



 **TSC Foresight**

Innovation Outlook

Version 1.0 増補版

Executive Summary

2026年6月

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
イノベーション戦略センター

目次

目次

はじめに	1
3章 解決すべき社会課題と取り組むべき領域	2
3-1 サステナブルエネルギー分野	3
3-1-1 分野の俯瞰	3
3-1-2 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F): 長期エネルギー貯蔵による変動性再エネ最大活用	4
3-1-3 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例	6
3-2 環境・化学分野	8
3-2-1 分野の俯瞰	8
[1]サーキュラーエコノミーの実現のためのリサイクル技術	8
3-2-2[1] 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F): レアメタルやレアアースなどの重要元素のリサイクル	8
3-2-3[1] 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例	10
[2]大気等からのCO ₂ 除去のためのネガティブエミッション技術	11
3-2-2[2] 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F): ネガティブエミッション技術/海洋CDRの工業的技術	11
3-2-3[2] 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例	13
3-3 アグリ・フードテック分野	14
3-3-1 分野の俯瞰	14
3-3-2 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F): 持続可能農業に向けた微生物活用	15
3-3-3 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例	17
3-4 デジタル分野	19
3-4-1 分野の俯瞰	19
3-4-2 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F): 省電力・高速情報処理(原子層エレクトロニクス・フォトニクスコンピューティング) 自動化・省人化・デジタル化(量子センシング・海洋ロボティクス・デジタル感性)	20
3-4-3 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例	23
3-6 バイオエコノミー分野	28
3-6-1 分野の俯瞰	28
3-6-2 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F): 高度センシングによる先制ヘルスケア(精密栄養と環境防疫を基軸とした行動変容モデル構築)	29
3-6-3 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例	31
3-7 新設定分野	34
[1]ブレインテック・ニューロテック	34
3-7-1[1] ブレインテック・ニューロテックとは	34
3-7-2[1] 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F): 脳・神経の機能回復・拡張や人機協働を実現するブレインテック・ニューロテック	35
3-7-3[1] 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例	38
[2]数理科学による産業革新	39
3-7-1[2] 数理科学とは	39
3-7-2[2] 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F): 幾何×情報に基づく産業基盤の高度化	39
3-7-3[2] 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例	43
おわりに	46

はじめに

NEDO イノベーション戦略センター(TSC:Technology and Innovation Strategy Center)は、2024 年度から、技術分野全体の俯瞰調査を基に社会課題の解決に向けて我が国が取り組むべきフロンティア領域等を特定する『Innovation Outlook』の策定を開始し、2025 年 7 月に Innovation Outlook Ver. 1.0(以下「Ver. 1.0」という。)を発行した。本稿はその増補版で、3 章「解決すべき社会課題と取り組むべき領域」について追加及び更新するものである。具体的には、Ver. 1.0 でまとめた Innovation Outlook の位置付け、及び目指すべき将来像を前提とし、継続的な俯瞰調査に基づき、Ver. 1.0 の 3 章で提案できていなかった取り組むべきフロンティア領域等を改めて特定・提案するものである。

増補版 3 章の冒頭部では TSC が所掌する分野全体で Ver. 1.0 で検討した内容に加えて増補版で検討した領域を含めて提示する。3 章 1～6 節では TSC の六つの技術分野ごと Ver. 1.0 での検討に対してさらに深掘りを進めることで抽出された新たなフロンティア領域等を特定する。また 7 節では、TSC の所掌する分野を横断するより広範な視点での調査分析結果に基づいて抽出された新たなフロンティア領域等を「新設定分野」と称して提示する。各節においては、分野の俯瞰を示したうえで、解決すべき社会課題(M)と社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向について述べ、社会課題の解決のために取り組むべきフロンティア領域等(F)を提示する。また、具体的手段のテーマ例(T)を例示する。

3章 解決すべき社会課題と取り組むべき領域

Innovation Outlook Ver.1.0 増補版においては、TSC の将来像レポート『イノベーションの先に目指すべき「豊かな未来」』¹(以下「豊かな未来レポート」という。)を起点として、社会像を実現するにあたっての解決すべき社会課題(M)とその解決のために取り組むべき領域を提供価値や機能の基準で抽出し、重要と思われるものをフロンティア領域等(F)として特定した。

社会課題(M)とその解決のために取り組むべき領域(F)、そのうちフロンティア領域等として提案するもの(Fのうち黄色のボックス)の俯瞰図を、図3に示す。なお、淡い黄色のボックスはInnovation Outlook Ver. 1.0で提案したFであり、増補版で提案するFと区別して示している。また、各ボックスの枠線の色が分野分類を示している。

これらの領域を実現するために取り組むべき具体的手段のテーマ例(T)については、以降の節で分野ごとに述べる。

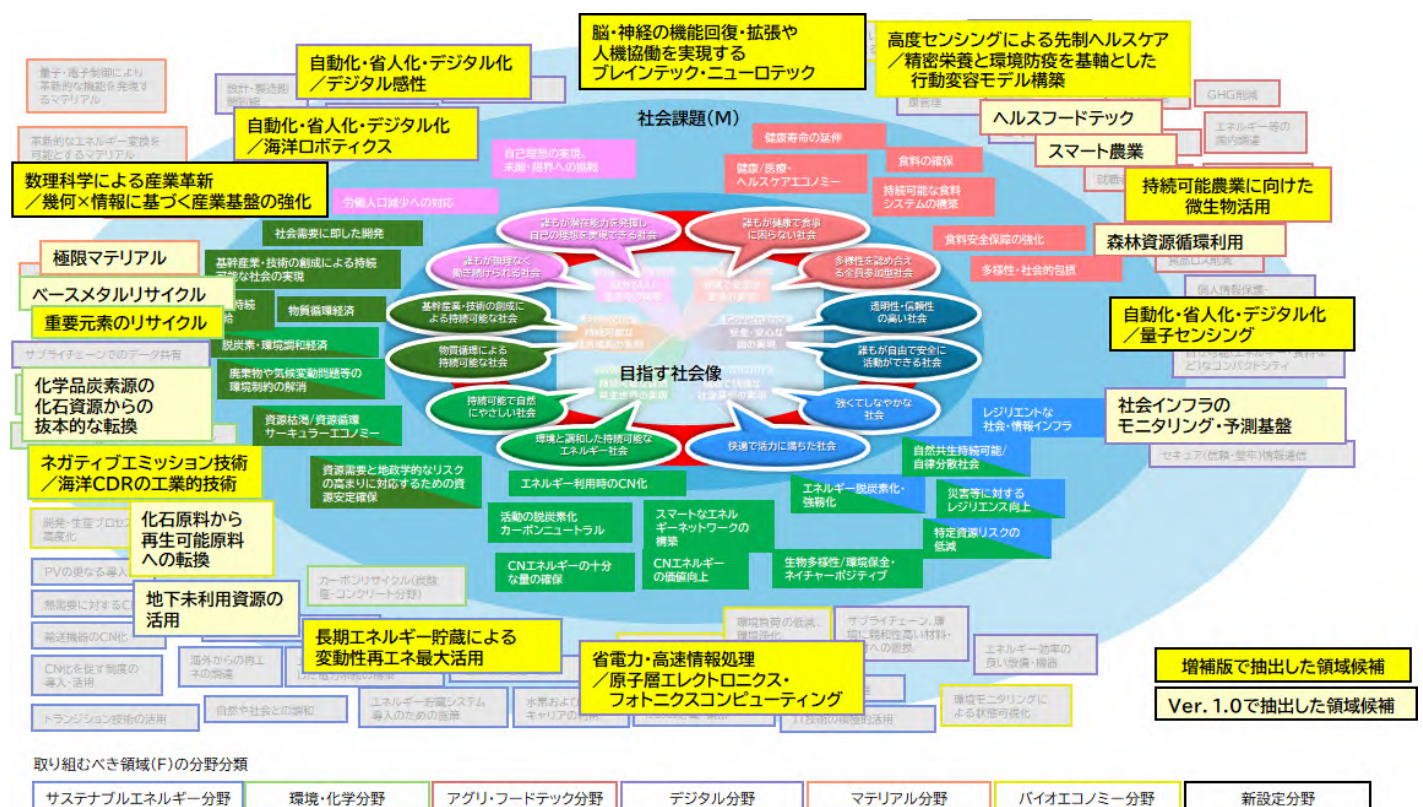


図3 MF 全体俯瞰図 (社会像 M→取り組むべき領域 F)

¹ 将来像レポート『イノベーションの先に目指すべき「豊かな未来」』(NEDO TSC、2021)
https://www.nedo.go.jp/library/future_2.html (2026年3月閲覧)

3-1 サステナブルエネルギー分野

3-1-1 分野の俯瞰

サステナブルエネルギー分野の俯瞰図を図 3-1-1 に示す。

エネルギーは自然界や周囲の環境に様々な形態で存在している。この一次エネルギーを我々が便利に利用するためには、目的に応じて電気、燃料もしくは熱といった二次エネルギーに転換し(『創る』)、それらを有効に『使う』必要がある。また、『創る』過程と『使う』過程の間には一般に需給ギャップがあるため、そのギャップを埋めるための『貯める』過程や、相互に調整する『整える』過程が必要となる。

2025年に公開の Innovation Outlook Ver. 1.0 では、四つの過程のうち『創る』『貯める』に焦点を絞って議論した。この増補版では『貯める』について改めて検討し、特に取り組むべき具体的手段を明確化する。

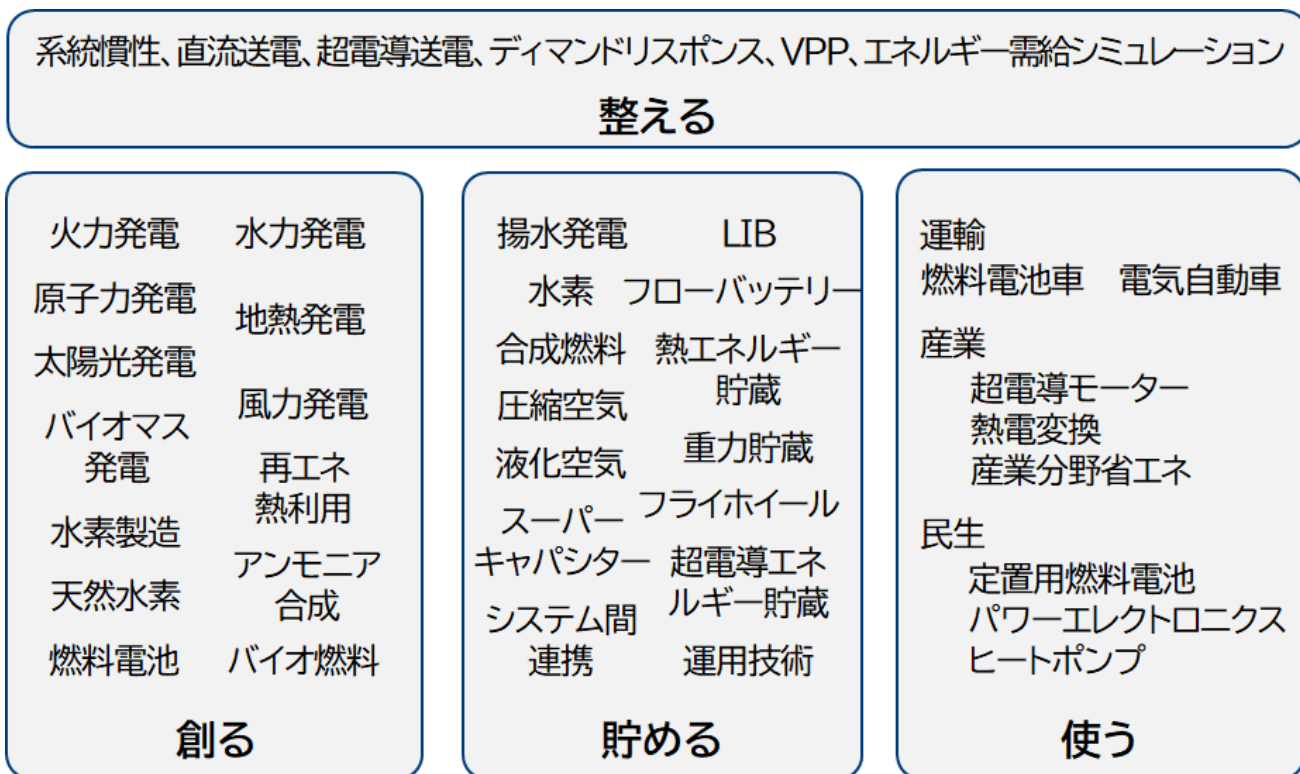


図 3-1-1 サステナブルエネルギー分野の全体俯瞰図及び技術例

3-1-2 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F): 長期エネルギー貯蔵による変動性再エネ最大活用

持続可能な社会の実現に向けて、日本においては、再生可能エネルギー(以下「再エネ」という。)やCCS等により脱炭素化した化石エネルギーといったカーボンニュートラル社会の実現に貢献するエネルギー(以下「カーボンニュートラル(CN)エネルギー」という。)を十分に確保し、一層の導入拡大を図ることが求められている。しかし、近年は太陽光発電の普及により、春や秋を中心に日中に電力が余り、卸電力価格が下がる一方で、朝・夕の電力が不足し、夏や冬を中心に需要によっては卸電力価格が高騰している。したがって、変動性再エネなどを供給過剰時には蓄え、不足時に取り出すことができるよう、『貯める』仕組みを高度化して社会実装することにより、『再エネの導入拡大・価値向上』を進めることが求められる。

くわえて、『災害等に対するレジリエンス向上・特定資源リスクの低減』が社会課題として重要になってきている。それらの解決のために取り組むべき主要な領域の全体像を図 3-1-2 に整理した。

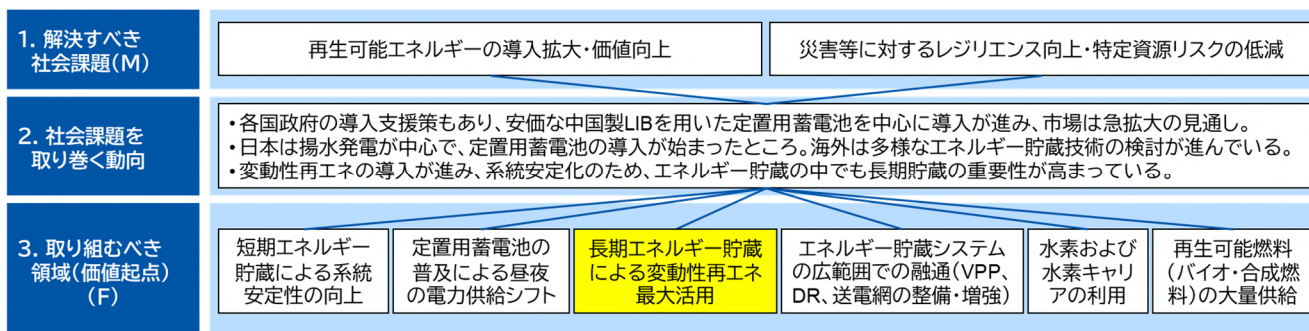


図 3-1-2 再エネの導入拡大とレジリエンス向上に関わる『貯める』領域の MF ロジックモデル

フロンティア領域を検討するにあたり、図 3-1-3 に『貯める』過程について、得られる出力とその出力が得られる時間(出力時間)でニーズを整理した。種々の設備の保護や運転維持のための小規模な非常用電源、病院等事業所規模の非常用電源、備蓄の他、変動性再エネの導入に伴い、日常的な出力調整、曇天無風といった変動性再エネにとっての長期的悪天候への備え、大規模災害に伴う送電途絶リスクへの備えといったニーズが生じる。化石燃料を使用せずこれらに応えるには蓄電池、水素や再生可能燃料が期待されるものの、出力時間が数時間を超えるところをカバーするには、コストをはじめ、未だ多くの課題が残されている。そこでこの領域を『長期エネルギー貯蔵による変動性再エネ最大活用』として、フロンティア領域等に提案する。

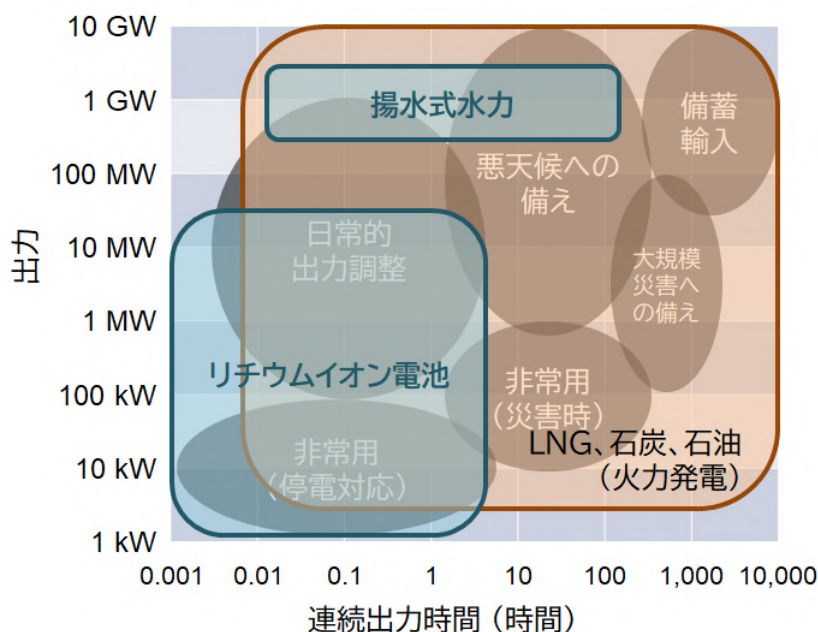


図 3-1-3 エネルギー貯蔵技術のフロンティア領域等

揚水、水素及び再生可能燃料を除くエネルギー貯蔵市場は、2024 年の 589 億ドルから 2033 年までに 2,048 億ドルに達するとの予測がある。ここからリチウムイオン電池(LIB)を除いた長期エネルギー貯蔵(LDES: Long Duration Energy Storage)に関しては、海外で革新的な技術として近年急速に注目が高まり、米国や欧州、中国を中心に政府機関やベンチャー企業が様々な研究開発を加速している。LDES の年平均成長率は容量(GWh)ベースで 28.0%に上り、エネルギー貯蔵全体に占める LDES の割合は 2025 年の 4.0%から 2035 年には 11.4%に拡大すると予想されている。

くわえて、日本は、高効率なヒートポンプ等の各種省エネルギー技術やガスタービン、ベアリング等の技術を有している。これらは LDES を構成する要素技術となることから、日本の強みとして活かせる可能性がある。

また、LDES は自然災害や国際情勢といった外的リスクに左右されにくい強靱なエネルギーシステムを構築する基盤技術となる。希少資源への依存が小さい国産技術の開発が進めば、地政学的リスクや市場変動への脆弱性を低減でき、経済安全保障の観点からも大きな意義を有する。

3-1-3 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例

本増補版では取り組むべき具体的手段を明確化するため、エネルギー貯蔵についてもう一段掘り下げた検討を行った。横軸に様々なエネルギー貯蔵手法を、縦軸にサプライチェーンの川上、すなわち素材・部材から、構成機器、製品・設備、さらには利用者に近い運用までをとり、エネルギー貯蔵に必要な技術をマッピングした(図 3-1-4)。日本に強みがある技術には下線を引いている。

