Innovation Outlook Version 1.0

2025 年 7 月

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

巻頭言



国立研究開発法人
新エネルギー・産業技術総合開発機構
理事長　斎藤 保

この度、NEDO の技術インテリジェンス機能の中核を担う機関として、昨年 7 月に新たに発足させた『イノベーション戦略センター』において、『Innovation Outlook Version 1.0』を発行する運びとなりました。

イノベーション戦略センターの前身である『技術戦略研究センター』は 2014 年の設立以来、NEDO のミッションであるエネルギー・地球環境問題の解決や産業競争力の強化に向けて、個々の技術課題について技術開発から実用化までの道筋を示す技術戦略を策定し、国家プロジェクトの企画立案に貢献してきました。

一方で、ここ 10 年間で、AI やデジタル化の進展、スタートアップ文化の浸透、技術開発を巡るグローバル競争の激化などイノベーションを取り巻く環境が大きく変化してきており、今後は、技術開発から実用化まで一方向で進めるリニアモデルではなく、環境の変化にアジャイルに対応しながら技術・アイディアの探索から育成、プロジェクト化、その成果の社会実装まで速やかに進めることが求められるようになりました。

このような背景から、技術開発にとどまらず、社会実装に向けてイノベーションを推進するため、昨年 7 月に、『技術戦略研究センター（TSC: Technology Strategy Center）』を改組し、新たに『イノベーション戦略センター（TSC: Technology and Innovation Strategy Center）』を発足させました。新たな TSC では、『Innovation Outlook』を策定し、全ての技術分野を俯瞰した国内外の技術・市場・政策の動向を調査・分析に基づき、新たに取り組むべき領域（フロンティア領域）や取組を強化すべき領域を提案することとしています。さらに、選定された重点フロンティア領域について、技術開発から社会実装までの道筋を示す『イノベーション戦略』を策定し、プロジェクトの企画立案やマネジメントを推進していくこととしています。

TSC では昨年 7 月以降、『Innovation Outlook』の策定に向けて、各技術分野の調査・分析を行い、新たな産業の創出や社会課題の解決の観点からフロンティア領域等の検討を進めてきたところですが、この度、初版となる『Version 1.0』を取りまとめ、公表することになりました。『Innovation Outlook』は、経済産業省や NEDO 内部に対して情報提供を行い政策やプロジェクトに生かすことはもちろん、産業界、中小企業、スタートアップ、金融機関、ベンチャーキャピタル、メディア、海外のファンディングエージェンシー（ＦＡ）・シンクタンクなどのステークホルダーに対しても積極的に発信し、各ステークホルダーによる研究開発やその社会実装に向けた取組を促進してまいります。

NEDO では、『Innovation Outlook』などの取組を通じて、研究開発成果を最大化し、企業等による社会実装を促進するイノベーション・アクセラレーターとしての取組を強化してまいります。

目次

1 章 序章 1
1-1 Innovation Outlook 策定の背景・意義 1
1-2 Innovation Outlook の調査分析手法 19
1-3 Innovation Outlook の構成 27
2 章 目指すべき社会像 28
2-1 国際的な枠組み 28
2-1-1 持続可能な開発目標（SDGs） 28
2-1-2 国連気候変動枠組条約締約国会議（COP） 29
2-1-3 主要国間の合意枠組（G7・G20） 30
2-2 主要国の関連政策 31
2-2-1 米国 31
2-2-2 EU 及び欧州主要国 33
2-2-3 日本 35
2-3 TSC が描く将来像 38
2-3-1 豊かな未来レポート 39
2-3-2 総合指針 2023 42
2-3-3 自然共生経済 44
2-3-4 デジタル社会の将来像レポート 45
3 章 解決すべき社会課題と取り組むべき領域 47
TSC が所掌する技術分野の概要 47
解決すべき社会課題（M） 48
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） 51
3-1 サステナブルエネルギー分野 53
3-1-1 分野の俯瞰 53
3-1-2 解決すべき社会課題（M） 55
3-1-3 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向 59
3-1-4 （1）社会課題の解決のために取り組むべき領域（F）：
地下未利用資源の活用 63
3-1-5 （1）具体的な手段（技術開発とその他の社会実装に向けた取組）（T） 70
3-1-6 （1）手段を進める上での道筋 73
3-1-4 （2）社会課題の解決のために取り組むべき領域（F）：
変動性再エネ最大活用のための長期エネルギー貯蔵 75

3-1-5 (2)具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T)…82
3-1-6 (2)手段を進める上での道筋…85
3-2 環境・化学分野…86
3-2-1 分野の俯瞰…86
3-2-2 解決すべき社会課題(M)…88
3-2-3 (1)資源循環分野における社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向…90
3-2-3 (2)カーボンリサイクル(化学品・燃料分野)における社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向…96
3-2-4 (1)社会課題の解決のために取り組むべき領域(F):ベースメタルの資源循環…100
3-2-5 (1)具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T) 107
3-2-6 (1)手段を進める上での道筋…109
3-2-4 (2)社会課題の解決のために取り組むべき領域(F):化学品炭素源の化石資源からの抜本的な転換…110
3-2-5 (2)具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T) 114
3-2-6 (2)手段を進める上での道筋…118
3-3 アグリ・フードテック分野…119
3-3-1 分野の俯瞰…119
3-3-2 解決すべき社会課題(M)…125
3-3-3 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向…126
3-3-4 社会課題の解決のために取り組むべき領域(F)…130
ヘルスフードテック…143
3-3-5 具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T)…143
3-3-6 手段を進める上での道筋…145
森林資源循環利用…146
3-3-5 具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T)…146
3-3-6 手段を進める上での道筋…148
(参考)スマート農業…149
3-3-5 具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T)…149
3-3-6 手段を進める上での道筋…151
3-4 デジタル分野…152
3-4-1 分野の俯瞰…152
3-4-2 解決すべき社会課題(M)…155
3-4-3 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向…156

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、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 159
3-4-5 具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T) 175
3-5 マテリアル分野 188
3-5-1 分野の俯瞰 188
3-5-2 解決すべき社会課題(M) 194
3-5-3 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向 195
3-5-4 社会課題の解決のために取り組むべき領域(F):
極限マテリアル 197
3-5-5 具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T) 220
3-5-6 手段を進める上での道筋 225
3-6 バイオエコノミー分野 227
3-6-1 分野の俯瞰 227
3-6-2 解決すべき社会課題(M) 229
3-6-3 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向 230
3-6-4 社会課題の解決のために取り組むべき領域(F) 238
3-6-5 具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T) 242
3-6-4 (1)社会課題の解決のために取り組むべき領域(F):
化石原料から再生可能原料への転換:バイオものづくり 245
3-6-5 (1)具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T) 249
3-6-4 (2)社会課題の解決のために取り組むべき領域(F):
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:
リビングマテリアル・リビングデバイス 253
3-6-5 (2)具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T) 257
3-7 6 分野の横断的考察 266
4 章 終章 271
付録:MFT 全体俯瞰図(詳細版) 273

