する評価が十分行われないうまま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ず、また関係組織の間で共有されていないのではないか、という点を提起したい。

例えば、「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、「プログラム」の実施状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。

この「プログラム」には、それを構成する制度だけでなく、プログラム参画者が制度を運用する際の姿勢、行動様式といった一種の風土のようなものが含まれていることに特に注意を払うべきである。例えば、野心的な目標を設定し失敗を許容しながら研究開発に取り組むためには、研究開発の責任者に大きな裁量を持たせる制度が有効であるが、それだけでは十分ではない。プログラムの期中において、目標に対する進捗度合いを細かくチェックするような評価を繰り返せば、プログラム参画者の中に失敗を恐れず挑戦しようとする風土は育たないであろう。プログラムの運用においては風土への配慮も重要である。

今後、新型コロナウイルス感染症によるさまざまな不可逆な変化に伴い、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。社会の変化や要求に応じた新規の「プログラム」の創設をはじめとする政策の推進にあたって、「プログラム」の設計とマネジメントについて、現在研究者が置かれている状況を十分に踏まえることは当然のこと、過去の施策の問題点や改善策を継続的に検討しておくことが、我が国

全体の研究の質と効率を高め、STI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

近年におけるITの著しい進歩はDXと呼ばれる変化を多方面にもたらし、研究開発の方法にも大きな変革をもたらし続けている。センサーを含むさまざまなIoTデバイス、あるいはそれらを実装した機械・ロボットが導入され、実世界（フィジカル空間）からリアルワールドデータを収集し、ディープラーニング（深層学習）を含む機械学習の解析結果に基づいて、新たな科学的知見の発見や、実世界のシステムにフィードバックをかけるような応用が広がってきた。例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ズ・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いわれる。

かかる状況下で新型コロナウイルス感染症が拡大し、世界・日本の研究開発活動は広範囲に停滞している。これに対して在宅・テレワークのまま研究を遠隔化するシステム、実験の自動化・ロボットの導入によるラボの省人化などによる研究活動の効率化が図られているが、実験やフィールドワークを主体とする研究においては限界があり、また遠隔で研究を続けていくこと自体に心理的負担を感じる声がある等研究環境上の問題がいくつも顕在化している。元々研究環境の改善・改革については上述してきたDX以外にも、研究者の多様なキャリアパスを想定したキャリア開発、クロスアポイントメントのようなフレキシブルな雇用形態、研究開発費における財源の多様化や合算使用等の取り組みがなされてきているが、今回の新型コロナウイルス感染症を契機に、DXを改革の駆動力としながら、DXのみならず、さまざまな側面から研究環境を構造的に変革していくことが必要である。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随できるか危ぶまれるところであるが、変化への対応を促し、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、制度面等で適切に支援することが必要である。

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。こうした研究のオープン化、国際化は研究の活性化のために不可欠であると認識される一方、国家による組織的関与等によるオープンな研究システムの不当な利用が、研究システムの健全性を毀損したり、技術流出等を通じて国家安全保障へ悪影響を及ぼしているのではないかと、との懸念が広がっている。そのような懸念に対し、安全保障貿易管理などの規制の強化のみでは、実効性があり、かつ研究の活力も損なわない対応は困難であると考えられ、研究コミュニティ自身が研究システムの健全性・公正性を確保することにより不適切な行為を防いでいく、研究インテグリティの取り組みが改めて重要になっている。また、オープン化の一例として、近年査読前論文をオープンアクセスで公開するケースが増加しているが、論文投稿から公開までの時間が短縮できる一方で、論文の質をどう保つかが課題となっている。オープン化の中で質を維持することも重要である。さらに、AI/IoT、量子、バイオテクノロジーなどは産業競争力あるいは安全保障の観点から、技術覇権争いの対象となっている。近年の米中対立の影響を受け、研究に必要なデータの移転規制が進む可能性があるが、内容に応じて“オープン”と“クローズ”を適切に使い分けることが研究開発の活力と健全性の観点から重要である。