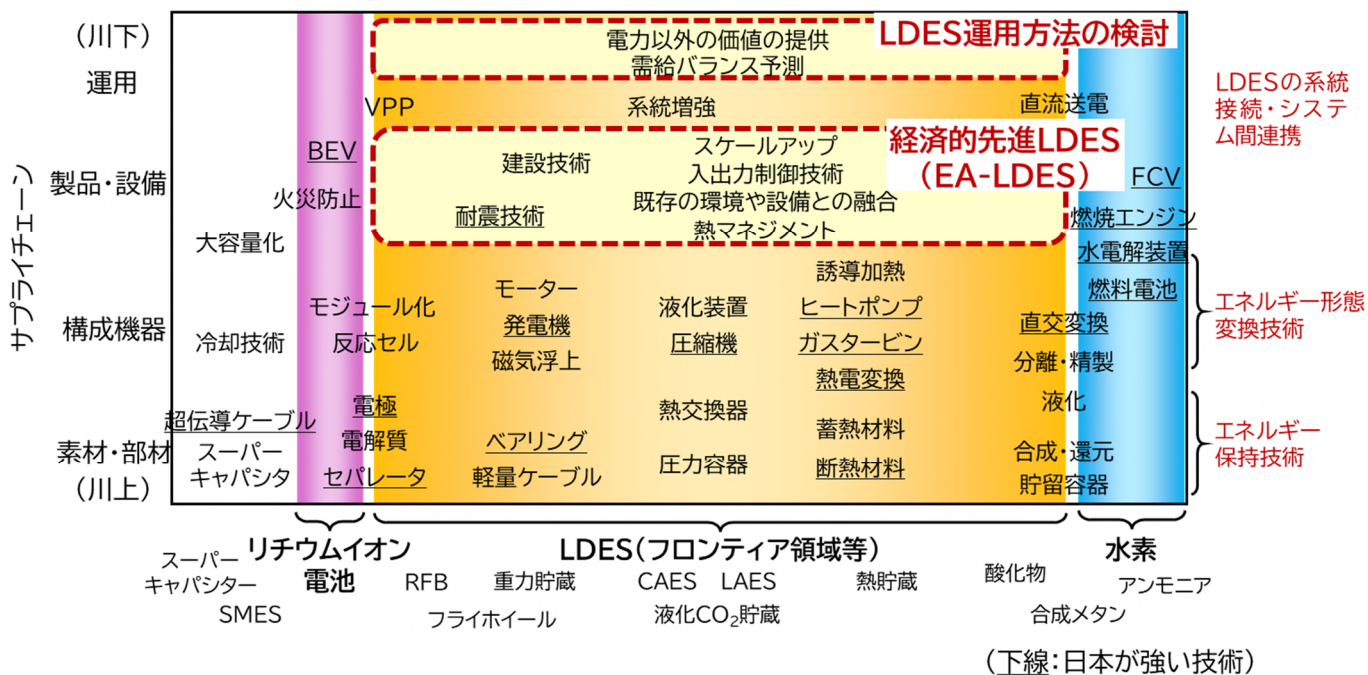


図 3-1-4 エネルギー貯蔵に必要な技術のマッピング

中央の橙色をつけた範囲が LDES に対応する。LDES に必要な要素技術には、日本企業が強い技術が至る所にある。その一方、システムレベルでの低コスト化の取組については限られている。欧米では 2020 年以降、LDES 分野で従来の電池の枠を超えた革新的なアイデアを採り入れるスタートアップが急増し、大規模実証も次々と進んでいる。例えば重力を使う「巨大クレーン蓄電」や、廃坑・油井をそのまま蓄電インフラに変える発想、CO₂ を液化して貯める「CO₂ バッテリー」、2400℃の超高温で熱を蓄える炭素ブロック、地層を人工的に加圧して揚水の代わりに使う地下貯蔵など、既存の発電・蓄電では考えられなかった仕組みが取り入れられ、有効性の検証が進んでいる。

この領域での取組が遅れば LDES の大半を海外からの輸入に頼らざるを得なくなり、長期的に見てエネルギー安全保障を揺るがしかねない。また、国内での導入を進めるためには日本の気候や送電網などの環境にあった運用方法の検討も必要となる。

以上を踏まえ、図 3-1-4 の赤破線で示す『経済的先進 LDES』と『LDES 運用方法の検討』を取り組むべき具体的手段と判断した(図 3-1-5)。

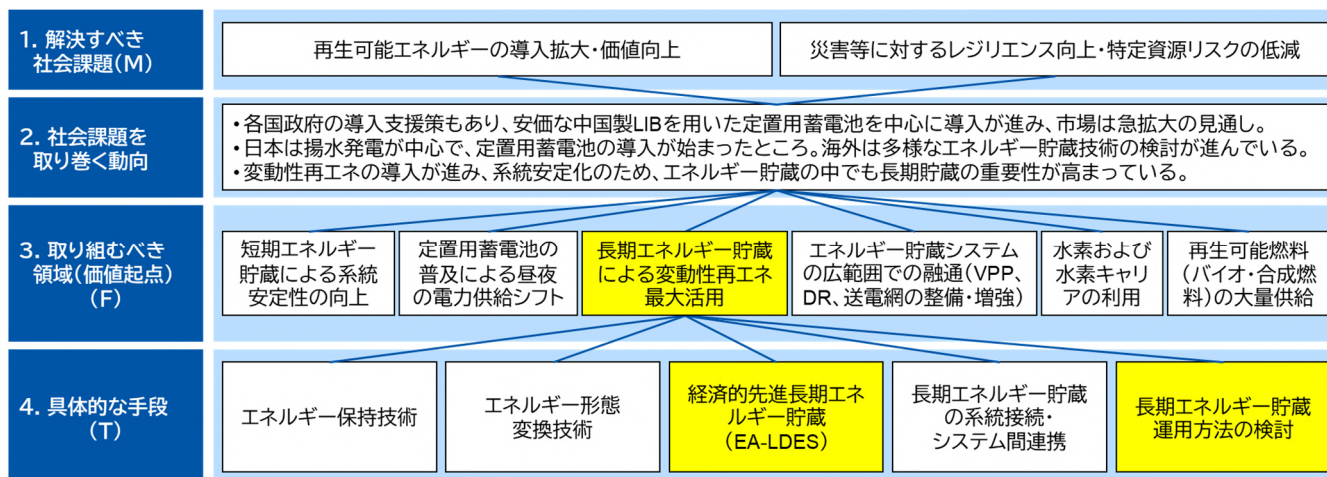


図 3-1-5 長期エネルギー貯蔵に関する MFT ロジックモデル

(1) 経済的先進 LDES

LDES の社会実装には優れた経済性が鍵となる。一方で機動性や設備サイズなどの要求は厳しくないことから、LIB とは異なる視点からの開発により低コスト化が可能だと期待される。例えば、スケールメリットが見込める技術、既存の施設の使用や廃棄物の再利用、安全性の高い設計(設備以外にかかる費用の削減)、電力以外の価値の利用(熱、慣性力など)、成熟した安価な技術の有効活用や組合せ(耐久性の向上や維持費の低減)、直接必要のない制約からの解放(重量あたりのエネルギー密度、耐振性、高速応答性)などが考えられる。これまで日本が蓄積してきた技術を最大限に活かしつつ、新たなアイデア・技術の実現可能性や有効性の実証などを通じて、コスト目標(例えば均等化貯蔵コスト(LCOS)で 10 円/kWh-cycle)を実現できる可能性の高い経済的先進 LDES システムを開発することが求められる。

(2) LDES 運用方法の検討

再エネ主力化が進むにつれ、数日～季節単位の需給ギャップへの対応や、火力発電の縮小による系統慣性・短絡電流の不足が課題となってくる。タービン発電機を備えた LDES や同期調相機とのハイブリッド運用により、系統強度を確保しつつ安定供給を支える必要があり、その効果を評価・検証する必要がある。また、稼働頻度が低く効率も限定的な LDES の投資回収には、AI をも活用した需給予測に基づく運用の効率化、新たなビジネスモデルの構築や Cap and Floor 制度のような収益下支えの市場設計が重要となる。これらを支えるための技術的エビデンスの提供にも取り組むことが考えられる。

3-2 環境・化学分野

3-2-1 分野の俯瞰

環境・化学の技術分野を図3-2-1に示す。サーキュラーエコノミーの実現、大気等からのCO₂除去は、持続可能な社会を実現するために重要である。本増補版では、[1]サーキュラーエコノミーの実現のためのリサイクル技術、及び[2]大気等からのCO₂除去のためのネガティブエミッション技術に焦点を絞って検討する。

サーキュラーエコノミーの実現	産業分野の化石資源消費量削減	環境影響物質の対策技術
リサイクル技術 ・ベースメタル(鉄、アルミ、銅) ・プラスチック (マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル) ・重要元素(レアメタル、レアアースなど) ・回収、解体、選別 ・易解体設計 ・情報連携 カーボンリサイクル技術 ・CO ₂ 分離回収 ・セメント、炭酸塩化 ・機能性化学品 ・燃料、化学品製造 (合成燃料、メタノール、メタネーション等) 未活用資源利用技術 ・バイオマス活用 ・廃水、排ガス、海水等からの資源回収 ・水資源 シェアリング等ビジネスモデル変革	原料転換技術 ・バイオマス燃料、SAF ・バイオマス由来化学品 ・水素還元製鉄 燃料転換技術 ・工業炉や加熱炉での水素・アンモニア利用 ・電熱化 熱利用高度化技術 ・産業用ヒートポンプ ・蓄熱技術 ・未利用熱利用 製造プロセス省エネ技術 ・革新的化学品製造プロセス	PFAS対応技術 ・代替 ・分離回収、無害化、リサイクル ・分析 その他 ・低GWP冷媒 ・SLCFs*1 ・窒素循環
		大気等からのCO ₂ 除去
		ネガティブエミッション技術 ・DACCS*2, BECCS*3 ・風化促進 ・DOC*4, 海洋アルカリ化 CO₂貯留 ・(CO ₂ -)EOR*5, 帯水層 ・CO ₂ ハイドレート

*1 SLCFs: Short-lived Climate Forcers, *2 DACCS: Direct Air Carbon Capture with Storage, *3 BECCS: Bioenergy with Carbon Capture and Storage
 *4 DOC: Direct Ocean Capture, *5 EOR: Enhanced Oil Recovery

図 3-2-1 環境・化学分野の活動分野俯瞰図

[1]サーキュラーエコノミーの実現のためのリサイクル技術

3-2-2[1] 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F): レアメタルやレアアースなどの重要元素のリサイクル

レアメタルやレアアースをはじめとする重要元素は、日常生活に密接した機器から産業用途に至るまで欠かすことのできない資源であり、さらにグリーントランスフォーメーション(GX)やデジタルトランスフォーメーション(DX)の推進にとっても不可欠である。一方で、これらの重要元素を含む鉱物は、埋蔵国の偏在や、経済合理性・環境規制・労働環境等の課題に起因する製錬品生産国の寡占化などにより、調達リスクが高まっている。このため、経済安全保障の観点から、『重要元素の持続可能な供給』は、我が国にとって喫緊の社会課題である。

『重要元素の持続可能な供給』(M)に向けた取り組むべき領域(F)を図 3-2-2 に整理した。『重要元素の持続可能な供給』に向けて取り組むべき領域としては、製錬品調達先の多角化、天然資源開発、製錬・加工技術強化、リサイクル、備蓄、使用量削減や代替素材開発などが挙げられる。このうち『リサイクル』は、廃製品や廃棄物等を国内資源として最大限に活用できることから、地政学的な影響を受けにくい資源調達手段である。また、天然資源からの生産と比べてGHG 排出削減や環境負荷低減への貢献が期待される。

以上を踏まえ、『レアメタルやレアアースなどの重要元素のリサイクル』を、我が国にとって取り組むべきフロンティア領域等として提案する。

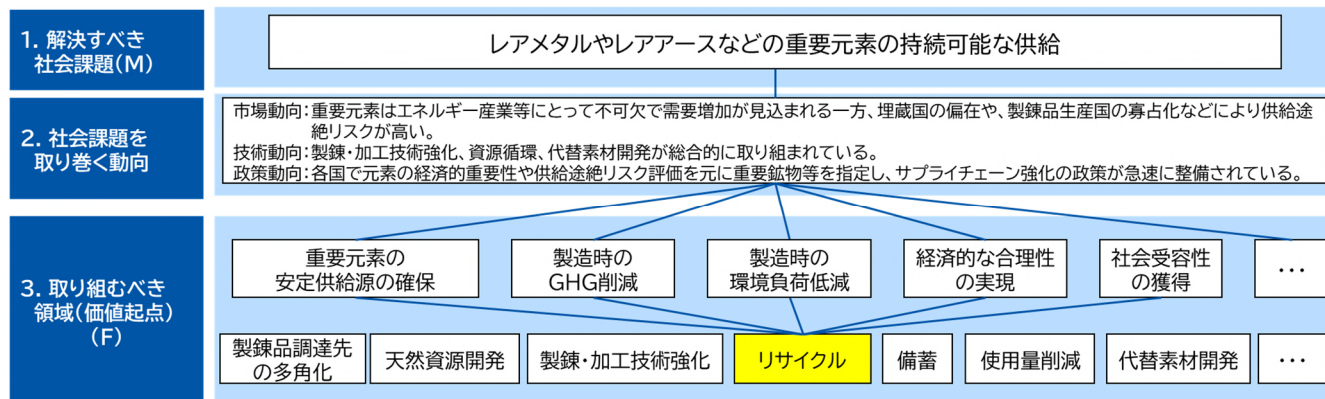


図 3-2-2 レアメタルやレアアースなどの重要元素のリサイクル分野の MF ロジックモデル

重要元素の再生材市場は今後大幅な拡大が見込まれており、IEA によると、2050 年には現在の約 5 倍の 2,000 億ドルに達すると予測されている²。しかし、リチウムイオン電池やレアアース磁石などでは一部でリサイクルが取り組まれつつあるが、リサイクル率は数%とまだ低く、半導体用途をはじめとする多くの重要元素では、高コスト等の理由によりリサイクルがほとんど行われていないのが現状であり(図 3-2-3)、経済合理性を持ったリサイクル技術は革新的である。

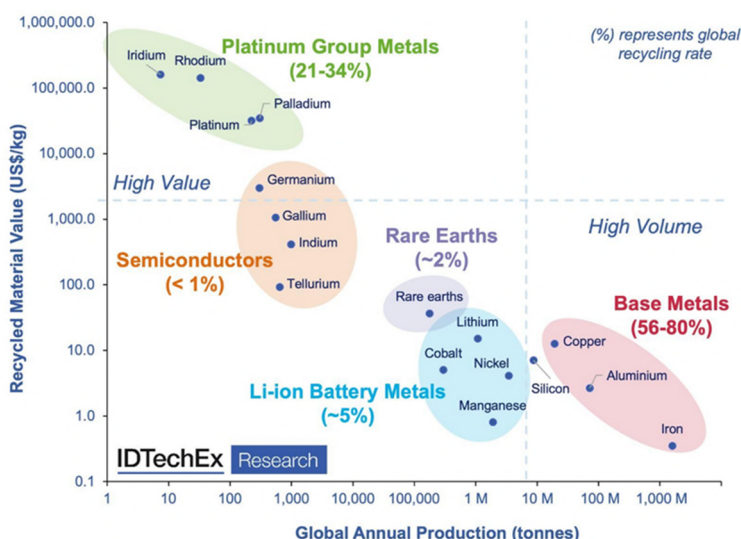


図 3-2-3 各元素のリサイクル率

出所: Critical Material Recovery 2026-2046: Technologies, Markets, Players(IDTechEx)

日本は、銅製錬を中心とした非鉄製錬ネットワークを活用した多種多様な重要元素を回収する技術や、社会に定着した資源回収の仕組みを有しており、これら日本の強みを活かしたリサイクル技術の発展が期待される。重要元素は、供給国の寡占や輸出規制等により価格変動が大きく、リサイクル事業の採算性が不安定になりやすいことが、リサイクルの進展を妨げる主要因となっている。したがって、鉱物価格の変動の影響を受けにくい持続可能なリサイクル技術や取組が求められる。さらに、リサイクルの拡大によって他国に依存しない自国内の供給源を確保することは、我が国の経済安全保障の強化に対し重要な意義を有する。

² Recycling of Critical Minerals (IEA, 2024)

3-2-3[1] 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例

重要元素は、多様な製品中に微量かつ複雑な形態で分散しているため、リサイクルプロセスが複雑化し、高コスト化の要因となっている。また、一部の工程では廃酸や廃液が多量に発生することから、環境負荷や処理コストの増大が問題となっている。

重要元素のリサイクルを拡大・推進するには、製品設計、破碎・選別・抽出などの高濃度化前処理、さらに精製・高純度化に至るまで、各プロセスにおいて革新的な技術開発が求められる。具体的な例を表 3-2-1 に示す。

表 3-2-1 重要元素のリサイクルにおける取り組むべき具体的手段の例

具体的な手段	技術例など
易リサイクル設計	<ul style="list-style-type: none"> 永久磁石のモジュール化、着脱可能設計 選択的に分解可能な接着剤の使用 廃製品に使用されている元素情報が取得可能な設計
廃製品から元素を抽出し高濃度化する前処理技術	<ul style="list-style-type: none"> 高電圧パルス破碎、超音波キャビテーション破碎による材料界面の選択的破壊 超臨界水、超臨界CO₂を用いた高回収率な金属抽出 廃製品中の元素情報を簡便に取得するAI解析技術や分析技術
低環境負荷・低コストな精製・高純度化技術	<ul style="list-style-type: none"> 深共晶溶媒、イオン液体などの高選択性抽出溶媒 吸着剤、イオン交換材、膜分離など、溶媒や酸の使用量が少ない抽出技術 バイオテクノロジーを活用した金属回収 マイクロ波加熱やプラズマ処理などの省エネルギー型乾式プロセス
元素の需要変動や供給ショックの影響を受けにくいレジリエントなリサイクル技術	<ul style="list-style-type: none"> 可能な限り精製プロセスを共有化し、運転条件の変更等で多様なリサイクル原料が処理できると共に、複数元素を柔軟に回収できるリサイクル技術
未利用資源からの元素回収技術	<ul style="list-style-type: none"> 廃水、下水、スラグ、海水などからの元素回収

廃製品中に微量かつ複雑に分散している重要元素を効率的に回収するには、精製・高純度化の前に、低エネルギー・低コストで元素を高濃度化する前処理技術が極めて重要である。また、精製プロセスを共有化し、運転条件の変更等で多様なリサイクル原料が処理できると共に複数元素を柔軟に回収できるようなリサイクル技術は、元素の需給変動や供給ショックの影響を受けにくい、経済合理性と資源安定供給を両立するレジリエントなリサイクルシステムとして有望である。

さらに、重要元素のリサイクルを促進するには、技術開発だけでなく制度面からの支援も不可欠である。回収インフラの整備、再生材利用に対するインセンティブ導入、公的な共用パイロット設備の整備など、多角的な施策により、重要元素のリサイクルの促進が期待される。

[2]大気等からの CO₂ 除去のためのネガティブエミッション技術

3-2-2[2] 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F): ネガティブエミッション技術/海洋 CDR の工業的技術

『持続可能な経済成長の実現』に向けて、CO₂ をはじめとする温室効果ガス(GHG)排出量の削減は喫緊の課題である。その解決のための取組としては、「使用するエネルギーの脱炭素化」、「最終エネルギー消費の削減」、「ネガティブエミッション技術の導入」、「原料転換等の非エネルギー起源の GHG 削減」が重要である。鉄鋼・化学・セメントといった産業は CO₂ 排出が避けられない産業であり、低炭素化に向けては素材や製造プロセス等における脱炭素化の推進に加えて、『ネガティブエミッション技術の導入』が経済合理性を伴うことが重要である。

CO₂ 除去技術である CDR は、大気からの CO₂ 吸収アプローチに基づき、自然ベースと、工業的アプローチの二つに大別できる。将来的な技術進展も見込んで技術を評価すると、工業的アプローチは CO₂ 除去の潜在的ポテンシャルが大きく、CO₂ 固定の恒久性、MRV (Measurement, Reporting, Verification)の観点で優位性を有する(図 3-2-4)。