1章　序章

1-1 Innovation Outlook 策定の背景・意義

気候変動、少子高齢化、安全保障上の脅威など我が国や世界を取り巻く社会課題が深刻化、複雑化している。そうした社会課題を乗り越えて、また、経済成長を追求するだけでなく、カーボンニュートラル、サステイナビリティ、レジリエンス、ウェルビーイングなどの価値を創出し、より良き豊かな将来像を実現していくことが求められている。

社会課題を解決しながら、将来像を実現するため、そのギャップを埋めるこれまでにない革新技術の開発が必要不可欠である。くわえて、開発された革新技術を社会課題の解決につなげるためには、新たなビジネスモデルの開発、ルール・標準の整備、社会受容性の醸成など、革新技術を活用するための社会システムの構築が必要になる。すなわち、将来像の実現のためには、従来の産業構造あるいは社会システムを前提とした取組ではなく、新たな産業の創出といった社会システムとしての変革につながるイノベーション、トランスフォーマティブ・イノベーションが求められる。

我が国には、高機能な素材・部材をはじめ、他国にはない強みを有する技術・産業が多く存在しており、これらの強みを活かすことにより、新たな産業を創出し、社会課題の解決に貢献するポテンシャルを有している。

こうした状況の下、これまでも NEDO では、社会課題の解決に向けて、革新技術の開発に取り組んできた。また、技術戦略研究センターを設置し、技術開発から実用化までの道筋を示す『技術戦略』を策定し、プロジェクトを推進してきており、実用化につながった研究成果も得られている[1]。

しかしながら、これまでのプロジェクトでは、主に従来の延長線上の個別の技術・産業にフォーカスした取組にとどまっており、今後のトランスフォーマティブ・イノベーションに向けては、社会課題を起点とした議論を通じて、社会システムの変革のために必要となる価値・機能を特定して、個別の技術や産業の枠を越えて取り組むことが必要である。

従来の技術、産業分野を越えて非連続な課題に取り組むという観点では、既存の業務、システム、人材、組織、文化の枠を越えた対応が求められるが、国内外の先進的な企業や公的機関においては、両利きの経営の考え方が取り入れられてきている。

[1] 実用化ドキュメント（NEDO）https://www.nedo.go.jp/media/practical-realization/index.html

また、技術開発の進め方に目を向けると、AI の高度化・コンピューティングの高速化などデジタル化の進展やスタートアップ文化の浸透などにより、イノベーションのハイサイクル化が進み、また、米国や中国などでは、技術開発を巡るグローバル競争が激化する中で、民間や政府のファンドによる大規模なリスクマネーの供給により、基礎研究段階から加速的に技術開発が進められている。

こうした変化に対応するために、イノベーションのマネジメントについて、国際的にも議論が進んでいる。

欧州を中心として各国で、ミッション志向型プログラムにより、社会課題解決、競争力強化に向けて、技術開発のみならず、事業化支援、ルール・標準の整備、社会受容性の醸成など一体的に進める動きが出てきている。

また、インターネット、GPS などの革新技術を生み出してきた DARPA（米国防高等研究計画局）が成功モデルの一つと捉えることができ、米国内のみならず、欧州でも、チャレンジングな課題に対し、PM（プログラムマネジャー）又は PD（プログラムディレクター）を設置して、アイデアの探索、プロジェクトの企画立案、予算配分、見直し、事業化支援など裁量権を持たせ一貫して進める DARPA のモデルを横展開する ARPA 型[2]が注目されている。

さらに、経済的、社会的な変革に向けて、戦略的インテリジェンスを活用し、新興技術を取り巻く課題や不確実性に対応しながら、政策やプロジェクトを運営する、先見的ガバナンスについても検討が進んでいる。

そこで、NEDO では、従来の技術戦略研究センターをイノベーション戦略センター（TSC：Technology and Innovation Strategy Center）に改組した上で、社会課題を解決しつつ、将来像を実現するため、各分野での市場、技術、政策の動向を俯瞰的に把握し、それを踏まえ、我が国が新たに取り組むべき領域（フロンティア領域）、又は、取組を強化すべき領域を特定するための『Innovation Outlook』を策定するとともに、各領域について研究開発から社会実装に向けた道筋を描く取組、『イノベーション戦略』の作成を開始し、フロンティア領域についての研究課題の探索から育成、事業化まで包括的かつ機動的に進める仕組みの構築を進めているところである。

策定した Innovation Outlook については、経済産業省ほか関係省庁、国立研究開発法人などの政府関係機関に情報提供を行い、政策やプロジェクトの企画立案に貢献するとともに、産業界、中小企業、スタートアップ、アカデミア、金融機関、ベンチャーキャピタル、メディア、海外 FA（ファンディングエージェンシー）・公的シンクタンクな

[2] 米国内では 2007 年に設立された ARPA-E（エネルギー高等研究計画局）など各分野で ARPA モデルの組織が設置されている。また、ドイツでは 2019 年に SPRIN-D（破壊的イノベーション連邦機関）、英国では 2023 年に ARIA（高等研究発明局）が設立されている。また、EU でも 2024 年 9 月に発表された「ドラギレポート」の中で、欧州イノベーション会議（EIC）を ARPA 型機関に改革することが提言されている。

どに対しても積極的に情報発信を行うことにより、研究開発やその投資など社会実装に向けた取組につなげていく考えである。

なお、Innovation Outlook は一度策定して終わりということでなく、政府関係機関や様々なステークホルダーからのフィードバック、経済社会情勢の変化、技術開発の進展、情報収集・分析から得られた新たな知見などを踏まえ、毎年度アップデートを行い、『フロンティア領域等』の追加、拡充を行っていく予定である。

