

2. 科学技術の俯瞰

2.1 世界の潮流等における分野を越えた動き

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

	<p>データの移転規制が進む可能性があり、相互理解の醸成により問題解決を図ることが重要。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 先端科学技術分野においては、自然界を要素還元的手法により解明する活動から、自然界に存在しないものを人為的・人工的に設計・制御し作製する活動が増加（例：ゲノム編集等による合成生物、機械学習するAI）。作製したものがシステムとして機能することが必要になることから、構成する諸要素を俯瞰し統合的に把握し、デザインすることの重要性が増大（例：ヒト細胞全体システムの把握、ナノ・マイクロ集積デバイス）。 ● 自然界を理解する研究は依然として重要であるとともに、自然界の一部のメカニズムに介入しようとする研究も徐々に進展（例：CO₂を大気から収集する研究）。 <p>● 近年、最先端研究機器の高度化・高額化、扱うデータ量の大規模化、高度な専門による分業化とハイスループット化が進む。その結果として、進歩に多額の資金と人員を要するタイプの先端科学技術分野が台頭する傾向にある（ビッグサイエンス化）。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 多様化・複雑化する現代の課題を前に、個々に発展してきた学問体系を越えて新分野に取り組むことや、複数分野の連携により新たな融合領域を生み出す流れが加速。トランスディシプリナリーやコンバージェンスを指向する研究プログラムが米国やEU諸国、中国・韓国で強化。 ● ELSI が科学技術の推進上重要な要素として位置付けられている。社会との関係深化に伴い、人社連携の重要性が増大。 ● 人材は依然として科学技術の源泉。分野、組織、国境等の壁を越えて人材が流動し、グローバルな競争環境の中で国籍、性別を問わず多様な人材が育成されることが科学技術イノベーションを牽引。 ● 科学技術イノベーション政策と他の政策との統合、連携の重要性が増大。また、人材育成、産学連携等の個々の科学技術システムが相互に関連することで機能。例えば研究成果を社会実装するための橋渡し機能においては、官民の連携、支援人材育成、知財管理等の複数の要素が関連しており、イノベーションエコシステムとして総合的に捉えることが重要になっている。
<p>日本の位置付け</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 我が国はより良い未来社会の実現に向け、科学技術イノベーションに戦略的に取り組み。科学技術が社会に深く浸透しつつある状況の中で、未来社会として「超スマート社会=Society 5.0」の実現を目標として設定。Society 5.0と密接に関連するSDGsについても産学官等の研究開発活動を通じて貢献。 ● イノベーションを指向した研究開発としてはAI技術、バイオテクノロジー

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

	<p>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。</p> <ul style="list-style-type: none">● 研究開発効率を最大化するプラットフォームの構築に加え、知の創出と研究成果の社会実装の循環を促進するイノベーションエコシステムの構築が課題。イノベーションエコシステムには人材育成、官民連携、知財管理などの仕組みから、若手人材を惹き付ける自由な研究環境、異分野研究者間の連携・協力を促進する雰囲気などの風土のようなものまで様々な要素が含まれ得る。● 科学技術と社会との関係深化が進み、AI、ゲノム編集等において倫理的問題が顕在化する中、ELSIに係る取り組みを研究開発の検討段階から社会における利活用の段階まで仕組みとして強化すること、またその際、人文・社会科学と理工学との相互発展的な連携が課題。
--	---

2.2 分野別俯瞰の概要

2.2.1 環境・エネルギー分野

項目	内容
世界の潮流	<ul style="list-style-type: none"> ● 化石資源利用関連技術が座礁資産化するリスクへの懸念から、脱化石燃料化は引き続き世界的な潮流。ESG 投資への取組みを表明する機関投資家が増加しており、あらゆる業種が価値観の変化を迫られている。 ● 再生可能エネルギーの導入拡大が進み、過去 5 年間で発電コストの世界平均は太陽光発電で約 65%、陸上風力発電で約 15%減少。 ● 気候変動についての科学的根拠の整備は引き続き進んでいる。それによると世界の温室効果ガス排出量は現在も増加を続けており、2017 年の人為起源 CO₂ 排出量は約 326 億 t。地球上の平均気温上昇を 2℃未満に抑えるにはこれまで以上の積極的な排出削減努力が必要との認識が主流であるが、米国トランプ政権はこの認識を共有しておらず引き続き状況を注視する必要がある。 ● 海洋プラスチックごみ問題も国際的に議論や各種の動きが活発化。SDGs の海洋保全（目標 14）と持続可能な生産消費形態確保（目標 12）に強く関連。 ● 技術潮流としては、横断的に見られるのは気候変動を始めとする地球環境と人間社会の持続可能性への対応、およびビッグデータ化やスマート化への対応（利用可能になる膨大なデータの高度活用）。 ● エネルギー分野では、安価かつ大量に貯めることが難しく、また変動性が高い再生可能エネルギー由来の電気を変換・貯蔵し、必要な場所やタイミングで利用するための技術についての研究開発が盛ん。特に化学的なエネルギーの活用は活発。蓄電、蓄熱、代替燃料や化学品等の炭化水素合成、CO₂利用（Carbon dioxide Capture and Utilization）等を目指した研究開発が進展中。再生可能エネルギーの導入拡大に伴いエネルギー需給の安定性に関する懸念が顕在化。これを受けて従来の火力や原子力といった大規模発電では電力システムのレジリエンス性向上が新たな課題になっている。再生可能エネルギー自体は主力電源化の実現に向けて予測、蓄エネルギー、最適制御等に係る研究開発が課題になっている。 ● 環境分野では、様々なスケールでの地球観測ニーズが依然として高く、観測技術並びにデータ解析技術が継続的に進展。IoT/AI の隆盛から環境ビッグデータの高度活用への取組みも盛ん。気候変動の影響評価は地域レベルの防災・減災対策等への活用を目指してダウンスケーリングが進展。海洋プラスチックごみ問題への対応では、汚染状況の把握、ヒトや自然環境に対する影響評価等で調査研究ニーズが高まる。

<p>日本の位置付け</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 低いエネルギー自給率（8.3%）を前提に、如何にして温室効果ガス排出の大幅削減を達成しつつ、エネルギーの3E+S（安定供給性、経済効率性、環境への負荷低減、安全性）の同時達成を追求できるかが重要課題。また関連産業の競争力強化や、海洋プラスチックごみ問題を始めとした環境問題への取組みにおける世界との協調等への取組みも重要課題。 ● エネルギー分野では、火力、原子力といった従来から強みのある分野は世界的な優位性をどうにか保持。再生可能エネルギー分野は研究の蓄積はあるものの、政策、法規制、地理的条件等の様々な制約もあり、基礎研究の成果が応用・開発、社会実装へと繋がる力強い流れは見えにくい。電力系統の安定化やICTを活用したサービス開発の研究開発等、エネルギーマネジメント分野の研究が盛ん。化学分野も脱化石燃料化やCO₂排出削減の観点から基礎研究並びに応用・開発への取組みが産学官で活発。 ● 環境分野では、観測系の分野はとりわけ水の分野で欧米に匹敵。気候変動適応関連では地球システムモデルの開発とその成果活用が政策支援の下で異分野連携により進む。一方で社会と生態系の一体的な評価やガバナンスの研究は他国に比して遅れ。汚染除去関連で自動車排気後処理技術に関して世界トップ水準の研究を展開。しかし環境影響の総合評価、データベース構築、システム開発等では欧米から遅れ。 ● 研究コミュニティに関しては全体的に研究開発の国際競争力低下が顕在化。特に工学系の基盤的な分野では公的支援も明確でなく状況は深刻。
<p>日本の挑戦課題</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 引き続き社会からの要請に応える研究開発を進めることが必要。そのためには中長期的観点から大きな方向性を示し、それに向かう研究開発を、全体バランスを考慮しながら推進することが重要。またその推進にあたっては俯瞰的な視野を持った政策的リーダーシップの重要性がこれまで以上に大きい。 ● 今後の方向性として重要なキーワードは以下に示す5つ <ol style="list-style-type: none"> ① ゼロエミッション（Zero-Emission） 重要課題：回収CO₂を用いた合成炭化水素研究 ② アダプテーション（Adaptation） 重要課題：異常気象への温暖化の影響解明、異常気象による災害への対応策 ③ サーキュラー（Circular） 重要課題：マイクロプラスチックの動態解明・リスク評価・社会科学的/行動科学的方策、水循環・水利用 ④ スマート（Smart） 重要課題：エネルギーネットワーク・需要科学、再生可能エネルギー

