



 **TSC Foresight**

# Innovation Outlook

## Version 1.0 増補版

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

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.....	3
解決すべき社会課題(M)と取り組むべきフロンティア領域等(F)の全体像.....	3
3-1 サステナブルエネルギー分野.....	6
3-1-1 分野の俯瞰.....	6
3-1-2 解決すべき社会課題(M).....	8
3-1-3 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向.....	11
3-1-4 社会課題の解決のために取り組むべき領域(F): 長期エネルギー貯蔵システムによる変動性再生エネ最大活用.....	36
3-1-5 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例.....	42
コラム 注目技術1 無線給電の展望.....	46
3-2 環境・化学分野.....	48
3-2-1 分野の俯瞰.....	48
[1]重要元素のリサイクル技術.....	50
3-2-2[1] 解決すべき社会課題(M).....	50
3-2-3[1] 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向.....	50
3-2-4[1] 社会課題の解決のために取り組むべき領域(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.....	57
3-2-5[1] 取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例.....	63
[2]ネガティブエミッション技術.....	67
3-2-2[2] 解決すべき社会課題(M).....	67
3-2-3[2] 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向.....	67
3-2-4[2] 社会課題の解決のために取り組むべき領域(F): ネガティブエミッション技術/海洋 CDR の工業的技術.....	70
3-2-5[2] 取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例.....	73
3-2-6[2]ネガティブエミッション技術/海洋CDRの工業的技術における手段を進める上での道筋.....	74
3-3 アグリ・フードテック分野.....	77
3-3-1 分野の俯瞰.....	77
3-3-2 解決すべき社会課題(M).....	79
3-3-3 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向.....	80
3-3-4 社会課題の解決のために取り組むべき領域(F): 持続可能農業に向けた微生物機能活用.....	83
3-3-5 取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例.....	87
3-4 デジタル分野.....	90
3-4-1 分野の俯瞰.....	90
3-4-2 解決すべき社会課題(M).....	93
3-4-3 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向.....	94
3-4-4 社会課題の解決のために取り組むべき領域(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) 社会インフラのモニタリング・予想基盤 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).....	97
3-4-5 取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例.....	118
コラム 注目技術2 情報セキュリティ.....	127
3-5 マテリアル分野.....	128
コラム 注目技術3 次世代冷却(磁気冷却).....	128
コラム 注目技術4 触媒(ナノザイム).....	129
3-6 バイオエコノミー分野.....	130
3-6-1 分野の俯瞰.....	130
3-6-2 解決すべき社会課題(M).....	131
3-6-3 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向.....	132
3-6-4 社会課題の解決のために取り組むべき領域(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).....	136
3-6-5 取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例.....	141
コラム 地域特有の再生可能資源を基盤とした循環型バイオ産業.....	155
3-7 新設定分野.....	164
[1]ブレインテック・ニューロテック.....	164
3-7-1[1] ブレインテック・ニューロテックとは.....	164

3-7-2[1]	解決すべき社会課題(M)	165
3-7-3[1]	社会課題の解決に向けて取り組むべき領域(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...	167
3-7-4[1]	取り巻く国内外の市場・技術・政策動向	170
3-7-5[1]	取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例	185
[2]	数理科学による産業革新	187
3-7-1[2]	数理科学とは	187
3-7-2[2]	解決すべき社会課題(M)	187
3-7-3[2]	国内外の市場・技術・政策動向	196
3-7-4[2]	社会課題の解決のために取り組むべき領域(F): 幾何×情報に基づく産業基盤の高度化	202
3-7-5[2]	取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例	205
	コラム Innovation Outlook 高度化に向けた試行的取組（文理融合ワークショップ）	210
	おわりに	211

## 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。

Innovation Outlook は、TSC が所掌する分野での市場・技術・政策の動向を俯瞰的に分析し、社会課題の解決に向けて我が国として取り組むべき『フロンティア領域等』を提案するものである。『フロンティア領域等』とは Ver. 1.0 で定義したもので、新たに取り組むべき領域(フロンティア領域)、既存領域においても取組を追加・加速すべき領域、さらには領域間の融合を図るべき領域(融合領域)をまとめた呼称である。

その策定アプローチとしては、『目指す社会像』と『社会課題』(M:Mission)を起点とし、バックキャスト・アプローチにより抽出した社会課題解決に求められる『機能』『提供価値』(F:Function)から、取り組むべきフロンティア領域等を特定し、同様の機能・提供価値をもつ複数の技術(T:Technology)や技術の社会実装に向けたアイデアを組み合わせ、パッケージ化して捉える分析を行うこととした。その際、MFT<sup>®</sup>フレームワーク<sup>1</sup>を参考としたロジックモデルを構築している。フロンティア領域等は、経済産業省が示した 5 つの観点(「将来性(成長性・社会課題)」「技術・アイデアの革新性」「日本の優位性」「民間のみで取り組む困難性」「重要経済安保技術」)<sup>2</sup>を踏まえつつ、TSC 独自の観点を加えて評価することにより、特定することとした。

以上のようなアプローチで、TSC として初めて策定した Innovation Outlook Ver. 1.0 については、以下のような課題があると考えられた。

- 1) 技術分野ごとに検討したものを統合したため、それぞれのロジックの整合性や、価値を起点とした技術分野間の融合領域の検討ができていないこと
- 2) 限られた時間・リソースの中で技術分野全体を俯瞰できず、その結果必ずしも全ての新たに取り組むべき領域を提案できていないこと
- 3) トランスフォーマティブ・イノベーションの推進を掲げているが、技術開発要素の提案が中心で、ルール形成、エコシステムの構築、社会システムの変革まで踏み込んだ提案が十分にできていないこと
- 4) 大きな経済社会情勢の変化により社会課題の設定自体が揺れ動くことがあり、そうした不確実性が高いという現状を、MFT フレームワークを含むあらゆるロジックモデルを活用する際に留意する必要があること

<sup>1</sup> Arthur D. Little により開発された技術経営のフレームワークの一つ

<sup>2</sup> 第5回 産業構造審議会 イノベーション・環境分科会 イノベーション小委員会(経済産業省、2025 年 1 月)  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo\\_gijutsu/innovation/pdf/005\\_04\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/innovation/pdf/005_04_00.pdf)(2026 年 3 月閲覧)

こうした課題認識を踏まえ、2025年度のInnovation Outlook策定を進めたが、4)経済社会情勢の変化に基づいた社会課題の再設定や、3)社会システムの変革に係る領域の抽出手法については検討中の段階でとどまっているのが現状である。一方、今年度は、1)技術分野間の融合領域の検討や、2) Ver. 1.0 で俯瞰できていなかった分野の俯瞰に基づくフロンティア領域等の検討を実施したので、その結果をInnovation Outlook Ver. 1.0 増補版として発行することとした。具体的には、Ver. 1.0 でまとめたInnovation Outlookの位置づ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領域を改めて特定・提案するものである。したがって、本増補版は3章を増補するものであることをご認識いただきたい。

増補版3章の冒頭部ではTSCが所掌する分野全体について、増補版で検討した領域をVer. 1.0 で検討した領域と合わせて、全体像として示す。3章1～6節ではTSCの六つの技術分野ごとのVer. 1.0での検討を更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、取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例を例示する。なお、俯瞰調査を通じて注目すべき技術が抽出されており、これらについては各分野の末尾にコラムとして掲載する。

### 3 章 解決すべき社会課題と取り組むべき領域

「はじめに」で記載したとおり、3 章では将来像の実現に当たって解決すべき社会課題とその解決のために取り組むべき領域を記述する。

冒頭では、解決すべき社会課題(M)と取り組むべきフロンティア領域等(F)の全体像を示す。3-1~3-6 ではTSC が所掌する各技術分野について、3-7 では検討範囲を広げた「新設定分野」について述べる。各技術分野については、サステナブルエネルギー、環境・化学、アグリ・フードテック、デジタル、マテリアル、バイオエコノミーの順に述べる。

#### 解決すべき社会課題(M)と取り組むべきフロンティア領域等(F)の全体像

目指すべき将来像については、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」』<sup>3</sup>(以下「豊かな未来レポート」という。)で示した「6 つの価値軸」と「12 の社会像」が相当する。これを起点としたバックキャストで、現状とのギャップを具体化して、解決すべき社会課題を抽出した。

目指す将来像と Ver. 1.0 および増補版で抽出された社会課題(M)の俯瞰図を図 3-1 に示す。

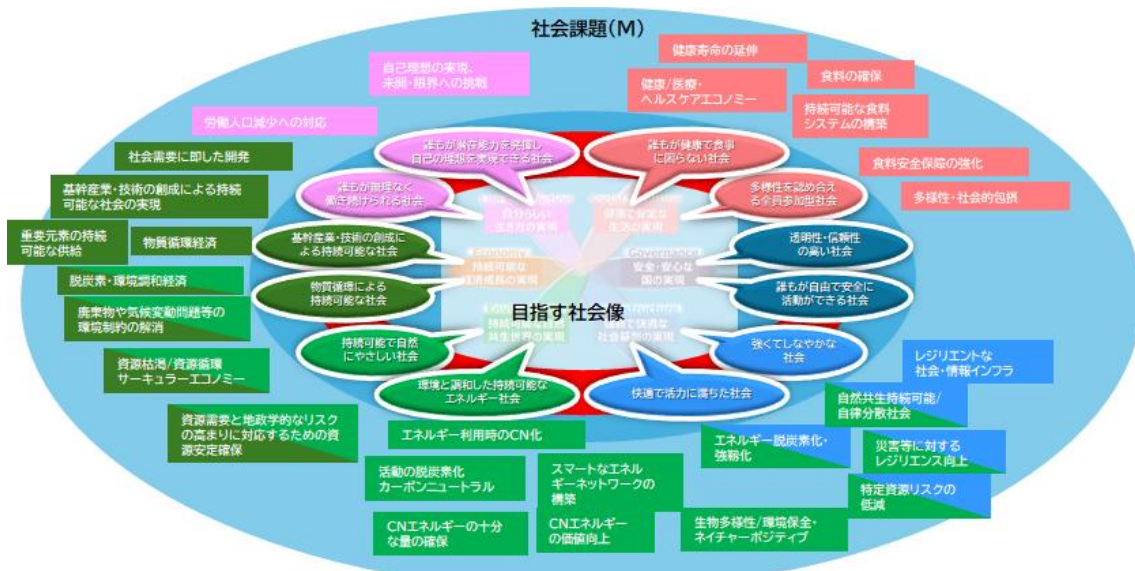


図 3-1 将来像と社会課題(M)の俯瞰図

次に、社会課題(M)を起点とするバックキャストのアプローチと、関連する技術(T)を起点とするフォアキャストのアプローチによって、機能・価値の基準で取り組むべき領域を抽出し、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。なお、増補版におけるフロンティア領域等は、Ver. 1.0 と同様に、各技術分野におけるフォアキャストを中心とした検討によ

<sup>3</sup> 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](https://www.nedo.go.jp/library/future_2.html)(2026 年 3 月閲覧)

て浮き彫りにしたものであり、社会課題を起点とするバックキャストのアプローチによる領域の抽出は、継続的な検討が必要である。

図 3-1 に対して各分野における調査・分析を通じて特定されたフロンティア領域等を、図 3-2 および表 3-1 に示す。なお、図 3-2 においては、増補版で提案する取り組むべき領域(F)を黄色のボックスで示しており、Ver. 1.0 で提案した取り組むべき領域(淡い黄色のボックス)と区別して示している。また、各ボックスの枠線の色は分野分類を示している。表 3-1 においては、増補版で提案する取り組むべき領域に下線を引いて示している。

これらの領域を実現するための具体的な手段(T)のテーマ例については、以降の節で分野ごとに述べる。

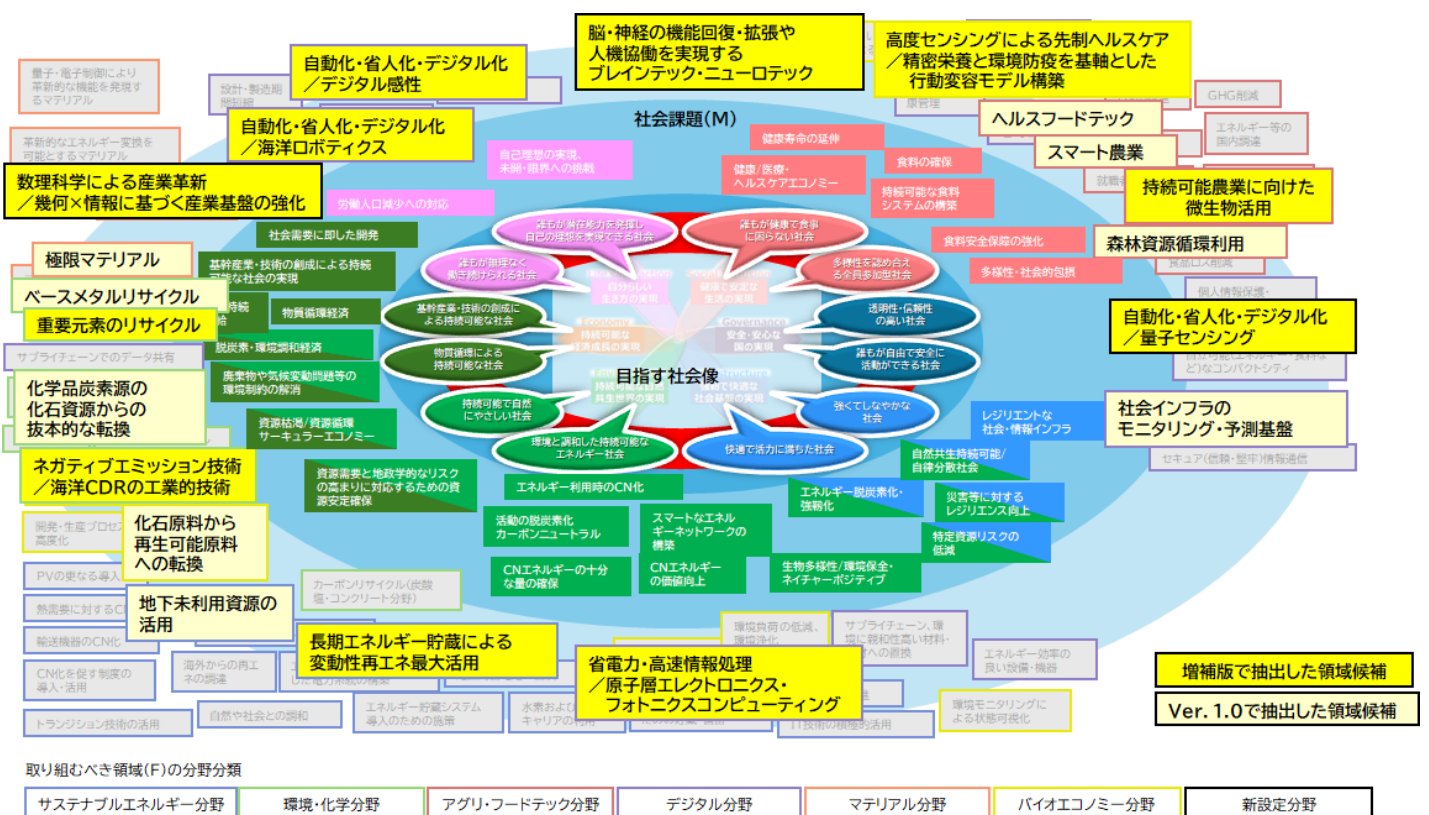


図 3-2 MF 全体俯瞰図(社会像 M→取り組むべき領域 F)

表 3-1 社会課題の解決のために取り組むべき領域(フロンティア領域等)

\*下線は増補版で提案する取り組むべき領域

分野名	領域
サステナブル エネルギー	<ul style="list-style-type: none"> <li>・短期エネルギー貯蔵による系統安全性の向上</li> <li>・定置用蓄電池の普及による昼夜の電力供給シフト</li> <li>・<u>長期エネルギー貯蔵による変動性再エネ最大活用</u></li> <li>・エネルギー貯蔵システムの広範囲での融通</li> <li>・水素および水素キャリアの利用</li> <li>・再生可能燃料の大量供給</li> </ul>
環境・化学	<p>【重要元素の持続可能な供給】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・製錬品調達先の多角化、製錬・加工技術の強化</li> <li>・備蓄、使用量削減、天然資源開発</li> <li>・<u>重要元素のリサイクル</u></li> <li>・代替素材開発</li> </ul> <p>【CO<sub>2</sub> 排出削減・除去】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・使用エネルギーの脱炭素化、最終エネルギー消費の削減</li> <li>・<u>ネガティブエミッション技術の導入</u></li> <li>・<u>海洋 CDR の工業的技術</u></li> <li>・原料転換等の非エネルギー起源の GHG 削減</li> <li>・経済合理性の確保、国際ルールと社会受容性の獲得</li> </ul>
アグリ・フードテック	<ul style="list-style-type: none"> <li>・森林資源循環利用</li> <li>・<u>持続可能農業に向けた微生物活用</u></li> <li>・スマート農業</li> </ul>
デジタル ※多数あるため 提案領域のみを 記載	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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) <u>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</u></li> <li>・<u>自動化・省人化・デジタル化(フィジカル Q・AI)</u> <u>量子センシング、海洋ロボティクス、デジタル感性</u></li> </ul>
マテリアル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・極限機能を有するマテリアル(極限マテリアル)</li> </ul>
バイオエコノミー	<p>【予防的ヘルスケア】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・定期健康診断</li> <li>・高度センシングによる先制ヘルスケア</li> </ul> <p><u>精密栄養と環境防疫を基軸とする行動変容モデル構築</u></p> <p>【治療的ヘルスケア】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・標準治療</li> <li>・精密治療</li> </ul>
新設定分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>・<u>脳・神経機能の回復・拡張や人機協働を実現する</u> <u>ブレインテック・ニューロテック</u></li> <li>・<u>数理科学による産業革新</u> <u>幾何×情報に基づく産業基盤の高度化</u></li> </ul>

## 3-1 サステナブルエネルギー分野

### 3-1-1 分野の俯瞰

エネルギーは移動や輸送、製造産業における熱や動力、人々の生活に必要な環境の維持、情報処理などで必要とされる。エネルギーは、自然界や周囲の環境に化石燃料、熱、光、風力など、様々な形態で存在している(一次エネルギー)が、これらのエネルギーを我々が便利に利用するためには、採掘等により取り出し、あるいは、目的に応じて電気やガス、ガソリン等の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に『貯める』過程や、相互に調整する『整える』過程が必要となる。そこで、この節では、『創る』『貯める』『使う』及び『整える』の四つの過程を俯瞰して議論する(図 3-1-1)。

『創る』過程には、バイオマスなどを含む火力発電、水力発電、原子力発電、地熱発電、太陽光発電(PV)、風力発電や燃料電池といった電力を得る技術に加え、熱エネルギーへの転換技術、天然ガスの採掘、水素の製造、バイオ燃料の合成といった燃料等を得る技術がある。Innovation Outlook では、近年、エネルギーの脱炭素化が大きな課題となっていることを踏まえ、再生可能エネルギー(以下「再エネ」という。)のみならず、CCS(CO<sub>2</sub>の回収・貯留)等により脱炭素化した化石エネルギーを含む持続可能なカーボンニュートラル社会の実現に貢献する様々なエネルギーを「カーボンニュートラルエネルギー(CN エネルギー)」として取り扱う<sup>4</sup>。

『貯める』過程については、電力を位置エネルギー(揚水発電など)、熱エネルギー、化学的エネルギー(蓄電池、水素をはじめとするエネルギーキャリアなど)といった別のエネルギー形態に変換して蓄え、必要に応じて電力に変換する技術がある。くわえて、変換した熱エネルギーを熱のまま利用する技術や、そもそも熱として得られる熱エネルギーを長時間保持し、必要に応じて熱や電力として利用する技術もある。

『使う』過程については、エネルギーを利用する技術全てが該当するわけであるが、持続可能なエネルギーシステムを目指す観点から、今回の Innovation Outlook では、省エネ技術(電力を利用する機器の効率向上、ヒートポンプ技術など)や、電化技術、あるいは水素等の脱炭素燃料への転換技術などに着目し、整理を行った。

『整える』過程には、エネルギーの需給のバランスを空間的あるいは時間的に調整する技術が該当し、近年注目が高まっている技術の例としては、電力であれば直流送電、調整力や系統慣性確保、エネルギーマネジメントシステムに関する技術が挙げられる。また、水素などのエネルギーキャリアの輸送技術なども含まれる。

ただし、エネルギーに関する技術は様々で、それらが四つの過程のどれか一つに分類されるとは限らない。例えば、電気分解による水素製造は、エネルギーを『創る』技術である一方で、『貯める』システムの一部となる技術でもある。また、水素輸送(『整える』過程)には、当然なが

<sup>4</sup> 脱炭素エネルギーとしては、原子力エネルギーも期待されているが、NEDO 法の規定により、NEDO では原子力関係の研究開発は実施しないこととされているため、今回の検討対象からは除外している。

ら、貯蔵技術(『貯める』過程)も不可欠となる。このように、現実のエネルギーシステムを考えた場合には、複数の過程の技術が、相互に関係している点には留意が必要である。

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』について改めて議論する。なお、残る二つの過程については将来議論する予定である。

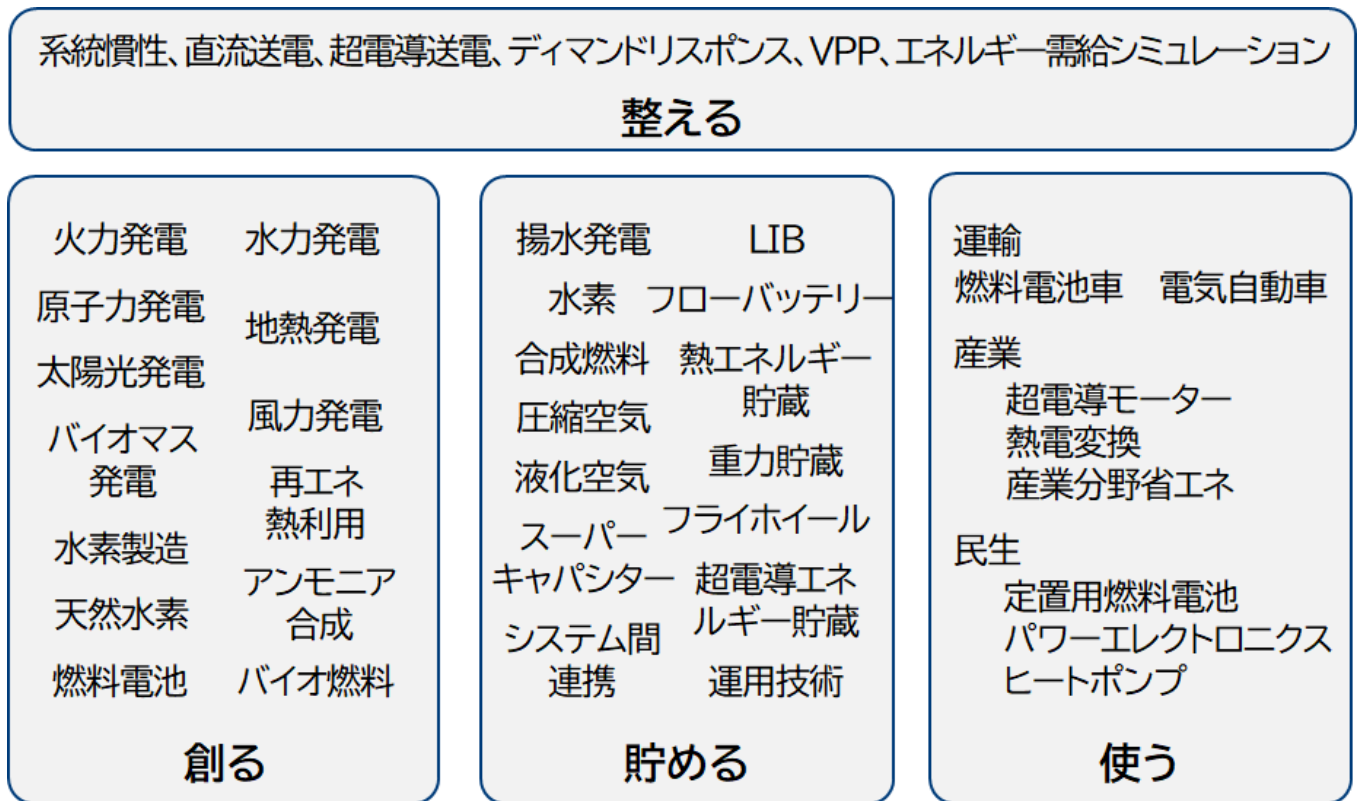


図 3-1-1 エネルギー技術の全体俯瞰図(記載の技術はあくまで例示)

### 3-1-2 解決すべき社会課題(M)

『貯める』ことが必要になっている背景には二つある。

一つは再エネの一層の導入を進めるにあたり、その変動性を克服する必要があることである。CN 社会の実現に向け、太陽光発電や風力発電といった変動性再エネ(VRE)の導入が加速している。それに伴い、新たなニーズが生じる。

図 3-1-2 は『貯める』過程、すなわちエネルギー貯蔵について、得られる出力を縦軸に、横軸にはその出力を連続して得られる時間(連続出力時間)をとり、種々のニーズを図示したものである。これまでは短時間の供給電圧の低下や停電から種々の設備を保護し運転を継続するための小規模の非常用電源、大規模災害時における社会活動継続のための事業所向け非常用電源、エネルギー安全保障リスク低減のための備蓄が主なニーズであった。

ところが、変動性再エネの導入拡大に伴い日常的な出力調整が必要となってくる。変動性再エネの出力は予測可能ではあるものの、短時間で急変することがあり、需要側との調整が難しい。特に需要が少ない時間帯に余剰電力が発生し、逆に需要が多い時間帯に供給不足が生じる問題がある。すなわち、太陽光や風力の短周期変動を平準化するための短時間の調整(秒~数時間)や、昼間の太陽光発電の余剰電力を貯め、夜間に放出するための日単位の調整(数時間~1日)が必要となってくる。

くわえて、曇天無風や台風といった再エネの発電が困難な悪天候(数日~1、2週間)への備え、季節による発電量の変動を補うための備蓄、後述の大規模災害への備えといったニーズも生じてくる。

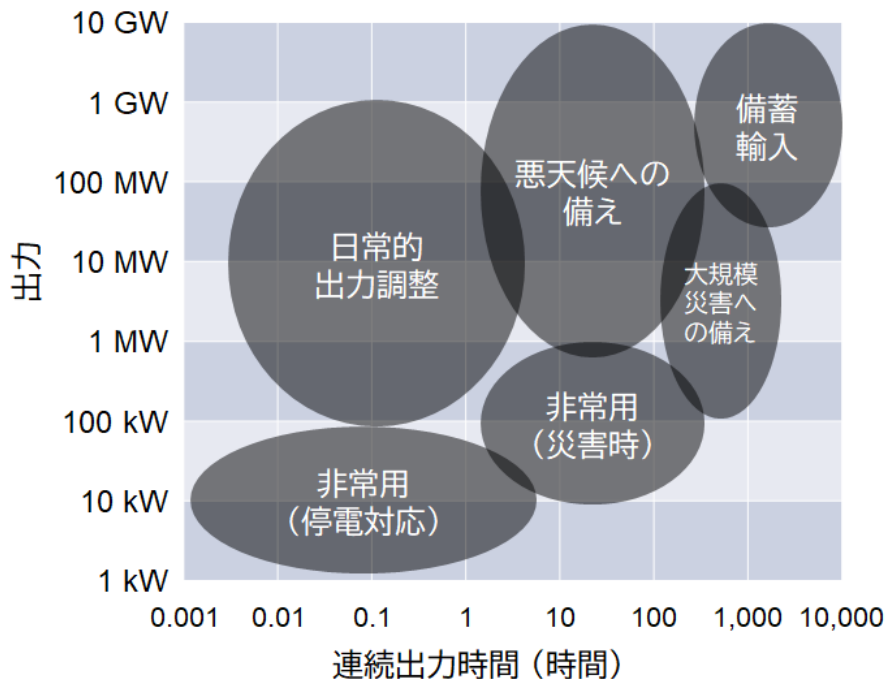


図 3-1-2 エネルギー貯蔵の社会的需要

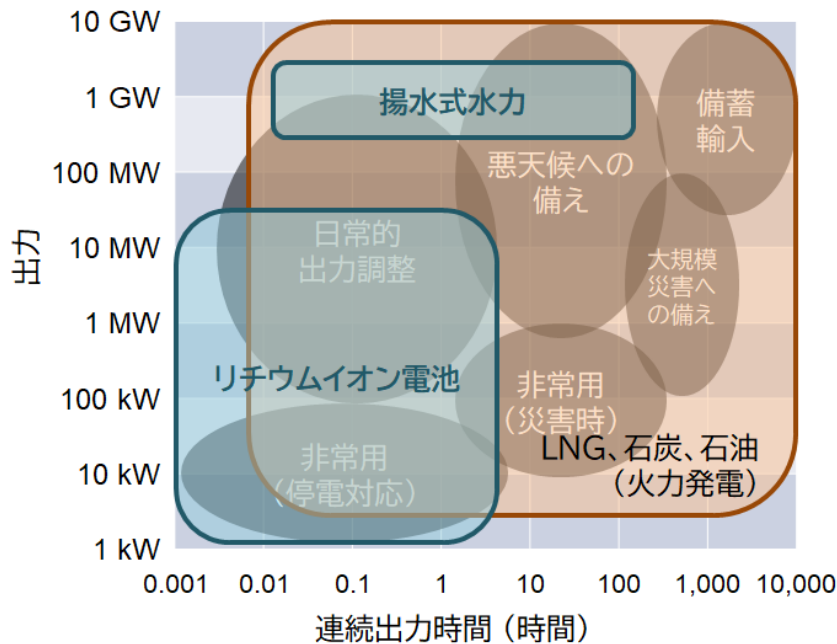


図 3-1-3 社会的需要に対する現在のエネルギー貯蔵手段

これらのうち、数 kW から GW の出力範囲、連続出力時間でいえば数分から数千時間を超える広い範囲のエネルギー貯蔵は、これまで主に天然ガス、石炭、石油といった化石燃料が担ってきた(図 3-1-3)。CN 社会においてこれら化石燃料から脱却するためには、図 3-1-3 の多様なニーズを満たす必要がある。そこには以下三つの課題がある。

### 1) 需給バランスの確保

日常的出力調整のため、揚水発電は現在、昼間の太陽光発電の余剰電力を貯め、夜間に放出する役割を担っている。しかし、その容量は現状では十分ではなく、より広範な導入が求められる。しかし、導入可能な適地は限られており、拡張に制約がある。

近年、日本でも定置用蓄電池の導入が進んでいる。しかし、蓄電池の価格が下がってきている現状を踏まえたとしても、大規模な系統運用を支えるには、膨大なコストが必要となる。安価な蓄電池についてはサプライチェーンの観点からの懸念もある。

### 2) 系統安定性の維持

電力系統は電圧や周波数を一定範囲に維持する必要があるが、変動性再エネの変動により系統が不安定になる可能性がある。CN 社会においては火力発電や揚水発電などの調整力をもつ電源には限りがあることから、そうした調整機能を強化する新たな技術の導入が求められている。

### 3) 長期的な変動への対応

季節変動を含む長期的な変動への対応には、化石燃料に代わる CN なエネルギーキャリアとして水素(液体水素やアンモニアなど)、バイオ燃料や合成燃料といった再生可能燃料の活用が期待されている。水素は燃料電池を用いた直接発電、タービンによる発電、燃焼による熱利用など多様な用途がある。しかし、製造コストの低減や輸送・貯蔵の効率向上が課題となっている。

このような課題を解決するため、新たなエネルギー貯蔵技術の活用が不可欠となっている。もう一つは、災害等に対するレジリエンスの向上や特定資源リスクの低減である。

近年、自然災害は発生頻度の増加と被害規模の拡大が同時に進行している。線状降水帯の発生により、短時間に局地的な豪雨が集中し、住宅地を巻き込む大規模な土砂災害や河川氾濫が各地で発生している。また、大型で勢力の強い台風の上陸により、送電鉄塔や配電設備が倒壊・損傷し、広範囲で長時間の停電が生じる事例も少なくない。さらに、地震による津波や地盤被害は、電力・ガス・交通といった社会インフラを同時に寸断し、避難や物資輸送、医療活動に深刻な支障を与えている。こうした災害時には、中央集約型のエネルギー供給に依存するほど復旧に時間を要する傾向がある。そこで、大規模災害への備えの観点から、太陽光発電や蓄電池、非常用電源を地域単位で分散配置し、平常時から活用しつつ、非常時にも最低限の電力を確保できる地域分散型のエネルギー環境の構築が求められている。

また、『貯める』技術を導入・維持するために必要となる資材・資源や関連製品が、特定の国や地域に強く依存している点についても懸念が高まっている。とりわけ蓄電池に不可欠なニッケル、コバルト、リチウムといった重要鉱物は、産出国が限られているうえ、地政学的リスクや資源ナショナリズムの影響を受けやすく、価格高騰や供給途絶が生じる可能性が常に存在する。実際、国際情勢の変化や輸出規制、鉱山開発の停滞などにより、調達の不確実性が顕在化する事例も見られる。こうした状況下では、設備の新設だけでなく、長期的な保守・更新が滞り、災害対応力やエネルギーの安定供給に支障を来すおそれがある。このため、サプライチェーンの多様化はもとより、代替材料の開発や蓄電池に依存しないエネルギー貯蔵・供給技術の開発や導入が必要となっている。

これらの背景を踏まえ、『貯める』に関して、『再生可能エネルギーの導入拡大・価値向上』と『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』を解決すべき社会課題に掲げることとした。

### 3-1-3 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向

#### (1) 『貯める』に係る市場動向

##### (i) 市場の年次推移・見通し

エネルギー貯蔵に関する投資額の推移を図 3-1-4 に示す。それぞれ増加している中で、揚水、水素等を除くエネルギー貯蔵の投資額がとりわけ多く、2024 年には\$60B に達し、2020 年に比べて 12 倍に増加している<sup>5</sup>。

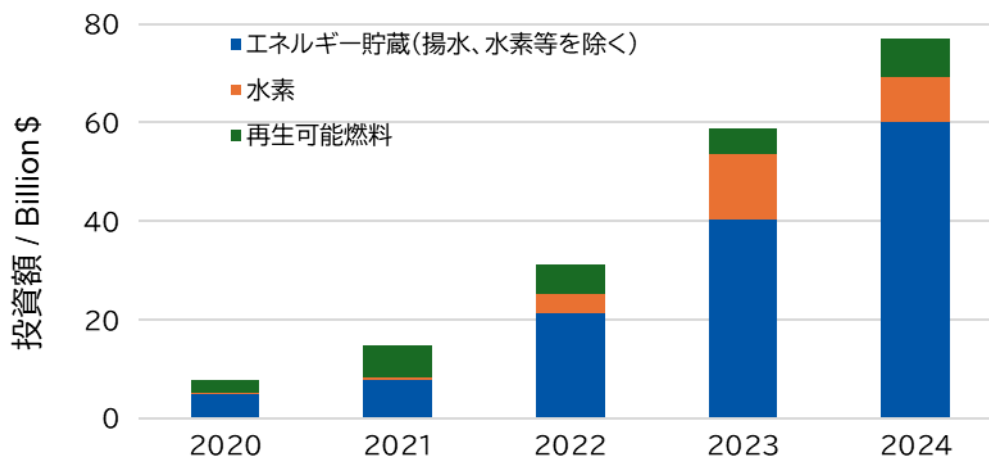


図 3-1-4 エネルギー貯蔵に関する貯蔵手法ごとの投資額の推移<sup>6</sup>

出所: BloombergNEF

世界のエネルギー貯蔵市場規模の予想は Dimension Market Research が発表している<sup>7</sup>。2024 年に\$58.9B に達する見込みで、さらに 14.8%の CAGR で成長し、2033 年までに\$204.8B の市場規模に達するとしている。

年単位の世界のエネルギー貯蔵の新規導入規模は、定格出力でみると、2025 年に 92 GW で、2035 年には 243 GW に拡大すると予測されている(図 3-1-5)<sup>8</sup>。容量 (GWh)ベースでは 2025 年に前年比 22.7%となる 247 GWh が見込まれ、2035 年には 1,033 GWh に達すると予測されている(図 3-1-6)。これは CAGR で 15.4% に相当する。

<sup>5</sup> Bloomberg NEF. Investing In the Low-Carbon Transition. Bloomberg NEF. (オンライン) <https://www.bnef.com/themes/t1ar6egoynte00?language=en> (2025 年 10 月閲覧)

<sup>6</sup> エネルギー貯蔵(揚水、水素等を除く): 定置用リチウムイオン電池、圧縮空気、フローバッテリー等、新興技術を含む。水素: 水電解装置、熱化学、パイプライン、地下貯蔵を対象として集計。

<sup>7</sup> Dimension Market Research. Energy Storage Market. (オンライン) <https://dimensionmarketresearch.com/report/energy-storage-market/#overview/> (2025 年 1 月閲覧)

<sup>8</sup> 2H 2025 Energy Storage Market Outlook (Bloomberg NEF, 2025 年 10 月) <https://www.bnef.com/insights/37795?language=en>

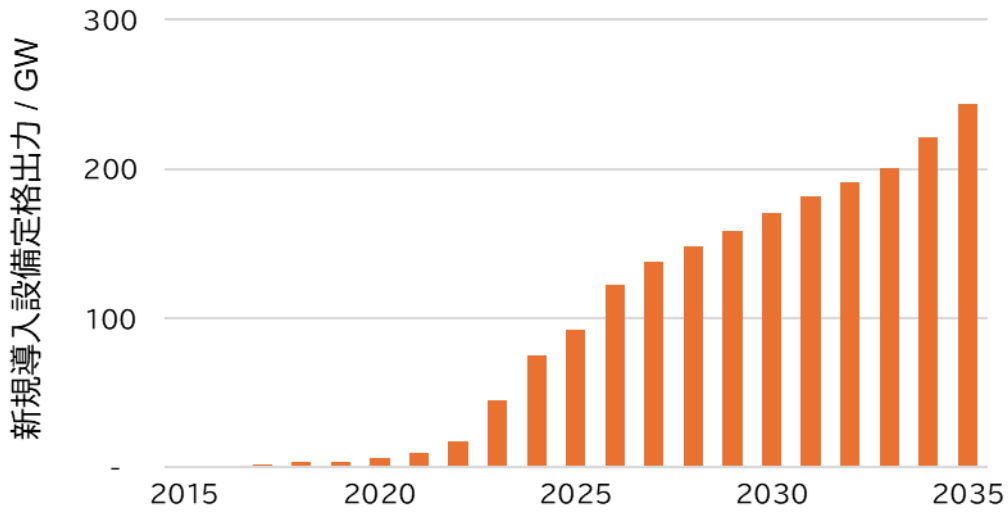


図 3-1-5 世界のエネルギー貯蔵の年間新規導入設備定格出力<sup>8</sup>

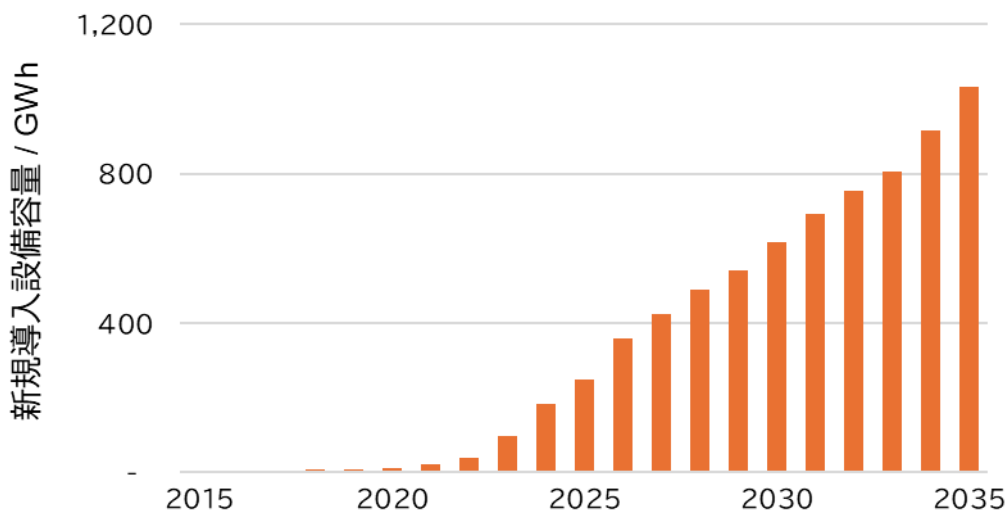


図 3-1-6 世界のエネルギー貯蔵の年間新規導入設備容量<sup>8</sup>

Bloomberg はさらに、エネルギー貯蔵のうちリチウムイオン電池(LIB)を除いたものを LDES(LDES:Long Duration Energy Storage)と定義し、その推移も発表している。それによれば、世界の LDES の新規導入設備定格出力は 2025 年にわずか 2 GW だが、2035 年には 17 GW に増加すると予想している(図 3-1-7)。容量ベースでは 2025 年に 10 GWh のところ、年平均 28.0% で成長し、2035 年には 118 GWh に達するとしている(図 3-1-8)。その結果、エネルギー貯蔵に対する割合は 2025 年の 4.0% から 2035 年には 11.4% にまで拡大する。累積では 2035 年に 718 GWh に上ると予測されている(図 3-1-9)。すなわち、エネルギー貯蔵の中でも特に LDES の成長が著しいことが分かる。

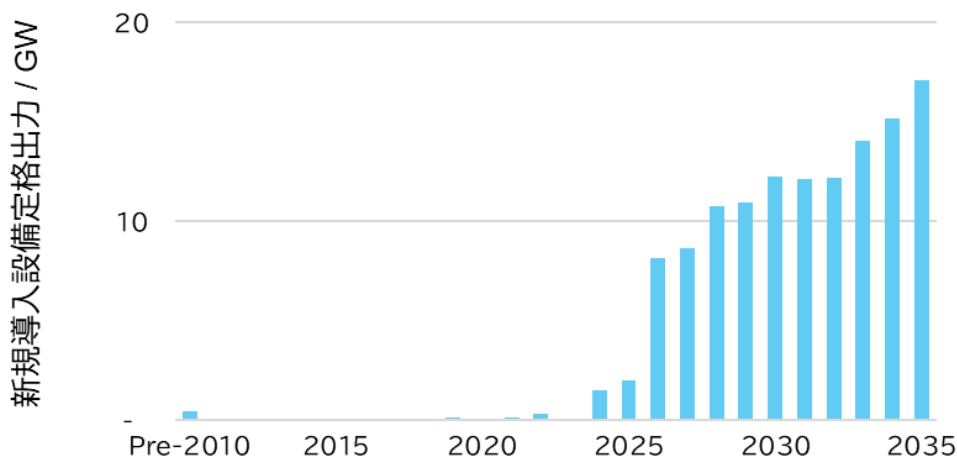


図 3-1-7 世界の LDES の新規年間導入設備定格出力<sup>8</sup>

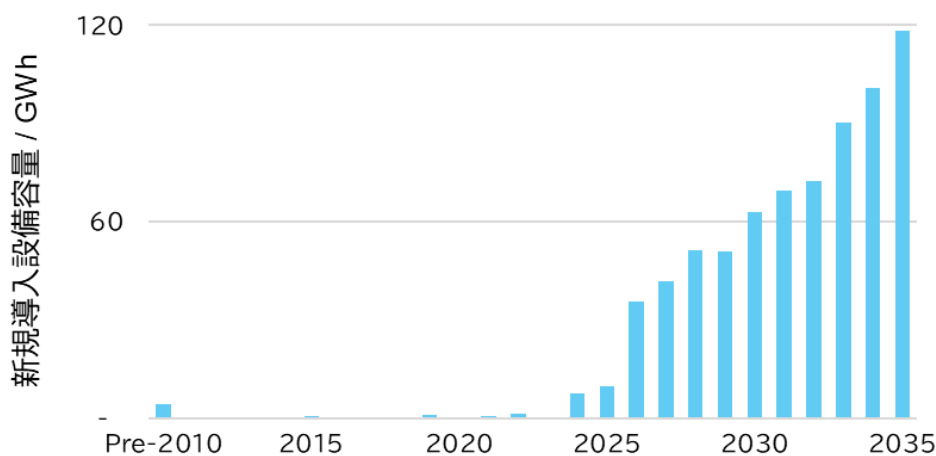
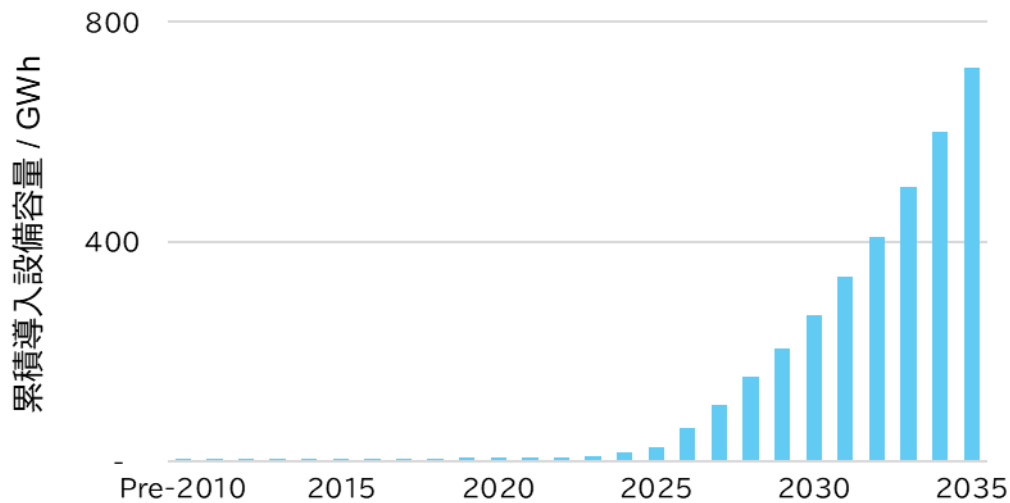


図 3-1-8 世界の LDES の年間新規導入設備容量<sup>8</sup>


 図 3-1-9 世界の LDES の累積導入設備容量<sup>8</sup>

## (ii) スタートアップの創出と投資の活況

エネルギー貯蔵の中でも LDES に関しては、2010 年代後半からスタートアップの設立が本格化し、特に再生可能エネルギーの主力電源化が進展した 2020 年前後以降、その動きが急速に活発化している<sup>9</sup>。世界的に見ると、LDES 関連スタートアップの数は 2016 年頃から増加傾向にあり、2022 年までの約 6 年間で約 45%増加したとされる。ニュースレターCTVC 及び LDES National Consortium Annual Workshop によれば、重力、熱、圧縮ガスなど電池に依存しない多様な手法を対象として多くのスタートアップが設立されていることが分かる。

これに伴い、ベンチャーキャピタルやプライベートエクイティからの資金流入も拡大し、近年で大型の資金調達を実現している。情報源の違いによる差はあるものの、2021 年を境に急増し、\$1B を超える投資を集めていることが分かる。こうした動きは、変動性再エネの大量導入を背景に、LDES が将来のエネルギーシステムに不可欠な要素として認識され始めたことを示している。

## (iii) 業界組織の設立や国際会議・展示会の活発化

エネルギー貯蔵に関する業界組織としては、EASE、LDES Council、LDES National Consortium などがある。

2011 年、ブリュッセルにて EASE(European Association for Storage of Energy、欧州エネルギー貯蔵協会) が設立されている。EASE は、エネルギー貯蔵バリューチェーン全体にまたがる約 70 の組織(電力会社、技術サプライヤー、研究機関、配電・送電事業者など)が参加する組織で、欧州におけるエネルギー貯蔵技術の導入と市場形成を主導する団体として位置づけられている。

<sup>9</sup> The long and the short of energy storage tech(Grace Donnelly, Oliver Booth, 2023)  
<https://www.ctvc.co/ldes-long-duration-energy-storage-tech/> (2026 年 3 月閲覧)

2021年にはエネルギー貯蔵の中でも長期に注目した LDES Council (LDES 協議会)が設立されている。LDES 技術企業やエネルギー関連企業、投資家など 24 社が創設メンバーとして参画し、現在は 24 か国・60 社以上が参加する非営利組織へと拡大している。

2023年にはDOEの支援によりLDES National Consortium(長期エネルギー貯蔵国家コンソーシアム)が設立されている。これは、LDES 技術の商業化を加速するための全国的な協働プラットフォームで、Sandia National Laboratories を中心とする六つの国立研究所が主導し、LDES を「10 時間以上の電力供給が可能な貯蔵技術」と位置づけている。産業界・自治体・投資家・研究機関など 200 以上の組織が”Teaming Partners”として参加し、技術開発、制度設計、投資・市場形成、系統接続、安全性など、商業化に向けた課題の整理と解決策の検討を共同で進めている。

国際会議や展示会では Energy Storage Summit、Energy Storage Global Conference、World Renewable Energy Congress(WREC)、IEEE Power & Energy Society General Meeting、LDES Expo (Shanghai International Long-Duration Energy Storage and Flow Battery Exhibition)などがあり、2020 年以降 LDES を主要テーマとしてとりあげられるようになってきている。

## (2)『貯める』に係る技術動向

### (i) 論文発表数で見る学術的動向

学術的動向の代表的な指標として Clarivate 社の Web of Science™ を用いて 2000 年から 2025 年の論文発表数について調査した<sup>10</sup>。データベースは Web of Science™ に収録されている Core Collection の中で、Document Types が Articles<sup>11</sup>と登録されているものを対象とした。検索は原則として Smart Search 機能を用い、Topics に調査対象のキーワードを入力して行った。

その結果、エネルギー貯蔵に関する論文発表数のうち、2025 年で最も多いのは水素で、次いで LDES、LIB、電磁氣的エネルギー貯蔵の順であった。ここ 10 年の伸びを見ると LDES が 4.4 倍で最も急激に増えている。LDES でエネルギーを貯蔵するときのエネルギー形態には様々なものがあるが、熱エネルギー、電気化学的エネルギー、力学的エネルギーいずれも 10 年間で約 5 倍の勢いで増加している。機械的エネルギーの手法には大きな偏りはなく、最も報告が多い圧縮空気エネルギー貯蔵(CAES)でも力学的エネルギー貯蔵全体の 8%に過ぎなかった。特定の手法に偏らず、様々な技術が検討されていることを物語っている。

論文発表数を著者の所属機関が属する国で整理すると、いずれも中国、米国が 1 位、2 位だが、LIB では日本が 4 位、水素では 3 位と上位につけている。一方、LDES に関して日本は 9 位にとどまっている。しかし、1 位との差は他のカテゴリーに比して大きく

<sup>10</sup> 検索は 2025 年 12 月～2026 年 2 月に行った。データベースは毎日のように更新されるが、2024 年以前の論文発表数についてはその影響はほとんどないと考えられる。2025 年の論文発表数については、検索のタイミングにわずかに依存する。

<sup>11</sup> Articles の他、Proceedings Paper、Early Access、Book Chapters などがある。

なく、前後の順位との差も小さい。今後の取組によっては遅れを取り返せる可能性があると考えられる。

以下にその詳細を説明する。

エネルギー貯蔵に関する論文は電磁氣的エネルギー貯蔵(Electromagnetic)、リチウムイオン電池(LIB)、水素(Hydrogen)、長期エネルギー貯蔵(LDES)の四つのカテゴリーに分類して調査した。電磁氣的エネルギー貯蔵の論文はスーパーキャパシター(supercapacitor)もしくは超電導磁気エネルギー貯蔵(SMES)のキーワードを含むものとして検索した。リチウムイオン電池(LIB)の論文はlithium batteryのキーワードで検索した。この中には一次電池や次世代のリチウム硫黄電池などもわずかに含まれるが、検索式で分離するのは複雑であることから、それらは排除しなかった。水素によるエネルギー貯蔵については水素(hydrogen)のキーワードのみで検索した。電気分解による水素製造、燃料電池、アンモニアや有機ハイドライドといったエネルギーキャリアへの変換やエネルギーキャリアからの脱水素、水素タービンのみならず、一般的な水素化・脱水素反応、水素燃焼、水素脆化など多種多様な論文が該当する。エネルギー貯蔵に直結しないものも多数含まれると思われるが、直結するか否かを個別に判断するのは困難なばかりか、恣意的と受け止められかねない。そのため、絞り込みは行わなかった。LDESはエネルギー貯蔵(energy storage)のキーワードを含み、上記の電磁氣的エネルギー貯蔵、LIB、水素に該当しない論文とした。なお、これら四つは相互に大きく異なるものの、多様な技術への適用を研究する論文や、比較検討するのが目的の総説があるため、一つの論文が複数のカテゴリーでカウントされることがある。

これら四つのカテゴリーで検索された2025年度の論文発表数の総和は約12万報であった。その内訳を図3-1-10に示す。水素に関する論文が半分以上を占める。LDES(20%)は次に多く、LIB(15%)を上回っている。図3-1-11では2015年を1として、ここ10年の増加を整理した。伸びが大きいのはLDESで、この10年間で4.4倍となっており、特に注目が集まっていることが分かる。続いて電磁氣的が3.2倍、LIBが2.6倍、水素が2.0倍であった。

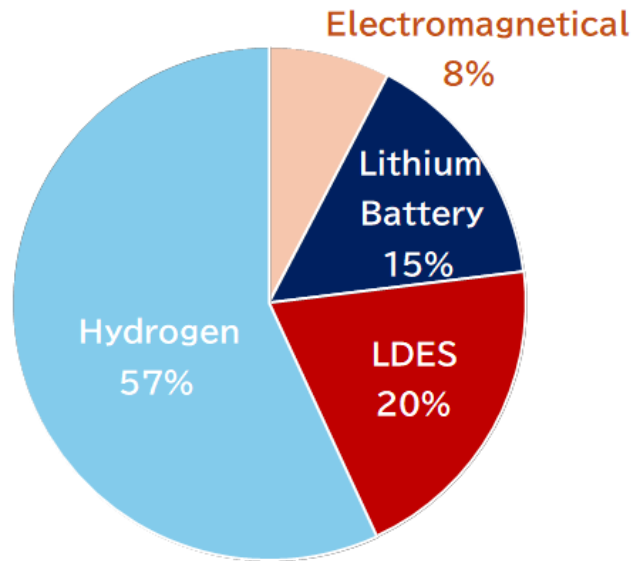


図 3-1-10 エネルギー貯蔵に関する論文発表の内訳(2025 年)

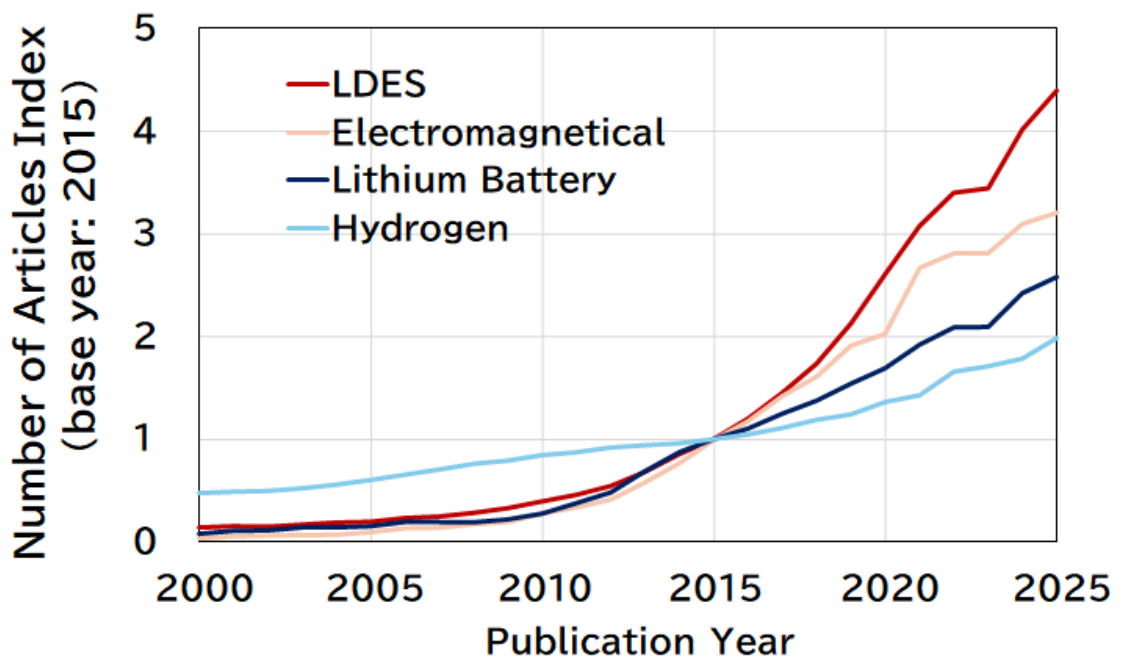


図 3-1-11 主なエネルギー貯蔵手法に関する論文発表数の推移  
(2015 年の論文発表数を 1 とした相対値)

LDES について、エネルギー貯蔵時のエネルギー形態で論文を分類すると、熱エネルギー(36%)、電気化学的エネルギー(33%)が多く、次いで力学的エネルギー貯蔵(18%)となっている(図 3-1-12)。それらの伸びは特にどれかが大きいということはなく、いずれも 5 倍程度(年あたり 17.5%増)の急成長を見せている(図 3-1-13)。

力学的エネルギー貯蔵では CAES、液化空気エネルギー貯蔵(LAES)の伸びが大きく、2025 年の論文発表数でも CAES が最大であった。しかし、全体に占める割合は CAES でも 8%であり、大きくない。多種多様な検討が進められているためであると考えられる(図 3-1-14、3-1-15)。

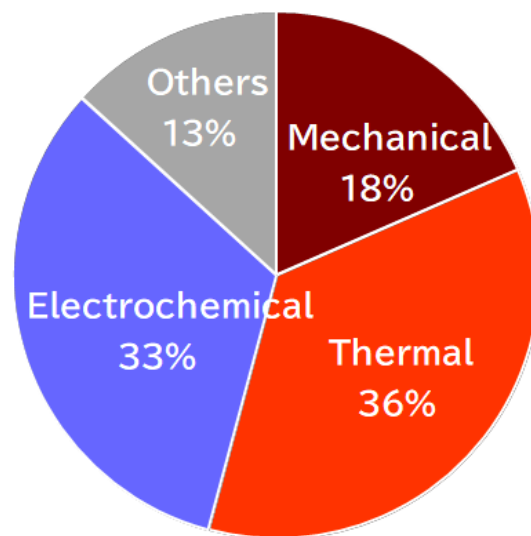


図 3-1-12 LDES に関する論文発表のエネルギー貯蔵形態ごとの内訳(2025 年)

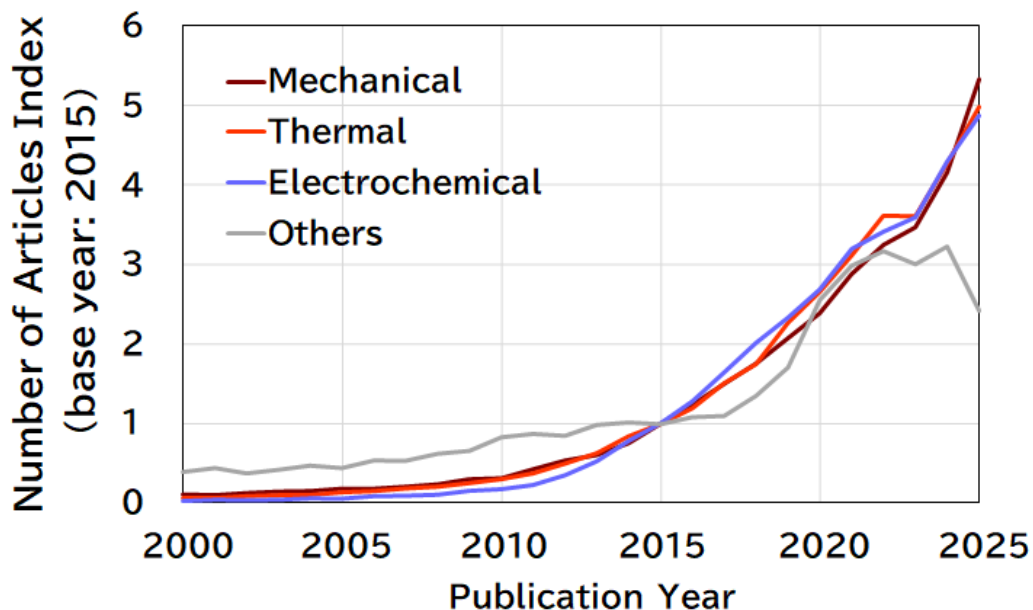


図 3-1-13 LDES の論文発表数のエネルギー貯蔵形態ごとの推移(2015 年の論文発表数を 1 とした相対値)

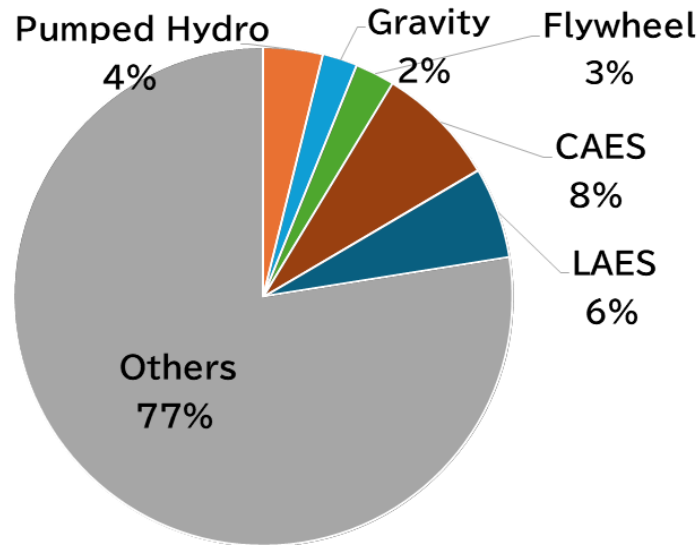


図 3-1-14 機械的エネルギー貯蔵に関する論文発表の手法ごとの内訳(2025 年)

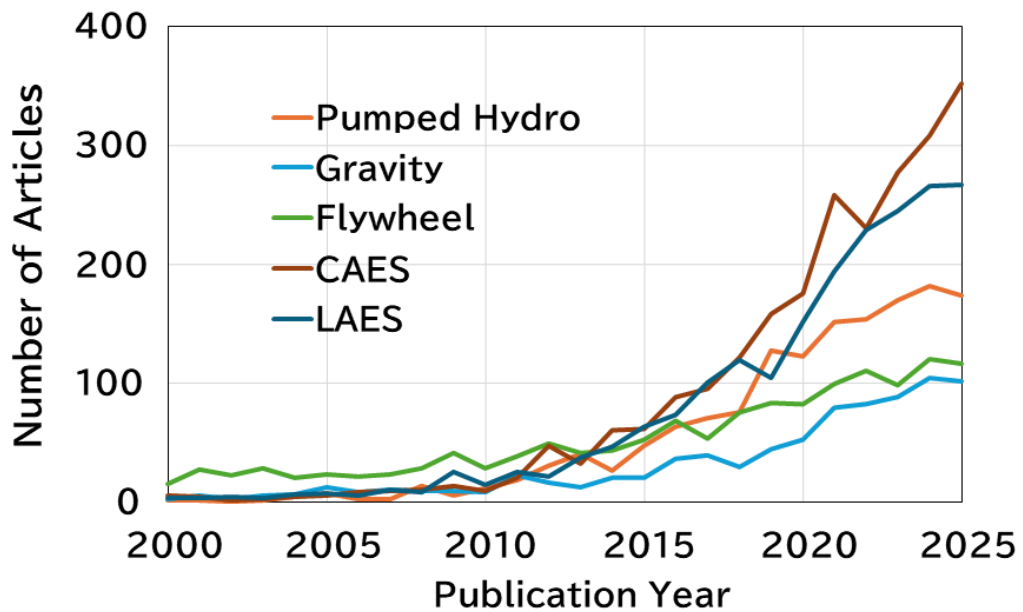


図 3-1-15 機械的エネルギー貯蔵の論文発表数の手法ごとの推移

論文発表数を国別で比較すると、LIB に関しては以前から強みがあり公的、民間を問わず多くの研究開発資金が投入されていることから、日本は、中国、米国、韓国に次ぐ 4 位につけている(図 3-1-16)。水素でも同様、日本は中国、米国に続いて 3 位となっている(図 3-1-17)。一方、LDES に関して日本は LDES で 9 位にとどまっている(図 3-1-18)。しかしながら、1 位の中国との差は LIB ほど大きくなく、くわえて、7 位のオーストラリアから 13 位のイランまでは日本との差が±10%以内と小さい。このことから、今後の取組によっては遅れを取り返せる可能性があると考えられる。

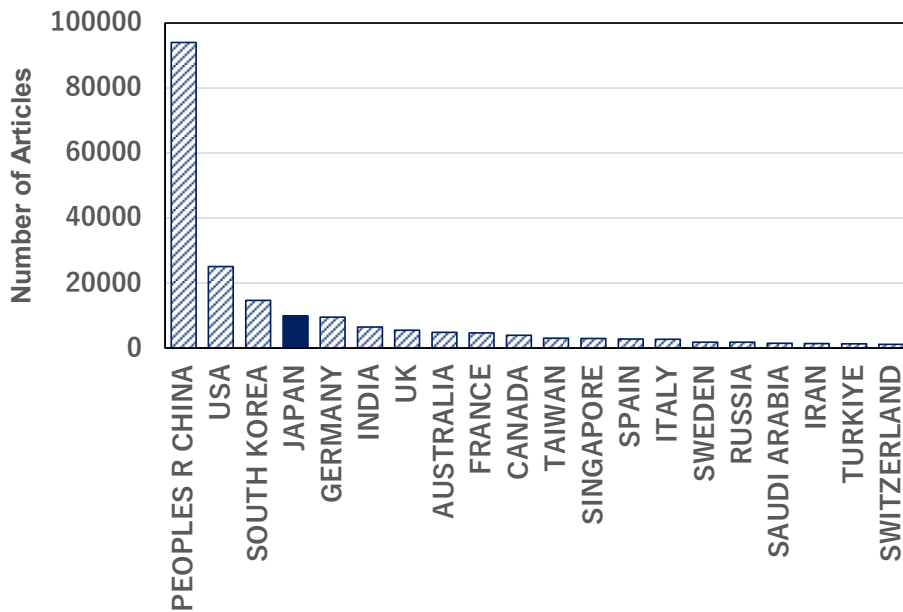


図 3-1-16 LIB に関する論文発表数の国別比較

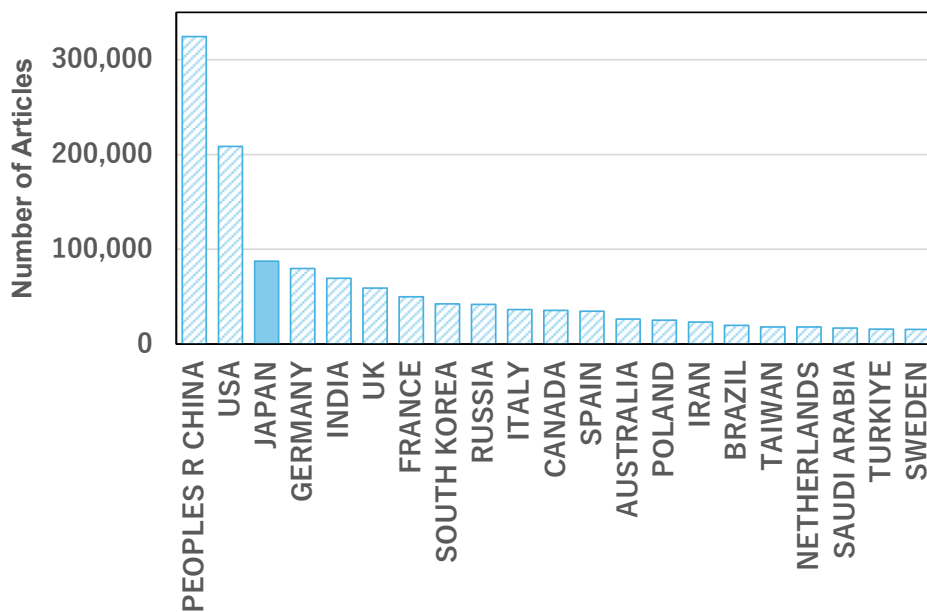


図 3-1-17 水素に関する論文発表数の国別比較

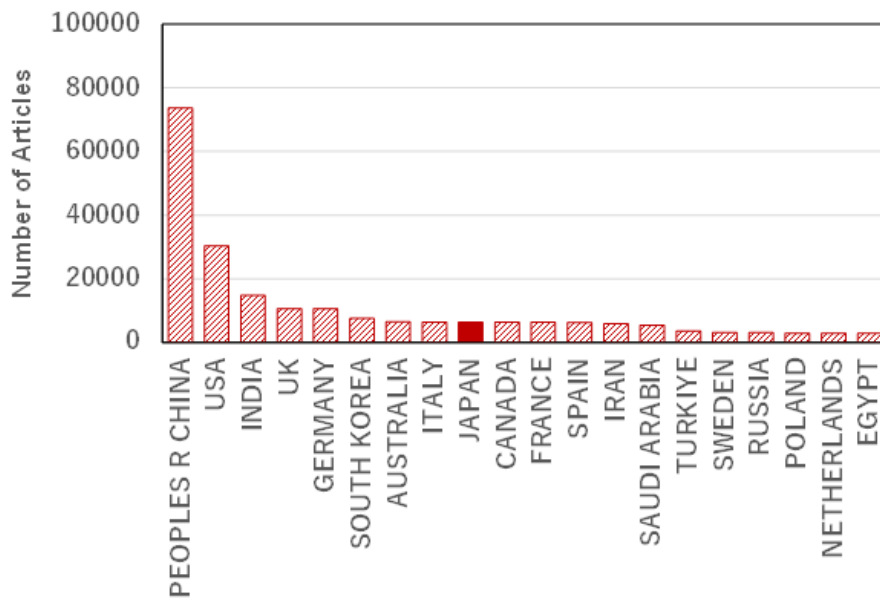


図 3-1-18 LDES に関する論文発表数の国別比較

## (ii) 研究者コミュニティの動向

IEA の TCP や 学術界の専門家による動きも活発化している。特に 2020 年以降は LDES への注目が高まっている。

IEA の Energy Storage TCP は 1975 年に発足したが、当初の主対象は揚水発電や短時間の電力調整、建築・地域向けの蓄熱などが中心であり、長期・季節間のエネルギー貯蔵は限定的な位置づけであった。しかし、2010 年代後半以降、再生可能エネルギーの主力電源化が進展し、日内調整を超えた需給ギャップへの対応が課題として顕在化したことで、LDES を明確に意識した Task が立ち上がり始めた。特に 2019 年に開始された Task36 (Carnot Batteries) は、電力を一度熱に変換して長時間貯蔵する概念を整理し、電池以外の長期貯蔵技術に注目を集める契機となった。その後、2022 年に Task42 (中時間帯貯蔵による系統柔軟性) が、2023 年には Task44 (Hi-CBest: 産業用カルノーバッテリー) や Task45 (大規模・季節間蓄熱の普及促進) が相次いで発足し、数十時間から季節単位の貯蔵を前提とした検討が本格化している。近年は、電池依存を前提としない技術群を横断的に扱う点が特徴となり、LDES は Energy Storage TCP の中核的テーマの一つとして急速に存在感を高めている。

IEEE Power & Energy Society General Meeting では 2024 年以降、長期エネルギー貯蔵 (LDES) を明示的に扱うパネルが設けられている。LDES の経済性、技術特性、市場・制度面での課題が体系的に議論されている。これは、LDES が学術的・技術的にも電力システム設計上の重要要素として認識され始めたことを示している。

こうした海外の動きに合わせ、国内学会でも動きが見られている。

日本機械学会では、2021 年に動力エネルギーシステム部門に「カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会」が設置され、電池に限定されない長期エネルギー貯蔵を含むエネルギーストレージの体系的検討を開始した。2023 年以降は、動力・エネ

ルギー技術シンポジウム等の定期的な講演会において、エネルギー貯蔵を明示的に含むオーガナイズド・セッションが拡充され、LDES が次世代エネルギーシステムの構成要素として議論されるようになった。これらの活動を背景に、2024 年には学会として「カーボンニュートラル達成に向けたエネルギーストレージベストミックスのための提言」が公表され、長時間エネルギー貯蔵の重要性が公式に位置づけられた。

電気化学会主催の電池討論会では、2023 年頃から、車載用途中心の高エネルギー密度電池に加え、定置用・長時間放電を意識したフロー電池やナトリウム系、金属空気電池等に関する発表が増加し、安全性や寿命、資源制約の観点から LDES 的価値が重要な評価軸として定着しつつある。一方、日本エネルギー学会では、2024 年以降、学会誌や大会特集において系統安定化や再生可能エネルギー主力化を支える長期エネルギー貯蔵が明示的に取り上げられ、電力・熱・燃料を横断した社会実装課題として議論が深化している。これらの動きは、LDES が個別技術を超えた横断的テーマとして国内学会に定着しつつあることを示している。

化学工学会では、エネルギー部会を中心に、2022 年頃から蓄熱や化学蓄熱、熱輸送、物質変換を伴うエネルギー貯蔵が体系的に議論されている。2024 年以降は「エネルギー貯蔵セミナー」や部会横断型シンポジウムが新設され、電池に依存しない長時間エネルギー貯蔵(LDES)を支える材料・プロセス・システムの研究が社会実装を意識して扱われている。

### (iii) 海外スタートアップの先進的な取組

ここでは、変動性再生可能エネルギーの大量導入を支える長期エネルギー貯蔵(LDES)に関する海外の先進的な取組を俯瞰する。近年注目を集める LDES 技術は、方式や形態こそ多様であるものの、共通して「低コストで大容量のエネルギーを長期間貯蔵する」ことを強く志向している点に特徴がある。その実現に向け、多くの技術が高効率や高性能を闇雲に追求するのではなく、汎用材料や既存インフラの活用、出力部と容量部を分離した構造設計、長寿命・低劣化といった割り切った設計思想を採用している。これにより、希少資源や高価な専用部材への依存を抑えつつ、貯蔵容量の拡大に伴う kWh 当たりコストの低減を図っている。こうした LDES は、短時間調整を担う蓄電池とは競合するものではなく、数日から季節単位の需給ギャップへの対応や、極端気象・災害時のレジリエンス確保といった役割を補完的に担う技術として位置づけられる。以下に紹介する事例は、LDES が単一の解ではなく、将来のエネルギーシステムにおいて用途や立地条件に応じて組み合わせられる技術群であることを示している。

#### a) ENERGY VAULT の G-VAULT™(重力貯蔵)<sup>12</sup>

ENERGY VAULT は、スイス及び米国に拠点を有するスタートアップ企業であり、重力を利用した長期エネルギー貯蔵技術「G-VAULT™」を開発している。同技術は、コンクリートまたは複合素材で作られたブロックを、余剰電力を用いてクレーンで高所に積み

<sup>12</sup> <https://globe.asahi.com/article/15410315> (2026 年 3 月閲覧)

上げ、電力需要時にこれらを降下させることで発電する重力エネルギー貯蔵システムである。中国国家エネルギー局が主導する「新エネルギー貯蔵実証実験事業」の一環として、中国上海郊外の江蘇省如東市に建設され、地域送電網と接続された世界初の商用重力蓄電施設として、2024年5月に試運転に成功した。本システムは、定格出力25MW、蓄電容量100MWh(将来的には3.7GWhまで拡張予定)を有し、高さ120mの構造体で構成される。往復エネルギー効率は80%超、運用期間は35年を想定している点の特徴である。さらに、AIと高度なソフトウェアを活用した複数クレーンの協調制御(群制御)技術に強みを持ち、2024年にはTimes誌の「THE BEST INVENTIONS OF 2024」に選出されるなど、国際的にも注目を集めている。