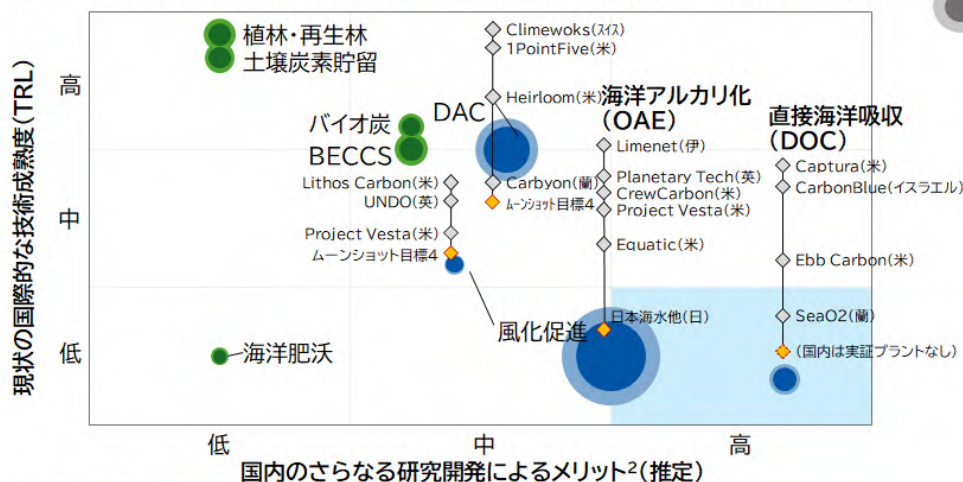
ネガティブエミッション技術		CO ₂ 除去 ポテンシャル	恒久性	MRV	コスト	環境リスク	回収CO ₂ の可用性	備考
自然ベース アプローチ	植林・再生林	△	△	△	○	△	×	成長期の吸収は速いが、伐採や火災などの長期的安定性低い
	土壌炭素貯留	△	△	△	○	○	×	低コストだが環境条件での変動が多く放出リスクも高い
	バイオ炭	△	○	○	○	○	×	長期の安定性高いが、供給の物流や原料確保に制約
	BECCS	△	◎	◎	△	△	×	長期の安定性高いが、バイオマス供給や土地・水資源との競合に課題
	海洋肥沃	△	△	△	△	△	×	CO ₂ 吸収量の定量が困難であり、生態系影響や国際法的規制の懸念も
工業的 アプローチ	直接空気回収(DAC)	○	◎	◎	△	○	○	MRV精度が高く再エネ利用で除去ポテンシャルも高いが、コスト低減は課題
	風化促進	○	○	△	△	△	×	岩石中の重金属の影響懸念や粉砕などのエネルギーコストとMRVが課題
	直接海洋吸収(DOC)	○	◎	○	△	○	○	恒久性とポテンシャルともに高いが、生態系影響やpH変化管理は課題
	海洋アルカリ化	○	◎	△	△	△	×	恒久性とポテンシャル高く、取水インフラと統合可。電力や副生物処理が課題

出所:以下の資料を基にNEDO イノベーション戦略センター作成
 ・IPCC Sixth Assessment Report "Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change" Table 12.6、および関連各章(植林・再生林/土壌炭素貯留/バイオ炭/BECCS 7.4節、海洋肥沃/OAE 12.3.1.3節、DAC 12.3.1.1節、風化促進 12.3.1.2節)
 ・NOAA "Strategy for NOAA Carbon Dioxide Removal Research", 2023 (植林・再生林、BECCS、海洋肥沃、DAC、DOC、OAE)
 ・CICE(現North X) "Catalyzing Carbon Dioxide Removal at Scale", 2024 (植林・再生林、土壌炭素貯留、バイオ炭、BECCS、海洋肥沃、DAC、風化促進、DOC、OAE)
 ・大気からCO₂を吸収するアプローチに基づき、工業的アプローチと自然ベースアプローチに分類

図 3-2-4 ネガティブエミッション技術における工業的 CDR の可能性

なかでも、直接海洋吸収(DOC:Direct Ocean Capture)は国内の材料技術や膜技術の優位性を活かせる領域と考えられる。また、海洋アルカリ化(OAE:Ocean Alkalinization Enhancement)は CO₂ 除去ポテンシャルが高く、国際的な注目が高まっている。DOC や OAE といった海洋 CDR の工業的技術は、研究開発による発展可能性が高く、CO₂ 除去ポテンシャルの高い技術の中で国内での開発が十分に行われていない技術である(図 3-2-5)。海水中には大気中の約 100 倍の CO₂ が存在しているため、大気からの回収より低コストで CO₂ 除去を実現することが期待される。

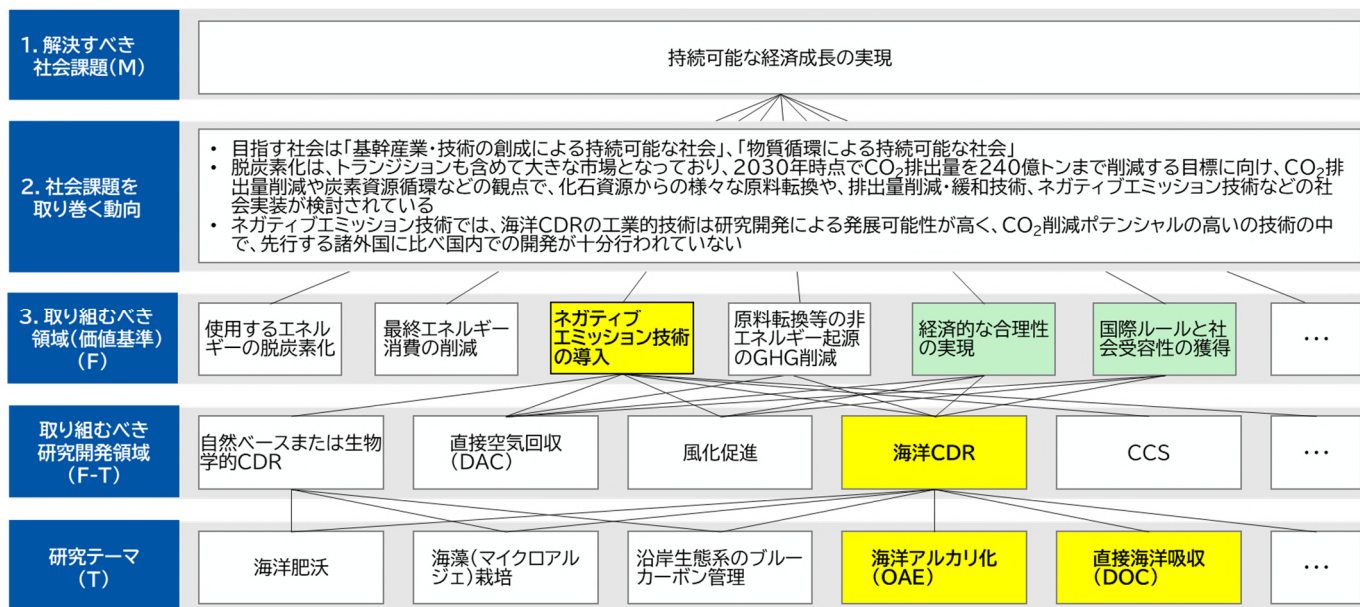
CO₂回収・貯留技術の除去ポテンシャル[GtCO₂/年]、技術成熟度および投資効果¹
IPCC-AR6 第3作業部会の報告(2022)に基づく値に、個別パイロットの最新データを追記し一部調整



- 自然ベースアプローチ³
 - 工業的アプローチ³
 - ◇ 海外実証PJ名(国)
 - ◇ 国内実証PJ
- DOC: 国内の材料技術や膜技術の優位性を生かせる領域であるが、国内での開発が十分に行われておらず、研究開発投資効果が見込める
 - OAE: CO₂除去のポテンシャルが高く、技術開発が期待される領域。海外懸賞金事業でも国際的な注目が高まる
- ※DAC、風化促進については既にムーンスヨット型研究開発事業(目標4: 2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現)について既に推進中

図 3-2-5 CO₂回収・貯留技術の除去ポテンシャル、技術成熟度及び国内の更なる研究開発によるメリット

以上を踏まえ、本増補版では『ネガティブエミッション技術/海洋 CDR の工業的技術』を取り組むべきフロンティア領域等として提案する(図 3-2-6)。



3-2-3[2] 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例

海洋 CDR の工業的技術の研究開発要素を図 3-2-7 に示す。

海洋 CDR の工業的技術の低コスト化に向け、投入エネルギーの削減、装置コスト削減、耐久性改善、消耗品コスト削減が重要である。電気透析や電気分解によって生成した酸を用いて海中の CO₂ を放出させる技術の低コスト化を目指したシステム改善が期待される。また、これらの電気化学的手法を用いずに海水から直接 CO₂ を回収する材料や膜の開発も期待される。

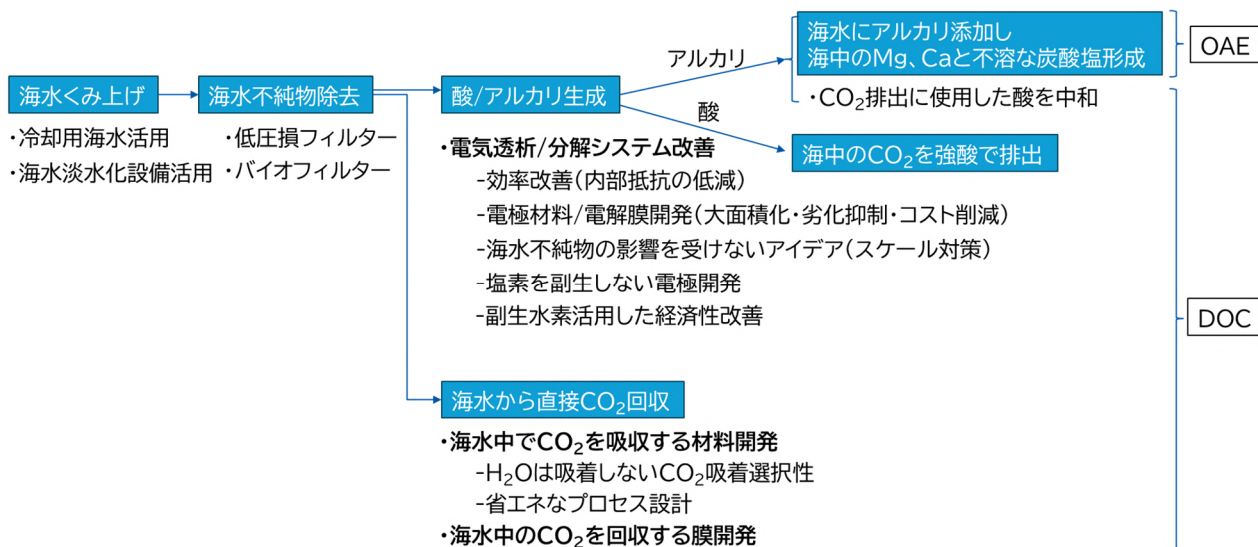


図 3-2-7 海洋 CDR の工業的技術の研究開発要素(例)

3-3 アグリ・フードテック分野

3-3-1 分野の俯瞰

アグリ・フードテック分野の俯瞰を図 3-3-1 に示す。

世界の食料市場では、人口増加に伴い食料需要量も大きく増加する見通しであり、飢餓人口の増加やプロテインクライシスにつながる懸念がある。気候変動や国際情勢などの外部要因も加わり、世界的に食料安全保障の問題が顕在化している。

日本においては、農業生産を支える基幹的農業従事者が今後 20 年間で 4 分の 1 にまで減少すると推計されている。くわえて、DX の遅れや、肥料などの農業生産資材やエネルギー資源の海外依存度が高いことから、農業生産の基盤が脆弱な状況にある。また、農林水産業は、施設園芸や漁船において大量の重油を消費するなどにより温室効果ガス(GHG)の排出源となっているほか、化学農薬や化学肥料の過剰使用により環境に大きな負荷を与えている。

このような状況を受けて、農業生産の基盤を強固にし国内農業の持続性を高めるためには、環境負荷の低減も含めた多角的な検討が求められる。

以上を踏まえ、Innovation Outlook Ver. 1.0 増補版(以下「増補版」という。)では、環境負荷の低減に関する近年の動向を整理し、新たなフロンティア領域等の検討を行った。

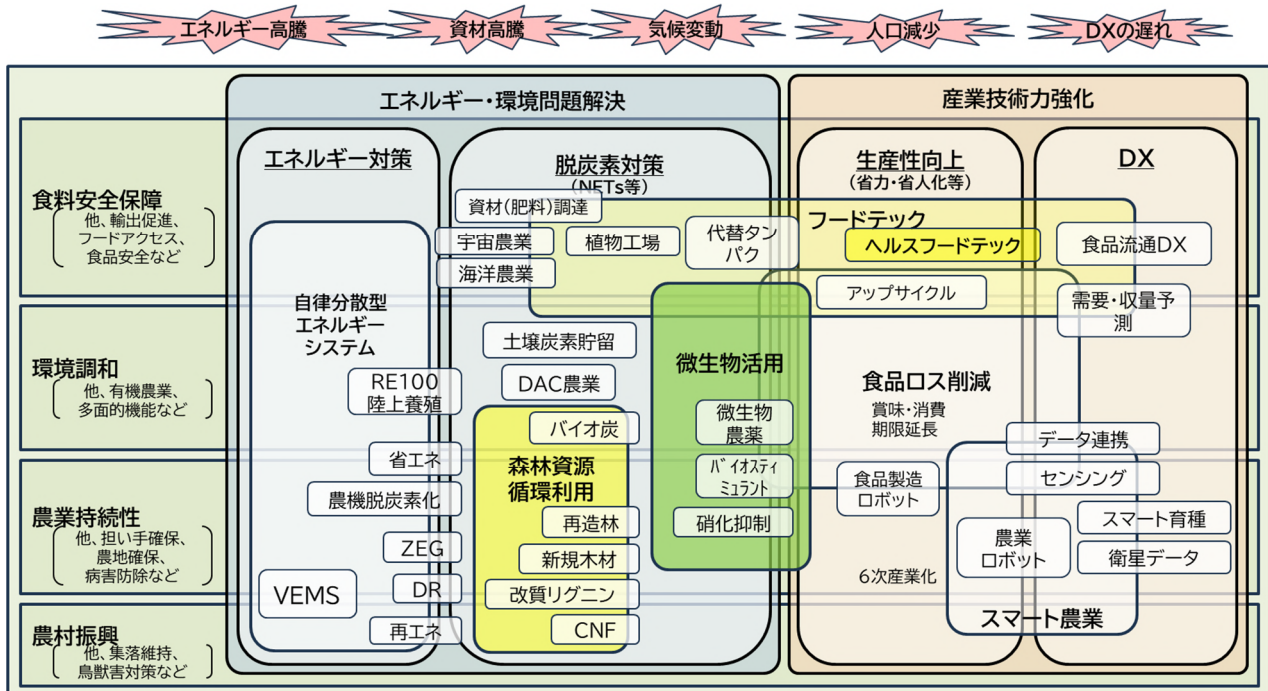


図 3-3-1 アグリ・フードテック分野の俯瞰

(注)NEDO のミッションと食料・農業・農村基本法の基本理念を踏まえた縦串と横串の視点から要素技術・技術領域、システムを俯瞰・整理。

3-3-2 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F): 持続可能農業に向けた微生物活用

Innovation Outlook Ver. 1.0(以下「Ver. 1.0」という。)では、『持続可能な食料システムの構築』と『食料安全保障の強化』を解決すべき社会課題(M)と設定し、取り組むべき領域(F)を「環境整備」、「量の確保」、「質の確保」の三つのグループに分類した。増補版では、そのうち「環境整備」のグループに含まれる「環境負荷低減」を中心に、近年の市場・技術・政策動向を探った。

世界的に環境再生型農業や有機農業などの環境と調和した持続可能な農業の取組が拡大し、有機食品の世界市場規模は 2034 年に約 6,700 億ドルと推計されている³。環境と調和した持続可能な農業においては、土づくりが重要であり、微生物の働きが鍵となる。また、化学肥料や化学農薬の代替として、環境負荷低減や、植物成長促進、病害虫防除、環境耐性向上等の効果も期待される微生物資材が注目されており、微生物資材を含む農業用バイオ資材の世界市場規模は 2030 年に約 350 億ドルと推計されている⁴。

微生物については、細菌や菌類など多様な生物が存在し、その種の数も 1,000 万を超えると予測されているが、単離できているのは1%に過ぎないと言われている⁵。微生物は単離・培養が困難であること、複数の微生物が共生や競合、抑制などで相互に影響を及ぼしていることから、微生物の機能解明が進んでいなかった。しかしながら、近年、微生物のスクリーニング技術や、メタゲノム(遺伝情報)やメタボローム(代謝物)などのビッグデータのマルチオミクス解析と AI の活用、根圏における元素動態の解明等の進展により、微生物の探索・機能解明や、微生物-植物間の相互作用の解明が進んできている。日本では、微小な液滴(マイクロドロプレット)に微生物を封入し有用微生物のスクリーニングを行う技術などの研究が進み、日本の強みとして期待される。また、日本は、長年にわたって培ってきた食文化を背景とした発酵技術(微生物利用技術など)に強みを有する⁶。

また、日本では、『みどりの食料システム戦略』⁷において、化学肥料や化学農薬の使用低減、これらにつながるバイオスティミュラント(微生物資材を含む)の活用技術の開発等が言及され、2025 年にバイオスティミュラントの表示等に関するガイドライン⁸が策定された。EU では、2022 年に新肥料法にバイオスティミュラントが位置付けられ、2025 年 12 月に施行された『土壌モニタリング法』(Soil Monitoring Law)において、土壌の回復度や炭素貯留の向上と

³ 有機食品市場(FORTUNE BUSINESS INSIGHTS)

<https://www.fortunebusinessinsights.com/jp/%E6%A5%AD%E7%95%8C-%E3%83%AC%E3%83%9D%E3%83%BC%E3%83%88/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%82%AC%E3%83%8B%E3%83%83%E3%82%AF%E9%A3%9F%E5%93%81%E5%B8%82%E5%A0%B4-101470>(2026 年 3 月閲覧)

⁴ Agricultural Biological Market (MarketsandMarkets, 2025)

<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/agricultural-biological-market-100393324.html> (2026 年 2 月閲覧)

⁵ 新規微生物の単離手法の開発 (産業技術総合研究所 バイオものづくり研究センター)

<https://bprc.aist.go.jp/s-katou/research/theme08> (2026 年 2 月閲覧)

⁶ 第 1 回フードテックワーキンググループ事務局説明資料(農林水産省、2025 年 12 月)

<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/attach/pdf/foodtech-13.pdf> (2026 年 2 月閲覧)

⁷ みどりの食料システム戦略 (農林水産省、2021)

<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/attach/pdf/index-10.pdf> (2026 年 2 月閲覧)

⁸ バイオスティミュラントの表示等に係るガイドライン(農林水産省)

<https://www.maff.go.jp/j/syuan/attach/pdf/biostimulant-28.pdf> (2026 年 3 月閲覧)

ともに、食料安全保障の強化を目的として、有機物、生物多様性などのモニタリングが求められている。生物多様性の観点からも微生物への注目は大きい。

さらに、経済安全保障推進法に基づく特定重要物資に肥料が指定されていることも注目すべき動向である。肥料の低減技術や代替技術などに、微生物を活用した技術開発が期待される。

これらの動向を踏まえ、農業の持続性の向上と微生物の活用に注目し、領域(F)の『環境整備』のグループにおいて、『持続可能農業に向けた微生物活用』を増補版のフロンティア領域等として提案する。

ロジックモデルで見た当該分野の俯瞰を図 3-3-2 に示す。

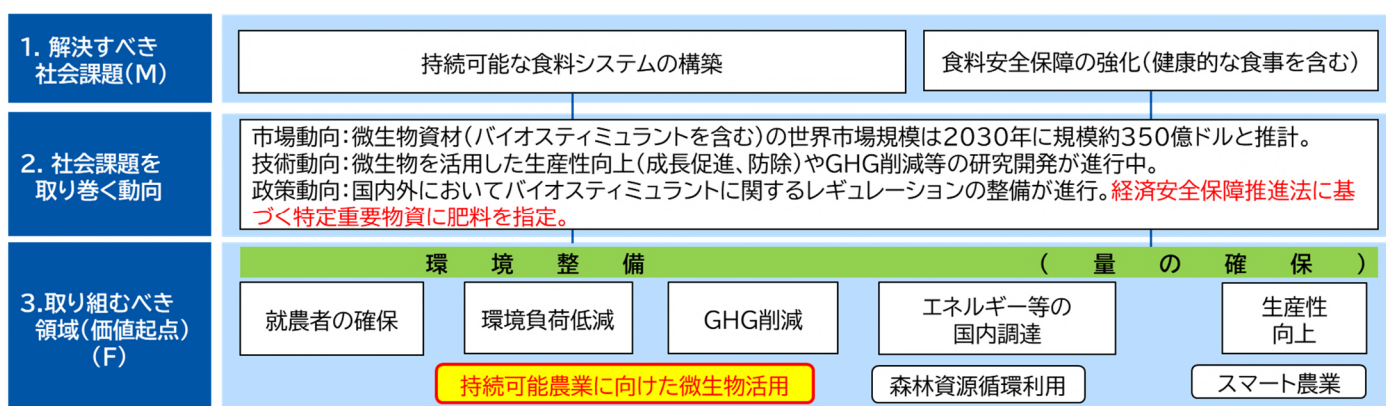


図 3-3-2 ロジックモデル(MF)で見た社会課題とフロンティア領域等

3-3-3 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例

3-3-2 で提案した『持続可能農業に向けた微生物活用』領域の実現のために、微生物・微生物叢の機能、微生物-植物間相互作用の解明とともに、環境負荷低減、植物成長促進、病害虫防除、環境耐性向上等の効果が期待される微生物資材の開発が期待される。以下、具体的な手段の事例を紹介する。