この後の項で、Innovation Outlook の策定の背景にある考え方について紹介する。

(1) トランスフォーマティブ・イノベーションの推進

経済成長と社会課題の解決を両立しながら将来像を実現するため、革新技術が期待されているが、昨今、革新技術を起点とした新産業や新市場の創出の潮流は急激に加速しており、さらに、市場やサプライチェーンのグローバル化に伴う経済安全保障や、国際的な協力が必要な気候変動、先進国での少子高齢化など解決すべき社会課題や社会のニーズは複雑化・多様化している。こうした状況を踏まえると、今後は、革新技術を開発するだけでなく、その早期の社会実装を目指して事業モデルの構築、ルール・標準の整備、社会受容性の醸成など、新たな社会システムの変革を伴うトランスフォーマティブ・イノベーションへと結実させていく取組が強く求められる(図 1-1)。トランスフォーマティブ・イノベーションに向けては、社会課題を起点とした議論を通じて、社会システムの変革のために必要となる価値・機能を特定して、個別の技術や産業の枠を越えて取り組むことが必要である。

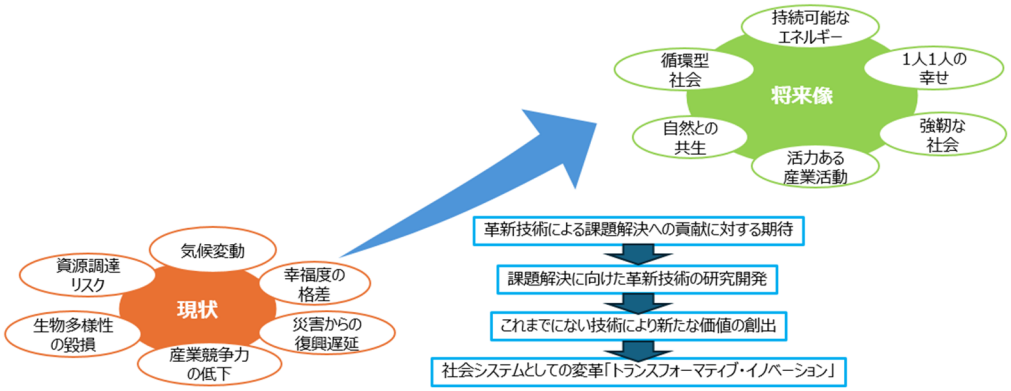


図 1-1　社会システムとしての変革 トランスフォーマティブ・イノベーション

トランスフォーマティブ・イノベーションへの取組としては、OECD(経済協力開発機構)のトランスフォーマティブな『科学技術イノベーション政策』(以下「STI 政策」という。)のためのアジェンダ(コラム 1-1-1)、EU の Horizon Europe などのフレームワーク

プログラム、欧州各国の『ミッション志向型 STI 政策』に加え、日本の『戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）』（コラム 1-1-2）などが挙げられる。これらを踏まえると、

・プロジェクトの企画立案において、社会課題に対して技術開発とそれ以外を含む解決手段を総合的に示し、プロジェクトとそれ以外の取組を具体的に示すこと
・プロジェクト実施にあたって、プロジェクトと多様なステークホルダーの取組との連携体制を構築すること
・プロジェクト以外も含む社会実装に向けた道筋を示しつつ、プロジェクト期間中も、経済社会情勢の変化や市場・技術の動向を踏まえながら、機動的に加速・見直しを行うこと
・プロジェクト終了後においても、社会実装に向けた継続的な取組を推進すること

が方向性として挙げられる。

トランスフォーマティブ・イノベーションの推進にあたっては、複数の施策や取組が重層的に働く際に生じるステークホルダー間の利害対立の回避や多様なステークホルダーの価値の共有が重要であり、STI 政策の企画立案や実施に関わる政府、公的資金配分機関などの関係者には、セクショナリズムを乗り越えて、社会課題の解決に向けて包括的な取組を行うことが求められている。

コラム 1-1-1

OECD による従来の STI 政策とトランスフォーマティブな STI 政策の比較



出所： Agenda for Transformative Science, Technology, and Innovation Policies（OECD Science, Technology and Industry Policy Papers, OECD Publishing、2024）（NEDO イノベーション戦略センター訳）

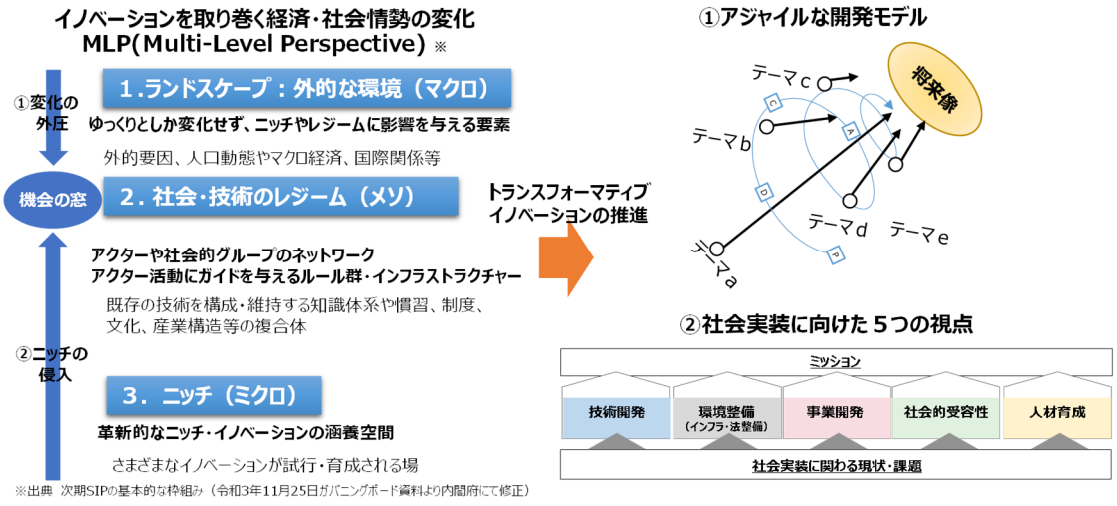
コラム 1-1-2

トランスフォーマティブ・イノベーションに向けた SIP 第 3 期の取組

SIP 第 3 期では、我が国が目指す将来像（Society 5.0）の実現に向けて、国内外の経済・社会情勢の変化に対応しつつ、技術開発にとどまらず、多角的な視点から社会変革を推進することを目指している。

このような社会変革を志向するイノベーション（トランスフォーマティブ・イノベーション）を推進するためには、従来の科学技術・イノベーション（STI）政策の枠組みを越えた総合的・複合的なアプローチが必要である。

このため、SIP 第 3 期では、①アジャイルな開発モデルでのテーマ設定、評価、予算配分、②社会実装に向けた５つの視点からの関係省庁や産業界と連携した取組を推進する。