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

2.2.2 システム・情報科学技術分野

項目	内容
世界の潮流	<ul style="list-style-type: none"> ● 「スマート化」「システム化・複雑化」「ソフトウェア化・サービス化」が大きな技術トレンド。GAFA と呼ばれる Google、Apple、Facebook、Amazon など大手インターネット関連企業が世界の市場と技術開発をリード（中国を除く）。中国では盛んな研究開発投資と巨大データ集積による AI 実用化が急速に進展。 ● 人工知能（AI）は、技術自体が急激に進化。意思決定の際に考慮すべき要因・影響の膨大さや複雑さは、人間が思考できるレベルを超越。医療診断や自動運転を含む様々な AI 応用システムで、人間を上回る精度や高度プロセスの自動化が進展。機械学習を含むシステムはブラックボックスで、偏見学習、誤認識誘発攻撃等の問題が発生。ロボティクスにおいては、物理的な柔軟性（ソフトネス）を取り扱う分野が進展し、生物規範型ロボットの新分野は急速に進展。 ● 人工知能や知的ロボットなど知的情報処理技術の研究開発が進展し、実社会への適用が次々と実現することに対して、倫理的・法的・社会的（ELSI: Ethical, Legal, and Social Issues）な視点での考慮が不可欠。 ● コンピューティングアーキテクチャは、データセンター、インターネットさらにモバイルネットワークによりその適用領域、連携が拡大。コンピューティングの対象も、数値データから多様なメディアに拡大。ブロックチェーンや量子コンピューターに期待が集まる。 ● 企業における情報技術の利活用を「デジタル・トランスフォーメーション」と呼び、業務プロセスや働き方、ビジネス連携などの改革を進める動きが活発化。FinTech（金融市場）、EdTech（教育市場）、AdTech（広告市場）、MedTech（医療市場）、RetailTech（小売市場）など「xTech」と呼ばれる業界を情報技術で大きく変革しようとする流れ。 ● 既存の社会システムは世の中の動向（人口動態変化、技術進歩、グローバル化、新興企業の台頭等）に追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。 ● 個人情報が GAFA 等のプラットフォーム事業者に蓄積されており、欧州では、GDPR（General Data Protection Regulation: EU 一般データ保護規則）が開始され、プライバシー保護に向けた動きが活発化。 ● 米国は、質の高い STEM（Science, Technology, Engineering and Mathematics）およびコンピューターサイエンス教育の推進を重点化。

<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。 ● しかし、かつての半導体や通信機器のようにグローバルな市場で圧倒的な強みを持ち、ビジネス展開していたような状況にはない。AIやIoTに関しては一部に強みはあるものの、産業として大きな国際的競争力を有するまでは至らず。新たなビジネスモデルの構築や新産業創出に弱み。 ● これまでユーザであった自動車産業や素材産業、サービス産業などが、デジタルトランスフォーメーションの流れや製品・サービスの進化のためにシステム・情報科学技術の研究開発、ビジネス化に取り組む。海外の技術の取り込みも盛ん。 ● データ利用のための政府方針として、統合イノベーション戦略では「Society 5.0 実現に向けたデータ連携基盤の整備」が掲げられ、法整備の面では、改正個人情報保護法により匿名加工情報の定義が明確になり、医療データについては、次世代医療基盤法も整備され、データ活用に期待。 ● また人間中心のAI社会原則会議は Society 5.0 の実現に向け、AIの適切で積極的な社会実装を推進するために、AI倫理に係る我が国の原則として、「人間中心のAI社会原則」を策定。
<p>日本の挑戦課題</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 日本が国際競争力を構築・維持していくため、また、国として自立した安全安心な社会を維持していくための研究開発投資戦略としての基本的な考え方は、①強い技術を核とした骨太化、②強い産業の発展・革新の推進、③社会課題の先行解決、④社会基盤を支える根幹技術確保の4つ。 ● 4つの基本的な考え方に基づく我が国が推進すべき20の重点テーマ <ol style="list-style-type: none"> (1) 意思決定・合意形成 (①技術、④基盤) (2) AIソフトウェア工学 (①技術、③社会) (3) 計算脳科学 (①技術) (4) 統合AI (①技術) (5) 自律・認知発達ロボティクス (③社会) (6) 生物規範型ロボティクス (②産業) (7) 人間・機械共生 (①技術、③社会) (8) ビッグデータに基づく問題解決 (③社会) (9) Society デジタルツイン (③社会) (10) 社会システムデザイン (④基盤) (11) RegTech (④基盤) (12) サイバーフィジカルセキュリティ (④基盤) (13) サービスプラットフォーム (③社会、④基盤)

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

2.2.3 ナノテクノロジー・材料分野

項目	内容
世界の潮流	<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。この間、ナノテクノロジーは技術の先鋭化、融合化、システム化へと向かう流れの中にあり、2010年代以降は特に異分野技術の融合化と、製品化・社会実装を指向した技術のシステム化・市場浸透が進展。 ● いよいよ全盛を迎えつつあるIoT/AI時代を牽引する多様なデバイス群を実現するのがナノテクノロジー・材料技術。エッジクラウド、IoTセンサーデバイス、自動運転、ロボット、ポスト5G/モバイル、診断・治療・計測デバイスなど、ハード側はナノテクノロジー・材料技術が競争を左右。 ● SDGsを技術ベースで支えるのもナノテクノロジー・材料技術。水・大気浄化、温室効果ガス排出削減、資源循環、エネルギー関連デバイスなど、素材としての性能だけではなく、プロセス・エネルギーコストや環境影響まで含めた研究開発を行うことが重要。 ● 情報科学技術の進歩とコンピュータの能力向上によって、データ駆動型材料開発（マテリアルズ・インフォマティクス）が全ての材料開発の基盤技術として定着。最近ではデータ駆動型プロセス設計（プロセス・インフォマティクス）への挑戦が始動。 ● ナノテクノロジーによって実現される製品（nano-enabled products）が社会に浸透するにつれ、製品の輸送、保管、販売、使用、さらには使用済製品の廃棄やリサイクルなど、製品のライフサイクル全体を対象とした、ヒトや環境への影響を明らかにする研究（ELSI、EHS含む）への関心が増大。既に欧米を中心に、国・地域単位での規制・制度が顕在化。
日本の位置付け	<ul style="list-style-type: none"> ● 米中台頭の中、我が国の生命線である輸出の約9割を工業製品が占めており、部品・素材のウェイトが増大。 ● 我が国は長年の技術蓄積に基づき、元素戦略、分子技術、蓄電池部材、電子材料、パワー半導体、複合材料などの物質創製・材料設計に強み。物質創製・材料設計に用いられる計測評価・分析・品質管理にも強み。これらが活きる形で省エネ・低環境負荷技術に優位性。IoT時代に重要となるセンサ/アナログ機能やコンピューティング機能のヘテロ集積モジュール化にもポテンシャルを保有。 ● 一方、データ科学、標準化・規制戦略、医工連携、産学連携に課題。 ● ナノ材料の安全性研究やリスク評価の体制が欧米に比較して脆弱。国際的なコミュニケーションを具備するエキスパート人材も不足。

日本の 挑戦課 題	<ul style="list-style-type: none"> ● 本分野の研究開発を進めるにあたって、 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 科学技術研究の量的競争では不利な中、官民の「研究開発投資効率最大化」の実現 ➢ 異分野融合／深みのある研究開発と水平／垂直連携の両立 ➢ 府省連携・産学連携／時間ギャップを考慮した研究開発フェーズへのスムーズな移行 ➢ 複数の分野（材料科学と情報科学など）に跨がる人材の育成を図ることが非常に重要。 ● 上記を踏まえた上で、取り組むべき 6 つの社会ニーズと 10 の挑戦課題（グランドチャレンジ）は以下のとおり。 <ul style="list-style-type: none"> 【快適・安全・安心な社会へ】 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 社会ニーズ <ul style="list-style-type: none"> ① 安全・低環境負荷の交通・輸送 ② 安全・快適社会実現へ向けた IoT/AI チップ・量子デバイス ➢ グランドチャレンジ <ul style="list-style-type: none"> i 量子状態の高度制御 ii トランススケール力学制御 iii センサフュージョン 【最適な医療・ヘルスケアへ】 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 社会ニーズ <ul style="list-style-type: none"> ③ ウェアラブル健康・医療モニタリング ④ 人と共生するサービスロボット ➢ グランドチャレンジ <ul style="list-style-type: none"> iv ナノ・メカ・IT・バイオ統合マニファクチャリング v バイオアダプティブ材料設計 vi IoT デバイス集積 【持続可能な社会へ】 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 社会ニーズ <ul style="list-style-type: none"> ⑤ 水・大気・鉱物の資源循環を可能にするスマート材料 ⑥ 省/創/蓄エネルギーのための先端材料・デバイス ➢ グランドチャレンジ <ul style="list-style-type: none"> vii サステイナブル元素戦略 viii 分離技術 ix 多機能・複雑系の材料設計 【上記すべての基盤となる技術】 <ul style="list-style-type: none"> x オペランド計測・プロセス統合ものづくり
-----------------	---

2.2.4 ライフサイエンス・臨床医学分野

項目	内容
世界の潮流	<ul style="list-style-type: none"> ● 「より多くの人に、より質の高い医療サービスを、より安価に提供する」こと、「より多くの人々が、より質の高い食料を安定して入手できる」ことは世界での喫緊の課題。 ● 本分野の研究開発領域の全体を見て、この2～3年の大きな技術・研究の変化、進展を以下のとおり分析。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 一細胞オミックス技術の隆盛と細胞社会・不均一性の理解や疾患の理解が進展。 ➢ クライオ電顕、超解像顕微鏡・光シート顕微鏡等イメージング技術の発展による各生体スケールの解像度が向上。 ➢ ゲノム編集技術の精度の向上による医療、食料応用への展開。 ➢ 計測技術やAI・機械学習等をはじめとする急速に発展するICT技術が、自動化、大規模化等を通じて、生命科学、臨床へ着実に浸透。 ➢ タンパク質間相互作用を阻害することによる薬効など新しい創薬等アプローチが出現。 ● 個別化・層別化医療、ゲノム医療・創薬およびバイオエコノミー等、社会の中に存在する多種多様なデータ活用を要するとともに、社会・国民の理解が必要な研究開発が引き続き大きな潮流。 ● 「仮説検証型」のアプローチに加え、大量の生命情報から法則を発見するという「データ駆動型」の新しいアプローチによる生命現象の理解が進展。これにより「精緻な理解」と「予測」が基本的な方向性。 ● サイエンスの流れとしては、これまで生体の多くの個別の遺伝子やタンパク質が同定されてきたが、その生体内での相関や時空間的挙動（ダイナミクス）はほとんど記述できていない。今後「多次元生命システムにおける時空間階層のブリッジング」を目指した相関、ダイナミクス、予測に研究が進むのは自然の流れ。 ● 近年では、研究者あるいは研究コミュニティが、研究対象として、研究開発の循環構造、生命の時空間階層を広く見る必要が出てきたこと、および技術進展サイクルの短縮化の結果、研究単位当たりのハイスループット化、高コスト化、つまり「ビッグサイエンス化」が急速に進展。これに伴い、実験デザインやデータマネジメントの重要性が増大。
日本の位置付け	<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」が大きなキーワード。社会保障費の増加による国の財政の圧迫、労働人口の減少や介護等による労働力の低下といった問題が顕在化。新しい科学技術を用いた薬価の高騰による医療経済の問題もある。