本領域における社会実装の課題として、実験室レベルで得られた成果が実ほ場に速やかに展開しにくいことが挙げられる。環境要因と合わせて分析・実証が必要であり、既取組との連携・補完が求められる。

(1) 微生物・微生物叢の機能解明

微生物や叢体である微生物叢の活用のためには、それらの機能や作用機序、植物との相互作用などを解明する必要がある。

早稲田大学では、植物と微生物の相互作用の解明とともに、有用微生物の取得、データベース(土壌微生物叢アトラス)の構築、土壌の生物的・化学的・物理的因子の網羅的アーカイブ化を進めている。得られた多階層的ビッグデータを基にモデル化・シミュレーションを行い、「環境制御による循環型協生農業プラットフォーム」の構築に取り組んでいる(図 3-3-3)。大豆と根粒菌を対象としているが、稲等の主要作物と微生物を対象としたデータ収集、プラットフォームの拡充が求められる⁹。

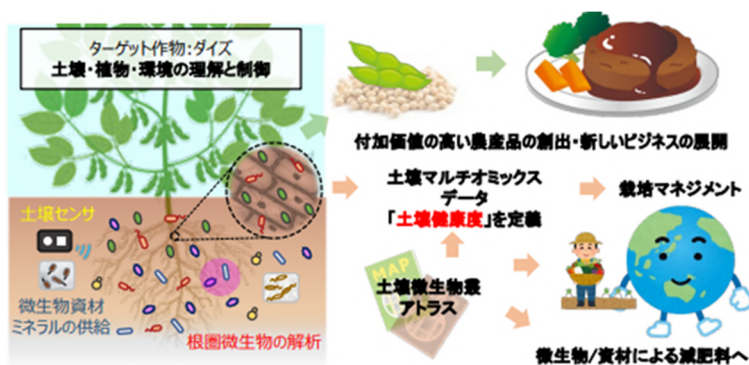


図 3-3-3 微生物・微生物叢の機能解明の取組事例

出所:ムーンショット型研究開発制度 目標 5(BRAIN)

(2) 微生物による硝化抑制

GHG 削減の対策として、主に肥料成分を由来として農地から発生する N_2O を削減することが求められている。アンモニア態窒素から硝酸態窒素を経て N_2O に至る経路において硝化を抑制できれば、肥料成分の流亡防止も期待できる。

東北大学では、微生物を活用し土壌からの N_2O 発生を抑制する技術開発が進められている。 N_2O 還元活性をもつ根粒菌や、水稻根内の CH_4 酸化・窒素固定菌といった植物共生微生物

⁹ ムーンショット型農林水産研究開発事業(ムーンショット目標 5) 土壌微生物叢アトラスに基づいた環境制御による循環型協生農業プラットフォーム構築(BRAIN)

https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/moon_shot/theme/files/MSPJ%202.pdf (2026年2月閲覧)

物による GHG 削減メカニズムについて分子レベルでの解明に取り組んでいる(図 3-3-4)¹⁰。目標として掲げられている、農地からの GHG 排出 80%削減に向けて、実ほ場での技術の確立と普及に取り組む必要がある。

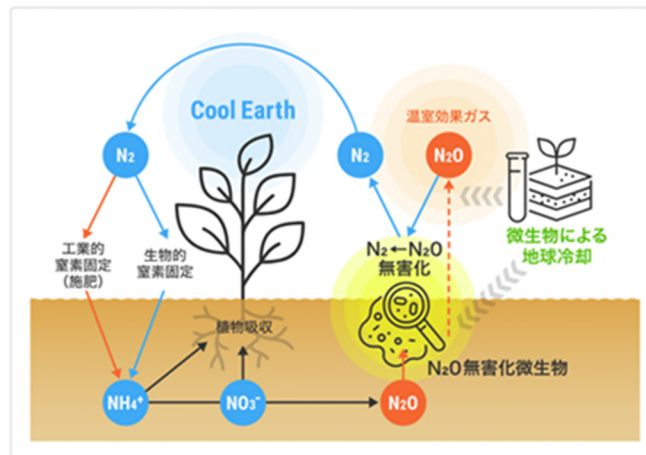


図 3-3-4 微生物を活用した N₂O 削減の取組事例

出所:ムーンショット型研究開発制度 目標 4(dSOIL)

(3) 微生物農薬

化学農薬の使用低減のため、環境に低リスクな新規防除資材の開発が求められている。微生物農薬は、微生物間の競合や抑制、寄生などの生物的作用を活用した資材であり、薬剤耐性菌や抵抗性害虫の発生リスクの低減も期待される。

米国ペンシルベニア州立大学では、ほ場のトマトから抽出した微生物を実験施設のトマトに継代移植した後、細菌性斑点病原体を接種し、病原体量の減少を確認するなど、微生物による病害抑制効果が期待されている。

産業技術総合研究所では、土壌伝染性植物病害に対する環境調和型防除技術の基盤構築を目的に、細菌を捕食する「プレデター細菌」の捕食メカニズム解明を進めている。

(4) バイオ肥料・資材

化学肥料の使用低減のため、バイオスティミュラント等のバイオ肥料・資材の開発が求められている。しかしながら、バイオ肥料・資材は作物や土壌などの環境によって効果が安定しないという課題がある。

米国 Pivot Bio 社では、通常の窒素固定細菌が *nifL* 遺伝子により高窒素条件下で窒素固定活性が低下する点に着目し、ゲノム編集により *nifL* 遺伝子を働かなくすることで、高濃度窒素条件下でも窒素固定を促進する技術開発に取り組んでいる。トウモロコシ用の生物学的窒素固定(BNF)の商用化資材として注目されている。

¹⁰ 微生物による地球冷却(dSOIL プロジェクト事務局)<https://dsoil.jp/>(2026年2月閲覧)

3-4 デジタル分野

3-4-1 分野の俯瞰

デジタル分野は、俯瞰図(図 3-4-1)に示すように、データを生み出し処理する AI 等の IT 分野、IT を活用する自動車、ロボットなどの応用分野、IT を支えるエレクトロニクス、半導体などの基盤分野から構成される。

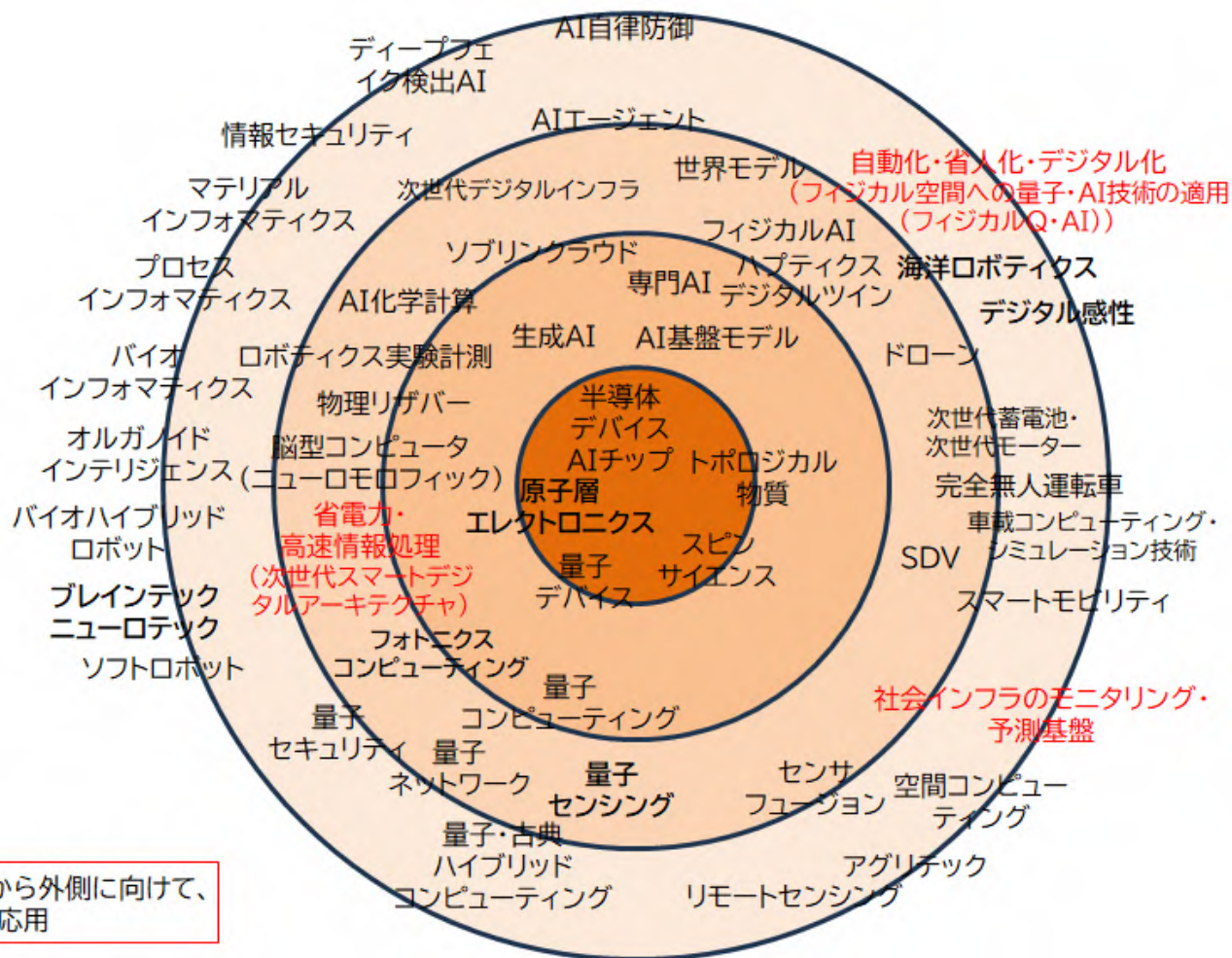


図 3-4-1 デジタル分野の俯瞰図

3-4-2 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F): 省電力・高速情報処理(原子層エレクトロニクス・フォトンクスコンピューティング) 自動化・省人化・デジタル化(量子センシング・海洋ロボティクス・デジタル感性)

デジタル分野は、他の分野で取り上げている社会課題も含めて、ほぼ全ての社会課題解決に関与する。社会課題を解決するために必要な『実現すべき機能』のうち、デジタル分野に関連する技術を用いることで実現できる可能性がある機能を整理した。

次に、豊かな未来レポートで考慮した 6 つの価値軸について『社会インパクトの大きさ』を評価した。続いて、先に挙げた機能が実現されて社会実装がなされるタイミングを、TRL (Technology Readiness Level) の考え方を参考に『実現時期』として試算した。実現すべき機能を、実現時期と社会インパクトの大きさをプロットしたものが図 3-4-2 である。

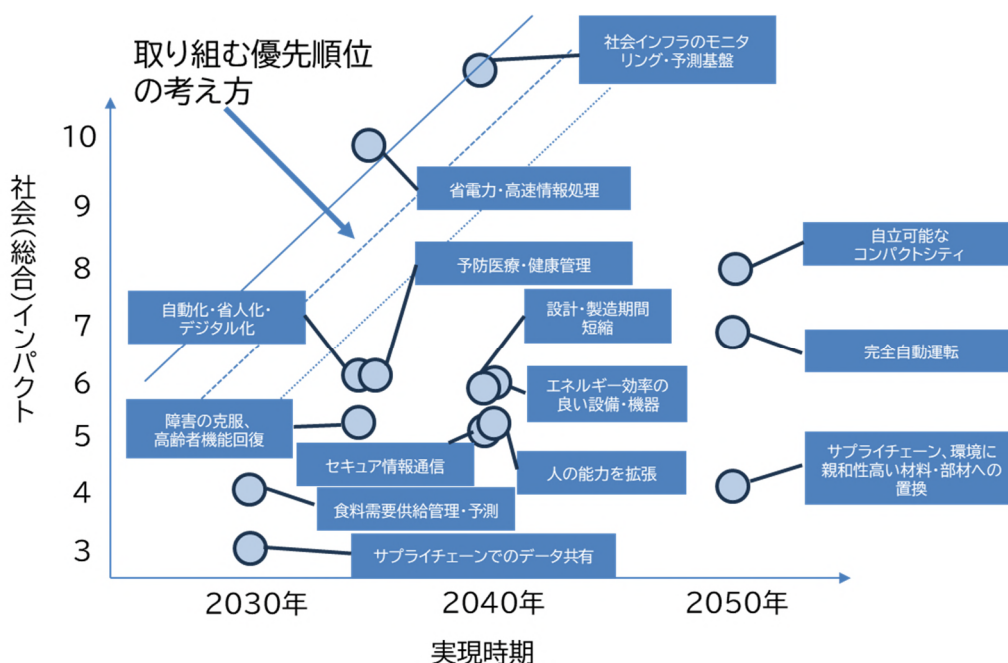


図 3-4-2 実現すべき機能の社会インパクトと実現時期

Innovation Outlook Ver. 1.0 ではこれらの結果から、実現すべき機能のうち、社会インパクトが大きく、実現時期が近い、『省電力・高速情報処理』『社会インフラのモニタリング・予測基盤』『自動化・省人化・デジタル化』を、優先的に取り組むべきフロンティア領域等として提案した。本増補版では更なる検討を踏まえ、より具体的な領域として、『省電力・高速情報処理』においては『原子層エレクトロニクス』『フォトンクスコンピューティング』を、『自動化・省人化・デジタル化』においては『量子センシング』『海洋ロボティクス』『デジタル感性』をフロンティア領域等として提案する。

(1) 省電力・高速情報処理(次世代スマートデジタルアーキテクチャ)

近年の発展が著しい生成 AI は、経済発展のみならず、産業基盤全体の強化のために、ますます利活用が進むと想定され、働き方改革、労働人口減少といった社会課題解決に大きく貢献することが期待される。一方、2050年のカーボンニュートラル実現のためには、生成AIの開発及び利活用に消費される膨大な電力量を大幅に削減することが求められることになる(図3-4-3)。具体的には、データセンターにおける電力消費を大幅に低減することに加えて、今後利活用が増加するエッジ側においても低消費電力で生成AIが動作可能な革新的なAIチップやシステムの開発が重要となる。情報処理にかかる電力消費を削減するためのハードウェア的アプローチである、『原子層エレクトロニクス』や『フォトニクスコンピューティング』を、取り組むべき領域として提案する。

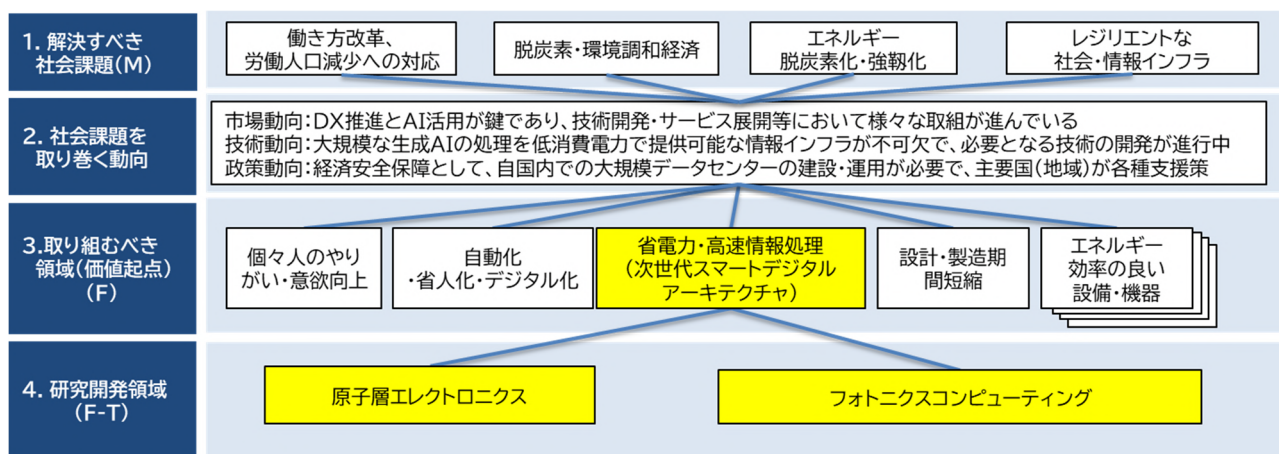


図3-4-3 省電力・高速情報処理(次世代スマートデジタルアーキテクチャ):
原子層エレクトロニクス、フォトニクスコンピューティングのMFロジックモデル

(2) 社会インフラのモニタリング・予測基盤

Innovation Outlook Ver. 1.0 で記載したとおり、社会インフラのモニタリング・予測基盤は、自然災害への対応やパンデミックへの対応といった社会インフラのレジリエンス向上に重要である。また、関連技術を平時の循環経済に組み込むことによって、農作の効率化をはじめとする生産活動・サービス活動の最大化にも貢献することも期待され、当該領域はより幅広い社会課題の解決に発展し、大きなインパクトをもたらす可能性を有している。

そこで、本項目については社会インフラを対象としてより幅広い視野でデジタル社会の将来像を捉え、その実現のための取り組むべき領域の具体化を継続的に検討し、Ver. 2.0 以降で改めて提示することとする。

(3) 自動化・省人化・デジタル化(フィジカル空間への量子・AI 技術の適用(フィジカル Q・AI))

労働生産人口の減少、高齢化社会の到来により、製造、物流、建設、介護に加え、海洋などの現場において、熟練技術者の知能や技術の継承及び人材確保が困難な状況にあり、フィジカル AI の活用も含め自動化・省人化を実現する技術開発が必要となっている。

従来のセンシング技術では計測が難しかった対象や、さらなる高精度で計測しデジタル化ができれば、新産業の創出が期待できる。これには、量子技術の適用が期待できる。中でも、量子現象を用い、従来計測ができない精度や対象の計測を可能にする『量子センシング』は、半導体、航空宇宙、国土強靱化、ヘルスケア等における新たな量子産業立ち上げの鍵となる領域である。

日本は世界第 6 位の管轄海域を有する海洋国家であり、その広大な海域の開発・利用が期待されるが、それに必要な人材(船員やダイバー)が不足している。このため、海洋産業における省人化や生産性向上、労働環境の改善、安全性向上を図るべく、AUV(Autonomous Underwater Vehicle:自律型無人潜水機)や USV(Unmanned Surface Vehicle:水上無人機)などの『海洋ロボティクス』の活用が強く求められている。

一方、自動化・省人化において、大量データを基に平均化する生成 AI を活用することは、多様性・個性・文化を奪う危険性を伴う。これに対して、個人の感性を理解しながら感性の向上を手助けする『デジタル感性』を活用すれば、自動化・省人化のみならず、個々人のやりがい・意欲向上や人間の能力の向上、個人のウェルビーイング、インクルーシブな社会の実現にも貢献し得る。