出所：内閣府総合科学技術・イノベーション会議ガバニングボード（令和 5 年 3 月 2 日）資料 6

（2） イノベーション循環の推進

経済産業省イノベーション小委員会では、2024 年 6 月の中間とりまとめ（図 1-2）において、継続的な高付加価値事業の創出のためには、質と量の高い研究開発投資等を通じて、①新たな「技術・アイディア」を生み、②その事業化による「新たな価値の創造」を通じて、③これを「社会実装して市場創出・対価獲得」することが重要との提言がなされた。

また、こうして実現したイノベーションの成功モデルが、次なるイノベーションを生むといった循環を起こすことが重要、研究開発の質・量が伸び悩んでいるのは、技術開発段階からこうした市場創造・対価獲得の姿を描けていないからではないかとの課題が示された。

これら課題を受けて、イノベーション循環の推進のため、1.研究開発の量・質の拡充、2.事業化・付加価値の創出、3.「技術・アイディア」から「新たな価値」「市場創造・対価獲得」に至るまでの横断的な取組としてフロンティア領域の探索・重点支援に取り組むことが示された。

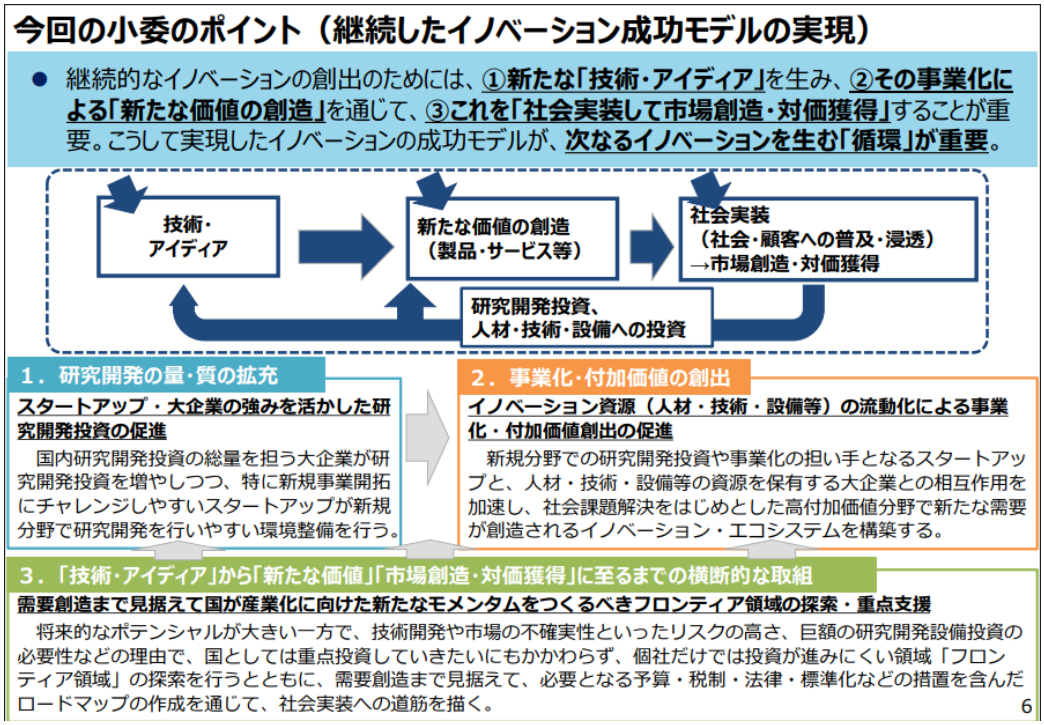


図 1-2 継続したイノベーション成功モデル

出所：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中間とりまとめ（概要）（経済産業省）
https://www.meti.go.jp/press/2024/06/20240621004/20240621004-1.pdf

（3） 日本の強みを活かした価値創出

NEDO 調査[3]においては、対象とするモノの製品数 969 品目のうち、日系企業群のシェアが 60%以上と高いシェアにある製品数が 224 品目と、米中欧と比較して圧倒的に多く、中でも素材・部材が 163 品目を占めている。素材・部材の 163 品目は、マーケット規模は限定されるが、素材から最終製品までの一連のサプライチェーンの中で重要なポジションを占める高機能マテリアル製品が多い（図 1-3）。

全969製品　※売上高の重複する製品は除外	日系	米国系	欧州系	中国系
シェアの高い製品(シェア60%以上)の品目数　[総額 兆円]	224 [18]	117 [66]	69 [25]	53 [41]
売上高の大きい製品(売上高1兆円以上)の品目数　[総額 兆円]	20 [109]	40 [240]	28 [222]	31 [271]

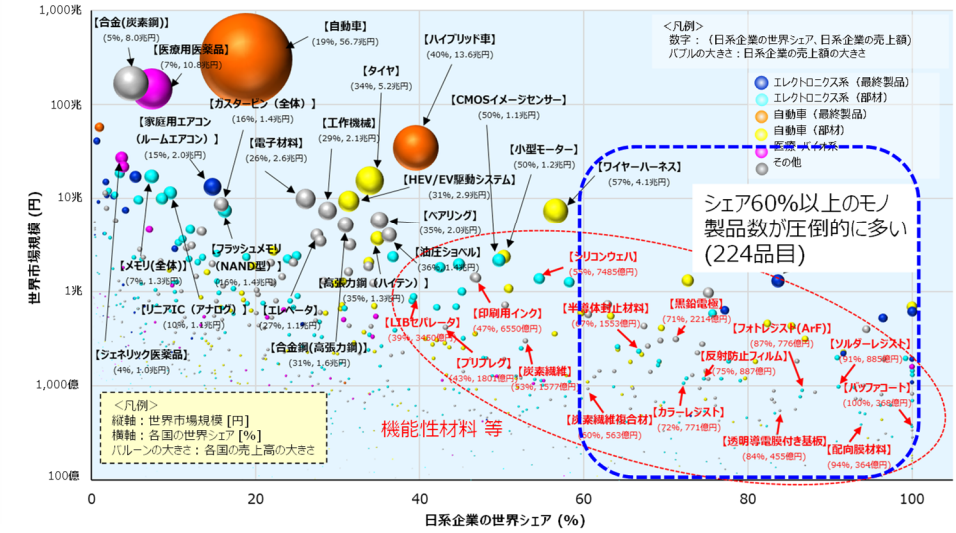


図 1-3　日本のモノ製品のポジショニング（2022 年）

出所：2023 年度 NEDO 調査を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

高機能・高付加価値で競合と差別性があるマテリアル製品の技術開発及び模倣困難な製造プロセス技術の開発が日本の強みを活かす方向として重要である（コラム 1-1-3）。マテリアルの価値を構成する源泉は、顧客価値から、環境価値、さらにはウェルビーイングのような広い社会を対象とする社会価値へと広がっている。経済価値との両立を長期的視点で追求し、価値の共通点をイノベーションの機会と捉えた取組が重要となっている。