	<ul style="list-style-type: none"> ● 食料需給の視点では、日本は2015年の段階で、世界第6位の農産物の輸入国（金額ベース）であるが、農林水産物の輸出額は右肩上がりに増大。 ● 2.6の国際ベンチマークからは、日本は「構造解析」、「細胞外微粒子」、「免疫科学」、「時間科学」、「脳神経科学」、「光学イメージング」、「核磁気イメージング」、「植物科学」、「畜産科学」、「高分子医薬」、「幹細胞・再生医療」、「オルガノイド」、「生活習慣病」、「精神・神経疾患」等における基礎研究に強み。また、「細胞外微粒子」、「水産、機能性食品」、「高分子医薬」、「幹細胞・再生医療」、「精神神経疾患」等における応用研究に強み。 ● 一方で、「遺伝子・細胞治療」や「がんゲノム医療」等、世界の大きな潮流となっている領域で後塵を拝する。 ● 論文動向を見ると、生命科学や臨床医学においても日本はこの10年で他の国に比べ増加率が低く、ドイツ、英国に抜かれる等相対的に順位を下げている。特に、新興・融合分野であるXオーム・オミックス分野・インフォマティクス分野での劣後が顕著。 ● 日本のアカデミアは分散化・たこつぼ化が進み、世界の潮流となっている研究開発の循環構造を回す、生命の時空間階層をつないでいく、といった研究が進めにくい環境・構造。 ● ゲノム医療やゲノム編集活用作物・水畜産物、合成生物学などをイノベーションにつなげるためのELSI研究が不足。
<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、日本のこれまでの政策、日本の強み・弱みを俯瞰した上で、今後国として手を打つべきテーマについて、9つを抽出。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 「“ヒト研究”および“データ研究”の戦略的な加速（Integration of Bio-Medical Things）」 ➢ 「治療用人工細胞創出に向けた基盤技術開発と医療応用」 ➢ 「圃場の微生物・作物・環境をつなぐ物質循環の解明～真に地球環境にやさしい農業～」 ➢ 「高品質水畜産物の高速・持続可能な生産に向けた品種改良、飼育養殖手法開発」 ➢ 「機能性農産物の創出と植物による高付加価値物質生産」 ➢ 「医薬・化成品など有用物質の持続可能な生産に向けた生体分子、生命システム設計ルール解明 ～核酸、タンパク質、細胞を結ぶ、多階層横断的サイエンス推進～」 ➢ 多次元解析で紐解く生命システムのダイナミクス～オミックス×イメージング×データ・モデリングによる基盤技術の創成～」 ➢ 理論的・実験的（生物学的）アプローチの融合による脳の動作原理の

	<p>理解</p> <ul style="list-style-type: none">➤ アトミックセルダイナミクス～構造・機能相関予測のための細胞知の統合～● 研究のパラダイム変化に対応した、データ・情報統合的な研究の推進が可能な研究体制の拠点化とそのネットワーク化による研究プラットフォームの構築が必要であり、下記を意識した政策、研究環境の構築必要。<ul style="list-style-type: none">・研究者が研究に専念できる環境構築・機器共用による全体コスト効率化・若手研究人材のスタートアップ環境整備・異分野融合による新しいサイエンスの創出・Wet/Dry 統合と人材育成・データマネジメントと計測技術等の標準化・マウスからヒトへ、ラボからフィールドへ（人材育成と研究）・異分野（生命科学・工学・情報学・医学）の統合や産学連携による基礎研究からイノベーションまでのコスト・時間短縮・社会科学者や法学者等の参画による ELSI の推進
--	--

研究開発の俯瞰報告書 概要

社会の要請・ビジョン

持続可能な豊かな社会

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

循環型経済

■ 循環型社会形成に向けた新たなイニシアチブ

SDGs

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

パリ協定

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

3E+S

■ 安全性 (Safety) を前提としたエネルギーの「安定供給性 (Energy Security)」, 「経済効率性 (Economic Efficiency)」, 「環境への負荷低減 (Environmental Load)」 同時達成の追求。

社会・経済の動向

人口、石油需給

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

CO₂排出量推移

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

ESG投資

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

海洋プラスチックごみ問題

■ EU循環型経済政策、中国プラスチックごみ輸入規制。

科学技術の潮流

■ 気候変動への対応：緩和策と適応策。

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

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

■ 規制開発：大気汚染物質の排出規制などに対応するための技術開発の進展。

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

環境・エネルギー分野（2019年）

研究開発動向

エネルギーシステム、エネルギー利用

[研究開発領域：1, 9, 10, 15]

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

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

集中電源、大規模発電

[研究開発領域：2, 4, 13, 14]

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

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

化学的エネルギーの活用

[研究開発領域：3, 7, 10, 11, 12]

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

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

分散電源、再生可能エネルギー

[研究開発領域：5, 6, 8]

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

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

環境観測

[研究開発領域：16, 18, 20]

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

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

気候変動適応

[研究開発領域：17, 21, 26]

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

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

環境分析・汚染除去/浄化・リサイクル

[研究開発領域：19, 22, 23, 24, 25]

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

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

日本の現状・トレンド※2

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

主要国の動向

米国

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

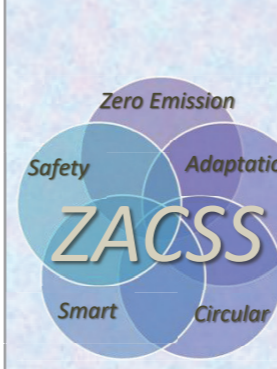
EU及び仏英独

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

中国

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

今後の展望・方向性



Zゼロエミッション：GHG正味ゼロ排出
課題例：回収CO₂を用いた合成炭化水素研究

Aアダプテーション：気候変動影響への対応（適応）
課題例：異常気象への温暖化の影響解明、異常気象による災害への対応策

Cサーキュラー：循環型社会形成
課題例：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/行動科学的の方策、水循環・水利用

Sスマート：デジタル化、データ活用
課題例：エネルギーネットワーク・需要科学、再生可能エネルギー最適制御、データ基盤構築

Sセーフティ：自然災害や事故への備え
課題例：地震、エネルギー安全保障、原子力発電と安全・安心

2.3 環境・エネルギー分野

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

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

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

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

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

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

研究開発領域群*	研究開発動向からのハイライト
エネルギーシステム、 エネルギー利用	<ul style="list-style-type: none"> ● 電化推進と変動電源拡大の流れの中でエネルギー製造・貯蔵/運搬・利用に関する検討が活発化。一方でエネルギーシステム全体を統合的に考える視点の必要性が指摘されている。その他、エネルギーフローの双方向化により ICT を活用した消費側との連携の重要性も増大。
集中電源、 大規模発電	<ul style="list-style-type: none"> ● 北海道におけるブラックアウトを受け、電力システムのレジリエンス性向上が新たな重要課題に。
化学的エネルギーの活用	<ul style="list-style-type: none"> ● 再エネの貯蔵・輸送・利用のための技術開発（蓄電、蓄熱、Power to X, CCU）が活発。
分散電源、 再生可能エネルギー	<ul style="list-style-type: none"> ● 世界的に変動・分散型再生可能エネルギーの競争力が向上。一方で導入拡大によるエネルギーネットワークへの影響が顕在化（例：九州における太陽光の出力制御）。主力電源化を実現するための予測技術の活用、蓄エネルギー、最適制御等に係る研究開発が課題に。
環境観測	<ul style="list-style-type: none"> ● 観測ニーズは高く、観測技術並びにデータ解析技術ともに研究開発が継続的に進展。IoT/AI の隆盛もあり環境ビッグデータの高度活用のための研究開発が活発化。
気候変動適応	<ul style="list-style-type: none"> ● 気候変動の影響評価のダウンスケーリングが建物レベルにまで進展（例：ヒートアイランドとの一体評価） ● 極端現象への温暖化の寄与を明らかにする研究（イベントアトリビューション）が活発化。
環境分析・汚染除去/浄化・ リサイクル	<ul style="list-style-type: none"> ● 海洋プラスチックごみ問題対応が世界的に活発化。ヒトや自然環境への影響の評価のニーズ高まる。代替物の議論も活発化。 ● 国内での水インフラの老朽化及び地方自治体の体力低下は深刻に。