3) 人材に主眼を置いた、独創的な基礎研究、技術基盤への持続的な支援

近年の潮流として、科学技術の知識や経験を社会課題解決等に活用することの期待が高まっている。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だけに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。「種」すなわち独創的な研究シーズを生み出す主体は言うまでもなく研究人材、特に将来の科学技術を担う若手人材であり、職業として研究者・技術者を選ぶ可能性のある高校生、大学生等も含まれると解釈したい。

まず研究開発投資の面から見ると、独創的な基礎研究と人材育成のための投資には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。独創的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。例えば、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。

この問題を人材面から考えると、我が国の少子化、人口減少のトレンドに鑑みれば、遠からず科学技術の担い手が減少していく可能性が高い。加えて、若手研究者のポストは減少の一途であり、ポストがあったとしても不安定な立場に置かれるなど生活が見通せず研究への熱意だけでは乗り越えられない状況に置かれている。こうした状況に対して研究現場から課題を解決していこう、研究システムをより良いものに変えていこう、という動きは十分ではない。これでは研究現場の活力がそがれ、職業としての魅力も低下していく。例えば、修士課程から博士後期課程への進学率（2010年：16.7%→2018年：9.3%、学校基本統計より）は長期的に低落傾向にある。

職業としての研究者の魅力の低下に対して、多様な人材を惹き付けることは非常に重要な課題である。自由な発想に基づく研究に長期的に取り組める研究環境は若い人から見て魅力であると考えられる。その際、実験の失敗が後にノーベル賞につながる成果を生んだ事例が多数見られるように、失敗を知識の蓄積と見なす前向きな研究風土が重要である。そのような環境を一定規模維持することが、職業として研究者が選ばれるためにも、また若手研究者が独創性を伸ばしていく上でも重要である。その観点から、若手人材育成と独創的基礎研究は政策として深く連関していると捉えるべきである。

加えて、人材のダイバーシティを増大させることが単に研究人口の減少を補うという意味ではなく、優秀な研究者・技術者を惹きつけること、研究対象に向けてより多様でユニークな発想を提供できるという点で意義があり、これまで以上に科学技術の世界を豊穡にしていくことにつながる。科学技術の現場は大学等の研究機関だけでなく、多くの民間企業の開発部門に広がっている。また研究現場では研究を支援する専門知識を持つ研究マネジメント人材や支援者も多く必要とされている。学生や若い研究者にとって、このような多様で幅広い仕事の間や職種に目を向けて、早い時期から自己のキャリア形成を考える機会が与えられれば、若い人たちが自分の適性に合った職を見つけることがより容易になることが期待できる。産業界や産学間でも人材の流動化が一段と促進されることになろう。

人材の問題を個々の研究者・技術者や個別の大学や学会が自分のこととして捉え、研究コミュニティ全体として考え行動していくことが我が国研究コミュニティ自身の存立のためにも重大な問題であろう。

さらに、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技術者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。

例えばEU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%弱程度に設定している。基礎研究や基盤整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。

繰り返しになるが、政府もさまざまな政策・制度により問題解決を指向しなくてはならないが、高度な職能集団である研究コミュニティが自身の自発的な行動や仕組みを持たなければ、中長期的な問題の改善には

つながってこないであろう。

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。例えば、日本の研究開発費総額19.5兆円（2018年）のうち、政府負担は約17%、企業負担は約73%である。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。