[3] 日系企業のモノとITサービスソフトウェアの国際競争ポジションに関する情報収集

コラム 1-1-3

再浮上する日本には希望がある

カリフォルニア大学　ウリケ・シェーデ教授



- 日本は世間で言われるよりもはるかに強い。日本企業は力強くよみがえりつつある。悲観バイアスを持つ人々は、市場や経済がどのように機能すべきかについて米国経済を基準に考えているが、日本は独自の論理で動いている。
- 1990 年代から 2010 年代は「失われた時代」ではない。産業構造または企業経営とその戦略が大きく変わるシステム転換期といえる。
- 遅いのは停滞ではない。日本の先行企業は改革を重ねて現在、再浮上している。「遅い」のは、安定と引き換えに日本が支払っている代償である。
- 日本企業が世間で言われるよりもはるかに強い理由は、「ジャパン・インサイド」にある。グローバルな最先端技術の領域で事業を展開する機敏で賢い企業が新たに出てきたのだ。
- 技術の最前線で競争し、飛躍的イノベーションに貢献する方向へと進む行動変革の道筋を、技のデパート＝「舞の海戦略」と呼ぶことにした。
- シン・日本企業は収益性が高く、戦略、企業カルチャー、リーダーシップなどで共通する 7 つの特徴がある。
- 「タイト・ルーズ」理論を使うと、日本の変革が「タイトな文化」の中で起きていることが理解しやすくなる。日本企業は「ルーズな文化」のアメリカとは異なる形で変革してきたのだ。
- 日本の企業カルチャーの中心には 3 本柱がある。「3 つのうち 2 つ」という原則を使えばタイトな文化の中でも前進が可能になる。また、「LEASH」という新たな枠組みのもとで、タイトな文化の国において企業カルチャーの変革を成功させる方法が理解できる。
- シリコンバレーやユニコーンなどは日本のイノベーションのお手本にはならない。日本独自のスタートアップ創出の試みが注目される。
- VUCA（変動性、不確実性、複雑性、曖昧性）時代においても、日本は経済的な繁栄、政治の安定、社会の結束とのバランスを保ちながら、未来に向けた新しいビジョンと自信を持って新しいモデルへの道を歩んでいくことができる。

出所：シン・日本の経営　悲観バイアスを排す（ウリケ・シェーデ著、渡部典子訳、日経プレミアシリーズ、2024）

(4)　両利きの経営の重要性

従来の技術、産業分野を越えて非連続な課題に取り組むには、既存の業務、システム、人材、組織、文化の枠を越えた対応が求められるが、国内外の先進的な企業や公的機関においては、既存事業の効率化と漸進型改善（知の深化）と新規事業の実験と行動（知の探索）を同時に行う両利きの経営の考え方が取り入れられてきている（図 1-4）。

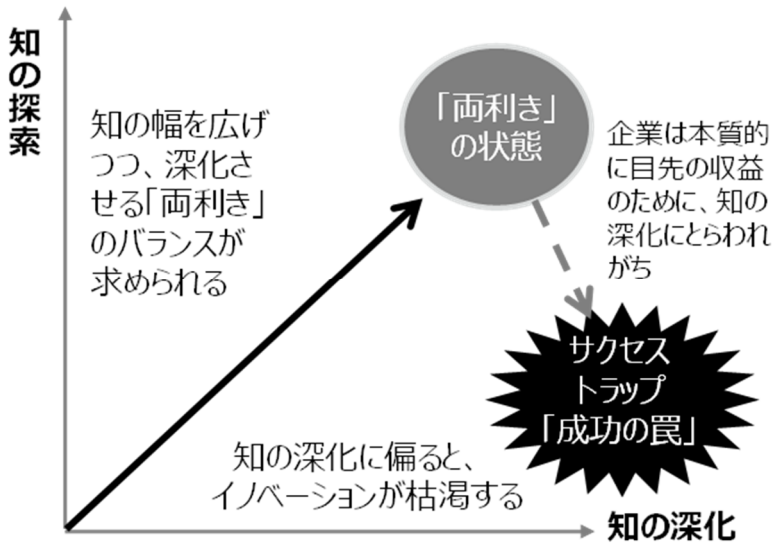


図 1-4　両利きの経営の考え方

出所：両利きの経営（チャールズ・A・オライリー、マイケル・L・タッシュマン著、入山章栄監訳・解説、東洋経済、2019）

一方、いわゆる両利きの経営の重要性は理解されているものの、実行面において上手く機能していないことも新産業の創出が遅れている原因として考えられる。新たな価値の創造に取り組む海外企業・政府系シンクタンクなどのヒアリング等を通じて得られた学びとして、

1）探索アプローチにおいては、産官学など多様な外部ステークホルダーとの頻繁かつ密なコミュニケーションにより新たな取組領域を検討し、既存ビジネス・組織体制などに偏らないバランスが重要であること
2）社会実装へのつなぎにおいては、失敗を次に活かすトライアンドエラーを前提とし、過度なマイルストーン管理を避け、モチベーションを下げないこと
3）当初から実装（ニーズ）側のステークホルダーと連携し、幅広い出口を持ち、アジリティ高く取り組むこと