そこで、自動化・省人化・デジタル化を推進する『量子センシング』『海洋ロボティクス』『デジタル感性』を取り組むべき領域として提案する(図 3-4-4)。

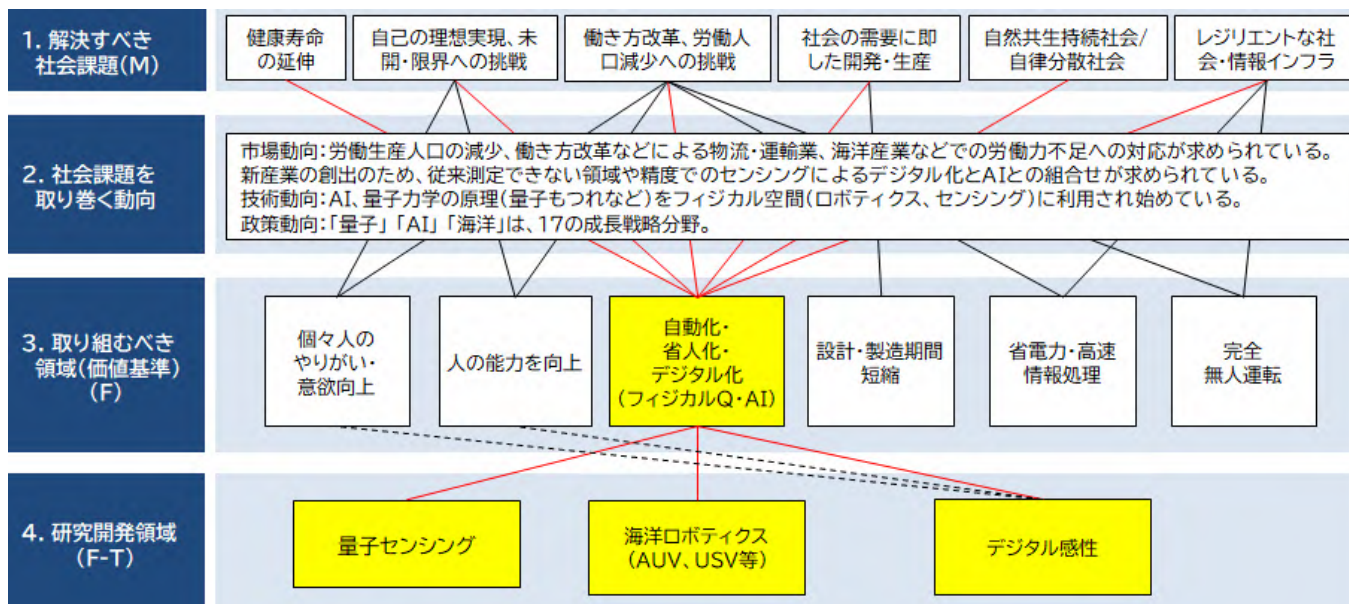


図 3-4-4 自動化・省人化・デジタル化(フィジカル空間への量子・AI 技術の適用(フィジカル Q・AI)) : 量子センシング、海洋ロボティクス、デジタル感性の M-F ロジックモデル

3-4-3 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例

(1) 省電力・高速情報処理(次世代スマートデジタルアーキテクチャ)

処理にかかる電力消費を削減するためのハードウェア的アプローチとしては、汎用的な処理基盤においても、チャンネル材料に新しい材料系である「原子層材料」を導入し、従来からのスケールリング則の更なる追求(More Moore)や多機能化(More than Moore)がある。くわえて、電子に代えてスピンや光などで四則演算をベースとした汎用コンピュータを実装する(Beyond CMOS)アプローチも有用性がある。さらに、物理リザーコンピューティング、脳型コンピューティング(ニューロモルフィックコンピューティング)、バイオ素材を使ったオルガノイドインテリジェンス、量子マテリアルである原子層物質やトポロジカル物質によるスピン演算素子や量子デバイスなども近年注目されている。

(i) 原子層エレクトロニクス

従来スケールリング則の延長手段として有力視されている『原子層エレクトロニクス』の市場導入時期は、2037年頃とされている(図3-4-5)。現時点では、300mm ウエハレベルでの成膜技術がほぼ確立された段階であり、デバイス作製・集積化に必要な他プロセスの確立とそれらの統合化技術の開発が軸になりつつある。ラボレベルの研究は数多いが、量産に耐える統合化プロセスへ、いかにつないでいくかの努力が社会実装に向けての鍵となっている。

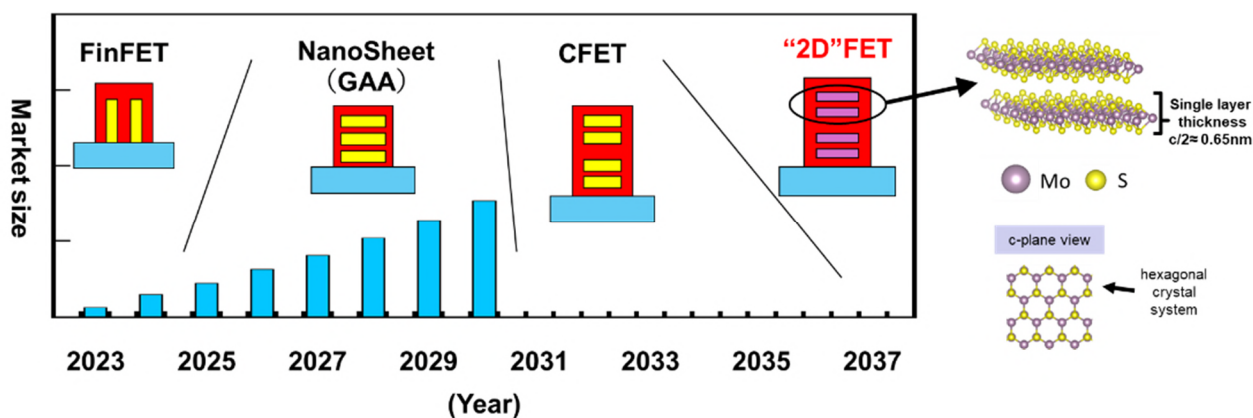


図 3-4-5 技術ロードマップ上の原子層エレクトロニクス(“2D”FET)の位置付け

(ii) フォトニクスコンピューティング

フォトニクスコンピューティングの実現方法には、光でニューラルネットワークを実装するアプローチと、光で四則演算を実現し、従来の汎用コンピュータを実現するアプローチの 2 通りが考えられる(図 3-4-6)。

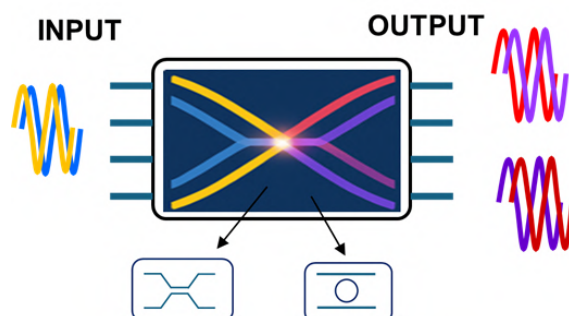


図 3-4-6 光演算素子の概念図

光でニューラルネットワークを実装するアプローチでは、機械学習で用いられるようなシンプルなニューラルネットワークの実装が研究開発されている段階である。FS フェーズとしては、生成 AI につながるトランスフォーマーモデルを光ニューラルネットワークで実装できるかどうかを検証し、有用性を検証する。2025 年 12 月に生成 AI 特有の処理をチップ上で光のまま処理する固体素子が発表され、技術が急速に立ち上がりつつある。

光でコンピュータを実現するアプローチでは、主に演算機の実装が現状の大きな課題となっているが、積和演算について光での実装の可能性が見えてきたところである。小規模な LLM を実行するのに必要な積和演算を並列実行可能なシステムの設計、構築及び小規模 LLM の実行と精度・性能評価が、初期段階での取組と考えられる。

(2) 社会インフラのモニタリング・予測基盤

本項目に関しては、Innovation Outlook Ver. 1.0 Executive Summary を参照。

(3) 自動化・省人化・デジタル化(フィジカル空間への量子・AI 技術の適用(フィジカル Q・AI))

従来測定できない領域や精度を実現する量子センシングによるデジタル化、世界第 6 位の管轄海域を有する海洋国家という日本の特性を活かした海洋ロボティクスの高度化、そして非言語的・非論理的な人間の嗜好や感情変化などの感性情報を理解する AI といった先端技術が、それぞれに新産業の創出を支える。さらに新たなフィジカルシステムとしては、ソフトロボティクス、バイオハイブリッドロボットが登場する一方、ロボット用 AI モデルの作成方法に関連して認知発達ロボティクス、リアルハプティクスが注目されている。

(i) 量子センシング

量子センシングには、従来のセンシングでは捉えられない微細な物理量(重力、磁場など)を検出可能にし、社会の「見えないものを可視化する力」として注目されている。本技術により、自動制御による省人化やインフラの予防保全、超早期病理診断などの社会課題に寄与すると考えられ、データ駆動社会におけるデータ生成の中核技術、すなわち「未来の感覚器官」としての役割を担うことが期待される。

我が国が基礎研究面で先行している光格子時計・原子時計は、これまでにない高精度の時間標準という点のみならず、重力センサーとして、計測地点の精密な時刻測定により、地殻変動など防災や環境保全、資源探索のツールとして期待される。高精度を維持しつつ小型軽量化と低コスト化につながる光学デバイスの開発等が求められる。

また、我が国が得意とする材料、デバイス開発が普及の鍵となるダイヤモンド等 NVC (Nitrogen-Vacancy Center:窒素-空孔中心)では、電流、磁気、温度における従来にない高感度計測を実現することにより、半導体の非破壊不良解析など産業分野での活用も広く期待されている(図 3-4-7)。さらなる高精度化と低コスト化に資する製造技術・加工技術の開発等が必要である。

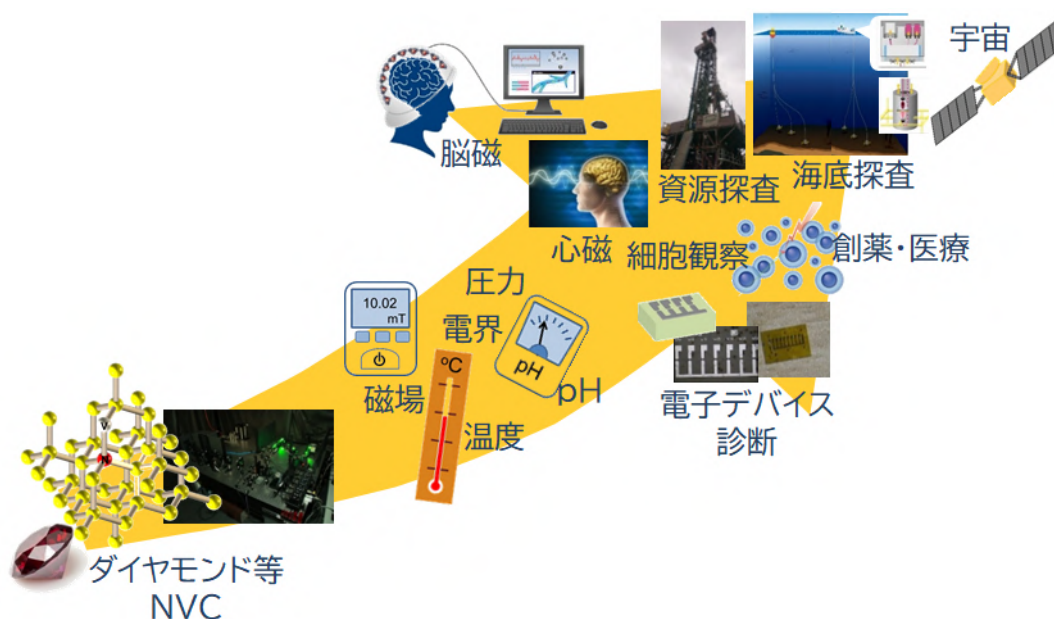


図 3-4-7 ダイヤモンド等 NVC の計測対象と応用分野

(ii) 海洋ロボティクス

海中・海上ロボティクスの協調制御により広範な海域の海洋データを収集し、そのデータを活用する「海の見える化」や「海洋デジタルツイン」に向けた取組が進みつつある¹¹(図 3-4-8)。こうしたデータの利活用を通じて、海底資源・水産資源の探索、気象予測の高精度化、さらには輸送船の航路最適化による CO₂ 排出削減などへの貢献が期待されている。

現状の AUV の運用は、基本的に母船(有人船舶)を用いて、AUV を運搬・投入・回収しており、その回収後に観測データを確認する運用が一般的である。この運用形態には、天候や運用時間の制約、人件費や備船料のコストの課題が存在する。これに対し、AUV が港から自律的に出航・帰還し、又はゼロエミッション USV とドッキングして港と目的海域間を移動できるようにできれば、母船に起因する人員・費用の削減に加え、船舶燃料の消費に伴う CO₂ 排出の低減が見込める。

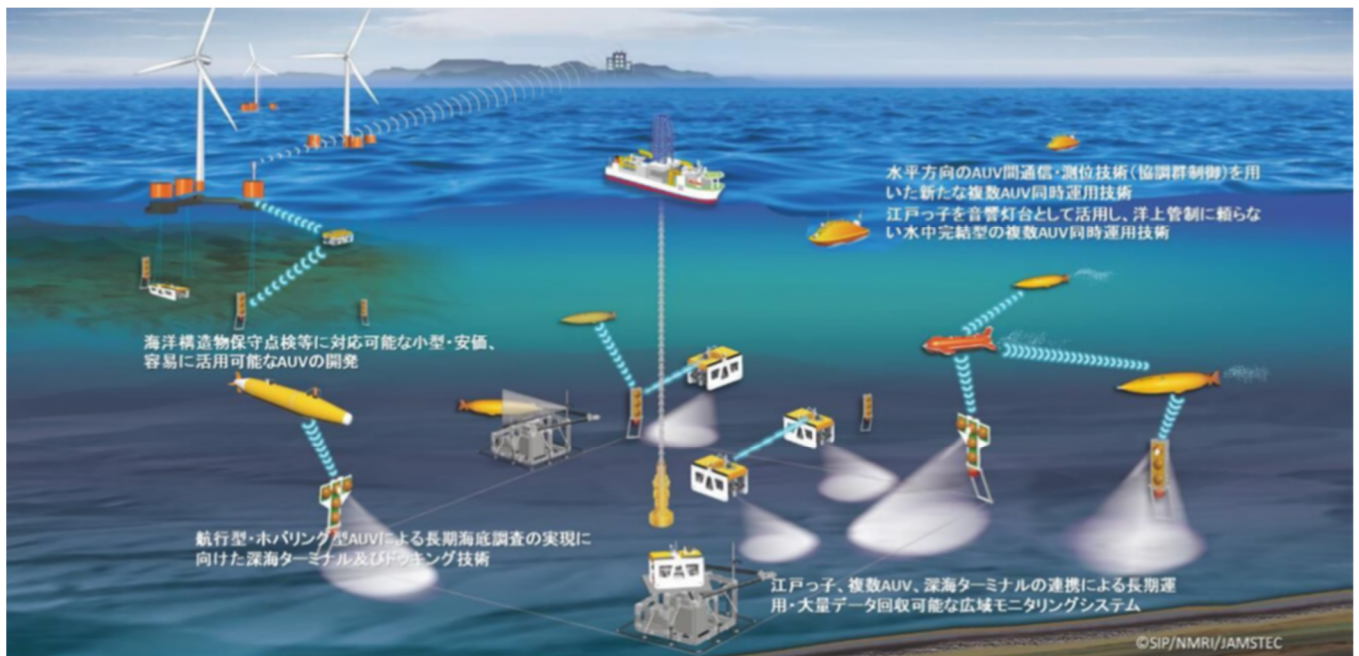


図 3-4-8 海洋ロボティクス技術の開発例¹¹

¹¹ 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 海洋安全保障プラットフォームの構築 社会実装に向けた戦略及び研究開発計画 https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sip_3/keikaku/05_kaiyo.pdf (2026年3月閲覧)

(iii) デジタル感性

デジタル感性とは、人間が外界を理解し、価値を見出し、他者や社会と関係を築く際に不可欠な感性を、デジタル技術によって捉え、理解し、支援・拡張するための概念及び技術基盤である。近年の生成 AI の進展により、言語に加え、画像・音声といった抽象表現の理解は飛躍的に向上している。しかし、感性情報をより理解するためには、触覚・嗅覚・味覚といった身体を介して体験する多感覚情報に加え、心拍・脳波・表情といった非言語反応を計測・推定するモデルの構築が不可欠である。また、デジタル感性は、個々人の価値観、文化的背景、感じ方の違いを尊重しながら、AI やデジタルシステムが人間と共存・共進化するための基盤技術として位置づけられる(図 3-4-9)。市場動向としては、世界的に医療、自動車、顧客対応、マーケティングなどの分野で導入が進むと見込まれている。製造業を強みとする日本においては、技能伝承をはじめとした職人の繊細な感性や暗黙知の理解にデジタル感性技術を活用することが期待される。さらに、デジタル感性は、個人の感性を引き出し成長を促す教師エージェントなど、個人の能力向上やウェルビーイングの実現にも寄与し得る。

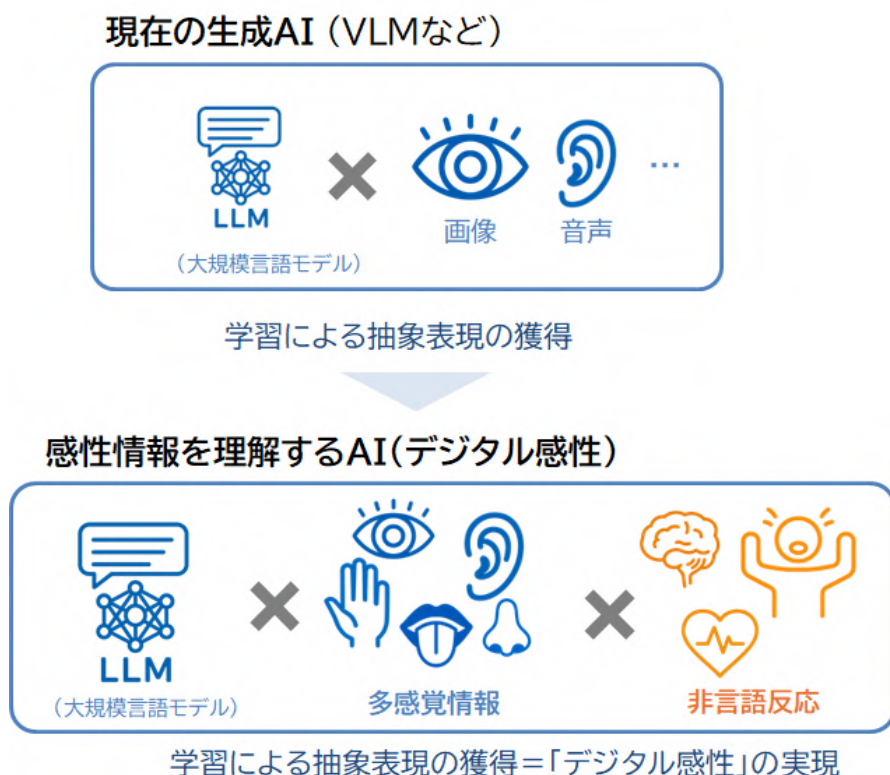


図 3-4-9 現在の生成 AI と感性情報を理解する AI(デジタル感性)の構成の比較

3-6 バイオエコノミー分野

3-6-1 分野の俯瞰

バイオエコノミーは、再生可能資源を基盤として、医療・ヘルスケア、食品、素材、エネルギー、環境等、極めて多様な産業領域に広がる経済活動である。市場・製品の視点では対象市場が多岐にわたり、気候変動、資源枯渇、生物多様性の損失、高齢化といった複合的な社会課題と密接に関係している(図 3-6-1)。技術の視点では、バイオテクノロジーを中核としつつ、デジタル技術、AI、材料、電子・電気工学等の周辺分野との融合が不可欠であり、学際的な知の統合が競争力の源泉となる。近年は、構造解析 AI、mRNA 技術、ゲノム編集等に象徴されるように、基礎研究の成果が短期間で社会実装・産業化へ展開する事例が増加している(図 3-6-2)。

本増補版では、バイオエコノミーの広範さを前提としつつ、社会的緊急性及び日本の競争優位性の観点から、ヘルスケアエコノミー、とりわけ予防・健康増進領域に焦点を当てる。

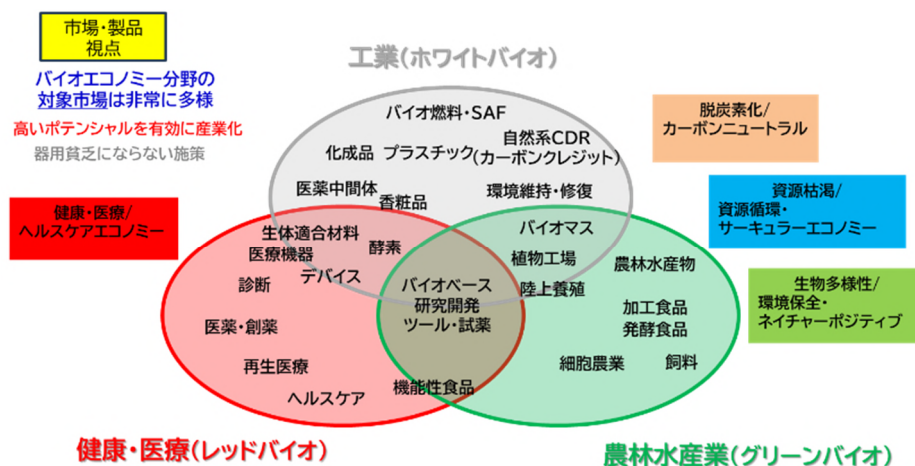


図 3-6-1 バイオエコノミー分野の俯瞰図(市場・製品視点)