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

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

<エネルギー分野>

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

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

<環境分野>

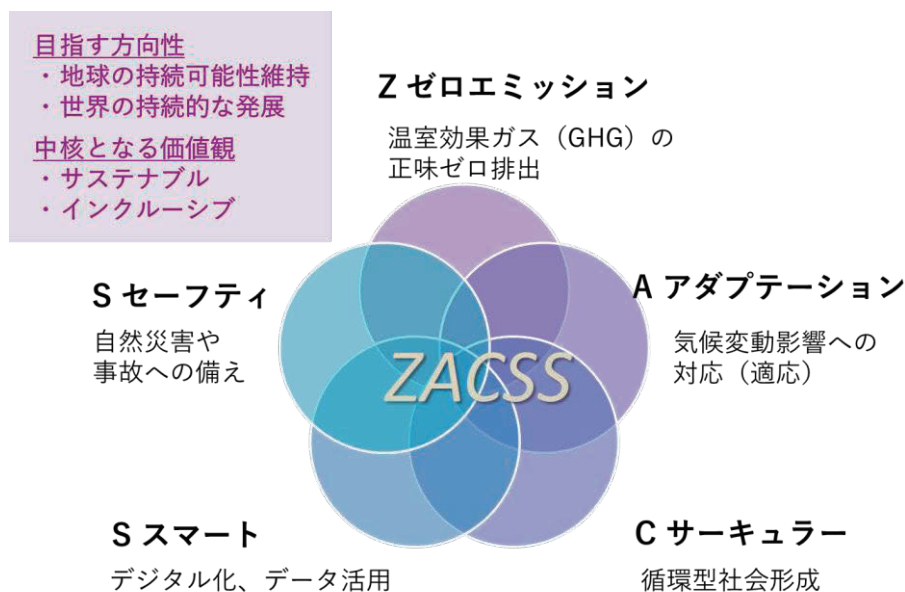
- 観測系の分野では雨量観測の高精度化や中小河川の流出予測、あるいは全球レベルの水循環や気候変動適応策の研究等、水の分野で欧米に匹敵する研究開発が進められている。また海洋観測でも国際的に重要な貢献をしている。しかし広域なデータ統合・解析、あるいは解析に基づく大規模実証研究等では遅れが見られる。気候変動観測衛星の戦略立案も停滞気味。
- 気候変動適応に関連する分野では地球システムモデル（ESM）の開発とその成果の活用が政策的支援の下で異分野連携によって進みつつある。一方で、社会と生態系を一体的に評価したり、そのガバナンスについて研究する取組みは他国に比して遅れている。
- 水処理や汚染物質の除去・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

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

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

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

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



以下にはキーワードごとの概説と研究開発との関連性を示す。

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

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

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

キーワード	展望および今後の重要課題例
ゼロエミッション	<ul style="list-style-type: none"> ● 2°C目標達成のためのGHG排出の大幅削減に向け、その手段として脱化石燃料、及び再生可能エネルギー主流化が進展。 ⇒回収CO₂を用いた合成炭化水素研究 ● 従来の一方向的・大規模集中型のエネルギーシステムの中に双方向的・分散型の要素が広がる。 ⇒日本の社会システムとしてのエネルギーの研究（エネルギー構成、都市と地方）
アダプテーション	<ul style="list-style-type: none"> ● 気候変動影響への適応がより重要に。影響予測の精度を高め、対策に繋げる。 ⇒温暖化に伴う異常気象による災害への対応（洪水・土砂災害） ⇒異常気象と温暖化影響の関連性解明（イベントアトリビューション）
サーキュラー	<ul style="list-style-type: none"> ● 海洋プラスチックごみ問題への取組みが国際的に本格化。 ⇒環境中での物質動態、環境影響評価 ⇒行動変容（ナッジ） ● 世界的な淡水資源の枯渇、日本では水インフラの老朽化と人口減少・過疎化。 ⇒グローバル・ローカルな水循環、水利用
スマート	<ul style="list-style-type: none"> ● データ駆動型社会が一層現実化。 ⇒エネルギー問題への適用（エネルギーネットワーク、需要科学、気象予測に基づく再エネ最適制御） ⇒データインフラの整備（共通データ基盤の構築、環境観測インフラ）
セーフティ	<ul style="list-style-type: none"> ● レジリエントな社会構築への要請高まる。 ⇒地震による社会への影響予測と対応検討（エネルギーや水のインフラ停止） ⇒日本のエネルギー源の確保（グローバルなエネルギーサプライチェーン） ⇒原子力と安全・安心

国際比較表

<エネルギー区分>

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

<環境区分>

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

研究開発の俯瞰報告書 概要



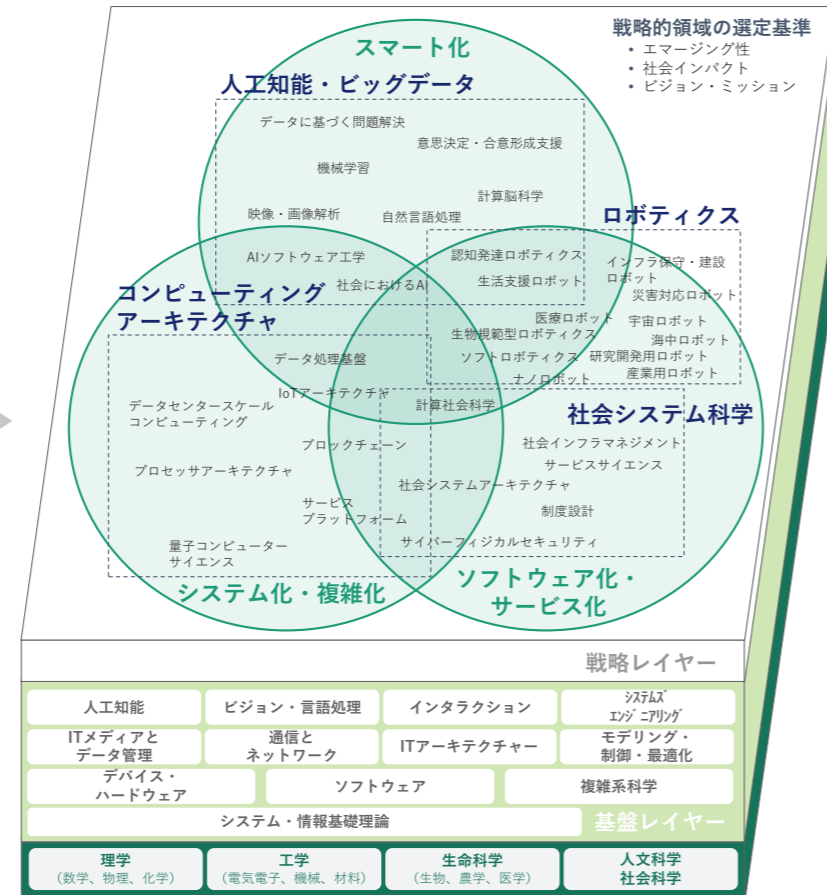
社会の要請・ビジョン

- 産業構造の変革**
多様なニーズ・シーズの適切なマッチングを実現するビジネス基盤システムや、透明・オープンなサービスプラットフォームなどの実現。多くの産業の効率化・省エネルギー化。
- 社会システムの変革**
最新の情報技術を使って、経済発展と社会問題解決を両立し、誰もが快適で活気に満ちた質の高い生活を送れるような社会を目指した、社会システムデザインの促進。
- 教育・研究の変革**
多様な個性に対応した質の高い教育・訓練の提供。センシング情報やエビデンスに基づく教育プログラムの構築。新しい方法論や情報・データ共有など、ITは研究の基盤となる。
- 知の活用の変革**
知識・情報・データベース化と統合活用、それを実現するようなプラットフォーム、そして実際の人間社会に影響を及ぼすCPDSなどにより、知の発見・伝播・蓄積が加速される。

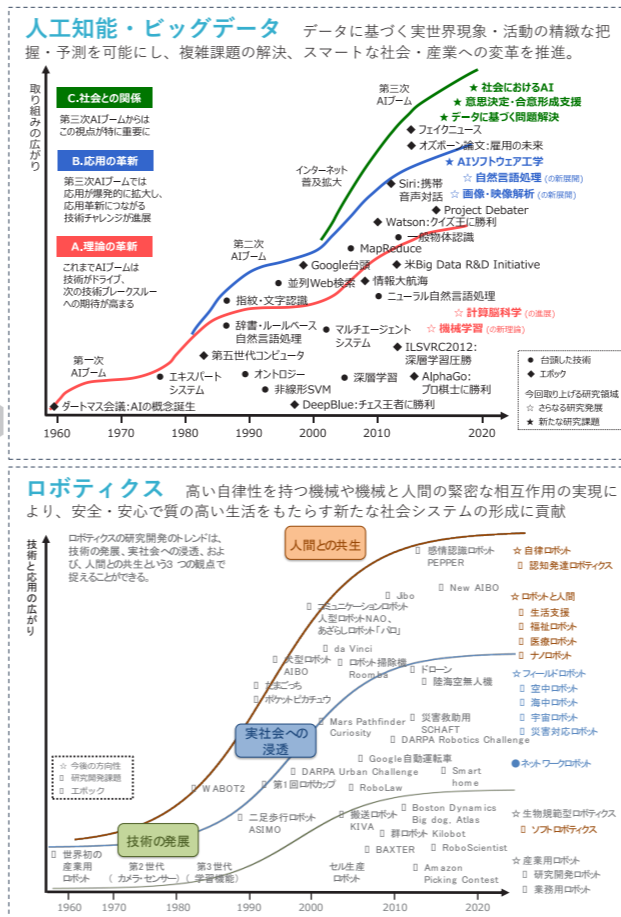
技術のトレンド

- スマート化**
コンピューターが小型軽量高性能になり、機器のスマート化とデータのデジタル化が進み、大量のデータの収集と解析が可能に。ビッグデータと機械学習を組み合わせたサービスやアプリケーションも普及。
- システム化・複雑化**
情報通信の無線化・大容量化・グローバル化は、機器や人をクラウドにリアルタイムにつなぐことを可能にした。世界中のあらゆる情報・制御システムは地球規模の複雑なシステムの一部となった。
- ソフトウェア化・サービス化**
仮想化の考え方がハードウェアの隠蔽・共有からソフトウェアやサービスのコンポーネント化・再利用に広がり、新たなIT活用技術を実現。人や資産をサービスコンポーネントとして共有するサービス形態も出現。