### b) Gravitricity の GraviStore™(重力貯蔵)<sup>13</sup>

Gravitricityは、英国エディンバラに拠点を置くスタートアップ企業であり、重力を利用した長期エネルギー貯蔵技術「GraviStore™」を開発している。同技術は、鋼鉄ケーブルで吊り下げた重りを上下させることで電力を貯蔵・放出する重力エネルギー貯蔵システムであり、特に坑道や鉱山ホイストなどの既存採掘インフラを再利用できる点に特徴がある。2021年には、エディンバラのリース港において高さ15mの試験用リグを用いた250kW規模の系統接続型実証プロジェクトを実施し、25トンの重り2基を用いた発電に成功した。本システムは、オンデマンドで1秒未満の応答が可能であり、周波数調整など高速な系統安定化用途への適性も有している。また、複数の重りを連続的に降下させる独自の制御技術により、従来モデルと比べて発電量を約8倍に拡大するとともに、コストを最大50%削減できる可能性を示した。これにより、低コストかつ柔軟性の高い長期エネルギー貯蔵技術として注目を集めている。

### c) Energy Dome の CO<sub>2</sub> Battery(圧縮ガス貯蔵)<sup>14</sup>

Energy Domeは、イタリア・ミラノに本社を置き、米国マサチューセッツ州などにも拠点を有する2020年創業のスタートアップ企業であり、二酸化炭素を作動流体として用いる長期エネルギー貯蔵技術「CO<sub>2</sub> Battery」を開発している。同技術は、余剰電力を用いてドーム型ガスホルダー内のCO<sub>2</sub>を圧縮・液化して貯蔵し、電力需要時には蒸発・膨張させてタービンを回すことで発電する圧縮ガス型のLDESである。往復エネルギー効率は75%以上、耐用年数は30年以上とされ、設備投資額はリチウムイオン電池の約0.6倍に抑えられる点の特徴である。設置面積は200MWhで5haと説明されている。

2022年にはイタリア・サルディニア島において、世界初となる商用規模(20MW/200MWh)のCO<sub>2</sub> Batteryを設置したほか、米国ウィスコンシン州ではDOEの支援\$30Mを受けた同規模プロジェクトが進行している。Breakthrough Energyやジャパンエナジーファンドなどが出資し、米Alliant Energyや伊ENGIE、印NTPCとい

<sup>13</sup> <https://gravitricity.com/gravistore-projects/> (2026年3月閲覧)

<sup>14</sup> <https://energydome.com/co2-battery/> (2026年3月閲覧)

ったエネルギー事業者との契約実績も有するなど、国際的な事業展開が進んでいる。2025年10月には日揮が日本市場での協業検討を目的としたMOUを締結している<sup>15</sup>。

#### d) Antora Energy(熱エネルギー貯蔵)<sup>16</sup>

Antora Energyは、米国を拠点とするスタートアップ企業であり、高温熱エネルギーを利用した長期エネルギー貯蔵技術を開発している。同社の技術は、安価で豊富に入手可能な炭素ブロックに電力を直接通電することで熱エネルギーとして蓄える点に特徴があり、従来の蓄熱技術では材料制約などから約600℃が上限とされてきたのに対し、最大で約2400℃という極めて高温でのエネルギー貯蔵を可能としている。この結果、体積当たりのエネルギー密度は一般的な蓄電池の約4倍に達するとされている。貯蔵した熱はそのまま利用するほか、熱光起電力(TPV: Thermophotovoltaic)半導体を用いた電力化も検討している。独自に技術を有するTPV半導体のエネルギー変換効率は約40%と世界最高水準を達成している。高価な材料や複雑な構造に依存せず、炭素というコモディティ素材と高温動作という一つの技術的ブレークスルーを組み合わせることで、大規模化と低コスト化の両立を目指しており、産業用途を含む長期エネルギー貯蔵技術として注目を集めている。

#### e) Polar Night EnergyのSand Battery(熱エネルギー貯蔵)<sup>17</sup>

Polar Night Energyは、フィンランドを拠点とするスタートアップ企業であり、砂や類似の固体材料を用いた熱エネルギー貯蔵技術「Sand Battery」を開発している。同技術は、余剰電力を用いて砂を高温に加熱し、その熱を長期間蓄え、必要に応じて産業用途や地域暖房向けに供給するものである。フィンランドのカンカーパーに設置された実証設備では、加熱出力200kW、蓄熱容量8MWhの砂電池が2022年から稼働している。また、Loviisan Lämpö社と共同で、100MWh規模の砂電池を2025年夏に完成させるなど、商用規模への展開も進んでいる。蓄熱媒体としては、地元産の天然砂に加え、セラミック製造時に生じる副産物であるソープストーンを活用するなど、資源制約の小さい材料選定が特徴である。さらに、高さ14m、幅15mのコンテナ型構造を採用し、1か月以上のエネルギー貯蔵を可能とする点や、地域暖房ネットワークへの熱供給に加え、フィンランドの送電事業者Fingridが運営する予備電力市場や需給調整市場にも参加可能な規模を有する点から、大規模かつ実用的な長期エネルギー貯蔵技術として注目されている。

<sup>15</sup> 日本市場に「CO2 バッテリー」、日揮と伊企業が協業検討(日経BPニュース 2025/11/5)  
<https://project.nikkeibp.co.jp/ms/atcl/19/news/00001/05393/?ST=msb> (2026年3月閲覧)

<sup>16</sup> 【新金脈】アメリカで見た、未来の電池がすごい(NEWSPICKS、2023年4月)  
<https://newspicks.com/news/8325376/body/> (2026年3月閲覧)

<sup>17</sup> Solution for clean energy's big problem (Polar Night Energy、2025)  
<https://polarnightenergy.com/reference/solution-for-clean-energys-big-problem/> (2026年3月閲覧)

#### f) Quidnet Energy(揚水発電)

Quidnet Energy は、米国を拠点とするスタートアップ企業であり、地下地層を活用した揚水発電型の長期エネルギー貯蔵技術を開発している。同社の技術は、地層中に水を通さない「レンズ層(lens)」を人工的に形成し、余剰電力を用いて地上のため池の水を加圧して地下に送り込み、レンズ層下部に水を貯蔵するものである。電力需要時には、井戸のバルブを開放して圧力を解放し、地上に戻る水でタービンを回して発電する仕組みとなっている。米国 ARPA-E の DAYS プログラムにおいて成果を挙げており、現在は商品化に向けた開発段階にあるとされる。コスト面では、従来の揚水発電や蓄電池と比較して約半分のコストでの実現を目指しており、発電コストは 5 セント/kWh を目標としている。1 か所あたり 1~10MWh 規模の貯蔵能力を有し、充放電の繰り返しによる劣化が小さい点や、米国内に広範な導入ポテンシャルがあるとされている点から、地理的制約の少ない長期エネルギー貯蔵技術として注目されている。

#### g) Renewell の Gravity Well(重力貯蔵)<sup>18</sup>

Renewell は、米国を拠点とするスタートアップ企業であり、使用されていない石油・ガス井を活用した重力型エネルギー貯蔵技術「Gravity Well」を開発している。同技術は、休止した井戸内に長い円筒形の錘を設置し、余剰電力を用いて錘を巻き上げることで位置エネルギーとして電力を貯蔵し、需要時には錘を降下させて発電する仕組みである。米国の石油・ガス井の平均深度は約 5,200 フィート(約 1,600m)とされており、この深さを活用することで、1 井戸当たり 40~500kWh 規模の電力供給が可能とされている。既存の掘削済みインフラを再利用する点に大きな特徴があり、資本コストは約 5 ドル/kWh、均等化貯蔵コスト(LCOS)は 0.063 ドル/kWh と、低コストな長期エネルギー貯蔵の実現が期待されている。米国及びカナダには 260 万本を超える利用可能な井戸が存在するとされ、地理的制約が小さく、大規模な展開ポテンシャルを有する点から、資源循環とエネルギー貯蔵を両立する LDES 技術として注目されている。

#### (iv) 国内の取組

短期のエネルギー貯蔵としては、NEDO 超電導応用基盤技術研究開発などにおいて SMES に関する大規模な研究開発に取り組んできた。

蓄電池に関しては、NEDO において次世代全固体蓄電池材料評価・基盤技術開発(SOLID-Next)、電気自動車用革新型蓄電池開発 RISING3 やグリーンイノベーション基金事業次世代蓄電池・次世代モーターの開発などにおいて大規模に研究開発に取り組んでいる。文部科学省においては JST 革新的 GX 技術創出事業において蓄電池領域を設定して次世代の電池開発に取り組んでいる。

水素に関しては 1974 年に発足したサンシャイン計画の時から主要な研究テーマで、水素吸蔵合金や燃料電池を中心に長期的かつ大規模に取り組んでいる。近年はグリーンイノベーション基金事業において、大規模水素サプライチェーンの構築、製鉄プロセ

<sup>18</sup> Oil Wells That End Well(Renewell) <https://renewellenergy.com/>(2026 年 3 月閲覧)

スにおける水素活用、再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造、燃料アンモニアサプライチェーンの構築などに取り組んでいる。

一方で長期エネルギー貯蔵をまとめた研究開発プロジェクトはない。レドックスフロー電池は 1980 年代にムーンライト計画で電池技術の一つとして研究が開始されたものである。現在実用化しているものの、バナジウム電解液の低コスト化やサプライチェーンリスクが課題として残っており、大規模な普及には至っていない。CAES については神戸製鋼所が NEDO「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」(2014～2018 年度)のもとで静岡県河津町に建設しているが、実用化に至っていない。

こうした中、近年、LDES に関して新たな技術が芽生えつつある。以下に国内企業の公表されている取組の例を紹介する。海外スタートアップの取組と同様、単純に高効率や高性能を追求するのではなく、既存インフラの活用や、利用環境に応じた必要な性能の見直しなどを通じて、LDES 実用化に不可欠な経済性の解決に挑んでいる。現時点で長期エネルギー貯蔵の技術開発の受け皿がないため、企業等の事業者は NEDO 先導研究プログラムや環境省事業などの幅広い公募枠に申請し、一部の事業者のみ予算を獲得しているのが現状で、未公表の多様な LDES 技術が企業の中で検討されていると考えられる。

#### a) 清水建設の Hydro Q-BiC(水素吸蔵合金)<sup>19</sup>

清水建設は、通常は重量がネックとなり利用範囲が限定される水素吸蔵合金を、建物内であれば重量制約が比較的緩い点に着目し、再生可能エネルギー由来の余剰電力で水素を製造し、安全に蓄えるエネルギー貯蔵システムを構築している。水素を高圧で保持しないため高圧ガス保安法の適用を受けず、建物内でも柔軟に設置できる点が特長である。必要時には燃料電池で発電し、スマート BEMS (ビルエネルギーマネジメントシステム)により最適制御された電力を供給する。2019～2021 年に郡山市総合地方卸売市場で 14 kW の実証を行い、2021 年 5 月からは北陸支店で 100 kW システムを稼働させている。

#### b) 住友重機械工業の LAES<sup>20</sup>

住友重機械工業は、LAES 技術を活用した LDES システムの商用運転を、2025 年 12 月 1 日に開始した。本システムは広島ガスと連携し、広島ガス廿日市工場内に建設されたもので、液化空気の生成時に LNG 冷熱を利用して充電効率を高める”世界初”の商用運転事例である。規模は 5 MW×4 時間の貯蔵(充電 4 MW)で、空気を液化して貯蔵し、需要時に気化・膨張させて発電する仕組みを採用している。LAES は大規模化が容易で、立地制約が比較的小さいという特長をもつ。

<sup>19</sup> NEDO 長期エネルギー貯蔵(LDES)ワークショップ 講演 7(2025 年 8 月 7 日)  
<https://www.nedo.go.jp/content/800031038.pdf>(2026 年 3 月閲覧)

<sup>20</sup>住友重機械工業 <https://www.shi.co.jp/info/2025/6kgpsq000000o62f.html>  
<https://www.shi.co.jp/products/energy/cryobattery/index.html>(2026 年 3 月閲覧)

### c) 東芝の岩石蓄熱

東芝は、電力需給調整に貢献するため、国内初となる岩石蓄熱設備(500 kWh)を設置し、熱挙動特性の評価手法を確立して、熱エネルギーを高効率に制御可能なシステムを開発している。環境省の令和 6 年度「地域共創・セクター横断型カーボンニュートラル技術開発・実証事業」に採択され、2025 年度末までに機器を製作し、2026 年より新東海製紙工場で実証試験を実施する予定である。

## (3)『貯める』に係る政策動向

2024 年 COP29 で発表された「世界エネルギー貯蔵・送電網誓約(Global Energy Storage and Grids Pledge)」では、2030 年までに世界全体で 1,500GW のエネルギー貯蔵定格出力を確保するという野心的な目標を掲げ、再生可能エネルギーの安定供給に向けた国際的な連携が加速している。これにより、各国は長期エネルギー貯蔵(LDES)を含む多様な技術の導入を急ピッチで進めている。

特にアメリカや中国、欧州主要国では、再エネ導入の急拡大に伴う再エネ出力変動や出力抑制への対応として、10 時間以上の蓄エネルギーを可能とする LDES の導入目標や制度整備、補助金制度、研究開発支援が体系的に進められている。トランプ政権の影響を注視する必要があるが、例えば、アメリカのカリフォルニア州では 2030 年までに 15GW の LDES 導入目標を掲げ、ニューヨーク州やバージニア州なども GW 単位の導入目標を設定している。

一方で日本は、2030 年までに蓄電池導入量 24 GWh という設備容量の目標を掲げているものの、定格出力(GW)の明確な目標は未設定であり、おもに系統用蓄電池に対し政府が導入支援を行っている状況である。国内では、『貯める』価値の社会実装については、市場原理にゆだねられているため、欧米諸国に比べて投資が進まないといった印象が否めない。

再エネの大量導入に伴う出力抑制や需給ギャップの拡大が国内でも顕在化しつつある中、長時間貯蔵技術の社会実装に向けた明確なロードマップと制度的支援の強化が急務となっている。

以下にその詳細を説明する。

### (i) 国際的な導入目標

COP29(2024 年 11 月 アゼルバイジャン)で発表された「世界エネルギー貯蔵・送電網誓約(Global Energy Storage and Grids Pledge)」では、再生可能エネルギーの導入を加速させるため、エネルギー貯蔵に関し次の目標が掲げられている<sup>21</sup>。

#### 1) エネルギー貯蔵容量の拡大

- ・ 2030 年までに世界全体で 1,500 GW(2022 年比 6 倍)のエネルギー貯蔵容量を目指す。
- ・ 対象はバッテリーだけでなく、揚水発電、熱エネルギー貯蔵、グリーン水素など多様な技術。

<sup>21</sup> <https://cop29.az/en/pages/cop29-global-energy-storage-and-grids-pledge> (2026 年 3 月閲覧)

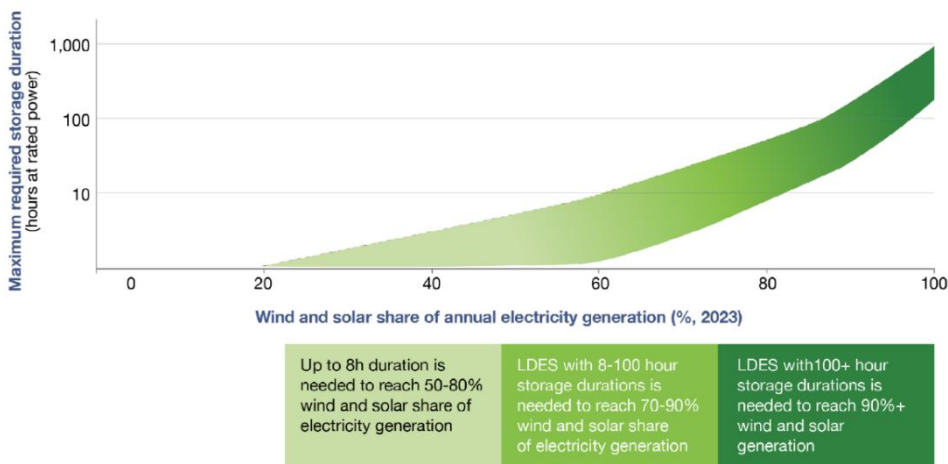
その他、2)送電網の拡張・改修、3)再エネ3倍目標との連携、4)国際協力と投資の促進と続く。この誓約には米国、EU、中国、インド、日本など多くの国が賛同しており、どの国もそれぞれの事情に合わせ、未来のエネルギー社会に向けて行動している。

## (ii) 各国の政策

太陽光発電や風力発電を中心とした、変動性再生可能エネルギー(VRE:Variable Renewable Energy)は発電量が天候に左右されるため、従来の火力発電のような需要変動に併せて出力を調整することができない。このことから、脱炭素化を目指しつつ、電力安定供給を実現するため、エネルギー貯蔵技術の社会実装ニーズが高まっている。変動性再エネの導入が進むにつれて必要となるエネルギー貯蔵の時間が増加し、変動性再エネによる電力供給が全体の70~90%に達すると、8時間から10時間の長期エネルギー貯蔵が必要になるとの報告がある(図3-1-19)<sup>22</sup>。

このため、諸外国では再生可能エネルギーの導入を主な背景に、LDESの導入目標の設定や開発支援が実施されている。

Illustration of how storage duration needs increase with greater VRE integration<sup>m</sup>



Source: Depicted from Albertus, P., Manser, J. S., & Litzelman, S. (2020). Long-duration electricity storage applications, economics, and technologies. *Joule*, 4(1), 21-32. ;

図 3-1-19 変動性再エネの電力割合増加に伴って必要となる貯蔵時間<sup>22</sup>

### a) 各国の LDES 導入状況

LDES Council の 2024 Annual report によると、各地域における LDES の導入状況は図 3-1-20 のとおりである。LDES 技術プロジェクトは、北米、中東、欧州、オーストラリアに集中しており、特に北米と欧州がこの分野で先進的に進んでいる。中東では、新たに電気化学的貯蔵設備の導入が増加すると予想されているが、オーストラリアと北米は、それぞれ約 80%と 50%が機械的貯蔵になると予想されている<sup>22</sup>。アジアでは、中国が圧縮空気やフロー電池技術を含むプロジェクトを展開している。

<sup>22</sup> 2024 Annual Report(Long Duration Energy Storage Council, 2024)  
<https://solarvision.org/wp-content/uploads/2024-09-long-term-storage2024.pdf> (2026年3月閲覧)

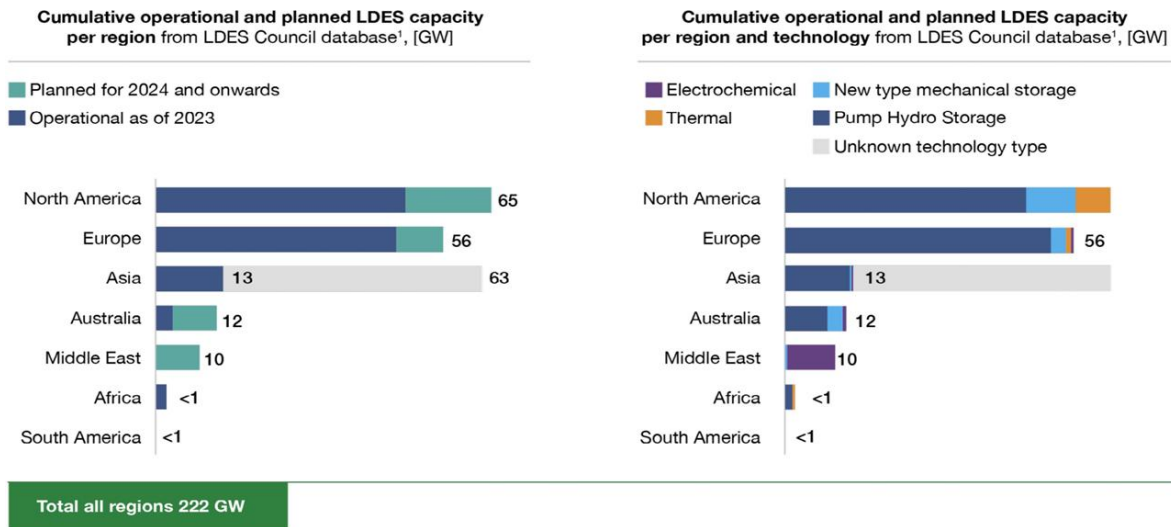


図 3-1-20 各地域における LDES の導入状況<sup>22</sup>

こうした中、2024 年以降、中国の設備導入が相次いで発表され、注目を集めている。前述の ENERGY VAULT が江蘇省で試運転に成功した重力エネルギー貯蔵はその一つである。

中国では近年、新型エネルギー貯蔵設備の導入が急速に進展している<sup>23</sup>。2024 年末時点で運転を開始した新型エネルギー貯蔵設備は 74GW/168GWh に達し、世界全体の設備容量の 40%超を占める規模となった。第 14 次五か年計画開始以降、その規模は約 20 倍に拡大し、年平均成長率は 130%を超えている。導入技術も多様化しており、電気化学的貯蔵に加え、圧縮空気エネルギー貯蔵、蓄熱利用、フライホイールなど複数の技術ルートが並行して展開されている。国家能源局は 2025 年に 56 件の新型エネルギー貯蔵実証プロジェクトを公表し、実証と大規模化を通じた技術成熟と社会実装を国家主導で加速させている。

## b) 主要国の LDES 社会実装に向けた取組状況

各国が支援する LDES 技術について表 3-1-1 に、また、各国の LDES 技術開発のための支援策を表 3-1-2 に示す。

米国、英国、ドイツ、スペインなど、2030 年代に再エネを 40~50%程度導入する目標を設定している国や地域において、特に短期間(2030 年頃)で社会実装を可能にするような TRL の比較的高い技術の実証支援をする国が多い。また、技術開発については、英国やドイツなど社会実装に向けたコスト削減につながる技術の開発への支援、もしくは、10 時間を超えるようなより長時間のエネルギー貯蔵に関する支援が多くなっている。

<sup>23</sup> AFP BB News 2026/1/12  
<https://www.afpbb.com/articles/-/3615965?act=all&pid=28755268> (2026 年 3 月閲覧)

LDES の代表的な研究支援として米国 ARPA-E の DAYS プログラムがある。このプログラムは、複数日分のバックアップ電力の確保や変動性再エネ導入の後押しを目的に、長時間放電が可能で、かつ LCOS を一定水準で維持できる技術の開発を支援するものである。2018～2021 年に総額 30 百万ドルで実施され、放電時間 10～100 時間、LCOS 5¢/kWh-cycle、往復効率 50%以上(最低 33%)を共通目標に掲げ、長期エネルギー貯蔵技術の実用化に向けた研究開発を促進した。

LDES に取組む企業が事業化をして長期的に収益を得られるかについては、UK の CAP and Floor 政策や中国のように国として LDES 導入促進を進めるような電力市場設計を検討する方針を示している国は僅かであり、他の国では LDES に特化したような規制・インセンティブにつながるような政策はほとんどない。これは、LDES に取組む企業にとっては、将来的に事業を継続していけるか、資金投資を受ける上でも障壁となり得ると想定される。

表 3-1-1 各国の LDES 支援と対象技術

対象国	社会実装に向けた支援			支援対象技術
	研究開発	実証	その他(事業者へのインセンティブを含む)	
米 24,25,26,27,28	○	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・税額控除。</li> <li>・一部地域でグリッド接続手数料免除。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・機械的貯蔵(揚水を除く)、熱貯蔵。電気化学的貯蔵、Power to Gas。</li> <li>・DOE 目標(2030 年に 2020 年比でコスト 90%削減できる貯蔵技術。)</li> <li>・ARPA-E 目標(\$0.05/kWh のコストでこの貯蔵を提供することを目標に、長期エネルギー貯蔵技術の開発に資金を提供。)</li> </ul>
英	○	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・グリッド接続手数料免除。</li> <li>・CAP and Floor 制度。(TSO と契約/グリッド接続により充放電に関わらず収益がえられる。)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・機械的貯蔵(揚水を除く)、熱貯蔵、電気化学的貯蔵、Power to Gas。</li> </ul>
中国	○	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・不明(事業者、PJ に対して様々なインセンティブがある可能性あり。)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電気化学システム(バッテリーなど)、圧縮空気エネルギー貯蔵、フライホイールシステム、スーパーキャパシター等(揚水は除外)。</li> </ul>
日本	※	※	<ul style="list-style-type: none"> <li>・脱炭素電源オークション。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・圧縮蓄電、液化空気蓄電、重力蓄電等(検討中)。</li> </ul>

※一部補助事業にて支援

<sup>24</sup> DOE ホームページ

<https://www.energy.gov/energy-storage-grand-challenge/energy-storage-grand-challenge>(2025 年 3 月閲覧)

<sup>25</sup> [https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-07/Storage%20shot%20fact%20sheet\\_071321\\_%20final.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-07/Storage%20shot%20fact%20sheet_071321_%20final.pdf) (2025 年 3 月閲覧)

<sup>26</sup> DOE ホームページ

<https://www.energy.gov/oced/office-clean-energy-demonstrations> (2025 年 3 月閲覧)

<sup>27</sup> DOE ホームページ, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy | Department of Energy (2025 年 3 月閲覧)

<sup>28</sup> ARPA-E, Duration Addition to electricity Storage (DAYS) Overview, 2021

表 3-1-2 各国の主要な LDES 技術開発支援

対象国	技術開発支援概要
米 29,30, 31,32, 33	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ DOE:LDES(10 時間以上貯蔵可能)の商業化に向けた開発、実証を支援。</li> <li>✓ Energy Storage Grand challenge</li> <li>✓ Long Duration Storage Shot</li> <li>・ Office of Clean Energy Demonstrations (OCED) LDES に対して \$505M の資金を調達。これらの資金を利用し、研究・実証フェーズのプロジェクトへの助成金や融資などの財務支援を実施。(Demonstration Project)</li> <li>✓ LDES pilot program:多様な LDES 技術について、商業化と実用規模の実証に向けて支援。2024 年 9 月に総額 \$100M の支援プロジェクトを募集。</li> <li>✓ LDES Demonstrations program:商業化に向けた実証試験を支援。2022 年 11 月に 349M ドルを支援。</li> <li>✓ LDES Joint program:DOE と国防総省 (DOD) の協力を通じて、政府施設で LDES 技術を実証 2022 年 11 月に \$30M を支援。</li> <li>・ Office of Energy &amp; Renewable Energy (EERE)</li> <li>・ ARPA-E 「技術概念の創出」「技術概念の検証」「研究環境下での技術開発・施策」を支援。 助成期間は、最長 3 年、1 件当たりの投資総額は \$2~5M、最大 \$20M が原則。 DAYS:2018 年より、10 時間から 100 時間にわたって電力網に電力を供給するエネルギー貯蔵システムの研究開発プロジェクトを支援。</li> <li>・ 45Q (税額控除)</li> </ul>
英 <sup>34</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2021 年に LDES コンペを開始し、二つのコンペストリームで最大 6800 万ポンドの資金提供。</li> <li>・ Ten Point Plan:貯蔵設備に 1 億ポンドの資金提供。</li> <li>・ BEIS:大型貯蔵設備に対して 2000 万ポンド、貯蔵設備コスト削減に対して 900 万ポンド資金提供。</li> <li>・ UK Research Institute:貯蔵設備の研究開発に 3 億 3000 万ポンド資金提供。</li> <li>・ Green Industries Growth Accelerator:洋上風力、ネットワーク、炭素回収、利用・貯留、水素、原子力など、主要なネットゼロセクターにおける高度な製造能力を加速させる Green Industries Growth Accelerator に 9 億 6,000 万ポンドを拠出。</li> </ul>
独 35,36	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ SINTEG プログラム、SPRIND LDES チャレンジ</li> <li>・ 研究開発:希少材を使わない 10 h 以上貯蔵可能な技術の研究開発へ資金提供。</li> <li>・ 実証支援:規制緩和による実証支援、実証資金提供。</li> <li>・ Climate and Transformation Fund(CTF):連邦財務省が主導する特別基金による資金を提供。</li> </ul>

<sup>29</sup> DOE ホームページ

<https://www.energy.gov/energy-storage-grand-challenge/energy-storage-grand-challenge>(2025 年 3 月閲覧)

<sup>30</sup> DOE ホームページ, Long Duration Storage Shot | Department of Energy (2025 年 3 月閲覧)

<sup>31</sup> DOE ホームページ

<https://www.energy.gov/oced/office-clean-energy-demonstrations> (2025 年 3 月閲覧)

<sup>32</sup> DOE ホームページ, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy | Department of Energy (2025 年 3 月閲覧)

<sup>33</sup> Duration Addition to electricitY Storage (DAYS) Overview (ARPA-E, 2021)

<sup>34</sup> GOV.UK, Longer Duration Energy Storage (LoDES) Demonstration Programme: successful projects  
<https://www.gov.uk/government/publications/longer-duration-energy-storage-demonstration-programme-successful-projects> (2025 年 3 月閲覧)

<sup>35</sup> SIX TEAMS RECEIVE UP TO ONE MILLION EUROS FOR THE DEVELOPMENT OF THEIR "LONGDURATION ENERGY STORAGE" CONCEPTS(SPIN-D, 2022 年 12 月)

<sup>36</sup> ドイツ連邦政府ホームページ(BMWK - Bundeskabinett beschließt Wirtschaftsplan des Klima- und Transformationsfonds (KTF))

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/08/20230809-bundeskabinett-beschliesst-wirtschaftsplan-des-ktf.html> (2025 年 3 月閲覧)

西	<ul style="list-style-type: none"> <li>・再生可能エネルギーによる革新的な貯蔵設備併設プロジェクトに対する補助金 (Recovery, Transformation and Resilience Plan, PERTE ERHA scheme)</li> <li>・再生可能エネルギー技術機器(特にソーラーパネル、風力タービン、ヒートポンプ、電解槽)と貯蔵技術の国内メーカーに直接助成金を提供。</li> <li>・TRLが6~8であっても対象となる。ただし、プロジェクトは完成時にTRL9でなければならない。</li> <li>・経済的実行可能性と短期間での完成がプロジェクトの採択基準となる。採択時の評価について、8時間を超えるプロジェクトは全て同じスコアが与えられる。(長期貯蔵技術が必ずしも優遇されない可能性。)効率が65%(蓄電システムに関連する全ての要素からの損失を含む)未満のプロジェクトは、効率基準において0点とする。</li> <li>・2021年に、2026年までに商業運転を開始する独立型及び共同設置型の貯蔵施設の開発を支援するために€620Mを割り当てることを発表。</li> <li>・2022年に、€50M規模のエネルギー貯蔵に関する研究開発プロジェクトを公募。2023年に2回目の公募を実施(€150M規模)。</li> <li>・1プロジェクトまたは1企業あたり最大€15Mの補助金を支給(中小企業の場合、適格コストに対する最大補助率は65%。ただし、少なくとも2時間の蓄電、少なくとも1MWの容量、少なくとも40%の再生可能エネルギー資産とのハイブリッド化が必要)。</li> <li>・(申請期間2023年1月~3月)</li> </ul>
伊	<ul style="list-style-type: none"> <li>・自然エネルギー、貯蔵技術メーカーに開発支援のための補助金。</li> </ul>
中国	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2024年初頭、中国の国家エネルギー局は、56の新型エネルギー貯蔵パイロットリストを発表(そのうち、11はCASEプロジェクト)。</li> <li>・エネルギー戦略的保証拠点を設置し、技術実証や制御システム、政策ガイダンス、ビジネスモデルの開発を促進(特に新疆ウイグル自治区は、風力発電との併設やエネルギー貯蔵設備の建設を進める。24年9月には中国華電集団有限公司による1GW二酸化炭素圧縮空気貯蔵総合エネルギー模範プロジェクト起工式を実施。最大8時間のエネルギー貯蔵を目指す。)</li> </ul>
豪	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ARENA:エネルギー貯蔵のための部分的なプロジェクト費用を支援。</li> <li>・Clean Energy Finance Corporation: 低排出経済支援プロジェクトに64億豪ドル。</li> </ul>
日本	<p>(LDESに特化した支援は検討中。)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・GX 経済移行債を活用(系統用蓄電池等電力貯蔵システム導入支援事業)蓄電以外のLDESを含めた導入支援フェーズの技術についてCAPEX支援を検討。</li> <li>・補助対象:6時間以上の長時間の充放電が可能であり国内での商業事例が限定的な新規技術(圧縮蓄電、液化空気蓄電、重力蓄電等のLDES含む)。</li> </ul>

表 3-1-3 米国 ARPA-E DAYS プログラムの実施プロジェクト

研究タイトル	実施機関	助成額	技術概要 + 開発内容
Sulfur-Based Aqueous Air Battery for Long-Duration Storage	Form Energy	\$3.9M	硫黄系水溶液電池: ・安価な硫黄を活用した長時間貯蔵用電池セル ・電解液の化学安定性と反応制御技術 ・システム統合とコストモデル開発
Separator-Free Zinc-Bromine Flow Battery	Primus Power + Columbia Electrochemical Energy Center	\$3.5M	亜鉛-臭素フロー電池: ・セパレータ不要のセル構造 ・電解液の腐食抑制技術 ・長寿命化と低コスト化のための材料開発
Geomechanical Pumped Storage for Grid Applications	Quidnet Energy	\$3.2M	地圧型ポンプ貯蔵: ・地下岩盤に圧水を注入する貯蔵システム ・高圧水の保持・回収技術 ・発電タービンとの統合設計
Supercritical CO <sub>2</sub> Heat Pump and Power Cycle	Echogen Power Systems	\$3.0M	CO <sub>2</sub> 熱ポンプ+発電: ・超臨界 CO <sub>2</sub> を用いた熱エネルギー貯蔵 ・高効率熱交換器とタービン設計 ・往復効率向上のためのサイクル最適化
Low-Cost Sulfur-Manganese Flow Battery	United Technologies Research Center	\$3.0M	硫黄-マンガン系フロー電池: ・低コスト無機化学電解液の開発 ・耐久性の高い電極材料 ・システムスケールアップ設計
Solid-State Thermal Battery with TPV Conversion	Antora Energy	\$3.0M	固体熱電池(炭素+TPV): ・炭素ブロックを 2000℃以上で加熱する蓄熱体 ・熱光発電(TPV)セルの高効率化(>40%) ・断熱構造と安全性設計
ENDURING: High-Temperature Particle Storage with Brayton Cycle	NREL	\$2.79M	高温粒子蓄熱+ガスタービン: ・1100℃超の粒子を使った蓄熱システム ・粒子搬送と保温技術 ・ブレイトンサイクルタービンとの統合
STORES: Thermochemical Energy Storage Using Mg-Mn-O	Michigan State University	\$2.0M	熱化学蓄熱(Mg-Mn-O): ・酸化還元反応を利用した蓄熱材 ・反応器のモジュラー設計 ・サイクル耐久性と反応速度の最適化
Reversible Brayton Cycle with Molten Salt Storage	Brayton Energy	\$1.99M	熔融塩+逆転ブレイトンサイクル: ・高温熔融塩の蓄熱タンク ・逆転タービン設計と熱交換器 ・システム効率向上のための流体制御
Reversible Fuel Cell Using Hydrogen Peroxide	University of Tennessee, Knoxville	\$1.5M	再可逆燃料電池(過酸化水素系): ・液体燃料として過酸化水素を利用するセル ・高効率電極触媒の開発 ・安全な燃料循環システム設計

### c) 各国の LDES 技術開発状況の整理

ここで整理した各国の LDES 導入における背景と各技術の特徴を考慮し、各国の LDES に取り組む背景と技術、LDES 導入により期待する効果を一元的に整理する(表 3-1-4)。

米国や英国については、国や地域での VRE 増加に伴い早期に LDES 導入を進めようとしている。したがって、特定の技術に偏るのではなく、早期の社会実装につながる TRL の高い技術の実証、コスト削減を積極的に支援している。一方で、100 時間を超えるような長時間のエネルギー貯蔵が可能になる技術の必要性が認知されてきており、両国ともこれらへの支援も併せて実施している。再エネ導入率の高い国でも、送電網の増強が進んでいる国でも、比較的短時間のエネルギー貯蔵技術の導入支援をしているにとどまっている。中国については、国家戦略として、LDES を位置づけ、国内の地域の特色、発電設備に合わせた技術を積極的に導入促進している。具体的な支援規模については不明だが、様々な技術の大規模化とコスト削減を進めながら早期の社会実装を実現し、将来的な海外展開を目指している。

表 3-1-4 各国の LDES 開発状況の整理

国	LDES 導入背景	各国の LDES 技術支援対象	導入を進める技術	期待する役割
米	<ul style="list-style-type: none"> <li>2035 までに 100% クリーン電源の実現。</li> <li>出力抑制によるコスト増加。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>10 時間以上の充放電が可能。</li> <li>早期(2030 年)に低コストで実装できる技術。</li> <li>より長期(100 時間以上)充放電可能な技術。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>機械的貯蔵(揚水を除く)、熱貯蔵、電気化学的貯蔵、Power to Gas。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>早期の社会実装。</li> <li>低コスト</li> <li>慣性、同期化力。</li> <li>10 時間以上の夜間、冬場のピーク対応。</li> </ul>
英	<ul style="list-style-type: none"> <li>2035 年までに電力セクター脱炭素化の促進(脱石炭火力)。</li> <li>電力供給網の信頼性向上。</li> <li>系統混雑緩和によるコスト削減。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TRL が 5 以上で早期(2030 年)に社会実装できる技術。</li> <li>100MW、6 時間の充放電が可能(今後更に長期となる可能性)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>機械的貯蔵(揚水を除く)、熱貯蔵、電気化学的貯蔵、Power to Gas。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>早期の社会実装。</li> <li>日中・夜間で 6 時間程度の充放電。</li> <li>今後より長期(100 時間程度の必要性)が議論。</li> <li>慣性、同期化力。</li> <li>大容量。</li> </ul>
独	<ul style="list-style-type: none"> <li>2030 年までに再エネ 80%。2035 年までに電力セクターの脱炭素化。</li> <li>長期の天候不順(暗い風)への対応。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>希少材を使わない 10 時間以上充放電可能な技術。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>蓄電。</li> <li>Power to Gas (水素)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>早期の社会実装。</li> <li>従来は日中のピーク対応。</li> <li>100 時間程度の長期充放電が可能な技術。</li> <li>大容量。</li> <li>慣性、同期化力。</li> </ul>
中国	<ul style="list-style-type: none"> <li>2025 年再エネ発電量 50%</li> <li>国家目標:2030 年までに新エネルギー貯蔵の完全な社会実装。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>新型エネルギー貯蔵は商業化初期から大規模化発展段階に入り、大規模商業化応用の条件を備える。</li> <li>電気化学蓄積エネルギーの向上、システムコストの 30%以上削減。</li> <li>火力、原子力発電プラントなど既存電源に併設する新エネルギー貯蔵技術の開発。</li> <li>100MW 級圧縮空気エネルギー貯蔵技術の実現。</li> <li>MW 級フライホイールエネルギー貯蔵技術などの機械エネルギー貯蔵技術の開発。</li> <li>水素エネルギー貯蔵、熱(冷)エネルギー貯蔵などの長時間スケールのエネルギー貯蔵技術の開発。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>電気化学システム(バッテリーなど)、圧縮空気エネルギー貯蔵、フライホイールシステム、スーパーキャパシター等(揚水は除外)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>早期の社会実装。</li> <li>大容量。</li> <li>低コスト。</li> <li>海外での市場競争力。</li> <li>慣性、同期化力。</li> </ul>
豪	<ul style="list-style-type: none"> <li>2030 年までに 100% 自然エネルギーで供給。</li> <li>ニューサウスウェールズなど一部地域で再エネ抑制率が高い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>太陽光発電導入にあわせバッテリーの導入を支援。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>現状は機械的貯蔵や電氣的貯蔵(バッテリー)が主となる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>早期社会実装。</li> <li>慣性、同期化力。</li> <li>(それほど需要は多くない)</li> </ul>

### 3-1-4 社会課題の解決のために取り組むべき領域(F): 長期エネルギー貯蔵システムによる変動性再エネ最大活用

『貯める』に深く関係する社会課題である『再生可能エネルギーの導入拡大・価値向上』及び『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』の解決に向けて、取り組むべき主要な領域の全体像を図 3-1-21 に整理した。それを踏まえ、この中で『長期エネルギー貯蔵による変動性再エネ最大活用』をフロンティア領域等として提案した。

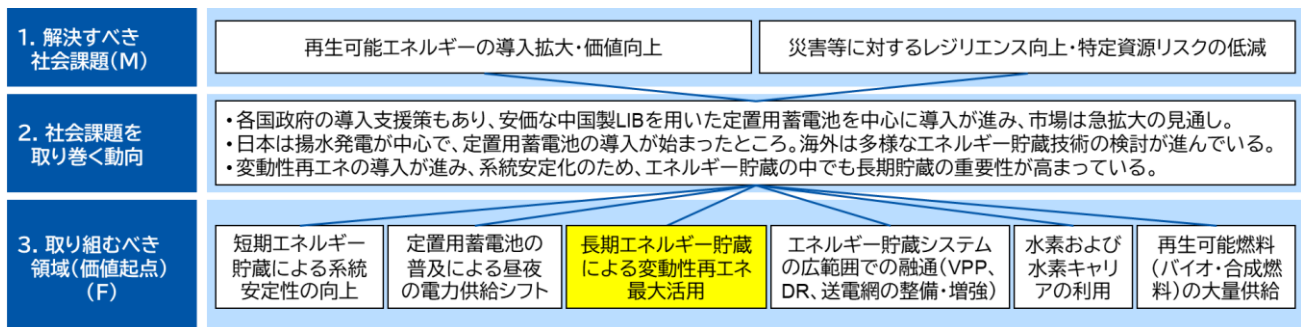


図 3-1-21 再エネの導入拡大・価値向上のために『貯める』に関して取り組むべき領域

その理由について改めて詳述する。

『貯める』に関する二つの社会課題『再生可能エネルギーの導入拡大・価値向上』及び『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』に対し、これらを解決するために取り組むべき領域には以下のものがある。

#### (i) 短期エネルギー貯蔵による系統安定性の向上

再生可能エネルギーやインバータ電源の増加により、電力系統では周波数や電圧の変動が生じやすくなっている。こうした課題に対し、短期エネルギー貯蔵は秒から数時間の時間スケールで需給変動を吸収し、系統の安定運用を支える重要な技術である。近年は蓄電池技術の高度化により、高速な応答性と一定の貯蔵容量を兼ね備え、系統安定化に幅広く貢献できるようになっている。くわえて、ミリ秒から秒オーダーのごく短時間領域では、スーパーキャパシターや超電導磁気エネルギー貯蔵(SMES)が限定的に補完的役割を果たし得る。

#### (ii) 定置用蓄電池の普及による昼夜の電力供給シフト

再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、時間帯による需給の偏りが生じやすくなっており、定置用蓄電池は電力供給の柔軟性を高める手段の一つとして位置づけられる。一方、その普及にあたっては、電池セルや主要部材の生産が中国を中心とする特定地域に依存している点が、供給安定性やコスト面での課題となっている。とりわけ、リチウム、ニッケル、コバルトといった重要鉱物への依存は、地政学的リスクや価格変動の影響を受けやすい。このため、研究開発においては、蓄電池の長寿命化による資源使用量の抑制に加え、国内での電池リサイクル技術の高度化、使用済み電池からの有価金属回収、さらにはナトリウム系電池など資源制約の小さい次世代電池技術の開発が重要となる。

### (iii) 長期エネルギー貯蔵による変動性再エネ最大活用

再エネの導入拡大に伴い、需給調整能力の向上のみならず、余剰電力の有効活用の観点からも、エネルギー貯蔵技術の社会実装の重要性が高まっている。IEA『World Energy Outlook 2018』でも再エネの導入フェーズが高まるごとに、Energy Storage の社会実装の蓋然性が高まるとしている。国内でも春や秋の低需要期を中心に、太陽光発電をはじめとする変動性再エネが出力制御指令を受ける回数が既に増えている。

今後、更に変動性再エネの導入拡大を図るためには、日内変動に加え、暗い嵐とも呼ばれる曇天無風が続き、太陽光発電・風力発電が十分に発電できない場合に備えたエネルギー貯蔵が必要となる。

### (iv) エネルギー貯蔵システムの広範囲での融通

再生可能エネルギーの主力化に伴い、エネルギー貯蔵は設備単体の性能向上だけでなく、広域で柔軟に融通できる環境整備が重要となっている。地域ごとに異なる需給特性や系統制約を踏まえると、貯蔵設備を分散的に最適運用する仕組みが不可欠である。このため、広域系統連系の強化、デジタル技術を活用したエネルギーマネジメント、複数拠点の貯蔵設備を統合制御する技術や制度整備を進め、貯蔵の価値を最大限引き出すことが求められる。

### (v) 水素及び水素キャリアの利用

再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、日内調整を超えた週単位から季節単位の需給ギャップへの対応が課題となっている。水素は、電力を化学的エネルギーとして大量かつ長期間貯蔵できるエネルギーキャリアであり、こうした長期エネルギー貯蔵の有力な選択肢として位置づけられる。また、アンモニアや有機ヒドライドといった水素キャリアは、輸送・貯蔵の柔軟性を高める手段として期待されている。一方で、変換効率やコストの面では依然として課題が多い。このため、研究開発においては、水電解装置の高効率化・低コスト化に加え、水素及び水素キャリアの貯蔵・輸送技術の高度化、利用段階での発電・燃焼技術の高効率化を一体的に進めることが重要となる。

### (vi) 再生可能燃料の大量供給

再生可能エネルギー由来の燃料としては、水素やアンモニアの他、バイオエタノール、バイオディーゼル、e-Fuel などの液体燃料も重要な選択肢となる。これらの燃料は、既存の燃料インフラや利用設備を活用できるため、貯蔵・輸送・利用に関する追加的な制約が比較的小さい点に特徴がある。一方で、大量供給の実現に向けては、製造コストの低減が最大の課題であり、原料調達から製造プロセスまでを含めた全体最適が求められる。くわえて、原料や燃料の調達先が特定地域に偏ることによる供給リスクを低減するため、国内外における調達先の確保や多様化、持続可能性を考慮したサプライチェーンの構築が重要となる。

3-1-2 節で説明したとおり、変動性再エネの導入、自然災害の頻発化、激甚化、国際社会の不安定化に伴い、エネルギー貯蔵には様々なニーズが加わり、その重要性が増している。

これらのニーズの大半は化石燃料が担ってきた。今後、これをほかの手段で置き換えるには、必要な容量が極めて大きい。蓄電池の利用は連続出力時間の長い方向に拡大していくと見込まれる。しかし、価格が下がってきている現状を踏まえたとしても、膨大なコストが必要になることから、数時間を超える範囲をカバーするのは容易でない。また、水素の利用技術が進展しても、製造・貯蔵・輸送のエネルギー効率向上が課題となっている。再生可能燃料についても製造コストが課題で、いずれも十分な量が市場に出回るにはまだ時間を要するものと考えられる。このことから、蓄電池、水素や再生可能燃料を補うためのエネルギー貯蔵技術が必要となる(図 3-1-22 の赤点線部分)。そこで、連続出力時間が数時間以上のこの範囲を『長期エネルギー貯蔵による変動性再エネの最大活用』領域としてフロンティア領域等に提案する。

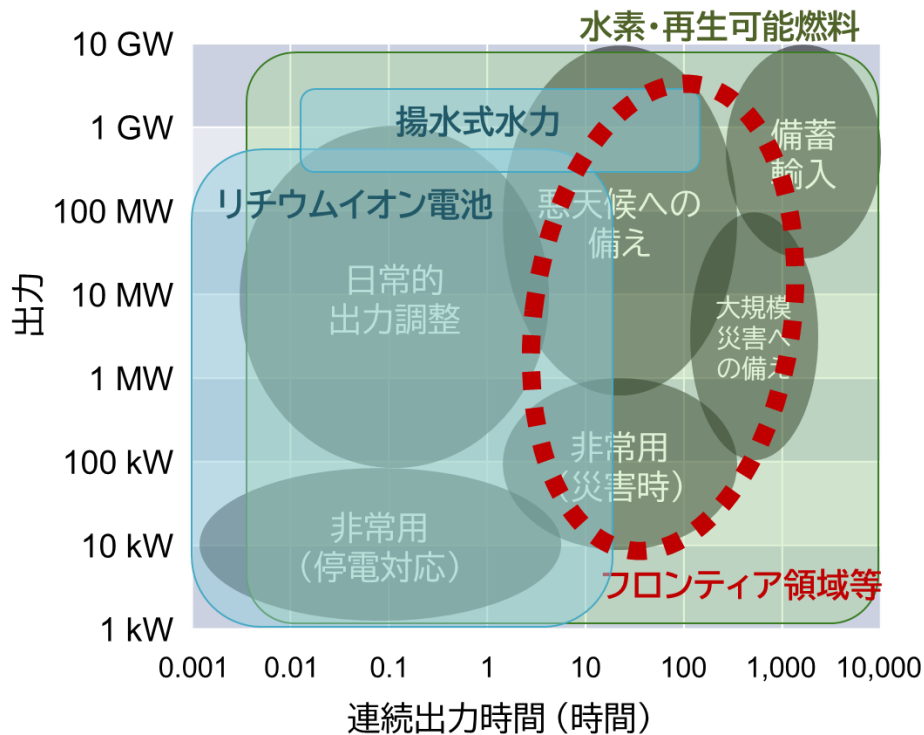


図 3-1-22 エネルギー貯蔵技術のフロンティア領域等

エネルギー貯蔵の手法には、SMES や LIB、LDES、水素などがあり、LDES には重力エネルギー貯蔵や熱エネルギー貯蔵など様々な手法がある。これらを横軸とし、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、更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 3-1-23)。日本に強みがある技術には下線を引いている。



図 3-1-23 貯蔵手法とサプライチェーンを軸にとったエネルギー貯蔵に必要な技術のマッピング

LDES の範囲の様々な要素技術には、日本企業が強い技術が至る所にある。そうした強い技術は、特に、川上の素材・部材に概ね対応するエネルギー保持技術、構成機器に概ね対応するエネルギー変換技術に多く見られる。その一方、図中赤破線で囲ったシステムレベルでの低コスト化の取組は限られている(以下「経済的先進 LDES」という。)。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。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応じた運用方法の検討も必要となる(赤破線で囲って「LDES 運用方法の検討」と記載した部分)。そのため、LDES の中でも特に『経済的先進 LDES』と『LDES の運用方法の検討』に注目して取組を進める余地がある。

当該フロンティア領域等の①将来性(成長性・社会課題)、②技術・アイデアの革新性、③日本の優位性、④民間のみで取り組む困難性、⑤重要経済安保技術、⑥その他特筆すべき理由については次のとおり評価される。

### ①将来性(成長性・社会課題)

先に述べたように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り、高い将来性が期待できる。このうちLDES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。

また、仮に、国内において変動性再エネにより電力の40%を確保しようとした場合、朝夕の不足電力発生時には年間で数十日程度、約100GWh規模の蓄電容量が必要となるとの試算もある<sup>37</sup>。

### ②技術・アイデアの革新性

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、CO<sub>2</sub>を液化して貯める「CO<sub>2</sub>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。

同時期に学术界でもLDES研究が急伸し、関連論文は10年で4.4倍とLIBを上回る勢いで増加し、IEA TCPやIEEEなど主要会議でも2020年代からLDESが主要テーマとして扱われ始めた。こうした「既存技術の前提を覆すアイデア」が次々誕生したことが、2020年以降の欧米での急速な活発化の大きな原動力となっている。

### ③日本の優位性

日本はLDESに必要な様々な要素技術に強みをもつ。

LDESでは一般に電力を他のエネルギー形態と相互に変換する技術や変換したエネルギーを保持する技術が要素技術として必要になる。熱エネルギーによる貯蔵でいえば、日本企業が得意とするヒートポンプ等の各種省エネ技術、ガスタービン、発電機、ベアリング等の技術を生かせる可能性がある。重力、慣性力、圧縮空気、熱による長期エネルギー貯蔵でも動力モーター、発電機、ベアリング等の技術が利用できる。日本が学術的に強みをもつ材料分野や化学分野はエネルギー貯蔵媒体、断熱材、エネルギー貯蔵化学媒体等の点から化学的エネルギーによるLDESの要素技術への貢献が期待される。

<sup>37</sup>カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会報告書(一般社団法人日本機械学会動力エネルギーシステム部門カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会、2024年7月)

NISTEP(科学技術・学術政策研究所)の2024年のデルファイ調査において、エネルギー貯蔵に関する「エネルギー変換」及び「エネルギーシステム」は国際優位性があるとされている<sup>38</sup>。

#### ④民間のみで取り組む困難性

長期エネルギー貯蔵システムは、スケールメリットの発揮に大規模設備の実証が不可欠であり、そのための初期投資額は相当に大きく、単独で負担するには民間企業にとってリスクが過大となる。また、革新的なコンセプトや多様な技術シーズを実証レベルまで具体化するには、中小企業を含む幅広い主体からの提案が不可欠であるが、その具現化には研究開発費や設備費などの外部支援が欠かせない。さらに、長期エネルギー貯蔵は電力システム全体の需給調整や系統安定化に直接影響するため、送配電事業者の協力や制度的調整が不可避であり、政府・事業者・産業界が一体となって取り組む体制が求められる。

#### ⑤重要経済安保技術

変動性再エネの最大活用は、エネルギー供給の安定性を高め、我が国のエネルギー安全保障を強化するうえで極めて重要である。とりわけ LDES は、エネルギーの日常的な需給変動を吸収し、自然災害や海外からの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。また、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。

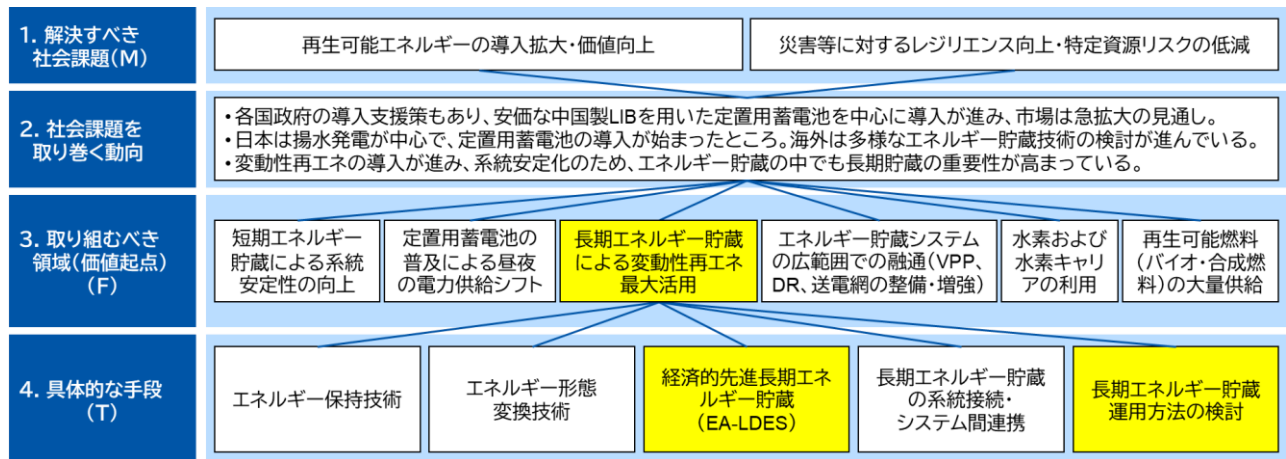
米国は CETs(Critical and Emerging Technologies)として 18 の技術を選んでおり、そのうちの一つにクリーンエネルギーの生成と貯蔵(Clean Energy Generation and Storage)がある<sup>39</sup>。さらに、その技術範囲をより具体的に表す重要分野(key subfields)として蓄電池(Batteries)とは別にエネルギー貯蔵(Energy storage)を取り上げている。すなわち、蓄電池でカバーできないエネルギー貯蔵技術の分野があることを意識し、蓄電池と並んで重要視している。

<sup>38</sup> 第 12 回科学技術予測調査 科学技術等の中長期的な将来予測に関する調査(デルファイ調査)【速報版】(文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術予測・政策基盤調査研究センター 動向分析・予測研究グループ、2024)

<sup>39</sup> CRITICAL AND EMERGING TECHNOLOGIES LIST UPDATE, A Report by the FAST TRACK ACTION SUBCOMMITTEE ON CRITICAL AND EMERGING TECHNOLOGIES of the NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL(2024年2月)  
<https://www.govinfo.gov/content/pkg/CMR-PREX23-00185928/pdf/CMR-PREX23-00185928.pdf>  
 (2026年3月閲覧)

### 3-1-5 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例

LDES を実現するための手法には重力エネルギー貯蔵、熱エネルギー貯蔵など様々なものがある。それぞれ得意な貯蔵容量(時間)範囲、出力範囲がある。また、それらの組合せや、技術開発によって更なる長時間、大容量が実現する可能性もある。このため、どれかの手法にターゲットを絞るのは賢明でない。むしろ、前述の図 3-1-23 で示した、『経済的先進 LDES』及び『LDES 運用方法の検討』を中心に取り組むことが望ましい(図 3-1-24)。ここでは、それぞれについて、具体的な手段のテーマ例について述べる。



EA-LDES: Economical Advanced Long-Duration Energy Storage

図 3-1-24 長期エネルギー貯蔵システムの 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。実際、3-1-3(2)の(iii)海外スタートアップの事例から見てきたのは、高効率や高性能を闇雲に追求するのではなく、汎用材料や既存インフラの活用、出力部と容量部を分離した構造設計、長寿命・低劣化といった割り切った設計思想の採用が一定の成果を上げていることであった。すなわち、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も、日本の既存の環境や設備との融合、見過ごされていた価値の活用などを通じた低コスト化は可能だと期待される。例えば次のような方向性がある。

- ・ 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、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)
- ・ その他日本の強みを生かして LDES を実現するための方策

こうしたアイデア・技術を発掘して前に進めるには二つの方法が考えられる。一つは目的である実用化時のコストターゲット(例えば均等化貯蔵コスト(LCOS)で 10 円

/kWh-cycle)を明確に掲げた上で、スケールアップによってその実現可能性や隠された技術的課題を明らかにすることである。企業各社が有する技術のTRLは様々であり、それらに応じた研究開発の支援があるべきであろう。米国 ARPA-E では LCOS を \$0.05/kWh-cycle と定めて研究開発を支援する DAYS プログラムを実施している。この手法には学ぶべきところがある。

また、既存の施設の利用など、自由な発想、アイデアが解決につながることを期待される。これを実現するにはダイバーシティが必要である。LDES の研究開発に集中してきた研究者や企業のみならず、これまで関わってこなかった専門家の参入が有効であろう。機械や化学工学の専門家のみならず、触媒化学や高分子合成の専門家、あるいは生命工学の専門性も役立つかもしれない。

## (2) LDES 運用方法の検討

LDES の運用方法に関する検討は、カーボンニュートラルが不可逆的に進行する電力システムにおいて、安定性と経済的な持続性をいかにして両立させるかという、極めて複合的かつ高度な課題への応答である。その本質は、単に余剰電力を時間的に移動させることにあるのではない。数日から数週間に及ぶ供給途絶に対する保険としての機能と、非効率な火力発電設備の休廃止などによる同期発電機の離脱によって失われる系統慣性の補完という、二重の役割を具体的な運用モデルに落とし込む作業が必要となる。

運用の前提としてまず認識しなければならないのは、再生可能エネルギーの主力電源化に伴う需給調整の要求の質的な変化である。現在、系統用蓄電池市場の主流となっている LIB による蓄電システムは、充放電効率が 90%前後と非常に高く、日内変動の平準化には極めて有効な技術である。しかし、そのコスト構造は出力(kW)と容量(kWh)が線形に連動しているため、8 時間を超えるような長時間の放電を行おうとすれば、バッテリーセルそのものを比例的に増やす必要があり、経済的な限界に直面する。

これに対して、CAES、LAES、圧縮 CO<sub>2</sub> エネルギー貯蔵、熱エネルギー貯蔵といった LDES 手法は、出力部(タービン)と容量部(タンク)が分離されたディカップリング構造を有している。そのため、容量部を増やすだけで容量単価(円/kWh)を低減しつつ大容量化が可能であり、欧米などで懸念される曇天無風(Dunkelflaute)の期間を埋める役割が期待されている<sup>40</sup>。しかし、これらの LDES には充放電効率が低く、かつ稼働頻度が極端に少ないという弱点がある。そのため、通常の卸電力市場でのアービトラージのみでは投資回収が困難となる Missing Money 問題に直面するのが現状である。

こうした経済的な課題以上に、電力システムの運用面で深刻な懸念事項となっているのがシステムの安定性、すなわち系統慣性と短絡電流の確保である。従来の電力システムでは、周波数及び電圧の維持や事故時からの回復において、同期発電機がもつ回転エネルギーが周波数変動に抵抗する系統慣性と、定格の数倍にも及ぶ短絡電流の供給能力が不

<sup>40</sup> An Assessment of Resource Drought Events as Indicators for Long-Duration Energy Storage Needs [https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-35955.pdf](https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-35955.pdf) (2026 年 1 月閲覧)

不可欠な役割を果たしてきた。現在、カーボンニュートラルの加速に伴い、これまで系統形成の一翼を担い、系統慣性や短絡電流の供給源として機能してきた非効率な火力発電設備の休廃止が進行している。これにより、系統安定化に寄与する同期発電機が減少する一方で、太陽光発電設備、風力発電設備及び蓄電所といった非同期電源であるインバータ電源が急増しており、系統の強靭性が根底から揺らぎかねないという深刻な危機感が顕在化している。

例えば、インバータ電源の比率が一定水準を超え、同期化力が希薄化すると、保護リレーが故障電流を検知できずに動作しなかったり、わずかな需給不均衡で連鎖的な系統崩壊が発生したりする危険性が高まる。この課題に対して、自律的に電圧位相を形成するグリッドフォーミングインバータへの期待が寄せられているが、特別高圧系統への適用には物理的障壁が存在する。パワー半導体は銅巻線に比べて熱容量が極めて小さく、同期発電機のような大きな過電流に耐えられない。このため、事故時の保護協調や変圧器励磁突入電流への対応において、大幅なコスト増を招く、あるいは保護機能の不要動作による遮断を誘発するリスクがある。

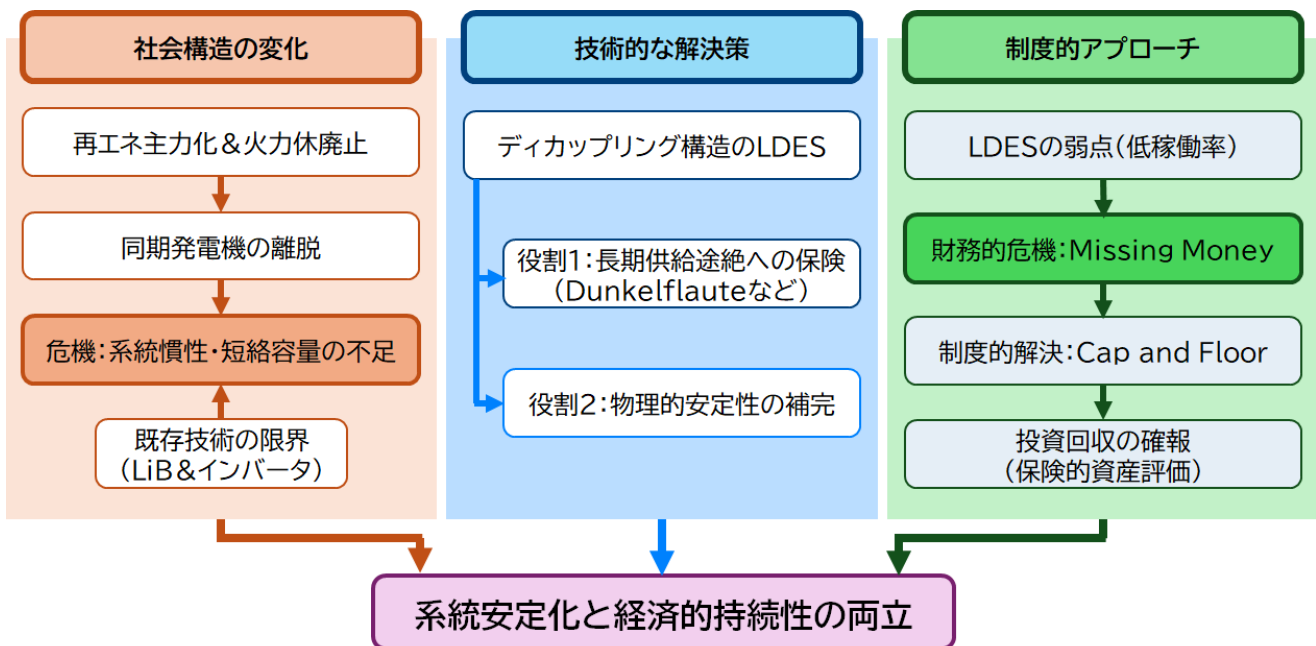
現時点において、フライホイールと発電機から構成される同期調相機と大規模蓄電システムによるインバータ電源を同一地点で連系するハイブリッド型系統安定化設備<sup>41</sup>は極めて有効な解決策の一つであると考えられる。この運用形態を採用することで、同期調相機が系統慣性と短絡電流を提供して系統強度を維持し、一方でインバータ電源が高速な周波数調整とエネルギー供給を担うことができる。このように互いの弱点を補完し合うことで、インバータ側の過剰な設備投資を抑制しつつ、システム全体の安定性を確保できる。また、この設備の代わりにタービン発電機を有するLDESを配置することも、系統の強靭化に資する対応策と成り得る。

このような技術運用を社会実装するためには、市場設計の刷新が不可欠となる。LDESの真価は、頻繁な充放電によるエネルギー供給(kWh)よりも、稀頻度ではあるが致命的な供給支障を回避するための設備容量(kW)としての価値、すなわち系統の回復力にあるからである。現状の容量市場では、4時間程度といった短時間の蓄電システムが増加するとピークが平準化され、LDESがもつ長期間の供給能力や系統安定化への寄与度といった価値が正当に評価されない懸念がある。

そのため、英国で検討が進められているCap and Floorメカニズムのような制度設計の導入が強く望まれる。これは、事業者の収益に下限(Floor)を設けて投資リスクを低減しつつ、異常高騰時には上限(Cap)を設けて消費者負担を抑制するというものである。この仕組みは、LDESを単なる市場取引の対象としてではなく、Dunkelflauteのような極端事象に備えるための系統運用の保険的資産として位置づけるものであり、稼働率に依存しない確実な投資回収を可能にするアプローチと言える。また、将来的には系統慣性の提供で報酬を得られる仕組みも必要であると考えられる。

<sup>41</sup> Two become one: Siemens Energy combines two technologies to stabilize the Irish grid  
<https://www.siemens-energy.com/us/en/home/press-releases/two-become-one-siemens-energy-combines-two-technologies-to-stab.html> (2026年1月閲覧)

結論として、LDES の運用検討においては、リチウムイオン電池との効率比較のみに終始するべきではない。図 3-1-25 に示すように、上述の社会的背景、技術的課題および制度的対応の関係性を整理すると、火力発電設備の減少に伴う系統安定化能力の不足を補完すべく、長期間の供給途絶リスクへの対応力と、LDES による系統安定化機能（系統慣性・短絡電流などの提供）なども検討する必要がある。そして、その経済的持続性を支えるためには、Cap and Floor などのようなリスク遮断型の政策枠組みとの一体的な運用設計が不可欠である。



- ・ 現状の危機:脱炭素化に伴う火力発電設備の休廃止と、それに伴う系統形成の要である同期発電機の離脱、および物理的な慣性・短絡容量の深刻な喪失。
- ・ LDESの役割:ディカップリング構造による長期供給途絶(Dunkelflaute)への保険的機能、および回転機等を活用した物理的な系統安定化能力の提供。
- ・ 経済的解決策:低稼働率に起因するMissing Money問題の克服、およびCap and Floorメカニズムの導入による投資予見性の確保と確実な社会実装。
- ・ 目指す姿:LDESの技術的特性とリスク遮断型の政策枠組みの統合による、電力システムの系統安定化と経済的持続性の高次元での両立。

図 3-1-25 社会構造の変化に対応する技術・制度両面からの系統安定化戦略

## コラム 注目技術 1 無線給電の展望

### (1) 技術の概要

無線給電(Wireless Power Transfer:WPT)とは、電線(ワイヤ)を用いず、送信側から空間を隔てて電力を伝送し、受信側でこれを受け取って利用する技術である。センサー、モビリティ、ロボット、ドローン、宇宙機器など、給電がボトルネックとなる用途において、従来の有線給電やバッテリー交換に代わる基盤技術として注目されている。

表1 無線給電方式の分類と伝送距離・用途

方式	伝送距離・用途
電磁誘導方式	数 cm 程度の近距離で高効率。スマートフォンや EV ワイヤレス充電に実用化。
磁気共鳴方式	数十 cm～数 m の中距離伝送が可能。複数機器同時給電などへの応用が進展。
マイクロ波方式	数 m～km 級の長距離伝送が可能。指向性制御や安全性確保が課題。
レーザー方式 (光無線給電)	高い指向性・長距離伝送が可能で、受光素子を介して電力を供給。

### (2) なぜ今、レーザー給電に注目するのか

これらの方式の中でも、近年とりわけ注目されているのがレーザー給電(光無線給電)である。レーザー給電は、送信側で生成したレーザー光を空間伝送し、受信側の光電変換素子で電力に変換する方式であり、以下の特徴を有する。

- 高い指向性による長距離・選択的給電
- アンテナサイズ制約が小さく、小型・軽量機器に適合
- 電磁ノイズ影響が小さく、周波数ひっ迫問題を回避可能

特に我が国は、光源(半導体レーザー)、光学系、受光素子といったレーザー給電の中核技術において、長年にわたり国際的な競争力を有してきた。また、宇宙太陽光発電(Space Solar Power Systems:SSPS)を背景とした基礎・基盤研究の蓄積に加え、近年では 1km 級の屋外実証や、スタートアップによるドローン向け応用など、社会実装に向けた技術進展も見られている。

### (3) 想定される応用分野と価値

レーザー給電は、従来の給電手段では困難であった領域に新たな価値を提供する(表2)。これら分野では、「電力を貯める」発想から、「必要な場所に、必要なときに送る」発想への転換が求められており、レーザー給電はその中核技術となり得る。

表2 レーザー給電の主な応用分野と期待効果

応用分野	期待される価値
ドローン	長時間滞空、バッテリー交換の不要化
被災地・離島	インフラ未整備地域へのオンデマンド給電
HAPS (High Altitude Platform Station)	高高度プラットフォームへの継続給電
宇宙インフラ	衛星間給電、月・宇宙拠点への展開

#### (4) 今後の研究開発・制度設計の論点

他方、レーザー給電の社会実装に向けては、技術・制度両面での課題整理が不可欠。特にドローン、HAPS、宇宙インフラといった新領域では、単なる要素技術開発にとどまらず、システム設計思想、運用シナリオ、制度との接続を含めた研究開発が求められる。

無線給電、とりわけレーザー給電は、エネルギー供給の在り方そのものを変革し得るポテンシャルを有する。今後は、基礎・基盤研究の深化と並行して、具体的な社会実装シナリオを見据えた研究開発・実証を戦略的に推進することが重要である。

表3 社会実装に向けた課題例

課題	概要
変換効率の向上	レーザー給電では、送信側での電力から光への変換、空間伝送、受信側での光から電力への変換という段階を経るため、システム全体としてのエネルギー効率が課題。
安全性の確保	レーザー光は高い指向性を有する一方、人体や物体に照射された際の影響を考慮する必要がある。異常時の即時遮断などシステムレベルでの安全設計が不可欠。
屋外・長距離環境での信頼性	屋外・長距離のレーザー給電では、雨や砂塵などの天候、大気の揺らぎなど実環境特有の不確実性が性能に影響する。
用途別のルール整備	電力・通信・光学・航空宇宙といった複数の規制分野にまたがるため開発段階から標準化・ルール形成を見据えた実証が重要。

## 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。気候変動問題を克服し持続可能な社会を実現するためには、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の削減、環境影響物質の対策、大気等からの CO<sub>2</sub> 除去といった取組が重要である。

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
<b>リサイクル技術</b> ・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  <b>カーボンリサイクル技術</b> ・CO <sub>2</sub> 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)  <b>未活用資源利用技術</b> ・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  <b>シェアリング等ビジネスモデル変革</b>	<b>原料転換技術</b> ・バイオマス燃料、SAF ・バイオマス由来化学品 ・水素還元製鉄  <b>燃料転換技術</b> ・工業炉や加熱炉での水素・アンモニア利用 ・電熱化  <b>熱利用高度化技術</b> ・産業用ヒートポンプ ・蓄熱技術 ・未利用熱利用  <b>製造プロセス省エネ技術</b> ・革新的化学品製造プロセス	<b>PFAS対応技術</b> ・代替 ・分離回収、無害化、リサイクル ・分析  <b>その他</b> ・低GWP冷媒 ・SLCFs <sup>*1</sup> ・窒素循環  <b>大気等からのCO<sub>2</sub>除去</b>  <b>ネガティブエミッション技術</b> ・DACCS <sup>*2</sup> 、BECCS <sup>*3</sup> ・風化促進 ・DOC <sup>*4</sup> 、海洋アルカリ化  <b>CO<sub>2</sub>貯留</b> ・(CO <sub>2</sub> -)EOR <sup>*5</sup> 、帯水層 ・CO <sub>2</sub> 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

サーキュラーエコノミーの実現は、『持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針』で提示した、「3つの社会システム」の一つであり、重要な取組である。サーキュラーエコノミーの推進により、製品や素材の生産量削減によるエネルギー消費の抑制に加え、ベースメタル、プラスチック、重要元素などのリサイクルを通じた資源利用の効率向上や供給リスクの低減が期待できる。

産業分野の化石資源消費量の削減の観点では、鉄鋼・化学産業など CO<sub>2</sub> 排出削減が困難とされる産業分野において、原料や燃料の非化石資源への転換や、未利用熱の活用、製造プロセス省エネルギー化などの化石資源消費量を削減する技術が不可欠である。

GHG(温室効果ガス)排出量の大部分を CO<sub>2</sub> が占めており、気候変動の観点からは CO<sub>2</sub> 排出削減が最重要課題である。地球環境の保全に向けては、CO<sub>2</sub> だけでなく様々な環境影響物質の対策技術が必要であり、例えば、SLCFs<sup>42</sup>(短寿命気候強制因子)の対策技術や、近年、欧米を中心に規制強化の議論が進められている PFAS<sup>43</sup>対応技術についても注視が求められる。

<sup>42</sup> Short-lived Climate Forcers の略。2021 年に公表された IPCC(気候変動に関する政府間パネル)第 6 次評価報告書において初めて項目立てされた。CO<sub>2</sub> よりも大気中の寿命が短く、物質同士の相互作用の存在や気候変動誘起メカニズムの複雑さ等から、対策効果の予測には大規模解析が必要とされる。

<sup>43</sup> Per- and Polyfluoroalkyl Substances の略。有機フッ素化合物の一部グループの総称であり、うちいくつかの化合物は国内でも製造等規制の対象となっている。

---

産業分野や運輸分野では、燃料の非化石転換等を進めても、どうしても避けられない CO<sub>2</sub> 排出(残余排出)があるため、カーボンニュートラルの実現には、大気から CO<sub>2</sub> を除去するネガティブエミッション技術も必要不可欠である。

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 CO<sub>2</sub> 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、俯瞰分析を行った。

## [1]重要元素のリサイクル技術

Innovation Outlook Ver. 1.0 ではベースメタルとプラスチックのリサイクル技術について俯瞰分析を実施した。本増補版では、経済的・産業的に不可欠でありながら供給リスクが高い「レアメタルやレアアースなどの重要元素のリサイクル」について俯瞰分析を行った。

### 3-2-2[1] 解決すべき社会課題(M)

石油、天然ガス、石炭、鉄、銅といった資源は、経済活動及び国民生活を支える基盤的要素である。我が国は、これら資源の多くを海外からの輸入に依存しており、国際的な需給動向や供給環境の変化の影響を受けやすい構造にある。こうした状況下において、資源調達の不安定化は経済活動や国民生活に重大な影響を及ぼすおそれがあることから、資源の安定確保は我が国にとって重要かつ継続的に取り組むべき課題である。

このうちレアメタルやレアアースをはじめとする重要元素は、スマートフォン・家電・電気自動車・再生可能エネルギー設備・データセンターなど、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、さらには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)の推進にも不可欠である<sup>44</sup>。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。

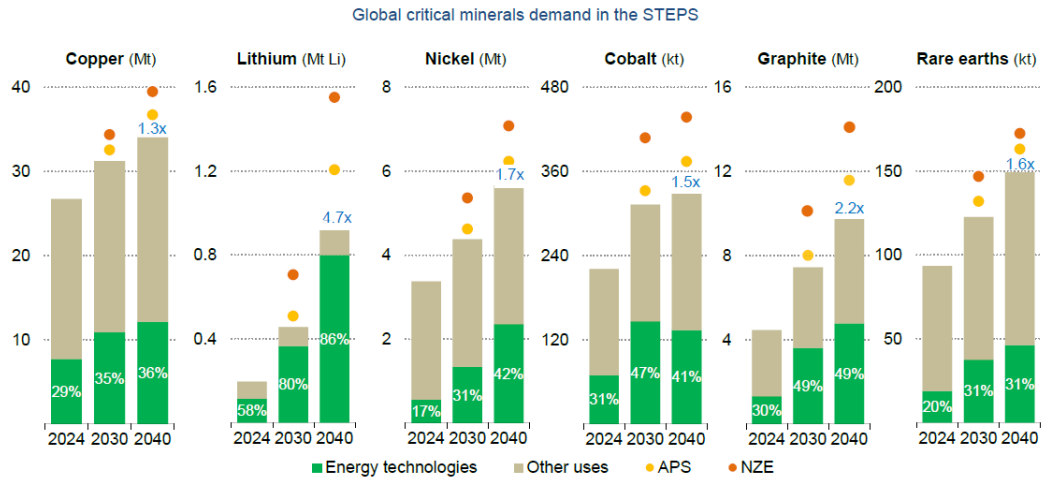
### 3-2-3[1] 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向

#### (1) 市場動向

エネルギー転換の加速に伴い、EV、蓄電池、再生可能エネルギー、送電網拡張等にとって必要不可欠なエネルギー関連鉱物の需要が大幅に拡大することが見込まれている。例えば、IEA によると、リチウム、ニッケル、コバルト、レアアースといった重要元素の需要は 2020 年代から 2030 年代にかけて急速に拡大し、リチウムは 2040 年までに約 5 倍に達する見通しである(図 3-2-2)。

<sup>44</sup> 日本政府により 2023 年に公表された『重要鉱物に係る安定供給確保を図るための取組方針』では、重要鉱物の対象は、以下のとおり。金属鉱産物(マンガン、ニッケル、クロム、タングステン、モリブデン、コバルト、ニオブ、タンタル、アンチモン、リチウム、ポロニウム、チタン、バナジウム、ストロンチウム、希土類金属、白金族、ベリリウム、ガリウム、ゲルマニウム、セレン、ルビジウム、ジルコニウム、インジウム、テルル、セシウム、バリウム、ハフニウム、レニウム、タリウム、ビスマス、グラファイト、フッ素、マグネシウム、シリコン、リン及びウランに限る。)

**Demand for critical minerals continues to rise across all scenarios, driven by the rapid deployment of energy technologies**



Notes: STEPS = Stated Policies Scenario; Mt = million tonnes; kt = kilotonnes; APS = Announced Pledges Scenario; NZE = Net Zero Emissions by 2050 Scenario. The figures for copper are based on refined copper (excluding direct-use scrap). Those for rare earth elements are for magnet rare earth elements only. Growth rates (in blue) are between 2024 and 2040.