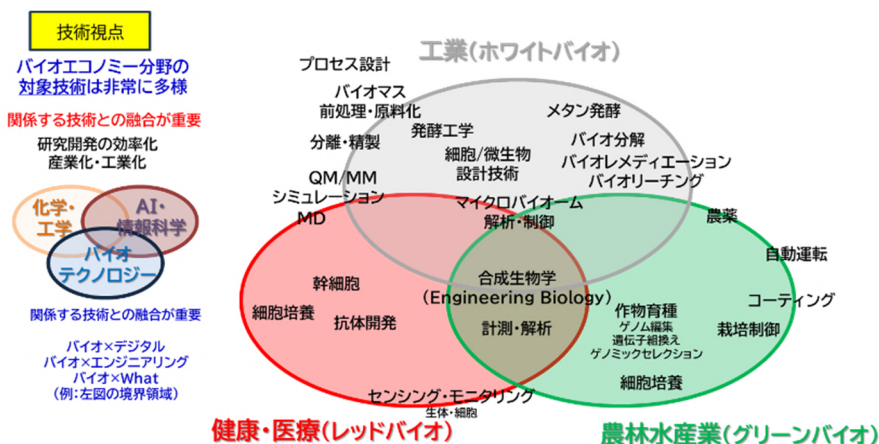


図 3-6-2 バイオエコノミー分野の俯瞰図(技術視点)

3-6-2 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F): 高度センシングによる先制ヘルスケア (精密栄養と環境防疫を基軸とした行動変容モデル構築)

世界的な高齢化の進展と慢性疾患の増大を背景に、ヘルスケア分野では治療中心から予防・健康増進中心への構造転換が課題である。日本においては、2024年に公表された『バイオエコノミー戦略』において、生活習慣改善ヘルスケア及びデジタルヘルスが重点市場として明確化された。また、『新しい健康社会の実現に向けた「アクションプラン 2023」』では、公的保険外の健康づくり・介護関連の国内市場規模として、2050年に累計77兆円を目指す目標が掲げられている。現在、ウェアラブルデバイスやデジタルヘルスサービスへの投資が加速し、日常生活での連続的な生体データ取得を前提とした新たなサービスが拡大しており、本分野は非常に大きな市場性を有している。

予防的ヘルスケアでは、日々の行動と健康アウトカムの関係が実感しにくく、行動変容の継続が困難という課題がある。年数回の検査に依存する従来型の評価に加え、食事・運動・睡眠・ストレス負荷に対する生体応答や代謝状態を日常生活で継続的に可視化し、介入とその生体応答を継続的に評価するフィードバックループの構築が重要となる。その中核となるのが高度な生体センシングに基づく行動変容であり、被験者に負荷をかけずにバイオマーカーを継続的に計測するためには、高感度・高特異性を備えた非侵襲・低侵襲の高度なセンシング技術が不可欠である。なお、医療領域における先行実装例として、2型糖尿病の管理において、センシングとフィードバックを通じて行動変容へとつながる成果を挙げつつある。例えば、連続血糖モニタリングと生活習慣データを統合的に解析し、個別最適化された食事及び身体活動介入を継続的に行うことで、HbA1c値、インスリン抵抗性、β細胞機能といった代謝指標の改善及び薬物療法負担の軽減が報告されている。これらの知見は、個人のセンシングデータに基づく継続的な介入とフィードバックループが、行動変容を介して実際の健康アウトカム改善に寄与し得ることを示している。

特に、栄養摂取は私たちの生活に密着し、かつ制御可能性の高い生体への入力要素であり、同分野において個人特性に応じて最適化する「精密栄養(Precision Nutrition)」が注目されている。精密栄養を実効的な行動変容につなげるには、栄養介入が生体指標に与える影響を定量化するとともに、腸内菌叢の機能や個人差を理解し、その応答を評価に組み込むことが不可欠である。これらの個人データの縦断的变化を適時フィードバックする仕組みにより、持続的な行動変容が促される。さらに、高齢者では個人差が大きいため、一般的な基準値との比較ではなく、個人のベースラインと過去のデータとの変化に基づく評価が、介入効果の解釈に有効である。このような精密栄養の社会実装には、食と腸内菌叢に関する大規模データ基盤とそれを日常生活で計測・活用する高度なセンシング技術が不可欠となる。

日本は、食と紐づく腸内菌叢の大規模公共データベースを構築済みである。また、センサー、材料、精密機器開発における高い技術力、機能性食品の社会実装の実績を有しており、精密栄養と高度センシングを組み合わせた先制ヘルスケアの展開に当たり、国際競争力を発揮し得る。

以上を踏まえ、ヘルスケアエコノミー分野の MFT ロジックモデルを図 3-6-3 のようにまとめ、予防的ヘルスケアを実現するため、『高度センシングによる先制ヘルスケア(精密栄養と環境防疫を基軸とした行動変容モデル構築)』を取り組むべき領域として提案する。

本領域は、科学的根拠の構築に長期かつ大規模な投資を要し、制度・規制面の不確実性も高いことから、民間単独での推進は困難である。そのため、疾病予防を通じた人的資本の維持や生体データ・センシング技術の戦略的な重要性を踏まえれば、経済安全保障の観点からも国家的に取り組む意義は大きく、フロンティア領域等と位置付けられる。

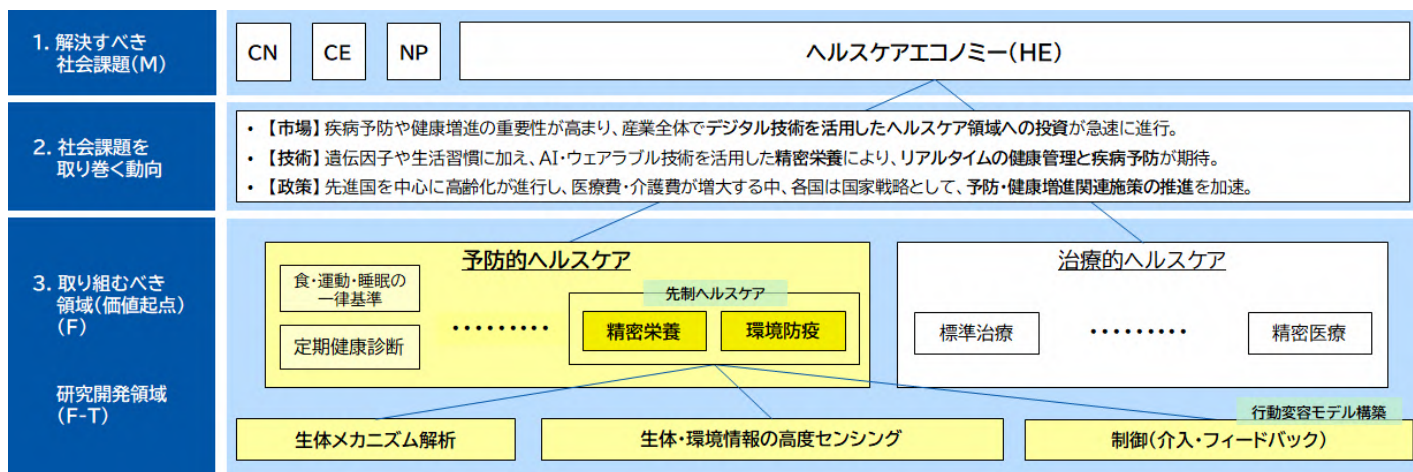


図 3-6-3 ヘルスケアエコノミー分野の MFT ロジックモデル

精密栄養(Precision Nutrition)及び環境防疫に関する高度センシングに基づき、行動変容を実現するための仕組みを図 3-6-4 に示す。

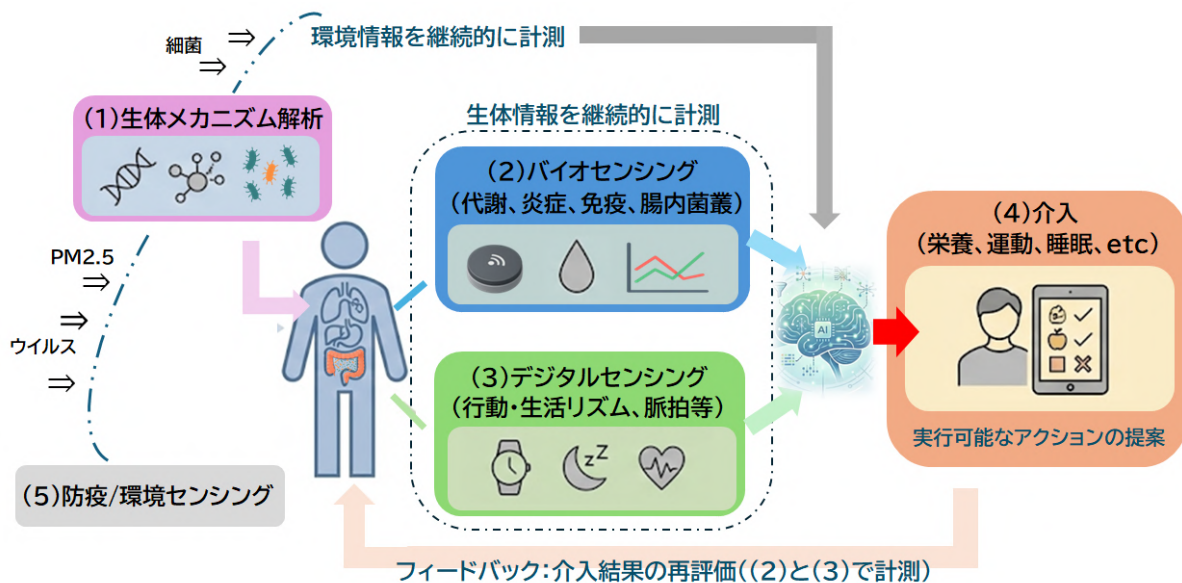


図 3-6-4 生体・環境情報の継続的センシングが実現する先制ヘルスケアの個別最適化

精密栄養の観点からは、はじめに、生体メカニズムの理解に基づいて、介入においてモニタリングすべき生体情報(バイオマーカー)を特定する((1))。続いて、これらのバイオマーカーが日

常生活の中でどのように変動するかを把握するため、非侵襲又は低侵襲の技術を用いて継続的な計測を実施する((2)・(3))。収集した多角的データを解析し、個々の生理状態に最適化された介入方針を設計・提示する((4))。その後、介入による反応を再び(2)及び(3)の計測系で評価し、データ駆動型のフィードバックループとして次の介入に反映させる。さらに、環境中の病原体や有害物質等を対象とした防疫／環境センシングにより、曝露リスクを継続的に可視化し、個人の行動の最適化と連動した社会レベルの「先制ヘルスケア」を実現する((5))。

3-6-3 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例

先制ヘルスケアは、疾病や健康リスクが顕在化する前段階での介入を可能にするため、個人と社会という異なるレイヤーにおける高度センシングを基盤とする。

個人レベル(以下、(1)～(4))では、精密栄養に代表される生体センシングにより、栄養応答や代謝状態の個人差を捉え、個別化された予防介入を実現する。また、社会レベル(以下、(5))では、防疫を目的とした環境中ウイルスのリアルタイムセンシングにより、感染症リスクを集団単位で把握し、社会システムとしての先制ヘルスケアを支える。

(1) 生体メカニズム解析

(i) 多層オミックス解析

個人差の大きい代謝応答や栄養介入効果を理解するためには、ゲノム、トランスクリプトーム、プロテオーム、メタボローム等を統合する多層オミックス解析が不可欠である。これにより、単一指標では捉えられない生体反応の因果構造やネットワークが明確化され、精密栄養に資する信頼性の高い分子型バイオマーカー探索が可能となる。

特に、複数のオミックス階層で一貫して変動する分子を抽出することで、偶然的相関ではなく、生体機構に根差した指標を効率的に同定できる点に強みがある。

(ii) 腸内菌叢(マイクロバイオーム)の機能解析

腸内菌叢は、食事由来成分の代謝、免疫調節、炎症制御を介して健康状態に深く関与しており、精密栄養における個体差の主要な決定因子である。重要なのは、菌の存在だけでなく、どの代謝物を産生し、生体にどのような影響を及ぼすかという機能的側面である。

多層オミックス解析を用いれば、腸内細菌の DNA 情報とそれに対応する代謝物を同時に捉えることができ、腸内菌叢－代謝－健康指標を結ぶメカニズム解明が加速する。これにより、腸内菌叢の特性に基づいた食事設計やポストバイオティクスを含む新たな介入戦略への展開が可能となる。

(2) バイオセンシング

生体分子のセンシングデバイスは、分子認識素子、電極(トランスデューサー)、基材、信号処理回路、電源から構成される(図 3-6-5)。この中でも、測定対象分子を特異的に捉える分子認識素子は、計測の選択性・感度・応答速度を規定する中核要素である。

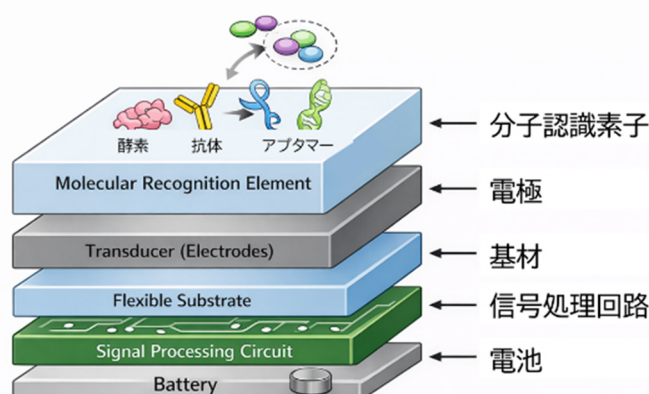


図 3-6-5 生体分子センシングデバイスの一般的な構成要素(概念図)

(i) 電気伝導型酵素(DET 型酵素)

酵素は、生体分子センシングにおいて成熟した認識素子であるが、近年は分子設計可能なデバイス要素として再定義されつつある。特に、電極と直接電子授受を行う電気伝導型酵素(DET 型酵素)は、メディエータ不要で高選択性・高感度を実現できるため、マルチセンシングに適した次世代素子として注目されている。クライオ電子顕微鏡や計算科学の進展により、電子移動経路や配向性といった DET 能の分子機序が解明され、AI を活用した de novo 設計や準人工酵素の創出が現実的になりつつある。

(ii) 核酸アプタマー

核酸アプタマーは、抗体に匹敵する特異性を持ちつつ、化学合成が可能で安定性・経済性に優れる分子認識素子である。小分子からタンパク質まで幅広い標的に対応可能であり、酵素では困難な分子のセンシングを補完する役割を担う。一方、結合・解離速度の制約から連続測定への適用には課題があり、今後は構造設計や信号変換機構の高度化による改良が鍵となる。

(3) デジタルセンシング

スマートフォンやスマートリング等により、活動量・睡眠・心拍変動等のデジタルバイオマーカー(Digital Biomarker: DBM)を日常生活で連続的に計測できるようになっている。歩行速度やキー入力特性等の行動センシングは、認知機能低下や疾病の予兆を捉える有望な DBM として期待される。DBM は非侵襲かつ大規模・継続的に行動や生理状態の変化を捉えられる点が大きな利点である。ミリ波センサーやモーションキャプチャーによる高精度解析では、歩行時の足関節可動域低下がサルコペニアの早期発見に有用と報告され、将来はスマートフォン映像による在宅診断も期待される。

以上の(2)バイオセンシング及び(3)デジタルセンシングにより得られた生体情報を統合・可視化し、個人の生理状態や行動特性を仮想空間上で再現・予測するヘルスケアを目的としたデジタルツインが注目されている。その活用にあたっては、厳格なデータ管理と個人情報保護が求められる。

(4) 介入としての精密栄養

精密栄養は、分子型バイオマーカー探索、生体・デジタルセンシングを統合し、具体的な行動変容を支援する介入技術である。遺伝情報、代謝特性、腸内菌叢、生活習慣といった多層データを統合し、個人に最適化された食事介入を動的に設計する点に特徴がある。

大規模コホート研究により、同一の食事に対する血糖応答が個人ごとに大きく異なること、腸内菌叢情報を組み込むことで食後の応答を高精度に予測可能であることが示されている。これらは、精密栄養が単なる栄養指導ではなく、データ駆動型の介入科学であることを示している。日本においては、和食・発酵食品等の食文化と日本人の腸内菌叢を反映した実効性ある精密栄養の提案が実装の鍵となる。

これら(1)~(4)のように、メカニズムに基づく生体応答を可視化した上で、介入とフィードバックのループを構築することは、生体の分子応答レベルでの理解とデバイス開発、さらに、データ解析と行動変容を個人レベルで統合的に接続するものであり、先制ヘルスケアを社会実装へと導く中核的な技術基盤である。

(5) 防疫／環境センシング

先制ヘルスケアを社会レベルで実現するには、個人の行動の最適化に加え、環境中の病原体を可視化し、防疫を拡張する技術が重要である。課題は、低濃度な気中ウイルスの効率的な捕集・濃縮と PCR に依存しない迅速な検出方法の確立である。

一例として、湿式静電式サンプラーは、高効率な捕集を可能にする一方、長時間の運用では捕集液の蒸発対策が必要となる。CONAN 法や SHERLOCK 等の技術は、短時間・低コストで高精度検出が可能であり、変異への対応も容易である。

また、早期に検知された病原体に対し、化学薬剤に依存しない迅速かつ局所的で残留性のない防除の実現により、防疫／環境対策を「拡大後の抑制」から「初期の封じ込め」へ転換する基盤技術が求められており、一例として、大気圧低温プラズマや深紫外線 LED が挙げられる。

これらの技術の統合により、公共空間のウイルスを常時監視し、感染リスクを事前に把握する社会システムの構築が期待される。

以上のとおり、本節で整理した具体的手段は、分子レベルの計測から行動変容としての介入、さらに、環境・社会レベルの防疫に至るまで、先制ヘルスケアを多層的に実装する技術基盤を構成する。

3-7 新設定分野

Innovation Outlook Ver. 1.0 増補版では、新設定分野として、[1]ブレインテック・ニューロテックと、[2]数理科学による産業革新を調査分析した。

[1]ブレインテック・ニューロテック

3-7-1[1] ブレインテック・ニューロテックとは

ブレインテック・ニューロテックは、脳(Brain)又は神経(Neuro)と技術(Technology)を合わせた造語である。OECD では神経技術(Neurotechnology)を「神経系の構造と機能へのアクセス、監視、調査、評価、操作及び模倣するために使用される装置及び手順」と定義している¹²。これを踏まえ TSC では、ブレインテック・ニューロテックを、脳・神経活動を計測・解析し、それらのデータを活用してアプリケーションや製品に応用する技術群として定義する。BMI (Brain Machine Interface:ブレイン・マシン・インターフェース)、脳刺激治療デバイス、神経活動モニタリングシステムなどが含まれ、脳・神経疾患の早期診断、症状の緩和、リハビリテーションの効率化に貢献する可能性があり、また医療・介護人材の不足を補う技術としても注目されている。さらには、医療・リハビリにとどまらず、教育、エンターテインメントまで幅広い応用が期待されている。

¹² Responsible innovation in neurotechnology enterprises (OECD, 2019)
https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/10/responsible-innovation-in-neurotechnology-enterprises_2d346c46/9685e4fd-en.pdf (2026年3月閲覧)

3-7-2[1] 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F):

脳・神経の機能回復・拡張や人機協働を実現するブレインテック・ニューロテック

ブレインテック・ニューロテックは、TSC が公表した豊かな未来レポートで示した「実現すべき12の社会像」のうち、「誰もが潜在能力を発揮し自己の理想を実現できる社会」「誰もが無理なく働き続けられる社会」「快適で活力に満ちた社会」の実現に寄与すると考えられる。Innovation Outlook Ver. 1.0 において、デジタル分野では、社会課題『働き方改革、労働人口減少への挑戦』『自己の理想実現、未開・限界への挑戦』の解決に向けて取り組むべき領域として『自動化・省人化・デジタル化』を提案した。その中で、具体的な手段として挙げた協働型多機能自律ロボットは、人の指示を理解して協働することを想定したものであり、BCI(Brain Computer Interface:ブレイン・コンピュータ・インターフェイス)や BMI が重要な要素となることを示した。他方、バイオエコノミー分野においては、社会課題『ヘルスケアエコノミー』の解決に向けて取り組むべき領域として『生体情報や環境情報の高度センシング及び生体や環境の制御』を挙げた。その本質は生体情報を高度にセンシングし、適切な応答／制御を行うことであり、ブレインテック・ニューロテックに係る生体デジタルデータの取得を支援する基盤となる。