などがあった。（コラム 1-1-4）

コラム 1-1-4

両利きの経営　先進事例のヒアリング結果

	IBM	SIEMENS	VINNOVA	ARPAE
	中長期のR&D方向付けのために、GTO(Global Technology Outlook)を策定	Pictures of the Futureをもとに、CCT(重点技術領域)を整理	社会課題解決等を目指し、Impact Innovationを運営	基礎研究の社会実装を目指し、ハイリスク領域への投資を実施
①探索アプローチ	• 重点領域案を社内で公募。選定基準は、社会的意義の大きさ・IBMの事業化可能性 • BUからも多くのアイデアを募りさらに外部エキスパートから中長期視点のインプットを獲得し、短期⇔長期、既存⇔新規をバランス	• PoFは産官学のパートナーと連携して策定（日頃からBUや大学に張り付ける構造）。毎年の活動がそのエコシステム形成に寄与 • BU/外部へのヒアリングを基に、重点技術領域を策定。選定基準は、複数BUの事業へのインパクトの大きさなど	• 取り組むべきミッションから公募して選定 • 応募案の評価は、外部エキスパートが中心に実施 • 選定基準は、（論文・特許数等ではなく）多様なステークホルダーの関与など	• 政策的な意図を踏まえ、政府長官等との協議の上で重点領域を最終決定 • 各PDが情報収集の上、プログラムを立案(自身の専門領域＋非専門領域の2件が主流) • PDによる自律的な探索体制（但し全体設計に課題意識）
②社会実装への繋ぎ	• GTOで選ばれた重点領域は、発案者中心に次年度にPJ化 • トップがトライアンドエラーに寛大 / トップの声掛けにより、特定プロジェクトに過度に拘らない組織風土	• トライアンドエラーを前提に、複数PJを並行で実施 • 社内での事業化が困難になった場合は、社外への売却等も模索	• ミッションごとにプログラムオフィスが設置され、個別PJの選定/見直しに対して大きな裁量を有する • 地方政府の公共調達との連携をはかり、社会実装を促進	• PDが、プログラム内の個別PJの選定/見直しに対して大きな裁量を有する • T2M(ARPA-E内の事業化支援チーム)が、事業化戦略/マッチング支援を提供
③仕組み	• BUを探索段階から巻き込み、事業化可能性を向上 –BUの事業戦略に合致する/BU発案のアイデアを優先 • ノブリスオブリージュ的価値観の全社浸透(BUが取組に協力的)＋心理的安全性の確保	• コーポレートとBUの混成チームによりPJ探索/推進 –コーポレートのリエゾン役が各BUに入り込み –BU側の参加インセンティブは他BUの取組状況を知る＋メンバーに選ばれたことの名誉感 • PoFを通じて、ステークホルダーとのコネクションを形成	• プログラム/PJの評価基準として多様なステークホルダーの関与を重視することで、探索~実装出口の広がりを担保	• コンサルファームが上流~下流まで包括的にPDを支援 (約850億円/10年間の契約) –外部エキスパートネットワーク提供/ワークショップ開催 –常駐のBooz社員にインフォーマルな調査依頼が可能 (常駐160人中、約40%がPh.D.)

出所：フロンティア領域等でのイノベーションエコシステムの構築のための INNOVATION OUTLOOK 策定及び発信に関する調査（NEDO、2025）

（5） NEDO で技術戦略をプロジェクトの企画立案・マネジメントで活用する上での課題

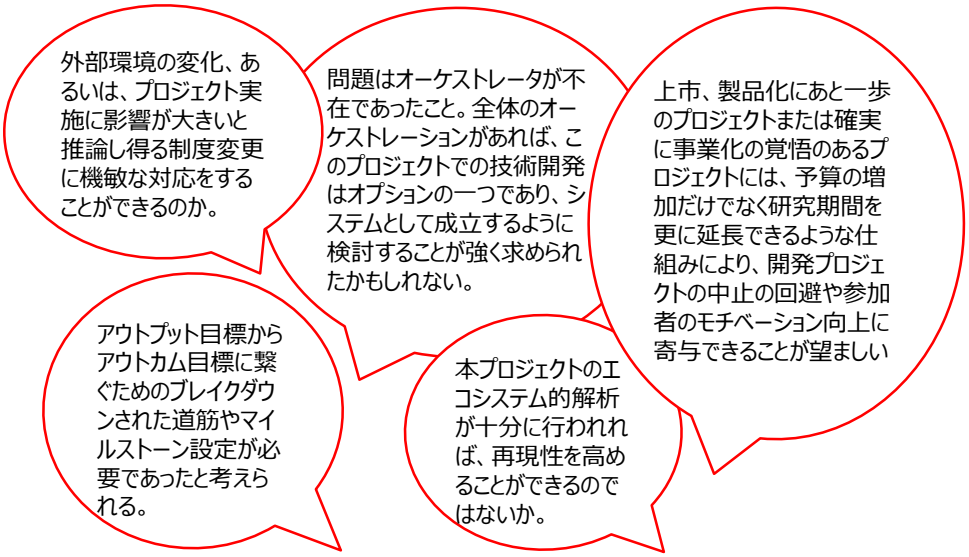
NEDO では、「エネルギー・地球環境問題の解決」と「産業技術力の強化」というミッションを掲げ、技術戦略を策定した上で、新たな価値創出・新産業創出に資するプロジェクトの推進に取り組んできた。

TSC では、2014 年度に設立以来、101 の技術戦略を策定し、延べ 159 のプロジェクトの企画立案・マネジメントに貢献してきた。技術戦略では NEDO プロジェクト実施中もしくは終了後に取り組むべきルール・標準の整備といった技術開発以外の政策手段や構築すべきエコシステムについての提案も含まれる。

一方、技術戦略で掲げた将来像や実現手段、研究開発プロジェクト構想が、必ずしもそのまま実現されるわけではない。例えば、産業政策上の優先順位により予算化がなされない場合、政府予算上の制約により全体構想の一部しか実施できない場合、想定されていた技術やプレーヤーとは異なる動きが生じてきた場合、対象分野を取り巻く環境変化が生じ構想の見直しが必要となった場合等があげられる。また、技術戦略では、NEDO プロジェクト実施中もしくは終了後に取り組むべきルール・標準の整備といった技術開発以外の政策手段や構築すべきエコシステムについての提案も含まれるものの、それらの担い手となる政府や業界・民間企業への具体的な取組にまでつながらない場合もある（コラム 1-1-5）。

コラム 1-1-5

技術戦略視点での試行的追跡評価における NEDO プロジェクトの企画立案段階での課題に係る有識者コメント



出所：2022 年度成果報告書 技術戦略視点での試行的追跡調査・評価手法に関する調査（NEDO）

（6） イノベーション戦略センターの発足、Innovation Outlook などの新たな活動の始動

従来の技術戦略を通じたプロジェクトの企画立案にとどまらず、国内外の市場・技術・政策の動向を踏まえ、NEDO プロジェクトのライフサイクル全体への貢献に取り組むことが必要と考え、社会実装に向けた伴走支援を行うこととした。

NEDO TSC の新たな活動を示したものが図 1-5 である。NEDO の組織改革の中で、TSC の顧客として、経済産業省をはじめとする関係省庁、NEDO 内、産業界、アカデミア、スタートアップ、ベンチャーキャピタル・金融機関、海外連携先などのニーズを踏まえた、活動の見直しを行い、以下の 4 点の活動を柱とすることとした。