研究開発成果を製品・サービスとして結実させるのは主として企業であるが、迅速な社会実装を進めるためには、大学や公的研究機関と研究の初期段階からの連携が必要である。この連携の「場」は社会課題解決を指向する基礎研究から社会実装までを包含し、企業、大学、公的研究機関等が継続的にそれぞれの強みを生かし、補完的に協働する「場」である。そこでは企業側のニーズに合う研究シーズを大学等において探索するのみならず、研究シーズが新たな企業ニーズを誘発し得るという双方向性があるべきである。また研究の進捗に伴ってシーズやニーズの組合せが変わり得るとともに、それに伴い連携相手も変わり得るといったオープン性・柔軟性があることも重要である。このようなオープンな形でイノベーションを推進できる「場」をイノベーション・エコシステムとして構築していくことが重要である。また、研究開発成果を事業化し社会実装するためには、研究開発以外に法務、財務、ビジネスコンサル等の専門的能力が必要であり、それらが「場」に組み込まれている必要がある。さらに「3 (2) 1) 日本のSTI政策の形成とマネジメントの体系化」で述べたように、研究開発課題設定の段階で人々の価値観を取り入れるためにも多様なステークホルダーが参画できるメカニズムが併せて「場」に備わっている必要がある。この観点から言えば、近年重要度が高まっている「ESG投資」は持続可能性が重要である等の価値観をイノベーション・エコシステムへ反映させる仕組みであると捉えられる。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。また、仮に研究開発成果が社会実装可能な形にまで具体化したとしても、それが社会・市場に受け入れられるまでには、なお不確定要素があり最終的には失敗に終わる可能性もある。そのように失敗した事案に対しても、再評価し、再挑戦を許すような寛容な風土が「場」には必要であり、この点は特に強調されるべきである。

このエコシステムは人材流動の観点からも重要である。研究開発者が基礎研究、応用研究、開発研究等の自分の担当するフェーズに閉じこもっているだけではなく、フェー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、フェー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組みや組織風土が求められる。

イノベーション・エコシステムの重要なテーマの一つが「地域」であり、少子高齢化や産業縮小の現実に直面している地域社会の持続的発展に対して、科学技術イノベーションが寄与することへの期待は高い。例えば、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山積している。地域が直面している課題に対応するに当たり、当該地域の実情・実態を把握している地方自治体、地域産業の中核企業等のステークホルダーの主体的な参画を得ると同時に、研究の側からは、特定の技術の専門知識だけでなく、地域社会に関することなど人文・社会科学の知見も必要であり、地域の大学等の役割が重要である。特定の地域で課題解決が進んだ場合、そのモデルや方法論を他の地域にも展開することを意識することが重要であり、その成果を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として展開できる可能性もある。

5) 分野を越えた連携とそのための素養の涵養

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。そして第6期科学技術・イノベーション基本計画では「Society 5.0」を現実の社会で実現しようとする段階に入る。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。例えば、現実の社会的課題を解決しようとしたとき、自然科学だけで太刀打ちできないことは明らかであり、人間や文化について広い知識を持つ人文・社会科学が関わる必要が出てくる。さらに当事者である市民と常に対話を保つことが求められるだろう。このような異なる立場の者が協力し合い、新たな解決策を探す「共創」の概念とその実践が大切である。

複雑な社会的課題の解決には、新しい知識、新しい科学技術、社会の変化を必要とする。このうち科学技術には、持続可能で豊かな未来の実現に必要な変革に影響を与える上で、果たすべき中心的な役割がある。この役割を果たすためには、研究コミュニティだけでなく、社会の他のセクターからの支援と関与も必要となる。異分野連携、自然科学と人文・社会科学との連携、市民参画などこれまでもいわれてきたが、政策立案者は、既存の阻害要因を低減し、すべての関係者の関与を促す枠組みを開発する上で、より一層重要な役割を果たしていくべきである。

これには、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や共創を継続的に行うプラットフォームといった「場」や仕組みを構築すること、ミッションに応じて機関を横断した水平連携等も必要であろう。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、一人一人の政策担当者、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。

(3) 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い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。いまだ新型コロナウイルス感染症の終息が見えない中、少子高齢化は進行し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、あるいは独創的な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シップではないだろうか。

複雑化した課題に対して多様なステークホルダーによる解決が求められる共創の時代にあって、共創は何も1人のリーダーもしくは政策を担う政府のみで牽引されるべきものではない。それぞれのコミュニティもしくはコミュニティ間で創出すべき価値や解決すべき問題を共有し、知識や経験を積み重ね、責任を持って実行に移していくことが重要である。共創に果敢に取り組む者は得てして所属するコミュニティの価値観を超えた活動をするようになる。こうした者が挑戦しようという意欲を湧き立たせ、報われることが重要である点は、科学の発展の歴史と共通である。