更なる検討の結果、デジタル分野の『自動化・省人化・デジタル化』と、バイオエコノミー分野の『生体情報や環境情報の高度センシング及び生体や環境の制御』とが融合することで、脳・神経情報の高度な計測・解析に基づく人の機能回復、能力拡張、人機協働の実現が期待できると考えた。

以上を踏まえ、本増補版では『脳・神経の機能回復・拡張や人機協働を実現するブレインテック・ニューロテック』に取り組むべきフロンティア領域等として提案する(図 3-7-1-1)。

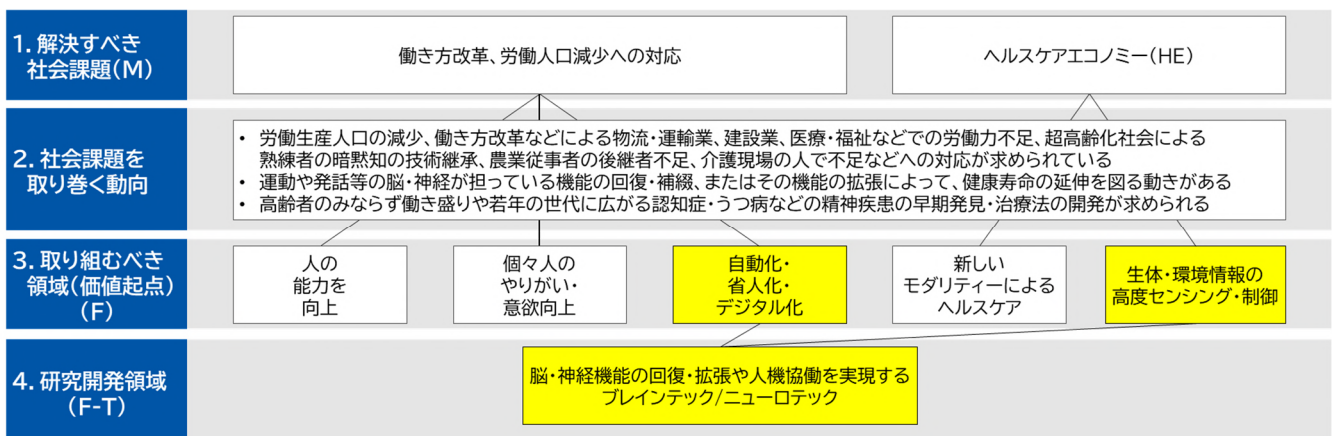


図 3-7-1-1 ブレインテック・ニューロテックの MF ロジックモデル

(1) 市場動向

ブレインテック・ニューロテックの応用は医療にとどまらず非常に広範な範囲の市場が想定されている。脳波計、MRI、MEG(脳磁図)などの医療機器が開発され、医療現場での実用に供されている。また、脳・神経活動の測定結果をビジネスでの意思決定やマーケティングに応用する動きもある。これらを総合すると、ブレインテック・ニューロテックの市場規模は、2035年までに600億ドル(≒9兆円)規模に成長すると予測される。

(2) 技術動向

研究論文数は右肩上がりに増加しており、国別では米中が牽引している。日本は全体では8位であるが、分野によっては、脳オルガノイドで4位、BCI/BMI やデコーディングの分野では5位に位置し、比較的日本の優位性があると考えられる。EEG、MRI、NIR、MEG に関する特許出願数は右肩上がりに増加しているが、特に MEG ではリコー、浜松ホトニクスが特許件数上位に位置している。

BCI の目標の一つに脳機能の補てつ(補完)がある。例えば脳で考えただけで、その思考を脳・神経活動の計測によって推測(デコーディング)し、思考内容を発話したりロボットアームを動かしたりすることができるようになる。ここでは、思考に伴う神経の動きを瞬時に解読し、対応しなければならず、侵襲的な計測を志向する傾向にあるが、一部ではシート状の電極や血管内留置型電極によって必要最小限の侵襲(極低侵襲)で計測可能とする研究開発も行われている^{13,14}。日本は材料技術や計測した信号の伝送技術で世界に対して優位性を持っており、低侵襲の電極の開発競争は重要な研究ターゲットになりえる。

(3) 政策動向

(i) 研究開発政策

ブレインテック・ニューロテックは欧米を中心に研究開発が進められてきた。

米国では、2000年代後半からの DARPA プロジェクトで基礎技術の開発が始まった。欧州は Human Brain Project(2013-2023)¹⁵を基盤として EBRAINS¹⁶という、脳関連研究のためのデータ、ツール、サービスを提供する研究基盤を構築し研究を推進している。中国は 2025年7月に発表した国家戦略(7部門の意見書)¹⁷の中で、BCI のほぼ全技術領域で産業を育成し、BCI 産業で世界をリードする方針を打ち出している。日本では、内閣府ムーンショット型研究開発、文部科学省の「脳神経科学統合プログラム」などが推進されている。

(ii) 倫理的な側面の取組

fMRI 研究の普及など、人の脳活動への非侵襲的なアプローチが盛んになったことを背景として、脳神経科学の研究成果とその社会実装が人間理解、法制度、社会等に与える影響について総合的に扱うニューロエシックス(Neuroethics)の研究が、脳神経科学と並行して研究されてきた¹⁸。

¹³ <https://precisionneuro.io/> (2026年3月閲覧)

¹⁴ <https://www.jimed.jp/> (2026年3月閲覧)

¹⁵ Human Brain Project

<https://www.humanbrainproject.eu/en/> (2026年3月閲覧)

¹⁶ Europe's Digital Infrastructure for Brain Research

<https://ebrains.eu/> (2026年3月閲覧)

¹⁷ 七部門关于推动脑机接口产业创新发展的实施意见

https://www.miit.gov.cn/zwggk/zcwj/wjfb/yj/art/2025/art_ea3ff408de194612891df352d24dd26a.html (2026年3月閲覧)

¹⁸ ニューロテクノロジーの倫理に関する動向について(東京通信大学、2025)

https://www.mext.go.jp/content/20250627-mex life-000043435_9.pdf (2026年3月閲覧)

ユネスコは 2025 年 11 月に、人権と尊厳を尊重しつつ脳科学研究を推進するためのニューロエシックスに関する新たな基準を設定し、加盟国によって採択された^{19,20}。この勧告は、精神的プライバシーを損なうことなく、脳神経技術の革新がこの技術による支援を必要とする人々に恩恵をもたらすための安全策を確立することを目的としている。OECD や EU でも同様の動きがある。

日本においても、第 3 期『健康・医療戦略』(2025 年 2 月 18 日閣議決定)で、「社会共創」の取組を強化することが示され、「健康・医療分野の研究開発が社会の理解や信頼を得つつ進められるよう、責任ある研究・イノベーション(Responsible Research and Innovation: RRI)の考え方に基づき」、「研究開発の早期の段階から倫理的・法的・社会的課題(Ethical, Legal and Social Issues: ELSI)への対応を行う」ことが求められている²¹。

(iii) ニューロデータの考え方や規制に関する取組

ブレインテック・ニューロテックの研究開発の進展に伴って脳神経科学に関するデータも膨大に蓄積している。米国では、州法により生体情報に加え神経データも規制する動きが、コロラド州等で始まっている。ただし州により脳・神経データの範囲や規制の内容が異なる。そのため、上院でも連邦で統一した考え方のもとに脳・神経データを規制していくことが議論されている²²。

¹⁹ Ethics of neurotechnology: UNESCO adopts the first global standard in the cutting-edge technology(UNESCO)<https://www.unesco.org/en/articles/ethics-neurotechnology-unesco-adopts-first-global-standard-cutting-edge-technology> (2026 年 3 月閲覧)

²⁰ UNESCO adopts first global ethical framework for neurotechnology(digwatch, 2025)
<https://dig.watch/updates/unesco-adopts-first-global-ethical-framework-for-neurotechnology>
(2026 年 3 月閲覧)

²¹ 健康・医療戦略推進本部
<https://www.cas.go.jp/jp/seisakukaigi/kenkouiryou/suisin/ketteisiryou/kakugi/r070218senryaku.pdf>(2026 年 3 月閲覧)

²² The MIND Act: Balancing Innovation and Privacy in Neurotechnology (Cooley, 2025)
<https://www.cooley.com/news/insight/2025/2025-09-25-the-mind-act-balancing-innovation-and-privacy-in-neurotechnology> (2026 年 3 月閲覧)

3-7-3[1] 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例

(1)脳・神経活動の非侵襲的な計測の高度化、(2)脳・神経疾患の予防・早期発見・治療に資する産業育成、(3)脳模倣システムの産業応用をテーマ例として挙げる(図 3-7-1-2)。

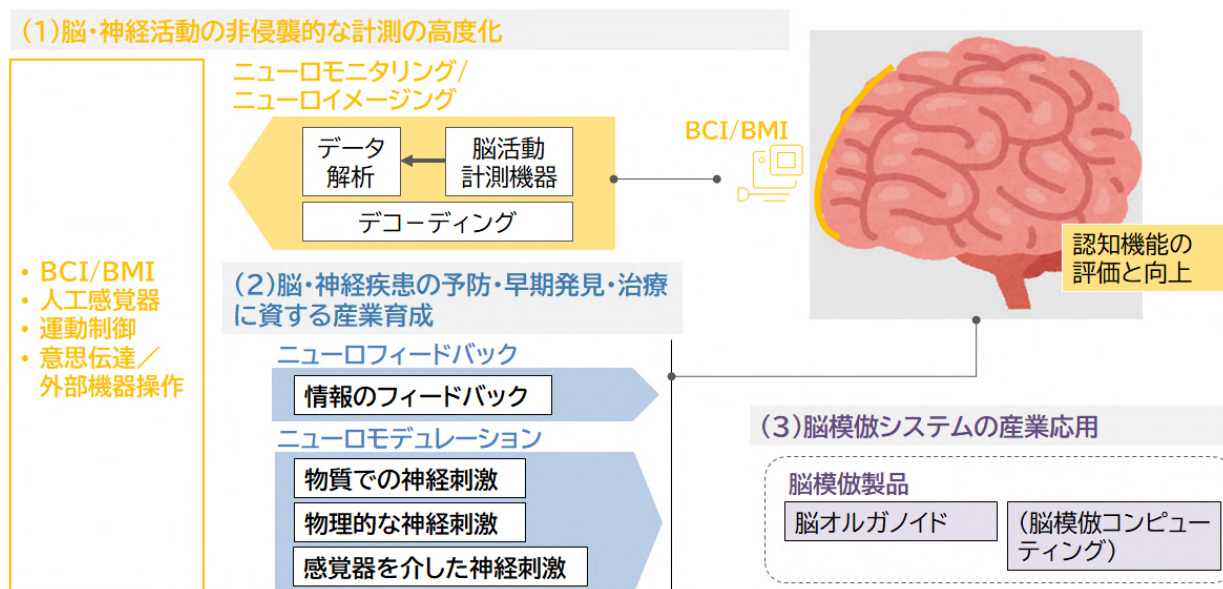


図 3-7-1-2 ブレインテック・ニューロテックにおいて取り組むべきテーマ

(1) 脳・神経活動の非侵襲的な計測の高度化

ブレインテック・ニューロテック領域においては、高品質な脳波等のデータを安全かつ大量に取得するための技術が重要であり、計測装置の電極・デバイスの開発や次世代の脳活動計測手法の開発等が課題として考えられる。

具体的には、各種計測方法の弱点を補強するような、計測精度向上・計測環境簡素化・被験者の負担軽減、等を目指した非侵襲的計測機器の開発が考えられる。また、複数の手法による同時計測等で得られた計測データの突合等の分析による、非侵襲的計測手法の精度向上も案として考えられる。

(2) 脳・神経疾患の予防・早期発見・治療に資する産業育成

脳・神経活動を計測した情報に基づき、適切な情報提示や神経刺激が治療行為として行われている。ただし効果は個人間で大きく異なり、個人に最適化したフィードバックや刺激の方法又はその組合せの研究が重要な課題となる。個人の特性に合わせた健康維持法や予防法が明らかになれば、その方法を個人に提示し実行させる事業の創出が期待できる。

(3) 脳模倣システムの産業応用

オルガノイドは、iPS 細胞等の培養細胞を様々な器官・組織に分化させたものである。医薬品開発の研究開発用途での実証が進められている。脳オルガノイドは脳・神経活動を模倣するものとして薬物応答等の研究のほかに、計算機(ニューロモルフィックコンピューティング)としての応用が検討されている。実現までには長期の研究期間が必要であるが、現在のノイマン型計算機での電力消費の課題が解決する見込みがあるため大きく期待されている。

[2]数理学による産業革新

3-7-1[2] 数理学とは

数理学とは、数学そのものが探究してきた構造や理論を基礎として、自然・社会・産業における複雑な諸現象を構造や因果の観点から捉え直し、理解・予測・制御へと接続するための学術基盤である。その特徴は、構造・関係・不変量といった本質的特徴を抽象化し、共通言語として扱うことを可能とすることである。近年では、データ科学やAIと数理モデルを融合させた手法や、トポロジー・幾何学的手法による高次元・複雑構造の解析など、より現実的な課題に適用する取組が進展している。そこで、出口として産業分野を想定し、「数理学」と「工学理論・AI(データ駆動)」の長所の組合せによる、日本の産業基盤の高度化について検討する。

3-7-2[2] 解決すべき社会課題(M)と取り組むべき領域(F): 幾何×情報に基づく産業基盤の高度化

これまでのイノベーションは、工学理論の発展と産業応用を軸に進展してきた。最近、米国や中国をはじめとする諸外国が、デジタル化・AIを含め先端技術に巨額投資を進めている。一方、AIは統計的学習と大規模データに強く依存しており、データが少ない分野やデータ取得がしづらい分野においては、データ群の本質的な構造や不変量の把握、理論的説明性や一般化保証が極めて難しいという課題がある。とりわけ日本は、モデル開発規模やデータ量の面で、諸外国に比べて不利な立場にあり、基盤モデルやクラウド基盤の覇権は海外主導で進んでいる。さらに、大規模データ依存は、GPUなどの半導体や消費電力による制約の顕在化にもつながっている。

こうした制約の下、日本の産業界における課題解決やイノベーション実現に向けては、諸外国とは異なる戦略を考える必要がある。日本の特徴を考察すると、学術研究の強さの一指標である Nature Index²³では日本は世界第5位と依然優位なポジションにあり多くの学術的知見を有する。産業についてみると、ハーバード大学のハーバード・ケネディスクールが公表している経済複雑性指標²⁴では日本は約30年にわたり世界第1位を継続しており、日本は製造業を中心とした輸出産業で、規模と多様性の両面で競争力を維持している。このように、日本の強みは、大学における物理学、計測・制御、材料科学といった分野で培われた学理と、産業界における製造・装置・品質管理など高度な現場技術が長年にわたり共存してきた点にあり、今後の日本のイノベーションの鍵は、大学における新学理又は未活用の学理を製造業の現場に効果的に取り込んでいくことにある。

数理学の源流は、紀元前にユークリッド幾何学に代表される数理的枠組みの構築に遡る。例えば古代ギリシアにおいては、幾何学的概念が建築や芸術に影響を与えるなど、数学は哲学・芸術・建築と深く結びつきつつ発展してきた。17世紀後半に成立した解析幾何学や微積分学は、18世紀にかけて力学理論と結びつき、産業革命に伴って工学・産業分野で広く活用されるよう

²³ Nature index(Springer Nature) <https://www.nature.com/nature-index/country-outputs/Japan> (2026年3月閲覧)

²⁴ Atlas of Economic Complexity 10.0 brings new data and Product Space design(Growth Lab of Harvard Kennedy School)<https://growthlab.hks.harvard.edu/news/atlas-economic-complexity-100-brings-new-data-and-product-space-design/> (2026年3月閲覧)

になった。その後、20 世紀には計算機の発展とともに、線形代数や確率論などを基礎とした数理理論が計算科学と結びつき、高度な数式モデル解析の実現や大規模・高次元問題への適用が可能となった。20 世紀後半には、確率論・統計学を中核とする数理群から機械学習が確立・普及し、2010 年代には深層学習が飛躍的に発展した。これらは AI と呼ばれる技術群へと展開し、産業・社会に大きな変革をもたらしている。このように、数理科学で発展・成熟された学理が順次、産業分野にスピアウトすることで、工学理論を発展させ、そして産業のイノベーションをもたらしてきた。

次なる打ち手として求められるのが、数理科学による第 4 のイノベーションである。すなわち、現行の AI の限界や課題を克服し、説明可能性・信頼性・汎化性の飛躍的向上を可能とする、次なる数理科学による新しいパラダイムの実現である(図 3-7-2-1)。

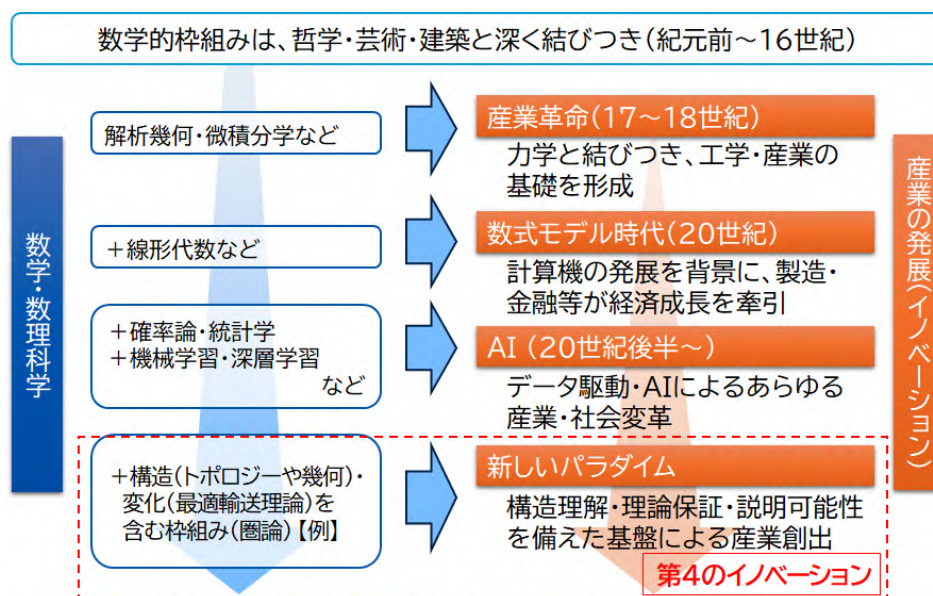


図 3-7-2-1 数学・数理科学によるイノベーションの実現

日本は、世界的に見ても強固なアカデミア基盤と多様で高度な産業群が併存する環境を有している。くわえて、先端ハードウェア、AI 技術、数理理論に通じた人材といった、次なる数理科学を支える要素技術・知的基盤が国内に集積している。

これらを有機的に結び付け、日本において次なる数理科学を先行的に実現することは、日本の「技術」の競争力に厚みを与え、「産業」の基盤を構造的に強化するのみならず、日本発の持続的なイノベーション創出につながる(図 3-7-2-2)。

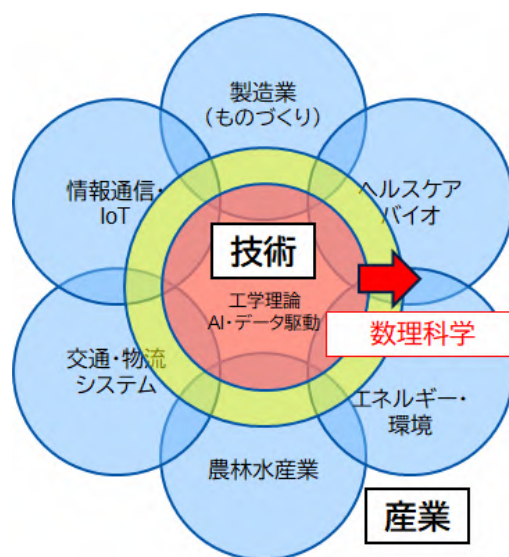


図 3-7-2-2 「数理科学による産業革新」のコンセプト

次なる数理科学の皮切りとして、文部科学省の戦略目標「新たな社会・産業の基盤となる予測・制御の科学(予測数学基盤)」で挙げられている手法や日本の産業との相性を考慮し、幾何学やトポロジーといった幾何学的手法に注目する。本手法を活用することで、従来のアプローチでは把握困難であったデータ群の特徴(かたち、うごき、つながり)の理解を可能にし、大量のデータに依存しない説明可能な推論基盤の構築が期待される。さらに、産業界の実課題への適用を考えると、工学理論の中心となる数式モデルや AI に対して、幾何学的手法の組合せ・融合を図ることが重要となる(図 3-7-2-3)。