1）経済産業省での組織改革（イノベーション・環境局の設置）との連動、政策への反映、

2）NEDO 内等への技術インテリジェンスの提供

3）産学官での研究開発等の促進に向けた情報提供・助言（コラム 1-1-6）

4）国・地域別の国際戦略、海外の FA・研究機関とのネットワーク構築

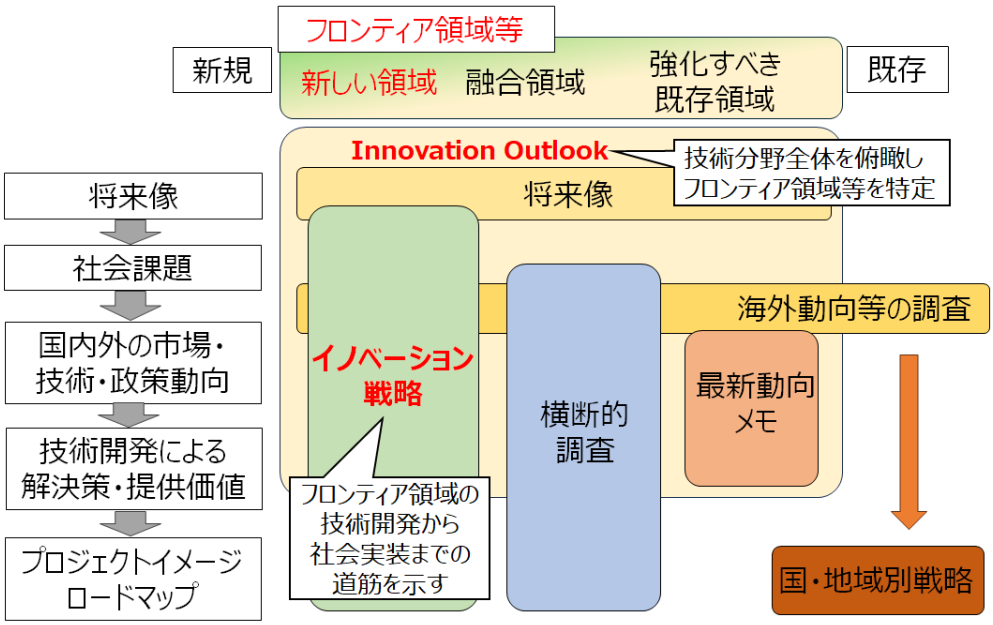


図 1-5 NEDO イノベーション戦略センターの新たな活動

図 1-5 で示すように、TSC は Innovation Outlook をその中心的な機能を担うものと位置付けて、各分野の国内外の市場・技術・政策の動向を俯瞰的に把握し、我が国として新たに取り組むべき領域（フロンティア領域）や領域間の融合を図るべき領域（融合領域）、さらには既存領域においても取組を追加・加速すべき領域（これらまとめて以下『フロンティア領域等』という。）を提案するとともに、各領域について研究開発から社会実装に向けた道筋を描く取組を開始した。

ここで、フロンティア領域等について、改めて定義を記載する。

・フロンティア領域等

我が国として取り組むべき新しい領域（フロンティア領域）、融合領域、新たな取組をすべき既存領域、取組を強化すべき既存領域の 4 領域全てを合わせたもの。

・フロンティア領域

将来的なポテンシャルが大きい一方で、技術開発や市場の不確実性といったリスクの高さ、巨額の研究開発設備投資の必要性などの理由で、国としては重点投資していきたいにもかかわらず、個社だけでは投資が進みにくい新領域。

（2024 年 6 月産業構造審議会 産業技術環境分科会 イノベーション小委員会 中間とりまとめ）

・融合領域

技術分野や領域をまたぐ領域。融合によって新領域となるため、フロンティア領域の内数となる。

・重点フロンティア領域

Innovation Outlook においては、「NEDO TSC、産総研、特許庁などからの情報を踏まえ、METI としての政策判断で定め、重点支援を行う領域」を『重点フロンティア領域』と称する。本領域は将来（15～20 年先）の「次世代の飯のタネ」となるような領域であり、フロンティア領域、融合領域が対象となる。選定基準は、①将来性、②技術・アイディアの革新性、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五つである。

（2025 年 1 月産業構造審議会 産業技術環境分科会 イノベーション小委員会 資料 4）

コラム 1-1-6

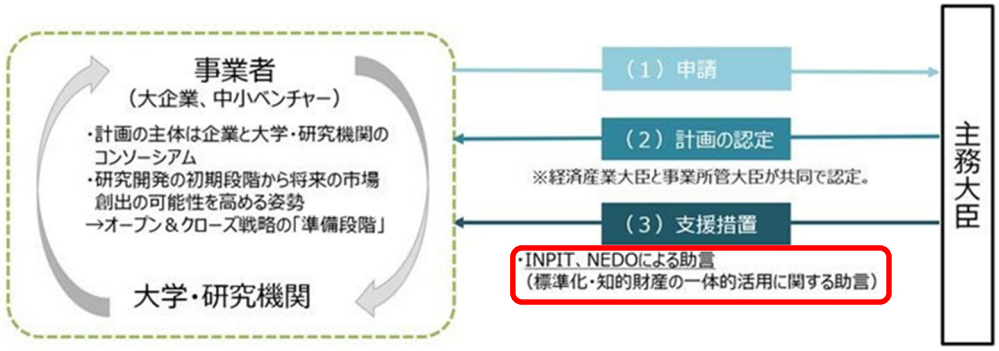
研究開発成果の社会実装に向けた TSC の新たな活動
－OCEAN*プロジェクトへのオープン＆クローズ戦略策定に向けた助言

研究開発成果を社会実装して、新たな市場を形成し、その中でシェアを獲得していくためには、単に研究開発を進めるだけでなく、その成果について、標準化や知的財産を一体的に活用するための「オープン＆クローズ戦略」の検討も必要である。

企業・大学などが共同で実施する研究開発について、オープン＆クローズ戦略の策定・活用を促進するため、2024 年 9 月に産業競争力強化法が改正され、特定新需要開拓事業活動計画認定制度（OCEAN プロジェクト）（下図）がスタートした。併せて、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法が改正され、TSC の新たな業務として、OCEAN プロジェクトの認定を受けた企業・大学などの事業計画に対するオープン＆クローズ戦略策定に向けた助言業務を担うことになった。同年 9 月・10 月に、第一弾として 9 件の計画が認定されたところであるが、認定を受けた事業者に対し、経済産業省、INPIT（独立行政法人工業所有権情報・研修館）、標準化の有識者と連携しながら、研究開発成果の社会実装に向けた助言を行っている。