図 3-2-2 STEPS シナリオにおける重要元素の需要予測

出所: Global Critical Minerals Outlook 2025 (IEA)

また、エネルギー転換に加え、デジタル技術、AI・ロボット、航空宇宙などの産業も大きく発展することが見込まれており、例えば世界の AI 市場規模は 2025 年から 2030 年にかけて約 3 倍<sup>45</sup>、宇宙産業の市場規模についても 2035 年までに約 3 倍<sup>46</sup>の規模に拡大すると予測されている。これらの産業でもエネルギー関連鉱物を含む様々な重要元素が使用されていることから(表 3-2-1)、各種の重要元素の需要拡大が見込まれており、例えばガリウムでは、データセンターだけでも需要が 2030 年までに 11%も増加する可能性があるとの報告もある<sup>47</sup>。

表 3-2-1 今後の発展が見込まれる産業で使用される重要元素

産業	部品、部素材	使用される主な重要元素
デジタル技術	ロジック半導体	ケイ素、ハフニウム、コバルト、ルテニウム、タングステン、ジルコニウム
	コンデンサ	タンタル、マンガン、ニッケル、バリウム、チタン、パラジウム
	ICチップ	金、銀、銅、錫
	HDD記録媒体	コバルト、ルテニウム、ネオジム、ジスプロシウム、テルビウム
AI・ロボット	ディスプレイ電極	インジウム、錫
	駆動モーター	ネオジム、プラセオジム、ジスプロシウム、テルビウム
	減速機・工具	コバルト、タングステン
	パワーエレクトロニクス	ケイ素、ガリウム
航空宇宙	光学レンズ	ランタン、イットリウム、ガドリニウム、セリウム
	センシング	インジウム、ガリウム、ゲルマニウム、ヒ素、アンチモン、水銀、カドミウム、テルル
	機体構造	マンガン、亜鉛、クロム、ジルコニウム、チタン、バナジウム、スカンジウム
	タービン翼	ニッケル、コバルト、レニウム、タンタル、タングステン、ハフニウム、ルテニウム

出所: 公開情報を元に NEDO イノベーション戦略センター作成

<sup>45</sup> 総務省「令和 7 年版 情報通信白書」において、Statista を元に推計  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r07/html/nd219100.html> (2026 年 3 月閲覧)  
<sup>46</sup> Space industry worldwide - statistics & facts (Statista, 2025)  
<https://www.statista.com/topics/5049/space-exploration/#topicOverview> (2026 年 3 月閲覧)  
<sup>47</sup> Global Critical Minerals Outlook 2025 (IEA, 2025)

このように、重要元素は今後発展が期待される様々な産業にとって不可欠であり、その需要は大きく拡大する見込みである。

一方で、重要元素は埋蔵国の偏在や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。例えば、コバルト鉱石の生産はコンゴ民主共和国が約 75%を占めており、供給源が集中している。ガリウムは生産の約 7 割を中国が占め、レアアースについても中国の採掘が約 6 割となっている。レアアース元素は性質が類似していることから、鉱物から個別の元素を分離・精製するには高度な分離技術が必要であり、また精製のためには多くのレアアース鉱物に含まれる放射性物質を処理する必要もあることから、製錬シェアにおいては約 9 割を中国が占めるに至っている。特に、重希土類について、日本はこれまで中国からの輸入に 100%依存してきたが(図 3-2-3)、輸入依存度の低減に向けて調達先の多角化に取り組んでおり、2025 年 10 月には初めて中国以外からの輸入が開始されている。

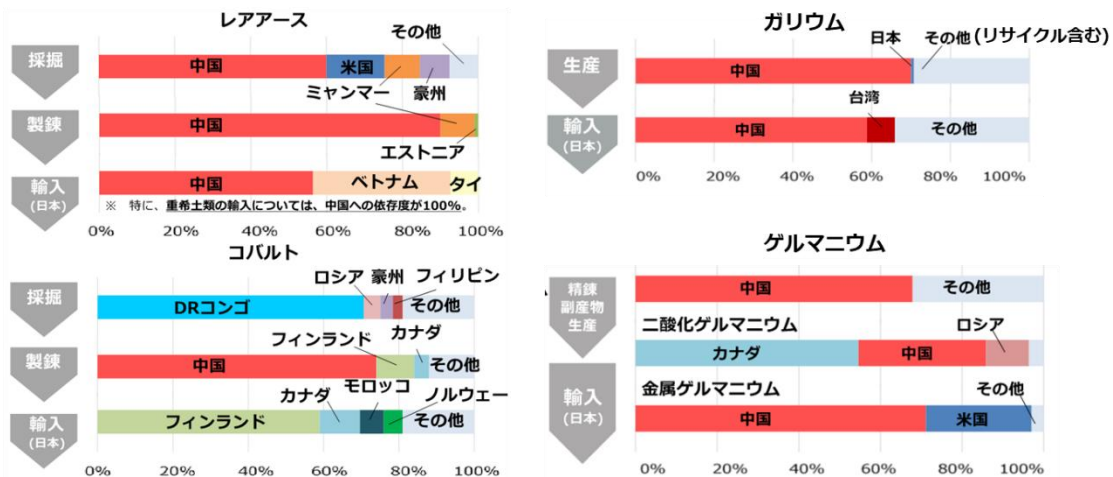


図 3-2-3 レアアース、コバルト、ガリウム、ゲルマニウムの生産・製錬国と日本の輸入先

出所: 第 1 回 産業構造審議会 製造産業分科会 鉱業小委員会「鉱物資源をめぐる状況について」(経済産業省、2024)を元に NEDO イノベーション戦略センター作成

また、近年では、経済安全保障、本国産業の保護・育成、鉱物価格のコントロール、環境保全などを目的として、生産国による鉱物や製錬品の輸出管理規制が急増しており(表 3-2-2)、重要元素の困り込みといった動きにより、調達リスクは一段と増している。

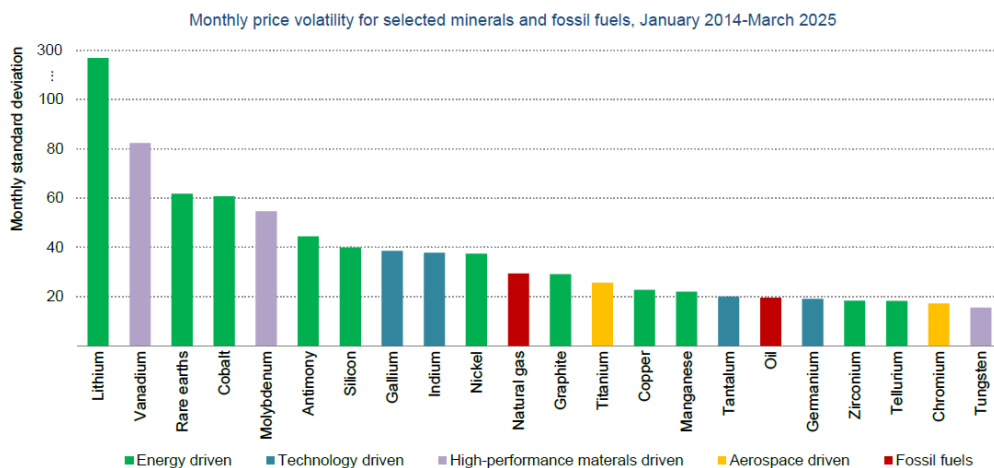
**表 3-2-2 重要元素に係る輸出管理規制の例**

年月	国・主体	規制対象
2020年1月	インドネシア	ニッケル
2022年12月	ジンバブエ	リチウム
2023年8月	中国	ガリウム、ゲルマニウム
2023年12月	中国	黒鉛
2024年9月	中国	アンチモン、超硬材料関連
2025年2月	DRコンゴ	コバルト
2025年2月	中国	タングステン、テルル、ビスマス、モリブデン、インジウム
2025年4月	中国	希土類(スカンジウム、イットリウム)、重希土類(サマリウム、ガドリニウム、テルビウム、ジスプロシウム、ルテチウム)
2025年10月	中国	中・重希土類(ホルミウム、ユーロピウム、ツリウム、エルビウム、イッテルビウム)、希土類関連製品・技術

出所: 各種公開情報を元に NEDO イノベーション戦略センター作成

ゲルマニウムが亜鉛生産の副産物として生産されるように、重要元素の多くは他の主要金属資源の副産物として生産されるため、これらの供給は主要金属の生産動向の影響を受けやすく、供給が不安定になりやすいという特性を有している。

重要元素は、これまで述べたような需要の急激な変化や、生産国の寡占化に伴う供給リスクの高さに加え、ベースメタルと比べて市場規模が小さいことから、市場価格の変動が大きいという特徴もある。IEAによると、多くの重要元素では、過去10年の価格のボラティリティは石油や天然ガスを上回っている(図 3-2-4)。

**Among 20 strategic minerals, 75% have shown greater price volatility than oil, and half have been more volatile than natural gas**


Note: Due to data availability, the volatility values for some minerals were calculated over differing time frames: January 2020 to March 2025 for graphite, January 2018 to March 2025 for manganese, March 2017 to March 2025 for titanium, and September 2019 to March 2025 for indium.  
Sources: IEA analysis based on S&P Global and Bloomberg.

**図 3-2-4 重要元素の価格のボラティリティ(2014年1月~2025年3月)**

出所: Global Critical Minerals Outlook 2025(IEA)

## (2) 技術動向

### (i) 製錬・精製技術の強化

重要元素の製造工程における製錬・精製は、鉱石や塩水中に微量に存在する対象元素を高純度で分離・回収する工程であり、乾式製錬(焙焼、還元、溶融)、湿式製錬(浸出、溶媒抽出、沈殿、イオン交換)、更に電解精製など、各プロセスが目的元素に応じて適切に組み合わせられている。一方、これらのプロセスは高温処理や多量の薬品、電力を必要とすることが多く、エネルギー消費や環境負荷が大きいため、環境規制やエネルギー供給条件を背景として、元素によっては製錬・精製が特定の国や地域に集中する傾向が生じてきた。このような状況から、近年ではエネルギー消費や環境負荷の低減が重要な技術課題となっており、溶媒抽出の高度化、イオン交換やバイオリーチングの導入、電解工程の省エネルギー化、更には直接リチウム抽出(DLE: Direct Lithium Extraction)のような新たな精製技術の研究開発が進められている。

### (ii) リサイクル

製造工程で発生する端材や副産物、使用済み製品などを原料として、含有する元素を再資源化する取組が進められている。乾式製錬、湿式製錬、電解精製といった天然資源の製錬・精製で確立された基本操作が応用されている。

リサイクルの形態としては、まず個別リサイクルが挙げられる。廃リチウムイオン電池、使用済み磁石、自動車用触媒など、特定の製品や部材を個別に回収し、前処理、分離を行った上で、重要元素を再資源化する方法である。この方法は廃製品中の対象元素の品位が高く、比較的高効率な元素の再資源化が可能である一方、廃製品の安定確保、部材取り出しコスト、処理対象が限定されるといった課題がある。

また、非鉄製錬ネットワークを活用したリサイクルも行われている。銅製錬、亜鉛製錬、鉛製錬では、製錬副産物等を相互にやり取りする非鉄製錬ネットワークを活用して銅、亜鉛、鉛鉱石中に微量含まれる希少金属を回収しており、この回収技術を活用してリサイクル原料から金や銀、レアメタルなどの重要元素を再資源化している。この方法は処理量が大きく、多様な元素を回収できるという特徴を有し、重要元素のリサイクルにおいて重要な役割を担っている。日本国内の主要な非鉄製錬メーカーは、製錬におけるリサイクル原料の処理量増加の方針を打ち出している<sup>48</sup>。

### (iii) 使用量削減・代替素材開発

調達リスクの高い重要元素については、その使用量を削減するための技術開発や、当該元素を使用しない代替素材の開発が精力的に進められている。

電池分野においては、従来の三元系リチウムイオン電池に用いられるニッケル及びコバルトを使用しないリン酸鉄リチウムイオン電池(LFP: Lithium Iron Phosphate

<sup>48</sup> JX 金属

<https://www.jx-nmm.com/company/industry/metal-recycling/>(2026年3月閲覧)

三菱マテリアル

<https://www.mmc.co.jp/corporate/ja/company/policy/details/e-scrap.html>(2026年3月閲覧)

battery)の普及が拡大しており、IEAによれば、2024年時点で電気自動車の約半数に採用されている<sup>49</sup>。また、コバルトの使用が微量または不要なマンガリッチ系電池や、リチウムを使用しないナトリウムイオン電池の開発も進展している。

電気自動車や風力発電向けの永久磁石分野においては、ジスプロシウムやテルビウムといった重希土類の使用量を低減するため、これらを局所的に使用する技術や、重希土類を使用しない磁石の研究開発が推進されている。NEDOにおいては、「経済安全保障重要技術育成プログラム(K Program)」の一環として、「重希土フリー磁石の高耐熱・高磁力化技術」に係る研究開発が実施されている<sup>50</sup>。

また、電池及び磁石以外の分野においても、透明電極材料として用いられるITO(酸化インジウムスズ)や、アンチモンを使用した難燃剤等について、代替素材の開発や使用量削減に向けた取組が進められている。

### (3) 政策動向

#### (i) 日本

2022年5月に公布された『経済安全保障推進法』に基づき、「特定重要物資」の一つに「重要鉱物」が指定され、サプライチェーン強靱化に向けた各種支援が進められている。また、2023年1月には『重要鉱物に係る安定供給確保を図るための取組方針』が策定され、探鉱・フィジビリティ調査、鉱山開発、製錬能力強化、技術開発、リサイクル等を組み合わせた包括的施策を推進し、資源権益獲得から国内での製錬・加工、循環利用に至るまでの一貫した供給確保体制の構築が図られている。これらの方針に基づき、これまでに鉱山開発支援、製錬能力・技術強化、リチウムイオン電池リサイクル促進などの複数の供給確保計画が認定され、支援が行われている<sup>51</sup>。さらに、2025年11月には日本成長戦略会議において、官民連携による危機管理投資、成長投資を促進する17の戦略分野の一つとして、マテリアル(重要鉱物・部素材)分野が指定され、国家戦略上の重点領域として強化する方針が示されている<sup>52</sup>。2026年3月には『重要鉱物に係る安定供給確保を図るための取組方針』が改定され、重要鉱物の対象が追加されている<sup>53</sup>。

#### (ii) 欧州

2023年に制定された欧州重要原材料法(CRMA)では、供給リスク及び経済的重要性が高い原材料として重要原材料を34種、このうちエネルギー・トランジションや宇宙

<sup>49</sup> Global Critical Minerals Outlook 2025 (IEA, 2025)

<sup>50</sup> 「経済安全保障重要技術育成プログラム」で重希土フリー磁石/レアアースフリー磁石開発と次世代磁石に適したモーターの設計開発に着手(NEDO, 2024)

[https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101765.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101765.html) (2026年3月閲覧)

<sup>51</sup> JOGMEC HP

[https://www.jogmec.go.jp/metal/metal\\_10\\_00001.html](https://www.jogmec.go.jp/metal/metal_10_00001.html) (2026年3月閲覧)

<sup>52</sup> 日本成長戦略会議 第1回、第2回(内閣官房)

<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/nipponseichosenryaku/index.html> (2026年3月閲覧)

<sup>53</sup> 2026年3月時点で、マンガ、ニッケル、クロム、タングステン、モリブデン、コバルト、ニオブ、タンタル、アンチモン、リチウム、ポロン、チタン、バナジウム、ストロンチウム、希土類金属、白金族、ベリリウム、ガリウム、ゲルマニウム、セレン、ルビジウム、ジルコニウム、インジウム、テルル、セシウム、バリウム、ハフニウム、レニウム、タリウム、ビスマス、グラファイト、フッ素、マグネシウム、シリコン、リン、ウランが対象となっている

[https://www.meti.go.jp/policy/economy/economic\\_security/metal/critical\\_minerals\\_torikumihoshin.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/economy/economic_security/metal/critical_minerals_torikumihoshin.pdf) (2026年3月閲覧)

産業といった戦略技術に不可欠で今後需要の急増が見込まれる原材料を戦略的原材料として 16 種指定し、戦略的原材料については、2030 年までに EU 域内供給に対して域内採掘 10%、域内加工 40%、域内リサイクル 25%を賄い、特定国への依存度を 65%以下に抑制するという数値目標が設定されている。

2025 年には、CRMA の目標達成を加速させるための行動計画「RESourceEU」が発表された。中核施策として、需給、在庫、リスク情報の一元管理、共同調達、戦略備蓄、プロジェクト資金支援などを統合的に担う欧州重要原材料センターの設立が進められている。リサイクルは RESourceEU の重要な柱として位置づけられており、永久磁石スクラップや電池ブラックマスの域外輸出制限、リサイクルしやすい表示義務の拡大、プレコンシューマ廃棄物を含む再生材利用の促進など、規制面と制度面の両面から循環利用を後押しする方針が示されている。

また、バッテリー規則では、リサイクル由来の原材料の最低使用割合として、2031 年以降にコバルト 16%、鉛 85%、リチウム及びニッケル各 6%、2036 年以降にコバルト 26%、鉛 85%、リチウム 12%、ニッケル 12%を用いることを目標として導入される予定である。

2025 年には、戦略的原材料の生産能力を強化するための 47 件の戦略的プロジェクトが発表された。プロジェクトは、採掘活動が 25 件、加工が 24 件、リサイクルが 10 件、原材料代替が 2 件あり、17 種の戦略的原材料のうち 14 種を含んでいる。

### (iii) 米国

内務省(DOI)は、米国地質調査所(USGS)を通じて、輸入依存度が高く、供給の混乱により経済に大きな影響を与える鉱物として 60 種の重要鉱物を指定している。また、エネルギー省(DOE)は、エネルギー転換に不可欠であり、供給途絶の際に代替手段が困難と予測される重要物資として 18 種を指定している。これら重要鉱物や重要物資は、インフラ投資雇用法、インフレ抑制法、国防生産法及び大統領令等により、サプライチェーン強化に向けた支援が行われている。例えば、インフラ投資雇用法では、バッテリー製造や原材料となる重要鉱物の処理、精製能力の高度化、リサイクル向け等に約 60 億ドルの支援が行われている。

さらに、米国は 1939 年に戦略的重要物資備蓄法を導入し、国防総省(DOD)傘下の国防兵站局(DLA)が国家防衛備蓄を実施している。

### 3-2-4[1] 社会課題の解決のために取り組むべき領域(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

3-2-3[1]で述べた社会課題である重要元素の持続可能な供給の解決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。本増補版では、これらの領域から、リサイクルを取り組むべきフロンティア領域等として俯瞰する。

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する地政学的な影響を受けにくい資源調達手段であり、今後の資源戦略の中核を担う重要な要素である。また、リサイクルは廃棄物削減や環境保全の観点からも重要である。将来的に、DX や GX に関連する製品の廃棄量の増大が見込まれる中、事前にリサイクル体制を構築することは、廃棄物削減の観点から必要である。さらに、廃製品や廃棄物が適切に回収・利用されない場合、重要元素が流出し、環境に悪影響を及ぼす可能性も考えられる。鉱山から採掘し、製錬する場合、元素によっては大量の排水や有害な廃棄物が発生したり、大量の電力やエネルギーの消費に伴い多くのGHG が排出される場合もある。くわえて、リサイクルで必要とされる選別、抽出、精製などの技術は、天然資源の製錬にも応用できる場合もあり、リサイクルに係る技術開発が製錬・加工技術の強化にも波及する可能性があり、重要元素の持続可能な供給体制の実現に大きく貢献することが期待される。

このような観点から、『レアメタルやレアアースなどの重要元素のリサイクル』は、我が国にとって取り組むべき重要な領域として提案する(図 3-2-5)。

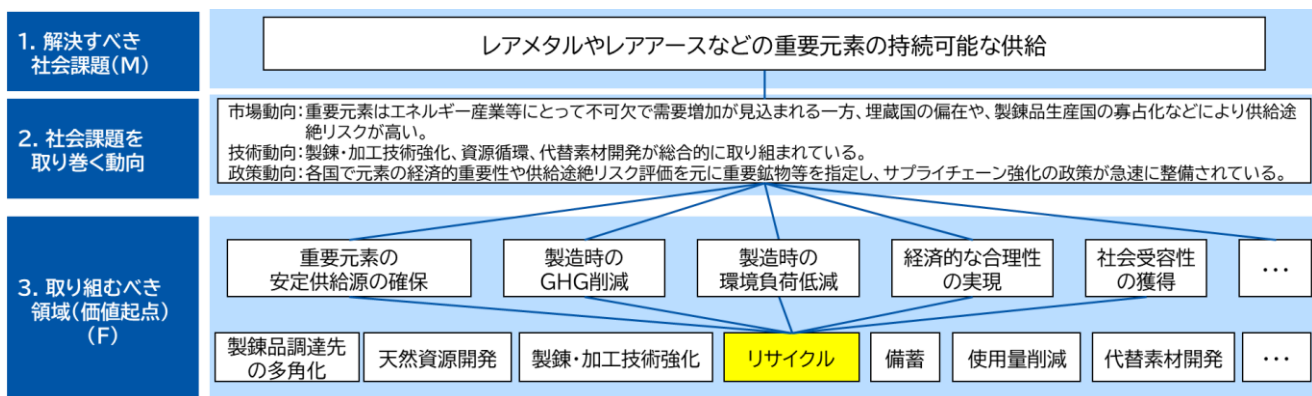


図 3-2-5 レアメタルやレアアースなどの重要元素のリサイクルの MF ロジックモデル

リサイクルに優先的に取り組むべき元素を選ぶ基準としては、鉱物や製錬品生産が特定地域に偏在し供給途絶リスクが高いもの、我が国の産業競争力を支える重要用途に使用されるもの、供給リスクの低い元素への代替が困難であるもの、が挙げられる。IEA は、エネルギー転換、AI・ロボット、航空宇宙、高性能合金といった今後の重要産業に利用され、経済に重大な影響を及ぼす可能性のある「エネルギー関連戦略鉱物」として、リチウム、ニッケル、コバルト、グラファイト、レアアース、マンガン、ケイ素、アンチモン、クロム、ガリウム、ゲルマニウム、インジウム、モリブデン、タンタル、テルル、チタン、タングステン、バナジウム、銅、ジルコニウムの 20

種を挙げており<sup>54</sup>、これらの元素は、リサイクルによる安定調達の寄与が期待される(図 3-2-6、図 3-2-7)。

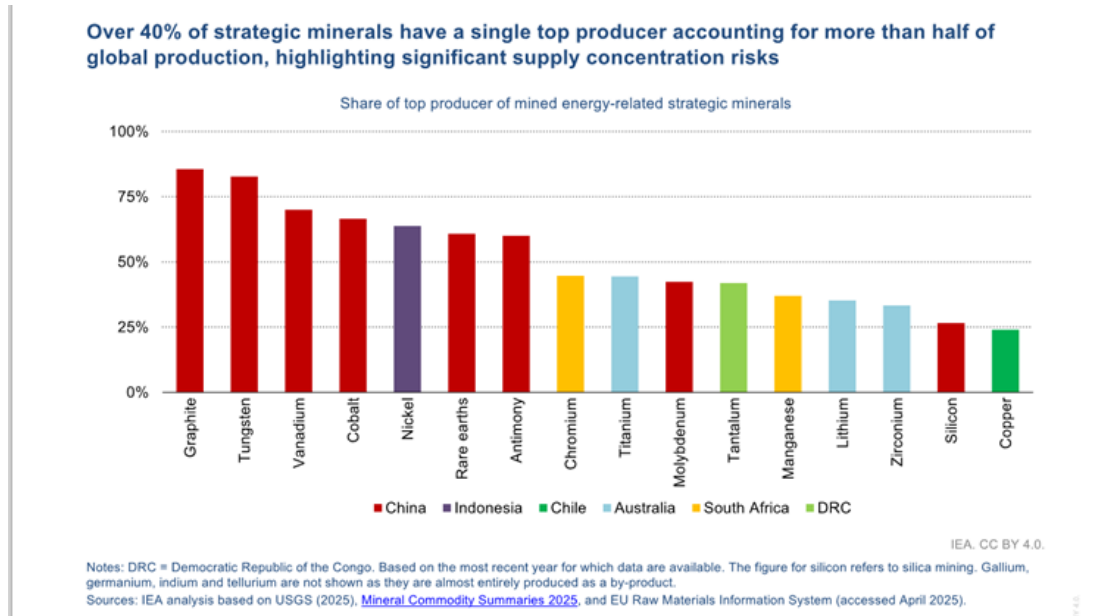


図 3-2-6 IEA の「エネルギー関連戦略鉱物」における、鉱石生産トップシェア国  
出所:Global Critical Minerals Outlook 2025(IEA)

**For refined material production, China is the leading producer for nearly all of the 20 minerals analysed and has an average market share of around 70%**

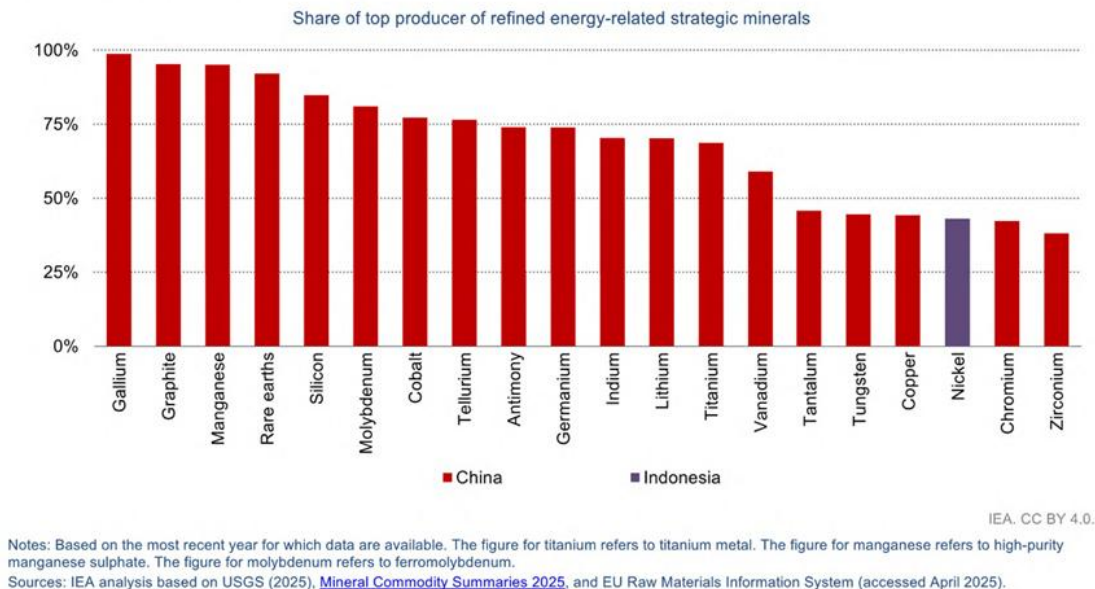


図 3-2-7 IEA の「エネルギー関連戦略鉱物」における、製錬品生産トップシェア国  
出所:Global Critical Minerals Outlook 2025(IEA)

<sup>54</sup> Global Critical Minerals Outlook 2025(IEA, 2025)

一方、重要元素の供給リスク、需要や価格の変動、代替可能性には将来の不確実性が大きく、リサイクルが果たす役割や貢献度も変動しうる。このような特性を踏まえ、直近の市場状況に過度に影響されることなく、廃製品や廃棄物の回収の可能性があり、リサイクル原料の確保が見込める元素については、リサイクル技術を確立し、リサイクル体制を整備しておくことが、長期的な安定調達に向けて重要である。

このように、重要元素のリサイクルは安定調達への貢献が期待される一方で、現状の重要元素のリサイクル率は図 3-2-8 に示すように、素材単体として利用され回収が比較的容易な鉄やアルミニウムといったベースメタルの 50~80%、元素の価格が高い白金族元素の 20~30%に比べて低い。リチウムイオン電池関連の元素で 5%程度、レアアースでは数%にとどまり、半導体関連の元素に至ってはほとんどリサイクルされておらず、リサイクル技術の確立を含めた総合的な取組を加速させる必要がある。

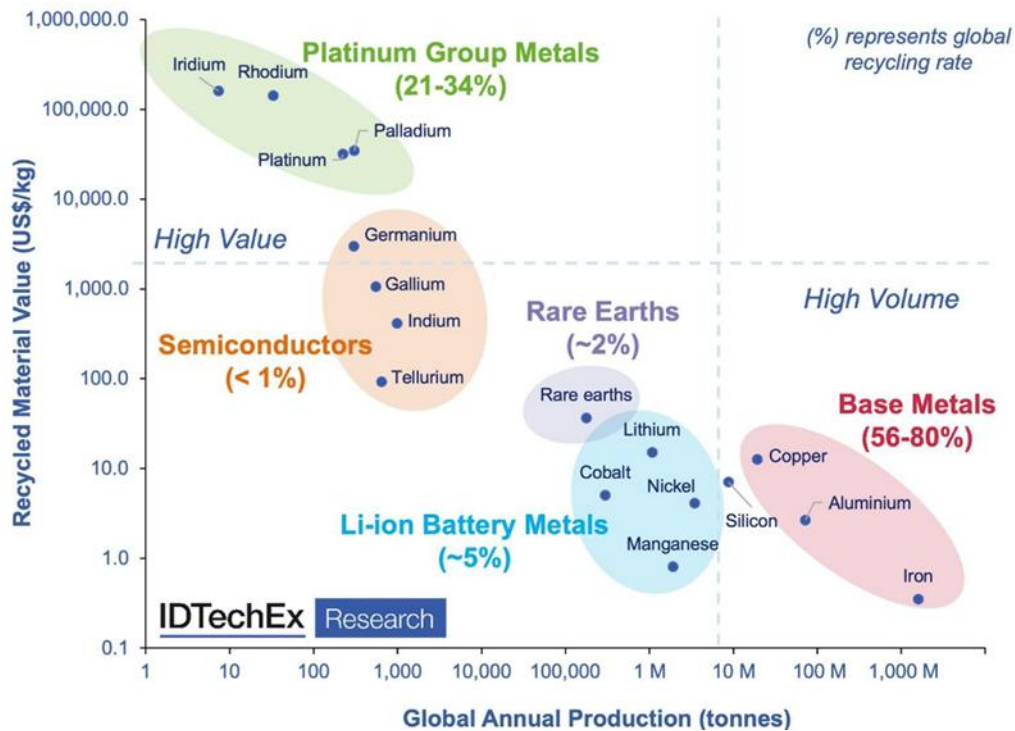


図 3-2-8 各元素のリサイクル率(世界)

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

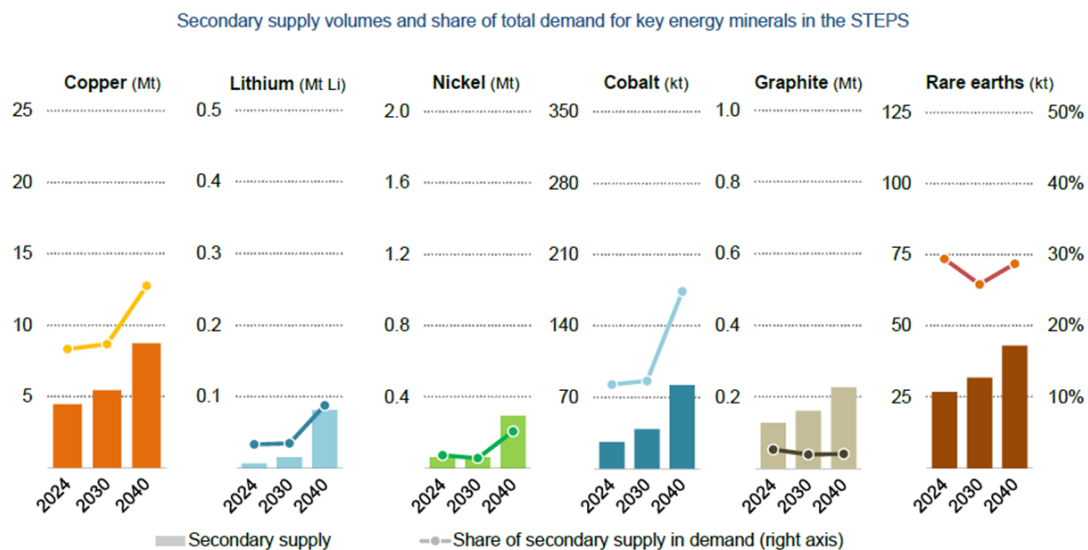
以下に、重要元素のリサイクルについて、将来性(成長性・社会課題)、技術・アイデアの革新性、日本の優位性、民間のみで取り組む困難性、重要経済安保技術、その他特筆すべき理由の観点から示す。

### ① 将来性(成長性・社会課題)

重要元素は、エネルギー、AI・ロボティクス、航空宇宙、高性能合金など、今後大きな発展が見込まれる産業にとって不可欠であり、需要の拡大が予測されている。これらの重要元素の供給手段としてのリサイクルは、地政学的リスクが小さく、今後、その重要性は高まると考えられる。

例えば、重要元素のうちリチウムイオン電池や再生可能エネルギーに使用されるエネルギー関連元素は、2030年以降に再生材供給量が急速に増加し(図 3-2-9)、再生材の市場規模は 2050 年までに現在の約 5 倍の 2,000 億ドル<sup>55</sup>に達する見込みである。

Secondary supply increases rapidly post-2030 as a growing amount of end-of-life feedstock becomes available



IEA, CC BY 4.0.

Notes: Includes recycled volumes from end-of-life equipment and manufacturing scrap. For copper, direct-use scrap is excluded.

図 3-2-9 STEPS シナリオにおける主要エネルギー関連元素の再生材供給量と総需要に占める割合  
出所: Global Critical Minerals Outlook 2025(IEA)

### ② 技術・アイデアの革新性

図 3-2-8 に示すように、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ているが、リサイクル率は数%程度にとどまり、半導体用途などの重要元素はほとんどリサイクルが行われていない。これらに対する経済合理性も兼ね備えたリサイクル技術は革新的である。

<sup>55</sup> Recycling of Critical Minerals(IEA, 2024)

通常、元素ごとに個別のリサイクルプロセスが確立されるが、軽微な条件変更やモジュール組み換え等によるプロセス変更によって、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れば、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システムとして革新的である。

さらに、既存のベースメタルリサイクル工程において、副産物に濃縮される重要元素の回収も実現すれば、重要元素の貴重な供給源となる。

### ③ 日本の優位性

金属資源に乏しい日本は、各非鉄製錬メーカーが独自に発展させてきた非鉄製錬ネットワークを有しており、天然鉱物に含まれる希少金属を無駄なく回収する高度な技術を確認している。この非鉄製錬ネットワークを活用した廃製品や廃棄物から多種多様な重要元素を回収する技術は、日本の大きな強みである。特に、その中核を担う銅製錬は世界第4位の規模を誇り、リサイクル原料を効率的に受け入れ処理できる十分なポテンシャルを備えている。各非鉄製錬メーカー内のネットワークは高度に構築されている(図3-2-10)一方、今後のリサイクル原料の拡大、回収元素の多様化に向けては、企業間の連携を更に強化していくことが効果的と考えられる。

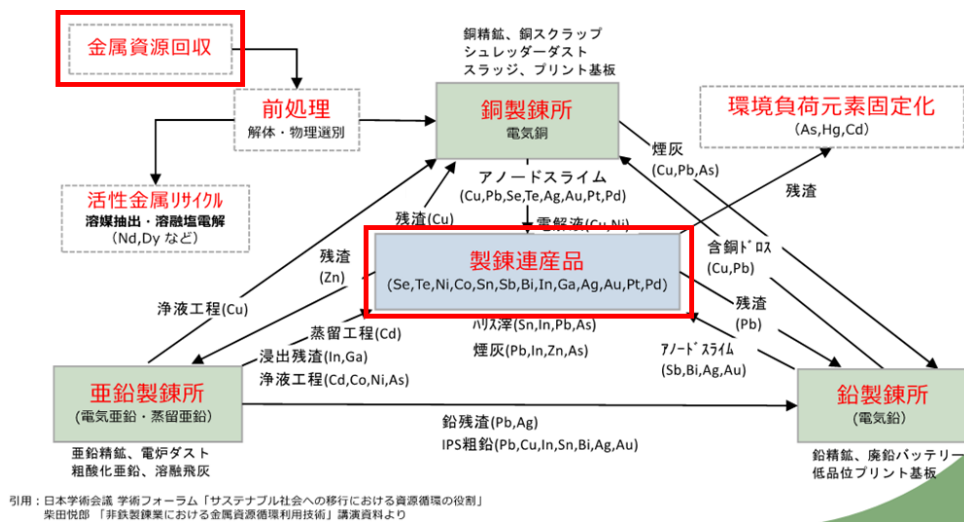


図3-2-10 非鉄製錬ネットワークによる重要元素回収

出所：資源循環と非鉄製錬(日本鉱業協会、2025)(赤囲みはイノベーション戦略センター加筆)

日本は最終処分場のひっ迫を背景に、早くからリサイクルに取り組んできた歴史があり、国民の分別排出の意識や実践のレベルが高く、地域に根ざしたリサイクルの取組が広く定着しているのも大きな特徴である。これらの仕組みを基盤として、回収・選別から再資源化までを一体的に推進できる強力なサプライチェーンを構築できることは、日本独自の大きな強みである。

#### ④ 民間のみで取り組む困難性

重要元素は、その需要の変動や鉱物の輸出規制などによって市場価格の変動幅が大きい。このため、リサイクル事業の採算性が不安定であり、民間単独での技術開発や設備投資の判断が難しい面がある。

さらに、リサイクルのサプライチェーンは、回収・選別・前処理・製錬・精製と工程が多岐にわたり、複数の主体の連携が不可欠となる。民間のみの取組では回収量の確保やコスト最適化に限界があり、また個別連携だけでは体系的なリサイクルの実現は困難である。

#### ⑤ 重要経済安保技術

経済産業省が策定した「重要鉱物に係る安定供給確保を図るための取組方針」において、リサイクル技術開発、設備投資が施策の一つとして挙げられている。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。

#### ⑥ その他特筆すべき理由

鉱石の採掘や製錬は大量のエネルギーを消費するとともに、多量の排水や有害廃棄物の発生も伴う。IEA によると、ニッケル、コバルト、リチウムなどのエネルギー関連鉱物では、リサイクルによる生産は天然資源からの生産に比べて GHG 排出量を平均して約 80%削減できると報告されている<sup>56</sup>。また、レアアースについても、地球温暖化に加えて、酸性化、富栄養化及びヒトへの毒性などを含む環境影響を、リサイクルによって 64%~96%削減できるとの報告がある<sup>57</sup>。

したがって、GHG 排出削減及び環境負荷低減の観点からも、リサイクルは取り組むべき課題である。

<sup>56</sup> Global Critical Minerals Outlook 2025 (IEA, 2025)

<sup>57</sup> A Systematic Literature Review of Selected Aspects of Life Cycle Assessment of Rare Earth Elements: Integration of Digital Technologies for Sustainable Production and Recycling (R. G. Mugion et al., Sustainability 2025,17)

### 3-2-5[1] 取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例

3-2-4[1]で特定した重要元素のリサイクル領域の実現のための具体的な手段の事例を述べる。

重要元素のリサイクルを推進するにあたり、まず解決すべき主な問題点を以下に整理する。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、不純物を多く含んだ状態で廃棄されるため、破碎・選別といった前処理から抽出・精製に至るまでのプロセスが複雑化することで高コスト化し、リサイクルが技術的・経済的に成立する障壁となっている。また、重要元素を含む製品は、性能向上やコスト削減を目的として、製品設計が絶えず変化しており、含有元素量や不純物組成も変化することから、リサイクル技術もその変化に応じて継続的な適応と高度化が必要である。例えば、近年、レアアース磁石では重希土類使用量の削減や、用途に応じてランタン、セリウムといった低価格元素の添加が進んでおり、廃磁石リサイクルに求められるリサイクル要件も変化しつつある(表 3-2-3)。

表 3-2-3 重要元素のリサイクルにおける解決すべき主な問題点

区分	解決すべき問題点
リサイクル原料の回収	<ul style="list-style-type: none"> <li>・<u>リサイクル原料の量の安定確保が難しい</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 多様な製品に微量で分散していることが多く、単体で回収しにくい</li> <li>- 製品の構造が複雑で、分離・剥離などの回収工程が複雑になる</li> </ul> </li> <li>・<u>リサイクル原料の質(濃度・不純物)が安定しない</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 製品の構造や材料が多様であり、また用途や製品設計の変化のスピードが速いため、スクラップ中の含有元素にばらつきがある</li> <li>- 回収スクラップ中の元素含有量、不純物量の把握が難しい</li> </ul> </li> </ul>
前処理(破碎・選別・高濃度化)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・<u>製品の複合化が進み、また複数の素材が強固に一体化していることが多く、目的元素を含む画分の分離難易度が高い</u></li> <li>・<u>使用済スクラップ中の含有金属の種類、量、位置情報の取得が難しい</u></li> </ul>
精製(抽出・分離・高純度化)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・<u>分離精度、コスト、環境負荷に課題がある</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 乾式:大量処理に適する一方、エネルギー消費が大きく、元素の選択分離が難しい場合がある</li> <li>- 湿式:高純度化のためにはプロセスが多段で複雑になりコスト増につながる。また、酸や有機溶媒を多量に排出し、環境負荷が大きい。</li> <li>- 電解:電力コストが大きい</li> </ul> </li> <li>・<u>重要元素は高純度品が求められることが多く、多様な不純物除去による高純度化技術が求められる</u></li> </ul>
経済性の確保	<ul style="list-style-type: none"> <li>・<u>重要元素は、元素ごとに需要、市場価格の変動が大きく、鉱物の貿易規制による突如の供給変化があるなど、リサイクル事業の経済性が不安定で投資判断が難しい</u></li> </ul>

こうした問題点に対する技術的対策としては、以下が考えられる。

## (1) 易リサイクル設計

製品段階で易リサイクル性を考慮した設計を取り入れることにより、破碎・選別前の分解性が向上し、前処理による高濃度化と前処理コストの低減が期待される。例えば、永久磁石を樹脂モールドせず、モジュール化して着脱可能とする設計や、選択的に分解可能な接着剤の使用などが考えられる。また、基板や部材に使用される材料の種類や組成の情報を容易に取得可能とする設計や仕組みも有効である。

## (2) 廃製品から部素材を分離・選別し、元素を高濃度化する前処理技術

個別リサイクルや非鉄製錬ネットワークでの精製・高純度化を実現するには、破碎・選別・抽出などの前処理により、元素含有量の高い分画を得ることが極めて重要である。破碎工程では、複合材界面を選択的に破断する高電圧パルス破碎や超音波キャビテーション破碎など、低エネルギーで高選択性を達成する技術開発が行われている<sup>58</sup>。選別工程では、従来の比重選別や磁力選別に加え、樹脂を選択的に溶解して金属層を露出させる溶媒処理や、超臨界水・超臨界 CO<sub>2</sub> を用いて高回収率で金属を抽出する技術も報告されている<sup>59</sup>。さらに、AI 画像認識や RFID (Radio Frequency Identification) のような識別技術は、高精度な分離に貢献すると考えられる。

くわえて、廃製品中の重要元素及び不純物の種類や量、重要元素の存在位置を迅速かつ簡便に分析できる技術は、最適な破碎条件や選別手法を事前に選定する上で有効であり、前処理全体の効率を飛躍的に向上させる。

これら前処理技術や分析技術によって対象元素を高濃度化することで、後段の精製プロセスの効率改善とコスト低減が期待される。

<sup>58</sup> A toolbox for improved recycling of critical metals and materials in low-carbon technologies(G. Zante et al., RSC Sustainability, 2024, 2, 320–347)

<sup>59</sup> Recovery of metals and valuable chemicals from waste electric and electronic materials: a critical review of existing technologies(S. Gulliani et al., RSC Sustainability, 2023, 1, 1085–1108)

### (3) 低環境負荷・低コストで元素を高純度化するリサイクル技術

精製・高純度化では、環境負荷が低く、低コストな技術の確立が必要である。そのため、使用する溶媒やエネルギー使用量を最小化しつつ、高い選択性を示す分離精製プロセスの開発が求められる。具体的には、深共晶溶媒やイオン液体を用いた低温選択溶解、吸着材やイオン交換材料、膜分離による高効率な分離・回収の研究開発が行われている。乾式プロセスにおいてもマイクロ波加熱<sup>60,61,62</sup>やプラズマ処理<sup>63,64</sup>などの省エネルギー型の技術が報告されている。

また、例えば永久磁石においては、レアアースを単体まで精製して再資源化するロングループリサイクルに対して、使用済み磁石から合金状態のまま回収し、再び磁石にするショートループリサイクルは、多段の湿式工程や電解工程を必要としないことから、低環境負荷や省エネルギーの観点で有効な手法の一つである(図 3-2-11)。

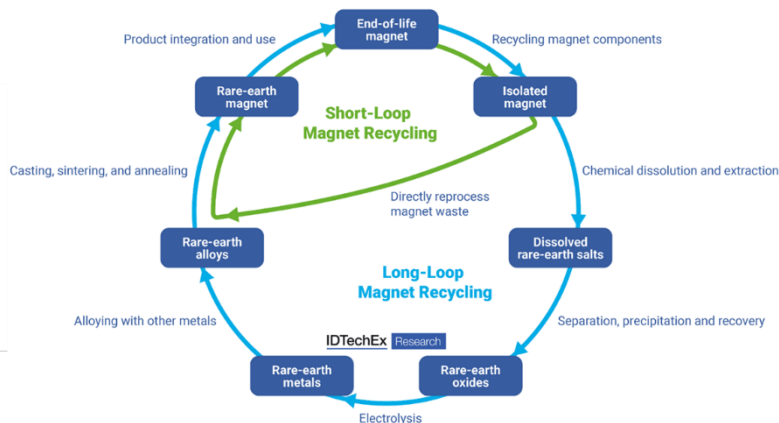


図 3-2-11 レアアース磁石におけるロングループ及びショートループリサイクル

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

### (4) 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りサイクル技術

重要元素は需要や市場価格の変動が大きく、さらに鉱物の輸出規制による突発的な供給変化も起こり得るため、特定元素に特化した専用リサイクル設備では採算が不安定となり、投資判断や長期的な操業計画が難しいという問題がある。

この問題に対しては、可能な限り共通化された精製プロセスを用いて多様なリサイクル原料を処理するとともに、軽微な条件変更やモジュール組み換え等によって複数元素を柔軟に回収できるリサイクル技術が有効であると考えられる。このような技術により、

<sup>60</sup> Microwave-Mediated Extraction of Critical Metals from LED E-Waste (A. B. Bourlinos et al. ChemEngineering, 2025, 9, 47)

<sup>61</sup> Green and Sustainable Rare Earth Element Recycling and Reuse from End-of-Life Permanent Magnets (Z. Cherkezova-Zheleva et al., Metals, 2024, 14, 658)

<sup>62</sup> Recycling of e-waste power cables using microwave-induced pyrolysis – process characteristics and facile recovery of copper metal (S. Horikoshi et al., RSC Adv., 2024, 14, 29955–29964)

<sup>63</sup> Applications of Plasma Technologies in Recycling Processes (R. Kusano et al., Materials, 2024, 17, 1687)

<sup>64</sup> <https://news.mit.edu/2025/6K-cleans-critical-minerals-using-microwave-plasma-0207> (2026年3月閲覧)

原料組成が変動しても運転条件の調整によって稼働を維持し、市場動向に応じて回収元素や回収量を切り替えることができれば、採算の安定化が期待される。また、共通プロセスで複数元素を扱えることが可能となれば、従来必要であった元素ごとの専用ラインの削減につながり、CAPEX や OPEX の低減も期待される。

このようなリサイクル技術は、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。

#### (5) 未利用資源からの元素回収技術

廃水、下水、スラグ、海水などには希薄ながらも重要元素が含まれており、新たな代替供給源として活用できる可能性を秘めている。元素濃度が低いため、回収の難易度やコストは高いが、排水中のレアメタルを微生物代謝を利用するメタルバイオ技術によって選択的に回収する試みなどがある。

重要元素のリサイクル促進のためには、技術開発だけでなく制度面からの支援も重要である。回収インフラを整備し、廃製品や未利用資源を安定的に確保できるルートを構築するとともに、再生材の利用に対するインセンティブを導入することで、民間によるリサイクル事業の継続的な実施につながる。公的機関が実証やスケールアップ検討のための共用パイロット設備を整備し、民間が必要に応じて利用できる仕組みを構築することで、技術開発リスクや初期投資負担を軽減できると考えられる。

## [2]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)

NEDO が国内外の市場・技術・政策動向を俯瞰した Innovation Outlook Ver. 1.0 では、豊かな未来レポート<sup>65</sup>をもとに、イノベーション推進において「大切にすべき 6 つの価値軸」をあげた。そのうち「持続可能な経済成長の実現」では、「基幹産業・技術の創成による持続可能な社会」「物質循環による持続可能な社会」の二つを目指すべき社会像として示した。

持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針 2023 では、目指す社会像として「気候変動問題を乗り越え、環境、経済、社会が調和を形成し、新しい価値が創造され続け、持続的に発展し続ける社会」を、持続可能な社会と位置づけた。

『持続可能な経済成長の実現』に向けて、気候変動の原因である CO<sub>2</sub> への対策が喫緊の社会課題である。

### 3-2-3[2]社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向

#### (1) 技術動向

IPCC AR6<sup>66</sup>の WG3 報告書で取上げられた温度上昇を 1.5°C に抑えるための四つの例示的緩和経路(IMP)は、何れも速やかかつ大幅な GHG 排出削減の共通の特徴をもつが、各緩和戦略は大きく異なる。しかしながら、カーボンニュートラルを達成するための取組として、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(NETs)の導入の三つの取組が共通して重要であり、くわえてエネルギーだけに限らず、あらゆる原料の脱炭素化が重要であることが示されている(図 3-2-12)。

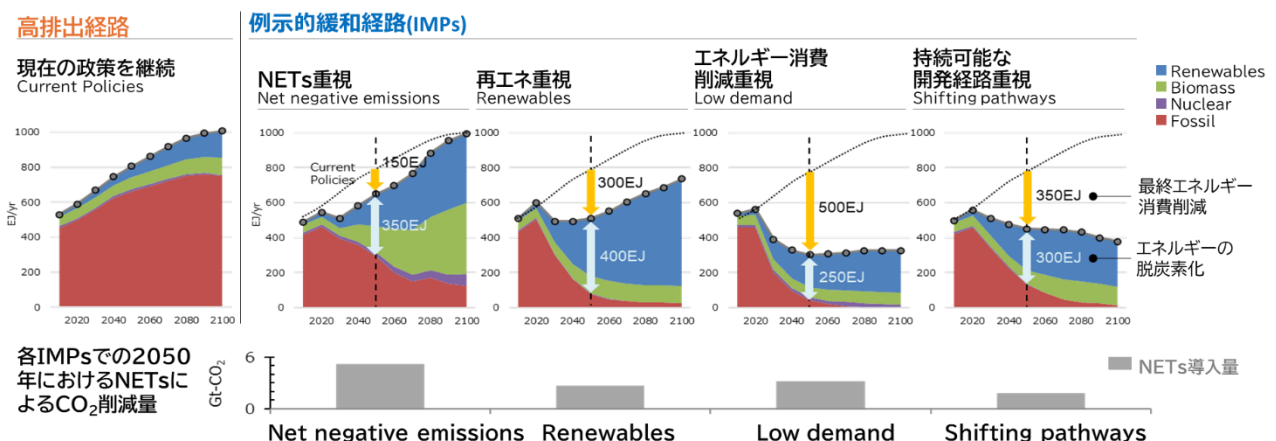


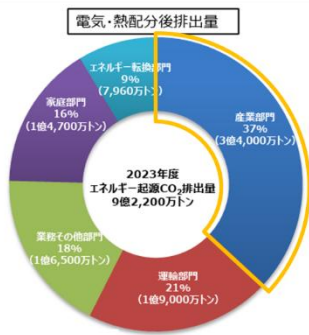
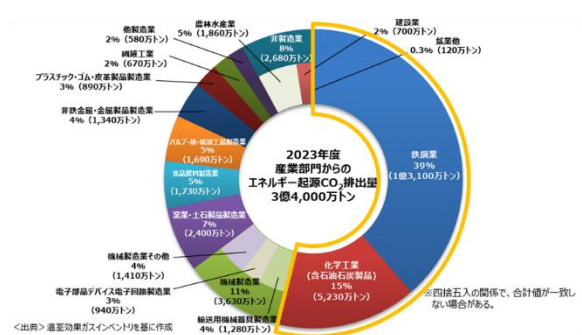
図 3-2-12 カーボンニュートラルを達成するための重要な取組

出所: AR6(IPCC) Figure 3.7, 12.3 を基に NEDO イノベーション戦略センター作成(2023)

<sup>65</sup> イノベーションの先を目指すべき「豊かな未来」(NEDO TSC、2021)  
[https://www.nedo.go.jp/library/future\\_2.html](https://www.nedo.go.jp/library/future_2.html)(2026年3月閲覧)

<sup>66</sup> 第6次評価報告書(AR6)(IPCC、2021)

図 3-2-13 に示すように、我が国では、2023 年時点でエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量の約 4 割を産業部門が占めている。なかでも、鉄鋼業や化学工業がその半分以上を占めるが、これらの産業は名目 GDP の 26%(152 兆円)を占める製造業・建設業に対して原料・素材を広く提供する重要な基盤産業であり、そのため関連産業のグローバルな競争力確保の観点からも低炭素化は必須である。しかし、鉄鋼・化学・セメントといった産業はハード・トゥ・アベートであり、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、低コストな CO<sub>2</sub> 除去(CDR: Carbon Dioxide Removal)技術の活用が重要となる。

 エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量の部門別内訳

 産業部門からのエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量の業種別内訳

 図 3-2-13 日本のエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量の部門別、業種別内訳

出所:「2023 年度温室効果ガス排出量及び吸収量について」(環境省、2025)を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

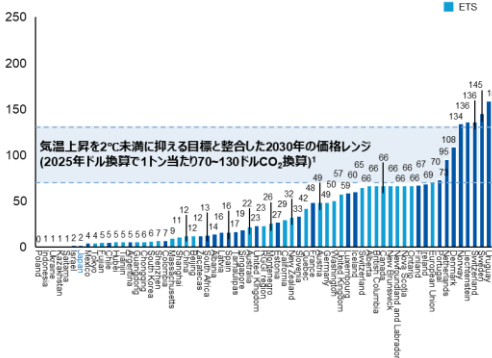
## (2)市場動向

脱炭素に向け、NetZero への目標を掲げる先進国・新興国では、2050 年にかけて 160~250 ドル/tCO<sub>2</sub> 水準の炭素価格想定を見据えた市場形成が進む可能性がある(図 3-2-14)。低コストな CDR 技術は経済合理性を有し、持続可能な経済成長の実現に資すると考えられる。

- 現在の炭素価格および将来の炭素価格シナリオ

### 現状

排出量取引制度(ETS)および炭素税における炭素価格  
ドル/tCO<sub>2</sub>e; 2025年4月1日時点



1. 炭素価格に関するハイレベル委員会の報告書における動向に基づき、インフレを調整した値  
2. "Global Energy and Climate Model", IEA, 2024. ASPは公表済シナリオ、NZEは2050年ネットゼロ排出シナリオ

データの出所: The World Bank (2025) State and Trends of Carbon Pricing 2025(2025年7月1日参照)

### 2050年ネットゼロ実現に向けた将来シナリオ

炭素価格の想定(IEA NZE 2050の想定)  
ドル/tCO<sub>2</sub>e

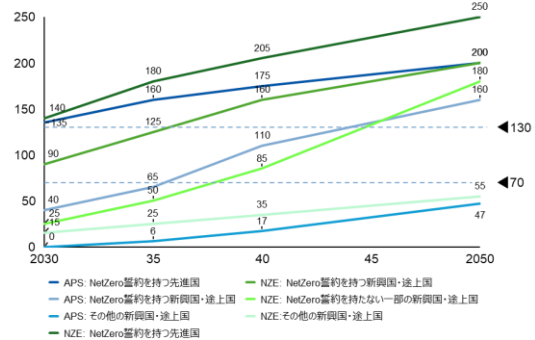


図 3-2-14 現在及び 2050 年ネットゼロ実現に向けた将来シナリオの炭素価格

出所: State and Trends of Carbon Pricing(The World Bank、2025)を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

### (3) 政策動向

日本の「第 7 次エネルギー基本計画」では、CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage) を、「エネルギー安定供給、経済成長、脱炭素の同時実現に不可欠なもの」として明記している。また、CDR についても、「2050 年カーボンニュートラル実現のため、最大限排出削減をしたとしても最終的に CO<sub>2</sub> の排出が避けられない分野からの排出(残余排出)を相殺する手段として、必要となる」と記載されており、政策面においても重要な取組と位置づけられている(図 3-2-15)。

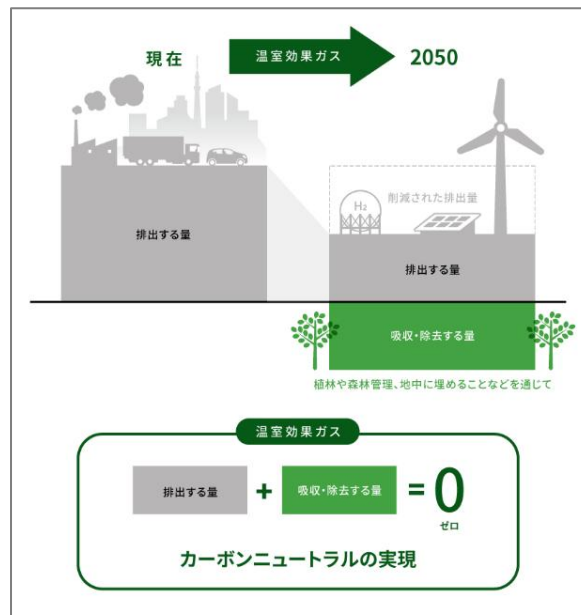


図 3-2-15 第7次エネルギー基本計画における温室効果ガスの吸収・除去の必要性  
出所:「カーボンニュートラルって何?」(METI Journal ONLINE、2022)

### 3-2-4[2]社会課題の解決のために取り組むべき領域(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、気候変動の要因である CO<sub>2</sub> への対策が喫緊の社会課題であり、その解決のためには『ネガティブエミッション技術の導入』が経済合理性を伴って推進されることが重要である。

現存のネガティブエミッション技術の現状を図 3-2-16 に整理した。CO<sub>2</sub> 除去技術である CDR は、大気からの CO<sub>2</sub> 吸収アプローチに基づき、自然ベースと、工業的アプローチに大別される。将来的な技術進展も見据えて技術を評価すると、工業的アプローチは CO<sub>2</sub> 除去の潜在的なポテンシャルが大きく、CO<sub>2</sub> 固定の恒久性や MRV (Measurement, Reporting, Verification) の観点で優位性をもつ。一方で、環境リスクの検証や国際的な枠組み形成は途上にあるが、今後の社会実装が期待される技術として注目に値する。

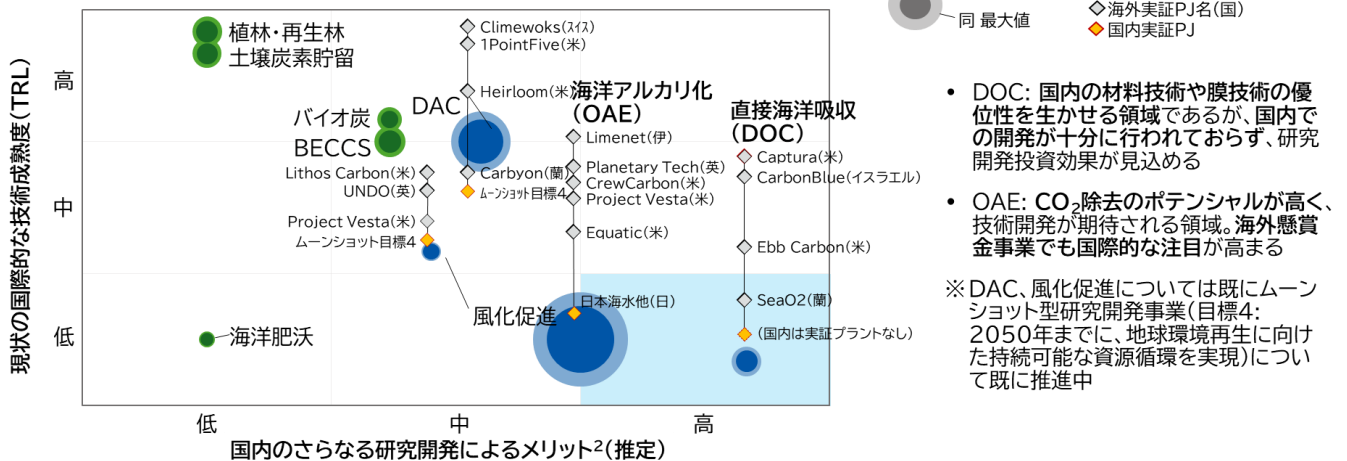
ネガティブエミッション技術		CO <sub>2</sub> 除去 ポテンシャル	恒久性	MRV	コスト	環境リスク	回収CO <sub>2</sub> の可用性	備考
自然ベース アプローチ	植林・再生林	△	△	△	○	△	×	成長期の吸収は速いが、伐採や火災などの長期的安定性低い
	土壌炭素貯留	△	△	△	○	○	×	低コストだが環境条件での変動が多く放出リスクも高い
	バイオ炭	△	○	○	○	○	×	長期の安定性高いが、供給の物流や原料確保に制約
	BECCS	△	◎	◎	△	△	×	長期の安定性高いが、バイオマス供給や土地・水資源との競合に課題
	海洋肥沃	△	△	△	△	△	×	CO <sub>2</sub> 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精度が高く再エネルギー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
海洋 CDR	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CO<sub>2</sub>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  
 ・MRV: Measurement, Reporting, Verification

図 3-2-16 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)や海洋アルカリ化(OAE: Ocean Alkalization Enhancement)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、CO<sub>2</sub>除去ポテンシャルの高い技術であるにもかかわらず、国内での開発が十分に行われていない技術である(図 3-2-17)。海水中には大気中の約 100 倍の CO<sub>2</sub> が存在しているため、大気からの直接回収と比べて、より低コストで CO<sub>2</sub> 除去を実現することが期待される。

CO<sub>2</sub>回収・貯留技術の除去ポテンシャル[GtCO<sub>2</sub>/年]、技術成熟度および投資効果<sup>1</sup>  
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



出所:以下の資料、考え方を基にNEDOイノベーション戦略センター作成  
1. 現状の国際的な技術成熟度: IPCC Sixth Assessment Report "Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change" Table 12.6 and P1271、DOCについては明示されておらず、他海洋CDR技術と同程度以下とした  
2. 国内のさらなる研究開発によるメリット: 機能実現・大規模化・コスト低減等に対するメリットについて、国内技術や地理的環境に優位性がある一方で国内技術のTRLが低く向上余地が大きい、あるいは、国内技術のTRLが高いが持続可能な社会実装に向けたコスト低減等の改善余地が大きい、等の観点から総合的に評価  
3. 大気からCO<sub>2</sub>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 3-2-17 CO<sub>2</sub>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

海洋 CDR(DOC、OAE)の工業的技術と DACCS(Direct Air Carbon Capture and Storage)、並びに、自然ベースアプローチについて、将来性、技術・アイデアの革新性、日本の優位性、民間のみで取り組む困難性、重要経済安全保障技術の観点での比較を図 3-2-18 に示す。

比較指標	工業的CDR	DACCS	自然ベースアプローチ
将来性	海洋CDR(DOC、OAE) 理論的なポテンシャルはDOCで10GtCO <sub>2</sub> /年(NOAA)、OAEでは100GtCO <sub>2</sub> /年(IPCC)との試算もあり大きい	DACCS 理論ポテンシャルは40GtCO <sub>2</sub> /年と大きい(IPCC試算)	自然ベースアプローチ 短期的な吸収には適するが、再放出リスクが大きく長期的固定化に不向き
技術・アイデアの革新性	OAEやDOCなどで化学・生物・海洋物理を融合。大洋のCO <sub>2</sub> 吸収力に着目した技術	吸着材・熱管理・電気化学・モジュール化などの新技術(ムーンショット事業で実施中)	既存技術を基にした開発
日本の優位性	特にDOCで用いられる膜・吸着・化学プロセスに強み。関連論文数が近年急拡大が、実証は海外が先行	材料やモジュール化に強みを持つが、大規模化に向けた実証は米国が先行	森林や農地、バイオ資源はノウハウある一方、国土に制約あり
民間のみで取り組む困難性	MRVや海洋利用などの規制が整備の途上、国際合意や仕組み構築の複雑性が高い	エネルギーや設備のコストが高く、研究助成やクレジット含む政府支援が必要	自治体や民間主導でも取り組みやすい一方、恒久性の担保は課題
重要経済安全保障技術	各種指針などに該当なし	各種指針などに該当なし	各種指針などに該当なし
総合評価 <sup>1</sup>	フロンティア領域として注目度が高い	フロンティア領域として注目度が高いが、既にムーンショット事業などで支援済	フロンティア領域として注目度が低い

図 3-2-18 海洋 CDR の工業的技術の重要性

海洋 CDR の工業的技術は、将来性・革新性・日本の優位性・民間のみで取り組む困難性が高い工業的 CDR 技術の中で、国内での開発が十分に進んでいない研究開発課題として注目される。

以上のとおり、ネガティブエミッション技術領域において、『海洋 CDR の工業的技術』である『直接海洋吸収技術(DOC)』と『海洋アルカリ化(OAE)』を、一層の技術開発の取組を強化すべき領域として提案する(図 3-2-19)。

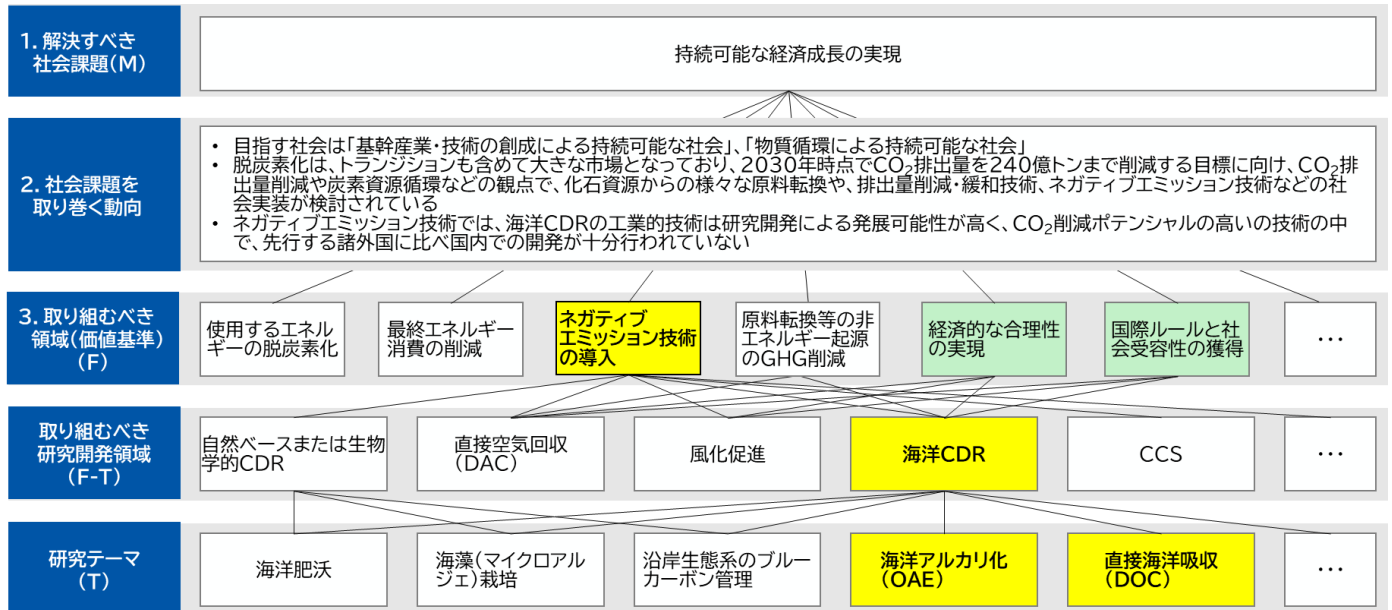


図 3-2-19 海洋 CDR の工業的技術の MFT ロジックモデル

### 3-2-5[2]取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例

海洋 CDR の工業的技術の実現のための具体的な手段の事例を図 3-2-20 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り生成した酸を用いて海中の  $\text{CO}_2$  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、工業的 OAE 向けのアルカリ生成の低コスト化技術は、DOC における低コストな酸生成と共通する技術として位置づけられる。さらに、DOC の低コスト化に向けては、これらの電気化学的手法を使用せずに海水から直接  $\text{CO}_2$  を回収する材料や膜等の開発も期待される。

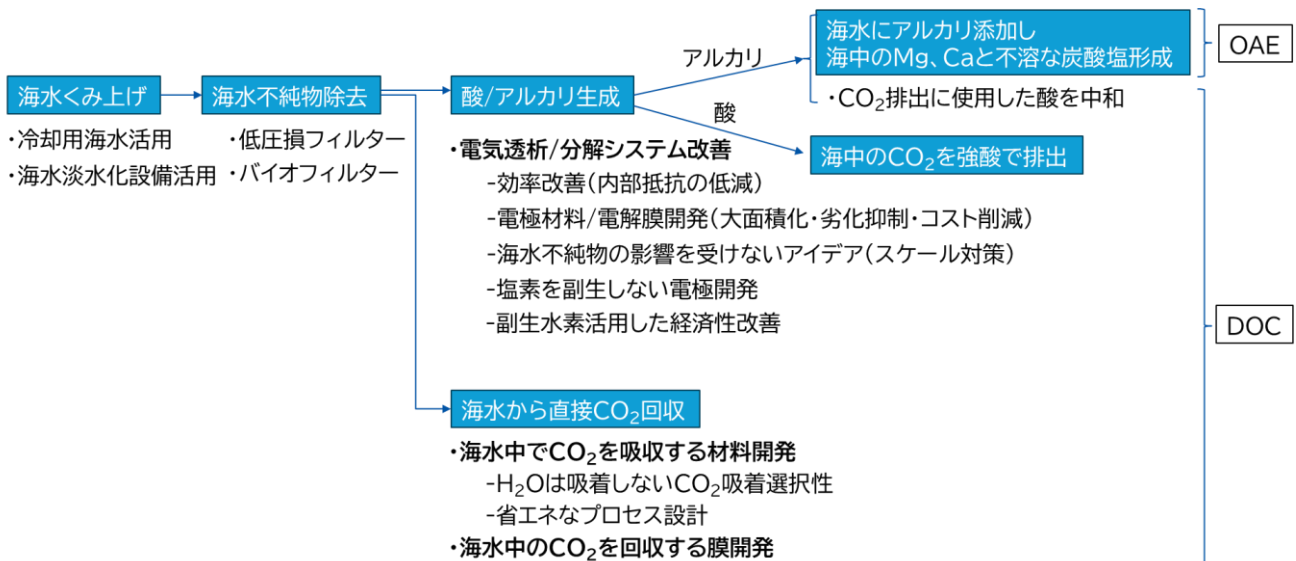


図 3-2-20 海洋 CDR の工業的技術の研究開発要素(例)

### 3-2-6[2]ネガティブエミッション技術/海洋 CDR の工業的技術における手段を進める上での道筋

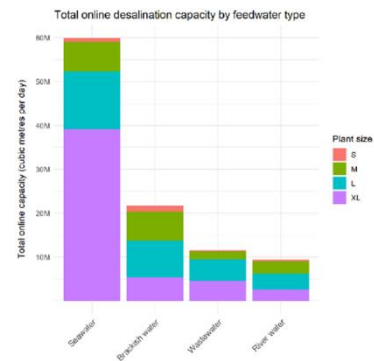
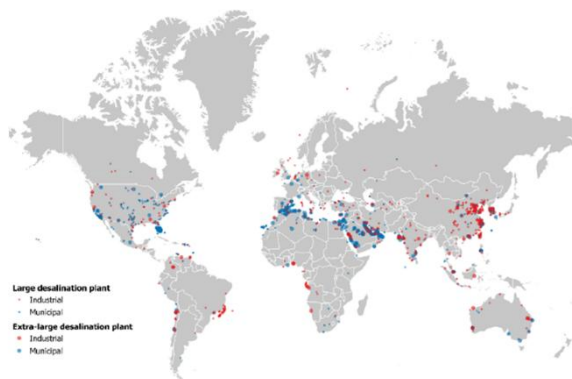
海洋 CDR の工業的技術の低コスト化を進める上での道筋として以下の観点を検討した推進が有効と考えられる。

- (i) 日本は海洋に囲まれ、既存産業においても海水利用が様々に推進されており、海水を利用している既存産業(火力発電所、原子力発電所、石油精製プラント、化学プラント、製鉄所、海水淡水化施設等)に導入することで、揚水コスト、海水ろ過フィルターコストを削減でき、初期導入コストの低減につながり、この用途での大気中の CO<sub>2</sub> 回収コストを DAC より低減し、早期の市場導入拡大を図る。
- (ii) 化石燃料由来 CO<sub>2</sub> を回収・利用しているプラントの CO<sub>2</sub> 回収装置の後処理設備(CO<sub>2</sub> 精製設備、CO<sub>2</sub> 利用設備)を活用し、後処理コスト及び CO<sub>2</sub> 利用コストの削減を図る。将来、プラントの化石燃料使用量が減少し、CO<sub>2</sub> 精製設備・利用設備の処理容量に余剰が生じた場合には、DOC による CO<sub>2</sub> 回収量を増加させることで、CO<sub>2</sub> 関連処理設備を有効かつ長期間にわたり活用することができる。この考えは DAC にも適用できるが、(i)との組合せが可能であること、また回収 CO<sub>2</sub> 量に対する必要敷地面積が小さいことから、DOC が有利となる可能性がある。
- (iii) カーボンニュートラルな電力や水素などの非化石エネルギー・資源への転換が難しい分野に対しては、既存インフラを活用できる利点を活かし、水素と CO<sub>2</sub> から合成した炭化水素を利用することが有効である。(i)、(ii)で示したような既存プラントの燃料を、プラントから回収した CO<sub>2</sub> とカーボンニュートラルな水素から製造した合成燃料として供給し、炭素循環を確立することの経済性が、既存設備活用の観点や原料 CO<sub>2</sub> ならびに製造した合成燃料の輸送コスト低減の観点から期待できれば、プラント運営者自身を初期需要者として社会実装を推進することが可能である。
- (iv) DOC 向けに開発した海水中のイオンを選択的に透過させる膜技術、電解による分離を低エネルギーで行う技術、低コストな酸/アルカリ製造技術を将来的な新規市場に活用し、関連産業への波及効果を図ることも付加価値として研究開発を推進し、社会実装による要素技術へのフィードバックも期待できる。

上記のとおり、例えば、海水を利用している既存産業に DOC 技術を導入することで、揚水コストや海水フィルターコストの削減により、初期導入コストを低減できる可能性がある。既存の海水淡水化プラントへの DOC 技術の統合を例に、その CO<sub>2</sub> 除去ポテンシャルを試算する。

世界には 16,000 を超える淡水化プラントがあり、その総稼働能力は約 9,537 万 m<sup>3</sup>/日以上ある。既存能力の約 70%は中東(サウジアラビア、アラブ首長国連邦など)及び北アフリカに集中している(図 3-2-21)。また、地中海沿岸諸国やアラビア湾周辺の国々にある大規模淡水化プラントは、主に自治体や公共事業体を通じて家庭用や商業用の水供給を担い、中国、チリ、ブラジルにあるプラントの多くは産業用の水需要を担っている。

淡水化施設と統合した DOC 技術を展開する CarbonBlue<sup>67</sup>は、15m<sup>3</sup>/hr の水を処理し、約 40t/年の CO<sub>2</sub> を除去している。仮に同様の能力が世界の全淡水化プラントに導入された場合、約 0.01GtCO<sub>2</sub>/年の除去ポテンシャルとなる(図 3-2-22)。これはあくまで理論上の試算値だが、将来の更なる技術進展も踏まえると、既存の淡水化プラントと DOC の統合によって、初期的スケールの CO<sub>2</sub> 除去ポテンシャルが期待される。



Source: GWI DesalData (2021).