分野の俯瞰と戦略的研究開発領域



俯瞰区分と研究開発領域



推進すべき重点テーマ

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

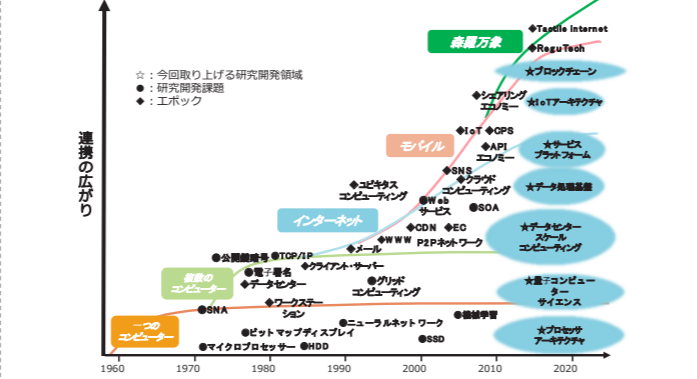
社会・経済の動向

- 世界**
- ・ 世界経済成長は年3-4%と低成長、需要拡大の妙手なし
 - ・ 中国経済変動の影響大
 - ・ 民主主義の揺らぎ
 - ・ 地球規模・一国内での格差問題の提起、SDGsニーズ市場化、貧困、食料偏在化
 - ・ 市場主義の揺らぎ、特に金融市場主義への反発
 - ・ 中国・ロシア・イスラム世界など地政学リスク高水準
 - ・ 温暖化、都市化、地球環境リスク、自然災害リスクの増加
 - ・ 産業・労働構造、人間行動、意志決定システム等の変化
 - ・ 先進国、新興国の消費・サービス構造の変化
- 日本**
- ・ 少子高齢化(役割担い手の減少)
 - ・ 経済低成長と財政の行き詰まり
 - ・ 社会インフラ老朽化
 - ・ 原発の位置づけとエネルギー問題
 - ・ 自然災害の脅威
 - ・ 地方創生への期待
 - ・ 社会保障費の増大、介護・教育・安全安心への期待
 - ・ 働き方の変革、一億総活躍

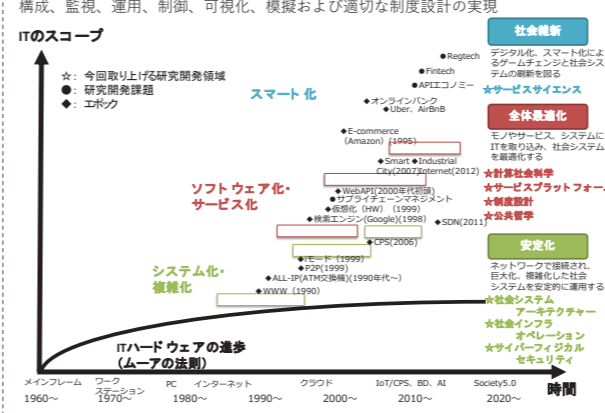
システム・情報科学技術との関連

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

コンピューティングアーキテクチャ



社会システム科学



戦略の基本的な考え方

- 技術：強い技術を核とした骨太化**
既に保有している、あるいは、育ちつつある強い技術を足掛かりとして、技術の国際競争力を骨太化する作戦・シナリオである。国の研究開発プロジェクトなどで生み出した中核技術に、周辺技術をかけあわせて、強みを出させる技術領域を拡大・強化するという作戦・シナリオがその一例である。
- 産業：強い産業の発展・革新の推進**
既に保有している、あるいは、育ちつつある強い産業を足掛かりとして、国際競争力のある技術群を育てる作戦・シナリオ。日本に強みのある産業において、現存する課題や将来直面する課題を見極め、それらを解決するための技術開発を推進し、その成果を産業に投入していくことで、その産業とそれを支える技術群の競争力を育成・拡大する。
- 社会：社会課題の先行解決**
課題先進国として、先端技術の社会受容性で先行できることを活かして、国際競争力を構築する作戦・シナリオ。社会課題解決のための先端技術導入・環境変化に対する社会受容性の面で、他国に先行できるチャンスがあり、社会課題の先行解決ができれば、それを他国に事業展開していくことが狙える。
- 基盤：社会基盤を支える根幹技術確保**
社会基盤を支える根幹技術は、国として保有・強化しなくてはならないという考え。今日、あらゆる技術を自前開発でそろえることは不可能であり、オープンイノベーション、他国からの技術導入も組み合わせ、バランスよく技術開発・活用を進めることが必要となる。