「研究開発の俯瞰報告書 統合版（2021年）」は、「1 科学技術イノベーションの俯瞰の前提」で強調した大きな時代の転換期にあって、産学官の科学技術関係機関における戦略の企画・立案者、研究開発事業の管理者、研究開発事業の計画・実施者、自由な発想に基づく個人研究の研究者などが、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、今後の科学技術イノベーションに関する議論に資するとともに、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（2021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-FY2020-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、CCS
	火力発電
	原子力発電
	太陽光発電
	風力発電
	バイオマス発電・利用
	その他の再生可能エネルギー発電（水力、海洋、地熱、太陽熱）
	電気エネルギー利用（エネルギーマネジメントシステム）
	電気エネルギー利用（電力貯蔵）
	熱エネルギー利用（産業熱利用）
	熱エネルギー利用（民生熱利用）
	化学エネルギー利用
	地域熱供給（地域冷暖房）
	エネルギーシステム評価
	反応性熱流体
	トライボロジー
	破壊力学
計算工学	
環境	気候変動観測
	気候変動予測
	水循環（水資源・水防災）
	水利用・水処理
	除去・浄化技術（大気、土壌・地下水）
	有機化学物質分析・毒性評価
	無機化学物質分析・動態把握
	生態系・生物多様性の観測・評価・予測
	社会-生態システムの評価・予測
	循環利用とライフサイクル評価
	都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）
農林水産業における気候変動適応・緩和	

2. システム・情報科学技術分野 (CRDS-FY2020-FR-02)

俯瞰区分	研究開発領域
人工知能・ビッグデータ	知覚・運動系のAI技術
	言語・知識系のAI技術
	エージェント技術
	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
	認知発達ロボティクス
	社会におけるAI
ロボティクス	ソフトロボティクス
	生物規範型ロボティクス
	インタラクション
	システム化技術
	モビリティロボット
	フィールドロボット
	生活支援ロボット
	サービスロボット
	産業用ロボット
	農林水産ロボット
	ロボティクスと社会
社会システム科学	デジタル変革
	サービスサイエンス
	社会システムアーキテクチャー
	メカニズムデザイン
	計算社会科学
セキュリティ・トラスト	IoT・制御システムセキュリティ
	サイバーセキュリティ
	データ・コンテンツのセキュリティ
	トラスト
コンピューティングアーキテクチャー	プロセッサアーキテクチャー
	量子コンピューティング
	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
	IoTアーキテクチャー
	デジタル社会インフラ
	ブロックチェーン

3. ナノテクノロジー・材料分野（CRDS-FY2020-FR-03）

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

4. ライフサイエンス・臨床医学分野 (CRDS-FY2020-FR-04)

俯瞰区分	研究開発領域
健康・医療	低・中分子創薬
	高分子創薬 (抗体)
	感染症 (抗菌薬・抗ウイルス薬・ワクチン等)
	AI創薬・インシリコ創薬
	再生医療・幹細胞治療
	細胞治療 (CAR-T等)・遺伝子治療
	ゲノム医療
	バイオマーカー・リキッドバイオプシー
	ヘルスケアIoT (ウェアラブル・生体埋め込み計測)
バイオエコノミー	微生物分子生産
	植物分子生産
	植物由来材料
	植物・農業
	植物工場
	水産
	畜産
	林業
	基礎基盤科学技術:組織 (生理・恒常性)
生体時計・睡眠	
老化	
マイクロバイオーム	
感覚器	
脳・神経	
臓器連関	
基礎基盤科学技術:分子・細胞	遺伝子発現機構 (RNA・エピゲノム・クロマチン)
	細胞外微粒子・細胞外小胞
	一細胞オミクス
	ゲノム編集・エピゲノム編集
	オプトバイオロジー
	ケミカルバイオロジー
	合成生物学 (人工生体高分子・人工細胞合成)
	基礎基盤科学技術:分析・計測技術
光学イメージング	
トランススケールイメージング	
計測×AI	
BMI・BCI	

研究開発の俯瞰報告書

CRDS-FY2021-FR-01

統合版（2021年）

～俯瞰と潮流～

PANORAMIC VIEW REPORT

Integrated Version (2021)

令和3年5月 May 2021

ISBN 978-4-88890-741-5

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/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製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。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



<https://www.jst.go.jp/crds/>