Note: S = under 1000 m<sup>3</sup>/day; M = 1000 to 10,000 m<sup>3</sup>/day; L = 10,000 to 100,000 m<sup>3</sup>/day; XL = over 100,000 m<sup>3</sup>/day. Source: GWI DesalData (2021).

**図 3-2-21 大規模(1万~10万 m<sup>3</sup>/日) 及び  
 超大規模(10万 m<sup>3</sup>/日超)の都市用・産業用の  
 淡水化プラント一覧**

**図 3-2-22 稼働中及び稼働中と推定される  
 淡水化プラントの能力(水資源、プラント規模別)**

出所:Desalination in the 21st Century: A Critical Review of Trends and Debates  
 (Water Alternatives Vol.15、2022)

<sup>67</sup> <https://carbonblue.cc/> (2026年2月閲覧)

図 3-2-23 にネガティブエミッション技術/海洋 CDR の工業的技術の DOC に関するロードマップ(イメージ)を示す。2030 年までに国内における DOC 設備導入及び回収 CO<sub>2</sub> 販売等の事業プランに応じた LOI(Letter of Intent:意向表明書/基本合意書)等に至る水準を目指し、その後大規模化や CCS 及び CCU の活用を本格化する道筋が期待される。

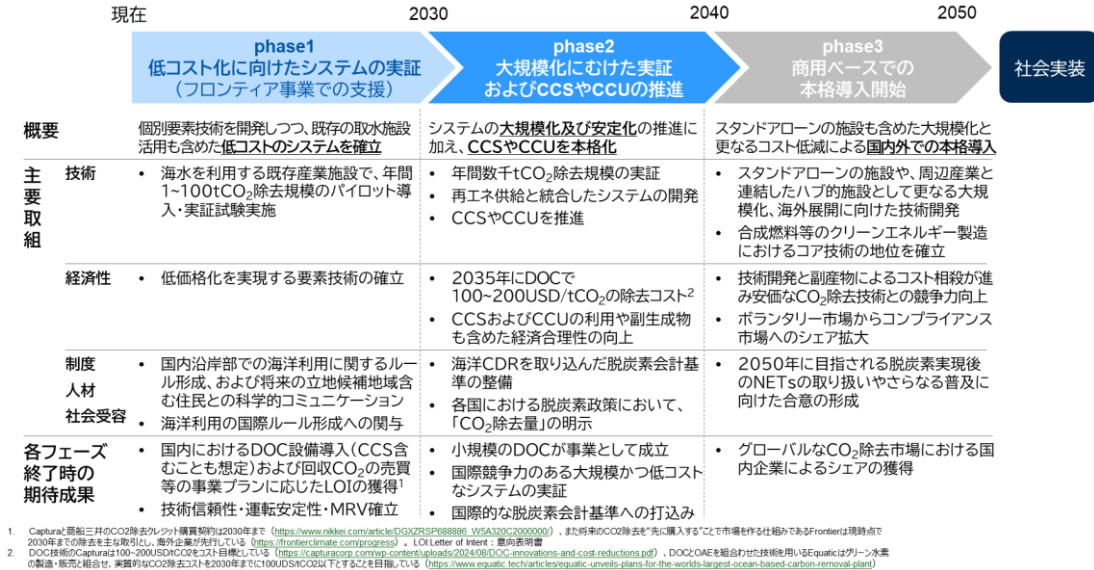


図 3-2-23 ネガティブエミッション技術/海洋 CDR の工業的技術の DOC に関するロードマップ(イメージ)

1. Captura2と高船三井のCO<sub>2</sub>除去クレジット購買契約は2030年まで ([https://www.nikkei.com/article/DGXZSP688886\\_W5A320C2000000](https://www.nikkei.com/article/DGXZSP688886_W5A320C2000000))、また将来のCO<sub>2</sub>除去を“先に購入する”ことで市場を作る仕組みであるFrontierは現時点で2030年までの除去を主な取引し、海外企業が先行している (<https://frontierclimate.com/progress>)。LOI(Letter of Intent:意向表明書)

2. DOC技術のCapturaは100~200USD/tCO<sub>2</sub>のコストを目標としている (<https://captura.org/content/uploads/2024/08/DOC-innovations-and-cost-reductions.pdf>)。DOCCOEを組合わせた技術を用いたEquaticはカーボン水素の製造・販売と組合せ、実質的なCO<sub>2</sub>除去コストを2030年までに100USD/tCO<sub>2</sub>以下を目標としている (<https://www.equatic.tech/articles/equatic-unveils-plans-for-the-worlds-largest-ocean-based-carbon-removal-plant>)

### 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、人口増加に伴う食料需要の増加を受けて、飢餓人口の増加やプロテインクライシスが懸念されている。さらに、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。

日本では、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<sup>68</sup>。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。

図 3-3-1 の俯瞰は、これらの検討に合わせて、NEDO のミッションである「エネルギー・地球環境問題の解決」と「産業競争力の強化」の視点、2024 年に改正された『食料・農業・農村基本法』<sup>69</sup>の基本理念の視点から、アグリ・フードテック分野で調査分析している対象を示したものである。

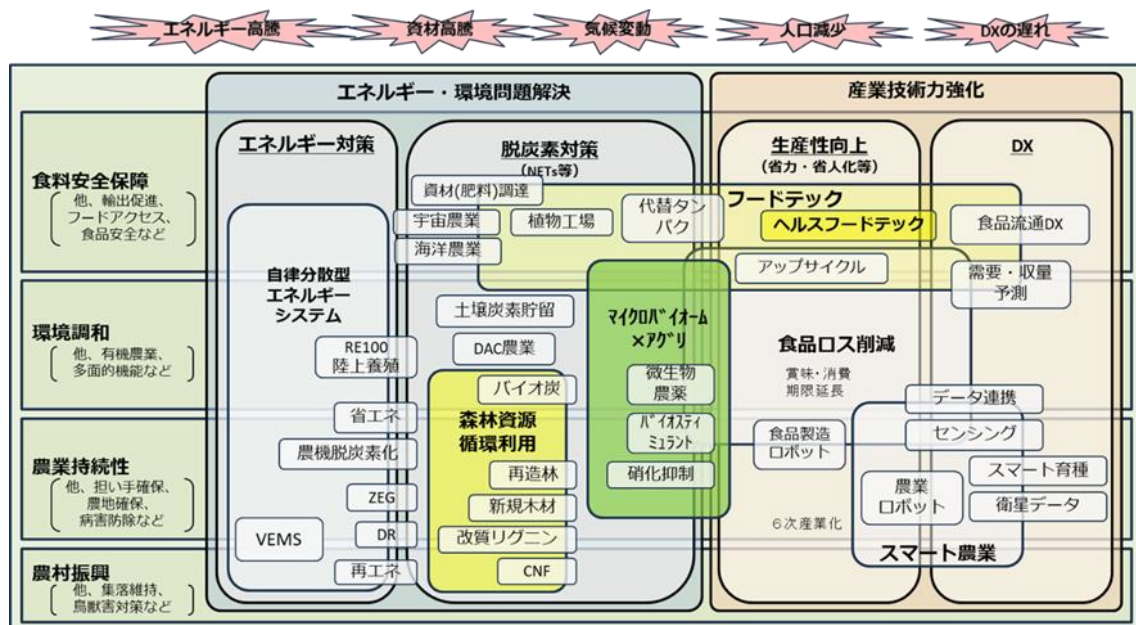


図 3-3-1 アグリ・フードテック分野の俯瞰

<sup>68</sup> 食料・農業・農村基本法 改正のポイント(農林水産省、2025)

<https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/kikaku/bukai/attach/pdf/250314-8.pdf> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>69</sup> 食料・農業・農村基本法(農林水産省、2024)

<https://www.maff.go.jp/j/basiclaw/index.html> (2026 年 3 月閲覧)

なお、自然を相手にする農林水産業は、気候変動による様々な影響を受ける。例えば、アジアモンスーン気候帯の日本には気象災害の激甚化や頻発化のほか、農作物に対して高温障害による品質低下や収量減少、栽培適地の移動をもたらす。高温多湿となる日本では病害虫の蔓延拡大や国内未発生病害虫・特定外来雑草の国内侵入リスクの拡大も懸念されている。

また、農林水産分野からの GHG 排出量は、施設園芸や漁船等での燃料燃焼のほか、稲作も大きな発生源となっている(図 3-3-2)。化学農薬や化学肥料等の過剰使用も環境への負荷となっており、プラネタリー・バウンダリー(地球の限界)では、肥料の成分となるリンと窒素が地球による自然修復力を超えてしまっている高リスクと報告されている<sup>70</sup>。

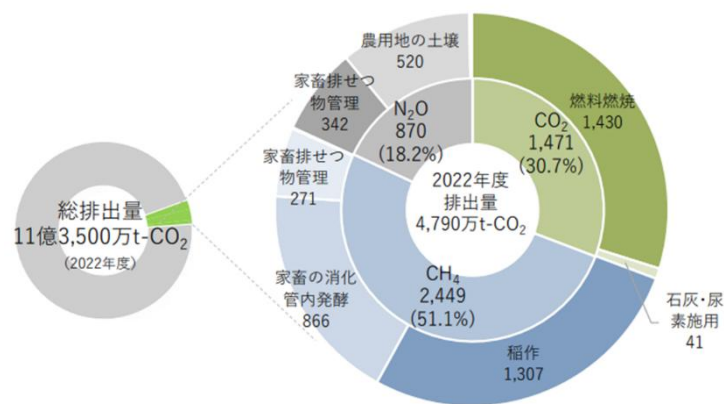


図 3-3-2 日本の農林水産分野の GHG 排出量

出所: 農林水産分野における地球温暖化に対する取組(農林水産省、2025)<sup>71</sup>

このため、本増補版では、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を検討することとした。

<sup>70</sup> 令和 5 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書(環境省、2023)  
<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r05/html/hj23010101.html>(2026 年 3 月閲覧)

<sup>71</sup> 農林水産分野における地球温暖化に対する取組(農林水産省、2025)  
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyoseisaku/attach/pdf/index-87.pdf>(2026 年 3 月閲覧)

### 3-3-2 解決すべき社会課題(M)

前述したように、農林水産業の生産基盤と経営環境は脆弱であり、気候変動の脅威にもさらされている。国内に安定的に継続して食料を供給するために、調達・生産・流通・加工・消費に至るまでのロバストなサプライチェーンの構築として『持続可能な食料システムの構築』が重要な社会課題と考えられる。

また、国内で消費する食料はできるだけ海外に依存しないことが望ましい。消費者ニーズ・嗜好の多様化により国内で生産できない農作物は輸入に頼らざるを得ないが、安定的、継続的な供給に加えて、必要な量を国内で供給できるよう食料自給率を高める『食料安全保障の強化』も重要な社会課題と考えられる。食料自給率を高めることにより、海外への依存を減らし、海外への輸出を増やすことができれば世界の食料需要の増加への対応にもつながる。

このため、増補版においても、Innovation Outlook Ver. 1.0(以下「Ver. 1.0」という。)と同様、『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と設定し、次項においては、特に、環境負荷の低減に関する近年の動向を整理した。

### 3-3-3 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向

#### (1) 市場動向

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、環境負荷低減として化学農薬や化学肥料を使用しない有機食品の世界市場規模は2034年に約6,700億ドルに増加すると見込まれている<sup>72</sup>。

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が期待されるバイオスティミュラントや微生物農薬が注目されている。これら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<sup>73</sup>。

また、農林水産分野は、GHG排出源となる産業であるとともに、GHG吸収源となる産業である。GHG排出削減・吸収に関する取組の一例として、高機能バイオ炭の国内市場規模は2030年に約510億円を目標とし、2050年に約2,900万トンのGHG削減効果と約1.5兆円の経済効果が期待されている<sup>74</sup>。バイオ炭は欧米、中国を中心に利用が拡大しており、生産量はCAGR(年平均成長率)40%程度で増加し、世界の市場規模は2032年に21億ドルに達すると見込まれている<sup>75</sup>。

#### (2) 技術動向

環境負荷低減に関しては、土壌診断に基づく化学肥料の使用低減技術や、天敵などの生物農薬と組み合わせた化学農薬の使用低減技術も取り組まれている。特定の害虫の遺伝子に作用するRNA農薬や、環境ストレス耐性の向上等が期待されるバイオスティミュラントの開発も進められている。

また、微生物については、細菌や菌類など多様な生物が存在し、その種数は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<sup>76</sup>。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

<sup>72</sup> 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2月閲覧)

<sup>73</sup> Agricultural Biological Market(MarketsandMarkets)

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

<sup>74</sup> グリーンイノベーション基金事業「食料・農林水産業のCO<sub>2</sub>等削減・吸収技術の開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画(農林水産省、2022)

[https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/gifund/pdf/gif\\_18.randd.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/pdf/gif_18.randd.pdf) (2026年2月閲覧)

<sup>75</sup> 世界バイオ炭市場規模、シェア、競合環境、トレンド分析レポート(レポートオーシャン)

<https://www.reportocean.co.jp/industry-reports/biochar-market> (2026年2月閲覧)

<sup>76</sup> 新規微生物の単離手法の開発(産業技術総合研究所)

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

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いる。これらにより、微生物の機能を活用した新規の微生物資材の開発が期待される。

### (3) 政策動向

農林水産省では、2021年に『みどりの食料システム戦略』を策定し、2050年のKPI（重要業績評価指標）に農林水産・食品分野のゼロエミッション化を掲げている<sup>77</sup>。2025年に閣議決定された『地球温暖化対策計画』<sup>78</sup>と農林水産省が策定した『農林水産省地球温暖化対策計画』<sup>79</sup>において、GHGの吸収源対策として、農地土壌炭素吸収源対策や森林吸収源対策が位置づけられている。関連する対策は、2021年に策定された『2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略』<sup>80</sup>にも位置づけられ、グリーンイノベーション基金を活用した研究開発が取り組まれている。

これらの排出削減・吸収源対策が進められているが、温暖化は現在も進行中であり、2023年に策定された『農林水産省気候変動適応計画』<sup>81</sup>においては、気候変動に適応する生産安定技術・品種の開発・普及等を推進することとしている。

米国では『農業イノベーションアジェンダ』、EUでは『Farm to Fork戦略』等により環境政策が取り組まれている。

なお、上述の『みどりの食料システム戦略』において、化学農薬の使用低減につながるバイオスティミュラントを活用した革新的技術の開発に言及し、バイオスティミュラントの開発が求められているとともに、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が策定され、バイオスティミュラントの利用拡大が期待されている。

EUでは、新肥料法にバイオスティミュラントが位置づけられている（図 3-3-3）。2025年12月に施行された『土壌モニタリング法』(Soil Monitoring Law)<sup>82</sup>においては、土壌の回復度や炭素貯留の向上を図りつつ、食料安全保障の強化を目的としており、有機物、生物多様性、団粒構造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の活用への注目は大きい。

<sup>77</sup> 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/> (2026年3月閲覧)

<sup>78</sup> 地球温暖化対策計画(環境省、2025)

<https://www.env.go.jp/content/000291669.pdf> (2026年3月閲覧)

<sup>79</sup> 農林水産省地球温暖化対策計画(農林水産省、2025)

<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/climate/taisaku/attach/pdf/top-31.pdf> (2026年3月閲覧)

<sup>80</sup> 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(経済産業省、2021)

[https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/ggs/pdf/green\\_honbun.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf) (2026年3月閲覧)

<sup>81</sup> 農林水産省気候変動適応計画(農林水産省、2023)

<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/climate/adapt/attach/pdf/top-4.pdf> (2026年3月閲覧)

<sup>82</sup> [https://environment.ec.europa.eu/topics/soil-health/soil-monitoring-law\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/soil-health/soil-monitoring-law_en) (2026年3月閲覧)

EU	米国
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 農業に係る規則（Regulation (EC) No 1107/2009）において、BSは農業に該当しない旨を規定</li> <li>● 新肥料法（Regulation (EU) 2019/1009）において、BSを肥料製品の1つとして位置づけ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2022年に農業の定義からBSを除外する法案（Plant Biostimulant Act）が米国議会下院に提出され、2023年にも同文の法案が同議会上下両院に提出されたが、審議には至っていない。</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>BSの定義<sup>※1</sup></b></p> <p>➢ 植物又は植物根圏の以下の特徴の1つ以上を改善することを唯一の目的として、製品の栄養成分とは無関係に植物の栄養過程を刺激する製品</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 栄養素の利用効率</li> <li>② 非生物学的ストレスに対する耐性</li> <li>③ 品質形質</li> <li>④ 土壌又は根圏における非可給態栄養素の利用可能性</li> </ul> <p><small>※1 Regulation (EC)1107/2009のCHAPTER I Article3の「Definition」を仮訳</small></p>	<p style="text-align: center;"><b>BSの定義<sup>※2</sup></b></p> <p>➢ 種子、植物、根圏、土壌、またはその他の生育培地に適用された場合、バイオスティミュラントの栄養成分とは無関係に、植物の本来のプロセスを補助し、それによって栄養素の利用可能性、取り込みまたは利用効率、非生物学的ストレスに対する耐性、およびその結果としての成長、発育、品質、または収量を改善する作用を有する物質、微生物、またはそれらの混合物。</p> <p><small>※2 「S.802-Plant Biostimulant Act of 2023」 / 「H.R.1472-Plant Biostimulant Act」の「Definition」を仮訳</small></p>

図 3-3-3 バイオスティミュラントに係る諸外国の動き<sup>83</sup>

出所：バイオスティミュラントの現状と課題

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、肥料の低減技術や代替技術などの研究開発が求められている。

<sup>83</sup> バイオスティミュラントの現状と課題(農林水産省、2026)

<https://www.maff.go.jp/j/syouan/attach/pdf/biostimulant-23.pdf> (2026年3月閲覧)

### 3-3-4 社会課題の解決のために取り組むべき領域(F): 持続可能農業に向けた微生物機能活用

Ver. 1.0 では、『誰もが健康で食事に困らない社会』を実現すべき社会像(V)、『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、バックキャストにより取り組むべき領域(F)を抽出した。

その結果、図 3-3-4 に示すとおり、「森林資源循環利用」と「スマート農業」「ヘルスフードテック」の領域に注目し、そのうち、『森林資源循環利用』と『ヘルスフードテック』をフロンティア領域等として提案したところである。

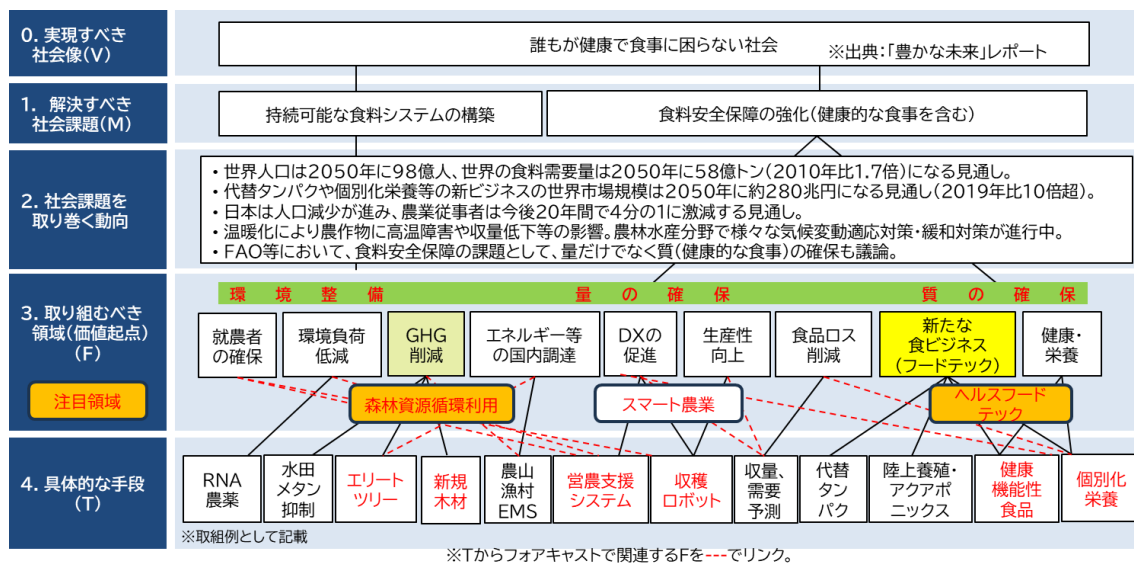


図 3-3-4 Ver. 1.0 における MFT ロジックモデル

Ver. 1.0 において、領域(F)として、社会的解決策に関するもの、政策的解決策に関するもの、技術的解決策に関するものを抽出し、それらを「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が、増補版の検討においては、3-3-3 の動向を踏まえ、「環境整備」のグループを対象に、特に「環境負荷低減」と「GHG 削減」の領域に関連する手段(T)について追加検討を行った。この結果、領域(F)「環境整備」のグループに係る手段(T)として、バイオスティミュラント、微生物農薬等の微生物の活用が注目され、これらと横断的・基盤的な手段(T)となる微生物・微生物叢の機能解明と合わせた『持続可能農業に向けた微生物機能活用』を領域(F)とみなし、これ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 3-3-5 に示す。

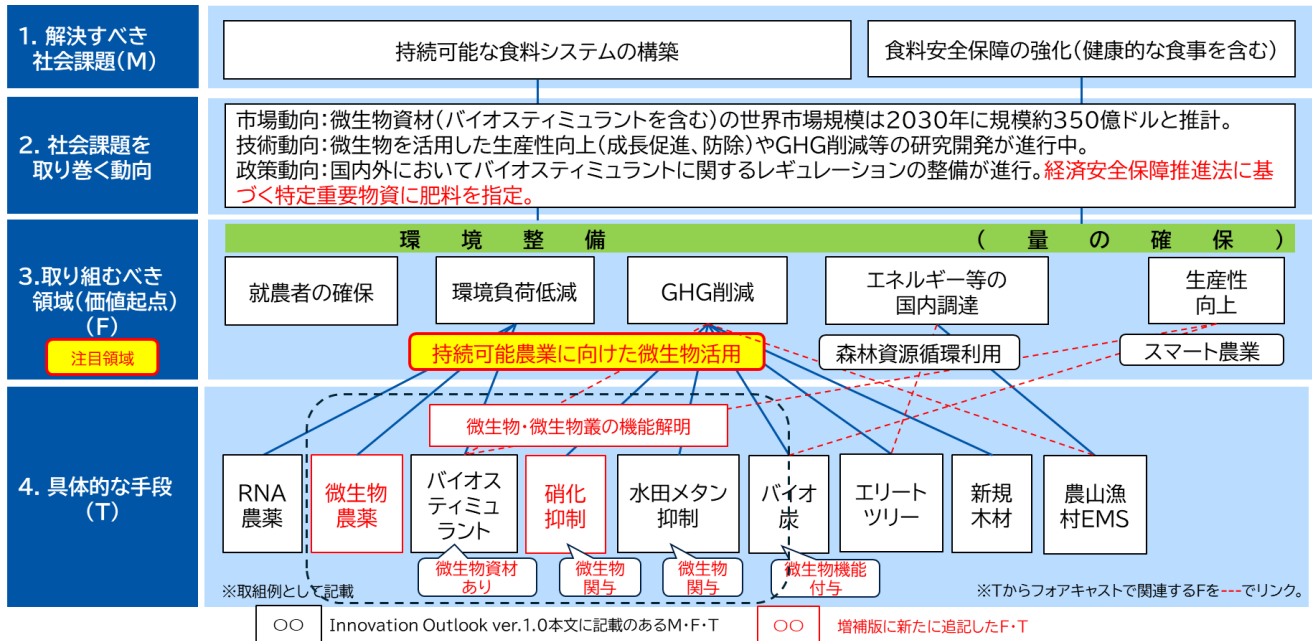
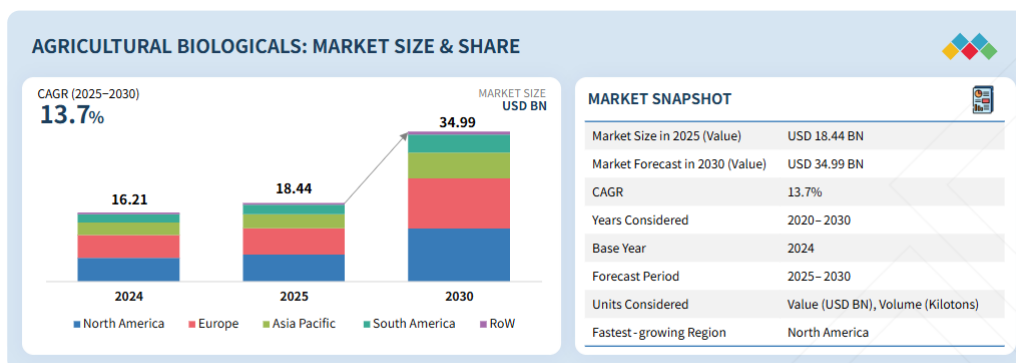


図 3-3-5 ロジックモデル(MFT)で見た社会課題とフロンティア領域

『持続可能農業に向けた微生物機能活用』をフロンティア領域等として特定した理由を以下に記す。

### ①将来性(成長性・社会課題)

世界的に環境と調和した持続可能な農業の取組拡大を背景に、バイオスティミュラントや微生物農薬等の農業用バイオ資材が注目される。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る(図 3-3-6)。



Source: Secondary Research, Interviews with Experts, MarketsandMarkets Analysis

図 3-3-6 農業バイオ資材の世界市場規模<sup>84</sup>

出所:Agricultural Biological Market

<sup>84</sup> Agricultural Biological Market(MarketsandMarkets)  
<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/agricultural-biological-market-100393324.html>  
 (2026年2月閲覧)

化学肥料、化学農薬の世界市場規模はそれぞれ 1,500 億ドル、800 億ドルを超える<sup>85</sup>。微生物資材はそれらの一部を代替可能であり、農業の GX、環境再生型農業の実現に貢献する。

## ②技術・アイデアの革新性

微生物は単離・培養が困難であること、複数の微生物が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。これを打破するためには、微生物のスクリーニング技術や微生物の機能を推測する技術が必要となる。

スクリーニング技術については、微小な液滴(マイクロドロプレット)に微生物を封入し、有用微生物を単離・検出する技術が開発され、培養条件の解明の効率化が取り組まれている。

また、東京大学と理研のグループが、マイクロバイオームとメタボロームのデータを統合解析する新手法(I-SVVS)を開発している<sup>86</sup>。根圏の微生物と代謝物の関連解明を効率化できる。

メタゲノム解析やマルチオミクス手法に AI を活用することで、微生物の探索、機能推定の加速化が期待される。

## ③日本の優位性

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<sup>87</sup>

また、微生物の活用に向けて、微生物のゲノムや機能、土壌・植物との相互作用に関するデータベースの構築が進みつつあることも強みとして挙げられる。

早稲田大学では、生物性を主体とする土壌データ(細菌叢データ、メタゲノム、シングルセルゲノム等)と解析ツールを組み込んだ機能的データベース「土壌微生物叢アトラス」を作成中である。土壌微生物叢アトラスを活用した土壌診断による「土壌健康度」(※従来の物理性・化学性の評価に、生物性の評価を追加した新たな指標)を提唱している<sup>88</sup>。

東北大学において、土壌からの N<sub>2</sub>O 発生を抑制する微生物利用技術の開発が取り組まれている<sup>89</sup>。

<sup>85</sup> 令和7年度生研支援センター調査報告書(研究開発構想)「農林水産・食料分野における微生物活用

[https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/contents/files/results\\_reportR7.pdf](https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/contents/files/results_reportR7.pdf) (2026年3月閲覧)

<sup>86</sup> 微生物群と代謝物のデータを統合し分類する新解析法 I-SVVS を開発(東京大学大学院農学生命科学研究科・農学部)

[https://www.a.u-tokyo.ac.jp/topics/topics\\_20250530-1.html](https://www.a.u-tokyo.ac.jp/topics/topics_20250530-1.html) (2026年2月閲覧)

<sup>87</sup> 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、2026年2月閲覧)

<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/attach/pdf/foodtech-13.pdf> (2026年3月閲覧)

<sup>88</sup> 農研機構ムーンショット型農林水産研究開発事業研究成果報告

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

[https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/moon\\_shot/results/files/MSPJresult2.2.pdf](https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/moon_shot/results/files/MSPJresult2.2.pdf) (2026年3月閲覧)

<sup>89</sup> 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)

#### ④民間のみで取り組む困難性

気候・土壌・植物によって微生物活用の効果が安定しない課題がある。解析技術の高度化による有用微生物探索及び機能解明は協調領域となる。

微生物活用による化学農薬・化学肥料低減、GHG 削減等は政策ニーズに合致し、国が後押しする必要がある。

NITE の生物資源データプラットフォーム(図 3-3-7)など、微生物活用に向けて資源管理に国が関与している。

**DBRP (生物資源データプラットフォーム) のアップデート  
およびデータベース横断検索システムの公開**

○八塚茂、青柳太智、阿部純平、伊藤絵理子、大塚梨沙、木村明音、外立貴宏、中谷諒介、  
牧山(片野)葉子、横田彩乃、市川夏子  
製品評価技術基盤機構バイオテクノロジーセンター (NITE-NBRC)

**DBRPとは？**

**バイオ** × **デジタル**

・資源 (細菌、植物、動物等)  
・資源についてのメタ情報 (産地、分離源、種名、学会情報等)

・オミックスデータ (ゲノム、メタゲノム、プロテオーム等)  
・資源についての計測データとメタ情報 (系統分岐情報等)

**生物資源を探している方** 両者を合わせて統合検索 **デジタルデータを探している方**

特性、分離源、データの有無で所望の資源を 検索・利用

データの種類や条件、資源の有無でデータを利用

**DBRPで公開している主なデータ**

- NBRCが保有する約6万の微生物株とその関連データ
- NBRC以外の機関 (企業・地方公共団体・大学等) が保有する生物資源データ
- NEDOプロジェクトなどの国家プロジェクトやNBRC独自の実験や解析で得られたデータ

**DBRPのデータ間関係図**

図 3-3-7 生物資源データプラットフォーム<sup>90</sup>

#### ⑤重要経済安保技術

『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。肥料の使用低減、代替技術等が求められている。

<sup>90</sup> 生物資源データプラットフォーム(ナショナルバイオサイエンスデータベースセンター)

[https://biosciencedbc.jp/event/symposium/togo2024/files/poster34\\_togo2024.pdf](https://biosciencedbc.jp/event/symposium/togo2024/files/poster34_togo2024.pdf) (2026年2月閲覧)

### 3-3-5 取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例

3-3-4 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を発揮す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」を構築している(図 3-3-8)。大豆と根粒菌を対象としているが、大豆以外の稲等の主要作物、根粒菌以外の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。



図 3-3-8 微生物の機能解明に関する取組事例<sup>91</sup>

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。

<sup>91</sup> 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, 2026)

[https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/moon\\_shot/theme/files/MSPJ%202.pdf](https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/moon_shot/theme/files/MSPJ%202.pdf) (2026年3月閲覧)

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により、GHG 削減メカニズムを分子レベルでの解明に取り組んでいる(図 3-3-9)。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。

なお、『地球温暖化対策計画』では、農地由来の  $N_2O$  について 2040 年に 2013 年比で約 600 万トン削減することが目標とされており、本取組が目標達成に貢献することが期待される。

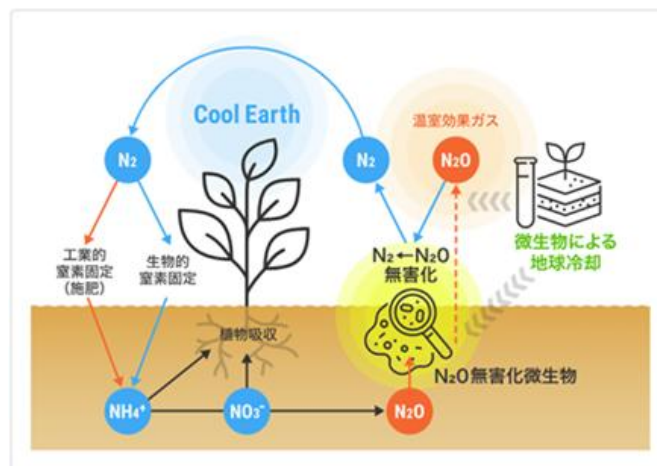


図 3-3-9 微生物を活用した GHG 削減の取組事例<sup>92</sup>

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<sup>93</sup>など、微生物群による病害抑制効果が期待されている。

また、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<sup>94</sup>。

<sup>92</sup> 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)

<sup>93</sup> Hanareia Ehai Taumaunu; Kevin L. Hockett, Passaging Phyllosphere Microbial Communities Develop Suppression Towards Bacterial Speck Disease in Tomato, APS Journals <https://apsjournals.apsnet.org/doi/10.1094/PBIOMES-05-22-0030-FI> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>94</sup> 環境調和型の土壌病害防除効果を有するプレデター細菌の捕食機構の解明(国立研究開発法人産業技術総合研究所) <https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-25K00095/> (2026 年 2 月閲覧)

#### (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(図 3-3-10)。

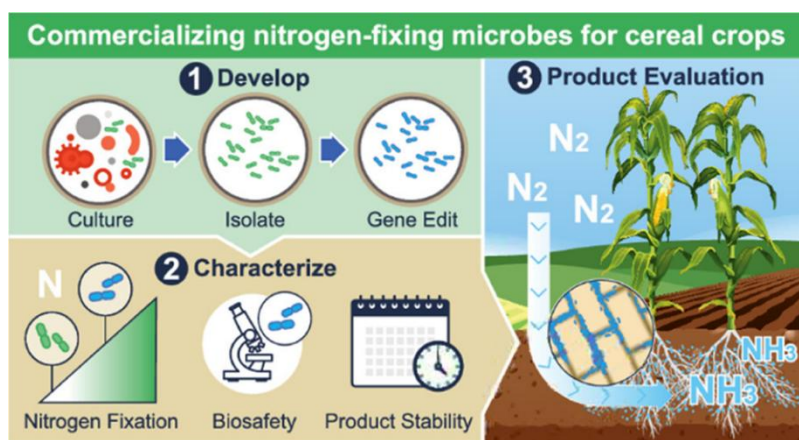


図 3-3-10 微生物による窒素固定に関する研究事例<sup>95</sup>

出所:Enabling Biological Nitrogen Fixation for Cereal Crops in Fertilized Fields (ACS Publications, 2021)

<sup>95</sup> Enabling Biological Nitrogen Fixation for Cereal Crops in Fertilized Fields (Wen, A.; Havens, K. L.; Bloch, S. E.; Shah, N.; Higgins, D. A.; Davis-Richardson, A. G.; Sharon, J.; Rezaei, F.; Mohiti-Asli, M.; Johnson, A.; Abud, G.; Ane, J.-M.; Maeda, J.; Infante, V.; Gottlieb, S. S.; Lorigan, J. G.; Williams, L.; Horton, A.; McKellar, M.; Soriano, D.; Caron, Z.; Elzinga, H.; Graham, A.; Clark, R.; Mak, S.-M.; Stupin, L.; Robinson, A.; Hubbard, N.; Broglie, R.; Tamsir, A.; Temme, K., ACS Synthetic Biology, 2021, 10, 12, 3264–3277, 2021)

<https://doi.org/10.1021/acssynbio.1c00049> (2026 年 3 月閲覧)

## 3-4 デジタル分野

### 3-4-1 分野の俯瞰

デジタル分野とは、従来アナログであったものをデジタル化することで情報がデータとして活用可能になる分野であり、表 3-4-1 に示すとおり、データを生み出し処理する情報通信技術(IT)分野、IT を活用する自動車、航空機、ドローン、ロボット、金融、ヘルスケアなどの応用分野、そして、IT 分野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。

表 3-4-1 デジタル分野を役割から俯瞰した場合の分類

役割	項目	技術やシステムの例
IT を活用する	応用分野	自動車、航空機、ドローン、ロボット、金融、ヘルスケアなど
デジタルデータを生み出し、処理する(IT)	IT 分野	コンピューティング、通信、AI、セキュリティ、IoT など
IT を支える	基盤分野	エレクトロニクス・半導体、光・レーザー、電磁波など

表 3-4-1 は、デジタル分野で必要となる役割を実現する技術の視点で記載をしている。自動車、航空機、コンピューティング、半導体などは産業分野としても認識されるものであるが、自動車、航空機、コンピューティングなどのシステムを実現するための技術、半導体を機能させたり、作り出したりするための技術という意味で取り上げている。デジタル分野は基盤分野も含めて、技術的視点が強い分野である。

デジタル分野の技術やシステムを俯瞰すると、図 3-4-1 のように示すこともできる。図の中央から基盤分野、IT分野、応用分野と広がりをもっている。

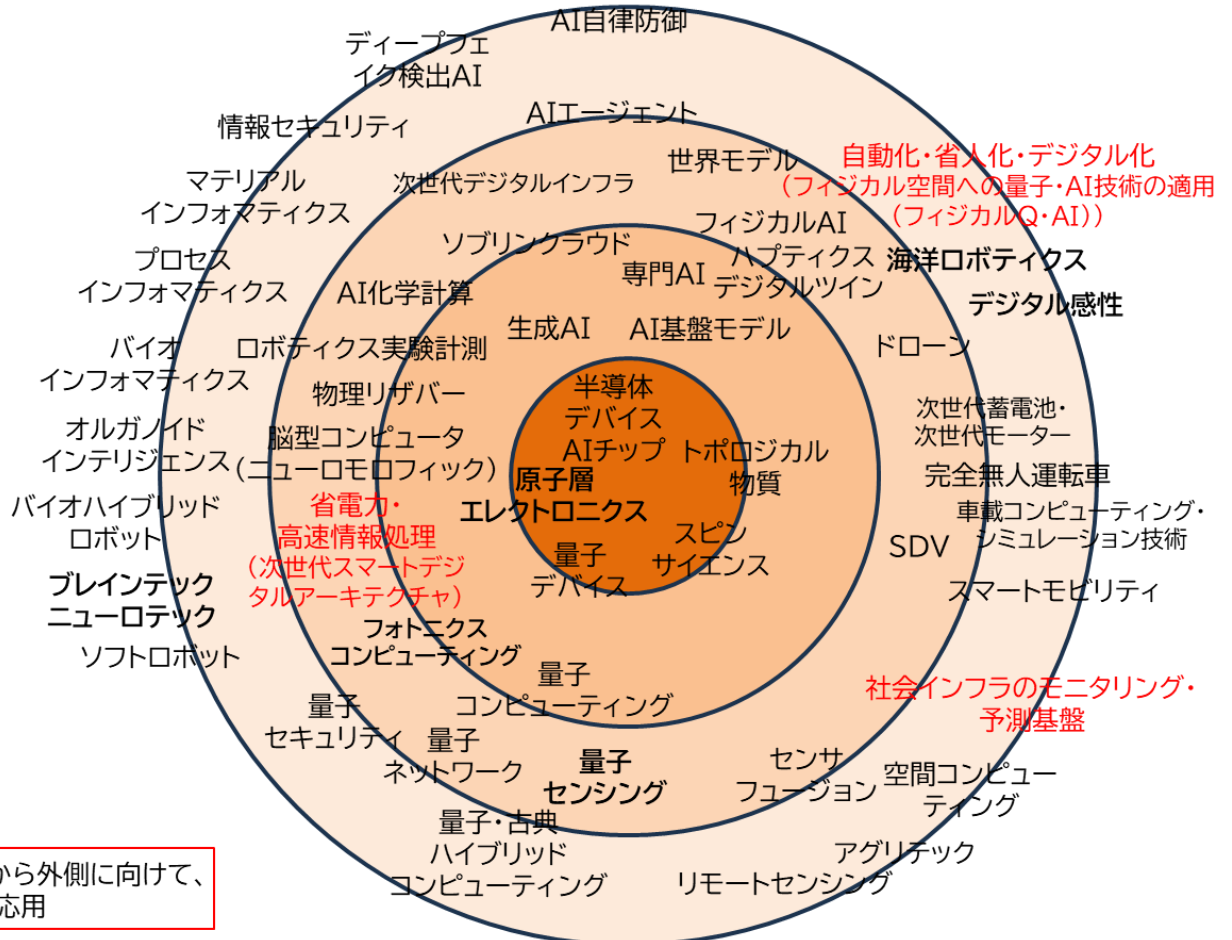


図 3-4-1 デジタル分野の俯瞰図

また、表 3-4-2 に示すように、様々な産業分野を支える技術をライフサイクル全体で見ることでも、デジタル分野を俯瞰することができる。なお、表 3-4-2 では、全ての産業及びそのライフサイクルを網羅できているわけではないが、デジタルに関わる技術の範囲が多様であることを理解いただきたい。

表 3-4-2 産業及びライフサイクルの観点によるデジタル分野の俯瞰  
(赤字がデジタルに関わる技術)

ライフサイクル 産業	衣類	食事	住居	モノ	エネルギー	チップ、デバイス	クラウド、PF (基盤層)	アプリ(応用層)	医療・ヘルスケア
リサイクル、廃棄	古着、焼却	微生物分解、焼却	中古、再利用、解体	中古、産業廃棄物、金属回収	余剰売電、ハーベスティング		基板回収、レアメタル		
消費・利用		食器			モーター、照明、ヒートポンプ、水電解装置	スマホ、サーバなどに組み込み	スマホ、タブレット、PC(エッジコンピュティング)、HMD、ゲーム	同左	
提供	店舗販売、EC	レストラン、居酒屋、食堂、コンビニ	不動産屋	量販店、電気店	充電ステーション、電池、コンデンサ、パワエレ	チップメーカー	クラウド、プロバイダ	SaaS、ソフト会社、銀行、仮想通貨会社	病院、ジム、サービサー
ソフト	ファッションデザイン、型紙、コーディネート	レシピ、コース料理、食の安全	HEMS、ホームセキュリティ、BEMS、ビルセキュリティ	自動運転、組込ソフト	EMS(Energy Management System)、セキュリティ	IP、TCAD	OS、ディスアグリゲーション、PaaS、IaaS、セキュリティ	ブロックチェーン、NFT、AI、画像処理、HPC、メタバース、デジタルツイン	
提供に必要なもの(保守、周辺機器)	洗濯、クリーニング、繕ぎ・繕い、仕立直し	周辺機器:冷蔵庫、調理器具(コンロ、オーブン、...)	リフォーム、リノベーション 周辺機器:エレベーター、エスカレーター	修理店、コールセンター	遠隔監視制御、点検ロボット	検査	周辺機器:抜熱、電源	バージョンアップ、バグフィックス	センサ、ベースメカ、分析機器、ダビンチ
インフラ	自動車、鉄道、バス・タクシー、自転車、航空機、空飛ぶクルマ、ドローン、電動モビリティ、トラック・貨車、船舶	道路、鉄道、空路、海路			送配電網、変電所、ガス管、	半導体サプライチェーン	ルーター、スイッチ、基地局、ファイバー、5G、HAPS、衛星ネットワーク	インターネット、web3	
生産、加工設計	衣類、服飾(アパレル産業)	惣菜、食材、食料品(水産加工、食品加工)	住宅、ビル、施設(建築業、土木業)	自動車、家電、時計(製造業)	電力、ガス、(電力会社、ガス会社)	AIチップ、メモリ、CPU、qubit	データセンター、サーバ・ストレージ・スイッチ、量子コンピュータ	アプリケーション、OoPay、ビットコイン	創薬、バイオインフォマティクス、アシストスーツ
製造装置・製造機械	繊維加工機、ミシン	食品加工ロボット	建設機械、大工道具、	産業ロボット、コンベア、AGV	発電機、ハーベスティング	最先端製造装置	Sier、アッセンブル	プログラム、SDK、(生成AI)	
素材、原料	綿、絹、石油	農業、漁業	木材、コンクリート、砂、鉄筋、ガラス	鉄鋳業	石炭、石油、バイオ資源、風力、太陽光	Si、Ga、Ge、Cu、... 超電導、レーザー	CPU、DRAM、不揮発メモリ、マザーボード	モジュール(ID認証、決済、位置情報、学習、認識、変換等)	iPS細胞、酵母、菌

### 3-4-2 解決すべき社会課題(M)

TSC の将来像 豊かな未来レポートでは、「6 つの価値軸」と「12 の社会像」を示している。これらの社会像は理想的な状態を概念的に示したものであり、理想的な状態と現状とのギャップを埋めるために必要なことが解決すべき社会課題である。デジタル分野は、他の技術分野の課題を含めて、ほぼ全ての社会課題に関与する。表 3-4-3 に、それらを 12 の社会課題に改めて整理した。

表 3-4-3 デジタル分野として解決すべき社会課題

項番	解決すべき社会課題
M-1	食料の確保(生産、供給、消費、廃棄の各フェーズにて)
M-2	健康寿命の延伸
M-3	多様性・社会的包摂
M-4	自己の理想実現、未開・限界への挑戦
M-5	働き方改革、労働人口減少への挑戦
M-6	社会の需要に即した開発・生産(少量多品種、アジャイル)
M-7	物質循環経済
M-8	脱炭素・環境調和経済
M-9	エネルギー脱炭素化・強靱化
M-10	自然共生持続可能／自立分散社会
M-11	レジリエントな社会・情報インフラ
M-12	安全・安心・透明性・信頼性の高い行政・コミュニティ

### 3-4-3 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向

表 3-4-3 で記載した社会課題ごとに、デジタルの視点から見た社会課題や動向の概要を示す。なお、社会課題の数が多いため、全ての社会課題に対して均等な質で記載できていない点は、今後の課題である。

#### M-1 食料の確保(生産、供給、消費、廃棄の各フェーズにて)

世界全体では、人口増加のため、食料が不足する傾向にある。また、地球温暖化による気候変動は、干ばつや洪水などの異常気象を引き起こし、農業に影響を与えている。これにより、作物の収穫量が減少し、食料供給が不安定になっている。

日本においては、高齢化が進み、就農する労働人口も減少し、食料自給率の低下が顕著になっている。結果として、輸入食料への依存度が増えており、世界情勢によっては食料の確保への影響が考えられる。

本社会課題は、食材の生産のみではなく、消費や廃棄におけるロスの削減や飼料等への再利用も含む。すなわち、必要以上に生産しない、廃棄を減らすといったことも、解決にとって重要なポイントである。

#### M-2 健康寿命の延伸

人の平均寿命は、先進国であるか否かにかかわらず伸びている。しかし、年齢が高くなるといずれは、健康を害したり、怪我をしたり、脳機能が衰えるなど、自立的な活動が困難となり、介護や支援が必要となる。健康に活動できる年齢である健康寿命と平均寿命の差は、先進国では大きな開きがあり、そのギャップを縮めることが社会課題となっている。この社会課題を解決することで、本人の活動期間の延伸とともに、介護や支援を行う人の数を減らすことができる。

#### M-3 多様性・社会的包摂

先進国を中心に多様性が進んでいるが、まだまだ差別や階級制度など、社会的包摂が行き届いているとは言い難い状況である。グローバル化が進む現代においては、世界各地で文化の違いや経済格差が社会課題となっている。日本においても、労働人口の減少の解決策として、様々な政策がとられているが、他国に比べ、言語の壁は大きく、多様性の実現ができていないとは言い難い。これらの課題を解決するためには、教育の充実、多様性を尊重する文化の醸成が求められる。

#### M-4 自己の理想実現、未開・限界への挑戦

先進国を中心に経済の豊かさが幸せであるとは限らず、心の豊かさや充実感を重視する社会が望ましいという価値観が広がってきている。これらの価値観を実感していくためには、全ての人が質の高い教育を受けられる環境や生涯学び続けられる機会の創

出が必要である。さらには、安定した雇用機会の創出とチャレンジできる環境づくりが求められている。

#### M-5 働き方改革、労働人口減少への挑戦

世界の多くの先進国において、高齢化が進む一方で出生率が下がっており、生産年齢人口が減少する傾向にある。また、要介護者の介護などにより離職する人も増加しており、総合的に労働人口が減少している。労働人口が減少すると、社会システムが機能しなくなる可能性があり、国の産業競争力の低下のみならず、環境への影響や Well-being の低下、社会インフラの脆弱化などのリスクとなる。労働人口を増やすほか、ロボットの導入等の代替手段の構築により対応を行うことが求められる。

#### M-6 社会の需要に即した開発・生産(少量多品種、アジャイル)

グローバルな競争の激化と消費者ニーズの多様化に伴い、時間をかけても良いものを開発し、大量に製造する従来型の開発手法からの変化が求められている。市場で大きなシェアを獲得するためには、短い開発サイクルで多様なニーズに応える様々な製品を少量製造リリースし、顧客フィードバックを繰り返す手法が重要となってきている。

#### M-7 物質循環経済

限りある資源の問題や環境問題への配慮から、世界各国で資源の効率的な利用と廃棄物の削減が、政府目標として掲げられている。欧州や中国でもサーキュラーエコノミーに関する政策が打ち出されており、日本においても、環境省から『循環経済工程表 2024』が発表され、ライフサイクル全体における資源循環による脱炭素化の取組を推進している。

#### M-8 脱炭素・環境調和経済

2015 年に採択された『パリ協定』により、GHG(温室効果ガス)の排出削減が全世界の目標となっている。日本においても、2050 年までに GHG の排出を実質ゼロにすることを目指している。

#### M-9 エネルギー脱炭素化・強靱化

化石燃料(石炭、石油、天然ガス)が主なエネルギー源として利用されているため、二酸化炭素が排出され、地球温暖化が進んでいる。また、化石燃料の多くは特定の地域に偏在しており、経済安全保障の観点からも供給リスクが存在する。そのため、地域の特性に合わせた再生可能エネルギーの利用が必要となっている。日本においては、再生可能エネルギーの導入が地理的に難しい地域も存在することから、効率的なエネルギーマネジメントシステムや省エネルギー技術の導入が必要である。

## M-10 自然共生持続可能／自立分散社会

食料確保のための農地開発や先進国以外での都市開発により、森林が伐採されることが多く、生態系に影響を及ぼしている。生物は自然環境が提供する様々な機能(水の浄化、土壌の肥沃化、気候の調整など)を担っており、生物多様性の喪失は、農業や漁業の収穫量の変化や感染症の増加、文化的喪失につながる可能性がある。

## M-11 レジリエントな社会・情報インフラ

道路、橋梁、トンネル、水道などが経年変化により倒壊するリスクがあることに加えて、世界各地で地震や世界的な気候変動により、台風、洪水などの自然災害が発生し、社会インフラを倒壊、断絶するリスクが高まっている。経年変化や災害に強いインフラの整備及び倒壊や断絶などが発生した場合の迅速な対応や復旧計画の策定が社会課題となっている。対象となるインフラは、物理的なインフラにとどまらず、情報インフラも含まれる。日本においては、必ず発生すると考えられている南海トラフ地震や、毎年発生している線状降水帯などへの対応、災害に強い通信インフラの構築が必要である。

## M-12 安全・安心・透明性・信頼性の高い行政・コミュニティ

政府の意思決定プロセスや政策の背景情報を市民に公開し、市民が行政に積極的に参加することが重要であるが、市民の意見を取り入れる仕組みは十分であるとは言えない。日本においても、デジタル技術を活用した行政サービスの導入が進められているが、全ての年代の人が無理なく利用できる状況にはまだ達しておらず、デジタルデバイドの解消には至っていない。

### 3-4-4 社会課題の解決のために取り組むべき領域(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)

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

(量子センシング・海洋ロボティクス・デジタル感性)

この項では、3-4-2、3-4-3 で示した社会課題の解決に寄与するデジタル分野として取り組むべき領域を抽出する。

社会課題を解決するために取り組むべき領域は、例えば、ロジックツリーの手法を用いることで、比較的網羅的に導出することが可能であるが、3-4-2 で提示した全ての社会課題に対してロジックモデルを適用することは時間的制約から困難であった。そこで、デジタル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領域、更には社会インパクトが大きいと想像される領域を取り上げるにとどめた。今回取り上げた機能は表 3-4-4 に示した 16 個である。

表 3-4-4 社会課題の解決に寄与する取り組むべき領域

F-1	食料需要供給管理・予測
F-2	予防医療・健康管理
F-3	障がいの克服・高齢者の機能回復
F-4	個人情報保護・社会受容性向上
F-5	個々人のやりがい・意欲向上
F-6	人の能力を向上
F-7	自動化・省人化・デジタル化
F-8	設計・製造期間短縮
F-9	省電力・高速情報処理
F-10	サプライチェーンでのデータ共有
F-11	完全無人運転
F-12	サプライチェーン、環境に親和性高い材料・部材への置換
F-13	エネルギー効率の良い設備・機器
F-14	社会インフラのモニタリング・予測基盤
F-15	セキュア(信頼・堅牢)情報通信
F-16	自立可能(エネルギー、食料など)なコンパクトシティ

これら 16 領域と社会課題の関係性を、表 3-4-5 及び図 3-4-2 に示す。

表 3-4-5 デジタル分野が関わる解決すべき社会課題と取り組むべき領域の関係

項番	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11	F-12	F-13	F-14	F-15	F-16
M-1	○															
M-2		○	○				○									
M-3				○												
M-4					○	○	○									
M-5					○	○	○		○		○					
M-6							○	○								
M-7										○		○				
M-8								○	○	○		○	○			
M-9									○	○		○	○			
M-10	○						○						○	○		○
M-11							○		○		○			○	○	○
M-12											○				○	○

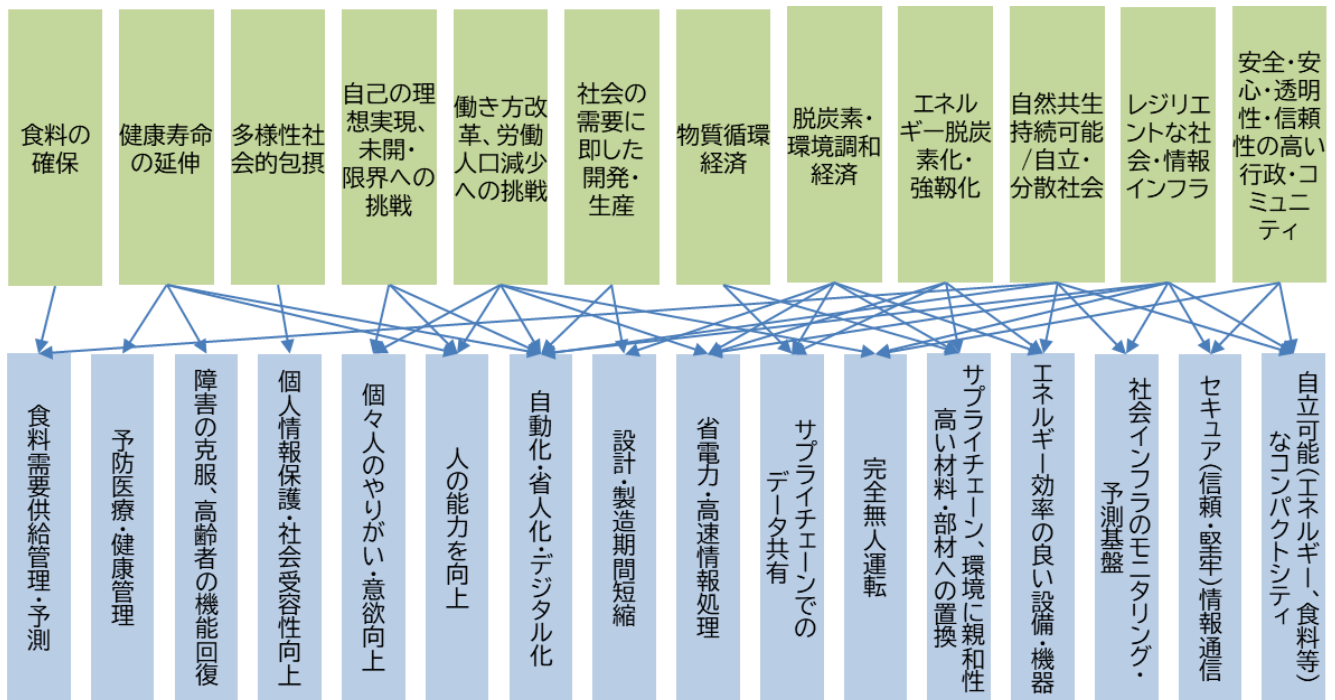


図 3-4-2 デジタル分野が関わる解決すべき社会課題と取り組むべき領域の関係

以下、取り組むべき領域ごとにその概要とどのように社会課題解決に貢献するかを述べるとともに、それらが実現することで、社会インパクトがどの程度であるかを述べる。また、それぞれの領域に関わる市場動向は、最終的にフロンティア領域の候補として抽出した三つの領域についてのみ記載する。

まず、社会インパクトは、以下の観点で評価した。豊かな未来レポートでは6つの価値軸を定めており、これらの価値軸に則して評価することとした。ただし、デジタル分野という観点で評価する際には、6つの価値軸のうち、経済(Economy)と環境(Environment)に比して、いわゆる Well-being に相当する Social Inclusion と Life Satisfaction 及び社会基盤に相当する Infrastructure と Governance は、それぞれ粒度が細かい。そこで、社会インパクトとしては、四つの評価軸、Well-being、経済、環境、社会基盤で評価することとした。また、社会インパクトの定量的評価は難しいため、定性的に◎(大きく影響する)、○(影響する)、△(影響するが限定的)、-(影響は僅か)として評価した。なお、定性的ではあっても、異なる四つの軸で社会インパクトの大きさをそろえる必要があるため、それぞれの評価軸で社会インパクトの基準を表 3-4-6 に示すように設けた。

表 3-4-6 社会インパクトの評価基準

評価軸	世界/日本	◎の基準	○の基準	△の基準
Well-being	世界総人口 80 億人 に対し	1 億人以上に影響	1000 万人以上に影響	100 万人以上に影響
	日本総人口 1.2 億人 に対し	100 万人以上に影響	10 万人以上に影響	1 万人以上に影響
経済	世界 GDP1.5 京円 に対し	10 兆円/年以上の 効果	1000 億円/年以上 の効果	10 億円/年以上の 効果
	日本 GDP560 兆円 に対し	1 兆円/年以上の効果	100 億円/年以上の 効果	1 億円/年以上の 効果
環境	世界 CO <sub>2</sub> 排出量 335 億トンに対し	1 億トン/年以上の削減	1000 万トン/年以上 の削減	100 万トン/年以上 の削減
	日本 CO <sub>2</sub> 排出量 11.1 億トンに対し	1000 万トン/年以上 の削減	100 万トン/年以上 の削減	10 万トン/年以上の 削減
社会基盤	共通	高信頼性に加え安全性が求められる(航空管制、医療制御、宇宙ロケット制御、建築構造計算、医療関連機器制御、緊急医療 NW など)	基本的に高信頼性が求められる(運輸、通信、金融・証券、プラント制御などの重要インフラ)	個別事業の普及範囲が大きいインフラ系で基本的信頼性が求められる(放送、行政、水道、建築など重要インフラ)

なお、社会インパクトの評価においては、複数の有識者へのインタビュー結果も加味した。

## F-1 食料需要供給管理・予測

食料の確保という課題に対しては、あらたな食料素材の開発などを目指したフードテックが大きな候補の一つと考えられるが、アグリ・フードテック分野の対象範囲であるため、デジタル分野としては除外している。デジタルの観点からは、需要と供給の予測を行い製造者が活用することで廃棄量を減らす。例えば、イベントや旅行などのマクロな動態

分析から、地域ごとの食事の需要予測を行い、供給量を可能な限り合わせることで廃棄を減らす。

公開情報などをベースに、データの収集、分析は比較的实现可能なため、需要の予測はある程度可能と考えられるが、供給側の意思決定は独立であり、調整することは難しいため、廃棄を減らす効果は限定的となる。

Well-being: - 経済: O 環境: Δ 社会基盤: Δ

## F-2 予防医療・健康管理

日々の生体モニタリング等により健康を維持し、罹患する前に予防することにより、疾病率と被介護率を下げ、健康寿命を 10 年規模で延伸させる。直接的な効用は Well-being に関わる点が大きいが、要介護者が減ることで介護離職も減り、仕事に従事できる人口は増加することに加えて、医療費の削減も起きるため、結果経済にも効果は大きい。

Well-being: ◎ 経済: ◎ 環境: - 社会基盤: -

## F-3 障がいの克服・高齢者の機能回復

病気や怪我、あるいは高齢化によって、認知、歩行、手作業など、人が有する様々な機能は弱まっていくが、機能低下が大きくなれば、仕事や社会活動ができなくなる。機能低下をデジタル技術によって補ったり、回復したりする。これにより、要介護者を減らすことに加え、本人の就労含め社会活動が可能になる。

Well-being: ◎ 経済: O 環境: - 社会基盤: -

## F-4 個人情報保護・社会受容性向上

個々人がリテラシーを高め、様々なマイノリティを許容するとともに、差別をしない意識をもつようにする。また、社会自身もマイノリティを認め、差別をしない制度やシステムに移行する。社会の仕組みとしては、一国だけの問題ではなく、グローバルに共通認識をもつことが必要となろう。

Well-being: ◎ 経済: Δ 環境: - 社会基盤: -

## F-5 個々人のやりがい・意欲向上

人々が自己実現を追求できるようにするために、柔軟な学びの環境やチャレンジできる労働環境を構築する。社会全体としても、個々人の貢献を認識し、評価する文化が育つことが必要となる。

Well-being: O 経済: O 環境: Δ 社会基盤: -

## F-6 人の能力を向上

ビッグデータの分析により、個人の特性の理解が進む。これにより、個々に最適な学習環境の提供が可能となり、効果的な能力の向上につながる。また、個人のスケジュール管理や健康管理に関しても、パーソナル AI を活用することにより、時間の有効活用につながるため、個人の生産性が向上し、社会全体の成長と発展が促進されるため、経済性の面での効果は大きい。

Well-being:○ 経済:◎ 環境－ 社会基盤:－

## F-7 自動化・省人化・デジタル化

これまで人が行っていた作業等を、人が関わらなくても可能にする、あるいは人が関わるエフォートを縮小する。頭脳的な作業もあれば、肉体的な作業も含む。特に、過酷な環境下や長時間の作業などから人々を解放することで Well-being への貢献を有する。また、自動化により、製品(サービス含む)の品質向上や作業時間が夜間も可能になることから経済的な貢献も大きい。また、これまでデジタル化できていなかった領域や精度向上により、新たな産業の創出も見込まれる。関係する産業は、金融、EC など主にサイバー空間で進められる分野だけでなく、健康、製造、海洋、社会インフラのほか、フィジカル空間で進められる分野にも寄与は広がる。

Well-being:◎ 経済:◎ 環境－ 社会基盤:－

現在、生成 AI の活用が世界中で拡大し、これまで人が行っていた作業の多くが生成 AI に代替されたり、人の作業効率の向上が図られたりしている。この流れは、生成 AI がフィジカル空間にも導入されることで、人が身体機能を用いて行う様々な作業にも拡大することが予想される。

## F-8 設計・製造期間短縮

モノを提供するか、コトを提供するかにかかわらず、あらゆる産業分野において、製品(サービス含む)を顧客に提供するためには、設計と製造の期間を必要とするが、これらの期間を今まで以上に短縮することである。

時代の変化が激しい現代及び将来においては、顧客のニーズを踏まえた製品をいち早く市場に投入することが求められる。設計期間及び製造期間を、海外企業に比して短縮することができれば、市場における日本シェアを拡大することにつながる。直接的な影響は、市場シェアの増加分であるため限定的であるが、顧客からのフィードバックを活用して新製品や新市場に結びつけられる可能性も有している。

Well-being:○ 経済:○ 環境:○ 社会基盤:－

## F-9 省電力・高速情報処理

今やあらゆる産業分野、個々人の生活においても広く使われているデジタル技術のコアである情報処理を、より高速に、より省電力に実現する。演算処理を担う汎用プロセッサである CPU や GPU は、半導体の微細化により、単位演算にかかる時間と電力は引き続き減少傾向にあるものの、総量としての演算量は急速に増大しており、微細化の限界までの追求や新しい動作原理の導入などによる、引き続きの性能向上と電力消費の大幅な低減が期待されている。これにより、生成 AI などの活用が広く普及し、大きな経済効果を生むと同時に、情報処理にかかるデバイスの製造、販売、利用にかかる産業も拡大が期待される。経済面でのインパクトが一番大きいですが、あらゆる産業、個々人の生活にも影響があることから、Well-being にも貢献が期待されるし、省電力を進めることで環境への貢献も期待され、ガバナンスやインフラでも活用されることから、それぞれの社会インパクトは認められる。

Well-being:○ 経済:◎ 環境:◎ 社会基盤:○

Web 上の情報検索は Google の寡占状態であったが、OpenAI の ChatGPT など生成 AI の登場により情報検索の在り方が変化し、牙城が崩される可能性がある。どの企業がプラットフォームとしてシェアを握るかはまだ未確定であり、使いやすさ、サービス内容、精度、応答速度等、様々な軸での価値が評価され競争されるものと考えられる。どの企業、サービスが優位を占めるかは未知数であるものの、世界における生成 AI の市場規模は急成長が期待されている。

生成 AI のモデル開発と利用者へのサービス提供は、クラウドとしてのデータセンターで実行される。AI の処理にかかる演算の多くの部分は NVIDIA の GPU を用いて実行されるが、GPU の多くはデータセンターのサーバーに納められ稼働している。また、生成 AI を活用するためにはデータの生成・収集が欠かせないが、データの価値が国外に搾取されぬよう、データ保持及びデータ処理を国内に閉じて実施するため、各国においてもデータセンターの増設が進んでいる。データセンターの建設は生成 AI をサービスする米国や中国での伸びが大きいだけでなく、世界各国で進んでおり、その市場規模も拡大傾向が続いている。一方で、データセンターにおける電力消費は、電力効率の高いハイパースケールデータセンターへの処理移行により微増に抑えられていたものの、ハイパースケールデータセンターの増加に伴い、今後急速に増大することが予想されている。

## F-10 サプライチェーンでのデータ共有

製品の設計から製造、使用、廃棄にわたって関わるステークホルダーで、製品に関する様々なデータを共有する。人が目で見て理解できる共有ではなく、フォーマットを共通化し、AI が可読なデータで共有することが必要であり、データソースを辿れるトレーサビリティや、耐改ざん性を有することが望まれる。

カーボンニュートラルを実現することが目指されている中、最終製品の製造に係る CO<sub>2</sub> 排出量は、部素材に係る CO<sub>2</sub> 排出量も加味することが必要であるし、利用時や廃棄・再利用時に係る CO<sub>2</sub> 排出量も踏まえておくことが、顧客価値創出や投資家へのアピールといった観点からは重要となる。また、環境負荷の観点から使用が敬遠される部素材や、サプライチェーン上入手が困難な部素材が生じた場合などに、代替の部素材を探索、調達するためには、現状の使用量などの把握が不可欠であり、データ共有ができていれば、様々な課題への対応が可能となる。主にはカーボンニュートラルへの貢献が大きいが、その結果として企業価値が増大し、経済的な効果につながる可能性もある。

Well-being－ 経済：○ 環境：△ 社会基盤：－

### F-11 完全無人運転

領域としては、F-7 に含まれるが、モビリティの自動化という観点で切り出している。移動物体を人手によらず、機械システムとして自律的に操作する。人を運ぶ、荷物を運ぶ、地上を走る、水上水中を進む、空中を移動する、と多様な利用が想定されるが、外界を認識して、目的地まで自律的に移動するという機能は共通している。

Well-being：○ 経済：○ 環境：－ 社会基盤：◎

### F-12 サプライチェーン、環境に親和性が高い材料・部材への置換

経済安全保障上の懸念がある材料や、環境負荷が懸念される材料の利用は、特定の契機を起点としてリスクが顕在化する可能性がある。これらのリスクに未然に対処するため、サプライチェーンの見直しや環境に親和性の高い素材の選定を進めておくことが重要である。これにより、安全保障の問題が発生した場合や、新たな環境規制が導入された場合においても、経済的な損失を抑えることができ、環境に配慮したモノづくりが可能となる。

Well-being：－ 経済：△ 環境：○ 社会基盤：△

### F-13 エネルギー効率の良い設備・機器

エネルギーを効率的に利用するためには、送電や利用の際に生じるロスを低減することが重要である。エネルギーロスは主にパワー半導体に代表されるスイッチング素子で生じることから、これらの損失を減らし、効率を向上することで、エネルギーの有効活用が可能となる。エネルギー・インフラは GHG への寄与が大きく、環境への波及効果は大きいですが、スイッチング素子の効率向上は難しく、経済的な効果は限定的である。

Well-being：－ 経済：◎ 環境：◎ 社会基盤：－

#### F-14 社会インフラのモニタリング・予測基盤

気象データや海洋データ、宇宙からの衛星データなど複数のデータを取得し、自治体の併せもつ地理データと組み合わせることで、街に起きているわずかな変化をモニタリングできるようにする。経年変化の予兆、事故による損壊、災害の予兆の観測が可能になることが期待できる。また、災害が発生した場合においても、これらのデータを活用することで、災害規模の把握、危険個所の特定、復旧計画の策定が可能となり、安全・安心な街づくりにつながる。災害の予測や効率的な復旧計画は災害による多大な経済損失を考慮すると、経済効果としては大きい。

Well-being:◎ 経済:◎ 環境:○ 社会基盤:◎

#### F-15 セキュア(信頼・堅牢)情報通信

量子技術が従来の暗号技術を破る可能性は高く、暗号通信のセキュリティが脆弱化する恐れがある。これにより、現在広く使用されている暗号技術が無効化し、量子耐性の新しい暗号技術の開発が不可避となっている。さらに、AI やロボットなどの大容量の通信を必要とするアプリケーションが利用されつつあり、より多くのデータが通信されることから、データ保護の重要性が増している。セキュアな情報インフラは個人や企業の機密情報の保護、電子商取引などの信頼性の確保、緊急通報システムなどの安定利用などに寄与することから、経済的な効果は大きく、もしも構築が遅れると安全性が担保されず、社会の安全保障にも影響が及ぶ。

Well-being:△ 経済:○ 環境:－ 社会基盤:○

#### F-16 自立可能(エネルギー、食料など)なコンパクトシティ

エネルギーや食料などの必要資源を地域内で自給自足できる都市を構築する。効率的なエネルギー利用と再生可能エネルギーの導入を行い、エネルギーを地産できる体制を整える。公共交通網や道路整備を行い、交通渋滞や排ガスの抑制につなげ、食料の地産地消を促進し、都市農業やコミュニティガーデンの設置を行う。

この都市モデルでは、都市の密度が高まることで、エネルギー効率が向上し、必要なサービスへの移動距離が低減され、公共交通機関の利用の促進につながる。また、社会的つながりの強化により、コミュニティの結束力の向上に資する。これにより、住民の Well-being につながり、ガバナンスの強化、環境保全への貢献度は大きい。

Well-being:○ 経済:△ 環境:◎ 社会基盤:○

表 3-4-7 に、以上に示してきた取り組むべき領域が達成された際の社会インパクトと、その根拠を評価軸ごとに示す。

表 3-4-7 取り組むべき領域が達成された際の社会インパクトとその根拠

機能・領域	社会インパクト				
	Well-being	経済	環境	社会基盤	総合
食料需要供給管理・予測	—	○2022年日本の食品ロスによる経済損失4兆円、内5%減で2000億円	△2022年日本の食品ロスによるCO2排出量0.1トン、内5%減で0.02トン	△社会・コミュニティの維持に必要	4
予防医療・健康管理(ヘルス・メンタルモニタリング)	◎日本で約72万人要介護高齢者削減介護者の負担も考えると100万人超	◎1.5兆円医療介護費削減	—	—	6
障害の克服、高齢者の機能回復	◎要介護認定者数2040年日本988万人脳卒中、関節症、骨折の割合4割で400万	○400万人が年100万稼ぐ仕事につけば4兆円、5%程度として2000億円	—	—	5
個人情報保護・社会受容性向上	◎LGBT+世界8%で6億人	△	—	—	4
個々人のやりがい・意欲向上	○日本ニート人口74万人	○新規事業創出、スタートアップ起業	△	—	5
人の能力を向上	○	◎日本給与総額200兆円、就業率7-8割が5%増加で10兆円。	—	—	5
自動化・省人化・デジタル化	◎2030年世界ヒューマノイド出荷台数3.8万台、スマホ普及率60-98%、2030年に5割にAI搭載	◎2030年世界サービスロボット市場規模4兆円超	—	—	6
設計・製造期間短縮	○	○	○2020年産業部門のCO2排出量約4億トンを期間3/4として1億トン削減	—	6
省電力・高速情報処理	○	◎2032年世界AIエッジ市場規模40兆円、5%ハード置換でも2兆円	◎2030年DCの1,000TWhを1/4削減するとCO2約1億トン	○データセンタは公共インフラの位置づけ	10
サプライチェーンでのデータ共有	—	○	△基盤としてであり、直接的効果ではない	—	3
完全無人運転	○	○	—	◎人命を含む安全を提供	7
サプライチェーン、環境に親和性高い材料・部材への置換	—	△	◎CO2削減だけでなく広範囲の材料にも適用できれば効果大	△様々な産業への影響あり	4
エネルギー効率の良い設備・機器	—	◎ポテンシャルで5000TWh~75兆円(1kWhが15円換算)10%で7兆	◎次世代パワエレの削減ポテンシャル10億トン/年 10%減らせて1億	—	6
社会インフラのモニタリング・予測基盤	◎南海トラフの被害人口(死者30万人、避難者950万人)	◎南海トラフの経済損失220兆円 5%軽減でも11兆円の効果	◎日本森林火災700ha/年x900本/hax14kg/本=0.9億トン/年	◎人命に関わる	11
セキュア(信頼・堅牢)情報通信	△	○災害、戦争、量子comの解読等による通信インフラ途絶の経済効果	—	○情報通信インフラは社会インフラの一部であり、重要度は高い	5
自立可能(エネルギー、食料等)なコンパクトシティ	○10万人都市×数力所か	△新たな建設などはあるが、仕事や生活で市場は増えない	◎ゴミ廃棄・物流・エネルギー送電口などが削減(試算未)	○重要な社会基盤だが人命や経済への影響は大きくない	8