2.4 システム・情報科学技術分野

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

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

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

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

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

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

いくつかの視点を調査・分析によって中立的な立場から提供するものである。

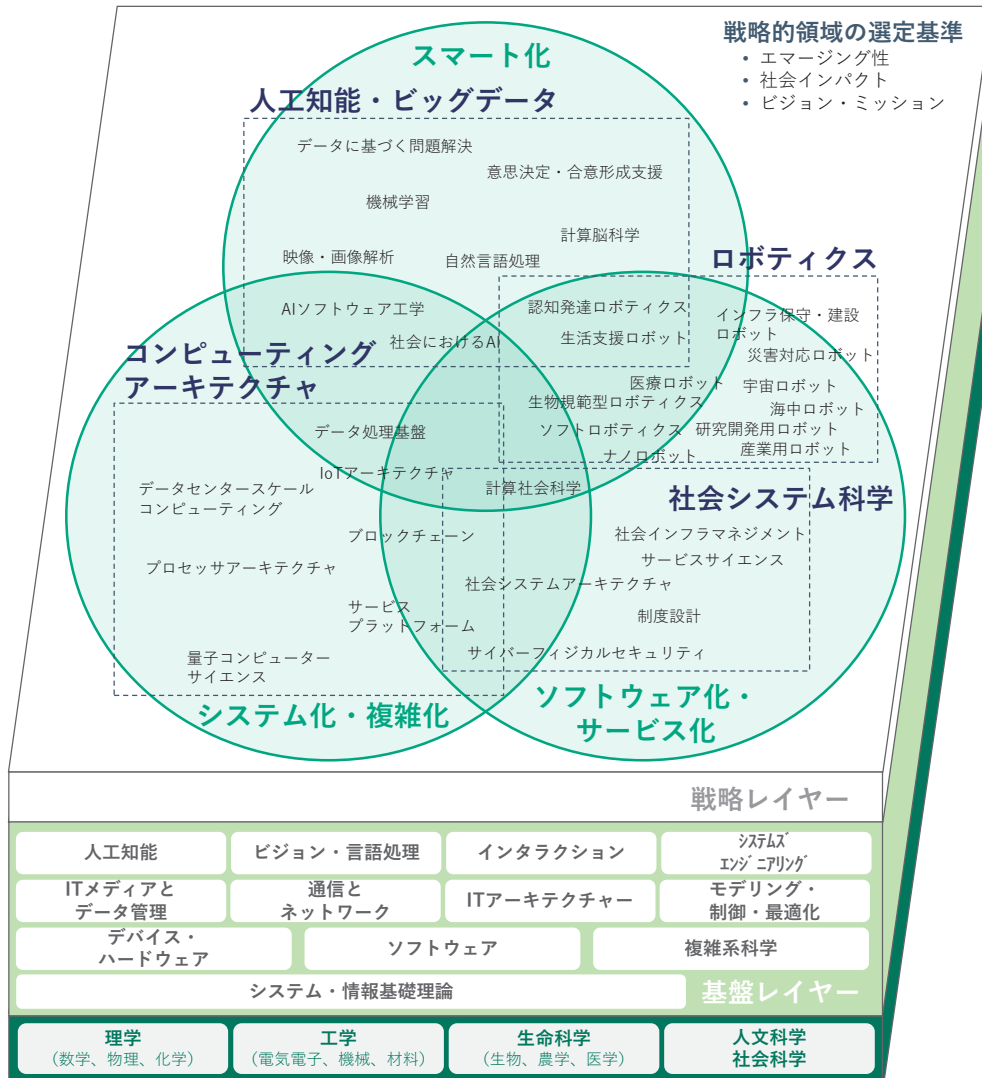


図 1 システム・情報科学技術分野の俯瞰

表1 重点テーマの抽出

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

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

国際比較表

【人工知能・ビッグデータ】

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

【ロボティクス】

国・地域	フェーズ	認知発達ロボティクス		生活支援ロボット		医療ロボット		海中ロボット		宇宙ロボット		インフラ保守・建設ロボット		災害対応ロボットシステム		ソフトロボティクス		生物規範型ロボティクス		産業用ロボット		研究開発用ロボット		ナノロボティクス	
		現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	基礎	○	→	◎	↗	○	→	○	↘	○	→	○	→	◎	→	○	→	○	↗	△	↗	◎	→	○	→
	応用・開発	◎	↗	○	↗	◎	↗	○	→	○	→	◎	↗	○	→	○	→	○	→	△	→	◎	↗	○	→
米国	基礎	△	↘	○	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	○	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	△	↗	△	→	◎	↗
	応用・開発	△	↘	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	○	→	◎	→	◎	→	◎	→	○	↗	△	↘	◎	↗
欧州	基礎	○	→	◎	↗	○	→	○	↗	◎	→	○	→	○	→	○	→	○	↗	○	↗	△	→	◎	↗
	応用・開発	○	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	○	→	◎	↗	○	→	◎	↗	○	↗	△	→	◎	↗
中国	基礎	△	↘	△	↗	○	→	△	↗	○	↗	/		△	→	△	→	○	→	△	→	△	→	△	↗
	応用・開発	△	↘	○	↗	○	↗	◎	↗	○	↗			○	↗	×	→	◎	↗	○	↗	-	-	-	-
韓国	基礎	△	↘	△	→	○	→	×	↘	△	→	△	→	○	→	○	↗	○	↗	△	→	-	-	○	→
	応用・開発	△	↘	×	→	○	→	△	→	△	→	△	↗	△	→	×	→	△	→	△	→	-	-	△	→
ロシア	基礎									◎	→														
	応用・開発									◎	→														
カナダ	基礎									○	→														
	応用・開発									○	→														
インド	基礎									○	↗														
	応用・開発									○	↗														

【社会システム科学】

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

【コンピューティングアーキテクチャ】

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

研究開発の俯瞰報告書 概要

社会の要請・ビジョン

IoT/AI時代のCPS (Society5.0) への期待

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

複雑化、深刻化する環境・エネルギー問題と科学技術への期待

太陽光や太陽熱エネルギーの電力変換技術、風力発電技術、そして電力系統間での負荷変動を吸収する蓄電池技術や、EVに代表される輸送機器の蓄電池技術はいずれもナノテク・材料・デバイス技術が鍵を握る。あらゆる素材・デバイスの作成・使用過程において、資源制約への対応技術と省エネ技術は経済的にも環境的にも極めて重大な課題に

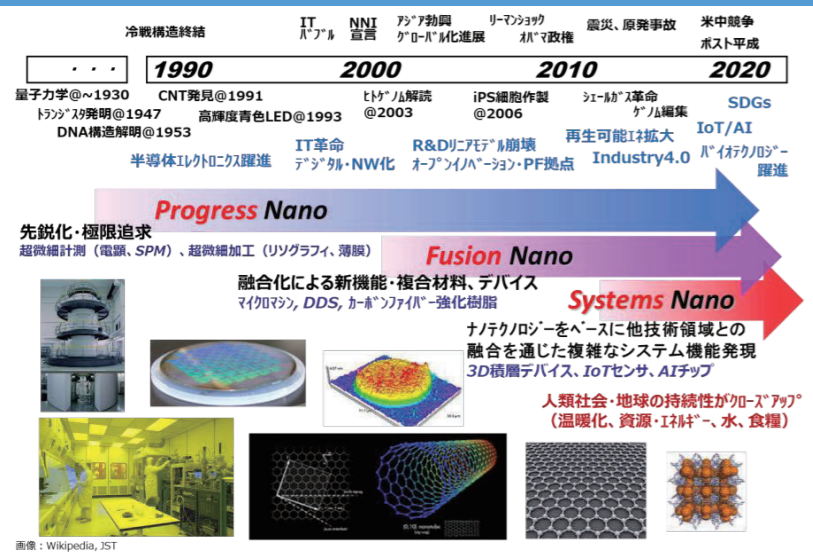
超高齢化社会・人口減少時代のヘルスケア・医療への期待

高齢人口の割合が増加するなか、健康寿命を延伸するためには「健康維持」「疾患治療」「身体機能の補修・代替・拡張」がより重要に。未病段階における超早期診断、健康状態把握に直結する生体情報モニター、簡便な在宅医療システム、難治疾患・がん、脳疾患などの根本的治療、機能を失った臓器を代替・修復する技術など、ナノテクノロジー・材料の貢献が期待される多数の医療・健康ニーズが存在

社会・経済の動向

SDGs（持続可能な開発目標）達成、Society5.0実現を見据えた研究開発が主流になり、価値形態が変化（所有からシェアへ、大量生産から個別生産/カスタマイズへ）

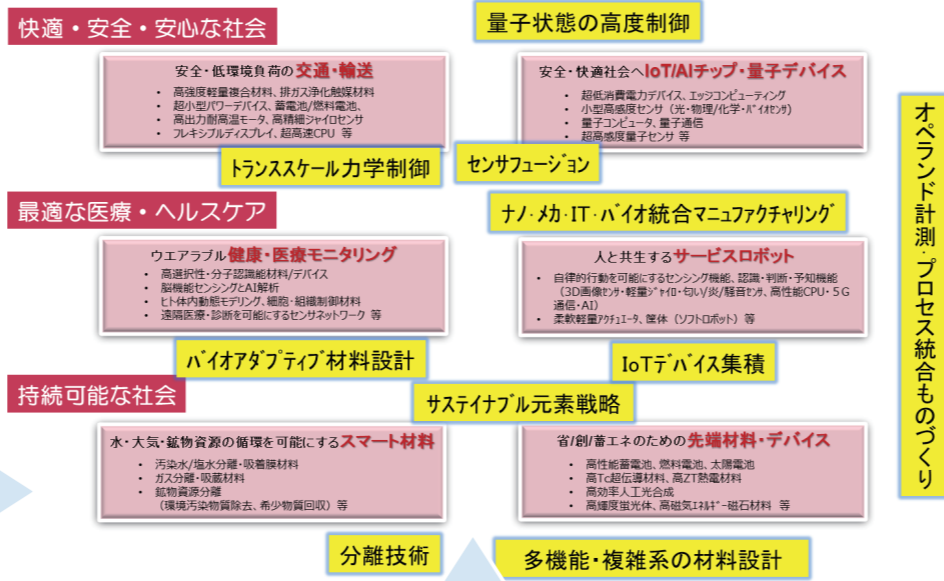
科学技術の潮流・変遷



ナノテクノロジー・材料分野（2019年）

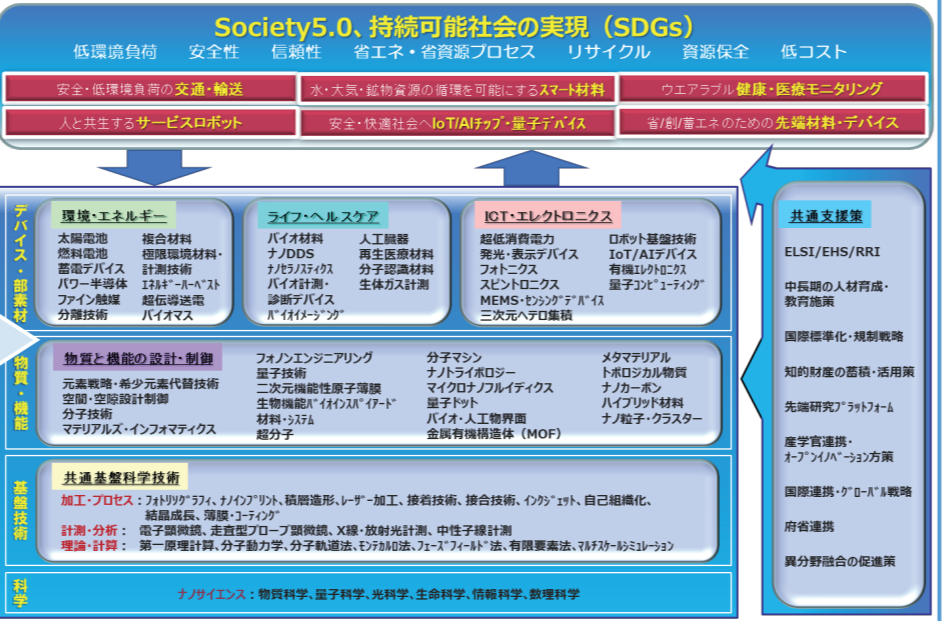
JST研究開発戦略センター
ナノテクノロジー・材料ユニット

6つの社会ニーズと10のグランドチャレンジ



オランダ計測・プロセス統合ものづくり

ナノテクノロジー・材料分野 研究開発俯瞰図2019



主要国におけるナノテク・材料科学技術の基本政策・国家戦略動向

- 米国では国家ナノテクノロジーイニシアティブを4代の政権に渡って継続。AI/IT/ロボティクスや量子の新たなイニシアティブと接続
- 欧州Horizon2020は、ナノテク・先端材料をKETs (key enabling technologies) として位置づけ。Graphene Flagship、Human Brain Projectに続きQuantum Flagshipを開始。

日本の位置づけ

- 元素戦略、分子技術、蓄電池部材、電子材料、パワー半導体、複合材料などの物質創製・材料設計技術に長年の技術蓄積にもとづく強み
- そこで用いられる計測評価・分析・品質管理にも強み。これらが活きるかたちで省エネ・低環境負荷技術に優位性

快適・安全・安心な社会

- 社会ニーズ ① 安全・低環境負荷の交通・輸送 事故や渋滞を激減し、安全で快適な移動空間としての自動車や、燃料効率が高くCO2排出量が抑制された航空機などの交通・輸送機器の実現
- ② 安全・快適社会実現に向けたIoT/AIチップ・量子デバイス ビッグデータを高速かつ低消費電力で処理した結果生まれる新たな情報をベースに人間が安全・快適に暮らす豊かな社会を実現するための材料・デバイス