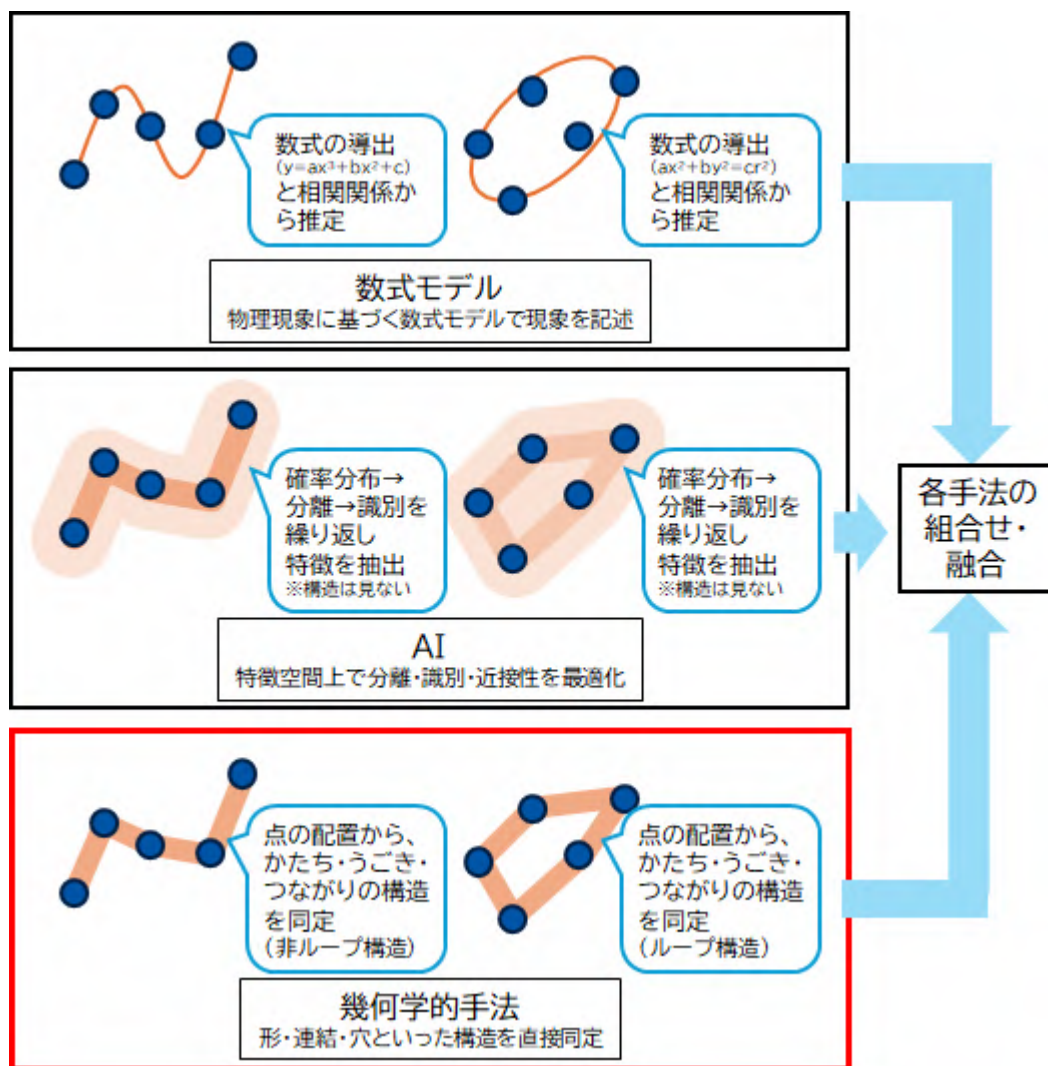


図 3-7-2-3 数式モデルや AI と幾何学的手法の組合せ・融合

以上のことを踏まえ、日本の産業界の課題解決及び産業革新の実現に向けて、取り組むべきフロンティア領域等として、『数理科学による産業革新』として提案する。そして、AI 開発でも幾何学的手法の取り込みが始まっていること、トポロジー等の研究がここ数年で大きく活性化していることを踏まえ、まずは、幾何学・代数幾何学の手法を、工学理論や AI などの情報と融合させることが有効と考え、次なる数理科学の構築に向けて、『幾何×情報に基づく産業基盤の高度化』に取り組むべき研究開発領域として提案する(図 3-7-2-4)。

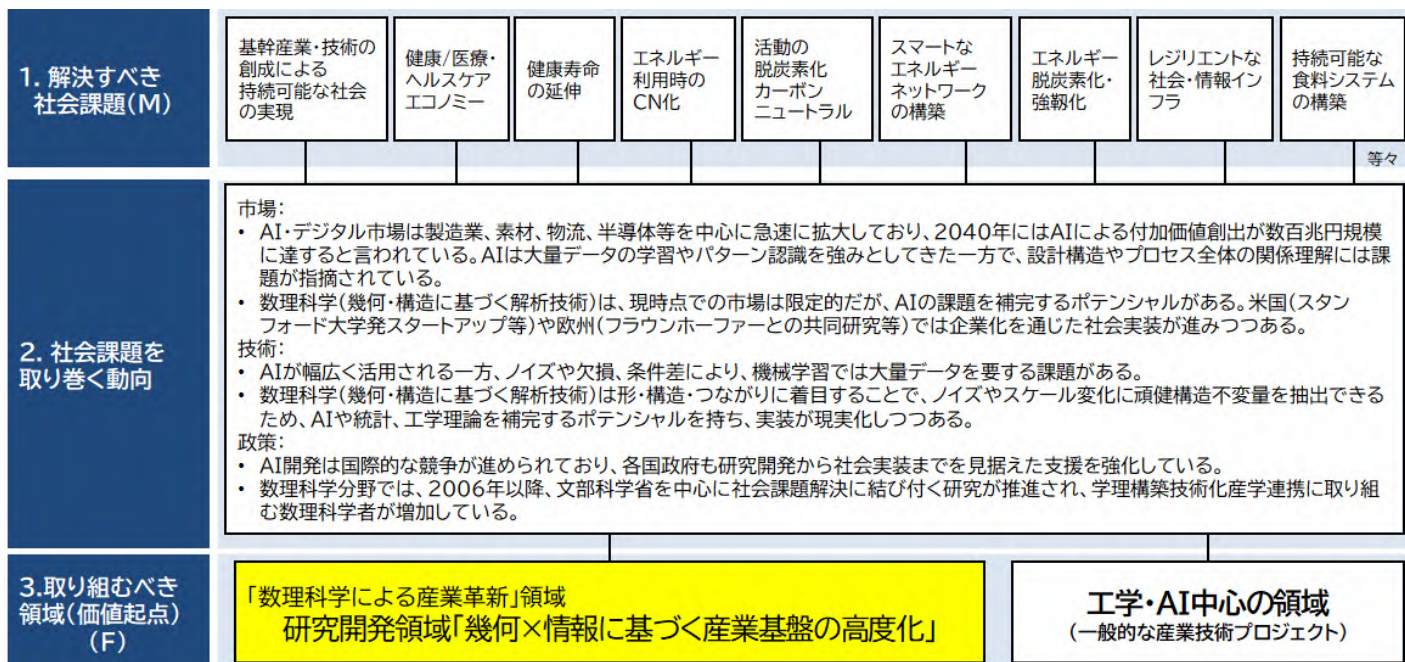


図 3-7-2-4 数理科学による産業革新の MF ロジックモデル

本領域の市場動向については、AI・デジタル市場は製造、ハイテク、素材、物流、半導体などで拡大しており、McKinsey & Company²⁵は 2040 年の AI の潜在付加価値を 390~660 兆円と試算している。この中で、「幾何×情報に基づく解析技術」による付加価値は 40~120 兆円規模と推計される。海外では、米国 IBM Research や Ayasdi(現 SymphonyAI)、欧州のフラウンホーファー研究機構などが社会実装に向けた取組を進めている。

技術動向として、センサー、シミュレーション、設計、運転ログなど高次元データが蓄積する一方、ノイズやスケール差により従来手法では構造把握が難しくなっている。こうした中、形・構造・つながりに着目する「幾何×情報に基づく解析技術」の強みを生かすことができる。その手法の一つであるパーシステントホモロジーを用いることで、ガラス構造解析や時系列 AI の有効性が示されている。さらに、流線トポロジー解析や最適輸送理論により、構造理解から予測・診断・制御への展開が進みつつある。

政策動向として、NISTEP「忘れ去られた科学—数学」(2006 年)以降、数学・数理科学を社会課題に結び付ける政策が継続的に推進されてきた。JST は「さきがけ」「CREST」や戦略目標

²⁵ The economic potential of generative AI: The next productivity frontier(McKinsey & Company, 2023)
<https://www.mckinsey.com/capabilities/tech-and-ai/our-insights/the-economic-potential-of-generative-ai-the-next-productivity-frontier#/> (2026 年 3 月閲覧)

「予測数学基盤」を通じ、将来変化や不確実性を捉える数理基盤の構築を重視している。東北大学のトポロジカルデータ解析コミュニティや京都大学 Math Clinic では、産業課題起点の数理活用が進展している。さらに、経団連と東北大学による数理活用産学連携イニシアティブなど、次なる数理科学の実現に向けた取組が進んでいるといえる。

3-7-3[2] 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例

『幾何×情報に基づく産業基盤の高度化』の実現のための具体的な手段の事例を述べる。

(1) トポロジカルデータ解析

トポロジカルデータ解析の手法の一つであるパーシステントホモロジーは、データの形状や構造に基づく特徴を多スケールで抽出する数理科学的手法であり、従来の解析手法に対して数理的な構造情報を付加することで、解析精度や信頼性の向上を可能とする。以下は、点群、時系列、画像に適用した例を取り上げるが、これらの実例を踏まえると、製造業をはじめとする様々な産業分野への応用も可能である。

(i) 材料構造解析への適用

アモルファス材料であるガラスは長距離秩序を欠くため、その原子配置の構造的特徴を記述することが困難であった。パーシステントホモロジーを原子配置データに適用し、ガラスに内在する中距離秩序を多スケールで特徴づける手法を提案した。原子配置を点群データとして解析し、パーシステンス図によりリング構造や空隙構造を抽出することで、結晶やランダム配置とは異なるガラス特有の階層的構造が可視化・定量化されることを示した(図3-7-2-5)²⁶。

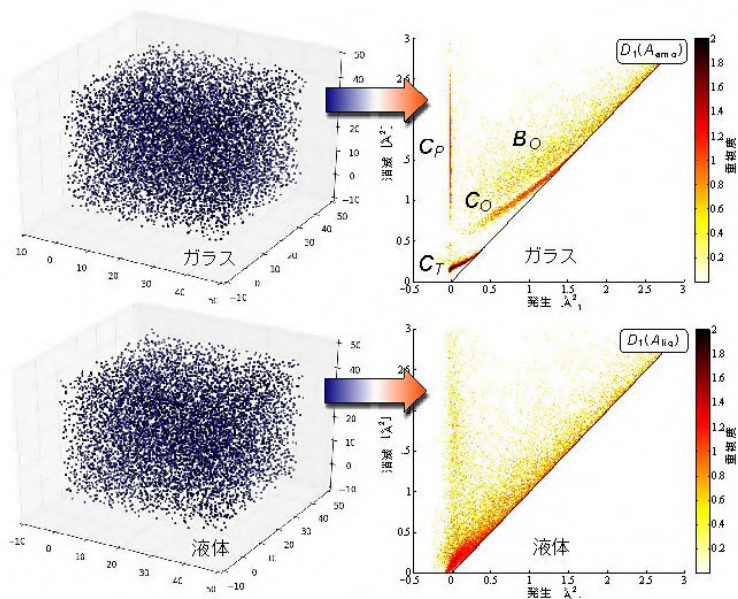


図3-7-2-5 SiO₂の原子配置(左)とそのパーシステントホモロジー(右)

(ii) 時系列解析への適用

時系列解析において、本手法を適用することで、時系列データに内在する構造的特徴量の抽出が可能となる。富士通と仏 Inria による共同研究では、本手法を脳波の実データに

²⁶ ガラスの「形」を数学的に解明～トポロジーで読み解く無秩序の中の秩序～(東北大学、2016) 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構、2016)
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20160614/index.html> (2026年3月閲覧)

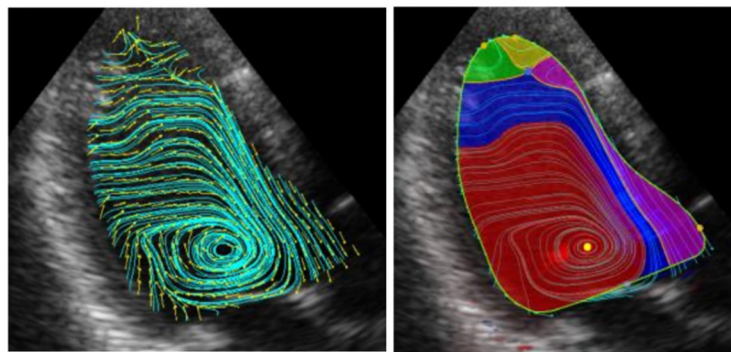
適用し、せん妄検出を行った²⁷。脳波時系列を幾何学的特徴として解析することで、せん妄状態に特有の Slowing 現象に対応する波形構造が抽出されることを確認した。

(iii) 画像診断への適用

画像診断においては、本手法と深層学習を融合することで、解析精度の向上が可能となる。Yu-Min Chung らは、皮膚画像から病変領域を抽出し、深層学習により画像特徴を学習するとともに、パーシステントホモロジーに基づき病変形状の幾何・トポロジー情報を抽出した²⁸。これらを統合して皮膚腫瘍を 7 分類した結果、幾何情報を付加しない場合と比べ、正解率は 80.6%から 85.1%へと向上した。

(2) 流線トポロジー解析

流線トポロジー解析は、日本が社会実装に向けて 20 年にわたり取り組んできたアプローチであり、流体や場に現れる流線の分岐・合流や渦構造といった位相的特徴を解析することで、複雑な物理現象の本質的な構造を把握することを目的とする。JST 未来社会創造事業²⁹では、本手法を心血流に適用し、心臓内血流場に形成される流線や渦構造を解析することで、拍動に伴う複雑な血流パターンの構造を抽出・可視化している。工学分野においても、流体力学に基づく数値シミュレーションや計測データに適用することで、流れの特徴を構造的に抽出することが可能であると考えられる(図 3-7-2-6)。



$$s_{01} \{ [\infty_{\pm}, \lambda_{\sim}, a_{\sim} \{ \sigma_{\sim}, \infty_{\sim} \}], \lambda_{\sim}, \lambda_{\sim}, \lambda_{\sim} \}$$

図 3-7-2-6 心臓エコーのベクトルフロー図(左上)から特徴的な位相構造を文字列で表現し(下)、心臓血流内部の特定渦領域を表現(右上)

²⁷ 異常要因を特定する世界初の時系列 AI 技術を開発 専門家でも気づきにくい異常の根本原因発見を支援(富士通株式会社、2021)

<https://pr.fujitsu.com/jp/news/2021/07/16.html> (2026 年 3 月閲覧)

²⁸ Persistence Curves: A canonical framework for summarizing persistence diagrams(Yu-Min Chung et al., Cornell University, 2021)

<https://arxiv.org/abs/1904.07768> (2026 年 3 月閲覧)

²⁹ 心臓内の「渦血流」を同定する理論を世界に先駆けて構築～心血流の渦のパターンを文字化し、早期に心不全を発見する可能性～(科学技術振興機構、2025)

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20230818/index.html> (2026 年 3 月閲覧)

(3) 最適輸送理論

最適輸送理論は、異なる状態や分布の間における対応関係や変化の構造を、距離やコストに基づいて定量的に捉える数理科学的手法である。単なる最適化手法ではなく、分布がどのように変化・対応しているかを構造的に記述できる点に特徴がある。

医療・生命科学分野では、単一細胞 RNA シーケンス(scRNA-seq)により得られる細胞集団データを確率分布として表現し、異なる時点における細胞状態分布の変化を最適輸送により連続的に捉える研究が進められている³⁰。

工学・産業分野においても、材料組織の統計的分布変化や、製造プロセス中に生じる状態遷移など、分布として記述される現象の変化構造を捉える数理基盤としての活用が期待される。

これにより、従来手法では把握困難であった形状・構造・遷移・流れに関する構造的特徴量を抽出し、機械学習・統計モデル・最適化手法と融合することで、異常兆候の早期検知、状態分類、挙動予測、制御・設計最適化に直結するユースケース創出を目指す。これにあたっては、解析精度の向上にとどまらず、現象理解と説明性を備えた意思決定支援につなげることを重視する。

³⁰ 時系列 scRNA-seq データから細胞分化ダイナミクスを推定-包括的軌跡推定フレームワーク scEGOT の開発-(東北大学、2025)

<https://www.sci.tohoku.ac.jp/news/20250206-13593.html> (2026年3月31日閲覧)

おわりに

Innovation Outlook Ver. 1.0 増補版では、Ver. 1.0 に引き続き、技術分野別の俯瞰調査をさらに進めることで、新たなフロンティア領域等の提案を行うことができた。さらに、TSC の所掌分野を横断するより幅広い視点での俯瞰調査に基づいて、「新設定分野」としてのフロンティア領域等の提案も行うことができた。

Innovation Outlook Ver. 1.0 及び増補版で提案したフロンティア領域等におけるイノベーションの創出に向けては、様々な革新的な技術アイデアを取り込んでいくことが重要である。Innovation Outlook では、取り組むべき具体的手段の例(T)として、TSC が注目する技術を例示したが、イノベーション実現の確度を高めるためには、アカデミア、企業をはじめとするTSC 外に潜在する技術アイデアも集約することが必要であり、RFI(情報提供依頼)を通じたフィジビリティスタディの結果を踏まえて、本格的な技術開発プロジェクトを組成・推進することになっている。

くわえて、革新的な技術の社会実装に向けては、事業モデルの構築やルール作りなど、社会システムの変革を促すような取組を具体化することが必要不可欠である。そのためには、Innovation Outlook を起点として、関係省庁や産業界、アカデミア、ベンチャーキャピタル・金融機関、メディアとも連携し、多様な知見を集約した総合知的な議論を行うことが有効と考えられ、この議論を踏まえ、イノベーション実現への道筋をイノベーション戦略として取りまとめていく。

Innovation Outlook Ver. 1.0 及び増補版が、読者の皆様における取組の検討の参考になることとともに、ここに提案したフロンティア領域等に係るアイデアやイノベーション戦略策定に対するフィードバックをいただけることを期待する。

TSC Foresight

Innovation Outlook Version 1.0 増補版

Executive Summary

2026年6月1日発行

作成メンバー

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
イノベーション戦略センター(TSC)

■センター長	岸本 喜久雄	
■事務局長	田辺 雄史	
■統合戦略ユニット長	澤田 篤志	
■サステナブルエネルギーユニット長	原 重樹	
■環境・化学ユニット長	坂本 清美	
■アグリ・フードテックユニット長	渡邊 美鈴	
	宇木 俊晴	(2026年3月まで)
■デジタルユニット長	横井 一仁	
■マテリアルユニット長	高町 恭行	
■バイオエコノミーユニット長	味方 和樹	
■標準化・知財戦略ユニット長	大屋 静男	
	玉木 宏治	(2026年3月まで)
■国際戦略ユニット長	田辺 雄史	
■マクロ分析ユニット長	山田 英永	
■統括課長	幸本 和明	

●本書に関する問い合わせ先
電話 044-520-5200(イノベーション戦略センター)

●本書は以下 URL よりダウンロードできます。
<https://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料はイノベーション戦略センターの解釈によるものです。
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。