続いて、取り組むべき領域が実現されて社会実装がなされるタイミングを「実現時期」と定義して試算する。その試算には TRL(技術成熟度)の考え方を参考にした。取り組むべき領域が実現されるためには、それらを構成する技術がそれぞれ TRL9 を達成していることが必要条件となり、場合によっては、複数の技術を組み合わせて実装するために更に時間を要する可能性がある。そこで、取り組むべき領域を実現するために必要な技術それぞれの現在の TRL を評価し、TRL9 に至るまでの期間を推測し、最も遅く TRL9 に至る時期を(最速の)実現時期とした。

各技術の現状の TRL を精緻に評価することも容易ではないが、現状の TRL から TRL9 に至る期間を評価することは更に難しい。デジタル技術の分野では、TRL1~3(基礎研究段階)は数年~数十年、TRL4~6(試作品開発段階)は数年~10年程度、TRL7~9(実証実験段階)は数年~5年程度かかるものとし、更に普及に2年程度かかると考え、現在の TRL からおよそ何年で普及が実現するかを、おおよそ図 3-4-3 に示すように推定した。

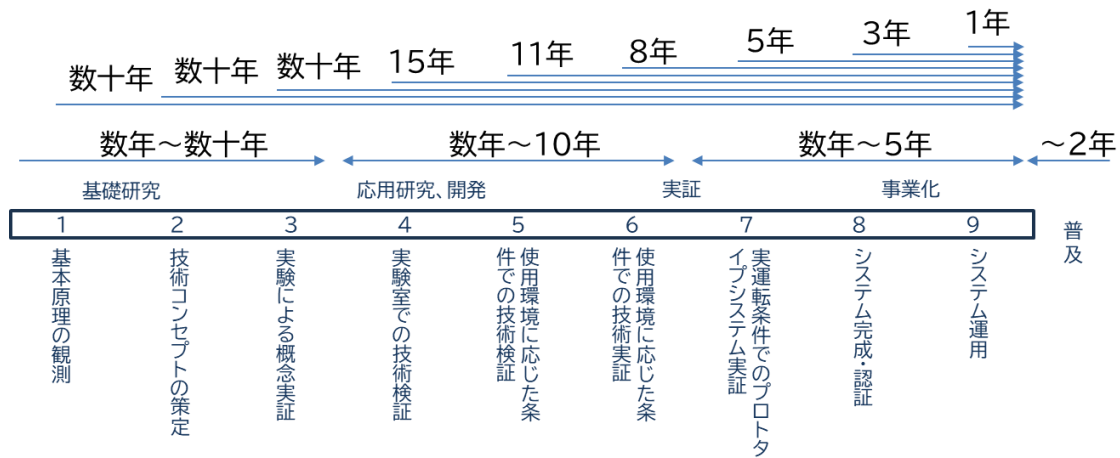


図 3-4-3 TRL と普及が実現するまでにかかる年数の推定

出所: Horizon Europe Work Programme 2021-2022<sup>96</sup>, Technology Readiness Levels (EU) を  
 基に NEDO イノベーション戦略センター作成

今回の取り組むべき領域の社会実装のために必要とされる全ての技術をリストアップできていないが、主要な技術を抽出し、現在の TRL から、実現の時期を図 3-4-4 主要な技術が実現する時期の推定のように推定した。さらに、取り組むべき領域の社会実装のために必要な技術、それぞれの実現時期の推測を組み合わせ、取り組むべき領域が社会実装されるであろう時期を図 3-4-5 のように推測した。

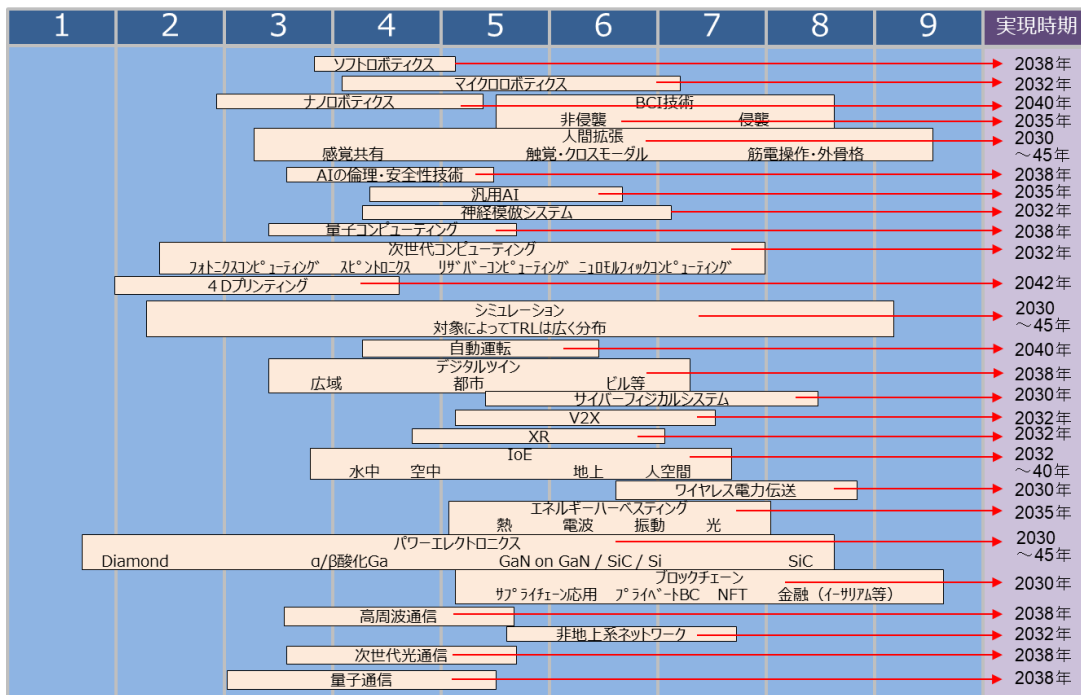
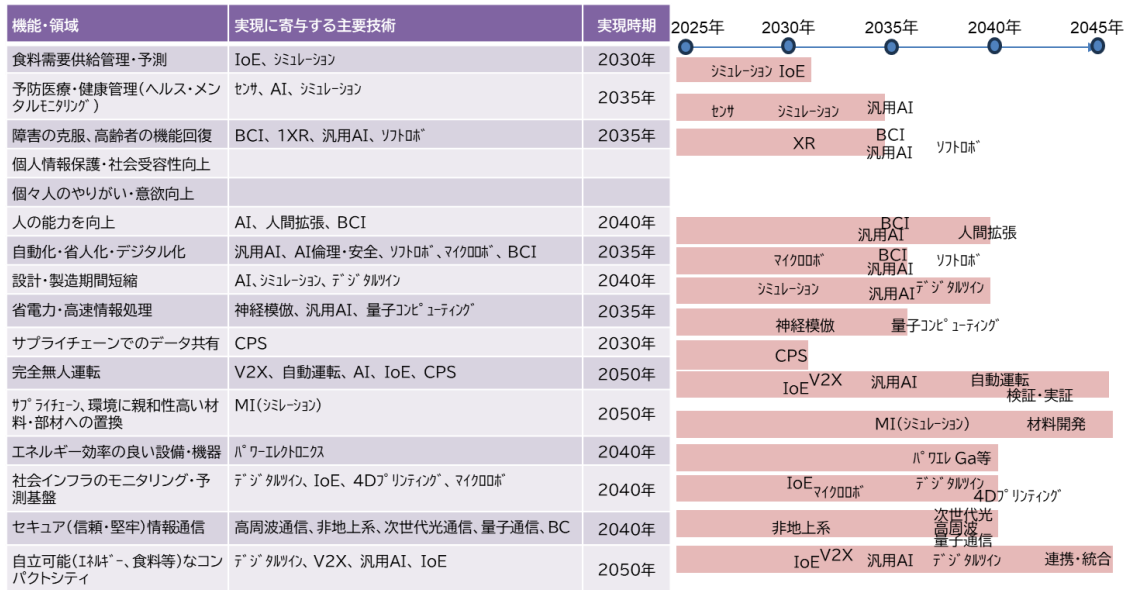


図 3-4-4 主要な技術が実現する時期の推定

<sup>96</sup> [https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2021-2022/wp-13-general-annexes\\_horizon-2021-2022\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2021-2022/wp-13-general-annexes_horizon-2021-2022_en.pdf) (2026年3月閲覧)



注)主要技術の全ての技術が実用化されなくても普及に至る機能・領域も存在する。また、主要技術以外に開発期間を要する機能・領域も存在する。

図 3-4-5 取り組むべき領域が社会実装される時期を主要技術の実現時期から推測

なお、「個人情報保護・社会受容性向上」と「個々人のやりがい・意欲向上」については、十分な技術項目が見いだせていないため、社会実装の時期は推測できていない。

取り組むべき領域について、実現に寄与する主要技術、社会実装の実現時期、社会インパクトを表 3-4-8 にまとめる。

表 3-4-8 取り組むべき領域の主要技術、社会実装の実現時期、社会インパクト

機能・領域	実現に寄与する主要技術	実現時期	社会インパクト				
			Well-being	経済	環境	社会基盤	総合
食料需要供給管理・予測	IoT、シミュレーション	2030年	—	○	△	△	4
予防医療・健康管理(ヘルス・メンタルモタリク)	センサ、AI、シミュレーション	2035年	◎	◎	—	—	6
障害の克服、高齢者の機能回復	BCI、XR、汎用AI、ソフト	2035年	◎	○	—	—	5
個人情報保護・社会受容性向上			◎	△	—	—	4
個々人のやりがい・意欲向上			○	○	△	—	5
人の能力を向上	AI、人間拡張、ソフト、BCI	2040年	○	◎	—	—	5
自動化・省人化・デジタル化	汎用AI、AI倫理・安全、ソフト、マイクロ、BCI	2035年	◎	◎	—	—	6
設計・製造期間短縮	AI、シミュレーション、デジタル	2040年	○	○	○	—	6
省電力・高速情報処理	神経模倣、汎用AI、量子コンピューティング、分散コンピューティング	2035年	○	◎	◎	○	10
サプライチェーンでのデータ共有	CPS、シミュレーション	2030年	—	○	△	—	3
完全無人運転	V2X、(自動運転、AI)、IoT、エネルギー、WPT、CPS	2050年	○	○	—	◎	7
サステイナブルな環境に親和性高い材料・部材への置換	MI	2050年	—	△	○	△	4
エネルギー効率の良い設備・機器	パワーエレクトロニクス、MI、シミュレーション	2040年	—	◎	◎	—	6
社会インフラのモニタリング・予測基盤	デジタル、IoT、4Dプリンティング、マイクロ	2040年	◎	◎	○	◎	11
セキュア(信頼・堅牢)情報通信	高周波通信、非地上系、次世代光通信、量子通信、BC	2040年	△	○	—	○	5
自立可能(エネルギー、食料等)なコンパクトシティ	デジタル、V2X、汎用AI、IoT	2050年	○	△	◎	○	8

取り組むべき領域について、社会実装の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 3-4-6 である。

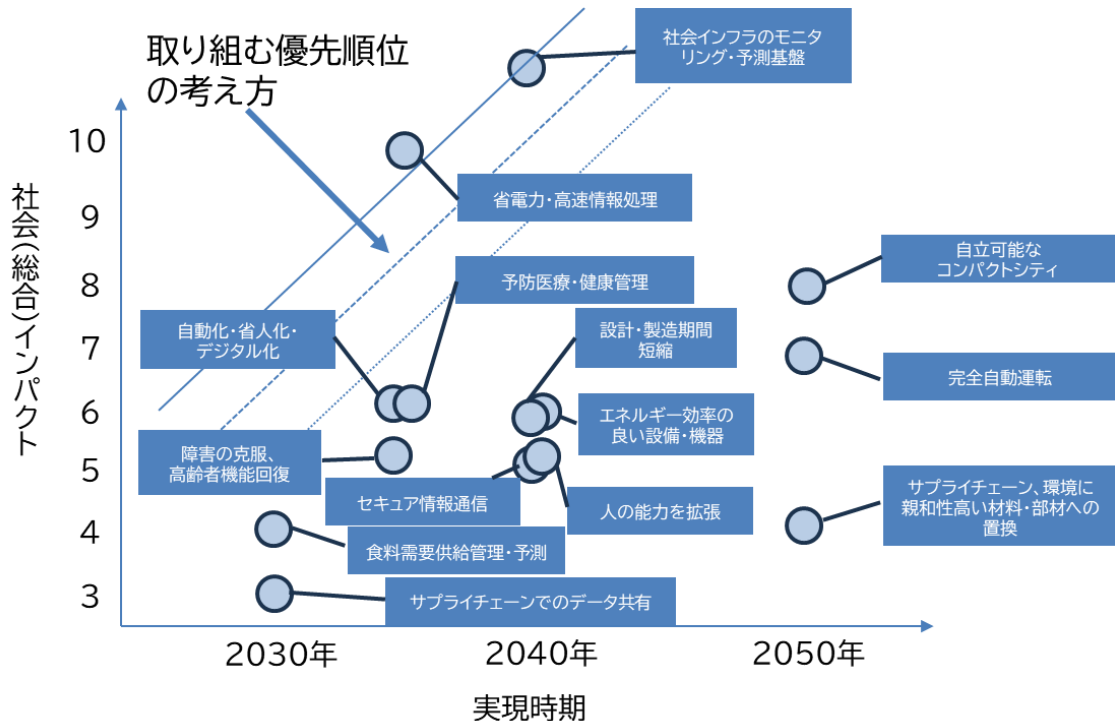


図 3-4-6 取り組むべき領域の社会インパクトと社会実装の実現時期

フロンティア領域の候補としての優先順位の考え方としては、

- ・社会インパクトが大きく、実現時期が近いものを、確実に刈り取る
- ・社会インパクトが大きいが一方で、実現時期が先であるものを、先行的に投資することで実現時期を早める
- ・社会インパクトは相対的に低いですが、経済安全保障上重要性が高い、又は日本の強みを活かしてシェアを大きく獲得できる可能性があるもの

など、様々であるが、図 3-4-6 に示すように、社会インパクトと実現時期を総合的に判断し、Innovation Outlook Ver. 1.0 では以下の 3 点の取り組むべき領域をフロンティア領域等として提案した。

- (1) 省電力・高速情報処理
- (2) 社会インフラのモニタリング・予測基盤
- (3) 自動化・省人化・デジタル化

本増補版ではその中でも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』『フォトニ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、優先的に取り組むべきフロンティア領域等として提案する。

なお、Well-being に関連して、多様性社会的包摂や自己の理想を実現するといった社会課題に貢献するデジタル技術を十分に抽出することができなかった。今後、引き続き検討する。

以下、増補版で示す取り組むべきフロンティア領域等について述べる。

### (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)

今や多くの産業においてデジタル技術は不可欠な存在となっており、社会基盤の一つとしても位置づけられる存在である。その中でも特に、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るが、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ている。本領域に関するロジックモデル(MFT)で見た社会課題との関係を図 3-4-7 に示す。

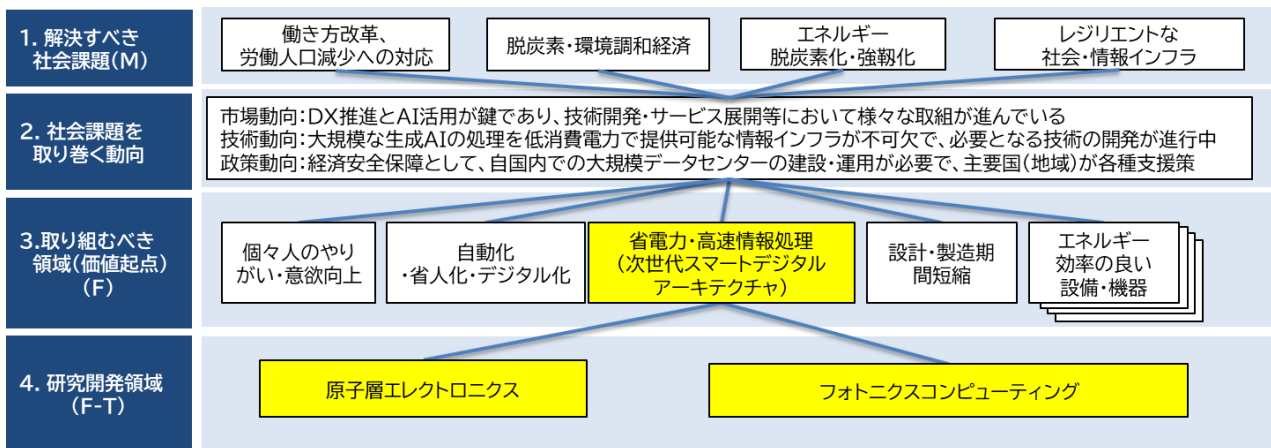


図 3-4-7 省電力・高速情報処理(次世代スマートデジタルアーキテクチャ): 原子層エレクトロニクス、フォトニクスコンピューティングの MF ロジックモデル

本領域の研究開発領域としては、今後、処理が指数関数的に増大すると予想される AI、特に生成 AI の処理方式を劇的に低減することを目的とした技術開発や社会実装に関わるものとし、2050 年のカーボンニュートラル実現に向けて電力需要を大幅に削減することを目指す。情報処理(コンピューティング)の技術構造は、「ハードウェア層」「システムソフトウェア層」「アプリケーション層」で構成され、個々のシステムは、「ネットワーク・インフラ」を介し連携される。そのため、削減目標達成に向けては、各技術構造において可能なアプローチを幅広く取り入れることが必要で、例えば、「システムソフトウェア層」「アプリケーション層」においては、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のみでなく、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 を動作可能な AI チップやシステムの開発が重要となる。一方「ハードウェア層」におけるアプローチとして、『原子層エレクトロニクス』の導入や、『フォトニクスコンピューティング』の実装が有用である。

## (i) 原子層エレクトロニクス

従来スケー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<sup>97</sup>。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、量産に耐えう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。

### ①将来性(成長性・社会課題)

- ・ 半導体産業の世界市場規模は2030年には1兆ドル以上への到達が予測され、引き続き高い将来性が期待されている。
- ・ 2037年頃に商用化されるA2技術世代から投入される新チャンネル材料候補として、IMEC(Interuniversity Microelectronics Centre)のロードマップ等において、明確に位置づけられている。

### ②技術・アイデアの革新性

- ・ 「原子層エレクトロニクス」は、従来スケーリング則の延長ではあるが、チャンネル材料を「原子層材料」に変更することにより、従来シリコンプロセスとの整合性も確保しつつ、新しい技術・アイデアを半導体製造プロセスへ昇華させて取り込む技術革新が不可欠である。

### ③日本の優位性

- ・ 日本は原子層物質研究における先駆者<sup>98</sup>。2011年以降の世界的な原子層エレクトロニクス研究の取組においてもアカデミア等による基礎的研究の蓄積がある。
- ・ 半導体デバイス生産に必要な電子材料・製造装置に関しては国内に有力事業者が存在するため、強みを活かした産業化が期待される。

### ④民間のみで取り組む困難性

- ・ 原子層物質の研究は、1980年代より日本が主導してきたところである一方、産業化技術への取組が遅れており、「技術の橋渡し部分」において国が積極的に関与する意義はある。
- ・ 『原子層エレクトロニクス』は、従来スケーリング則の延長であるがゆえに、従来シリコンプロセスとの整合性を確保する必要があるが、現状シリコンプロセスにとって、「原子層材料」は異物であり、既存のシリコン半導体ラインで扱うことにはリ

<sup>97</sup> <https://www.imec-int.com/en/articles/introducing-2d-material-based-devices-logic-scaling-roadmap> (2026年3月閲覧)

<sup>98</sup> <https://doi.org/10.11470/oubutsu1932.48.806> (2026年3月閲覧)

スクが大きい。別途検証用のラインが必要であり、民間企業としての先行投資額が巨大で困難である。

### ⑤重要経済安保技術

- ・ 『経済安全保障推進法』に基づき、「半導体」は、特定重要物質として指定され、国として安定供給確保を支援する対象とされている。

### (ii) フォトニクスコンピューティング

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。

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。フィジビリティスタディ(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。

#### ①将来性(成長性・社会課題)

- ・ AI・HPC・量子技術との融合が可能なフォトニクス技術は、基盤技術として新たなグローバル市場の創成が期待できる。
- ・ 「高速(光)並列演算」と「低消費電力」の特性により、飛躍的な省電力・高速情報処理を実現し、社会課題解決への大きな寄与が期待できる。

#### ②技術・アイデアの革新性

- ・ 『フォトニクスコンピューティング』の生成 AI への適用可能性は、これから検証する段階であり、実現できれば革新的である。

#### ③日本の優位性

- ・ 「シリコンフォトニクス技術」や「並列型光演算法」など、光の技術を用いた研究開発では、アカデミアも企業もトップクラスに位置している<sup>99</sup>。

<sup>99</sup> 国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター戦略プロポーザル「半導体デバイス革新に向けた材料開発戦略～2次元半導体材料の新規導入～」  
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2022/SP/CRDS-FY2022-SP-06.pdf> (2026 年 3 月閲覧)

- ・ 劇的に電力を下げられるアナログ方式の開発では、日本が得意とするすり合わせ的なアプローチが有用である。

#### ④民間のみで取り組む困難性

- ・ ハードウェア開発及びその大規模化には開発コストが大きく、リスクが高い。
- ・ 真の勝ち筋である固体デバイス化には、半導体製造ラインが必要で、試作生産環境が国内に未整備であり、投資判断に資する材料(研究開発成果)が少なく民間単独では取り組みにくい領域となっている

#### ⑤重要経済安保技術

- ・ 『経済安全保障に関する産業・技術基盤強化 アクションプラン改訂版』において「破壊的技術革新が進む領域」として次世代コンピューティングが取り上げられている。

## (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、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、自動化・省人化を実現する技術開発が必要となっている。さらに、生産性改革による既存産業の発展や新産業の創出には、従来測定できない領域や精度でのセンシングによるデジタル化とAIとの組合せが求められている。

本領域に関する M-F ロジックモデルで見た社会課題との関係を図 3-4-8 に示す。

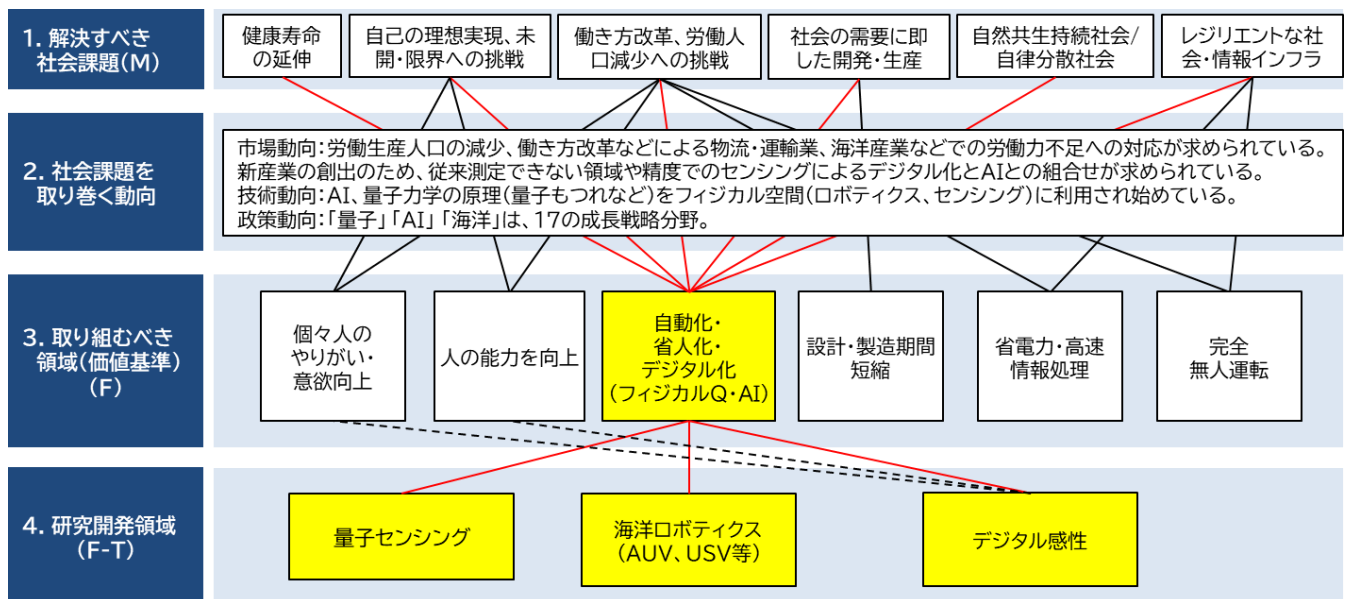


図 3-4-8 自動化・省人化・デジタル化(フィジカル空間への量子・AI 技術の適用(フィジカル Q・AI))  
：量子センシング、海洋ロボティクス、デジタル感性の M-F ロジックモデル

対象とする産業分野によって、取り組むべき課題も異なってくる。

増補版では、以下の 3 項目を抽出した。

- ・ 従来捉えきれなかった「物理的な微細変化」や「不可視の空間」を可視化する『量子センシング』
- ・ 海洋の特殊環境において、危険を伴う作業の省人化に貢献する『海洋ロボティクス』
- ・ 利用者の感性や価値観・共感性をデジタル技術によって捉え、支援・拡張する『デジタル感性』

増補版で抽出した取り組むべき領域について示す。

#### (i) 量子センシング

現在のデジタル IT 処理とその技術延長では達成困難な課題(組合せ最適化、量子化学計算、量子多体系計算など)がある。それに対し、量子コンピューティング領域を中心に活発な国家投資が主要各国で進められている。また、フィジカル空間への量子技術活用により、従来測定できない領域や精度での計測/診断ができるようになる量子センシ

ングが実用化され、生産性改革による既存産業の発達や環境インフラの精密計測に伴う新産業の創出が想定される。

### ①将来性(成長性・社会課題)

- 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。量子センシングの世界市場規模は、2040年には数千億~1兆円規模になるという観測もあり<sup>100</sup>、将来性が見込まれる。

### ②技術・アイデアの革新性

- 量子センシング技術は、製造産業・環境・医療などの分野における革新的な計測のみならず、コンピューティングや通信など他の量子技術にも波及する『量子の結節点』となり得る技術としての期待がかかる。

### ③日本の優位性

- 光格子時計は基礎研究面で世界に先行している。ダイヤモンド NVC などの格子欠陥やトポロジカル材料デバイス領域では、日本の得意分野である材料・デバイス技術が実用化のカギとなる。

### ④民間のみで取り組む困難性

- 量子センシングに用いられるデバイスの中には、量子効果を基にした設計スキルや製造手法の改良が必要なものがある。アカデミアを軸とした知識体系の形成が不可欠である。
- 量子センシングが必須な企業ニーズとアカデミアの量子シーズのマッチングに向けた活動が必要であるが、デバイス/素材/アプリの総合的な開発に向けた産業基盤構築には企業単独での活動は困難である。
- 量子効果の改良には、同位体濃縮など原子核の操作技術が必要な場合があり、原料提供可能な国の制限など、国家核戦略との密接なつながりが必要である。

### ⑤重要経済安保技術

- 経済産業省の『経済安全保障に関する産業・技術基盤強化 アクションプラン改訂案』において、下記の領域が取り上げられている。
  - 1)破壊的技術革新が進む領域として、「量子」が取り上げられている。

<sup>100</sup> Quantum Technology Monitor(McKinsey & Company, 2024)  
<https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/steady%20progress%20in%20approaching%20the%20quantum%20advantage/quantum-technology-monitor-april-2024.pdf> (2026年3月閲覧)

2) 産業支援策と産業防衛策を有機的に講じる「Run Faster(ランファスター)」戦略重点分野として「量子」が挙げられている。

- ・ 内閣府経済安全保障領域として「最先端な重要技術」の中に「量子技術」「先端センサー技術」が挙げられ、「社会や人の活動等がかかわる場としての領域」では海洋の航法やモニタリングなどにも「量子技術」が取り上げられている<sup>101</sup>。

## (ii) 海洋ロボティクス

自動化・省人化・デジタル化の領域におけるAIロボティクスの開発対象は、タスクと環境の複雑さに応じて、特殊環境自律ロボット、協調型多機能自律ロボット、熟練・専門 AI エージェントに大別できる。いずれも重要であるが、この中で、更なる官民の支援・投資が必要な特殊環境自律ロボットに焦点を当てた。

特に、人間にとって過酷な作業を伴う特殊環境下においては、AIロボティクス等の代替手段の導入が検討されている。とりわけ、日本は世界第6位の管轄海域を有する海洋国家であるが、その広大な海域の開発・利用に必要な人材(船員やダイバー)が不足している。このため、海洋産業においても、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。

### ① 将来性(成長性・社会課題)

- ・ AI・ロボット分野は、2050年の我が国の人口9500万人、GDP世界7位の予測<sup>102</sup>に由来する超人手不足時代に対抗する有力な技術分野である。
- ・ 海洋ロボティクスの世界市場規模は、2030年に約1兆円に達すると予測されている<sup>103</sup>。さらに、海底通信インフラや海洋エネルギー分野、水産業、海上輸送といった関連分野への波及効果も含めると、経済的インパクトは数兆円規模に拡大する可能性がある。

### ② 技術・アイデアの革新性

- ・ 海洋ロボティクスは、水圧や電波減衰といった海洋特有の制約下で機能することが求められる。自律化や海中作業への対応には、海中無線通信、自己位置推定、マ

<sup>101</sup> 内閣府/総合科学技術・イノベーション会議/重要技術領域ワーキンググループ(第5回)配布資料5経済安全保障上の重要技術領域について

<https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/kihon7/wg/5kai/shiryo5.pdf> (2026年3月閲覧)

<sup>102</sup> [https://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2023/pp2023\\_ReportALLc.pdf](https://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2023/pp2023_ReportALLc.pdf) (2026年3月閲覧)

[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/shin\\_kijiku/pdf/001\\_04\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/shin_kijiku/pdf/001_04_00.pdf) (2026年3月閲覧)

<sup>103</sup> 一般社団法人海洋産業研究・振興協会「海の次世代モビリティの市場規模と将来予測」

[https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/SeaMobilityPF/pdf/conference9/03\\_%E3%80%90%E8%B3%87%E6%96%99-](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/SeaMobilityPF/pdf/conference9/03_%E3%80%90%E8%B3%87%E6%96%99-)

[3%E3%80%91%E5%B8%82%E5%A0%B4%E8%A6%8F%E6%A8%A1%E3%81%A8%E5%B0%86%E6%9D%A5%E4%BA%88%E6%B8%AC.pdf](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/SeaMobilityPF/pdf/conference9/03_%E3%80%90%E8%B3%87%E6%96%99-3%E3%80%91%E5%B8%82%E5%A0%B4%E8%A6%8F%E6%A8%A1%E3%81%A8%E5%B0%86%E6%9D%A5%E4%BA%88%E6%B8%AC.pdf) (2026年3月閲覧)

ニシミュレーション、姿勢制御などの複合的かつ分野横断的な技術革新が不可欠である。

### ③日本の優位性

- ・ 海洋ロボティクス分野では、日本は AUV の隊列制御や音響通信などの研究技術において世界トップクラスの水準を有している。

### ④民間のみで取り組む困難性

- ・ 海洋ロボティクスでは、高信頼な機体開発に加え、実証に母船運用を要するなど事業化までのコスト負担が大きい。さらに、関連法規や漁業権への対応といった制度面の参入障壁も高く、自律運用の拡大には行政との連携が不可欠である。

### ⑤重要経済安保技術

- ・ 内閣府の『第 4 期海洋基本計画』では、経済安全保障に資する重要技術として、海洋ロボティクスや無人観測・センシング技術が位置づけられている。

## (iii) デジタル感性

デジタル感性とは、人間が外界を理解し、価値を見だし、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。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、効率性向上に寄与する一方で、多様性・個性・文化を奪う危険性を伴う。これに対して、個々の価値観・文化的背景・感じ方の違いを尊重しながら、AI やロボットが人間と共存・共進化する『デジタル感性』を活用すれば、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。

### ①将来性(成長性・社会課題)

- ・ 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 は、医療・自動車・顧客対応・マーケティング分野での市場拡大が予測されており<sup>104</sup>、自動化・省人化を効率化する上で重要な AI 基盤となると期待される。
- ・ データ駆動型の AI や自動化技術が社会に深く浸透する社会において、人間の価値判断・社会性・共感性を理解し、支援・拡張するためのデジタル感性は、自動化を単なる「人の代替」でなく、人とシステムの能力を互いに引き出す共進化の自動化へと転換する可能性をもつ。

<sup>104</sup> Latest Market Study on Affective Computing Market, DataM Intelligence, <https://www.newstrail.com/global-affective-computing-market-forecast-us-592-9b-by-2031/> (2026年3月閲覧)

## ②技術・アイデアの革新性

- ・ デジタル感性を実現するためには、視覚・聴覚に加えて触覚・嗅覚・味覚などの多感覚情報や、表情・心拍・脳波・動作などの非言語反応を計測する技術に加え、人間の感性反応のモデリング技術及び感情情報の生成・共有技術など、複合的かつ分野横断的な技術革新が求められる。
- ・ デジタル化された感性情報のデータベースや感性の AI モデル、個人の属性や状況に応じて感性反応を再現する技術は、個人の嗜好に合わせた製品開発の効率化や、サービスの高付加価値化、ユーザビリティ評価の効率化に寄与する。
- ・ 視覚・聴覚中心の情報通信を超え、身体的な触覚や運動体験、更には味覚・嗅覚など、本人しか理解・体験できない感性情報をデジタル化、再現する技術は、「情報共有」から「体験共有」へのパラダイムシフトを生み出す。

## ③日本の優位性

- ・ 感性工学は日本発祥であり商品開発やマーケティングに応用されてきた。質感の科学についても視覚、触覚などの分野で多くの有力研究者が存在する<sup>105</sup>。日本は消費者の要求水準も高く、感性・品質にこだわった製品・サービスに対して海外と差別化できる土壌がある。
- ・ 欧米では、AI による感情情報の取り扱いには、プライバシー配慮や倫理的側面から規制強化が進む一方、日本では、認知発達ロボティクスにおけるパートナーロボットやアバターロボットなど、身体性を伴う個人の感性を社会性の基盤として捉えており、先駆的な取組を行う研究者が多い<sup>106</sup>。また、多感覚情報に基づく質感科学の研究が進んでいる。

## ④民間のみで取り組む困難性

- ・ 感性情報に関する先端の計測、提示技術はアカデミアが中心である。一方、AI 化のための大規模データセット、学習環境には民間企業のデータの共有やプラットフォーム化が必要となる。また、プライバシー配慮のガイドラインの整備が必要である。

## ⑤重要経済安保技術

- ・ 経済産業省の『経済安全保障に関する産業・技術基盤強化 アクションプラン改訂案』において、下記の領域が取り上げられている。  
1)破壊的技術革新が進む領域として、AI-生成 AI がこれからの革新の核技術と

<sup>105</sup> Shitsukan—Understanding and Manipulating Material and Quality Perception (Shin'ya Nishida, Ko Nishino, Springer Nature, 2026)  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-95-4762-3> (2026年3月閲覧)

<sup>106</sup> 研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野～領域別動向編～(2006年), 人工知能(AI), 人間知能の理解(国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター, 2026)  
<https://doi.org/10.82643/crds-fr-s-ai-uhi> (2026年3月閲覧)

なっている。

2)我が国が技術優位性をもつ領域として、工業機械・産業用ロボット(製造業)があり、生成 AI による更なる強化が強く求められている。

### 3-4-5 取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例

優先的に取り組むべき領域について、それぞれの具体的な手段を記載する。

#### (1) 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)

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、物理リザーブ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、IMEC(Interuniversity Microelectronics Centre)のロードマップにおいては、2037年頃商用化予測の IMEC A2 技術世代とされており、主要な先端半導体製造企業も同様である。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。PN 制御含むドーピング、コンタクト、ゲートスタック等に関するラボレベルの研究は数多いが、量産に耐えう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。

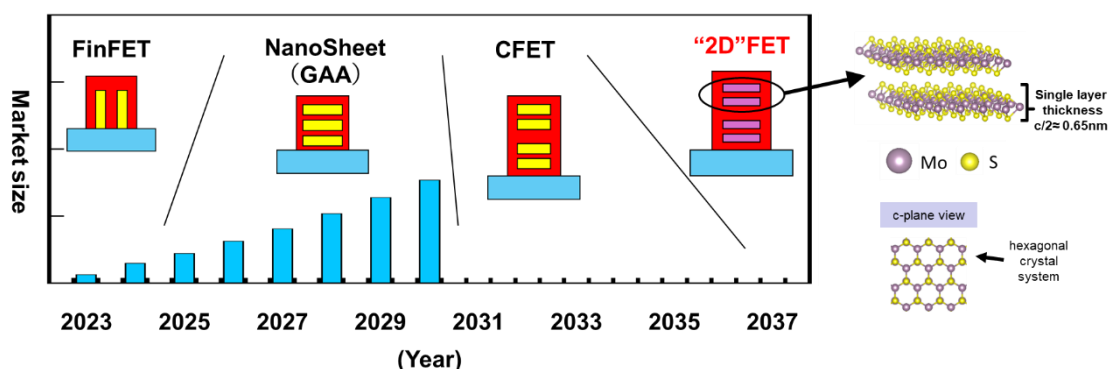


図 3-4-9 技術ロードマップ上の原子層エレクトロニクス(“2D”FET)の位置づけ

出所:IMEC ロードマップ等を基に NEDO TSC 作成

## (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。

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。フィジビリティスタディフェーズとしては、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(大規模言語モデル)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。

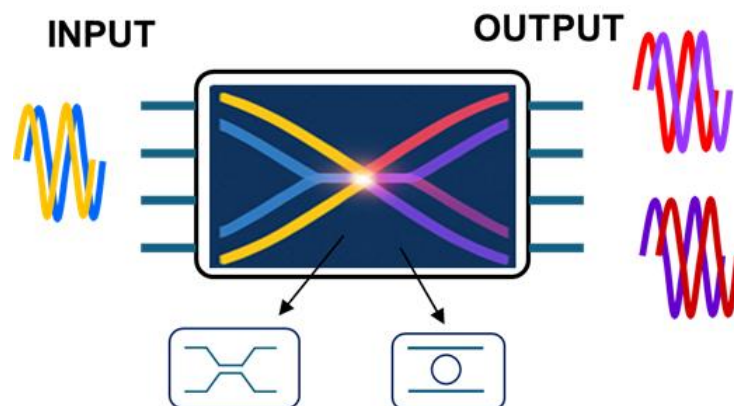


図 3-4-10 光演算素子の概念図

## (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 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、日本の世界第 6 位の管轄海域を有する海洋国家という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 であるデジタル感性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、表 3-4-9 に示すような様々な手法が挙げられ、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て、データ生成技術の中核技術であり、「未来の感覚器官」として機能することが期待されている。センシング技術により、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に寄与すると考えられる。現状、量子センシングには、環境ノイズへの脆弱性、装置が大型・高価であるなどの課題があるものの、外乱抑制、補償技術、センサー機能を有するダイヤモンドNVCなど様々な結晶欠陥や、トポロジカル材料の製造、制御技術の進展による機能向上と汎用性の獲得による普及が期待されている。

中でも、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。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 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。これら、光格子時計・原子時計やダイヤモンド等 NV センター(NVC)は、コンピューティングや通信など他の量子技術にも波及する「量子の結節点」となり得る技術として重要である。

量子センシングの産業化を加速するためには、光格子時計・原子時計及びダイヤモンド等 NVC の領域において社会実装につながる研究開発が必要である。

光格子時計・原子時計は、18 桁精度かつ 250 リットルの装置容量が実現されている。今後は、通信におけるタイムスタンプなど高精度な時間標準の形成や地殻変動・資源調査などきめ細かな観測を行うため、多地点への機器設置や装置移動中計測のニーズに対応する必要がある。そのためには、現状の高い時間計測精度を維持しつつ、移動中計測も可能にする外乱抑制、補償技術や、可搬性をより高める小型軽量化、低コスト化につながる光学系、原子制御系及び光源などの光学デバイスの開発が求められる。

ダイヤモンド等 NVC の結晶欠陥を用いた固体量子センサーは、常温常圧動作できることにより、半導体の非破壊不良解析など多くの産業分野での利用が考えられている(図 3-4-11)が、広く産業分野に浸透させるためには、高品質 NVC の安価供給や制御計測装置の汎用化を実現していく必要がある。そのためには、現状達成されている以上の高感度かつ高分解能なセンシングが可能になるよう、ダイヤモンド等 NVC の位置等の結晶欠陥構造制御性の大幅な向上、高品質な NVC の生産技術、センサーの低コスト化に寄与する材料合成及び加工技術が求められる。また、センサー運用性に優れたデバイスの新規構造や、様々な計測手法のデバイス集積化につながる技術開発が求められる。

表 3-4-9 量子センシング技術例

比較指標	光格子時計・原子時計	量子慣性センサー	光ポンピング磁気センサー(OPM)	ダイヤモンド等 NVC 結晶欠陥量子	トンネル量子磁気センサー (TMR)	光量子もつれ	超偏極MRI
将来性	位置情報の精度向上、通信・電力で社会意義が大。量子コンピュータへ技術波及あり	慣性航法が主用途。競合技術(MEMS)が同程度の感度表現	脳磁計、防衛などの用途が期待される。市場性はやや弱い。	常温常圧動作により、産業・医療検査など、利用範囲広い。量子コンピュータ/通信へ波及効果あり	磁気メモリ、インフラ検査、防衛など用途が幅広い。量子産に向けた技術でもある	汎用光源を用いた広域分光評価が可能で、機器の小型化など幅広い用途が想定。量子コンピュータ/通信へ波及効果あり	次世代MRIでのブレイクスルーと目され、欧米企業が投資。医療向けが主で波及性には難あり
技術・アイデアの革新性	精度、安定度に優れた次世代時間標準化	衛星非依存のナビゲーション技術	磁場電磁波の小型高感度センシング	室温動作固体量子素子として利用可能	特異な電子構造材料とデバイス化	非線形光学現象の積極的な利用	室温長時間安定な超偏極材料開拓
日本の優位性(競合国対比)	国内研究発祥で、理論と技術が先行しており優位性が高い	海外は防衛用途で開発加速	日本:大企業が参画 欧米:SU主体も国家支援あり	企業含め研究層が厚く、材料技術で優位	材料・デバイス研究者、企業が複数存在	量子もつれ光源を用いた生体計測などが先行	医療応用で材料優位も、機器は海外のみ
民間のみで取り組む困難性	光学系が複雑で小型可搬化困難	用途が限定的	精度は良いが、実装密度が低く、用途が限定	素材、デバイス化制御に新技術が必要 安定同位体不可欠	—	現状用途が限定的で、既存機器優位性が不十分	安定同位体利用が不可欠
重要経済安保技術ほか	原子制御など量子コンピュータ技術に波及	宇宙、海洋など非GPS領域での利用	—	量子計算、量子通信など用途が幅広い	HDD等で社会実装された技術のため、フロンティア性薄い	量子通信への応用が各国で進行	—



図 3-4-11 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

日本は世界第6位の管轄海域を有する海洋国家である一方、その広大な海域の開発・利用を支える人材(船員やダイバー等)の不足が顕在化している。このため、省人化や生産性向上、労働環境の改善、安全性向上を図る手段として、AUVをはじめとする海洋ロボティクスの活用が強く求められている。

例えば、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(図 3-4-12)。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 CO<sub>2</sub>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、人件費や傭船料のコストの課題が存在する。これらの課題は、洋上風力発電施設をはじめとする海洋インフラの保守点検や、海洋資源調査をはじめとする広範な海域での海洋データ収集(海の見える化)など、AUV の多くの活用先において共通するものであるから、これらの課題解決に資する省人化技術の確立が急務である。

これまで、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)や、経済安全保障重要技術育成プログラム(K Program)による無人航空機を用いた AUV の運搬技術等により、海洋ロボティクスの省人化技術に関して一定の成果が得られている。しかしながら、産業用途(水深~2,000m に対応)を見据えた場合、より低コストで効率的な運用を実現するためには新たな省人化技術の確立が不可欠である。例えば小型 USV を用いて小型 AUV を運搬するなどの技術により有人母船レス運用を実現することが求められる。

有人母船レス運用の場合、AUV と接続した USV や AUV 自体が障害物の多い港湾内から外洋まで長距離を自律航行すること、AUV が高精度に自己位置を推定すること、USV と AUV の接続・分離(ドッキングや曳索接続を含む)を正確に行うこと、更に目的海域で海洋ロボティクスが長時間活動することなど、複数の課題が存在する。自律航行を実現するためには、海上・海中の障害物認識と回避や、AUV と USV の協調制御に関する技術開発が必要となる。また、AUV/USV 接続・分離には、相互位置の高精度特定や姿勢制御技術が求められる。さらに、長時間の活動を可能にするためには、例えば USV をターミナルとした AUV の充電・データ転送技術の確立が必要である。くわえて、海洋ロボティクスによる水中作業を実施するためには、目標物の認識・操作(マニピュレーション)技術や姿勢制御技術が必要となる。

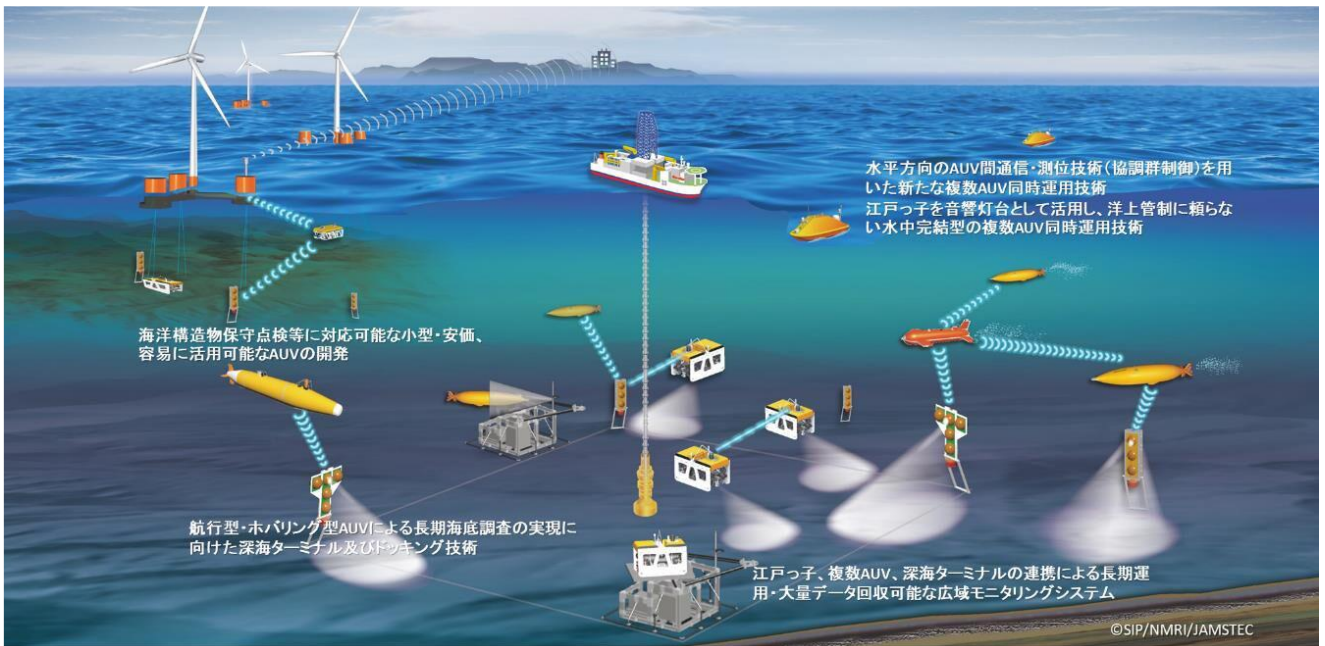


図 3-4-12 海洋ロボティクス技術の開発例<sup>107</sup>

<sup>107</sup> 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](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、価値を見だし、他者や社会との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。

人間の感性は、単なる主観的感情ではなく、

- ・ 外界を「意味あるもの」として解釈する価値判断の仕組み
- ・ 他者の感情や意図を理解し、社会性や協調を形成する仕組み
- ・ 快・不快などの情動を通じて心身の健全性を保つ仕組み

といった、人間の行動・判断・社会形成を根底から支える機能的システムである。データ駆動型の AI や自動化技術が社会に深く浸透するなかで、人間一人ひとりの価値観・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概念として位置づけられる。とくに、平均化や最適化を指向する従来のデジタル技術だけでは見落とされがちな、

- ・「なぜそれを大切だと感じるのか」
- ・「どのような表現が心地よいのか」
- ・「どのような関わり方が人として適切なのか」

といった問いに対し、構造的かつ説明可能な形で応答するための枠組みがデジタル感性である。市場動向では、世界では医療・自動車・顧客対応・マーケティングなどでの導入が進むと見込まれている。製造業の強い日本では、技能伝承など職人の細やかな感性や暗黙知の理解にも感性 AI の活用が期待される。また、感性 AI は、個人の感性を引き出すための教師エージェントなど、個人の能力やウェルビーイング向上にも寄与すると期待される。

このような『デジタル感性』を実現する手段として、例えば以下のような技術開発が必要となる。

- ・感性に関わる視覚・聴覚・触覚・嗅覚・味覚などのマルチモーダル情報、非言語反応の計測技術
- ・人間の属性や経験、文化的背景、環境、状況などに基づいて感性反応を予測する感性モデリング技術
- ・感性情報を安全に取り扱うための機械学習・AI モデル
- ・感性を刺激する質感レベルまで忠実に再現するディスプレイ
- ・リアルタイムに感性を推定しながら、人間とインタラクションする技術

以下、具体的研究手段の詳細を説明する。

感性のデジタル化を実現する一つの方法は、近年の生成 AI で利用される大規模言語モデル(LLM)と画像・音声などのマルチモーダル情報を組み合わせた抽象表現学習のフレームワークを取り入れることである。ただし、感性情報を AI に理解させるためには、画像・音声に加えて、触覚・嗅覚・味覚などの感覚情報や、声色・心拍・脳波・表情・行動といった非言語反応と紐づけたデータセットを用意し、学習モデルを構築する必要がある(図 3-4-13)。さらに、個人の嗜好や個性に対応するためには、個人の属性や経験、文

化的背景、メンタル状況、体調、環境や文脈を紐づけたデータを取得することが望ましい。また、熟練者の技能に関する感性など、特定タスクに関するデジタル感性を実現するためには、作業の状況や作業者の意図・注意、作業のパフォーマンスなど、より総合的なデータを蓄積するためのプラットフォームが必要となる。

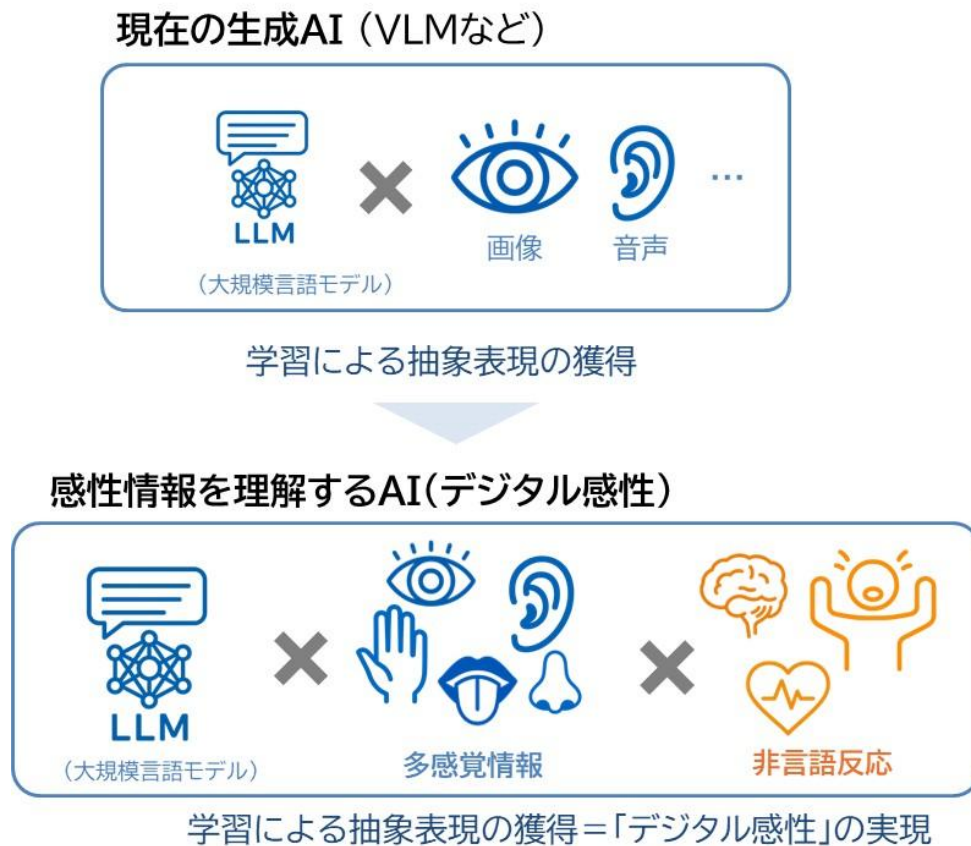


図 3-4-13 現在の生成 AI と感性情報を理解する AI(デジタル感性)の構成の比較

感性情報のセンシングに関しては、これまで画像・音声を利用した情動推定技術が開発されており、カスタマーサポートや医療診断、自動運転支援への活用が期待されている。今後のフロンティア領域等として、従来デジタル化が難しかった触覚、嗅覚、味覚、運動感覚といった新たなモダリティの計測技術が求められる。また、情動や注意喚起などの非言語反応の計測も有効な手段となる。心拍、脳波、発汗などの生理信号や注視点や行動の変化など前後の文脈も含めたデータ取得が求められるが、感性に直接関係しないノイズデータも増えることから、大量のデータの中から良質なデータを選別する技術が必須となる。さらに、大規模データを取得するためには、日常生活をウェアラブルデバイスや環境設置型の非接触センサーで感性情報を手軽にロギングする技術の研究開発も求められる。

人間の感性反応を予測するモデルに関しては、これまで感性工学分野を中心に感性評価語やオノマトペを利用した感性分析が行われており、今後は、大規模言語モデルと

の統合が期待される。また、感性モデルの基盤として、心理学における自由エネルギー理論や、予測誤差最小化に価値判断や意味理解に着目した研究が行われている。認知発達ロボティクスの分野では、感性反応に他者との関係といった社会的相互作用を通じた意味の獲得プロセスを構成論的に実証する試みが行われている。また、神経科学の知見をもとに、人間の脳の内部表現と行動に整合した AI モデルを構築することにより、AI の説明可能性を高めた AI の行動・判断の価値整合 (AI アライメント) を実現しようとする試みがある。感性 AI や感性モデリングでは、欧米を中心に倫理的側面から規制が強化されており、安全運用のための説明可能性や出力の安定性、AI アライメントが実運用では重要な技術となる。

さらに、感性情報をデジタル化し、それを人工的に再現し、共有する技術は、これまでの視覚や聴覚中心の情報通信から、触覚や味覚・嗅覚など自らの身体を介した「体験」を共有する新しい情報通信のパラダイムを切り開く可能性がある。感性に訴える質感レベルの多感覚情報を再現する技術は、「質感」の研究として、JSPS 学術変革領域「深奥質感」などで、脳科学・心理学・工学・情報科学の融合研究として実施されてきた実績がある<sup>108</sup>。感性モデルとディスプレイ技術を統合し、デジタル空間で任意の感性体験を生成できるようになれば、より付加価値の高い製品設計や視聴だけでは伝えることが難しい技能や体験の魅力を手軽に伝えることができると期待される。

<sup>108</sup> JSPS 学術変革領域研究(A)「実世界の奥深い質感情報の分析と生成」研究概要  
[https://shitsukan.jp/deep/?page\\_id=15](https://shitsukan.jp/deep/?page_id=15) (2026年3月閲覧)

## コラム 注目技術 2 情報セキュリティ

### (1) 技術の概要

- AI 自律防御: ネットワークやシステムへの攻撃を自動で検知・分析し、必要に応じて自律的に防御策を講じる AI エージェント技術や、自律的に動作する AI エージェントが、自らを防御する技術
- ディープフェイク検出 AI: AI によって生成された偽・誤情報を対策する技術
- 秘密計算: データを暗号化したまま計算することができる技術

### (2) 注目する理由

- 生成 AI の出現により、サイバー攻撃の容易化、手口の巧妙化が進んでいる。くわえて、生成 AI に不正プロンプトが注入されると、予期せぬ AI の動作が誘発され、社内の秘密データ等が流出する可能性も出てきている。これらに対抗するために、AI エージェントにより自律的にサイバー防御する技術や、自律型の AI エージェントが自らを防御する技術が注目されている。
- 生成 AI を利用することにより様々な本物そっくりのディープフェイク(文章、画像、動画)が、誰でも容易に作成できるようになっており、それによる詐欺(含むフィッシング)が増加している。このディープフェイクを見破る AI 技術として、ディープフェイク検出 AI が期待されている。
- 大規模 AI 基盤モデルを学習させるには、多量のデータが必要となる。このため、個社の壁を越えて、業界全体でデータを共有しあい、基盤モデルの学習を行う必要がある。その一方、各社のデータには、自社のノウハウを守るために、他社には公開しにくいという課題があった。この課題を解決するために、データを暗号化したまま学習に使用する秘密計算(秘匿計算)が注目されている。

## 3-5 マテリアル分野

### コラム 注目技術 3 次世代冷却(磁気冷却)

#### (1) 技術の概要

磁気冷却は、磁性材料に磁場を印加または除去した際に生じる磁気熱量効果を利用した冷却技術である。磁場印加時には磁性体内部の磁気モーメントが整列し、磁気エントロピーが減少することで断熱条件下において温度が上昇する。一方、磁場を除去すると磁気モーメントの配列が乱れ、エントロピーが増加し温度が低下する。この可逆的な温度変化を熱交換過程と組み合わせて周期的に駆動することで冷却作用が得られる。

磁気冷却は方式により 20K 級の水素液化から、10mK 級の極低温域まで適用可能である。また磁気冷却は、希釈冷凍機では必要かつ供給懸念が存在するヘリウム3資源に依存しない極低温技術としても注目されている。

従来の蒸気圧縮式冷却は室温域などで広く用いられる一方、低温域では多段化などの特殊構成を要しエネルギー効率が低下する。これに対して磁気冷却は、極低温域で適用可能なこと、極低温域でも高いエネルギー効率を有している。また断熱消磁冷凍機 ADR は希釈冷凍機と比較した場合にロバストな運用が可能であり、宇宙機器や量子技術向けの冷凍機として希釈冷凍機を代替・補完する技術として期待される。

#### (2) 注目する理由

磁気冷却が注目される理由としては、極低温環境下で高効率な冷却が可能なこと、希少資源であるヘリウム3に依存しないこと、小型・ロバスト性による適用範囲の拡大が期待できることなどが挙げられる。省エネルギー性と持続可能性の面からも次世代の極低温技術として期待ができる。

国内外での注目動向としては下記の項目がある。

- (i) JST 未来社会創造事業にて物質材料研究機構らのグループが 2022 年に世界初の能動的蓄冷式磁気冷却による水素液化に成功したこと。
- (ii) 欧州 Horizon Europe の枠組みで複数の磁気冷却に関する研究プロジェクトが進行中なこと。
- (iii) 超低温を必要とする量子技術・超伝導検出器・宇宙機器・水素液化など先端分野の社会需要が近年高まっていること。

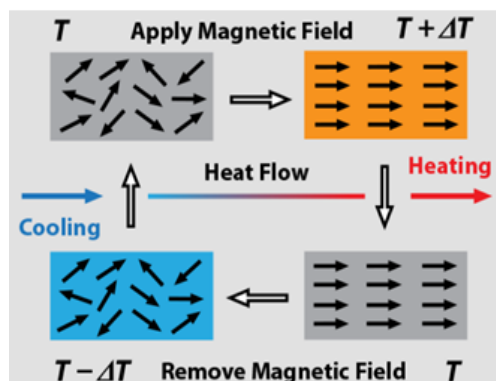


図 磁気冷却の概念図

出所:<https://access-inc.com/the-future-of-air-conditioning/>

## コラム 注目技術 4 触媒(ナノザイム)

### (1) 技術の概要

ナノザイムは、貴金属、炭素系素材、酸化物などをナノ粒子化して表面活性を高めて人工酵素とする技術。高安定・低コスト・大量生産が特徴で、適用用途によっては天然酵素の限界を超える強みがある。

#### 【ナノザイムの特性】

- ・酵素様活性:酸化還元反応や分解反応など、天然酵素が行う反応を模倣。
- ・高い安定性:天然酵素は温度や pH に弱い、ナノザイムは比較的安定。
- ・低コスト・大量生産可能:天然酵素より低コストに合成しやすく、量産性が高い。
- ・多機能性:触媒活性だけでなく、診断・治療・環境浄化など幅広い応用。

#### 【代表的な種類】

- ・金属酸化物ナノザイム(例:Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>ナノ粒子 → ペルオキシダーゼ様活性)
- ・金属ナノ粒子ナノザイム(例:Pt, Au → 酸化還元反応)
- ・カーボン系ナノザイム(例:グラフェンベース)

#### 【適用分野】

- ・バイオセンサー(血糖値測定など)
- ・がん治療(活性酸素生成による腫瘍破壊)
- ・環境浄化(有害物質分解)抗菌・抗ウイルス材料
- ・感染症の即時診断
- ・食品・農業分野のセンシング など

### (2) 注目する理由

ナノザイムは無機・ナノ材料が酵素様活性を示す人工酵素である。天然酵素に比べ、熱や pH に強く長期保存が可能で、低コストかつ大量生産しやすい点が注目されている。医療診断、がん治療、抗菌材料、環境浄化、バイオセンサーなど幅広い分野での応用が期待されている。

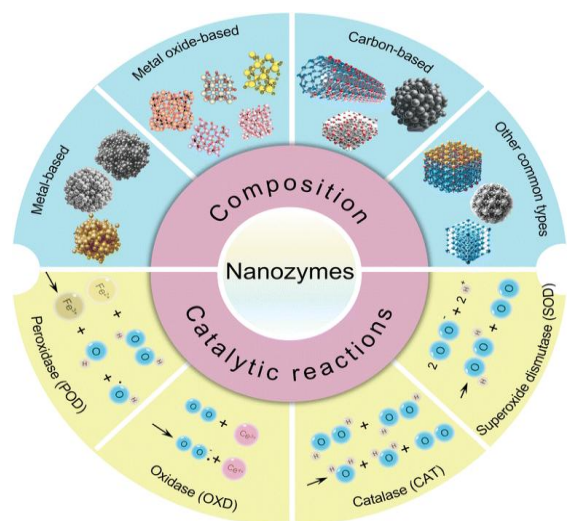


図 ナノザイムの分類例

出所:L. Liu et al., RSC Advances, 2024 /CC BY NC 3.0

<https://doi.org/10.1039/D4RA07303G>

## 3-6 バイオエコノミー分野

### 3-6-1 分野の俯瞰

バイオエコノミー分野全体を俯瞰すると、下記の図のとおり整理できる。

図 3-6-1 は市場・製品の視点からの俯瞰であり、対象市場が極めて多様であること、及び多くの社会課題の解決に関係することを示す。図 3-6-2 は技術の視点からの俯瞰であり、対象となる技術の多様性を示している。

くわえて、後述のとおり、バイオテクノロジー関連技術は、基礎科学研究の成果であっても短期間で破壊的イノベーションへと展開し得る潜在力を有する。なお、バイオエコノミーを構成する要素技術はバイオテクノロジーに限らず、デジタル技術、化学、工学、電子・電気工学等の周辺分野も含まれるため、研究開発の高度化・効率化や産業化の推進には、これら複合領域の知見が重要となる。

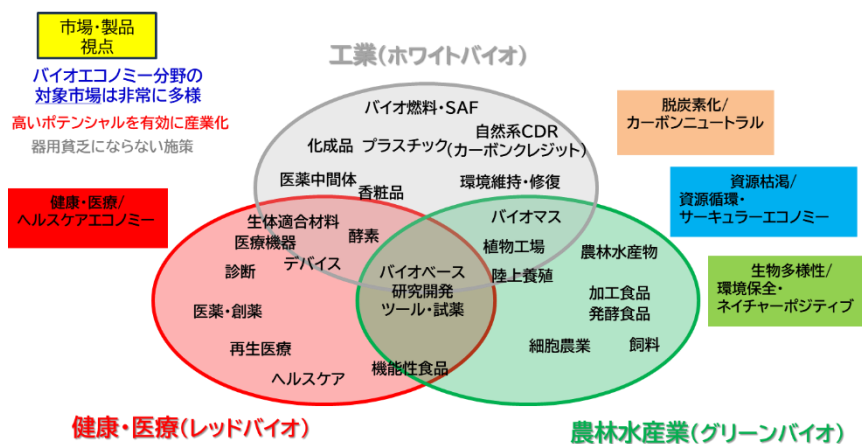


図 3-6-1 バイオエコノミー分野の俯瞰図(市場・製品視点)

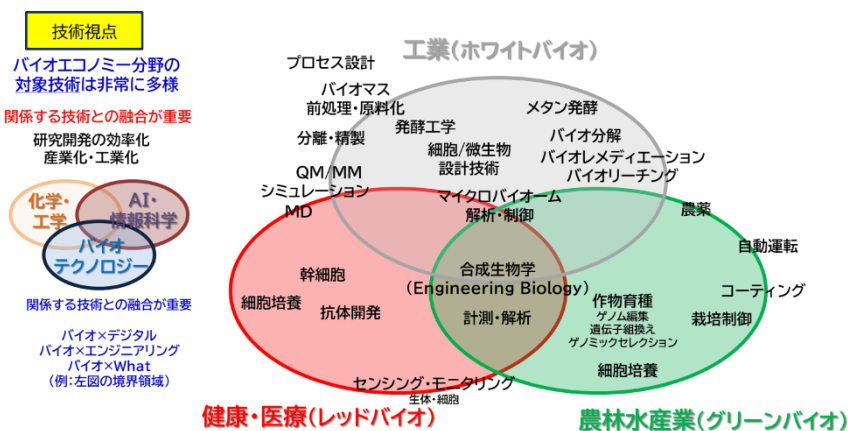


図 3-6-2 バイオエコノミー分野の俯瞰図(技術視点)

本増補版では、バイオエコノミーの広範さを踏まえつつ、社会的緊急性と我が国の競争優位性の観点から、とりわけヘルスケアエコノミーに着目し、分析を進める。

なお、バイオエコノミー分野において、Innovation Outlook Version 1.0 で提案した『化石原料から再生可能原料への転換』領域に関連して、「地域特有の再生可能資源を基盤とした循環型バイオ産業」については、別途コラムで述べる。

### 3-6-2 解決すべき社会課題(M)

日本が先行して直面する超高齢社会を踏まえ、Innovation Outlook Version 1.0 では、解決すべき社会課題(M)の一つとして、ヘルスケアエコノミー(HE)を設定した。ヘルスケアエコノミーにおける社会課題に関する我が国の主な目標は、以下のとおりである。

- ヘルスケアエコノミー(HE)の実現

(健康・医療戦略(第2期)<sup>109</sup>:2040年までに健康寿命を男女とも75歳以上へ／  
健康・医療戦略(第3期)<sup>110</sup>:平均寿命の伸びを上回る健康寿命の延伸)

ヘルスケアエコノミーの実現においては、高齢化の進展を背景に、健康寿命の延伸と公的保険外のヘルスケアサービス産業の拡大が政策課題として位置づけられている。従来の「治療中心」から「予防・健康増進中心」への転換<sup>111</sup>を通じて、QOL向上と社会保障費の最適化を両立する持続可能なヘルスケアシステムの構築が不可欠である。生体情報とデジタル技術を活用し、生活習慣に寄り添った解決策を提供することは、ウェルビーイングの向上を通じて経済成長をけん引し得る。次節以降では、この観点からヘルスケアエコノミーを重点的に検討する。

<sup>109</sup> 健康・医療戦略(第2期)(令和2年3月27日閣議決定)

<https://www.cas.go.jp/jp/seisakukaigi/kenkouiryou/senryaku/index.html> (2026年3月閲覧)

<sup>110</sup> 健康・医療戦略(第3期)(令和7年2月18日閣議決定)

<https://www.cas.go.jp/jp/seisakukaigi/kenkouiryou/senryaku/index.html> (2026年3月閲覧)

<sup>111</sup> 健康日本21(第三次)(厚生労働省)

[https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou\\_iryou/kenkou/kenkounippon21\\_00006.html](https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryou/kenkou/kenkounippon21_00006.html) (2026年3月閲覧)

### 3-6-3 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向

本節ではバイオエコノミー分野全体の動向を俯瞰し、後節で焦点化するヘルスケアエコノミー(予防・健康増進)を見据えた観点から、要点を整理する。

#### (1) 市場動向

表 3-6-1 我が国のバイオエコノミー戦略の 5 つの市場領域ロードマップ

市場領域	2018年時点	2030年(目標)
<b>バイオものづくり・バイオ由来製品</b>	合計 32.5兆円	合計 53.3兆円
高機能バイオ素材・バイオプラスチック (バイオ生産システムを含む)	23.1兆円	41.4兆円
有機廃棄物・有機排水処理	7.7兆円	8.1兆円
バイオ関連分析・測定・実験システム	1.7兆円	3.8兆円
<b>持続的・一次生産システム</b>	3.6兆円 (国内 0.3兆円) (海外 3.3兆円)	14.9兆円 (国内 1.7兆円) (海外 13.2兆円)
<b>木材活用大型建築・スマート林業</b>	国内 0.5兆円	国内 1兆円
<b>バイオ医薬品・再生医療・ 細胞治療・遺伝子治療関連産業</b>	2020年時点 26.6兆円 (国内 1.5兆円) (海外 25.1兆円)	2030年(目標) 58.6兆円 (国内 3.3兆円) (海外 55.3兆円)
<b>生活習慣改善ヘルスケア、デジタルヘルス</b>	2016年時点 25兆円	2030年(目標) 39.1兆円

我が国の『バイオエコノミー戦略』<sup>112</sup>では 5 つの重点市場領域が設定され、現状と 2030 年目標を整理すると表 3-6-1 のとおりであり、ヘルスケアエコノミーを含むバイオエコノミー分野は国内外市場を見据えた成長分野として期待される。同分野では、予防・健康増進の重要性の高まりを背景に、ウェアラブルによるリアルタイム生体データ取得、クラウドによるデータ連携、AI による疾病リスク分析の高度化等、デジタル投資が急速に進展している。企業と自治体の連携による新サービス創出も加速している。例として、血糖値モニタリング用ウェアラブルの世界市場は、2023 年 652 億米ドルから 2032 年 1,629 億米ドルへ成長する予測がある<sup>113</sup>。

このように、ヘルスケア市場は「治療」から「予防・健康増進」中心へ構造転換が進み、デジタル基盤の産業横断型エコシステムが形成されつつある。

<sup>112</sup> バイオエコノミー戦略(令和 6 年 6 月 3 日 統合イノベーション戦略推進会議決定)  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/index.html> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>113</sup> WiseGuy Reports, Diabetes Wearables Market Report, 2025.  
<https://www.wiseguyreports.com/ja/reports/diabetes-wearables-market> (2026 年 3 月閲覧)

## (2) 技術動向

本分野の技術は多岐にわたるため、詳細は後述のフロンティア領域で検討する。本項では、技術トレンドを大局的に捉える。

### (i) ノーベル賞に見る研究ツール～社会実装の加速化

生体高分子の同定・解析(2002年 化学賞)、緑色蛍光タンパク質(2008年 化学賞)、クライオ電子顕微鏡(2017年 化学賞)、指向性進化(2018年 化学賞)等は、研究開発を飛躍的に効率化した好例であり、基礎から産業利用・社会実装への橋渡しを加速させた。近年は、ゲノム編集(2020年 化学賞)、mRNA ワクチン(2023年 生理学・医学賞)、タンパク質構造予測 AI(2024年 化学賞)等、発見から標準化・産業化までの時間短縮が際立つ。基礎研究であっても短期間で破壊的イノベーションへ至り得る点は、フロンティア検討の重要な視点である。

### (ii) 世界各国・機関の戦略に見る重点技術

世界各国の戦略文書では、AI・量子と並び、「バイオテクノロジー」が重点分野として位置づけられる(表 3-6-2)。米国の『Critical and Emerging Technologies』(2024年)、英国の『Engineering Biology』(2023年)、中国の『第14次五か年計画』(2021年)における「遺伝子・バイオテクノロジー」等が代表例である。NATO や CFG 等の国際機関でも「バイオ」「ニューロテクノロジー」「人間拡張」が重要技術として挙げられている(表 3-6-3)。共通キーワードとしては、「合成生物学」「バイオものづくり」「センサー・センシング」が広く見られ、ほかには、「生物・非生物相互作用」「ブレインテック」等もフロンティア領域の候補になり得ると考えられる。

表 3-6-2 各国政府が公表しているエマージングテクノロジー(バイオ関連)

発行国	戦略文書	エマージングテクノロジー (バイオ関連) の対象
米国	CETsの最新リスト (2024/2)	<b>バイオテクノロジー</b> ・核酸、ゲノム、エピゲノム、タンパク質の合成・工学を含む新しい合成生物学 (設計ツールを含む) ・マルチオミクス、その他の生体計測学、生物情報学、計算生物学、予測モデリング、機能表現型の分析ツール ・細胞内システム、多細胞システム、マルチスケール・システムのエンジニアリング ・無細胞システムと技術 ・ウイルス及びウイルス送達システムの工学 ・生物/非生物インターフェイス ・バイオものづくりとバイオプロセス技術
中国	第14次五年計画 (2021/3)	<b>バイオメディカル</b> <b>遺伝子とバイオテクノロジー</b> ・ゲノム学研究の応用、遺伝細胞と遺伝育種、合成生物学、バイオ医薬品等の技術のイノベーション ・ワクチン、体外診断、抗体医薬品等の研究開発 ・農作物、家畜・家禽・水産、農業用微生物等の重大新品種の開発 ・バイオセーフティ重要技術の研究
イギリス	英国科学技術フレームワーク (2023/3)	エンジニアリング・バイオロジー
ドイツ	ホワイトペーパー技術主権 (2021)	バイオテクノロジー
フランス	フランス2030 (2021/10)	バイオ燃料 バイオセラピー・革新的療法のバイオ製品 ヘルステック 新興感染症・核放射線生物・化学的脅威
韓国	12大国家戦略技術 (2022/10)	<b>先端バイオテクノロジー</b> ・合成生物学 ・感染症ワクチン・治療 ・遺伝子・細胞治療 ・デジタルヘルスデータ分析・活用

表 3-6-3 国際機関が公表しているエマージングテクノロジー(バイオ関連)