グランドチャレンジ

- i 量子状態の高度制御 電子、光子、スピン、フォノンなどの個々の量子状態およびそれらの相互作用がもたらす物理現象を理解し、さらにトポロジーといった新しい概念を導入することによる新しい量子状態の実現と、これらの高度制御
- ii トランススケール力学制御 航空機・自動車におけるCO2排出量の大幅削減、摩擦などによるエネルギー損失を大幅低減した機械機器、社会インフラ材料の超長寿命化や修復など、持続可能な社会実現に貢献する材料・デバイスの創製

最適な医療・ヘルスケア

- 社会ニーズ ③ ウェアラブル健康・医療モニタリング 疾患の早期診断や健康状態・生体情報のモニタリングを実現するウェアラブル（もしくはインプラント型）な健康・医療モニタリング技術の構築
- ④ 人と共生するサービスロボット 負担の少ない高齢者介護、持続可能な社会インフラ保守管理、災害やテロに対するセキュリティ強化などの課題の解決のため、人間が苦手な作業の代行や人間の作業能力を補強・拡張するなど、人と共生するサービスロボットの活用

グランドチャレンジ

- iv ナノ・メカ・IT・バイオ統合マニュファクチャリング 生物が実現する巧妙な構造や機能、低エネルギーで実現する動作や物質生産に学び、人工的な材料・デバイスの生産システムとして再構築
- v バイオアダプティブ材料設計 生体環境に適合した材料の探索という従来の概念から脱却し、生体との相互作用を積極的に活用して能動的に制御する機能をもつ材料の設計・創製

持続可能な社会

- 社会ニーズ ⑤ 水・大気・鉱物資源の循環を可能にするスマート材料 世界の人口増による著しい水不足や海洋汚染、CO2・大気汚染問題、および世界のハイテク産業を支える希少元素をはじめとする鉱物資源枯渇の危機や偏在性から生ずる価格高騰のリスクを解決するために必要な材料・デバイス
- ⑥ 省/創/蓄エネルギーのための先端材料・デバイス 再生可能エネルギーを持続かつ効率的に導入するために必要な省/創/蓄エネルギー用材料・デバイス

グランドチャレンジ

- vii サステイナブル元素戦略 グローバルな課題解決に資する魅力的な機能を持った材料・デバイスの継続的創出のため、新機能の追求と元素・物質循環に代表されるサステナビリティを重視した材料創製を可能にする強固な材料開発基盤の構築
- viii 分離技術 化学プロセス分離工程の省エネ化、環境汚染物質除去、来たる水素社会に向けたガス分離・吸蔵、鉱物資源分離、医療など広範な分野において分離・吸着機能材料・システムの研究開発
- ix 多機能・複雑系の材料設計 様々な機能材料のさらなる高性能化には結晶構造の多元素化や複合化が避けられず多様な結晶構造が可能になるなか、絨毯爆撃的な材料設計から脱却し、進展が著しいシミュレーションやデータ科学、さらにはオランダ計測を駆使した精緻な材料設計、プロセス設計手法の確立

上記すべての基盤となる技術

x オランダ計測・プロセス統合ものづくり

反応プロセス中の物質・材料もしくは実動作下の材料・デバイスを対象にオランダ計測を実行し、得られた計測結果に対してデータ科学的手法を駆使して高速・高効率なデータ解析を実現

2.5 ナノテクノロジー・材料分野

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

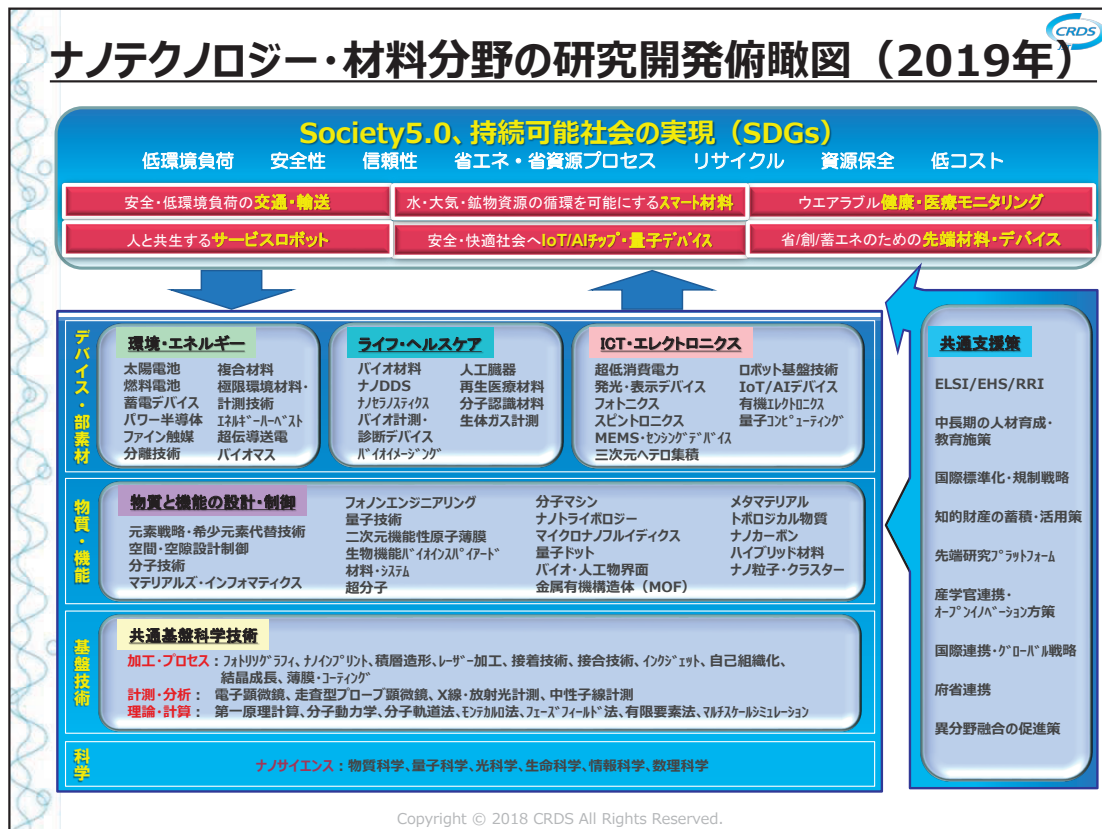


図1 ナノテクノロジー・材料分野の研究開発俯瞰図（2019年）

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

国際比較表

<環境・エネルギー応用>

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

<ライフ・ヘルスケア応用>

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

<ICT・エレクトロニクス応用>

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

<物質と機能の設計・制御>

国	フェーズ	空間 制御 設計		分子 技術		元素戦略・希少 元素代替技術		マテリアルズ・ インフォマティ クス		フォノンエン ジニアリング		量子技 術		二次元機能 原子薄 膜		生物機能イ ンス ・システム 材料	
		現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	基礎	◎	→	◎	↗	◎	→	○	↗	◎	↗	○	→	○	↗	◎	↗
	応用・ 開発	○	↗	◎	→	◎	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	→	○	↗
米国	基礎	◎	↗	◎	↘	○	↗	◎	↗	◎	↘	○	↗	◎	↗	◎	↗
	応用・ 開発	◎	↗	◎	↗	○	↗	○	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→
欧州	基礎	◎	↗	◎	→	○	↗	○	↗	○	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	応用・ 開発	◎	→	○	→	○	↗	○	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→
中国	基礎	◎	↗	○	↗	○	→	◎	↗	◎	↗	○	↗	○	↗	◎	↗
	応用・ 開発	◎	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	◎	→
韓国	基礎	○	→	△	→	△	→	○	↗	○	→	×	→	○	→	○	→
	応用・ 開発	△	→	○	→	×	→	×	→	○	↗	△	→	◎	↗	△	→