発行機関	戦略文書	エマージングテクノロジー (バイオ関連) の対象
NATO (North Atlantic Treaty Organization)	科学技術のトレンド 2020-2040 (2020/3)	<b>バイオテクノロジーと人間の強化</b> ・バイオインフォマティクスとバイオセンサ ・人間拡張 ・医療対策とバイオ医療技術 ・合成生物学
CFG (Center Future Generations)	今すぐ行動すべき 5つのエマージングテクノロジー (2024/3)	ニューロテクノロジー バイオテクノロジー
WEF (World Economic Forum)	2024年のトップ10 エマージングテクノロジー (2024/6)	移植のためのゲノミクス

これらの潮流は、生命現象の多面的で精緻な理解と制御に向けた基盤整備が急速に進むことを示しており、その影響はヘルスケア全般に波及している。近年は、遺伝要因に加え、代謝・腸内菌叢・生活習慣等の統合的管理が重視され、「精密栄養(Precision Nutrition)」関連の技術革新に期待が高まっている。

### (3) 政策動向

バイオエコノミーの定義・範囲は国際的に統一されておらず、世界各国は自国の定義と戦略を策定し、取組を加速している。我が国では 2024 年 6 月に『バイオエコノミー戦略』<sup>114</sup>を公表し、5 つの重点市場(バイオものづくり・バイオ由来製品、持続的・一次生産システム、木材活用大型建築・スマート林業、バイオ医薬・再生医療等、生活習慣改善ヘルスケア・デジタルヘルス)を設定した。民間投資を喚起し、2030 年に国内外で 100 兆円規模の市場創出を目指す。

各国の共通した特徴として、バイオものづくり(Biomanufacturing)を戦略の中核に位置づけ、研究開発から社会実装まで一体的に支援している。OECD、ISO、UNEP 等による標準化・認証の国際議論も進展している。さらに、先進国を中心に高齢化に伴う医療費・介護費の増大に対処すべく、予防・健康増進の重点化は世界的な潮流である。我が国の『バイオエコノミー戦略』では、生活習慣改善ヘルスケア、デジタルヘルス領域の国内外の市場規模として、39.1 兆円(2030 年)を目指す目標が掲げられている。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」』<sup>115</sup>では、医療 DX や健康経営等の施策を推進することで、公的保険外のヘルスケア・介護に係る国内市場規模として、累計 77 兆円(2050 年)を目指す目標が掲げられている。

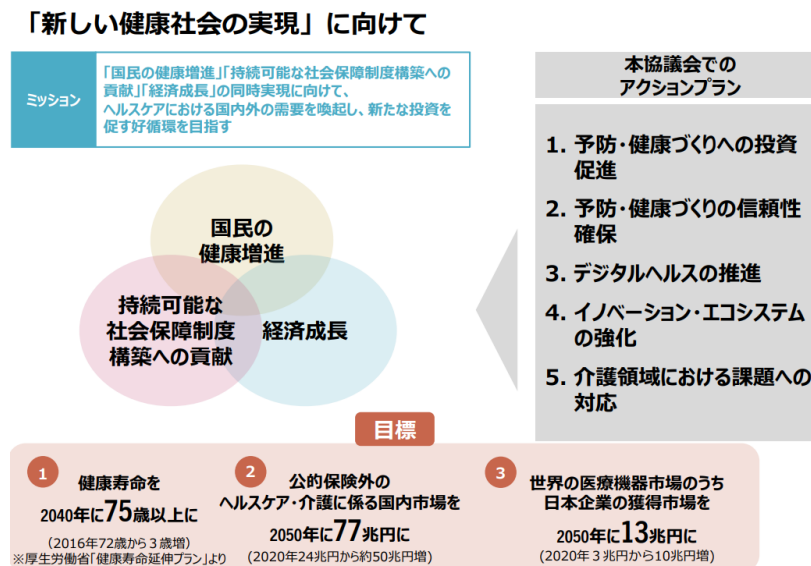


図 3-6-3 新しい健康社会の実現に向けた「アクションプラン 2023」の概要

<sup>114</sup> バイオエコノミー戦略(令和 6 年 6 月 3 日 統合イノベーション戦略推進会議決定)

<https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/index.html> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>115</sup> 新しい健康社会の実現に向けた「アクションプラン 2023」(健康・医療新産業協議会、2023 年 8 月)

[https://www.meti.go.jp/shingikai/mono\\_info\\_service/kenko\\_iryu/20230824\\_report.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/kenko_iryu/20230824_report.html) (2026 年 3 月閲覧)

### 3-6-4 社会課題の解決のために取り組むべき領域(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)

世界各国が独自戦略の下に取組を加速する中、本分野では短期・中長期的な視点で戦略をローリングし、実装・改善を続けることが重要である。本検討では、カーボンニュートラル(CN)、サーキュラーエコノミー(CE)、ネイチャーポジティブ(NP)、HE という一般的にオーソライズされた社会課題(M)に対し、貢献する提供価値(F)と具体的手段(T)の関係を明らかにするため、図 3-6-4 (MFT ツリー:概要図)を作成した。今後も新たな社会課題の設定と MFT 分析を継続し、見落とされがちな領域におけるイノベーション発掘とフロンティア領域の探索につなげる。

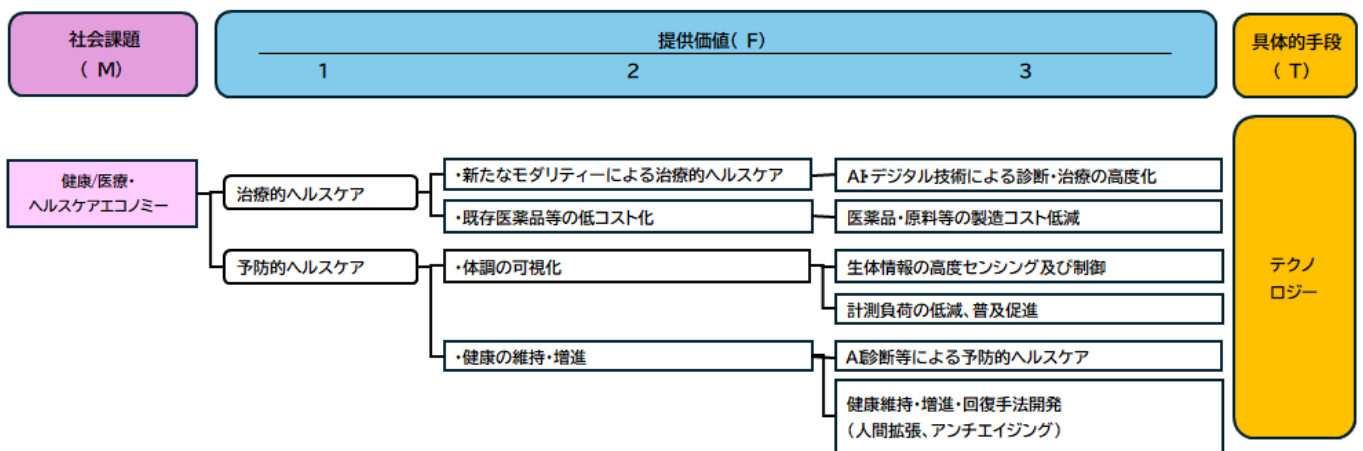


図 3-6-4 MFT ツリー(概要図)

図 3-6-4 では、HE は「治療的ヘルスケア」と「予防的ヘルスケア」に大別される。

本増補版では、HE の提供価値のうち「予防的ヘルスケア」に焦点を当て、その課題構造と取り組むべきフロンティア領域を明確にするため、図 3-6-5 (ロジックモデル:MFT)を整理した。

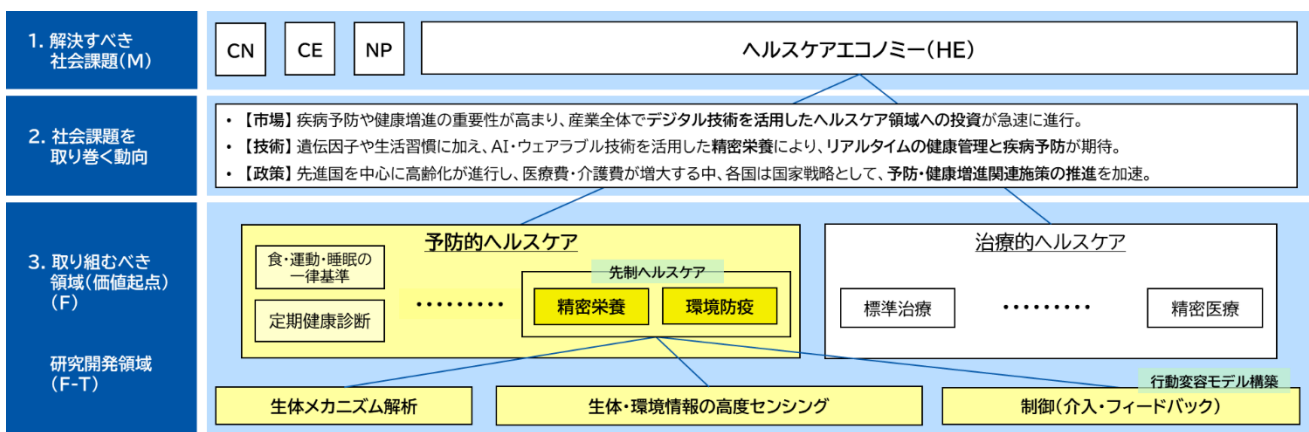


図 3-6-5 フロンティア領域のロジックモデル(MFT)

予防的ヘルスケアは、必要な行動を継続することが難しいという課題がある。その主要因の一つとして、日々の行動と健康成果(アウトカム)との因果関係が可視化されにくい点が挙げら

れる。例えば、食習慣を改善しても効果が実感しづらい、運動を行っても成果が表れるまで時間を要する、あるいは評価が年に数回の検査に限定されるなど、行動変容のためのモチベーションが継続しにくい状況が生じている。すなわち、予防的ヘルスケアにおいては、従来の年数回の検査・診断といった断続的な評価に加えて、個人の生活環境や生活習慣(食事・運動・睡眠等)、ストレス負荷に対する生体応答、代謝状態の変動、更に数か月単位で徐々に変化する生体機能を日常生活下で負荷なく継続的に取得・可視化することが求められる。その実装において中心的な役割を果たすのが、「高度な生体センシングに基づく行動変容」である。

なかでも栄養摂取は、日常生活において最も重要であり、かつ制御可能性の高い生体への入力要素である。そのため、近年では、生活習慣や代謝特性に基づき個人への最適化を図る「精密栄養(Precision Nutrition)」が注目を集めている<sup>116</sup>。しかし、精密栄養を実効的な行動変容につなげるためには、栄養介入が生体指標に与える影響を定量的に把握し(図 3-6-6)、その変化を個人に適時フィードバックする仕組みが不可欠である。すなわち、予防的ヘルスケアでは、個人データの縦断的变化を適切にフィードバックし、その好循環を通じて行動変容をより自発的かつ持続的なものへと誘導することが重要となる。

さらに、高齢者においては、健康指標の個人差が大きいため、一般的な標準値との比較のみでは適切な評価につながりにくい。むしろ、個人のベースライン値を基準とし、過去の自身のデータとの変化に基づいて評価する方が、介入効果の解釈がより明確となる。

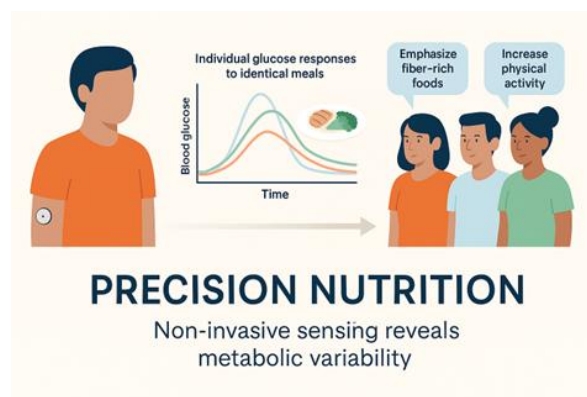


図 3-6-6 精密栄養の概念図

※同じ内容の食事を摂っても、血糖値推移には個人差がある一方で、その違いは計測しなければ分からない。

<sup>116</sup> 次世代型食・栄養研究 ～地球環境の持続可能性とヒトの健康を両立する食・栄養の実現へ(JST CRDS、2025年3月)  
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-SP-03.html> (2026年3月閲覧)

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 3-6-7 に示す。

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、非侵襲また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))。

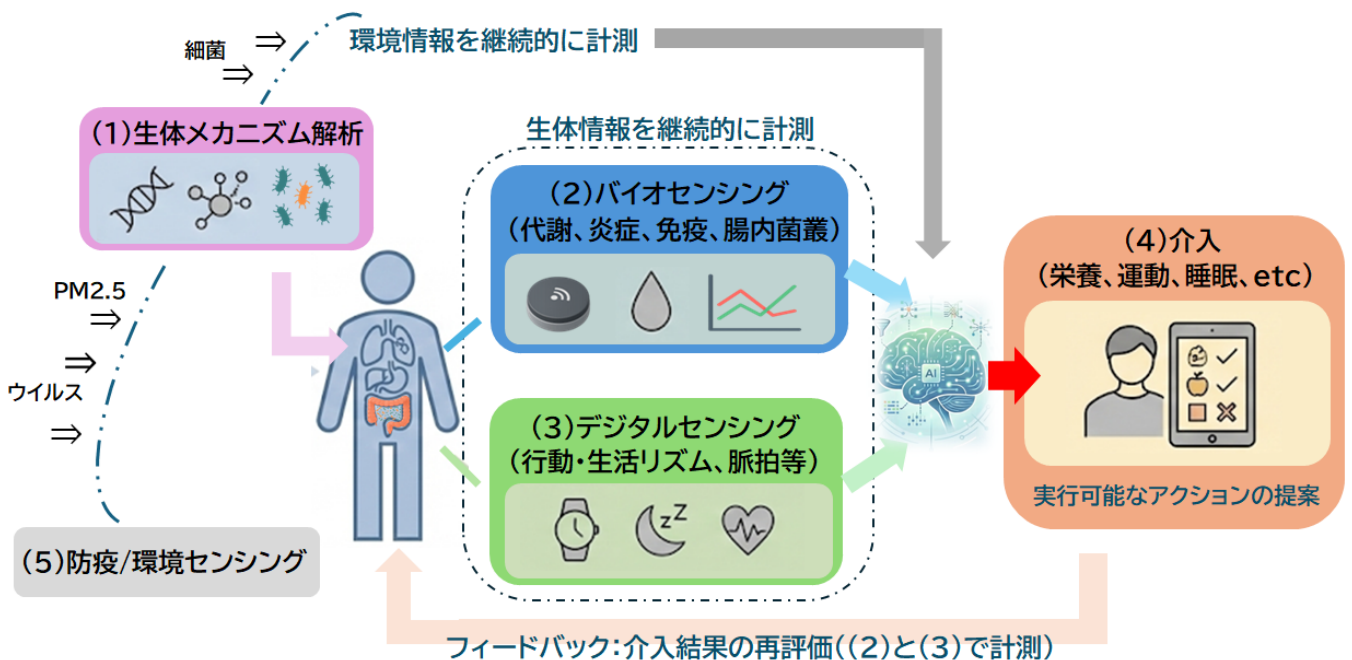


図 3-6-7 生体・環境情報の継続的センシングが実現する先制ヘルスケアの個別最適化

※精密栄養を行動変容に繋げるには、介入応答の可視化・フィードバックが重要である。

上述の「個人に最適化された先制ヘルスケアの実現」について、その将来性、技術・アイデアの革新性、日本の優位性、民間のみで取り組む困難性、重要経済安保技術、更にその他特筆すべき理由の観点を踏まえ、以下に要点を整理する。

### ①将来性(成長性・社会課題)

先進国を中心に、高齢化と慢性疾患の増大、それに伴う医療費及び介護費の増大を背景に、従来の治療中心から予防・健康増進中心へと資源シフトし、保険システムの再構築が加速している<sup>117</sup>。

日本では、健康寿命の延伸を最重要課題として位置づけ、2050年の公的保険外のヘルスケアサービス産業の市場規模を77兆円(健康づくり:58.1兆円、介護:18.9兆円)まで拡大させる目標を掲げる(2020年は24兆円)<sup>118</sup>。

### ②技術・アイデアの革新性

疾病予防には、従来の画一的な基準には限界があり、ライフスタイルや個人の生物学的特性(遺伝子、代謝、腸内菌叢等)に基づいた介入が有効である。個人に最適化した先制ヘルスケアの実現には、分子生物学、オミックス解析、データサイエンス、そして、体調・環境で変化する免疫、代謝特性をセンシングするデバイスの開発等、分野横断的な要素技術の革新と融合が鍵となる。

### ③日本の優位性

腸内菌叢に関する世界規模のデータベースを構築済みである<sup>119</sup>。腸管機能(受容体・免疫)に関する研究にも強みを有する<sup>120</sup>。また、世界に先駆けて機能性表示食品の制度を整備し、科学的根拠に基づいた食品開発の土壌がある<sup>121</sup>。センサー、光学機器、素材産業において、世界トップレベルの技術を有している。

### ④民間のみで取り組む困難性

個人の生物学的特性と体調に関する科学的根拠の集積には、巨額の研究開発投資が必要である。ヘルスケアビジネスには、規制の不確実性(グレーゾーン)があり、国の積極的な支援と環境整備が不可欠である。

<sup>117</sup> Declaration on Building Better Policies for More Resilient Health Systems(OECD, 2024)  
<https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0500> (2026年3月閲覧)

<sup>118</sup> 新しい健康社会の実現に向けた「アクションプラン 2023」(健康・医療新産業協議会、2023年8月)  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/mono\\_info\\_service/kenko\\_iryu/20230824\\_report.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/kenko_iryu/20230824_report.html) (2026年3月閲覧)

<sup>119</sup> 国立研究開発法人医薬基盤・健康・栄養研究所(NIBN), Japan Microbiome Database(NIBN JMD)  
<https://microbiome.nibiohn.go.jp/> (2026年3月閲覧)

<sup>120</sup> 食品の機能性表示制度について(消費者庁食品表示企画課, 2015年12月)  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/mono\\_info\\_service/kenko\\_iryu/20230824\\_report.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/kenko_iryu/20230824_report.html) (2026年3月閲覧)

<sup>121</sup> 國澤 純, 合田 昌史, 清野 宏, 「腸管免疫のユニーク性の解明と粘膜ワクチンへの展開」, 薬学雑誌, 127(2), 2007.  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/yakushi/127/2/127\\_2\\_319/pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/yakushi/127/2/127_2_319/pdf) (2026年3月閲覧)

## ⑤重要経済安保技術

疾病による労働力喪失や医療費増大は経済的な脅威である。予防技術は人的資本の維持と社会保障の確保に不可欠である。バイオセンサーや AI 診断等は次世代産業の中核であり、技術覇権のために、自国開発が不可欠である。生体情報は、国家・企業の競争力と安全を左右する戦略的資源であり、自国で収集し、管理する必要がある。

## ⑥その他特筆すべき理由

日本は高齢化に伴う社会課題の「先進国」であり、本領域で培った予防技術(バイオセンサー、AI 診断、ウェアラブル、栄養・生活習慣介入)は、ハード・ソフト統合型ソリューションとして、輸出が期待できる。

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。

以上を踏まえ、『精密栄養と環境防疫を基軸とした行動変容モデル構築』をフロンティア領域等として提案する。次節では、本節で整理した提供価値(F)を現実の行動変容へと結び付けるための具体的手段(T)について、整理する。

### 3-6-5 取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例

個人が日常生活において先制ヘルスケアを負荷なく実現する、すなわち、個別最適化するには、生活環境、生活習慣(食事、睡眠、運動等)やストレスに対する生体応答、代謝状態の変化、また、数か月にわたって徐々に変化する生体機能を日常生活下で負荷なくリアルタイムに、かつ継続的に計測を実現する高度な生体センシング技術の実現が求められる。

生体成分のリアルタイム計測の実現例として、連続血糖モニタリング(Continuous Glucose Monitoring:CGM)が挙げられる。CGMは、グルコースを特異的に酸化する酵素(グルコースオキシダーゼ)をセンシング素子として利用し、低侵襲的に皮下間質液中のグルコース濃度を日常生活において継続的に計測することをウェアラブルデバイスで実現している。近年では、糖尿病患者の血糖コントロールを目的とした医療用途のみならず、糖尿病非発症者のヘルスケア、ウェルネス用途(血糖モニタリング)においても市場が拡大している。同事例は、生体センシングが、個人の自発的な健康維持に寄与し得る可能性を示した例と言える。一方で、広範な人を対象に先制ヘルスケアを実現するには、血糖値に限らず、代謝状態、炎症・ストレス応答、免疫活性等に関わる生体指標を継続的に計測可能な次世代生体センシング技術の実現が望まれる。利用者に負荷をかけないウェアラブルなセンシングデバイスにおいては、特に次の要件を満たすことが求められる。

1. 実用上、十分なリアルタイム計測
2. 連続・長期の使用に耐える安定性
3. 小型化・低消費電力
4. 計測デバイスの生体適合性及び装着快適性
5. 単一デバイスによるマルチセンシング

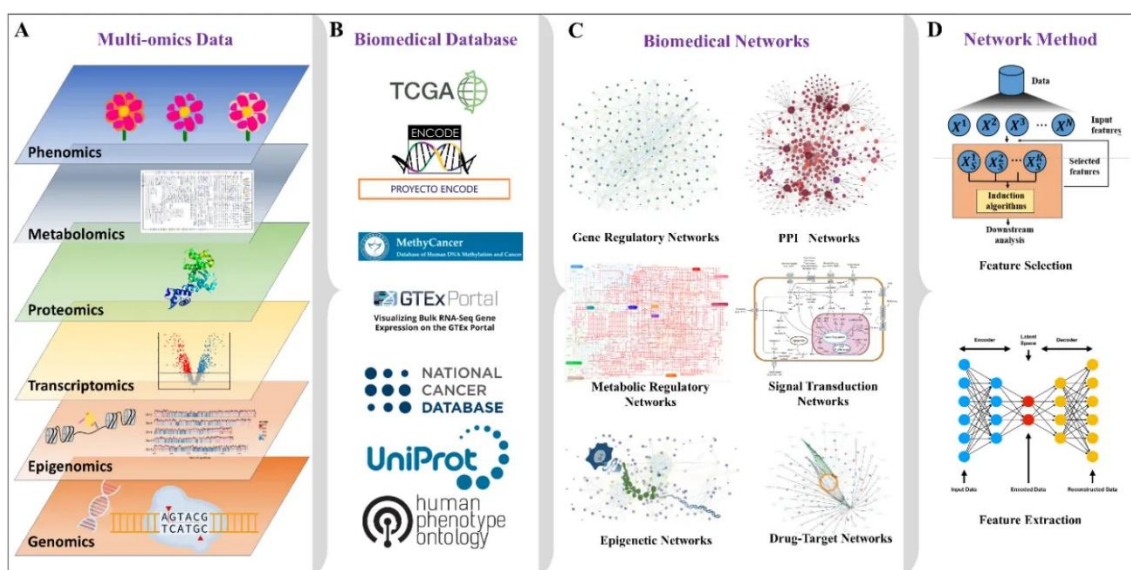
スマートフォンやウェアラブルデバイスを起点としたデジタルバイオマーカー(Digital Biomarker:DBM)は、非侵襲かつ連続的なデータ取得が可能であり、簡便に行動や生理状態(心拍数、血圧等)の変化を捉える点で大きな利点を有する。一方で、現行のデジタルバイオマーカーは集団平均モデルに基づくものが多く、層別化や個別化への展開は限定的である。また、その多くは表現型や疾患リスクとの統計的相関に基づいて定義されており、生体メカニズムとの対応関係が必ずしも明確ではないケースもある。DBMを単独で用いるのではなく、生体メカニズムに基づいて選定された生体分子の変化と組み合わせることで、介入に対する応答を簡便に捉える指標として位置づけることも期待できる。その結果、DBMの感度・特異度を向上させるとともに、DBMを対象群別に最適化することも期待できる。

上述の実現への寄与が期待される具体的な手段(T)について、以下に論じる。

## (1) 生体メカニズム解析

### (i) 多層オミックス解析

多層オミックス解析は、ゲノムから代謝物まで複数の階層の分子情報を統合し、生体内の分子機構を体系的に理解するための中核技術である。統合解析には、生物学的ネットワークに基づく解析手法(図 3-6-8)<sup>122</sup>や深層生成モデルを含む機械学習アプローチ<sup>123</sup>、更に、複数のオミックスデータを俯瞰して統合する戦略<sup>124</sup>が用いられ、複雑な生体反応の因果関係の解明に寄与している。一方で、データの異質性や解析手法の標準化の不足、計算コストの高さといった課題が指摘されている<sup>125</sup>。



**Fig. 1** A workflow diagram from omics data generation to network-based analysis. (A) Integration of multi-omics across the major omics layers (genomics, epigenomics, transcriptomics, proteomics, metabolomics, and phenomics); (B) The aggregation and archiving of multi-omics data into specialized databases, showcasing how these data repositories support standardization, preservation, and accessibility of large-scale biological data; (C) Multi-omics data extracted from databases are used to construct various biological networks (GRNs, PPI networks, MRNs, STNs, epigenetic networks, DTIs). The complex interactions in these networks reflect different biological activities; (D) The application of network-based analytical techniques to decipher the constructed networks. It includes methods like network feature selection methods and feature extraction methods]

図 3-6-8 オミックスデータ生成からネットワークベース解析までのワークフロー

<sup>122</sup> Network-based multi-omics integrative analysis methods in drug discovery: a systematic review(W. Jiang et al., BigData Mining, 18 (27), 2025)

<https://link.springer.com/article/10.1186/s13040-025-00442-z> (2026年3月閲覧)

<sup>123</sup> A technical review of multi-omics data integration methods: from classical statistical to deep generative approaches(A. R. Baião et al., Briefings in Bioinformatics, 26 (4), 2025)

<https://academic.oup.com/bib/article/26/4/bbaf355/8220754> (2026年3月閲覧)

<sup>124</sup> Integrating Molecular Perspectives: Strategies for Comprehensive Multi-Omics Integrative Data Analysis and Machine Learning Applications in Transcriptomics, Proteomics, and Metabolomics(P. H. Godoy Sanches et al., Biology, 13 (11), 2024)

<https://www.mdpi.com/2079-7737/13/11/848> (2026年3月閲覧)

<sup>125</sup> A technical review of multi-omics data integration methods: from classical statistical to deep generative approaches(A. R. Baião et al., Briefings in Bioinformatics, 26 (4), 2025)

<https://academic.oup.com/bib/article/26/4/bbaf355/8220754> (2026年3月閲覧)

このような課題はあるが、多層オミックス解析は、個人の代謝特性の違いを高精度に把握することができるため、食事反応の予測や栄養介入の評価といった「精密栄養 (Precision Nutrition)」の発展において有用である。また、疾病研究で蓄積された統合解析の知見は栄養科学にも応用可能であり、代謝変動の理解や新たなバイオマーカー探索への貢献が期待される<sup>126</sup>。

くわえて、多層オミックス解析は、腸内菌叢(マイクロバイーム)の機能解析、バイオマーカー探索において、解析効率とマーカーの信頼性を大きく高める利便性を備えている。従来の解析では、特定の菌が、偶然そこにいただけなのか、実際に生体影響に参与しているのかを判断できず、候補の絞り込みに膨大な時間を要していた。しかし、多層オミックス解析によって、菌の存在(DNA)とその菌が産生する代謝物をセットで特定できれば、生体影響のメカニズムに直結する候補を迅速に抽出できる。この手法の最大の利便性は、複数のオミックス層で共通して現れる変動を裏付けとして利用できる点にある。これにより、ノイズに惑わされることなく、有望なバイオマーカー候補を効率よくスクリーニングすることが可能となっている。

なお、多層オミックス解析をバイオマーカー探索の主軸としつつ、必要に応じて、栄養介入に伴う生体応答の初期過程を補足的に検討する手法として、NV センター(量子センシング)を用いた超高感度の物理量計測への活用の可能性も考えられる。

## (ii) 腸内菌叢(マイクロバイーム)の機能解析

腸内菌叢(マイクロバイーム)は、食事由来成分の代謝や免疫調節を通じて健康に深く関わっており(図 3-6-9)<sup>127</sup>、その構成は個人間で大きく異なる上、微生物間の相互作用も複雑である<sup>128</sup>。そのため、腸内菌叢の全体像と機能を把握するには、多層オミックスを統合する高度な解析技術が必要とされる<sup>129</sup>。さらに、腸内環境は食事や生活習慣によって動的に変動するため、個人レベルでの代謝応答を理解するには、因果推論を含む精緻な解析が求められる<sup>130</sup>。

このような課題はあるが、腸内菌叢の機能解明は、新たなバイオマーカーの発見や疾病リスク評価に貢献し得ることに加え、腸内微生物の特性に基づいた個別の食事設計を

<sup>126</sup> Nutrigenomics meets multi-omics: integrating genetic, metabolic, and microbiome data for personalized nutrition strategies(A. Nourazarain et al., Genes & Nutrition, 20 (30), 2025)  
<https://link.springer.com/article/10.1186/s12263-025-00790-9> (2026年3月閲覧)

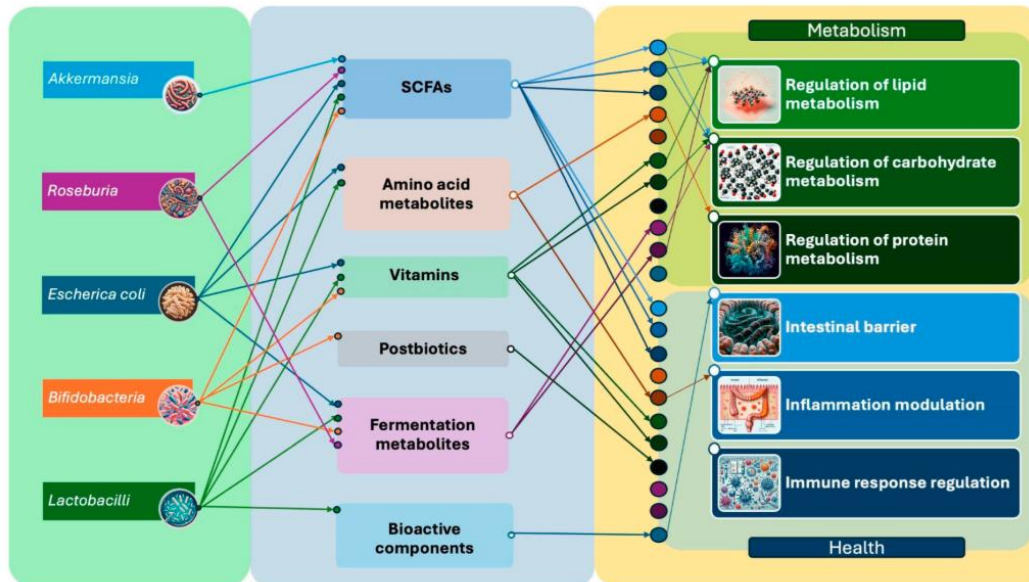
<sup>127</sup> Unraveling the Gut Microbiota: Implications for Precision Nutrition and Personalized Medicine( A. Abeltino et al., Nutrients, 16 (22), 2024)  
<https://www.mdpi.com/2072-6643/16/22/3806> (2026年3月閲覧)

<sup>128</sup> Gut microbiome-mediated transformation of dietary phytonutrients is associated with health outcomes(L. Zhang et al., Nature Microbiology, 11, 2025)  
<https://www.nature.com/articles/s41564-025-02197-z> (2026年3月閲覧)

<sup>129</sup> Microbiome multi-omics analysis reveals novel biomarkers and mechanisms linked with CD etiopathology(G. Serrano-Gómez et al., Biomarker Research, 13 (85), 2025)  
<https://link.springer.com/article/10.1186/s40364-025-00802-1> (2026年3月閲覧)

<sup>130</sup> Effects of a personalized nutrition program on cardiometabolic health: a randomized controlled trial(K. M. Bermingham et al., Nature Medicine, 30, 2024)  
<https://www.nature.com/articles/s41591-024-02951-6> (2026年3月閲覧)

可能とする「精密栄養(Precision Nutrition)」の発展にも寄与する重要な研究領域である<sup>131</sup>。



**Figure 3.** Schematic representation of the interactions between gut microbiota, their metabolites, and their effects on human metabolism and health.

図 3-6-9 腸内菌叢とその代謝物がヒトの代謝・健康に及ぼす影響の相互作用

<sup>131</sup> Human Gut Microbiome: A Connecting Organ Between Nutrition, Metabolism, and Health (S. Valencia et al., Int. J. Mol. Sci., 26 (9), 2025)  
<https://www.mdpi.com/1422-0067/26/9/4112> (2026 年 3 月閲覧)

## (2) バイオセンシング

生体分子のリアルタイム計測技術の代表例として、連続血糖モニタリング(CGM)が挙げられる。一方、先制ヘルスケアを広範なヒトを対象に実現するには、血糖値にとどまらず、代謝状態、炎症反応、免疫活性、ストレス応答等、より多様な生体指標を連続的に計測可能とするセンシング技術の開発が求められる。

図 3-6-10 に生体分子センシングデバイスの一般的な構成要素を示す。デバイスは、測定対象分子を特異的に認識する認識素子、認識素子を担持する電極系、それらを固定するフレキシブル基材、そして、信号処理回路及び電源から構成される。近年、デバイスの更なる小型化及びウェアラブル化を実現するため、各構成要素における材料・デバイス・回路技術の研究開発が精力的に進められている。

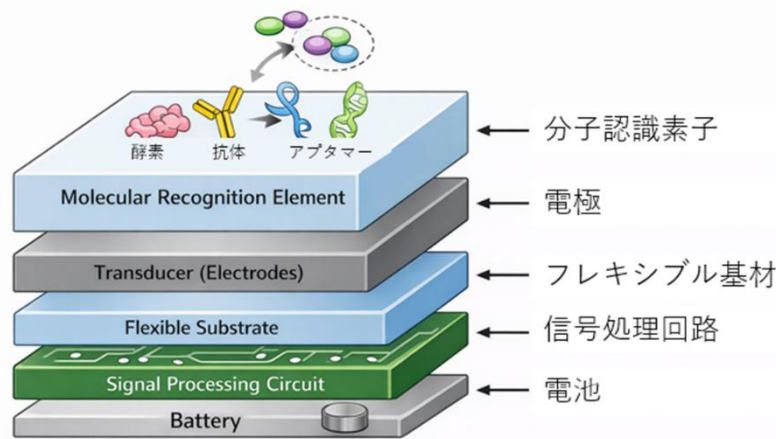


図 3-6-10 生体分子センシングデバイスの一般的な構成要素(概念図)

以下に各構成要素の研究開発動向と具体例を示す。

### (i) 生体分子認識素子

近年、バイオセンシングの素子開発において、網羅的スクリーニングや経験に依存した素子探索から、分子構造や機能に基づく合理的設計へと大きなパラダイムシフトが進んでいる。従来、素子用途の酵素開発では、測定対象を基質とする酵素の探索が中心であり、また、抗体開発においても動物免疫に基づく取得プロセスに多大な時間と労力を要していた。

現在では、AI を活用した構造生物学及び計算科学の進展により、センサー素子として望ましい機能を有する酵素の立体構造について、基質認識や電子移動特性を考慮した分子設計が可能となりつつある。同様に、抗体に代わる認識素子として、*in vitro* で選抜・合成可能なアプタマーが登場し、取得や利用に関する従来の課題を軽減している。

### a) 電気伝導型酵素(DET 型酵素)

酵素は、生体成分の連続計測における分子認識素子として確固たる実績を有しており、その代表例が連続血糖モニタリング(CGM)である。本技術は、酵素が生体刺激を電子信号へと変換する機能を活用することで実現され、糖尿病管理をはじめとする臨床応用を通じて、多くの人々の QOL 向上に寄与している。このような成功事例の蓄積により、酵素は分子認識素子として成熟した既存技術の一つとして受け取られがちである。しかし、近年、構造生物学及び情報科学の急速な進展により、酵素はもはや単なる天然由来材料ではなく、機能や応答特性を設計可能な分子デバイスへと移行しつつある。

このような背景の下、酵素の中でも電気伝導型酵素(Direct Electron Transfer Enzyme; DET 型酵素)は、外部メディエータを介さずに電極と直接、電子授受できる特性から、次世代バイオセンシングにおいて特に注目を集めている(図 3-6-11)<sup>132</sup>。この方式では、酵素固有の標準酸化還元電位に近い電位で作動可能であるため、妨害反応を抑制した高い選択性と感度を実現できる。また、メディエータを必要としない簡素な構成が可能であることから、マルチセンシング用バイオセンサーの認識素子としても大きな利点を有する。

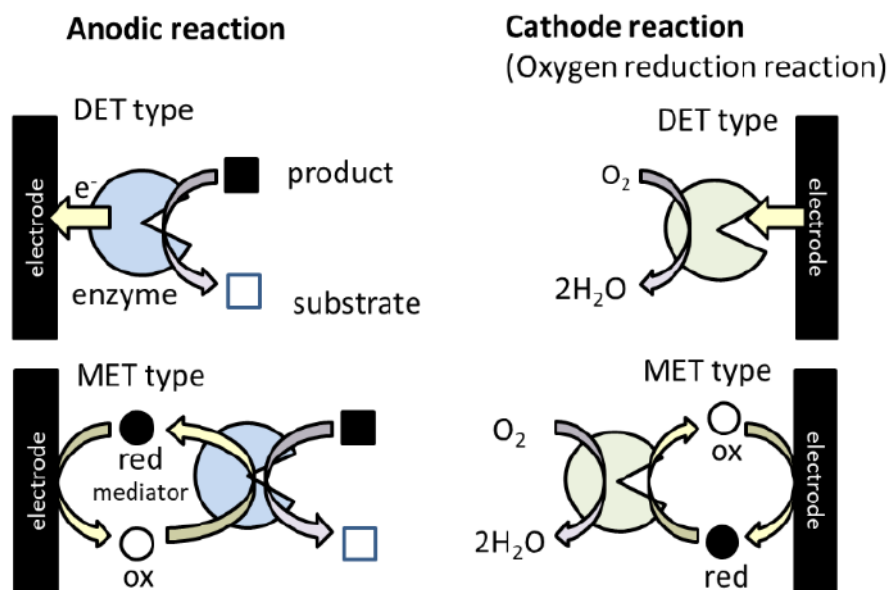


図 3-6-11 DET 型酵素のメカニズム

上: 酵素が電極に対して直接的に電子を受け渡す(DET 型)

下: メディエータを介して電子を受け渡す(MET 型)

一方で、目的基質を認識し、かつ DET 能を示す酵素を天然から見いだすことは極めて困難である。効率的な DET を実現するためには、一般に活性中心と電極表面との距離を約 10~15 Å 以内に保つ必要があるが、多くの天然酵素(例えば、グルコース酸化

<sup>132</sup> Developments in Bioelectrocatalysis Using Rationally Designed Enzyme, Electrode Materials(S. Tsujimura, Electrochemistry, 92 (10), 2024)  
[https://www.researchgate.net/publication/383328380\\_Developments\\_in\\_Bioelectrocatalysis\\_Using\\_Rationally\\_Designed\\_Enzyme\\_Electrode\\_Materials](https://www.researchgate.net/publication/383328380_Developments_in_Bioelectrocatalysis_Using_Rationally_Designed_Enzyme_Electrode_Materials) (2026 年 3 月閲覧)

酵素)では、活性中心がタンパク質構造の深部(約 17~22 Å)に埋没している。さらに、活性中心の電極に対する配向性も電子移動効率を大きく左右する重要な因子であるため、これらの幾何学的制約により、多くの天然酵素は DET 能を示さない。

このような天然由来 DET 型酵素の希少性という課題に対し、外部メディエータに依存せず、酵素自体に電子授受機能を組み込んだ人工酵素や酵素工学的に改変された準人工酵素の創出が報告されている(図 3-6-12)<sup>133</sup>。くわえて、DET 型モデル酵素である膜結合型 D-fructose dehydrogenase(FDH)の全体構造がクライオ電子顕微鏡により解明されたことで、芳香族残基(例えば、Trp)を介した電子移動経路や電極反応部位が特定され、DET 能の分子機序が明確化された(図 3-6-13)<sup>134</sup>。これらの知見は、新規 DET 型酵素の合理的設計に向けた重要な指針を与えている。さらに、近年では、AI や計算科学を活用した de novo 酵素設計が急速に発展しており、電極との電子授受や検出対象との相互作用を設計段階から組み込んだ人工酵素の創出を通じて、理想的な応答特性を有する次世代認識素子を開発する道が拓かれつつある。

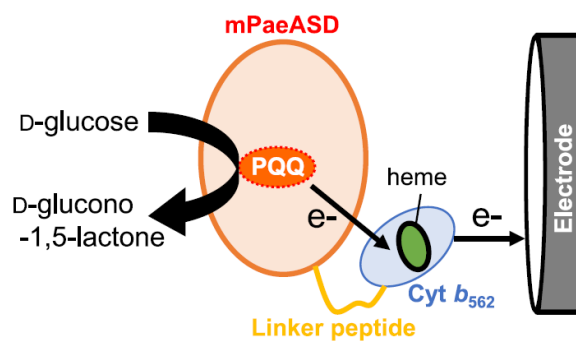


Fig. 1 Schematic illustration of mPaeASD-cyt  $b_{562}$  and its electron transfer pathway

### 図 3-6-12 mPaeASD-cyt $b_{562}$ とその電子伝達経路の模式図

※MET 型である超好熱性古細菌 *Pyrobaculum aerophilum* 由来の PQQ 依存性アルドース糖脱水素酵素(PaeASD)に電子伝達タンパク質シトクロム  $b_{562}$ (cyt  $b_{562}$ )を融合して DET 型酵素を作出。

<sup>133</sup> Creation of a highly stable direct electron transfer-type enzyme sensor by combining a hyperthermophilic dehydrogenase and natural electron mediator(M. Maeno et al., Biotechnology Letters, 47 (45), 2025)

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10529-025-03587-3> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>134</sup> Essential Insight of Direct Electron Transfer-Type Bioelectrocatalysis by Membrane-Bound d-Fructose Dehydrogenase with Structural Bioelectrochemistry(Y. Suzuki et al., ACS Catalysis, 13 (20), 2023)

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscatal.3c03769> (2026 年 3 月閲覧)

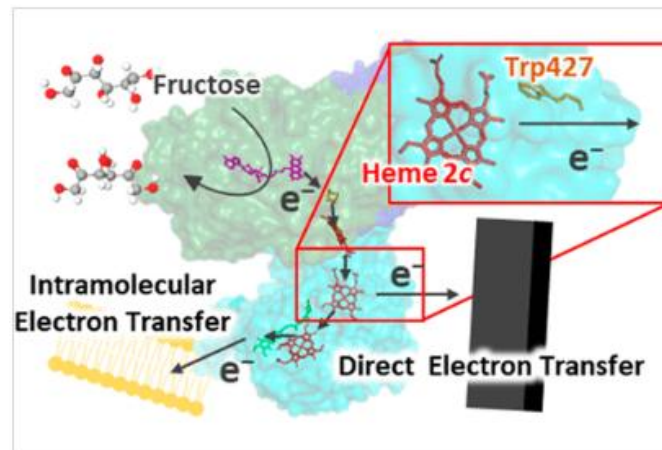


図 3-6-13 D-フルクトース脱水素酵素の立体構造と電気化学的特性に基づく直接電子移動(DET)のメカニズム

## b) 核酸アプタマー

核酸アプタマーは、核酸高分子(20~100 塩基程度)であり、抗体に匹敵する高い特異性と感度を兼ね備え、小分子から複雑なタンパク質、細胞に至るまで広範なターゲットを認識する能力をもつ(図 3-6-14)<sup>135</sup>。抗体とは異なり、化学合成可能であり、経済性と安定性において大きな利点がある。また、天然の核酸アプタマーはヌクレアーゼによる分解を受けやすい問題があるが、人工核酸の導入や化学的改変を施すことで、実用的な安定性を確保することが期待できる。アプタマーの柔軟な設計により、酵素では検出が困難なタンパク質に対しても、分子認識素子として機能させることができる可能性がある。アプタマーによるセンシングは、計測対象分子との結合に伴う構造変化を利用するが、結合した分子の解離に一定の時間を要するため、酵素と比べると連続測定における時間分解能が低くなる可能性がある点は留意が必要である。今後は、構造設計や電極界面制御、信号変換機構の高度化により、応答速度や可逆性の課題を克服し、連続測定型バイオセンサーへの適用の可能性が拡大することが期待される。

<sup>135</sup> A Brief Review of Aptamer-Based Biosensors in Recent Years(W. Wang et al., Biosensors, 15 (2), 2025)  
<https://www.mdpi.com/2079-6374/15/2/120> (2026 年 3 月閲覧)

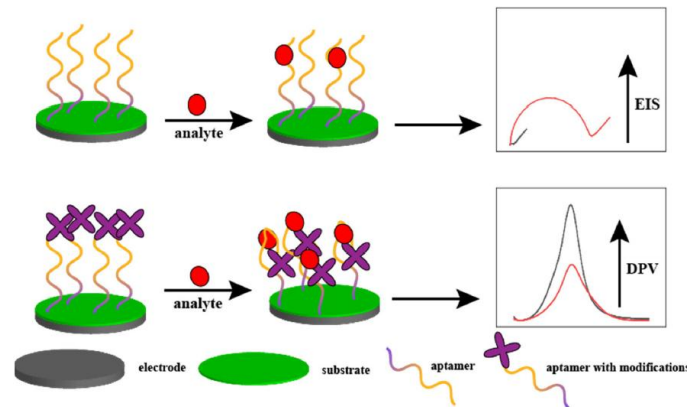


Figure 1. Aptamer-based detection mechanism for electrochemical sensors. The upper figure shows the electrochemical impedance method, which results in an increase in electrochemical impedance when the analyte binds to the aptamer; the lower figure shows the current method, which results in an increase in induced current when the analyte binds to the aptamer, causing the signaling molecules at the end of the aptamer to approach the electrode interface.

### 図 3-6-14 アプタマーを用いた電気化学センサーの検出メカニズム

上:インピーダンス法…分子がアプタマーに結合すると電気化学インピーダンスが増加。

下:電流法…分子がアプタマーに結合するとアプタマー末端のシグナル分子が電極界面へ近づき、誘導電流が増加。

#### c) その他

その他、人工細胞、受容体タンパク質・イオンチャネル、分子インプリントポリマー、レクチン等についても、生体分子認識素子としての応用が期待されている。特に、生物由来の機能を活用した分子認識素子に関する研究開発は、近年の合成生物学の急速な進展や AI を用いた分子構造設計技術の高度化を背景として、新たな発展段階へ移行しつつある。これらの技術は、天然分子の高選択性・高親和性と人工設計による高い安定性・チューニング自由度を統合し、次世代の高機能センシングデバイスの構築に大きく寄与することが期待される。

#### (ii) 電極及び基材開発

ウェアラブルバイオセンサーの研究開発においては、導電性と機械的柔軟性を同時に満たす弾性ポリマー基の導電性複合材料の活用が急速に進展している。特に、導電性高分子にグラフェンやカーボンナノチューブ等の炭素系ナノ材料を組み合わせた複合体は、高い電気伝導性と優れた機械的強度を併せ持ち、柔軟・伸縮性デバイスに適した材料系として注目されている<sup>136</sup>。これらの材料は、従来の金属電極が有する伸縮性能の制限を克服し、電極と支持体の機能を一体化できる点で大きな利点を有する。

さらに、金や銀のナノ構造体を組み込んだ複合材料も高い導電性、耐久性、安定な界面特性を付与する目的で広く研究されている。このような材料設計によって得られた電極は、心電図(ECG)計測用電極、汗中成分のオンボディセンシング、身体運動を検知する伸縮性ひずみセンサー等、多様なウェアラブルデバイスへの応用が進んでいる<sup>137</sup>。

<sup>136</sup> Behavior of Polymer Electrode PEDOT:PSS/Graphene on Flexible Substrate for Wearable Biosensor at Different Loading Modes(M. Aleksandrova et al., *Nanomaterials*, 14 (16), 2024)  
[https://www.mdpi.com/2079-4991/14/16/1357#Author\\_Contributions](https://www.mdpi.com/2079-4991/14/16/1357#Author_Contributions) (2026年3月閲覧)

<sup>137</sup> Flexible Sensors Based on Conductive Polymer Composites(D. Zhao et al., *Sensors*, 24 (14), 2024)  
<https://www.mdpi.com/1424-8220/24/14/4664> (2026年3月閲覧)

くわえて、単一材料系で複数の機能を統合する多機能化アプローチは、デバイス全体の薄型化・軽量化を促進し、装着時の快適性やユーザー体験の向上にも寄与している。

### (iii) 自己給電デバイス

生体分子を継続的に計測する用途では、バッテリー容量の制限や交換の負担を克服する自己給電型ウェアラブルセンサーの実現が望ましい。その給電方法には、身体の動きを利用する物理的アプローチと生体成分を燃料とする化学的アプローチの二つの主要な動向がある。物理的な仕組みでは、圧電効果、摩擦帯電、電磁誘導、静電誘導を用いた発電技術の研究がある。これらは筋肉の収縮、心拍、歩行といった日常的な身体活動を電気エネルギーに変換し、ナノ材料や柔軟なフィルムを用いることで高効率な電力回収を図っている。一方、化学的な仕組みでは、体液中の成分を燃料とするバイオ燃料電池の開発が進展している。特に、汗に含まれる乳酸や尿・血液中のグルコースを酵素で酸化させて発電する手法は、測定対象そのものをエネルギー源とするアプローチである。最近では、和紙に電極をスクリーン印刷した柔軟な乳酸バイオ燃料電池アレイが開発され、汗のみで無線通信や活動量計を駆動させることが可能となった。このような自己駆動型デバイスは、電池切れの懸念がないため、ヘルスケア用途に加えて、スポーツや介護現場におけるリアルタイムな体調センシングへの応用も期待される。

### (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のウェアラブルデバイスを利用して、日常生活における活動量、睡眠、心拍変動等のデジタルバイオマーカー(DBM)の連続的な計測が実現している<sup>138</sup>。歩行速度やキー入力特性の解析といった行動センシングは、認知機能低下や疾患の予兆を捉える DBM として期待される。DBM は、非侵襲かつ大規模なデータ取得が可能であり、行動や生理状態の変化を継続的に捉える点で大きな利点を有する。また、ミリ波センサーやモーションキャプチャーを利用した高精度な行動データに基づいた早期疾病予測の可能性も報告されている。具体的には、高齢 2 型糖尿病患者の歩行における「足関節の運動範囲の減少」が、サルコペニアの早期発見に有用な DBM となることが報告されている<sup>139</sup>。この指標は歩行速度に左右されず、身体機能低下を検出できるため、従来の評価法よりも感度の高い早期発見ツールとなり得る。将来的には、スマートフォンの映像から関節の動きを推定する技術により、専門設備のない自宅等での非侵襲的な早期診断の実現が期待される。一方で、デバイス間の精度のばらつき、臨床的妥当性の確立、高度な個人情報保護や規制の整備が普及に向けた大きな課題である。

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って取得された多層的な生体情報を統合・可視化する技術として、近年では、個人の生理状態や行動特性を仮想空間上に再構築し、状態の把握や将来予測に活用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<sup>140</sup>。なお、デジタルツイン技術の活用にあたっては、個人に紐づく生体情報や行動データを取り扱うことから、適切なデータ管理及び個人情報の保護が不可欠である。

### (4) 介入としての精密栄養

精密栄養は、本章で示した先制ヘルスケアのフロンティア領域等の中核を成す概念であり、本節では、前段で述べた分子型バイオマーカー探索及び生体・デジタルセンシング技術を統合し、具体的な行動変容として実装する介入手段として位置づける。

精密栄養は、個人の遺伝学的背景、代謝特性、腸内菌叢、環境要因等の多層的データを統合し、推奨される食事を最適化することを目的とする新たな栄養科学である。従来

<sup>138</sup> Digital biomarkers: Convergence of digital health technologies and biomarkers(S. Vasudevan et al., Digital Medicine, 5 (36), 2022)

<https://www.nature.com/articles/s41746-022-00583-z> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>139</sup> Spatiotemporal and kinematic gait characteristics in older patients with type 2 diabetes mellitus with and without sarcopenia(T. Manabe et al., Scientific Reports, 15 (18000), 2025)

<https://www.nature.com/articles/s41598-025-00205-0> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>140</sup> H. K. Rudsari et al. Digital twins in healthcare: a comprehensive review and future directions, Front. Digit. Health, 7, 2025.

<https://www.frontiersin.org/journals/digital-health/articles/10.3389/fdgth.2025.1633539/full> (2026 年 3 月閲覧)

の画一的な食事指針から、個別化かつ動的に調整される食事介入への転換を促す領域として近年急速に研究が進んでいる。

本領域の進展を象徴する代表的研究として、イスラエル・ワイツマン研究所による大規模コホート解析が挙げられる<sup>141</sup>。同研究グループは、800名の参加者を対象に1週間の連続血糖モニタリング(CGM)を実施し、計46,898件の食事摂取に対する血糖応答を詳細に評価した。その結果、同一の食事であっても食後血糖反応(PPGR)には大きな個人差が認められることが明らかとなり、特定の食品は、ある個人では血糖上昇をほとんど引き起こさない一方、別の個人では急峻な上昇をもたらすといった高度に個別的な代謝応答が示された。

さらに、同研究所は、血液・身体計測データに加えて、腸内菌叢の構成及び機能的特徴を統合した機械学習モデルを開発し、未知の食事に対する個人のPPGRを高精度に予測するアルゴリズムの構築に成功した。これを用いた短期介入試験では、従来型食事指導を上回る血糖管理の改善効果が示され、腸内菌叢にも一貫して良好な変化が認められた。

このような国際的な潮流を踏まえ、米国国立衛生研究所(NIH)は、『2020-2030 Strategic Plan for NIH Nutrition Research』において、精密栄養を重点研究領域として明確に位置づけている<sup>142</sup>。特に、Nutrition for Precision Health プロジェクトでは、約8,000名の多様な参加者を対象に、食事パターンに対する個別反応をAIで予測するアルゴリズム開発が進められており、医療現場及び日常生活で活用可能な個別化ヘルスケアの構築が目指されている。

以上のように、精密栄養は先制ヘルスケア実現の鍵となる日常的な体調維持・管理の個別最適化において重要な研究領域と言える。

腸内菌叢(マイクロバイーム)は、食事に対する代謝応答を規定する主要な決定因子であり、個体差の形成に大きく寄与することが知られている<sup>143</sup>。先行研究では、腸内菌叢の構成が食後の脂質応答やPPGRの変動の相当部分を説明し、場合によっては食事に含まれる栄養素組成よりも強い影響を及ぼすことが報告されている。日本人向けの精密栄養の実装においては、和食、発酵食品、特有の調味料等、日本固有の食習慣が腸内菌叢に及ぼす影響を体系的に把握した国産マイクロバイームデータの整備が不可欠である。このような地域・文化特異的データが欠如した場合、日本人の生理的特性や食文化を十分に反映しない実効性の低い食事が推奨される可能性も懸念される。

<sup>141</sup> Personalized Nutrition by Prediction of Glycemic Responses(D. Zeevi et al., Cell, 163 (5), 2015)  
[https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674\(15\)01481-6](https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674(15)01481-6) (2026年3月閲覧)

<sup>142</sup> Research gaps and opportunities in precision nutrition: an NIH workshop report(B. Y. Lee et al., Am. J. Clin. Nutr., 116 (6), 2022)  
[https://ajcn.nutrition.org/article/S0002-9165\(23\)03718-8/fulltext](https://ajcn.nutrition.org/article/S0002-9165(23)03718-8/fulltext) (2026年3月閲覧)

<sup>143</sup> 医薬基盤・健康・栄養研究所のヒト腸内環境研究(細見 晃司、國澤 純、腸内細菌学雑誌, 39 (1), 2025)  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jim/39/1/39\\_9/pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jim/39/1/39_9/pdf) (2026年3月閲覧)

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、更に、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

先制ヘルスケアを多層的に実現するためには、精密栄養のように個人の行動を最適化する取組に加えて、個人では制御しにくい外的要因である環境中の病原性微生物を可視化し、防疫の仕組みを個人から社会レベルへと広げる技術の社会実装が望まれる。

環境中ウイルスのリアルタイム検出における第一の課題は、計測に供するウイルスの捕集と濃縮である。気中のウイルス濃度は極めて低いため、効率的な回収が困難であるが、例えば、湿式静電式サンプラーでは、溶解バッファを捕集電極に用いることで、核酸損傷を抑えつつ高い捕集効率を実現している(図3-6-15)<sup>144</sup>。しかし、長時間の安定稼働には捕集液の蒸発に伴う液量変動を制御すること求められる。第二の課題は、PCRに依存しない簡便で迅速な検出法の開発である。ウイルスの定量で一般的に用いられるRT-qPCR法は、高精度ながらも計測に時間を要し、専門機器や高度な技術を必要とする。これに対して、CONAN法(CRISPR-Cas3)<sup>145</sup>やSHERLOCK<sup>146</sup>等の技術は、最短1時間以内でPCR並みの高精度な検出を可能とする。これらの手法は、低コストかつ迅速であり、ウイルスの遺伝子配列の変異にも比較的簡便に対応できる。高効率な捕集技術と迅速な検出技術を統合することで、公共空間のウイルスを常時監視し、感染リスクを未然に把握する社会システムの構築が期待できる。

<sup>144</sup> Novel virus air sampler based on electrostatic precipitation and air sampling of SARS-CoV-2 (K. Fukuda et al., *Microorganisms*, 11 (4), 2023)

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37110367/> (2026年3月閲覧)

<sup>145</sup> CRISPR-Cas3-based diagnostics for SARS-CoV-2 and influenza virus (K. Yoshimi et al., *iScience*, 25 (2), 2022) <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35128347/> (2026年5月閲覧)

<sup>146</sup> Nucleic acid detection with CRISPR-Cas13a/C2c2 (J. S. Gootenberg et al., *Science*, 356 (6336), 2017) <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aam9321> (2026年3月閲覧)

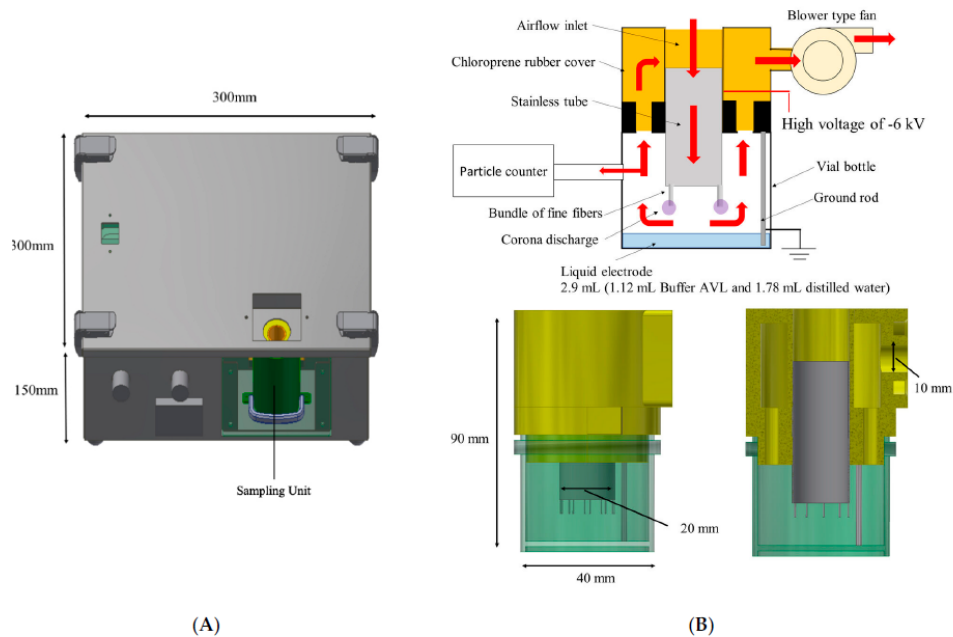


Figure 1. Schematic diagram of the developed electrostatic air sampler. (A) Exterior view of the air sampler. (B) Schematic diagram of the electrostatic sampling unit. Red arrows indicate the flow of air. The particle counter was installed to measure the particle collection efficiency.

### 図 3-6-15 湿式静電式サンプラー(模式図)

※湿式静電式サンプラー: 溶解バッファーを捕集電極に用いることで、核酸損傷を抑えつつ、高い捕集効率を実現。

また、早期に検出されたウイルスや細菌に対し、化学薬剤に依存せず、迅速かつ局所的で残留性のない防除を実現することで、防疫/環境の考え方を従来の「拡大後の抑制」から「初期段階での封じ込め」へと転換する基盤技術の実装が求められている。例えば、大気圧低温プラズマ<sup>147</sup>や深紫外線 LED<sup>148</sup>等の技術は、高度センシングによって検知された微量で局所的な病原体に対し、その場で即時に不活化処理を行う防疫技術としての展開が期待される。

以上のとおり、本節で整理した具体的手段(T)は、分子レベルの計測から行動変容としての介入、更に、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。

<sup>147</sup> 大気圧低温プラズマを用いた殺菌・ウイルス不活化技術 (大澤 泰樹、沖野 晃俊、化学と工業 75-1, 2022) <https://students.csj.jp/wp-content/uploads/2023/04/ko75-14-tokushu.pdf> (2026年3月閲覧)

<sup>148</sup> 深紫外光を用いた病原微生物の不活化 (南川 丈夫、日本レーザー医学会誌 45 (2), 2024) [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsism/45/2/45/jsism-45\\_0028/pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsism/45/2/45/jsism-45_0028/pdf) (2026年3月閲覧)

## コラム 地域特有の再生可能資源を基盤とした循環型バイオ産業

Innovation Outlook ver. 1.0 では、バイオエコノミー分野の重点課題として「再生可能資源の活用による化石資源の削減」を取り上げた。本章では、この課題の中でも特に重要な論点であるバイオマス原料の持続的な活用に着目し、技術開発にとどまらず産業創出までを視野に入れた「地域特有の再生可能資源を基盤とした循環型バイオ産業」として、現状分析から将来展望までをまとめた。

一般に、どれほど優れた製造技術であっても、原料の安定供給が確保されなければ産業としての継続的な展開は難しい。バイオエコノミー分野においても同様であり、バイオマス原料の安定供給は、開発された技術を社会実装へとつなげる上で重要な課題の一つである。

この課題は、単に原料を調達するという問題にとどまらず、回収・集荷・前処理等の産業基盤の整備や長期的な事業展開を支える制度設計、更には、地域内での資源循環を通じた地域経済への波及といった観点を含め、中長期的な視点から全体構造を捉えることが求められる。

### (1)現状と課題

バイオエコノミー分野において、現在、一般的にオーサライズされている社会課題(M)の中で、カーボンニュートラル(CN)、サーキュラーエコノミー(CE)、ネイチャーポジティブ(NP)の解決のために共通して貢献する提供価値(F)として、「再生可能資源の活用」が挙げられる。これは、将来像「自然共生経済」の実現にとって重要である。

その実現のためには、バイオマス資源や CO<sub>2</sub> を原料としてバイオ燃料やバイオマス由来素材等の有用物質を微生物生産する技術が有望となっており、グローバルに研究開発が進められている。

日本においても CO<sub>2</sub> を直接原料としたバイオものづくりが「グリーンイノベーション基金事業」<sup>149</sup>で、バイオ資源の利用については未利用資源(非可食バイオマス等)を原料とするバイオものづくりが「バイオものづくり革命推進事業」<sup>150</sup>等で、それぞれ製造プロセスの高度化や実用化に向けた大規模な研究開発プロジェクトが進められている。

バイオマス資源を利用したバイオものづくりの社会実装の加速及びその拡大の実現のためには、原料の安定的・持続的な確保及び増産が必要となる。また、経済安全保障の観点から国内で調達することが望ましい。しかし、国内におけるバイオ製品や SAF 等の大規模生産では、糖質原料やバイオエタノール等の輸入原料を利用している。

一方、国内における未利用資源は、林業や農業の余剰生産物や残渣、食品加工業の副産物や廃棄物等がほとんどであり<sup>151</sup>、未利用資源の生産量(供給量)は、主生産物の生産量や需要動向に依存するため、バイオものづくり産業の需要予測に応じた生産計画を立てることは困難である。

<sup>149</sup> NEDO「グリーンイノベーション基金事業／バイオものづくり技術による CO<sub>2</sub> を直接原料としたカーボンリサイクルの推進」  
<https://green-innovation.nedo.go.jp/project/bio-manufacturing-technology/> (2026年3月閲覧)

<sup>150</sup> NEDO「バイオものづくり革命推進事業」  
[https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100246.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100246.html) (2026年3月閲覧)

<sup>151</sup> NEDO「未利用資源のアベイラビリティ調査(バイオものづくり革命推進事業 俯瞰調査)」  
 (2024年度)

国内に賦存するバイオマス資源として最も多いのは森林資源であるが、商業利用可能なものは木材用途に植林されたものであり、バイオものづくり用の原料として利用可能なものは副産物である合板にも適さない曲がり材、間伐材、枝条等である<sup>152</sup>。特に林地残材は賦存量が多いが、林地内での集積には技術、労力、コスト等の面での課題がある。集積可能な資源についても林地外への運び出し、加工工場への輸送、木材チップへの加工、バイオ工場への輸送等にコスト、エネルギーを要することが課題となっている。

農業の余剰生産物や残渣、食品加工の副産物や残渣等をバイオものづくり原料として用いる場合、無価値あるいは極めて低価値の資源としてコスト計算してしまう傾向があるが、多くの場合、畑へのすき込みや燃料、飼料、肥料としての用途が既にあるため、その価値を踏まえた買い取り価格を設定しないと安定供給を可能にすることは難しい。したがって、未利用資源の価値を適切に設定したバリューチェーンの設定が重要となる。

このような状況を踏まえると、バイオマス資源の生産を前提とした農業や林業を確立し、これを起点としたバイオ産業としてのサプライチェーン、バリューチェーンを前提とした産業化の構想が重要と考えられる。また、バイオマス資源の生産は地域ごとの特性と深く関係しているとともに、輸送や貯蔵等のコストが課題であることから、地域内でのバイオマス資源から糖やエタノール、油脂等の原料あるいは製品製造までのサプライチェーンを地域内で構築することが有用である。さらに CN、CE、NP の観点から、地域内でのバイオマス資源の生産を起点とした循環型のバイオ産業、すなわち「地域特性を活かした循環型バイオ産業」を形成することが重要であり、さらに、その実現のためにはサプライチェーン全体として成長させるためのスキーム、施策が必要となる。

## (2) 地域特有の再生可能な資源生産と循環型バイオ産業のポテンシャル

### ① 既存資源の増産、利用の拡張

#### i) てんさい産業

てんさいは、寒冷地に適した製糖原料作物であり、北海道における商品作物、輪作作物として重要な位置づけとなっている。北海道における製糖産業は、てんさい生産から製糖、残渣や副産物、廃棄物の有効利用も含めたバリューチェーン及びサプライチェーンの基盤が構築された地域における循環型のバイオ産業として確立している<sup>153</sup>。例えば、北海道の広い範囲でてんさいが栽培されており、主要な生産地域の中心に位置するように製糖工場があって、全道をカバーした効率的に運搬・集積するロジスティックスが確立している。また、酵母や乳酸菌といった微生物や酵素の生産のプラントを有してバイオ事業を展開している製糖会社もある<sup>154,155</sup>。したがって、地域特有の再生可能な資源生

<sup>152</sup> 木質バイオマス燃料等の安定的・効率的な供給・利用システム構築支援事業(NEDO)  
[https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP2\\_100162.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP2_100162.html) (2026年3月閲覧)

<sup>153</sup> 日本甜菜製糖株式会社 Web ページ  
<https://www.nitten.co.jp/> (2026年3月閲覧)

<sup>154</sup> 日本甜菜製糖株式会社 Web ページ  
<https://www.nitten.co.jp/business/food/> (2026年3月閲覧)

<sup>155</sup> 北海道糖業株式会社 Web ページ  
<https://www.hokutou.co.jp/bio/> (2026年3月閲覧)

産を起点とした循環型バイオ産業の基盤が既に確立している(図 3-6-16)。一方、近年の砂糖消費の低減傾向や労働人口減少、脱炭素化対応等の課題の顕在化により、てんさい生産から製糖までの各種プロセスの高度化や新価値創造による新規事業創出等が重要になっていることから、新規の技術開発や環境整備等の施策によって、更なる産業拡大が期待される。例えば、日本甜菜製糖株式会社では、2025年に第2次中期経営計画の見直し<sup>156</sup>の中で「てん菜糖業」から「てん菜産業」への飛躍を打ち出すとともにノルウェーの企業に出資して食料や飼料に資するマイコプロテイン生産の事業化を進めている。また、2025年度、ホクレン農業協同組合連合会が「バイオものづくり革命推進事業」に採択されており、余剰糖蜜を活用した微細藻類培養による油脂生産に関する技術開発、新規事業への展開が期待されている<sup>157</sup>。

このような状況を踏まえると、てんさいの栽培及び製糖プロセスにおいて生産性を飛躍的に向上することで、副産物や余剰生産物等を用いたバイオものづくり産業の拡大が期待できる。てんさいの生産性向上のためには、高生産性、低肥料、超高糖性、高温耐性、病虫害耐性等を実現するための育種技術の高速化・高度化、バイオスティミュラント、土壌微生物叢・共生微生物叢を制御する土壌改良材の開発等が考えられる。

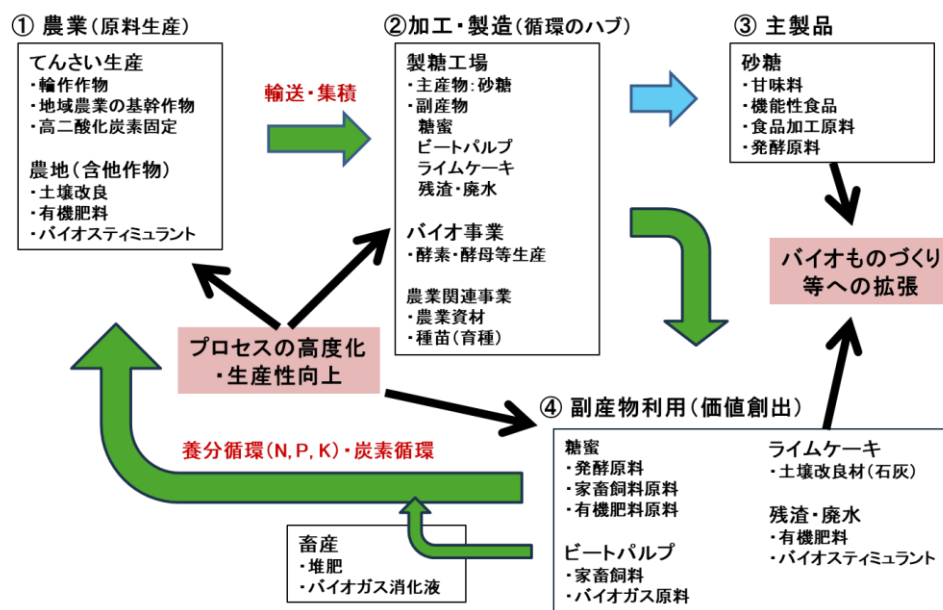


図 3-6-16 地域特有の再生可能資源を基盤とした循環型バイオ産業モデル  
(北海道における「てんさい産業」を事例として)

## ii) でん粉産業

でん粉は、そのまま片栗粉等の食品として、あるいは、加工食品に添加して利用される他に、糖化製品や加工でん粉のように加工して利用されたり、グルタミン酸ソーダやビ

<sup>156</sup> 日本甜菜製糖株式会社 Web ページ

[https://www.nitten.co.jp/dcms\\_media/other/2nd\\_medium\\_term\\_plan\\_revise\\_20250514.pdf](https://www.nitten.co.jp/dcms_media/other/2nd_medium_term_plan_revise_20250514.pdf) (2026年3月閲覧)

<sup>157</sup> ホクレン農業協同組合連合会 Web ページ

<https://www.hokuren.or.jp/newsrelease/c6tjwkqcmfbu> (2026年3月閲覧)

ール、焼酎等の発酵や製紙、段ボール生産、医薬品生産等にも利用されたりしている<sup>158</sup>。その中では糖化製品としての利用が最も多い。国内のでん粉供給量のうち 86%が輸入トウモロコシを原料とするコーンスターチであり、国内産はイモ類由来が主で、その内訳は、ばれいしょでん粉が6%、かんしょでん粉が 0.4%となっている。でん粉用のばれいしょは北海道で輪作体系を形成する基幹作物として、かんしょは九州で主に生産されており、いずれも地域農業や地域経済の上でも重要な位置づけとなっている。

余剰でん粉やでん粉製造の副産物等は、バイオものづくり等の原料としても期待される。例えば、「バイオものづくり革命推進事業」では、輸入トウモロコシから生産されるコーンスターチの規格外でん粉を原料として機能性糖質を生産するプロジェクトが進められている<sup>159</sup>。国内では、ばれいしょ(馬鈴薯)やかんしょ(甘薯)の栽培からでん粉生産、それらを利用した製造業のバリューチェーン、サプライチェーンが確立していることから、低肥料、高病害虫耐性、低コスト、低労力で機械化適性が高い、でん粉原料用品種の改良やバイオスティミュラント、微生物農薬といった先端的農業資材活用等の栽培技術の改良等、新規参入者でも大規模栽培が容易で高く安定な収量が得られるような技術の確立や副産物の加工技術の高度化等で、地域特有の再生可能資源を起点とした循環型のバイオ産業としての拡張が期待される。

### iii) 飼料用ソルガムの利用拡大

ソルガムはイネ科の C4 植物で成長性が良く、日本国内では主に家畜の飼料用として約 11,700ha 栽培されており<sup>160</sup>、近年、その生産量は、減少傾向にあるが、バイオものづくり等の資源作物としての利用拡大が期待されている。NEDO「再生可能原料アベイラビリティ調査」(2022 年度)において、全国の再生可能な荒廃農地での新規栽培可能面積及び生産量の推計結果が報告されている<sup>161</sup>。

福島国際研究教育機構(F-REI)の東北大学を中心としたチームでは、ソルガムをバイオ資源としたトランスアコニット酸(バイオポリマー原料)及びブタノールの生産を目的とした研究開発事業を進めている。ゲノム編集技術を用いた代謝系改変によるトランスアコニット酸高蓄積株の育種を進めるとともに、搾汁残渣を原料としたブタノール製造プロセスの確立のため、高ブタノール生産株の開発等を進めている<sup>162</sup>。また、東京都立大学を中心としたチームにより、顕微授精技術を用いて従来の交雑技術では同じイネ科であっても困難(生殖的隔離)であったサトウキビや野生イネ等とソルガムとの雑種形成に

<sup>158</sup> 農林水産省、「でん粉をめぐる状況について」(2025 年 9 月)

<https://www.maff.go.jp/j/seisan/tokusan/imo/attach/pdf/siryou-16.pdf> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>159</sup> 三和澱粉工業株式会社 Web ページ

<https://www.sanwa-starch.co.jp/news/684/> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>160</sup> 農林水産省、「令和 5 年産飼料作物の作付(栽培)面積及び収穫量、えん麦(緑肥用)の作付面積」

[https://www.maff.go.jp/j/tokei/kekka\\_gaiyou/sakumotu/sakkyou\\_kome/siryu/r5\\_siryu/index.html#:~:text=%E7%B4%AF%E5%B9%B4%E3%83%87%E3%83%BC%E3%82%BF-,%E8%AA%BF%E6%9F%BB%E7%B5%90%E6%9E%9C,%E5%89%B2%E3%82%92%E5%8D%A0%E3%82%81%E3%81%A6%E3%81%84%E3%82%8B%E3%80%82](https://www.maff.go.jp/j/tokei/kekka_gaiyou/sakumotu/sakkyou_kome/siryu/r5_siryu/index.html#:~:text=%E7%B4%AF%E5%B9%B4%E3%83%87%E3%83%BC%E3%82%BF-,%E8%AA%BF%E6%9F%BB%E7%B5%90%E6%9E%9C,%E5%89%B2%E3%82%92%E5%8D%A0%E3%82%81%E3%81%A6%E3%81%84%E3%82%8B%E3%80%82) (2026 年 3 月閲覧)