< 共通基盤科学技術 >

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

< 共通支援策 >

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

研究開発の俯瞰報告書 概要

ライフサイエンス・臨床医学分野（2019年）

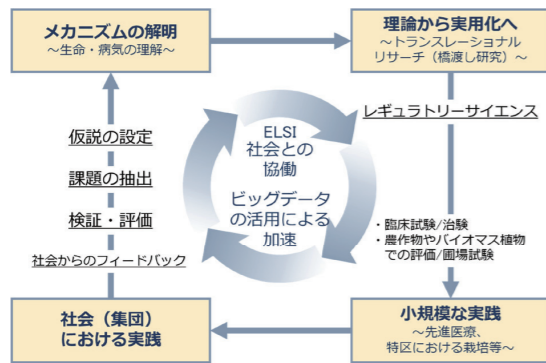
社会・経済動向（期待・要請）

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

日本の課題

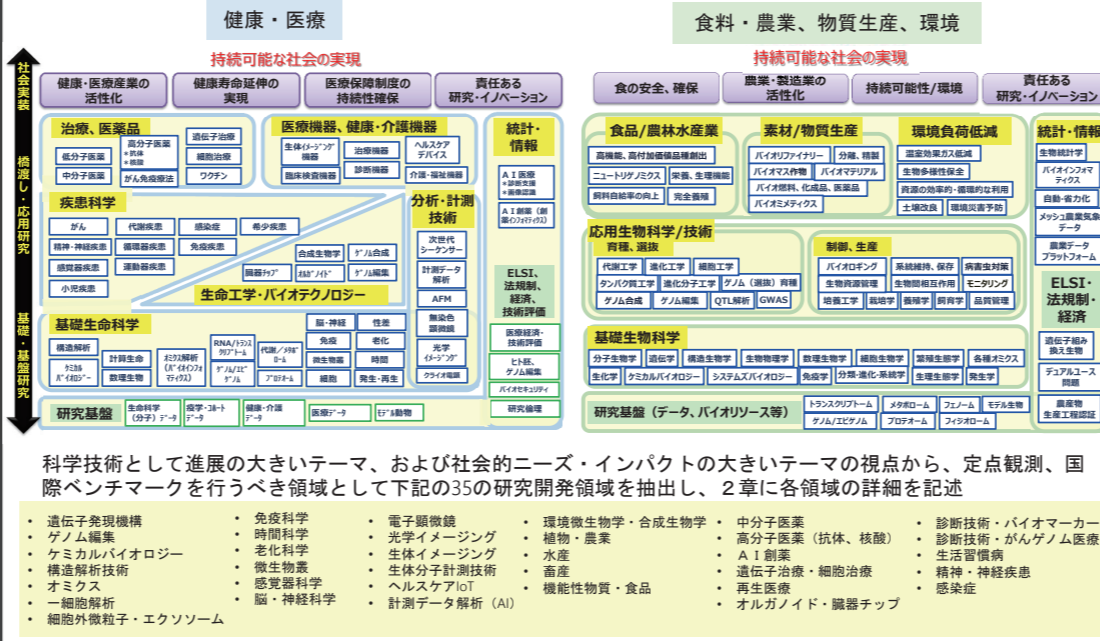
- 少子高齢社会（労働人口減）
- 医療費の高騰（国の財政問題）
- 人口増加や気候変動による食料問題
- 産業構造の変化
- 情報技術・社会の加速度的進展

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



ライフサイエンス、健康・医療、食料・農業、物質生産等の研究開発の俯瞰図

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



ライフサイエンスの研究スタイルの変化

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

日本の研究開発推進体制の課題と方策

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

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

世界の研究開発政策の潮流

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

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

技術トレンド 近2~3年の大きな技術・研究の変化、進展

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

第三・四世代DNAシーケンサ 2014 1000xゲノム達成後もより短い時間で連続的に数千塩基の読み取りができる様々な技術が進展 生命科学研究から臨床や民生利用へ展開 これまでの機器は単光を積み重ねる方式であったが、英Oxford Nanopore Technologies社が製品化した電気信号を検出する方式のMinIONは外付けHDD程度の大きさを実現 生命科学・創薬・医療のあり方を大きく変える技術として国内外の産・学で注目	ゲノム編集技術 2013 CRISPR/Cas9システムが登場、圧倒的な簡便さ、自由度の高さから、幅広い研究者層へ普及 生命科学、医療、食料 生命科学・医療技術開発を大きく変える技術として国内外の産・学で注目 2016年中国でヒト胚への臨床応用が開始 食料に向けて、ゲノム編集活用新品種（作物・動物）の開発が盛んに ELSIの観点からの検討も必須（デザイナーベビー等）	クライオ電子顕微鏡（単粒子解析法） 2012 X線構造解析では結晶化が必要だが、本技術では結晶化が不要 2017年ノーベル化学賞 計測装置（COMOSセンサ）と画像処理技術の高度化で、近年顕著な成果 生命科学・創薬のあり方を大きく変える技術として国内外の産・学で注目
一細胞オミクス解析技術 2010 DNAおよびRNA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まま万単位単位の細胞を一度に解析する技術など新しい技術が急速に進展。Human Cell Atlasにつながる。	人工知能技術 2012 ディープラーニングなどの第三世代人工知能技術 ゲノムと疾患の相関、医療画像解析、創薬など医療への応用に加え、計測データの解析など広く活用されている。特に、レンズによる結像を行わず、非結像イメージング・コンピュータビジョンイメージング等がエマージング技術として注目 生命科学・創薬・医療のあり方を大きく変える技術として国内外の産・学で注目 データを蓄積・共有する仕組みの検討が必要	超解像顕微鏡技術 2010 光学顕微鏡の回折限界を越えた分解能での観察が可能な技術（200nm⇒20nm） 2014年ノーベル化学賞 生命をライブ（生きたまま）で可視化可能であるが、「形態を見る」技術だけでなく、今後さらに「動態も見る」ことが期待 日本をはじめ、技術開発が急速に進展。格子状シート顕微鏡は高精度な三次元画像撮像を実現
オルガノイド技術 Body on a Chip 2010 バイオプリンティング技術 人工的にin vitroで二重組織を作出する技術。ヒトに近い環境下で、生命現象の解明ツールや、創薬のテストツールとして期待 2008年笹井芳樹（理研）が大脳皮質オルガノイド報告 2013年、2015年に脳オルガノイド構築に成功 わが国が強みを持つPS技術の展開可能	遺伝子改変免疫細胞治療技術 2011 腫瘍免疫応答機構に打ち勝つための遺伝子操作が加えられた免疫細胞を用いた治療法 2011年慢性リンパ球白血病を対象として第2世代の抗CD19CAR-T療法が臨床試験で有効性を示す一歩発表 2017年米国FDAは、CD19標的CAR-T療法である「キミーリア」を、経口「Yescarta」を承認 次世代がん医療を担う技術として国内外の産・学で注目	光分子操作・制御技術 2011 特殊な薬品（抗体）と外部からの近赤外線を使い局所的にがん細胞を破壊する光免疫技術 2011年米国国立がん研究所（NCI）の小林久隆らの研究グループが発表（医療） 2015年米国でヒト臨床応用が開始。2018年日本でも国立がん研究センターで治療を開始 次世代がん医療技術として国内外の産学で注目 マイクログラフや中性子でも研究が進み、光遺伝学（オプトジェネティクス）も含め外部からの刺激による生体内分子制御技術、及びその応用研究

国際ベンチマーク（技術）から見た日本の位置づけ

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

今後の方向性

社会課題解決型、産業競争力強化型

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

サイエンスプロンティア型

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

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

2.6 ライフサイエンス・臨床医学分野

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

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

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

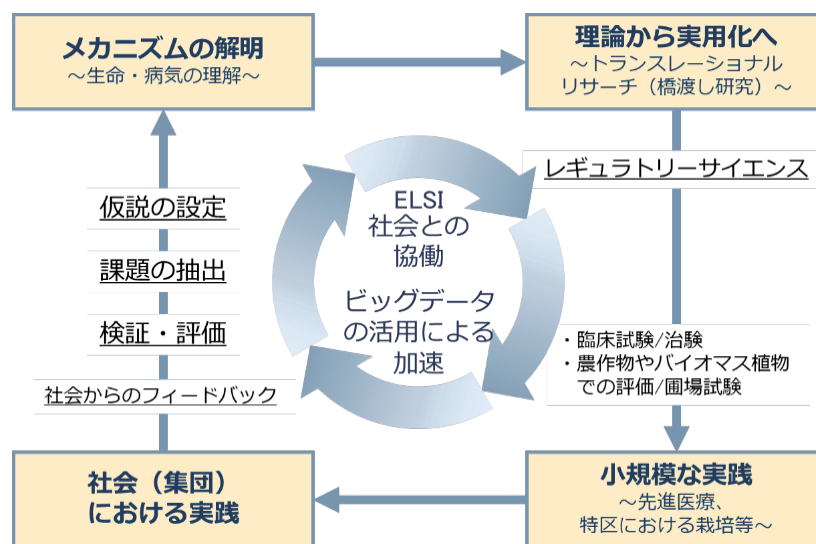


図1 俯瞰図（研究循環エコシステム）

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ユニティは以下を意識したプログラム・プロジェクトの立案を検討すべきである。

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

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

この5年の世界の政策の大きな潮流を以下のとおりまとめた。

健康・医療分野では、下記が多くの人に共通の優先項目となっている。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

社会課題解決型、産業競争力強化型

健康医療分野

世界の展望：個別化・層別化医療

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

食料・農業、物質生産分野

世界の展望：バイオエコノミー

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

サイエンスフロンティア型

世界の展望：多次元生命システムにおける時空間階層のブリッジング

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

図2 今後の研究の展望・方向性（日本）

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

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

国際比較表

< 基礎基盤科学技術（分子・細胞、組織） >

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

< 基礎基盤科学技術（分析・計測技術） >

		電子顕微鏡		イメージング 光学		イメージング 生体		生体分子計測		ヘルスクエアロリ		計測データ解析 (AI)	
		現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向	現状	動向
日本	基礎	○	→	◎	→	◎	\	△	→	○	→	○	/
	応用	○	→	○	→	○	→	○	→	○	/	△	→
米国	基礎	◎	/	◎	/	◎	→	◎	/	◎	/	◎	/
	応用	○	/	○	/	◎	→	◎	/	◎	/	◎	/
欧州	基礎	◎	/	◎	→	◎	→	◎	/	◎	→	○	/
	応用	○	/	◎	→	◎	→	◎	/	◎	→	○	/
中国	基礎	◎	→	○	/	○	/	○	/	○	/	◎	/
	応用	△	→	△	/	○	/	○	/	○	/	◎	/
韓国	基礎	△	→	△	/	○	→	○	→	◎	/	△	→
	応用	×	→	△	→	△	→	○	→	△	→	△	→

科学技術の俯瞰

<食料・農水産業、生物生産>

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

<健康・医療>

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