<sup>161</sup> NEDO「再生可能原料アベイラビリティ調査」(2022 年度)

<sup>162</sup> 福島国際研究教育機構、「ソルガムに含まれる有用物質の活用やバイオブタノール製造の技術開発に関する研究」事業概要 [https://www.f-rei.go.jp/assets/contents/240401\\_energy\\_01r.pdf](https://www.f-rei.go.jp/assets/contents/240401_energy_01r.pdf) (2026 年 3 月閲覧)

より、耐寒性や乾燥耐性を強化した品種の開発を進めている<sup>163</sup>。また、トヨタ自動車を中心とする 7 社の連合体は、福島県大熊町でソルガムを栽培してセルロース由来バイオエタノールを製造する実証研究所(次世代グリーンCO<sub>2</sub>燃料技術研究組合)を設置・運営している<sup>164</sup>。

一方、名古屋大学を中心としたグループでは、JST「未来社会創造事業」等のプロジェクトにおいて、ソルガムの生産性を更に高めるために、雑種強勢の遺伝子同定とそれらを利用した迅速な育種技術の確立、超高生産性品種の開発が進められている。また、バイオエタノール等の原料とするには、可溶性の遊離糖(ショ糖、グルコース、フルクトース等)の含量が高いことが有用であることから、糖含量(15%程度)の高いスイートソルガム系統と高バイオマス生産性を組み合わせた新規品種「炎龍」が開発された。これまでに実証栽培が行われ、家畜飼料としての性能(v-score)が高いことが示されているため、まずは家畜飼料用品種としての栽培拡大が期待される。さらに、SAF 生産のための実証栽培、エタノール発酵としての利用のために搾汁や濃縮、発酵等のプロセス開発が進められている<sup>165</sup>。また、成田国際空港の騒音対策用地において、スイートソルガム「炎龍」を栽培し、これを原料とした SAF の地産地消に向けた実証実験も進められている<sup>166</sup>。なお、グルコースやフルクトース等のヘキソースは、ショ糖の結晶化の阻害因子となるため、製糖原料としては不向きであったが、さらに低ヘキソース型の遺伝子も同定しており、近い将来に製糖原料にも適したソルガム品種の開発も期待される。

日本国内において、ソルガムの栽培から飼料としての利用までのサプライチェーンができているため、そこに搾汁、製品製造プロセスを組み込むことで、てんさい産業に類似のバリューチェーン、サプライチェーンの構築も期待される。また、高糖性と高成長性を併せもつ品種に精糖に適した形質を導入することで、温帯地域での製糖産業の創出の可能性が考えられる。

## ②新規資源生産技術の創出

### i)「エネルギーの森事業」

国内森林資源の再生可能なバイオ資源としての利用の難しさを克服するため、NEDO「エネルギーの森事業」が進められている<sup>167</sup>。ここでは、資源生産から燃料チップ生産、バイオマス発電までのサプライチェーン最適化を目指す。特に、再生可能資源とし

<sup>163</sup> 福島国際研究教育機構、「顕微授精法を用いた高効率 CO<sub>2</sub> 固定化植物の研究」事業概要  
[https://www.f-rei.go.jp/assets/contents/240401\\_Energy\\_02.pdf](https://www.f-rei.go.jp/assets/contents/240401_Energy_02.pdf) (2026 年 3 月閲覧)

<sup>164</sup> 次世代グリーン CO<sub>2</sub> 燃料技術研究組合 Web ページ  
<https://rabbit.or.jp/> (2026 年 3 月閲覧)(2026 年 3 月閲覧)

<sup>165</sup> JST「未来社会創造事業」第 3 回公開成果報告会より、「ソルガム雑種強勢の原理説明によって期待される脱炭素社会構築への波及効果」(名古屋大学、神戸大学、信州大学)  
<https://www.youtube.com/watch?v=bYzupetmgMQ> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>166</sup> 成田国際空港プレスリリース、「成田空港で SAF の”千産千消”に向けた取り組みを行います」(2025)

<https://www.narita-airport.jp/files/edc42009fb2b4f4382b009e63578e6c2e9b79a71c7ba12e341e92815134e0dc1> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>167</sup> NEDO「木質バイオマス燃料等の安定的・効率的な供給・利用システム構築支援事業」  
[https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP2\\_100162.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP2_100162.html) (2026 年 3 月閲覧)

て早生樹に着目し、バイオ資源供給を前提とした新たな林業体系の構築を進めている。休耕地等にヤナギ等の早生樹種を植林し、間伐を行わずに、5～10年で皆伐して利用することで機械化も進めつつ、低い生産コストで高い生産性でのバイオマス生産の実現を目指している。今後、国産木質バイオマス燃料の供給拡大に向け、事業の成果等を踏まえ、関係省庁が連携し、地域の農林業との調和を図りつつ、林地残材等の更なる利用に向けた体制構築、各地域に適した早生樹や広葉樹等の育林手法等の実証、適正な再造林等を推進していく。

ii) NEDO「ムーンショット型研究開発事業／遺伝子最適化・超遠縁ハイブリッド・微生物共生の統合で生み出す次世代 CO<sub>2</sub> 資源化植物の開発」<sup>168</sup>

次の三つのコア技術を開発することで、従来比 30%増、各技術を適宜組み合わせることで、従来比 50%増のバイオマス生産性を実現する次世代バイオマス植物の開発を目指すプロジェクトである。

a) ゲノム編集による細胞壁強化技術

ゲノム編集によって細胞壁合成や木質形成を制御する遺伝子の機能を最適化し、木質増強した樹木(強度向上建材の高層木造建築等への利用等)、一次細胞壁強化草本植物(糖化適性、バイオマス生産性の高い植物)等の開発(産業技術総合研究所、住友林業株式会社)

b) 超遠縁ハイブリッド

前述の顕微授精技術を用いた生殖的隔離を乗り越えた交雑種開発の拡大(東京都立大学)

c) 植物の生育を促進する共生微生物の樹木(育苗)、イネ等への応用技術開発、a)あるいは b)と併用することでの生産性の飛躍的な向上(産業技術総合研究所)

iii) 施設園芸に特化した生育特性や生産物品質及び作物残渣の利用性向上等に資する技術開発

農作物の残渣についても再生可能なバイオ資源として期待される。残渣の種類が多さや成分の不均一さ、年間の供給頻度、運搬、集積、糖化やペレット・チップ化のコストや技術的な様々な課題があり、現状では主にすき込みや焼却処分されている。近年、拡大している大規模な施設園芸での野菜や花卉の生産では、年間を通して同じ作物を生産するため露地栽培に比べると均質な残渣を得やすく、バイオ資源としての供給予測も立てやすい。また、液肥栽培やスマート化の進展、果樹等の従来は園芸施設での生産に不適であった作物の適合化等に適した品種開発も施設園芸産業の拡大にとって重要となる。以上のことから、施設園芸での生産物の高付加価値な品質特性とともに、易糖化性等、バイオ資源供給に適した残渣特性を併せもつ専用品種及び栽培技術の開発によって、新

<sup>168</sup> NEDO「ムーンショット型研究開発事業／遺伝子最適化・超遠縁ハイブリッド・微生物共生の統合で生み出す次世代 CO<sub>2</sub> 資源化植物の開発」(国立研究開発法人産業技術総合研究所、東京都立大学、住友林業株式会社)  
<https://www.nedo.go.jp/content/800031031.pdf> (2026年3月閲覧)

たな地域特有の再生可能資源を起点としたバイオ産業の創出につながる可能性が考えられる。また、モジュール化した可搬型の前処理や糖化、チップ化、あるいはバイオガス生産等の装置を開発することもこのような産業の創出に貢献すると考えられる。

### ③工業原料を生産する植物

マツ(ロジン等)<sup>169,170</sup>、カンゾウ(グリチルリチン)<sup>171</sup>等は、重要な植物由来原料であるが、ほぼ輸入に依存している。また、ウルシ(漆)<sup>172</sup>、カクレミノ(黄漆)<sup>173</sup>、クスノキ(樟脳)<sup>174</sup>、ハッカ(ハッカ油)<sup>175</sup>、ワタ(綿)、アサ(麻)、アマ(リネン)等は、植物由来の樹脂や精油、繊維として、かつて大規模に生産されていたか伝統的に利用されてきた。これらを国内の再生可能バイオ資源として生産して活用する産業を創出あるいは再興することで、地域特有の循環型バイオ産業とするポテンシャルが期待される。例えば、カンゾウについては、最新の知見や技術を基にした北海道内での商業栽培化が取り組まれており<sup>176</sup>、よりグリチルリチンの生産性を向上させるための技術開発が求められている。樹木については、前述した早生樹のバイオマス原料用の栽培のように新たな資源樹木生産のための林業を創出することが必要と考えられる。

重要な植物由来工業原料には、パラゴムノキ(天然ゴム)やアブラヤシ(パーム油)等、熱帯地域でのみ栽培される植物に由来するものもある。これらの安定供給を図るためには、パラゴムノキやアブラヤシの持続的、低環境負荷で高効率な栽培技術や育種技術とともに、温帯地域で栽培可能な代替植物の利用技術の開発も重要と考えられる。

以上のようなバイオマス資源植物生産の革新のためには、それぞれの成分の合成、蓄積のメカニズムの解明とその情報を活用した育種、栽培技術の開発、生産された成分の抽出・加工技術の高度化が必要となる。また、余剰糖源等を再生可能資源とした各種植物由来工業原料の培養細胞での生産技術の開発等も注目されている。さらに、生産される原料・製品等の地域特有の価値やブランドの創出も重要となる。

<sup>169</sup> 荒川化学工業株式会社 Web ページ

<https://tsunagu.arakawachem.co.jp/blog/aboutRosin> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>170</sup> ハリマ化成グループ株式会社 Web ページ

[https://www.harima.co.jp/pine\\_chemicals/rosin1.html](https://www.harima.co.jp/pine_chemicals/rosin1.html) (2026 年 3 月閲覧)

<sup>171</sup> 国立研究開発法人医薬基盤・健康・栄養研究所 薬用植物資源研究センター、「令和 6 年度運営評議会」資料

[https://www.nibn.go.jp/introduction/committee/documents/21\\_13\\_2-6.pdf](https://www.nibn.go.jp/introduction/committee/documents/21_13_2-6.pdf) (2026 年 3 月閲覧)

<sup>172</sup> 林野庁、「令和 3 年度 森林・林業白書」

<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r3hakusyo/attach/pdf/zenbun-17.pdf> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>173</sup> 徳島大学、「カクレミノ(Dendropanax trifidus)から有用成分を含む樹脂の調達プロセス構築」

<https://www2.st.tokushima-u.ac.jp/sci-tech/sci-tech2024/SCI-Tech-2/nakamura.pdf> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>174</sup> 林野庁、「林野」(令和 7 年 8 月号(No.221))

<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kouhou/kouhousitu/jouhoushi/attach/pdf/0708-5.pdf> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>175</sup> 株式会社北見ハッカ通商「ハッカの知識」

<https://hakka.be/knowledge/cultivation/> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>176</sup> 王子薬用植物研究所株式会社 Web ページ

<https://oji-yakuyo.jp/> (2026 年 3 月閲覧)

#### ④地域特有の再生可能資源を起点とした循環型バイオ産業構築に向けた研究開発プラットフォーム

農業、林業、施設園芸等での資源生産、発酵等の生産プロセスの高度化、副産物や廃棄物のアップサイクル等におけるプロセスの効率化や低環境負荷化、新規製品の開発等には植物の育種技術の開発・栽培管理技術の高度化、生産性や品質・機能性等の向上に有用な微生物との相互作用の解析、新規微生物(叢)の探索や単離、培養、機能制御、複合微生物系の利用技術の開発等を一体的に進めることが有効と考えられる。例えば国内では、国立研究開発法人産業技術総合研究所 バイオものづくり研究センター<sup>177</sup>において、「バイオリソース解析プラットフォーム」「微生物資源探索プラットフォーム」及び「バイオものづくり研究棟」が整備されており、企業や研究機関等との連携による活用が可能となっている。このようなプラットフォームを活用することで、微生物及び植物の先進的な活用技術の開発による様々な再生可能資源を基盤とした新たな循環型バイオ産業創出が期待される。

### (3)まとめと展望

地域特有の再生可能資源を起点とした循環型バイオ産業は、バイオエコノミー分野の社会課題の解決に向けて、重要な基盤となり得る。しかし、国内のバイオマス供給は未利用資源への依存度が高く、供給量の不安定さ、既存用途との競合、収集・輸送コストの高さなど、産業化に向けた構造的課題が依然として存在する。これらを克服するためには、バイオマス資源を単なる廃棄物の有効利用ではなく、「計画的に生産される地域資源」として位置づけ直し、農業・林業・施設園芸・工業原料植物等、多様な資源生産及びそれらを活用した製造業を含めた産業体系を再構築することが不可欠である。

てんさい、でん粉原料作物、ソルガム、早生樹等、地域ごとに適合した資源ポテンシャルが存在しており、これらを活かした循環型バイオ産業の形成に向けた技術開発や実証が進みつつある。また、施設園芸残渣や伝統的工業原料植物等も地域特有の再生可能資源としての可能性がある。育種技術の高度化、微生物・酵素技術の活用、前処理・糖化・抽出技術の革新、可搬型設備の導入等、資源生産から製品化までの一連のプロセスを地域内で最適化する取組は、輸入原料への依存からの脱却と地域経済の強靱化に寄与する。

今後は、地域資源の特性に応じたサプライチェーン・バリューチェーンの設計とそれを支える制度・インフラ・人材育成の整備が重要となる。特に、労働人口減少の影響が既に顕在化し、今後も進展していくであろう農業分野では、経験の浅い新規参入者や企業等が大規模事業を展開し、成長させられるような環境や制度の整備、技術開発が必要になると考えられる。また、化石資源の代替や化石資源由来製品とのコスト比較といった価値に囚われすぎず、CN・CE・NP の観点を踏まえた地域の再生可能資源や循環型であ

<sup>177</sup> 国立研究開発法人産業技術総合研究所 バイオものづくり研究センター Web ページ  
<https://bprc.aist.go.jp/> (2026年3月閲覧)

ることの高価値化、地域ブランドの創出、企業・自治体・研究機関の連携強化によって、循環型バイオ産業を持続的に成長させるエコシステムの構築が求められる。

地域特有の再生可能資源を基盤とした循環型バイオ産業は、日本のバイオエコノミーの新たな成長へとつながる可能性を秘めている。資源生産から製品化までを地域内で循環させる産業モデル(図 3-6-16;前掲)を確立することで、環境負荷低減と地域経済の活性化を同時に実現する未来に期待したい。

## 3-7 新設定分野

Innovation Outlook Ver. 1.0 増補版では、TSC の所掌する分野を横断する、より広範な視点での調査検討を行った。この節では、その結果抽出された「新設定分野」について、[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について記載する。

### [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)を組み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<sup>178</sup>。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。

<sup>178</sup> Responsible innovation in neurotechnology enterprises  
[https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/10/responsible-innovation-in-neurotechnology-enterprises\\_2d346c46/9685e4fd-en.pdf](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)

本節は、TSC が策定した Innovation Outlook Version 1.0 に基づき、特に人々の「多様な幸せ(ウェルビーイング)」の実現に不可欠なブレインテック・ニューロテックに着目し、それによって解決しうる社会課題の特定を行った。

ブレインテック・ニューロテックには、BMI(Brain Machine Interface:ブレイン・マシン・インターフェース)、脳・神経刺激デバイス、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ことが可能な技術であり、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。

我が国は世界で最も高齢化が進んだ国の一つであり、認知症やパーキンソン病などの脳・神経系疾患を抱える患者数が増加し、今後も増加していくと推計されている(図 3-7-1-1)<sup>179</sup>。ブレインテック・ニューロテックは、こうした疾患の早期診断、症状の緩和、リハビリテーションの効率化に貢献することが可能であり、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。

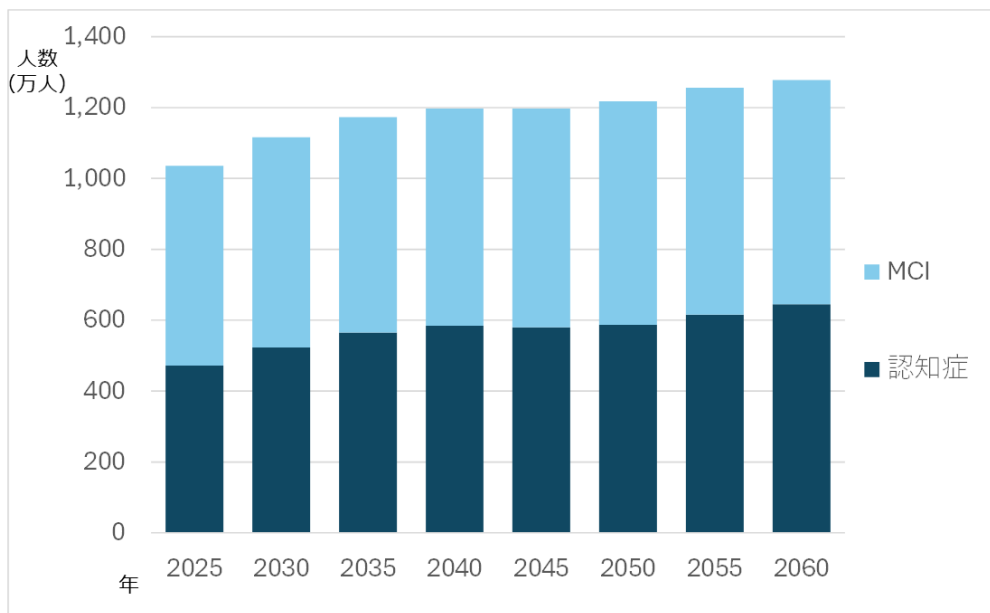


図 3-7-1-1 我が国における認知症及び MCI 患者数の将来推計

MCI:Mild Cognitive Impairment(軽度認知障害)

出所:認知症及び軽度認知障害の有病率調査並びに将来推計に関する研究報告書(九州大学)をもとに NEDO TSC 作成

TSC は、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」』で「実現すべき 12 の社会像」をまとめた。このうちブレインテック・ニューロテック領域は、日常生活のウェルビーイング実現に焦点を当てた以下の社会像の実現に大きく寄与する(図 3-7-1-2)。

<sup>179</sup> 認知症及び軽度認知障害の有病率調査並びに将来推計に関する研究

<https://www.eph.med.kyushu-u.ac.jp/jpsc/uploads/resmaterials/0000000111.pdf> (2026 年 3 月閲覧)

- ・「誰もが潜在能力を発揮し自己の理想を実現できる社会」:  
個々人がもつ潜在能力を最大限に引き出し、自己実現を可能にする社会。
- ・「誰もが無理なく働き続けられる社会」:  
高齢化や障害にかかわらず、社会活動や仕事に参画し続けられる社会。
- ・「快適で活力に満ちた社会」:  
デジタル技術の進化により、個人の生活の質(QOL)と活力を向上させる社会。

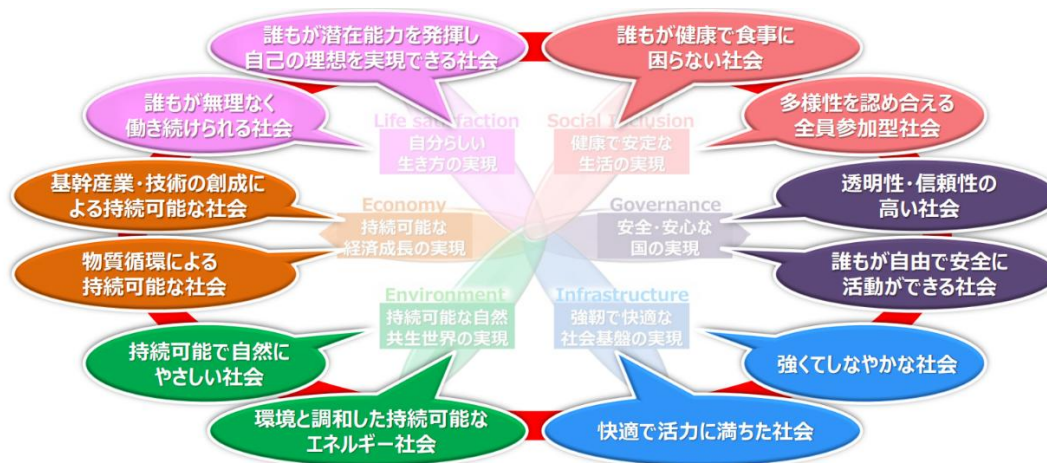


図 3-7-1-2 実現すべき 12 の社会像

出所: ノベーションの先に目指すべき「豊かな未来」(NEDO TSC、2021)

ウェルビーイングの実現に向けてブレインテック・ニューロテック領域が貢献すべき主要な社会課題は、Innovation Outlook Version 1.0 のデジタル分野及びバイオエコノミー分野に記した「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」そして「健康寿命の延伸」である。

特に、労働人口の減少は社会システムが機能しなくなるリスクをもたらし、国の産業競争力の低下のみならず、環境への影響やウェルビーイングの低下、社会インフラの脆弱化などのリスクとなる。ブレインテック・ニューロテックは、以下の課題解決に貢献する。

- ・労働力不足への対応:  
「自動化・省人化・デジタル化」を推進し、人が行っていた作業をロボットや AI エージェントが代替すること、あるいは労働人口を増やす代替手段を構築する。
- ・機能の回復・補てつ:  
運動や発話等の脳・神経が担っている機能の回復・補てつによって、健康寿命の延伸を可能にする。
- ・学習効率や生産性の向上:  
パーソナル AI の活用等により、「個々に最適な学習環境」や「集中力を向上できる環境」を提供し、学習効率や労働生産性を向上する

### 3-7-3[1] 社会課題の解決に向けて取り組むべき領域(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

上記の社会課題を解決するためのブレインテック・ニューロテックは、Innovation Outlook Version 1.0において、デジタル分野及びバイオエコノミー分野が特定した取り組むべき重点領域と強く関連する。今回両者を統合し、『ブレインテック・ニューロテック』領域のMFモデルとしてまとめた(図3-7-1-3)。

デジタル分野では、『自動化・省人化・デジタル化』を取組むべき重要な領域として特定しており、それを実現する具体的な手段として、協働型多機能自律ロボットの開発を挙げている。このロボットは「バーバル及びノンバーバルなコミュニケーション」により人と協働することが想定され、「指示を理解し、計画実行して、複雑な問題を解決する自律型のAI」であるAIエージェントが重要な役割を担うことが期待されている。そのためには身体機能を用いて実施する作業を代替するロボットとの連携を深め、日常生活や現場作業の効率化と機能拡張を図ることが必要で、これにはBCI(Brain Computer Interface:ブレイン・コンピュータ・インターフェイス)やBMIも含まれる。

また、バイオエコノミー分野のフロンティア領域候補の一つとして特定されている「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」は、このブレインテック・ニューロテックの基盤となる。この領域は、ヘルスケアエコノミーへの貢献が期待されているが、その本質は腸内環境も含む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ータの取得を支援する。

以上の事項を踏まえると、デジタル分野の「自動化・省人化・デジタル化」、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」がブレインテック・ニューロテックを介して融合することで、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、人機協働が実現し、ウェルビーイングの向上と社会のレジリエンス強化につながるものと考えられる。

そこで、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3-7-1-3)

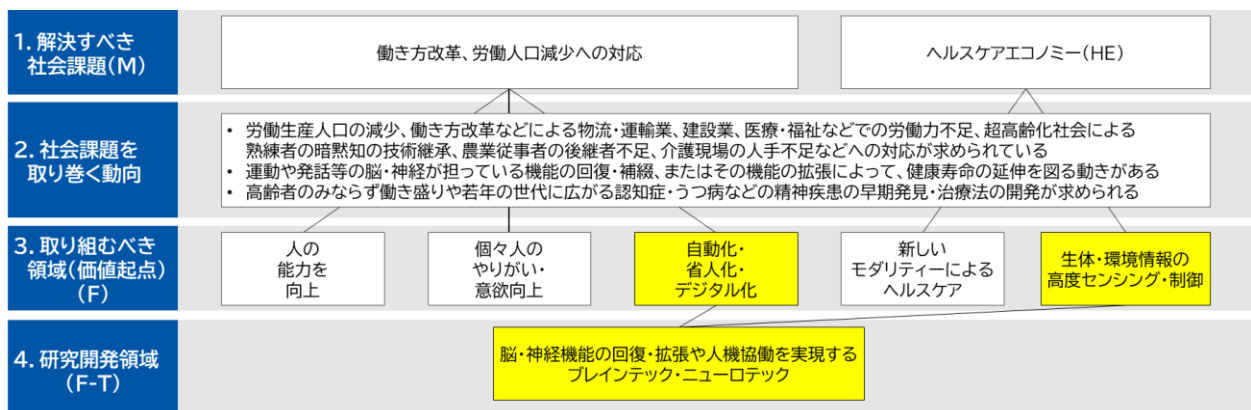


図3-7-1-3 「ブレインテック・ニューロテック」領域のMFモデル

ブレインテック・ニューロテックは、図 3-7-1-4 に示すような、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である。その周辺には、図 3-7-1-5 に示すように、脳基盤モデルや脳オルガノイド・ニューロモルフィックコンピューティングを含む範囲まで応用が進むことが期待されている。すでに、医療への応用にとどまらずマーケティング、人材育成、意思決定支援を含む企業活動全般への応用が試みられている。

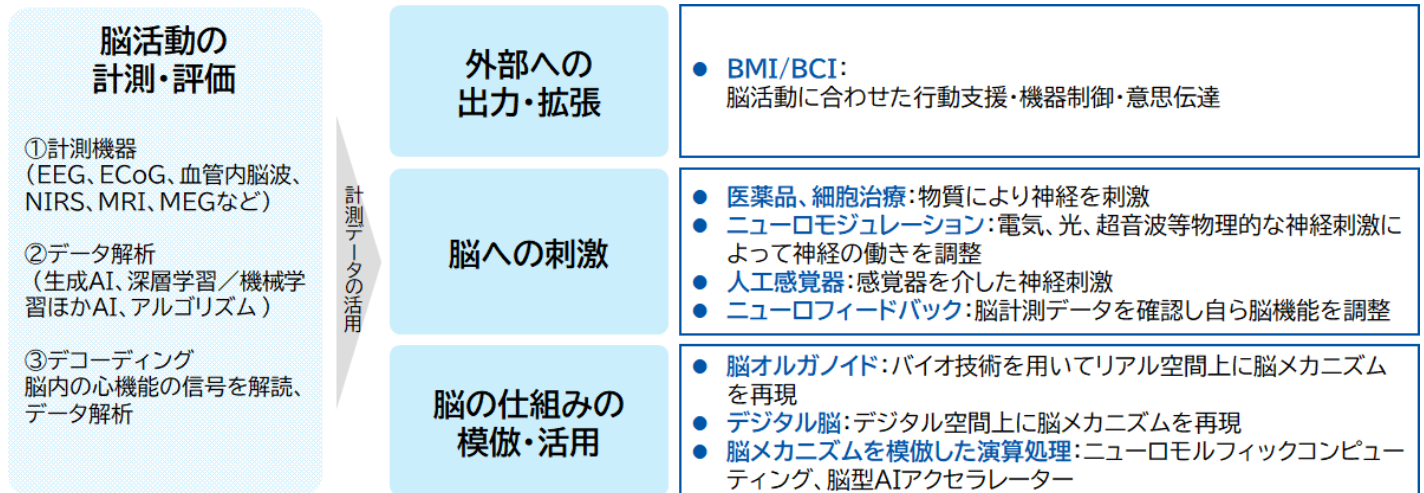


図 3-7-1-4 ブレインテック・ニューロテックの技術分野

出所:ブレインテック最新動向 2024(日本総研)<sup>180</sup>、脳神経機能の理解に基づく、応用技術(ブレインテック/ニューロテック)の研究開発の潮流と展望(JST 研究開発戦略センター)<sup>181</sup>を基に NEDO TSC 作成

<sup>180</sup> <https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=107231> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>181</sup> <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-XR-01.html> (2026 年 3 月閲覧)

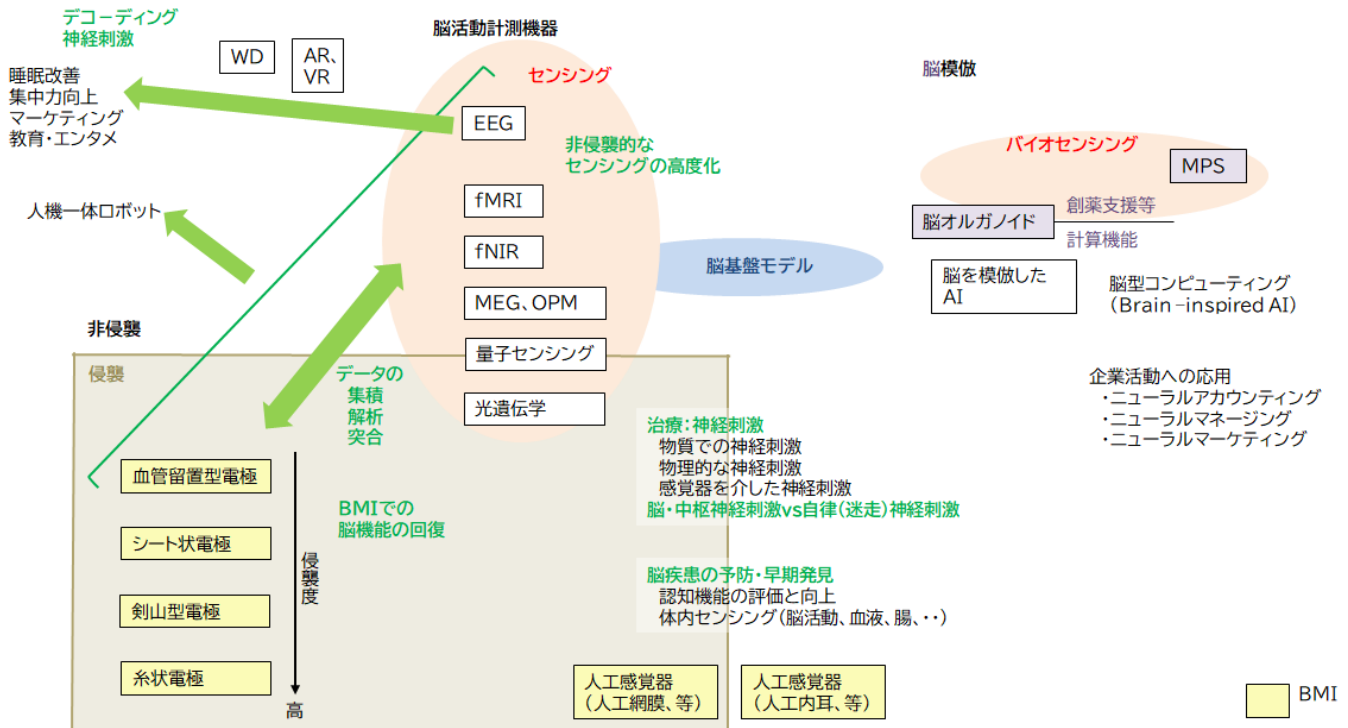


図 3-7-1-5 周辺領域を包含したブレインテック・ニューロテックの技術分野

注)WD:Wearable Device(ウェアラブルデバイス)、AR:Augmented Reality(拡張現実)、  
 VR:Virtual Reality(仮想現実)、EEG:Electroencephalography(脳波)、  
 fMRI:functional Magnetic Resonance Imaging(機能的核磁気共鳴画像法)、  
 MEG:Magnetoencephalography(脳磁図)、  
 OPM:Optically Pumped Magnetometers(光ポンピング磁気センサー)、  
 MPS:Microphysiological System(生体模倣システム)

### 3-7-4[1] 取り巻く国内外の市場・技術・政策動向

#### (1) 市場動向

ブレインテック・ニューロテックは脳や神経を対象とする技術全般を指す用語であり、その応用は医療にとどまらずマーケティング、人材育成、意思決定などの活動やゲーム等の生活全般に及び非常に広範な市場が想定されている。未来には、生成 AI と同様に、人々の生活に欠かせない技術となる可能性を秘めている。

歴史的には、2000 年前後から米・欧・日を中心に脳科学に関する国家プロジェクトが開始され、並行して脳波計や MRI、PET などの測定機器が開発されてきた。

これらの研究開発の出口として、まず医薬品が挙げられる。精神疾患用の医薬品は多数開発されてきてはいるものの、薬効等は個人差が大きく、個人に適する医薬品を選定するのに時間がかかっている状況である。これがブレインテック・ニューロテックの進展によって個人に適する医薬品が事前検査等ですぐにわかるようになると、患者の QOL 向上につながり、服薬のコンプライアンスも向上すると考えられる。

次に医療機器が挙げられる。脳波計、MRI、MEG などの機器が開発され、医療現場での実用に供されている。事故等で脳が損傷を受けた患者または ALS(筋萎縮性側索硬化症)やパーキンソン病等が原因で身体が麻痺した患者の脳での思考を読み取り、外部機器を使用した意思伝達や神経刺激による運動機能等の回復・改善が試みられている。さらに、脳・神経への刺激伝達の方法として、神経細胞への電氣的刺激や視覚・聴覚を介した光・音での刺激が実用化されている。

脳研究により人の意思決定機構や嗜好形成過程の解明がなされつつあり、ビジネスでのマーケティングや意思決定支援に応用する動きもある。

これらの市場規模は図 3-7-1-6 のようにまとめられる。



図 3-7-1-6 想定市場の予想される成長(市場規模、年、CAGR:年平均成長率を示した)

出所:脳神経機能の理解に基づく、応用技術(ブレインテック/ニューロテック)の研究開発の潮流と展望<sup>182</sup>  
(CRDS、2024)及び各種調査資料を基に NEDO TSC 作成

<sup>182</sup> <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-XR-01.html> (2026 年 5 月閲覧)

また、その成長過程を考察すると以下のとおりとなる。

まず、初期には非侵襲的な計測データを基にした睡眠改善・集中力向上や人と機械のシームレスな協働(人機一体のコントロール)等での市場が確立していき、次に、より高度な非侵襲でのセンシング機器及びエンタメ等の非医療やヘルスケア産業における用途拡大が見込まれる。また、脳基盤モデルの社会実装が実現すれば、運動や言語の機能の回復・補てつにとどまらず、情緒安定や意思決定への科学的な知見を提供できることが期待される。さらに脳を模倣した計算機(ニューロモルフィックコンピューティング)は圧倒的な低消費電力を実現できるため、ゲームチェンジャーになりえる。

以上を総合すると、ブレインテック・ニューロテックの市場規模(世界)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(図3-7-1-7)。

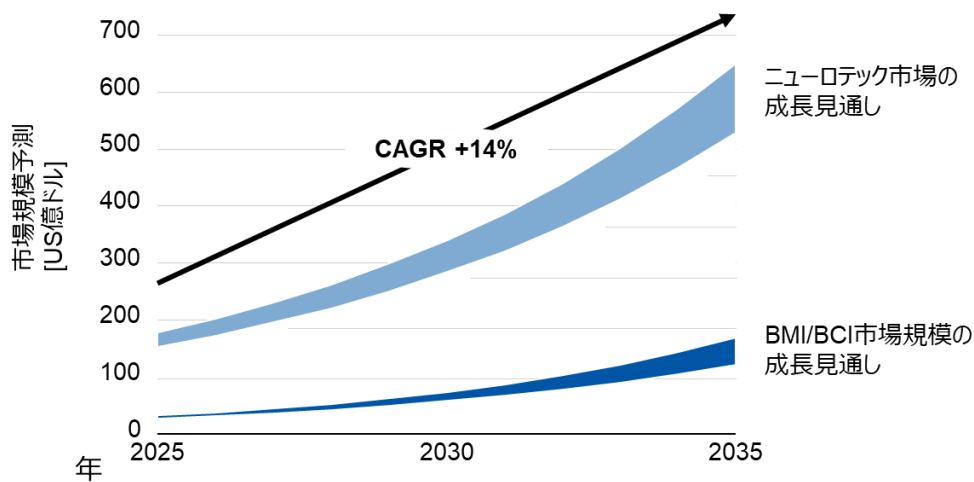


図3-7-1-7 脳・神経関連市場(世界)の成長見通し

## (2) 技術動向

研究論文数は 1990 年以降右肩上がりに増加している(図 3-7-1-8)。

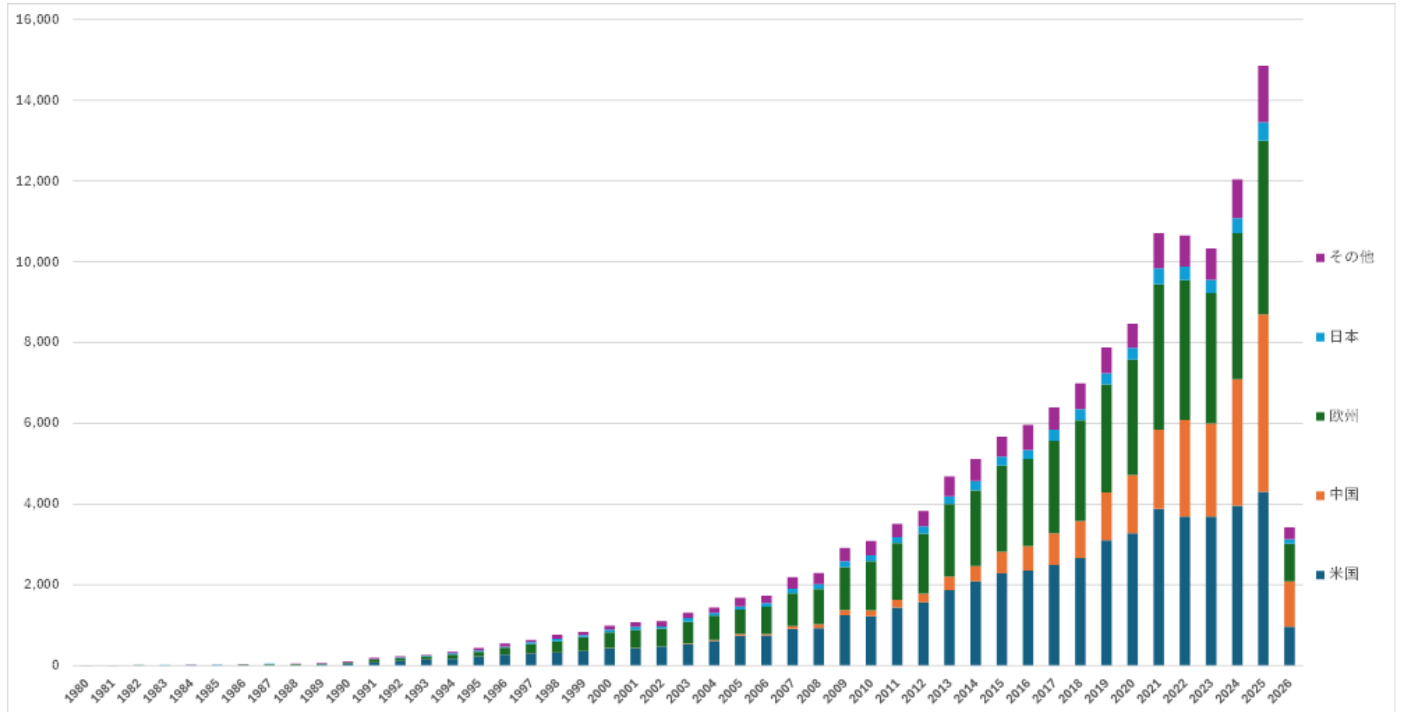


図 3-7-1-8 脳神経科学関連論文数の推移

出所: Web of Science™での検索結果を基に NEDO TSC 作成

検索式(総説は除外): (neuromonitoring OR neuroimaging) OR ((BCI AND “brain-computer interface”) OR (BMI AND “brain-machine interface”)) OR (NeuroFeedback) OR (“Cognitive Assessment” OR “Cognitive Enhanc\*”) OR (NeuroModulation) OR (Organoid AND (Brain or neur\*)) OR (“Brain inspired” and compu\*) OR (“foundation model” AND (Brain or neur\*)) OR (decoding AND brain)、

検索日: 2025/10/30、検索件数: 138,214 件

順位	国/地域	件数	分野	論文数	構成	日本		
						論文数	割合	順位
1	USA	54,252	Neuromonitoring/ Neuroimaging	78,277	52%	3,0332	3.9%	11
2	PEOPLES R CHINA	22,465	Cognitive Assessment & Enhancing	21,073	14%	660	3.1%	8
3	ENGLAND	13,145	Neuro Modulation	18,952	13%	477	2.5%	14
4	GERMANY	12,138	<b>BCI/BMI</b>	<b>13,353</b>	<b>9%</b>	<b>825</b>	<b>6.2%</b>	<b>5</b>
5	CANADA	9,366	<b>Decoding</b>	<b>9,784</b>	<b>7%</b>	<b>482</b>	<b>4.9%</b>	<b>5</b>
6	ITALY	8,545	Neurofeedback	4,253	3%	196	4.6%	8
7	FRANCE	5,798	<b>Brain organoid</b>	<b>2,149</b>	<b>1%</b>	<b>161</b>	<b>7.5%</b>	<b>4</b>
8	<b>JAPAN</b>	<b>5,688</b>	Brain-inspired computing	2,126	1%	100	4.7%	9
9	AUSTRALIA	5,486	Brain foundation model	466	0%	7	1.5%	15
10	NETHERLANDS	5,332						
11	SPAIN	5,233						
12	SOUTH KOREA	4,235						
13	SWITZERLAND	4,173						
14	INDIA	4,075						
15	BRAZIL	2,714						
16	BELGIUM	2,452						
17	SWEDEN	2,332						
18	TAIWAN	1,936						
19	AUSTRIA	1,894						
20	SINGAPORE	1,656						

図 3-7-1-9 脳神経科学関連論文数の国別及び分野別のシェア

出所:Web of Science™での検索結果を基に NEDO TSC 作成

国別で比較した場合、米中が本分野をけん引しており、日本は全体では 8 位に位置する。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、存在感を発揮している(図 3-7-1-9)。これらの分野は比較的日本の優位性があると考えられる。

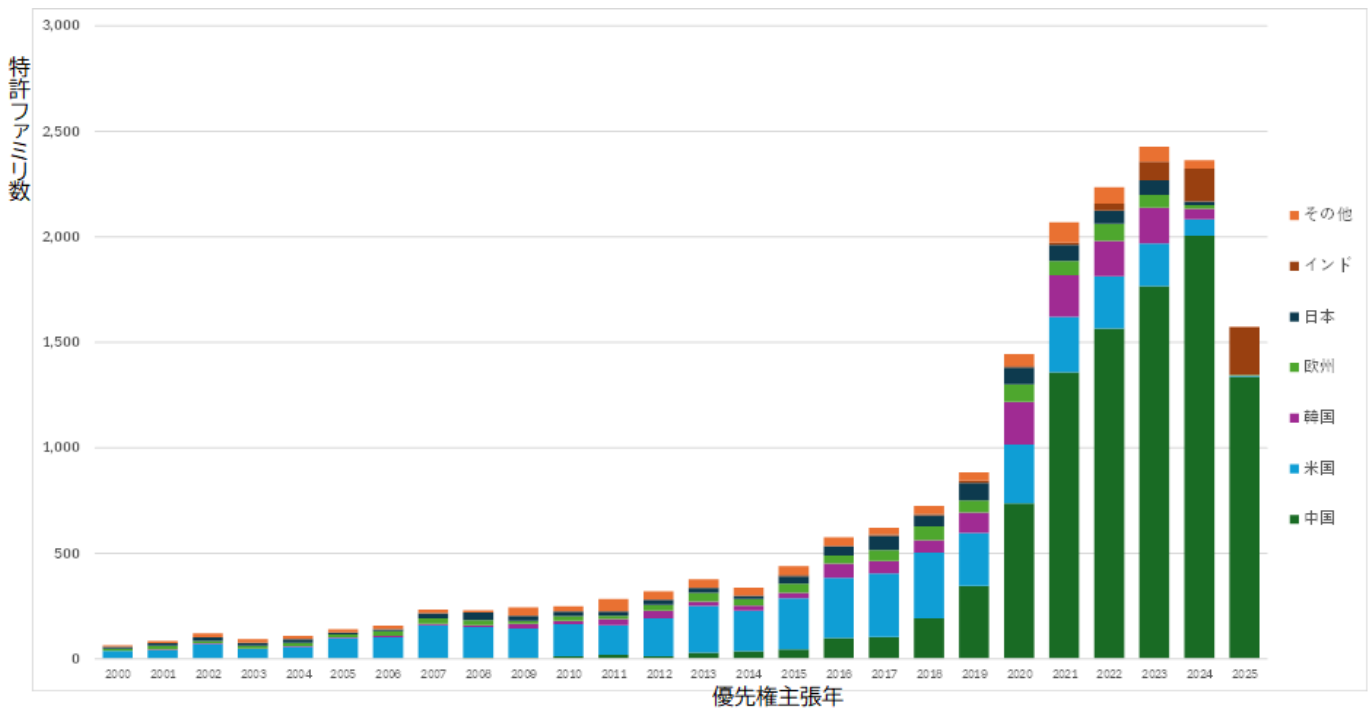


図 3-7-1-10 計測機器 (EEG、MRI、NIR、MEG) に関する特許件数推移

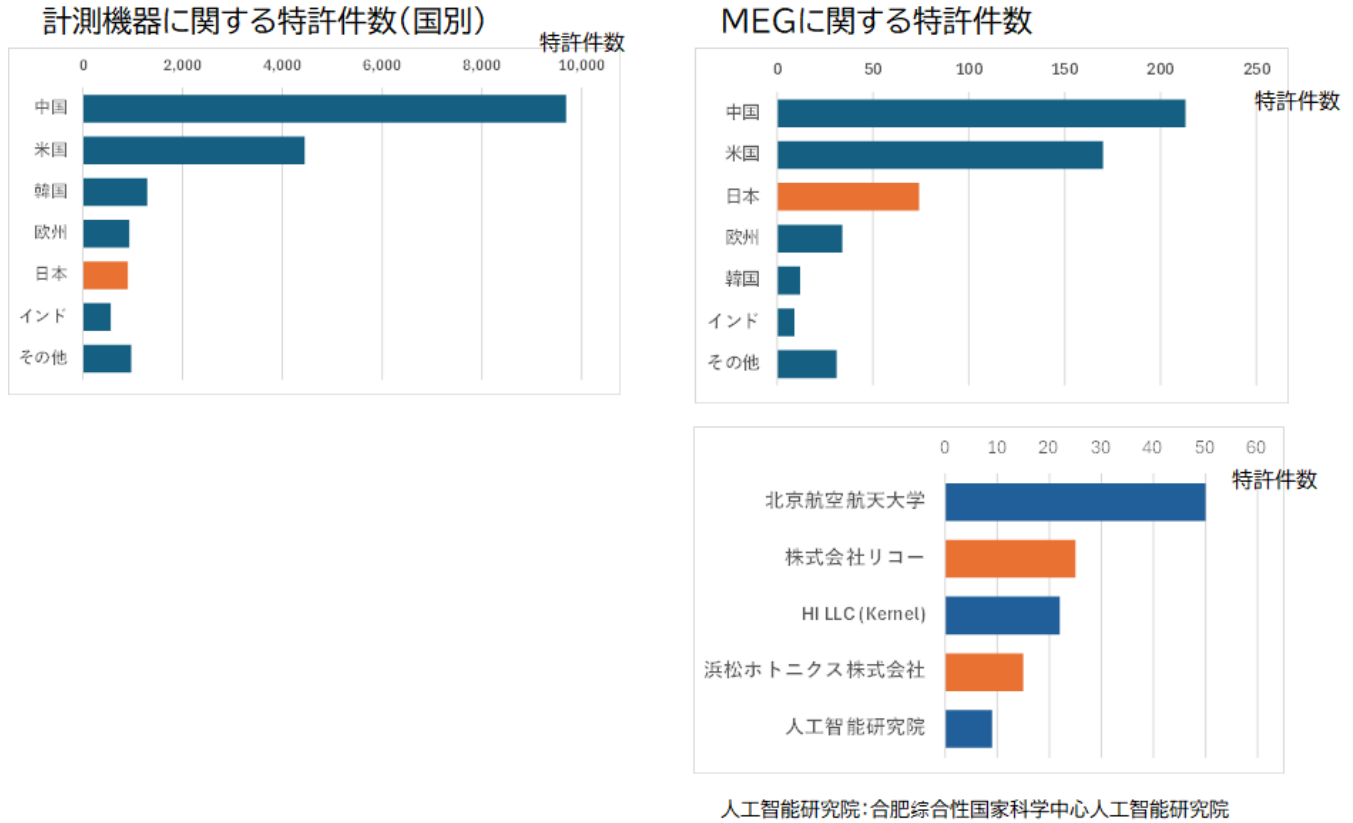
出所: Derwent Innovation™ での検索結果を基に NEDO TSC 作成

検索式: (IC=((A61B0005369 OR A61B000537 OR A61B0005372 OR A61B0005374 OR A61B0005375 OR A61B0005377 OR A61B0005378 OR A61B000538 OR A61B0005381 OR A61B0005383 OR A61B0005384 OR A61B0005386)) OR ((A61K004906 OR A61K004908 OR A61K004910 OR A61K004912 OR A61K004914 OR A61K004916 OR A61K004918 OR A61K004920)) OR ((A61B00051455 OR A61B00051459 OR A61B00051464)) OR ((A61B0005245 OR A61B0005246))) AND DP>=(18360101)) AND (CTB=(Brain OR Neur\* OR "nervous system"))

検索日: 2025/11/26、検索件数: 18,800 件

EEG、MRI、NIR、MEG に関する特許出願数の推移を図 3-7-1-10 に示した。右肩上がりに増加しているが、特に 2019 年から 2021 年にかけて急増し、その傾向が続いている。

国別で比較した場合、日本は5位であるが、特にMEGでは3位に位置し、リコー及び浜松ホトニクスが特許件数上位に位置し、存在感を発揮している(図3-7-1-11)。



**図3-7-1-11 計測機器に関する国別特許件数とMEGに関する特許件数**  
 出所:Derwent Innovation™での検索結果を基に NEDO TSC 作成 検索条件は図3-7-1-10と同じ

### (3) スタートアップ(SU)の動向

図 3-7-1-12 は、ブレインテック・ニューロテック関連のスタートアップ(SU)をマッピングしたものである。背景がピンクの領域は医療向けの開発を行っている SU、白い領域は広く産業界向け、生活者向け等の製品・サービスの開発・事業を行っている SU である。また、青破線上部は非侵襲的アプローチ、青破線下部は侵襲的アプローチを採用している SU を配置した。各国・地域ごとに色分けしている。

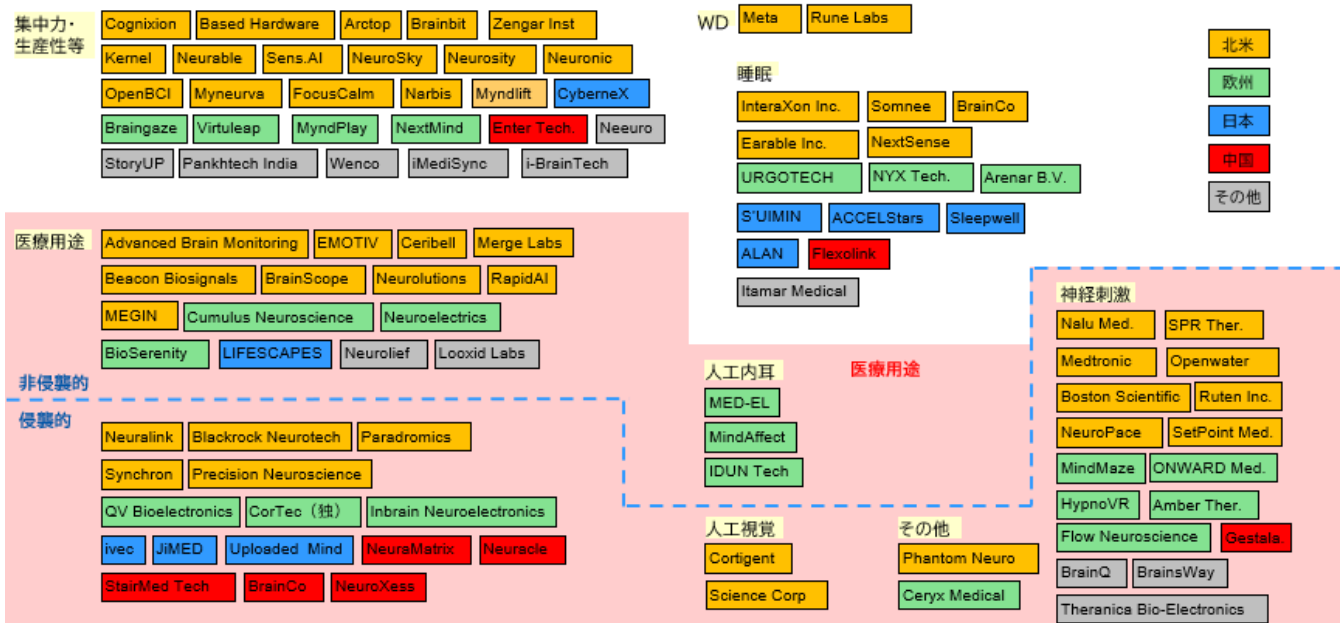


図 3-7-1-12 ブレインテック・ニューロテック領域のスタートアップ

出所:2026年3月27日時点の主な公開事例を基に NEDO TSC 作成

米国の Neurable 社、Neuroosity 社や中国(香港)の Enter Technology 社は計測した脳波データから適切なフィードバックを実施することにより、集中力や生産性を高めるサービスを提供している。イスラエルの i-BrainTech 社はスポーツ選手のメンタルコントロールに特化したサービスを提供しており、オーストラリアの Wenco 社(日立建機社の子会社)は工事作業員の安全管理のサービスを行っている。北米の SU が多いなか、日本の CyberneX 社<sup>183</sup>は耳に装着して脳波を取得できる次世代型デバイスを開発しており、消費者調査において商材がもたらすリラックス度を定量的に可視化したり、職場環境の改善に利用できる。

睡眠改善サービスに関しても、非侵襲で脳波計測データを取得できるため多数の SU が参入している。米国の Somnee 社や英国の NYX Technologies 社はヘッドバンド型、米国の NextSense 社はイヤホン型でのデバイスで脳波を測定・推定し、睡眠改善を図るサービスであり、測定にとどまらず音を流して睡眠改善を図るサービスもある。

<sup>183</sup> <https://www.cybernex.co.jp/> (2026年3月閲覧)

日本では S' UIMIN 社<sup>184</sup>、ACCELStars 社<sup>185</sup>、SleepWell 社<sup>186</sup>等がサービスを開始している。

英国の MyndPlay 社は VR 対応デバイスによってゲーム・音楽等を操作することでユーザーが自身でのマインドコントロールが可能となるプラットフォームを開発している。

Amazon 社関連の Alexa Fund 等が出資している Cognixion 社<sup>187</sup>は Axon-R というヘルメット型のデバイスを開発している。このデバイスは、拡張現実(AR)ディスプレイを有しており、EEG の計測や眼球の動きを追跡する機能を備えている。ユーザー(ALS 患者)は思考と視線の動きでタイピングした単語をスピーカーから送ることができ、Apple 社の Vision Pro と連携して ALS 患者での臨床試験が行われている<sup>188</sup>。また、より簡便に WD(ウェアラブルデバイス)で脳波を推測するサービスも立ち上がっている。

医療現場では非侵襲的な計測が行われているほか、治療や機能回復・補てつを目的とした侵襲的な計測・措置も研究されており、一部臨床試験が開始されている。

2025 年 6 月に Neuralink 社がシリーズ E の資金調達ラウンドで 6 億 5,000 万ドル(約 930 億円)を集めた<sup>189</sup>ことが大きく報道された。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目標のことである。その場合、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ない。非侵襲での計測では、空間的分解能(脳のどの部分で神経活動が行われているか)や時間的分解能(神経活動が行われてからどのくらいの時間で測定できるか)の点で、侵襲的な計測にはかなわない。したがって、脳機能の補てつを目指す SU は侵襲的な計測を志向する傾向にあり、その分野での SU を図 3-7-1-13 にまとめた。計測方法の侵襲度の程度で整理している。

Blackrock Neurotech 社が開発した剣山型電極(ユタアレイ)<sup>190</sup>は FDA に最初に承認された BCI 電極であり、BCI 研究の主流となってきた。導電性金属でコーティングされた小さな針が 100 本突き出た、硬いシリコン製の電極アレイは、侵襲性が高い。近年では、侵襲性がより低い電極の開発が進展している。

この中で、Synchron 社<sup>191</sup>は脳内の静脈に留置できる電極の開発を行っている。また、シート状の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、

<sup>184</sup> <https://www.suimin.co.jp/> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>185</sup> <https://accelstars.com/> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>186</sup> <https://www.sleepwell.co.jp/> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>187</sup> <https://www.cognixion.com/> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>188</sup> Apple Vision Pro と BCI を連携——“考えるだけで意思を伝える”臨床試験へ

<https://wired.jp/article/this-startup-wants-to-put-its-brain-computer-interface-in-the-apple-vision-pro/> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>189</sup> マスク氏のニューラルリンク、6.5 億ドル集める—最新の調達ラウンド

<https://www.bloomberg.com/jp/news/articles/2025-06-03/SX9749T0AFB400> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>190</sup> Utah Array <https://blackrockneurotech.com/products/utah-array/> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>191</sup> <https://synchron.com/> (2026 年 3 月閲覧)

Precision Neuroscience 社<sup>192</sup>や JiMED 社<sup>193</sup>で開発中である。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もっており<sup>194</sup>、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。

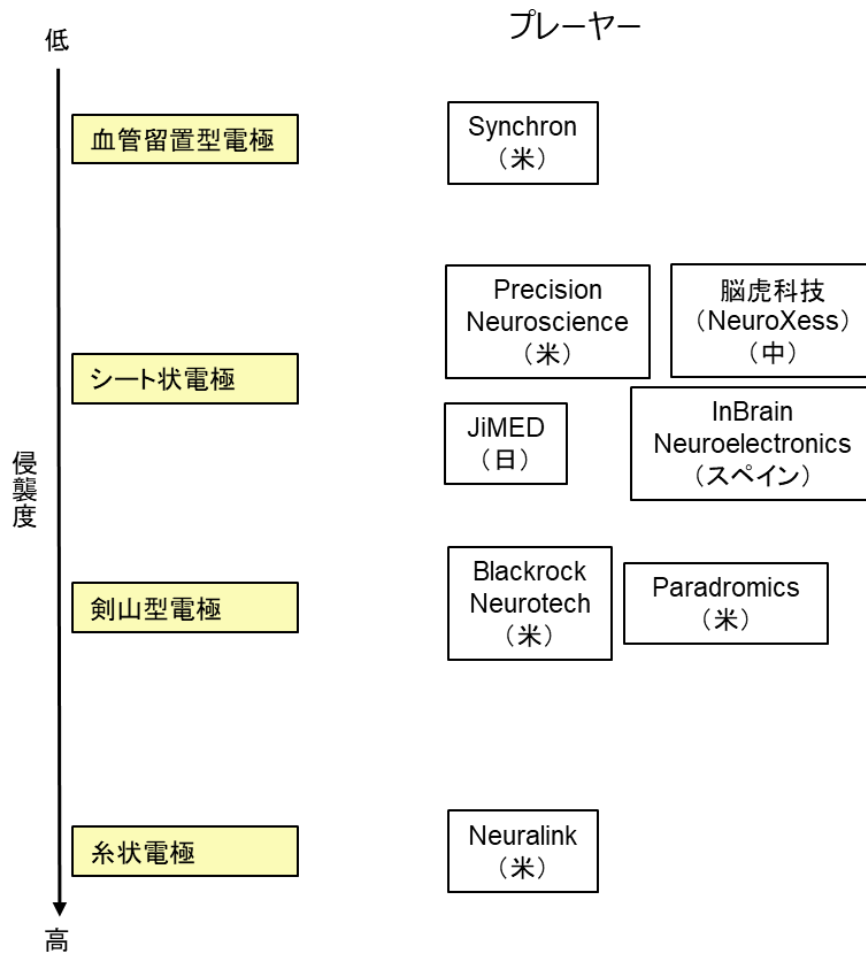


図 3-7-1-13 侵襲的な BCI/BMI を開発中の SU

出所:各社公開資料を基に NEDO TSC 作成

<sup>192</sup> <https://precisionneuro.io/> (2026年3月閲覧)

<sup>193</sup> <https://www.jimed.jp/> (2026年3月閲覧)

<sup>194</sup> 未来の AI 計算システムを支える光データ通信技術～ ネットワークアーキテクチャーから光デバイス材料まで ～ (CRDS,2025)

<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2025/SP/CRDS-FY2025-SP-07.pdf> (2026年3月閲覧)

## (4) 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、1990年にブッシュ大統領が1990年から1999年を「Decade of the Brain: 脳の10年」と宣言した。その後NIH(National Institutes of Health: アメリカ国立衛生研究所)を中心に「Brain Initiative(2013-2025)」「SPARC(2015～継続中)<sup>195</sup>」で、身体と脳との相互作用を理解し治療へ応用するプロジェクトを継続している。またDARPA(Defense Advanced Research Projects Agency: 国防高等研究計画局)は2000年代後半よりBCI/BMI開発へのプロジェクトを拡大し、Nuralink社やSynchron社の基礎技術の開発が行われた。また2018年に開始された「Next-Generation Nonsurgical Neurotechnology<sup>196</sup>」においては健康者向けの非侵襲BMIの開発を目指している。(図3-7-1-14)

#### DARPA's Brain-Computer Interface Programs

On average, DARPA has funded a new multi-million dollar neural interface R&D program every year for the last two decades

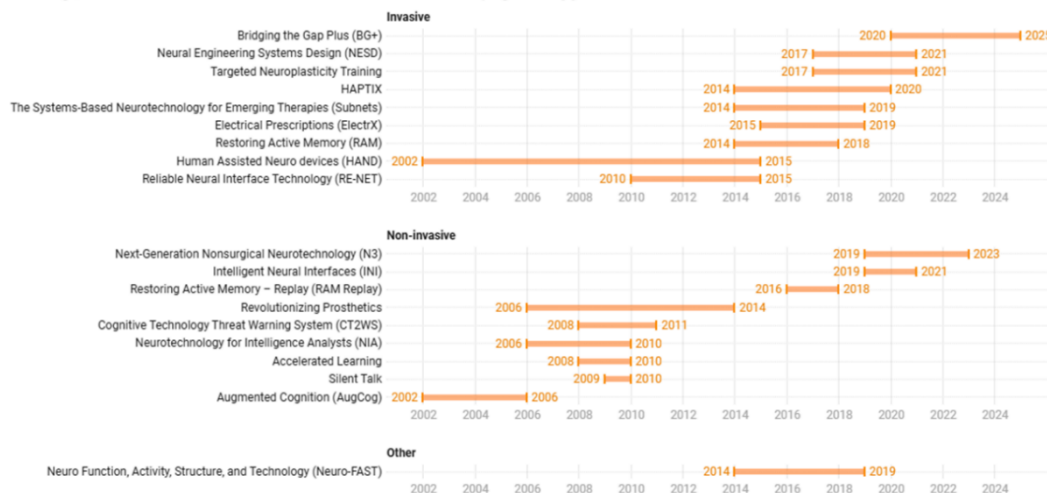


Chart: Pooja Rao • Source: News reports and DARPA's website • Created with Datawrapper

図3-7-1-14 DARPAのBMI関連研究プロジェクト一覧

出所: How DARPA drives Brain Machine Interface Research<sup>197</sup>

欧州は Human Brain Project(2013-2023)<sup>198</sup>として、ヨーロッパ内外の数百人の研究者による10年間にわたる集中的で影響力のある学際的研究を実施した。その結果、脳の3Dアトラス、個別化脳医療における画期的進歩、そして人工知能やニューロモルフィック・コンピューティングといった脳に着想を得た新たな技術の開発がなされた。脳医療の面では、視覚回復を目的とした視覚障害者向け視覚インプラントや、麻痺患者

<sup>195</sup> SPARC — bridging the body and the brain

<https://sparc.science/> (2026年3月閲覧)

<sup>196</sup> N3: Next-Generation Nonsurgical Neurotechnology

<https://www.darpa.mil/research/programs/next-generation-nonsurgical-neurotechnology> (2026年3月閲覧)

<sup>197</sup> <https://www.from-the-interface.com/DARPA-funding-BCI-research/> (2026年3月閲覧)

<sup>198</sup> Human Brain Project

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

の歩行再開向けの神経刺激技術などが挙げられる。現在は EBRAINS<sup>199</sup>という分子レベルや細胞レベルから臓器全体に至るまで、脳関連の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『第13次五か年計画』(2016年～2020年)で脳機能の解明(脳認知)、脳疾患研究、人工知能の発展を課題として設定した。続く『第14次五か年計画』(2021年～2025年)では人工知能と脳科学が戦略的科学技術分野として示され、BCIもその重要なコア技術として位置づけられた。最近では2025年7月に発表した国家戦略(7部門の意見書)<sup>200</sup>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目標』(目標1、2、7、9)にてブレインテック・ニューロテック関連の研究プロジェクトを実施している。文部科学省では、「革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト(革新脳)」「戦略的国際脳科学研究推進プログラム(国際脳)」などのプロジェクトを、2021年度に「脳とこころの研究推進プログラム」に統合し、2024年度からは「脳神経科学統合プログラム」として推進されている。

## (ii) 倫理的な側面の取組

2000年ごろから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<sup>201</sup>。これは1990年代に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学術分野である。

近年、脳・神経活動を記録する装置の低侵襲化、軽量化、小型化の進展とAIの高度化により、ブレインテック・ニューロテックの実用可能性が向上し、社会実装に向けた研究開発・事業開発が加速している。また、ブレインテック・ニューロテック関連企業への投資は2014年から2021年の間に700%増加した<sup>202</sup>。このような研究活動や事業化の急激な拡大に伴い、国際的に研究開発・事業開発のガバナンス構築に向けた国際的な動きがみられる。

ブレインテック・ニューロテックには、神経系に直接作用して測定、調節、刺激を与えるツールが含まれる。医療分野での使用は厳しく規制されているものの、他の分野ではほとんど規制されていない。多くの消費者は、心拍数、ストレス、睡眠をモニタリングするために神経データを使用する接続型ヘッドバンドやヘッドフォンなどの一般的なデバイス

<sup>199</sup> Europe's Digital Infrastructure for Brain Research  
<https://ebrains.eu/> (2026年3月閲覧)

<sup>200</sup> 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/zwgk/zcwj/wjfb/yj/art/2025/art\\_ea3ff408de194612891df352d24dd26a.html](https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/yj/art/2025/art_ea3ff408de194612891df352d24dd26a.html) (2026年3月閲覧)

<sup>201</sup> 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](https://www.mext.go.jp/content/20250627-mex.life-000043435_9.pdf) (2026年3月閲覧)

<sup>202</sup> Unveiling the neurotechnology landscape: scientific advancements innovations and major trends (UNESCO)

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386137> (2026年3月閲覧)

介して、この技術を知らずに使用している。この非常に機微性の高いデータは、思考、感情、反応を明らかにする可能性があり、同意なしに共有される可能性がある。

脳・神経活動を取り扱うブレインテック・ニューロテックは、人体への安全性、神経活動データの取扱い、プライバシー保護、人権への影響、Dual Use への対応、人間のアイデンティティへの影響等、科学に問うことはできるが科学では答えられない領域の課題を含有している。これらの課題解決には政策的なアプローチが必要であることから、国際的なガバナンスの構築や国際ルールの策定とその順守に向けた動きが加速している。

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<sup>203,204</sup>。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。勧告のなかでは、各国政府に対して、脳神経技術を規制しアクセス性を確保し、特に子どもや労働者といった脆弱なグループを保護するよう求めている。また、若者への非治療目的の使用を禁止するよう強く求め、明確な同意なしに従業員の精神活動や生産性を監視することに対して警告を発している。さらに、行動を変えたり依存症を助長したりする可能性のある製品について、透明性の向上と規制強化の必要性を強調している。

また、OECDはニューロテクノロジーにおける責任あるイノベーションに関する勧告を採択した<sup>205</sup>。この勧告は、政府とイノベーターが、イノベーションを促進しつつ、新たな健康関連ニューロテクノロジーによって生じる倫理的・法的・社会的課題を予測し、対処するための指針となることを目的としており、以下の9原則で構成されている。

- 1) 責任あるイノベーションを促進する
- 2) 安全性評価を優先する
- 3) 包摂性を促進する
- 4) 科学的協力を促進する
- 5) 社会的な審議を可能にする
- 6) 監督機関及び諮問機関の能力を強化する
- 7) 個人の脳データ及びその他の情報を保護する
- 8) 公共部門と民間部門全体にわたって、管理と信頼の文化を促進する
- 9) 意図しない使用や誤用の可能性を予測し、監視する

<sup>203</sup> 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)

<sup>204</sup> 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)

<sup>205</sup> Neurotechnology Toolkit  
<https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/topics/policy-sub-issues/emerging-technologies/neurotech-toolkit.pdf> (2026年3月閲覧)

EU の SIENNA プロジェクトは、欧州委員会が資金提供する Horizon 2020 プログラムの一環であり、ヒトゲノミクス、人間機能強化等の新興技術分野における倫理的問題に取り組んでいる<sup>206</sup>。人間機能強化に関しては、1) 健康と安全性、2) プライバシーとデータ保護、3) 自律、4) 平等、5) テクノロジー・アセスメントの観点でのレポートを公表している。ここでは、人間機能強化技術は、人が生まれながらにもつ特性や能力を改善、修正、あるいは増強するために用いられる技術と定義しており、BCI/BMI 等の新興技術は、将来の人間機能強化技術の候補となる可能性が高いと述べている。また、2021 年～2023 年にかけて実施された EU の TechEthos プロジェクト<sup>207</sup>は、気候工学、拡張デジタルリアリティ及び脳神経技術(Neurotechnology)という三つの新興技術分野における EU の法的枠組みの強化を目的とした四つの政策概要を公表した<sup>208</sup>。1) 自律、2) 責任、3) プライバシー、4) リスク軽減、5) インフォームド・コンセントの五つが脳神経科学にとりわけ関連する倫理的価値・原則として議論された。両者とも、脳神経科学の展開に伴い、非常にセンシティブな個人情報の収集と抽出が可能となるリスクが飛躍的に高まるため、EU 一般データ保護規則(GDPR)等の規制枠組みの改革や倫理委員会の関与が必要であるとしている。

日本では、第 3 期『健康・医療戦略』(2025 年 2 月 18 日閣議決定)で、「健康・医療分野の研究開発のプロセスや成果が人々の生命や生活、社会に変化や影響を与え得る点に鑑み、健康・医療分野の研究開発を社会との対話や協働を通じて進め、研究開発の成果が人々の安全・安心を確保し、理解・信頼を得ながら患者・家族に届けられるよう、「社会共創」の取組を強化する」ことが示されている<sup>209</sup>。そして同戦略では、「基礎から実用化まであらゆるフェーズにある健康・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」、「社会の理解を得つつ実用化を進めることが必要な研究開発テーマについて、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。

また、ムーンショットの目標1では、BMI 技術を活用し、脳がインターネットとつながり、サイバー空間とリアル空間が融合したサイバーフィジカル空間でのサイバネティック・アバター(CA)を自在に操作したり、他者や AI と直接コミュニケーションしたりすることのできる「Internet of Brains(IoB)」の実現を目指している。このような技術が社会に導入される際には、倫理・法・社会・経済において多くの課題が想定されるため使用に向けたガイドラインを示しつつ、実用化にふさわしい技術を社会実装していくこととしてい

<sup>206</sup> SIENNA: Technology, ethics and human rights  
<https://www.sienna-project.eu/w/si> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>207</sup> <https://www.techethos.eu/> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>208</sup> Analysis of International and EU Law and Policy  
<https://zenodo.org/records/7650731> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>209</sup> 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)

る。そのための第一歩として、『ブレイン・テックガイドブック』と『ブレイン・テック エビデンスブック』が公開されている<sup>210</sup>。

### (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。

European Brain Council が公表した『European Charter for the Responsible Development of Neurotechnologies』<sup>211</sup>では、脳・神経データ(neural data)を、個人情報及び機微なデータとして認識している。これには、動作、心拍数、眼の変化、皮膚伝導度、その他の身体反応のモニタリングから間接的に得られる情報も含めている。また、個人の思考の中身を分析する研究も開始されていることから、脳・神経データの収集や移動を規制する動きもみられる。

EU での規制枠組みの改革等については前述した。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<sup>212</sup>。

<sup>210</sup> ブレイン・テック ガイドブック/エビデンスブック(Internet of Brains)  
[https://brains.link/braintech\\_guidebook](https://brains.link/braintech_guidebook) (2026年3月閲覧)

<sup>211</sup> <https://www.braincouncil.eu/european-charter-for-the-responsible-development-of-neurotechnologies/> (2026年3月閲覧)

<sup>212</sup> 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)

以上の動向を踏まえ、ブレインテック・ニューロテック領域を①将来性、②技術・アイデアの革新性、③日本の優位性、④民間のみで取り組む困難性、⑤重要経済安保技術の5観点で評価した。

### ①将来性(成長性・社会課題)

高齢化社会の進展で、MCI 等の早期発見や新たな診断・分析等がより重要になっており、ブレインテック・ニューロテックの世界市場は CAGR 14%で成長し 2035 年には 9 兆円規模になると予測される(図 3-7-1-7)。また、医療にとどまらず、人間の認知・思考の特徴が解明されるにつれ、産業活動や日常生活のあらゆる意思決定場面に影響する可能性があり、社会的なインパクトは非常に大きい。

### ②技術・アイデアの革新性

計測の高度化には新規計測技術開発及び侵襲・非侵襲同時計測等による高精度な計測技術開発が必要である。また、脳疾患の発症への他臓器の関わりが明らかになりつつあり、医療への応用が期待されている。また日常生活の場面でも EEG 等を活用したサービスが模索されている。

### ③日本の優位性

日本は MRI 設置台数が世界でもトップクラスであり<sup>213</sup>、脳の fMRI 測定データが大量に蓄積しており、健常者の健診データの蓄積も魅力である。また、血管内留置型電極のように電気化学・材料工学との連結という日本の得意なすり合わせ技術によって、測定デバイスの開発で有利な位置にいる。

### ④民間のみで取り組む困難性

医療・ヘルスケア、情報システム、素材・デバイス等の様々な業種が関わる融合領域であり、個社単独での取組は難しい。また ELSI や RRI の課題が存在するため、研究初期から民間のみではなく政府と協働して開発を進める必要がある。

### ⑤重要経済安保技術

欧米諸国をはじめ脳・神経データの保護推進に向けた動きがあるため、日本も独自に体制を構築し研究開発を推進することが必要な領域である。

以上をまとめると、ブレインテック・ニューロテック領域は社会実装が急速に進んでおり、日本の強みが活かせる課題・技術テーマを適切に伸ばしていき産業化を目指すべき領域である。

<sup>213</sup> Magnetic resonance imaging (MRI) units (OECD)  
<https://www.oecd.org/en/data/indicators/magnetic-resonance-imaging-mri-units.html> (2026年3月閲覧)

### 3-7-5[1] 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例

図 3-7-1-5 で前述した領域について、具体的な 3 課題を図 3-7-1-15 に例示した。

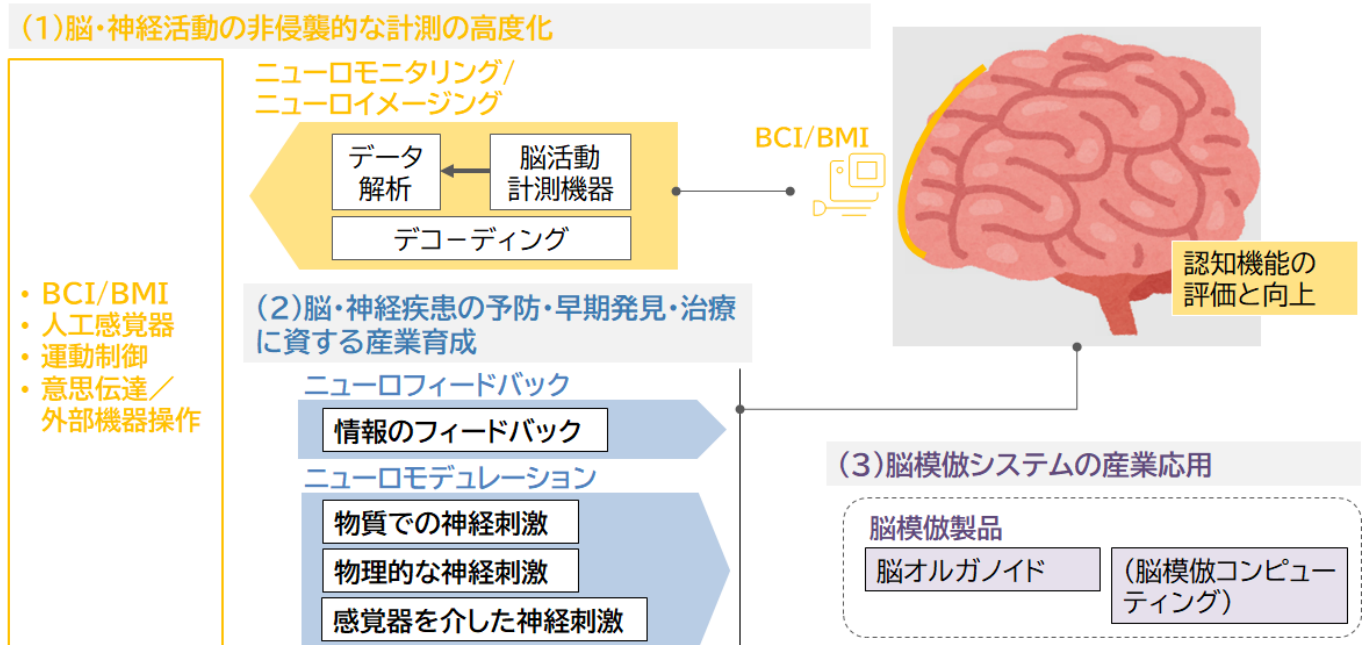


図 3-7-1-15 ブレインテック・ニューロテック領域の課題例

#### (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。

まず、脳波は減衰するため EEG では脳深部の情報は得られない(空間分解能が劣る)という弱点がある。これに対して fMRI は脳深部まで計測可能であるが、変化を瞬時にとらえることが苦手である(時間分解能が劣る)。また、fMRI での測定は寝そべった状態で測定するため、日常生活での脳波測定との相違も指摘されている。各種計測方法の弱点を補強するように、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必要である。次に、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が考えられる。この複数の手法は非侵襲的な計測の組合せや侵襲的な計測との組合せなど、目的に応じた組合せが必要である。さらに、計測データの効率的・効果的な集積方法開発やその集積したデータの分析、及びその分析結果の健康維持・増進への応用または産業化への活用が挙げられる。

#### (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。治療の方法には物質(医薬品等)や物理的な刺激などが工夫されている。多数の SU が神経刺激デバイスを開発しており、例えば、ドイツの CorTec 社やイスラ

エルの BrainQ 社は、脳波や神経活動をモニタリングしながら最適な強度に調整した刺激を与えるデバイスを開発している。オムロン社が出資している Theranica Bio-Electronics 社(イスラエル)は偏頭痛の緩和用デバイスを開発しており、米国の SetPoint Medical 社の埋め込み型デバイスは関節リウマチ治療に用いられている。より個人にパーソナライズされた刺激を与えることが可能になりつつある。これらは侵襲的な方法による刺激を行っているため、非侵襲的な方法による刺激開発等の研究課題が考えられる。

また、パーキンソン病の症状が腸内の異常型  $\alpha$ -シヌクレインに起因することが報告されてから、食習慣を見直し腸内環境を改善することで認知機能の維持・向上や脳疾患の予防につながる結果が多数得られている。未病領域またはそれ以前の健康維持・増進に関わる取組であるため、エビデンスの蓄積によって個々人に適した食生活の提案などのサービス化が期待できる分野である。

### (3) 脳模倣システムの産業応用

抗体、遺伝子、細胞などの新規モダリティを用いた医薬品の開発が盛んになるにつれ、前臨床試験では問題がなかったにもかかわらず、治験で開発中止になるケースが多く発生している。これは薬効や毒性の種間差異が原因とみられるため、人の脳オルガノイド(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)を創薬でのターゲット探索へ応用する研究がなされている。我が国は世界で初めて iPS 細胞の作製に成功した国であること、また培養の成否に大きく影響する容器材料・電極の技術開発に優れていることから、積極的に取り組むべき分野である。

また、脳オルガノイドは計算機(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、脚光を浴びている。

## [2] 数理科学による産業革新

### 3-7-1[2] 数理科学とは

数理科学とは、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。文部科学省が2022年に公表した『2030年に向けた数理科学の展開－数理科学への期待と重要課題－』<sup>214</sup>では、数理科学は、学問の進展とビッグデータの活用により、社会・産業・文化・自然・環境・生命などあらゆる現象の「根本原理を解明し、重要な変化の兆しを予測」できるようになることにより、より良い社会、Society 5.0 実現に数理科学が重要なイニシアティブを果たすとされている。

数理科学の特徴は、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。具体的には、線形代数や代数的構造論、解析学等により対象の本質的構造や時間的変化を理論的に記述・解析するとともに、不確実性やばらつきを伴う現象に対しては、確率論や統計的推論に基づき、データからの推定や予測を通じて理解を深化させる。さらに、現実問題への展開においては、数理モデルの構築、数値解析や計算科学による近似解法、最適化理論や制御理論を用いた設計・意思決定が重要な役割を果たす。

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、「数理科学」と「工学理論・AI(データ駆動)」の長所を組み合わせることによる、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)

世界的潮流として、グローバルな競争激化、地政学リスクの高まり、労働人口減少、気候変動、サプライチェーンの分断、デジタル化・AI活用の急速な普及といった複合的な問題が顕在化している。こうした状況の下、産業競争力の強化と社会課題の同時解決を目的とした産業革新の加速が強く求められている。日本においても、『基幹産業・技術の創成による持続可能な社会の実現』『健康／医療・ヘルスケアエコノミー』『健康寿命の延伸』『エネルギー利用時のカーボンニュートラル化』『活動の脱炭素化』『カーボンニュートラルスマートなエネルギーネットワークの構築』『エネルギー脱炭素化・強靱化』『レジリエントな社会・情報インフラ』『持続可能な食料システムの構築』などの社会課題の解決に向けて、イノベーションの社会実装や新産業の創出に向けた取組が進められている。

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。2026年1月に開催された世界最大級のテクノロジー見本市、CESでは生成AI技術が推論を可能にすることを示唆されるなど、本技術は日々進歩している。AIは、国家安全保障の観

<sup>214</sup> 2030年に向けた数理科学の展開－数理科学への期待と重要課題－(文部科学省研究振興局、2022年7月)  
[https://www.mext.go.jp/content/20220722-mxt\\_kiso-000184889\\_1.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20220722-mxt_kiso-000184889_1.pdf)(2026年3月閲覧)

点でも重要な技術であることは間違いなく、今後も日本も含め各国によるし烈な開発競争が行われることは必然である。

一方、AI は統計的学習と大規模データ活用に強みを有し、データ量や計算資源の拡大に伴って高い性能を発揮してきた。他方で、少量データでの条件や構造的特徴や不変量の明示的把握が重要となる場面では、AI 単独では十分な説明や理論的保証を与えにくい場合がある。また、AI モデルの大規模化・高速化は、高性能な計算資源と消費電力を伴うため、半導体供給、計算コスト、エネルギー制約といった観点も重要性を増している。基盤モデル、学習データ、クラウド基盤といった AI の覇権は海外主導で進む中、日本は有利なポジションを確保できているとは言い難い。

こうした状況の下、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、AI 開発に併せて、諸外国との差別化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 Index<sup>215</sup>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<sup>216</sup>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。すなわち、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。

それでは、数理科学における新学理又は未活用の学理とは何か。数理科学の源流は、紀元前のユークリッド幾何学に代表される数学的枠組みの構築に遡る。例えば古代ギリシアにおいては、比例や調和といった幾何学的概念(例えば、黄金比)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になった。これは、数理科学が産業的価値創出に直接結びついた最初の段階と位置づけることができる。その後、20 世紀には計算機の発展とともに数理科学の活用領域は大きく拡張した。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。例えば、1940 年代に伊藤清らによって構築された確率微分方程式は、1970 年代に金融工学へと応用され、新たな産業分野の形成に寄与した。一方、数理理論自身は、普遍化・一般化・抽象化を進めていく。20 世紀後半には、確率論・統計学を中核とする数理群から 1990 年代に機械学習が確立・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 と総称さ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において発展・成

<sup>215</sup> Nature index(Springer Nature)

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

<sup>216</sup> 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)

熟した学理が順次、産業分野へとスピナウトすることで、工学理論を発展させ、イノベーションを生み出してきた。

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)。

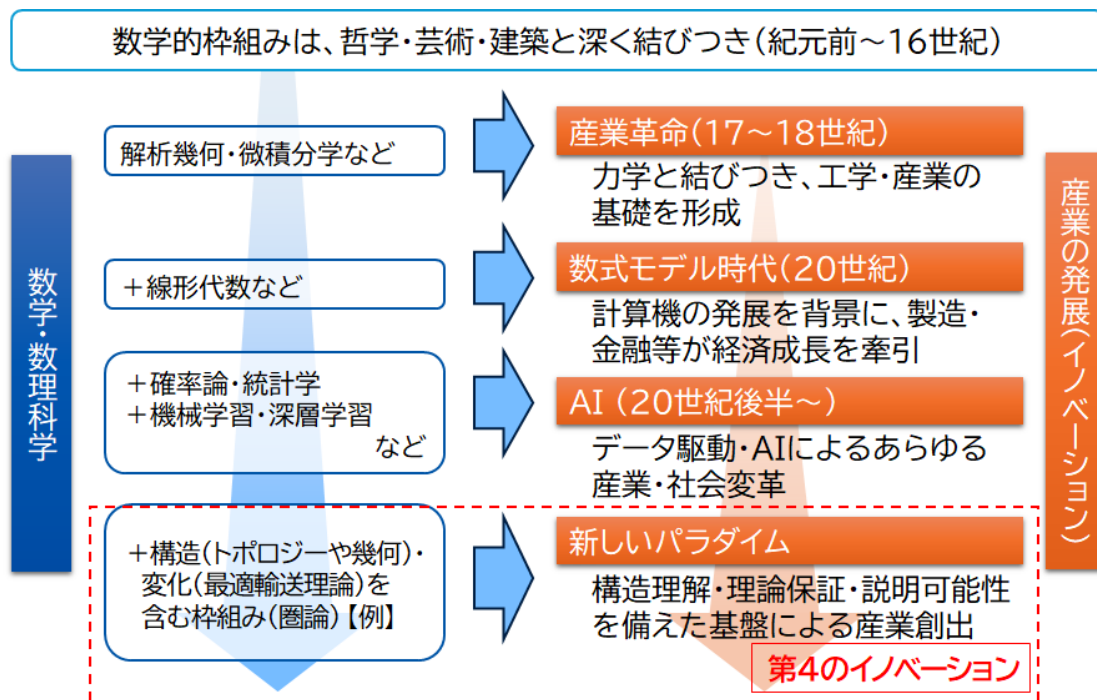


図 3-7-2-1 数学・数理科学によるイノベーションの実現

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<sup>217</sup>。

## (1) ハードウェアの進展

近年のコンピュータハードウェアの飛躍的な進展により、従来は理論的枠組みにとどまっていた高度な数理モデルを、現実の産業・社会課題に対して実装・適用することが可能となった。高性能 CPU・GPU、専用アクセラレータの普及に加え、大規模データを高速に処理可能な計算基盤が整備されたことで、「数理の理論」を単なる解析手法としてではなく、「実環境の課題」を解決するための実用技術として活用できる段階に入っている。

<sup>217</sup> 半導体・デジタル産業戦略(経済産業省、2023年6月)

[https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/joho/conference/semicon\\_digital/semiconductors\\_and\\_digital.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semicon_digital/semiconductors_and_digital.pdf) (2026年3月閲覧)

令和7年版 情報通信白書の概要(総務省)

<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r07/html/nd112130.html> (2026年3月閲覧)

数学・数理科学研究の加速 ~産学協働・分野融合によるイノベーションの創出・社会課題の解決~(文部科学省)

[https://www.mext.go.jp/a\\_menu/mathematicalsciences/index.html](https://www.mext.go.jp/a_menu/mathematicalsciences/index.html) (2026年3月閲覧)

これにより、複雑系、非線形現象、多次元データを対象とした課題に対しても、数理科学に基づくアプローチが現実的な選択肢となっている。

## (2) AI の活用

生成 AI を中心とする AI 技術の進展は、数理科学と工学という従来は異なる理論体系の間を接続する役割を果たし始めている。AI は、数理モデルの構築やパラメータ探索、近似解の導出を支援するだけでなく、工学的知見や設計制約を踏まえた形で数理的手法を実装へと橋渡しする機能を担うようになってきている。また、生成AIを用いたプログラミングの簡便化により、高度な数理科学のソフトウェア化が効率的にできるようになっている。さらには、生成 AI と Lean 等に代表される定理証明支援系の技術との組合せにより、帰納的な推論に基づく AI に演繹的な証明が可能になりつつある。<sup>218</sup>この結果、「数理科学」と「工学」が分断された専門領域として存在するのではなく、相互に補完し合いながら新たな価値を創出する統合的な研究開発が可能となった。数理科学は、AI によって実装可能性を飛躍的に高められ、産業応用に向けた基盤技術としての重要性を一層増している。

## (3) 人材の蓄積

日本では 2006 年に文部科学省科学技術政策研究所が公表した『忘れ去られた科学—数学』において、数学・数理科学が有する潜在力が指摘された。これを契機として、文部科学省や国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)が中心となって、数学・数理科学と社会課題を結びつける研究開発が継続的に推進されてきた。これらの取組を担ってきたアカデミアの研究者が現在壮年期を迎え、数学・数理科学を強みとしつつ産業界と連携する動きが着実に拡大してきた。

<sup>218</sup> 数学セミナー 2024 年 8 月 生成 AI とこれからの数学「対談」数学者・物理学者から見た生成 AI

このような日本の強み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)。

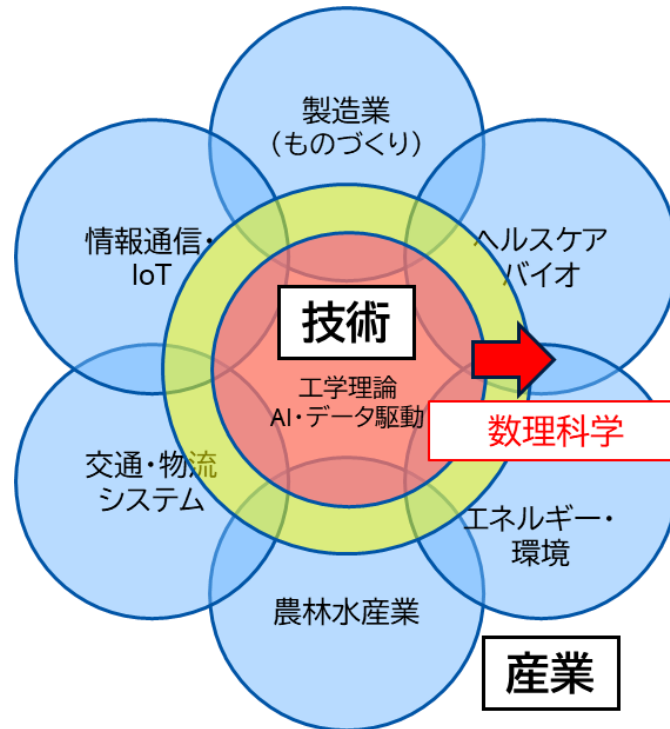


図 3-7-2-2 「数理科学による産業革新」のコンセプト

それでは、次なる数理科学は社会課題に対して、具体的にどのような貢献をするのであろうか。TSC において、現在行われている学術研究の内容を参考に、社会課題例に対して数理科学の活用が可能と思われるものをまとめた(表 3-7-2-1)。例えば、材料開発では、微細構造や工程条件のわずかな違いが性能・寿命に大きく影響するが、幾何学的指標を取り入れることで、設計・製造条件の探索に説明可能性の付加による高度化が期待される。一方、本表で示したものは、課題例、数理科学の活用例ともに全体の一端に過ぎず、今後、産業界と数理研究者との間で、課題や数理科学の活用例や仮説を共有していくことが期待される。

表 3-7-2-1 社会課題に対する数理科学の活用例

社会課題	技術開発・実装レベルの課題例	数理科学の活用例
基幹産業・技術の創成による持続可能な社会の実現	材料開発では、材料微細構造や工程条件のわずかな違いが性能・寿命に大きく影響するが、従来指標では差異を十分に捉えられない。試作・評価の負担が大きく、設計空間探索が非効率である。	トポロジーなど幾何学的指標により材料組織や工程状態の構造的特徴を定量化し、多重尺度数理モデルや最適化手法と組み合わせて設計・製造条件の探索を高度化。
健康／医療・ヘルスケアエコノミー	医療機器や診断アルゴリズムの性能が患者差やデータ品質に左右されやすく、診断根拠やリスク評価の説明性を確保することが難しい。	生体信号・医療画像を高次元構造データとして解析し、構造的特徴量を抽出。統計数理や機械学習と統合し、診断・評価の信頼性向上に活用。
健康寿命の延伸	ウェアラブル等で取得される行動・生体データはノイズが多く、長期的な変化や予兆を捉えにくい。	時系列データの位相構造解析や確率モデルにより、日常行動や生体状態の遷移・劣化パターンを定量化し、疾病や機能低下の予兆検知、介入タイミング設計に活用。
エネルギー利用時のカーボンニュートラル化	個別設備の更なる効率化が必要であると同時に、システム全体としての最適運用や排出削減効果の評価が難しい。	流体解析の結果及び実機計測データに対してトポロジカルデータ解析等を適用し、流れ構造・渦構造の「構造的特徴」を定量化。これらをエネルギーフローの数理モデルと結び付け、設計条件や運転条件が省エネ性能・排出削減に及ぼす影響の評価に活用。
活動の脱炭素化	産業・都市・生活における行動変容や施策導入の効果を事前に評価する手法が不足している。	人流・物流・活動データを数理モデル化し、構造的変化や削減効果を定量評価。施策設計やシナリオ分析に活用。
カーボンニュートラル・スマートなエネルギーネットワークの構築	再生可能エネルギーや分散電源の導入により、電力・エネルギーネットワークの構成が複雑化し、局所的な設備故障や需給変動が全体に及ぼす影響を把握しにくい。従来の運用指標では、構造的な脆弱性や冗長性を十分に評価できない。	エネルギーネットワークをグラフ構造としてモデル化し、グラフ理論に基づく接続性・冗長性評価と、トポロジカル指標によるループ構造・構造変化の解析を組み合わせることで、システムの脆弱性・安定性を定量評価。分散制御やシステム再構成アルゴリズムの設計に活用。
エネルギー脱炭素化・強靱化	水素、アンモニア、合成燃料等を用いた脱炭素社会に向けたエネルギー・インフラの構築において、長期的な設備投資判断と短期的な需給変動・運用制御の整合が難しい。また、燃料製造の効率・コスト・安定性を左右する触媒性能についても、反応機構や劣化要因を踏まえた最適設計が課題となっている。	エネルギー供給網を確率モデルやネットワークモデルとして記述し、シナリオ解析・最適化により水素・合成燃料インフラの投資・運用戦略を設計する。一方で、触媒材料や反応場をミクロな構造データとして解析し、構造指標や反応経路の数理モデル化により高効率・高耐久な触媒設計を支援。マクロなエネルギーシステム設計とミクロな材料・触媒開発を数理的に接続し、安定的かつ強靱な脱炭素エネルギー基盤の構築に活用。
レジリエントな社会・情報インフラ	通信、電力、交通等のインフラや情報システムが複雑に相互依存し、障害や外乱が連鎖的に波及するリスクが高まっている。くわえて、量子通信ネットワークや量子センサー等の新たな量子技術の導入により、従来とは異なる特性をもつインフラが混在する環境での信頼性評価が課題となっている。	社会・情報インフラをネットワーク構造としてモデル化し、確率論・複雑ネットワーク解析・トポロジカル指標を用いて構造的脆弱性や障害伝播特性を定量評価。さらに、量子通信・量子計測に由来する新たな不確実性やノード特性を考慮した数理モデルを構築し、異常検知、系統分離・再構成、復旧戦略設計に活用。
持続可能な食料システムの構築	気候変動等により農作物の生育や収量のばらつきが拡大し、経験則に基づく施肥や生産計画が限界に達している。また、木材利用による炭素固定や、植物工場における高度制御型生産など、新たな技術導入において最適条件の設計・評価が難しい。	農地・森林・生産施設を含む生産システムを数理モデルとして記述し、確率モデルや最適化により施肥量・施肥タイミングの最適化、炭素固定量の評価、環境制御条件の設計を行う。生育データや環境データの構造解析を通じて、収量安定化と環境負荷低減を両立する技術開発に活用。

次なる数理科学として取り組むべき研究開発課題を検討する。文部科学省の2024年度の戦略目標「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)」<sup>219</sup>では、解析・評価手法として16の手法を挙げている。この中でも、産業応用のポテンシャル・工学理論と経験的手法(AI や統計)との親和性・数理科学の視点での市場黎明段階を考慮すると、「不確実性

<sup>219</sup> 令和6年度戦略目標新たな社会・産業の基盤となる予測・制御の科学, 文部科学省, 2024年3月, [https://www.mext.go.jp/content/20240315-mxt\\_chousei01-000034470\\_4.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20240315-mxt_chousei01-000034470_4.pdf) (2026年3月閲覧)

定量化・確率論」「幾何学・代数幾何学」「離散数学」「トポロジカルデータ解析」「流体数理」「ネットワーク理論・グラフ理論」などの学理的手法が注目される。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(表 3-7-2-2 及び図 3-7-2-3)。

表 3-7-2-2 数式モデル/AI/幾何学的手法の特徴

		数式モデル	AI	幾何学的手法
概要		自然法則や原理に基づいて現象をモデル化し、設計・制御に応用する方法	実際の観測データや経験からパターンや関係性を学習する方法	対象の「形」「つながり」「構造」を数理的にとらえ、全体の構造的特徴を抽出する方法
基礎となる理論		物理学・力学等に基づく数式モデル	統計学・確率論に基づく統計的学習理論・最適化理論	トポロジーや幾何学を基盤とする数理科学(トポロジカルデータ解析、最適輸送理論など)
特徴	得意な点	<ul style="list-style-type: none"> <li>物理法則が明確な現象の理解・予測</li> <li>再現性の高い設計・制御</li> <li>原理に基づく説明や理論的保証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大量データからのパターン抽出・予測</li> <li>複雑な関係性の学習</li> <li>幅広い応用分野への展開</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>データに内在する「形」「つながり」「構造」の把握</li> <li>ノイズに埋もれた全体構造の抽出</li> <li>AIや数式モデルとデータのギャップの橋渡し</li> </ul>
	不得意な点/留意点	<ul style="list-style-type: none"> <li>複雑で要因が多い現象の記述</li> <li>未知要素が多い現象への柔軟な対応</li> <li>モデル化が困難な実データの扱い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>学習結果の解釈や理論的説明</li> <li>データ分布が変化した場合の安定性</li> <li>データが少ない状況での性能確保</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>結果の直感的理解に一定の専門性が必要</li> <li>実装・活用方法が分野ごとに異なる</li> </ul>

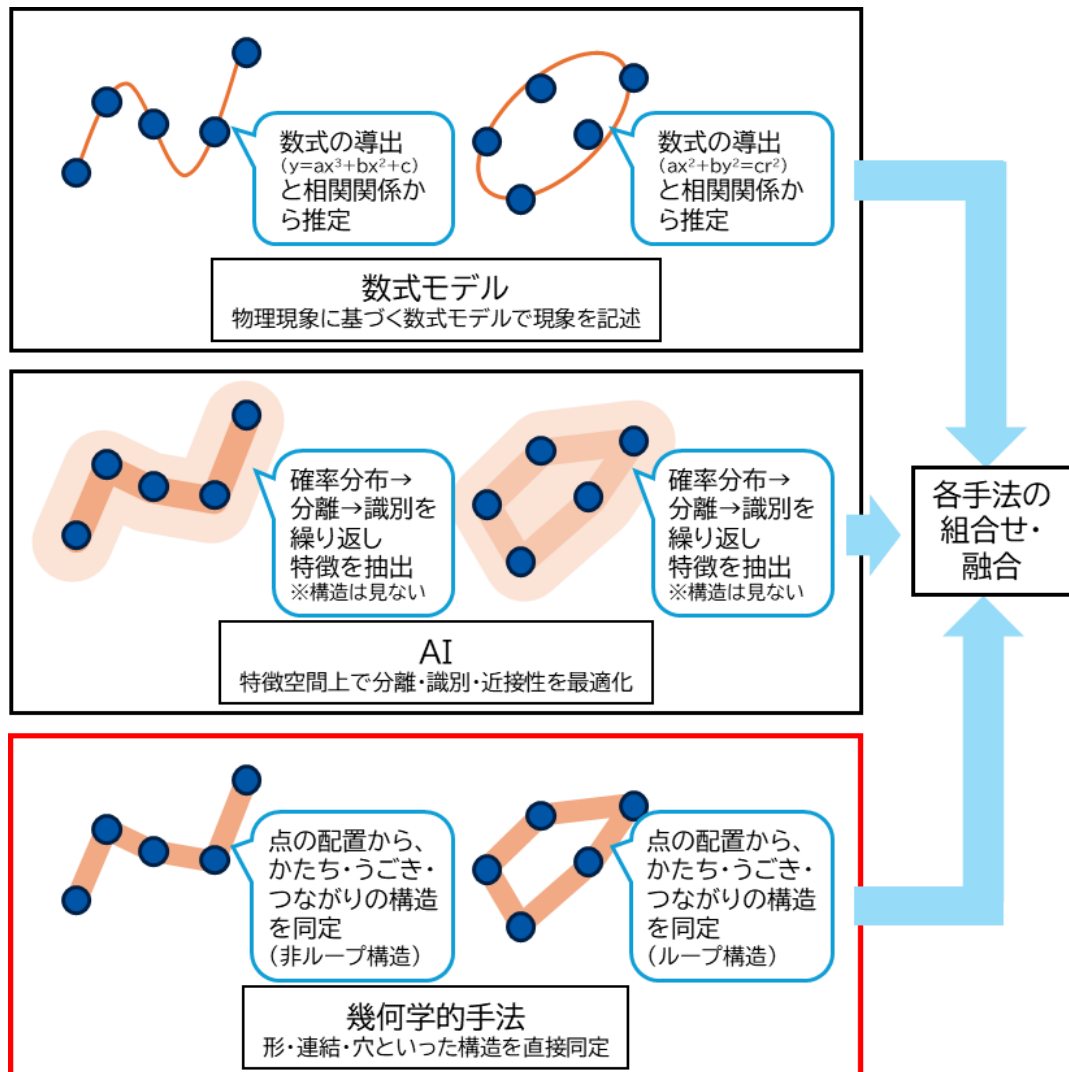


図 3-7-2-3 数式モデルや AI と幾何学的手法の組合せ・融合

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』を提案する。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課題として提案する。

本研究開発課題で代表的手法であるトポロジカルデータ解析は、データの次数や表現形式の違いに対して比較的頑健に、データに内在する構造的特徴や関係性を捉える特性を有している。この特性により、計測データ、設計情報、運転データなど、産業現場で生成される多様かつ異質なデータを対象として、形状や構造に着目した分析を行うことが可能となる。特に、統計的相関やテキストの違いでは把握しにくい、幾何構造や連結性、破断といった構造的特徴の抽出において、トポロジカルデータ解析は有効な分析手段となる。

さらには、生成 AI の急速な普及に伴う GPU への依存や、学習や推論に要する電力消費の増大が、今後の社会実装における制約要因となる可能性が指摘されている。こうした状況に対して、「幾何×情報に基づく解析技術」は、構造に着目した特徴抽出やモデル設計を通じて、AI の適用範囲や計算負荷を適切に制御し得る補完的な役割を果たす。また、対象とする課題や構造特性に応じて、計算アルゴリズムと計算基盤を適切に選択・最適化する余地を提供する点でも意義を有する。数理科学的アプローチを AI や工学理論と組み合わせて活用することにより、性能向上にとどまらず、説明性、信頼性、持続可能性を備えた知能基盤の構築が可能となる。

### 3-7-3[2] 国内外の市場・技術・政策動向

#### (1) 市場動向

AI・デジタル市場は、製造業、ハイテク、素材、物流・輸送、半導体など多様な産業分野で急速に拡大している。McKinsey & Company は、2040 年には、AI による潜在的な付加価値創出額として、390 兆円から 660 兆円規模に達するとの試算をまとめている<sup>220</sup>。この巨大市場の中で、幾何×情報に基づく産業基盤の高度化は、AI が得意とする「大量データのパターン認識」だけでなく、「形・構造・つながり」といった本質的特徴を捉える領域で、AI の補完・代替となる可能性がある。

数理研究者へのヒアリングを行った結果等から、高度製造分野では AI 市場 25.5～43.5 兆円のうち 25～40%、ハイテク分野では 36～69 兆円のうち 10～15%、素材分野では 18～30 兆円のうち 20～30%が「幾何×情報に基づく解析技術」に適合すると仮定すれば、本技術による付加価値創出の規模感としては、40 兆円から 120 兆円と推計される。ただし、実際にこのような付加価値の創出が可能かは、今後のユースケース形成とともに精査していく必要がある。

当該研究開発課題に関する諸外国の動きを見ると、米国では、IBM Research<sup>221</sup> が、材料科学、複雑ネットワーク解析、システムの信頼性評価や異常検知などを対象に、トポロジカルデータ解析を研究開発に取り入れている。IBM Research におけるトポロジカルデータ解析の利用は、特定の製品やサービスとして外部提供するというよりも、材料構造やネットワーク構造といった対象の「構造的特徴」を把握するための解析技術として、AI や統計的手法と組み合わせて用いられている点に特徴がある。このアプローチは、大規模データや複雑システムを扱う企業内 R&D において、構造理解や仮説生成を支援する基盤技術として位置づけられている。

また、米国国立科学財団(NSF)及び米国国防高等研究計画局(DARPA)が Stanford University におけるトポロジカルデータ解析を支援し、これに基づき Stanford University 発のスタートアップとして設立された Ayasdi (現 SymphonyAI)<sup>222</sup>は、金融、製造、医療分野における複雑データ解析に位相的手法を導入してきた。Ayasdi は、金融取引データや製造プロセスデータ、医療データなどを対象に、従来の特徴量設計やクラスタリングでは捉えにくい構造的関係を可視化・抽出する技術としてトポロジカルデータ解析を活用した点に特徴がある。特に、因果関係や業務プロセスのつながりを重視する領域において、説明性を備えた意思決定支援ツールと

<sup>220</sup> 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)

<sup>221</sup> IBM Research - AI for IT Infrastructure,

<https://research.ibm.com/projects/ai-for-it-infrastructure> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>222</sup> SymphonyAI, Topological Data Analysis and Machine Learning: Better Together, 2020 年 7 月, <https://www.symphonyai.com/wp-content/uploads/2020/07/SAI-Topological-Data-Analysis-and-Machine-Learning-Better-Together-vf.pdf> (2026 年 3 月閲覧)

して展開されてきた。このように、大学で生まれた数理的アイデアを起点に、スタートアップが特定業務にフォーカスした形で事業化を進める動きが活発である。

欧州では、例えば、ドイツのフラウンホーファー研究機構<sup>223</sup>を中心とする応用数理・データサイエンス系研究拠点において、産業課題を起点とした高度な数理解析手法の研究開発が進められている。とりわけ、材料構造解析、生産・製造データ、エネルギーシステム、画像・センサーデータ等を対象に、「幾何×情報に基づく解析技術」の観点を取り入れたデータ解析手法や最適化理論が、実証研究や技術コンセプトの実証(PoC)として産業応用を見据えて展開されている点に特徴がある。これらの取組は、特定企業による単独事業化を目的とするというよりも、研究機関が中核となり、複数の産業パートナーと連携しながら応用可能性や実装性を段階的に検証するモデルが主流である。こうした欧州型の枠組みは、数理理論そのものの深化を大学等に委ねつつ、フラウンホーファーが橋渡し役となって産業課題との接続点を丁寧に探索・具体化していく点に特徴がある。

こうした諸外国の動きを踏まえると、日本は、製造業を中心とする大規模な産業基盤と、長期にわたり蓄積されてきた高品質な現場データを併せもつことで、幾何×情報に基づく解析技術を、直接的に産業分野に展開するに適した条件を有している。

一方で、日本では、個別企業内の解析業務や研究プロジェクトがクローズとなっているケースが多く、解析手法や知見が業界横断的に共有・再利用される仕組みは十分に整っていない。幾何×情報に基づく解析技術についても、品質管理、外観検査、予兆保全、材料微細構造解析、医療・バイオ分野の高次元データ解析、エネルギー・インフラ分野のネットワーク解析など、適用可能性の高い業務領域は多いものの、AI や物理シミュレーションと統合された共通的な技術基盤として定着していない。

海外事例に見られるように、幾何×情報に基づく解析技術は単独の解析技術としてではなく、AI や統計、物理モデルと組み合わせられることで、構造理解に基づく説明性の高い分析や、運用・制御につながる判断支援を可能にしている。日本においても、既存のAI 活用やデジタルエンジニアリングの枠組みに幾何×情報に基づく解析技術を組み込み、現場データを用いた実証と改善を繰り返すことで、汎用的な構造抽出レイヤーとしての位置づけを確立していくことが重要である。

以上を踏まえると、日本は、「数理理論」「実運用データ」「長期的な産業適用」を同時に結び付けることが可能なポテンシャルを有し、幾何×情報に基づく解析技術を核とした構造理解型 AI の社会実装において、独自の役割を果たし得る立場にある。

## (2) 技術動向

近年、産業・社会のあらゆる分野において、センサーデータ、シミュレーションデータ、設計情報、運転ログなど、多様かつ高次元なデータが蓄積されている。一方で、これらのデータはノイズや欠損を含み、観測条件やスケールの違いによって表現が大きく変化する

<sup>223</sup> Fraunhofer IWM, Software solutions in materials informatics  
<https://www.iwm.fraunhofer.de/en/services/manufacturing-processes/materials-informatics.html>  
 (2026年3月閲覧)

るため、単純な統計処理や機械学習手法では、本質的な構造や変化を安定的に捉えるためには、十分な学習データを必要とするなどの制約がある。

これに対して、「幾何×情報に基づく解析技術」に代表されるトポロジカルデータ解析は、データの位相的構造、すなわち連結性、穴、空洞といった性質を抽出し、ノイズやスケール変化に対して頑健な不変量として記述する技術群である。

例えば、パーシステントホモロジーは、点群データに対してスケール(半径)を段階的に変えながら、点のつながり方や穴の有無といった形の特徴を調べる。その結果を、特徴(穴)が現れたタイミングと消えたタイミングとして整理し、パーシステンス図にまとめる。この方法により、ノイズの影響を受けにくいデータの構造的な特徴を捉えることができる。(図 3-7-2-4)

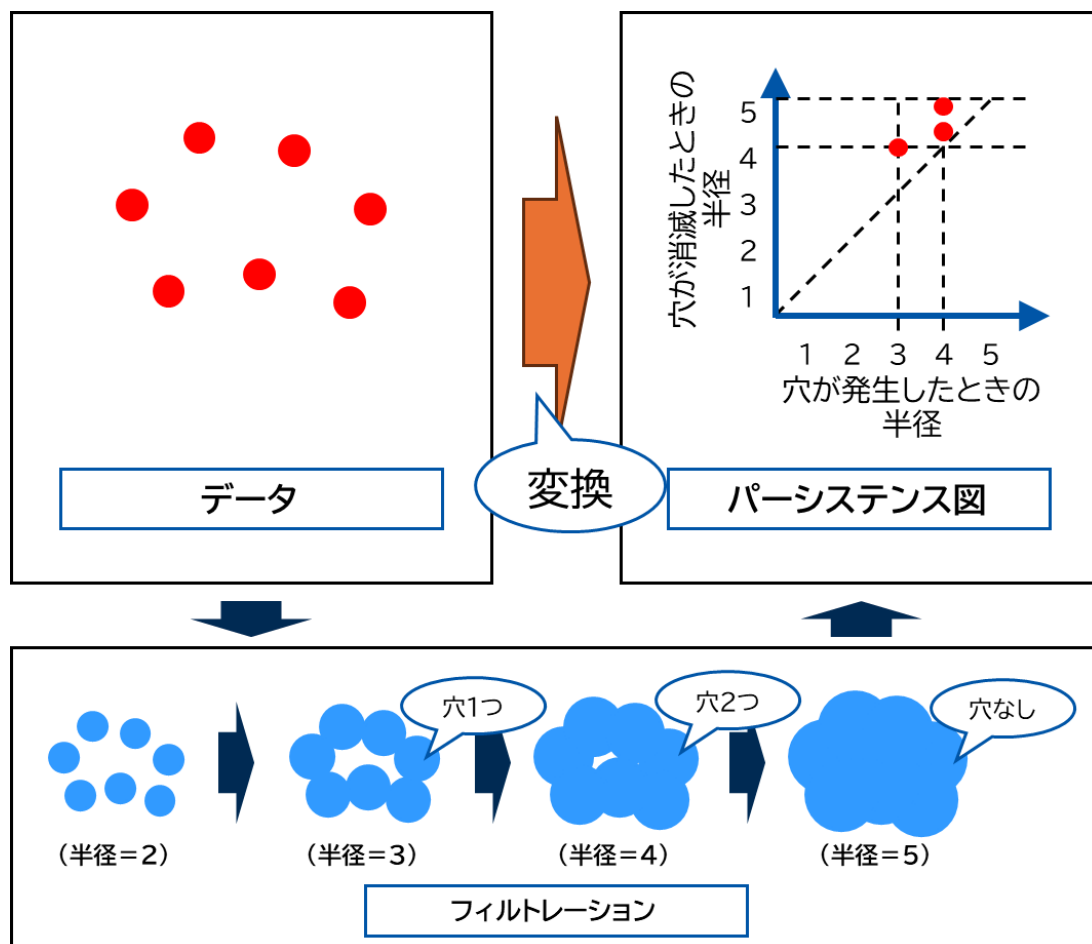
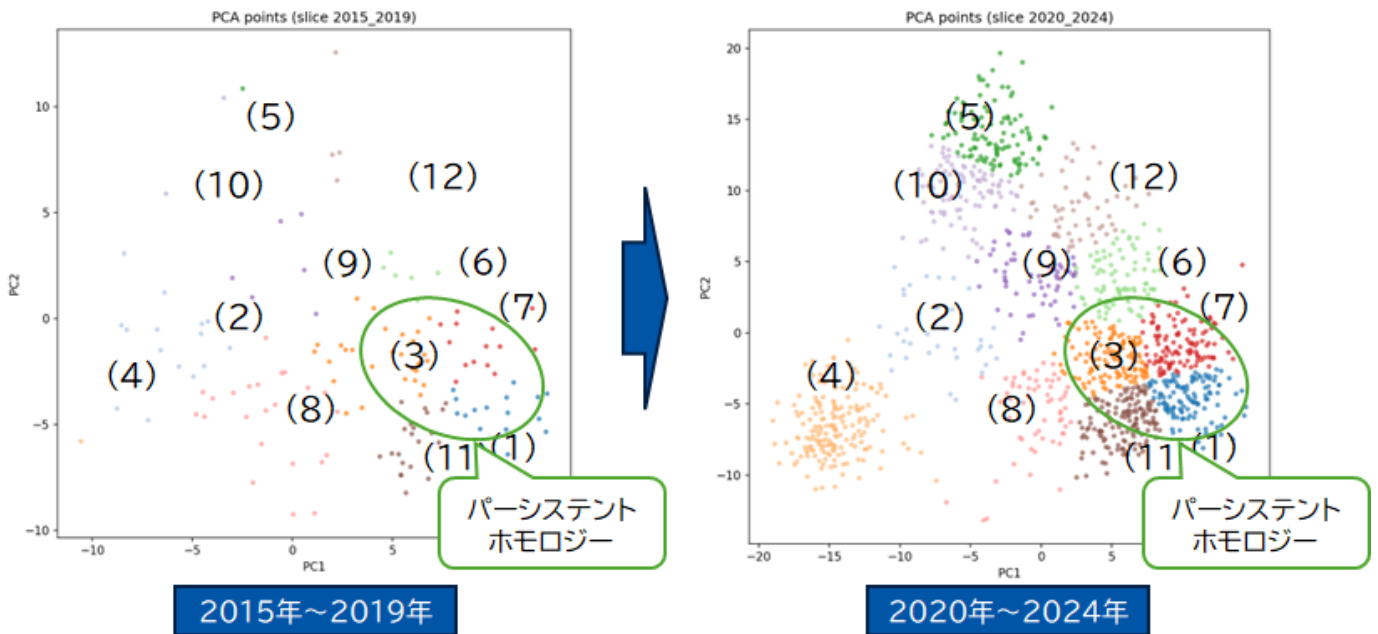


図 3-7-2-4 パーシステントホモロジーの基本的な考え方

トポロジカルデータ解析は、2000 年代以降、データの形や構造に注目する新しい解析手法として発展してきた。オープンアクセスの論文公開サーバーである arXiv に掲載された論文を対象に、2000 年以降のトポロジカルデータ解析関連論文について、論文要旨を Sentence Transformer によりベクトル化し、主成分分析(PCA)によって二次元空間に配置して分析を行った。その結果、2015 年～2019 年と比較して、2020 年～2024 年では当該分野に関する投稿数が増加しており、特にパーシステン

トホモロジーに関連するトピックが高密度な領域を形成していることが確認された。これらの結果は、近年におけるトポロジカルデータ解析分野、特にパーシステントホモロジーを中心とした研究テーマの広がりを示唆するものである(図 3-7-2-5)。



参照元  
arXiv

**検索キーワード**

"topological data analysis" OR "persistent homology" OR "computational topology" OR "simplicial complex" OR "discrete differential geometry" OR "discrete exterior calculus" OR "discrete Laplacian" OR "Ricci flow" OR "geometric deep learning" OR "hypergraph Laplacian" OR "sheaf learning"

凡例	内容
(1)	パーシステントホモロジーを用いたトポロジカルデータ解析と特徴抽出
(2)	計算幾何における離散ラプラシアンと外微分計算
(3)	パーシステントホモロジー解析のためのアルゴリズムと学習手法
(4)	多様体上のリッチフローと曲率解析、幾何進化の研究
(5)	単体複体と組合せ的グラフホモロジー
(6)	高次単体構造とネットワークの持続的トポロジー
(7)	グラフに基づくパーシステントホモロジー解析
(8)	リッチフローや多様体に関連する幾何・ニューラルネットワークモデル
(9)	複体トポロジーにおける離散モース理論と単体ホモロジー
(10)	単体複体の数理論基礎と代数トポロジーを用いた証明理論
(11)	3次元データ表現におけるディープシオメトリックラーニング
(12)	単体複体における高次相互作用とトポロジカルダイナミクス

図 3-7-2-5 パーシステントホモロジーに関する研究動向

幾何×情報に基づく解析技術に関連する手法として、最適輸送理論は、18 世紀のモンジュ問題に起源を持ち、20 世紀後半に分布間の距離や構造差を定量化する手法として重要である。流線トポロジーは、流体やベクトル場における流れの分岐・循環・特異点などを構造的に把握する手法として位置づけられる。これらはいずれも、単なる数値比較では捉えにくい、「構造の特徴」や「状態遷移」を記述する点で共通している。

このような「幾何×情報に基づく解析技術」は、近年、AI や統計、工学理論を融合する試みも活発化している。これにより、学習モデルが物理的・構造的に不合理な解を出力することを抑制し、単なる予測精度の向上にとどまらず、説明性や信頼性を備えた判断・制御への発展が期待されている。幾何×情報に基づく解析技術は、ブラックボックス化しがちな AI に対して、数理的な意味づけを付与する役割としても期待される。

### (3) 政策動向

近年、社会課題や産業課題の高度化・複雑化が進んでいる。こうした課題に対して、単なる計算能力や経験的手法に依存するのではなく、現象の背後にある構造や因果関係を数理的に捉え、予測や制御へと接続する学理の重要性が改めて認識されている。特に、幾何×情報に基づく解析技術は、ノイズや不確実性を含む実世界データから本質的な構造を抽出する基盤技術として、政策的にも注目されている。

日本においては、文部科学省科学技術政策研究所が 2006 年に『忘れ去られた科学—数学』報告書を公表し、これを踏まえ、文部科学省が 2007 年に戦略目標「社会的ニーズの高い課題の解決に向けた数学／数理科学研究によるブレークスルーの探索」を掲げた。以降、JST において、「さきがけ」「CREST」「未来社会創造事業」といった競争的研究資金を通じて、純粋数学・応用数学の成果を、工学、情報科学、生命科学など社会・産業と結びつける研究を一貫して支援してきた。

近年では、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)」に代表されるように、単なる解析技術の高度化にとどまらず、将来の変化や不確実性を事前に捉え、意思決定や制御へとつなげる数理基盤の構築が重視されている。この枠組みでは、確率論、最適化、力学系、トポロジー、幾何学といった数理分野が、AI やデータ科学と並ぶ中核技術として位置づけられており、数理科学を社会実装に耐える形で発展させる政策的意図が明確化されている。

このような政府の動きに呼応して、東北大学や京都大学では、数理科学を社会課題や産業課題に適用する取組が本格化しつつある。

東北大学材料科学高等研究所(AIMR)に設置された「トポロジカルデータ解析コミュニティ」<sup>224</sup>では、トポロジカルデータ解析を中心に、材料科学、物理、情報科学、データ科学などの研究者が分野横断的に連携し、複雑なデータ構造の理解や特徴抽出を通じた新たな知見創出に取り組んでいる。とりわけ、材料開発や計測データ解析において、従来手法では捉えにくかった構造的特徴を数理的に把握し、データ駆動型研究を高度化することを目的とした研究交流や人材育成が進められている。

また、京都大学の「京大と企業の対話を促進する専門チーム」や「諸分野のための数学よろず相談室(Math Clinic)」では、企業や社会が抱える具体的課題を起点として、大学の数理研究者が課題構造を数理的に整理・定式化し、解決の方向性を探索する実践的な場を提供している<sup>225</sup>。数学・数理科学を「解法提供」にとどめず、「課題の構造理解」や「モデル化」に重点を置き、産業界と学術界の対話を通じて、数理的思考を社会実装へと橋渡しする役割を果たしている。

<sup>224</sup> データの「かたち」を捉えて理解する「トポロジカルデータ解析コミュニティ」(東北大学)

<https://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/TDA/> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>225</sup> 諸分野のための数学よろず相談室(Math Clinic)(京都大学)

<https://www.sci.kyoto-u.ac.jp/ja/academics/programs/macs/clinic> (2026 年 3 月閲覧)

京大と企業の対話を促進する専門チーム(京都大学)

<https://philo.saci.kyoto-u.ac.jp/2023/08/kuo11/> (2026 年 3 月閲覧)

さらに、近年は経済界においても数理科学の重要性に対する認識が高まり、日本経済団体連合会(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、企業ニーズと大学の数理的知を結び付ける枠組みが整備されつつある。これらの取組では、共同研究の推進に加え、企業課題を理解した数理人材の育成や、数理的視点を備えた技術者の育成が重視されており、数理科学を社会・産業の基盤技術として定着させるための環境整備が進展している。

前述のとおり、米国では政府の支援を得た大学発スタートアップによる事業化が活発である。ドイツでは、フラウンホーファーが数理科学の産学連携の接続点となるなどの取組が進展しており、日本における数理科学の社会実装を見据えた政策動向を考える上でベンチマークしておく必要がある。

このように、日本では数理科学の基礎研究と社会課題接続のための萌芽的な枠組みは整いつつある一方で、産業現場の実データを核として、幾何×情報に基づく解析技術を継続的に実装・標準化・展開するための橋渡し機能は、なお十分ではない。

#### (4) 動向のまとめ

日本は、基礎数理の蓄積に、社会課題解決を結び付ける長期的視点により取り組んできた。一方、世界では数理科学を産業に結び付ける取組が、大企業の研究開発、大学発のスタートアップ、研究機関を拠点とした産学連携により始まっている。日本は、世界的な社会課題の複雑化や AI 開発の競争激化に対処する必要があるものの、幾何×情報に基づく解析技術を含む数理科学はポテンシャルを有するにもかかわらず、産業への活用という点では黎明期にある。日本においても、新たなイノベーションの実現に向け、産業の課題起点で、数理科学を産学連携により社会実装に結び付けていく政策的枠組みを整備することが期待される。

### 3-7-4[2] 社会課題の解決のために取り組むべき領域(F): 幾何×情報に基づく産業基盤の高度化

以上のことを踏まえ、数理科学による日本産業の革新に向けて、数理科学の幾何学・位相・代数的手法を、工学理論及び AI と融合し、構造理解に基づく解析・予測・制御等を可能とする研究開発領域として、『幾何×情報に基づく産業基盤の高度化』を提案する。

ロジックモデルで見た取り組むべき領域の俯瞰を改めて図 3-7-2-6 に示す。

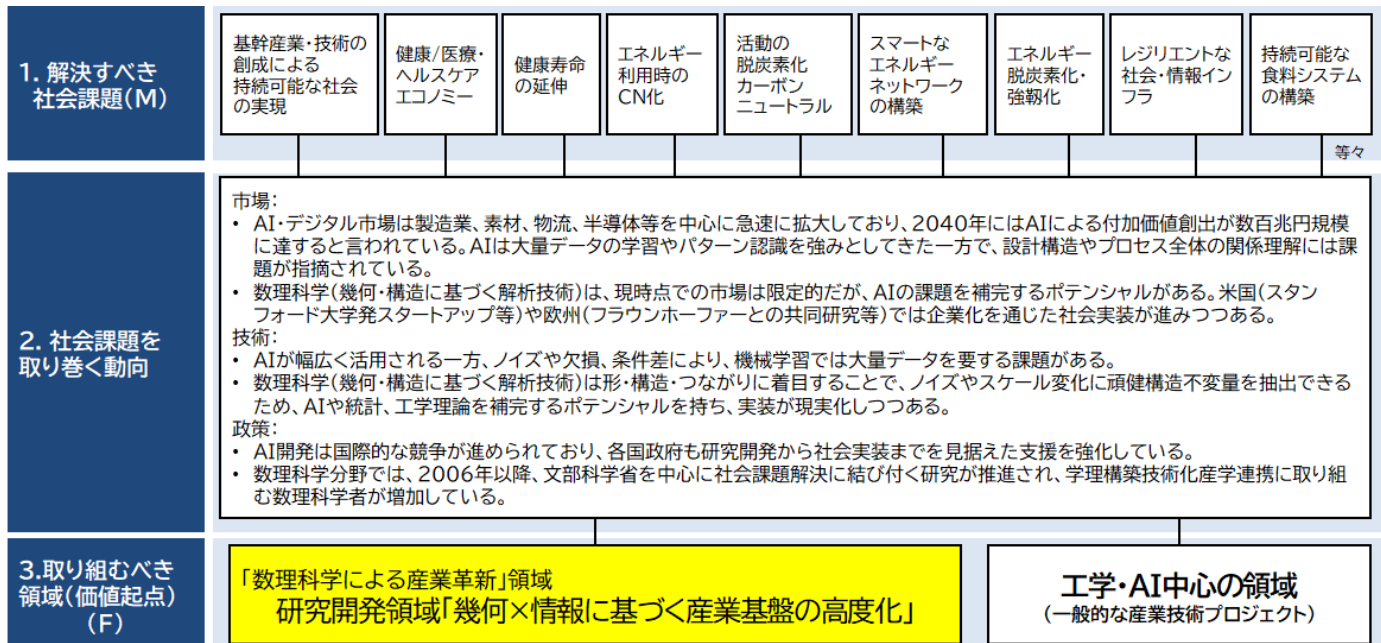


図 3-7-2-6 数理科学による産業革新に関する MF ロジックモデル

#### ①将来性(成長性・社会課題)

- 幾何×情報に基づく解析技術は、材料・製品・設備・インフラ・医用画像など、形状・構造・つながりといった「構造情報」を本質的に扱える点に特長があり、従来の統計・AI技術との差別化要素を有する。
- 本技術は、AI が苦手とする「少量データ条件」「構造的特徴の抽出」「因果関係に近い形の理解」「ノイズに強い判断」を補完する基盤技術であり、AI の適用範囲そのものを拡張する役割を果たす。
- McKinsey & Company が2040年のAIによる潜在付加価値を約390~660兆円と試算している中、幾何×情報に基づく解析技術は、特に高度製造、材料開発、医療機器、インフラ保全、ハイテク分野と適合性が高い。これら分野への波及を踏まえると、本技術による付加価値創出規模は約40兆円~120兆円程度に達する可能性がある。
- 製造業を中心とした日本の産業構造と親和性が極めて高く、デジタル化・DX の次の競争軸として、日本の競争力強化に直結する技術領域である。  
特に、本技術は、試作・実験回数の削減、設備異常の構造的要因の理解、熟練技術者

の経験知の数理化など、製造現場の意思決定プロセスそのものを高度化する可能性を有する。

## ②技術・アイデアの革新性

- ・ 数理科学はこれまで、「産業革命を支えた数学的基盤」、「数式モデルに基づく設計・制御」、「AI・機械学習」という三つの大きな産業変革を下支えしてきた。
- ・ 現在は、AI の急速な普及の一方で、ブラックボックス性、構造理解の弱さ、理論保証の欠如が産業応用上の制約となっており、これを克服する次なるイノベーションが求められている。
- ・ 幾何×情報に基づく解析技術は、構造理解・理論的裏付け・説明可能性を備えた新たな産業基盤として、AI の延長ではなく、数理科学(幾何学・トポロジー)の視点からこの課題に正面から応えるものである。
- ・ 実際、トポロジカルデータ解析分野では 2020 年以降、論文投稿数が急増しており、学術的にも研究テーマの広がりや国際的関心の高まりが顕著である。
- ・ しかしながら、産業課題を起点に幾何×情報に基づく解析技術を体系的に実装・展開する施策は、国内外を見ても未整備であり、今が先行投資・主導権確保の好機である。

## ③日本の優位性

- ・ 日本は、数学・数理科学における世界水準のアカデミア基盤と、材料・製造・機械・医療・インフラといった多様で高度な産業群が同時に存在する、国際的にも稀有な環境を有する。
- ・ くわえて、半導体・先端ハードウェア、AI 技術に通じた研究者・技術者といった、次世代数理科学を支える要素技術・人材が国内に集積している。特に、2007 年以降、文部科学省の政策により、数学・数理科学を社会課題に結び付ける研究が推進され、産業界との接続に関心を有する研究者層が厚みを増しており、この領域の産学連携を加速する機会にきている。
- ・ AI 分野で各国が大規模投資競争を行う中、単純な計算資源・モデル規模競争では不利な日本でも、幾何×情報に基づく解析技術による差別化戦略を通じて、日本独自のポジションを確立する余地が大きい。
- ・ 現在は、幾何×情報に基づく解析技術が、学術研究段階から実装・基盤化段階へと移行し始める転換点にある。ここで主導権を取れなければ、将来的には海外で開発された解析基盤やソフトウェアを利用する「後追い」構造に陥る可能性が高い。

## ④民間のみで取り組む困難性

- ・ 幾何×情報に基づく解析技術の産業応用は黎明期にあり、例えば、国が、数理科学・情報工学・現場産業を結び付けるようなマッチングの仕掛けを作るなど、分野横断的連携が不可欠である。

- ・ ソフトウェア技術であるため将来的なスケール展開・波及性は高い一方、初期段階では市場が未形成であり、民間単独ではリスクが高い。
- ・ 実証プロジェクトを通じたユースケース創出、産業界への橋渡し、分野横断人材の育成には、官による中長期的支援が不可欠である。
- ・ さらに、本領域を担う人材は、数理科学と情報工学、産業課題の理解を横断的に備える必要があり、民間単独では計画的な育成が難しい。

#### ⑤重要経済安保技術

- ・ 幾何×情報に基づく解析技術は、政策でも極めて優先順位が高い「AI・半導体」に関連する基盤技術であり、AIを補完・高度化する役割を担う。
- ・ アルゴリズム・ソフトウェアを先行的に開発し、オープン／クローズ戦略を適切に設計することで、日本がグローバルなサプライチェーン・バリューチェーン上のチョークポイントを押さえることが可能となる。
- ・ 特に、産業データの解析基盤を海外に全面依存しないという観点からも、経済安全保障上の重要性が高い。
- ・ さらには、解析アルゴリズムに加え、データ表現や評価指標の標準化を主導することで、事実上の国際標準を形成し、日本の技術がグローバル市場でチョークポイントを押さえる環境を作る必要がある。

#### ⑥その他特筆すべき理由

- ・ 幾何×情報に基づく解析技術は、疎行列処理や離散構造計算など、深層学習とは異なる計算特性を有する。
- ・ 技術と市場が成熟した段階では、FPGA／ASIC など専用計算ロジックの開発による高速化・省電力化も視野に入り、ソフトウェアにとどまらないハードウェアイノベーションへの波及可能性をもつ。

### 3-7-5[2] 取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例

「数理学による産業革新領域(研究開発課題:幾何×情報に基づく解析技術)」の実現のための具体的な手段について、具体的な技術例と方法論について、それぞれ説明する。

まず、具体的な技術例は以下のとおりである。

#### (1) トポロジカルデータ解析

トポロジカルデータ解析には、データの多スケールな構造を抽出するパーシステントホモロジーや高次元のデータの全体構造をグラフ的に可視化するマップーなどの手法がある。パーシステントホモロジーは、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。

以下では、パーシステントホモロジーに関する代表的研究例として、点群、時系列、画像に適用したものを示す。これらは、製造業をはじめとする多様な産業分野への展開可能性を示すものである。

#### (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。本手法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 3-7-2-7)<sup>226</sup>

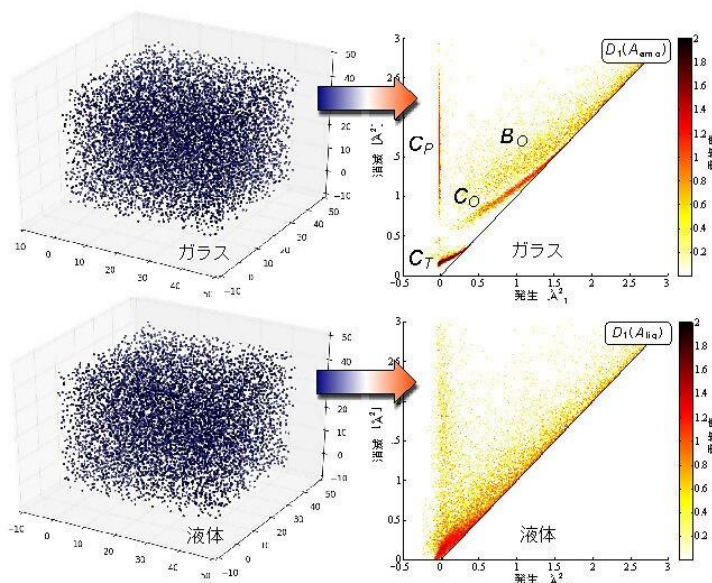


図 3-7-2-7 SiO<sub>2</sub>の原子配置(左)とそのパーシステントホモロジー(右)

<sup>226</sup> 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 原子分子材料科学高等研究機構他、2016年6月)  
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20160614/index.html> (2026年3月閲覧)

## (ii) 時系列解析への適用

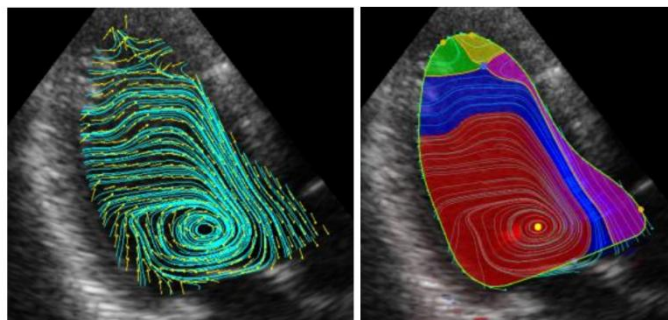
時系列解析において、本手法を適用することで、時系列データに内在する構造的特徴量の抽出が可能となる。富士通と仏 Inria による共同研究では、本手法を脳波の実データに適用し、せん妄検出を行った。脳波時系列を幾何学的特徴として解析することで、せん妄状態に特有の Slowing 現象に対応する波形構造が抽出されることを確認した<sup>227</sup>。

## (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<sup>228</sup>。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、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 3-7-2-8)<sup>229</sup>。



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

図 3-7-2-8 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)

<sup>227</sup> 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(富士通株式会社他、2021 年 7 月)

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

<sup>228</sup> Persistence Curves: A canonical framework for summarizing persistence diagrams(Yu-Min Chung et al., 2021 年 8 月) <https://arxiv.org/abs/1904.07768> (2026 年 3 月閲覧)

<sup>229</sup> 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～(京都大学他、2027 年 8 月)

<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工学的手法である。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<sup>230</sup>。

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を比較・追跡する数理基盤としての活用が期待される。

### (4) トポロジー・幾何学的手法と工学・AI(データ駆動)が融合する場の構築

現状、産学連携志向の数理工学研究者であっても、産業界が抱える課題との接点はほとんどない。したがって、製造、材料、インフラ、医療などの産業分野において、産業界が抱える課題を起点に、設計情報、計測データ、運転データ、シミュレーション結果を横断的に扱い、トポロジー・幾何学的手法に関する数理工学研究者を含めた産学体制の下で、幾何×情報に基づく解析技術を開発する。

特に、物理法則に基づく数値シミュレーション(流体解析や材料シミュレーション等)と、センサーデータ、画像、時系列データなどの実測データを対象に、幾何×情報に基づく解析技術として、トポロジカルデータ解析、流線トポロジー解析、最適輸送理論等を適用し、従来の指標では捉えにくかった形状、構造、遷移、流れの違いなど構造的特徴量を、数理工学的手法を含めて表現すると同時に、計算手法の最適化を図る。

これらの構造的特徴量を、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・劣化進行の把握」「条件変更に対する挙動予測」「制御・設計パラメータの最適化」といった工学的判断・制御に直結するユースケースの創出を目指す。単なる解析精度の向上にとどまらず、現象理解と意思決定の説明性を伴うデータ駆動技術として実装する点を重視する。

### (5) 産業データの構造的特徴を把握する幾何学的手法の開発・改良

データの表現形式やスケールに依存しない構造把握を可能とするため、以下のようなトポロジー・幾何学的手法の高度化及び産業適用を進める。

- ・ パーシステントホモロジーを用いた、点群、画像、時系列、ネットワークデータからの多スケール構造(連結、穴、空隙)の抽出と比較

<sup>230</sup> 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月閲覧)

- ・ 流体、ベクトル場、場データに対する流線トポロジー解析による、渦構造、循環構造、分岐構造の記述と状態診断
- ・ 最適輸送理論を用いた、分布間の変化、遷移、整合の定量化による構造変化の距離評価及びトラジェクトリ推定

これらを通じて、従来のクラスタリングや統計量では見落とされがちであった中間構造、遷移構造、不連続な変化点を捉え、産業データに内在する「構造的意味」を可視化・定量化する技術基盤の確立を目指す。

## (6) 理論的枠組みの発展・深化

幾何×情報に基づく解析技術を産業側の実データに適用すると、ノイズや欠測を含む実データに対する理論的保証、高次元・大規模データに対する計算安定性、ならびに抽出された構造指標と物理的・機能的特性との関係付けといった新たな学理的課題が顕在化する。

これらの課題に対応するためには、トポロジカルデータ解析等における構造指標について、統計的保証や不確実性評価を伴う理論的枠組みを整備するとともに、物理モデルや工学的知見と整合的に解釈可能な構造量として再定式化することが求められる。さらに、こうした構造量を機械学習や制御理論と接続することで、単なる解析結果の可視化にとどまらず、予測、最適化、制御といった工学的意思決定に資する数理基盤へと発展させる必要がある。

そのため、本領域では、基礎数理と産業応用の往復を可能とする学理の深化を図る観点から、文部科学省のプロジェクト等において取り組まれている不確実性定量化・確率論、幾何学、代数幾何学、力学系理論などの先進的研究動向を継続的に把握し、必要に応じて連携・知見の導入を図る。

## (7) ハードウェア及び計算基盤の検討

幾何×情報に基づく解析技術は、疎行列演算、組合せ的探索、離散的な構造処理を含むなど、従来の深層学習とは異なる計算特性を有している。このため、GPU を前提とした汎用的な AI 計算基盤においては、対象とするデータ構造やアルゴリズムの選択によっては、計算効率や資源利用の面で課題が顕在化する場合がある。

このような特性を踏まえ、FPGA や ASIC 等の専用ロジック、グラフ処理や疎構造計算に適したアクセラレータ、ならびに分散計算や近似アルゴリズムを含む多様な計算アーキテクチャについて、海外の研究動向及び産業動向を体系的に把握し、その適用可能性を検討することが重要である。

## (8) 共通基盤・人材・実装を見据えた横断的取組の効果検証基盤の構築

上記(5)～(7)で掲げた方法論を進めていくため、以下の横断的要素を組み込む。

- ・ 共通データ・共通評価基盤の整備:分野横断で利用可能なソフトウェア開発、ベンチマークデータ、評価指標、電力消費量の削減効果、検証手法を整備し、技術の再利用性・比較可能性を高める。
- ・ 技術コンセプトの実証(PoC)から社会実装への接続支援:産業界の実課題に適用可能な数理学手法を開発・実証すること(PoC)にとどまらず、当該手法を企業の課題解決に実際に活用するために必要となるコンサルティングの仕組みや、成果物がソフトウェアであることを踏まえたオープン/クローズ戦略の設計を行う。さらに、プラットフォーム化までを視野に入れた社会展開を想定し、社会実装につなげる戦略を構築する。
- ・ 数理人材と実装人材の循環促進:数理研究者、データサイエンティスト、エンジニアが協働する体制を構築し、産業課題を理解した数理人材と、数理を実装できる企業内人材の育成を図る。
- ・ 数理学の活用裾野の拡大:トポロジカルデータ解析に基づく特許戦略分析や医療診断の精度向上、治療法選択や薬剤開発への応用、マーケティングに加え、トポロジカルデータ解析ではないが、数理統計手法を発展させた実験計画法を製造業や材料開発に応用している例がある。このような取組にも注目し、数理の活用の裾野を増やすことが重要である。

## コラム Innovation Outlook 高度化に向けた試行的取組 (文理融合ワークショップ)

Innovation Outlook Ver. 1.0 の「3-7 6 分野の横断的考察」では、複雑化・重層化する社会課題に対応するため、技術領域を越えた融合的領域の検討の重要性が指摘されている。とりわけ、制度、倫理、社会受容性といった人文・社会科学的視点の取り込みは、今後の Innovation Outlook の高度化に向けた重要な論点である。

こうした課題意識を背景に、TSC は、「自然と共生する持続可能社会」をテーマとした文理融合ワークショップ(WS)を、2026年1月28日に試行的に開催した。本WSは、人文・社会科学系研究者とTSC技術ユニットの職員が共通のテーマの下で議論する場を設け、社会課題(M)解決に資する機能(F)や具体的手段(T)をより幅広く共創することを目的としたものである。

本WSには、人文・社会科学系の有識者として、筑波大学 副学長・理事の西尾チヅル氏、京都大学 教授の山本真也氏、南山大学 准教授の太田和彦氏、桜美林大学 准教授の熊坂元太氏の4名を迎え、有識者2名、TSCの技術ユニット職員4名、ならびにファシリテーター1名の計7名を1グループとし、2グループに分かれて議論を行った。グループ討議では、Innovation Outlook で採用しているMFTのロジックモデルを議論のフレームワークとして活用し、TSCにおいて事前に作成した「自然と共生する持続可能社会」の実現に向けたMFTツリー図を基に、追加・修正すべき機能(F)について議論した。続いて、拡充されたFを踏まえ、当該機能を実現するための具体的な技術や、技術に限らないその他の手段について議論を深めた。



グループ討議の様子



拡充したMFTツリー図

全体で2時間という限られた時間ではあったが、WS最後の参加者講評において、MFTロジックモデルをフレームワークとした集中的な議論を通じて、TSC内のみの検討では得られなかったFやTにおける新たな示唆を抽出することができた、との発言があり、一定の成果が得られたものとする。事後のアンケートにおいても、有識者及びTSC参加者の双方から、本WSに対する肯定的な評価が寄せられた。一方で、前提条件の共有が十分でなかったことによる議論の発散や収束の難しさ、MFTツリーに含まれる情報量の多さ、テーマ設定の粒度、ならびにグループ討議時間の短さといった課題も提示された。これらの点については、次回以降のWS企画に反映し、より高度な議論を通じた融合的領域の抽出を目指す。

## おわりに

TSC は 2025 年 7 月、将来像の実現に向けて技術分野全体を俯瞰してフロンティア領域等(新たに取り組むべき領域や取組を強化すべき領域)を抽出する『Innovation Outlook Ver. 1.0』を公開し、技術開発から社会実装までの道筋を描く『イノベーション戦略』の策定を開始した。

今回は Innovation Outlook Ver. 1.0 増補版として、Ver. 1.0 で俯瞰できていなかった分野の俯瞰や更なる深掘り検討、さらには TSC の所掌分野を横断するような、より広範な視点からの「新設定分野」に関する調査分析結果を踏まえて、新たなフロンティア領域等を特定し、その結果を取りまとめた。

Innovation Outlook で抽出したフロンティア領域等は、技術や市場に不確実性が高く、失敗する可能性も高いが、失敗を恐れず取り組む必要がある。また、フロンティア領域等の取組を進めるにあたっては、個々の技術を対象とするのではなく、社会課題解決に向けた提供価値を基準として、対象とする技術や社会実装の取組をアジャイルに見直していくことが重要である。そのため、Innovation Outlook は様々な意見や取り巻く状況の変化を踏まえ毎年度アップデートしていく予定である。さらに、社会的インパクトがより大きいフロンティア領域等を抽出するためには、社会課題を起点としたバックキャスト・アプローチで、多様な分野の知見を集約できるような総合知的な議論を行うことが有効と考えられる。現在 TSC では、こうした多様性の高い議論の仕組みについて調査検討中であり、この結果を踏まえて Innovation Outlook 策定プロセスの改善を図っていく。

イノベーション創出に向けては、革新的な技術アイデアを国内外から幅広く集めてフィジビリティスタディを実施し、得られた知見に基づいてイノベーション戦略を策定する仕組みを回していくことが重要である。Innovation Outlook では TSC が注目する技術を「取り組むべき具体的手段の例」として例示したが、続くステップではこれをきっかけとした RFI(情報提供依頼)を通じて産業界やアカデミア等に潜在する多様な革新的技術を掘り起こしてフィジビリティスタディを実施し、その結果を本格的なプロジェクトの組成へとつなげていくことにしている。

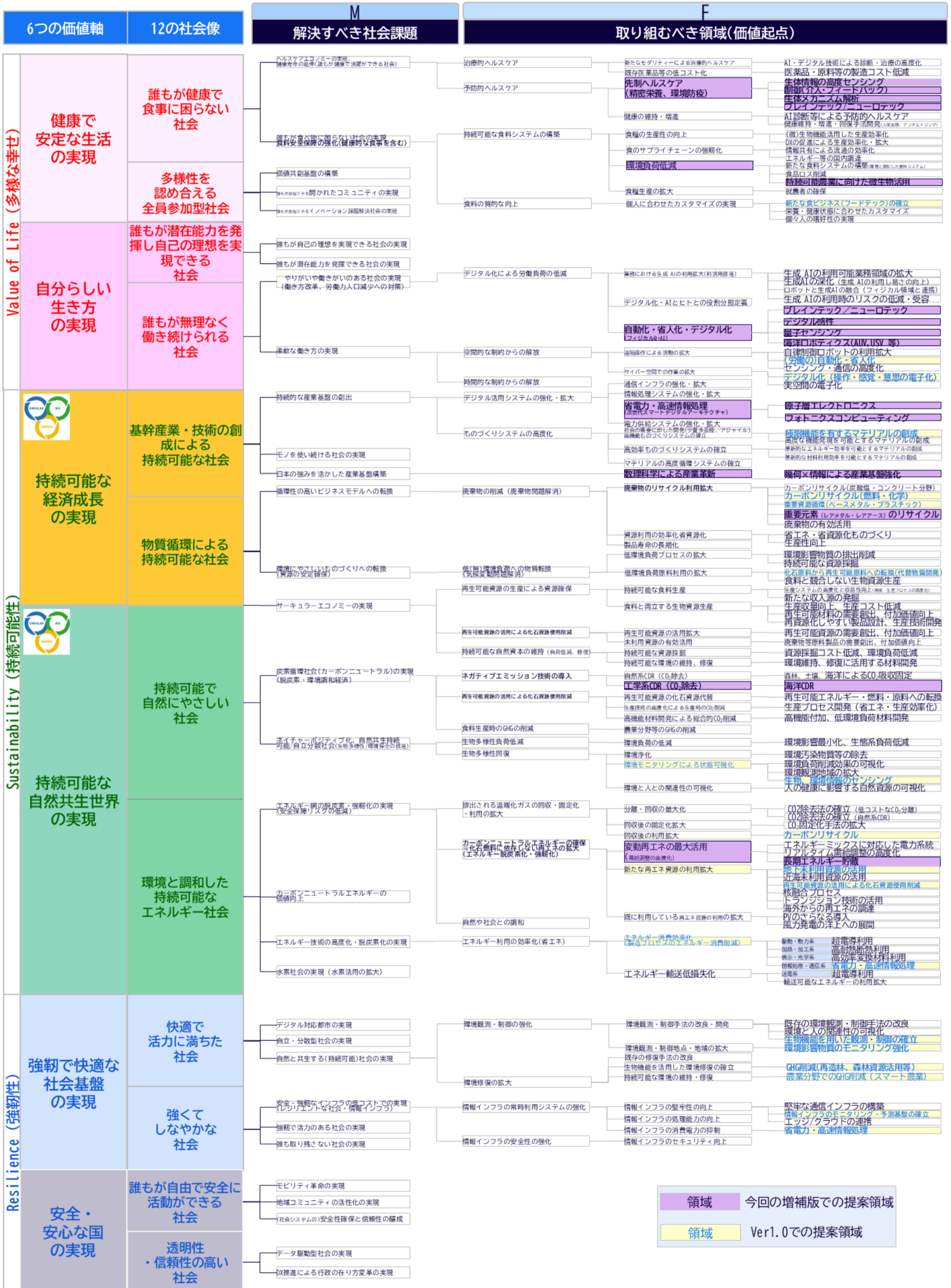
さらに、得られた革新的技術の社会実装に向けてビジネスとして定着させるための事業モデルの構築、提供価値の最大化に向けたルール・標準の整備、社会受容性の醸成など、社会システムの変革につながるような取組も必要不可欠である。その検討は TSC のみでできるものではなく、関係省庁や、産業界、スタートアップ、アカデミア、ベンチャーキャピタル・金融機関、メディアとも連携し、多様な知見を集約した総合知的な議論を行うことが有効と考えられる。TSC としては、こうした議論を積み重ねてイノベーション実現への道筋を具体化し、これをイノベーション戦略として取りまとめていく予定である。

なお、国家資本主義の台頭とそれに伴うサプライチェーンの再編、ポピュリズムの拡大と保護主義的な政策発動、世界各地での紛争勃発など、経済社会情勢の変化は一層激しくなっており、社会課題の設定自体が揺れ動くことも想定される。Innovation Outlook 策定の前提となる将来像や社会課題の見直しも併せて行い、Ver. 2.0 以降の構想を検討していきたい。

---

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。

# MFT 全体俯瞰図(詳細版)



領域 今回の増補版での提案領域  
領域 Ver.1.0での提案領域

# TSC Foresight

## Innovation Outlook Version 1.0 増補版

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。