新たな TSC では、この助言活動などを通じて、企業・大学などへのオープン＆クローズ戦略の普及、さらには、市場形成やシェア獲得につながる研究開発成果の創出や、オープン＆クローズ戦略を策定・活用する人材の育成に貢献していく方針である。

*Open & Close strategy with Exploiting Academic kNowledge



OCEAN プロジェクトのフロー

出所：経済産業省「特定新需要開拓事業活動計画認定制度」
（赤囲みは NEDO イノベーション戦略センター加筆）
https://www.meti.go.jp/policy/economy/hyojun-kijun/katsuyo/ocean_project/index.html

（7） フロンティア領域等の推進の仕組み

中長期的な社会実装を目指し、革新技術に係る研究開発プロジェクトを進める場合、あらかじめ市場・技術・政策について現状を把握し、また、その将来の動向を予測したとしても、プロジェクト期間やその成果の社会実装にあたって様々な状況の変化が起きることが想定される。

そのため、そのような研究開発プロジェクトについては、あらかじめ個別の研究開発テーマやそのプロセス、リソース配分などをリジッドに決めるのでなく、創出する価値を起点として、研究開発テーマについてのアイデアの情報収集、企画立案、プロジェクトの成果を踏まえたテーマやリソース配分の見直し、事業化に向けたテーマの追加など、状況の変化に応じて、柔軟かつ迅速な対応（高いアジリティ）が求められる。

そのため、フロンティア領域の推進にあたっては、図 1-6 のとおり、探索から育成、国家プロジェクトや民間事業としての実施、社会実装までの全体サイクルのマネジメントフローを検討している。

1.Innovation Outlook 策定を通じて所掌分野の全体俯瞰を行うことで、社会課題の解決のために日本の産官学が一体となって取り組むべきフロンティア領域等を提案する。

2.国家プロジェクトとして重点的に推進すべきフロンティア領域については、経済産業省に対して提案を行い、経済産業省が自らや他の機関からの情報を踏まえ、重点フロンティア領域を選定する。

3.選定されたフロンティア領域について、解決策を産業界、アカデミア、スタートアップなどから広く募集し、各領域で取り組むべき研究課題とその社会実装までの道筋を仮説として示したイノベーション戦略の案を策定した上で、フィジビリティスタディを実施する。

4.フィジビリティスタディの結果を踏まえ、仮説を検証した上で、必要に応じてピボットを行った上で、国家プロジェクトや民間事業としての実施を検討し、その結果をイノベーション戦略としてとりまとめる。

5.イノベーション戦略に基づいて国家プロジェクトや民間事業を組成して、社会実装に向けた取組を推進する。

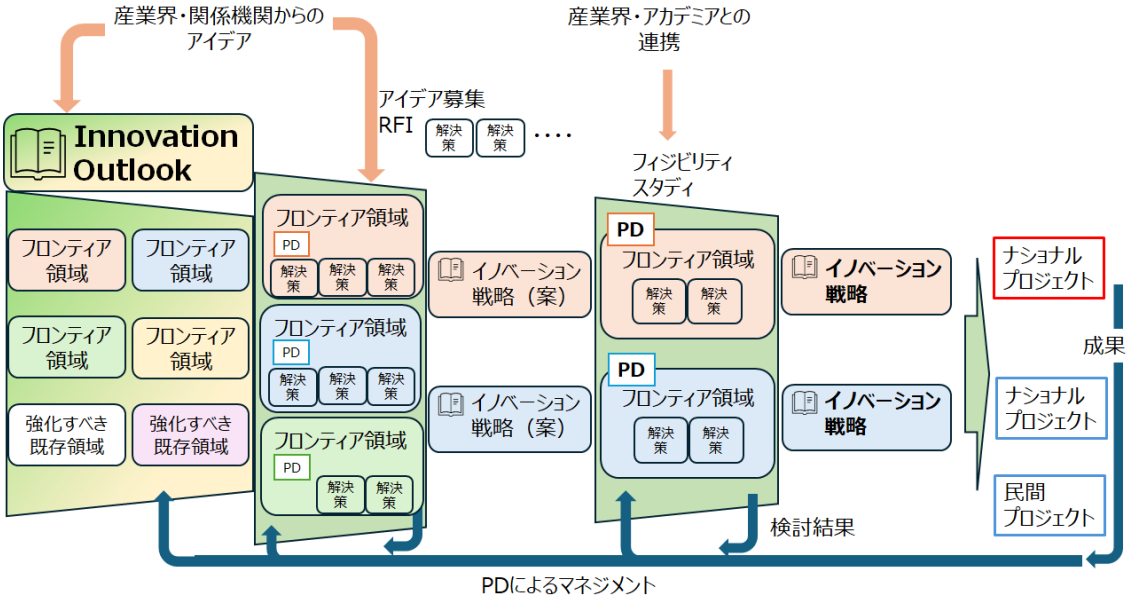


図 1-6　NEDO のフロンティア領域マネジメントフロー

ここで重要なことは、各領域について、フィジビリティスタディやプロジェクトの成果をモニタリングし、それを基にプロジェクトの方向性を見直していくサイクルを回すこと（図中の青矢印）である。そのため、Innovation Outlook は一度策定するだけでなく、Innovation Outlook の定期的なアップデートや、各フロンティア領域の情報収集、イノベーション戦略の検討を通じて、プロジェクトを取り巻く市場、技術、政策の動向について継続的かつ俯瞰的に情報収集・分析を行うことが極めて重要である。

また、フロンティア領域のマネジメントにあたって、高いアジリティを確保しながら、社会実装を目指す上で、以下の点が重要である。

1）フロンティア領域は、実現する価値を起点として、研究開発テーマの競合案・他技術分野の代替案・他技術分野との共創案（融合案）などの選択肢をパッケージ化した上で、フィジビリティスタディや調査分析を実施する。

2）市場・技術・政策動向をも踏まえつつ、ステージゲート等における個別の研究開発テーマを評価し、状況に応じて撤退も含めたプラン B にピボットする柔軟性と迅速性（高いアジリティ）を持ち、撤退や当初案からの方針転換を検討する。なお、撤退、方向転換は新規開発において当然のこととして許容され、むしろ、技術開発や事業化の困難性が明らかになったことが評価されることが重要である。

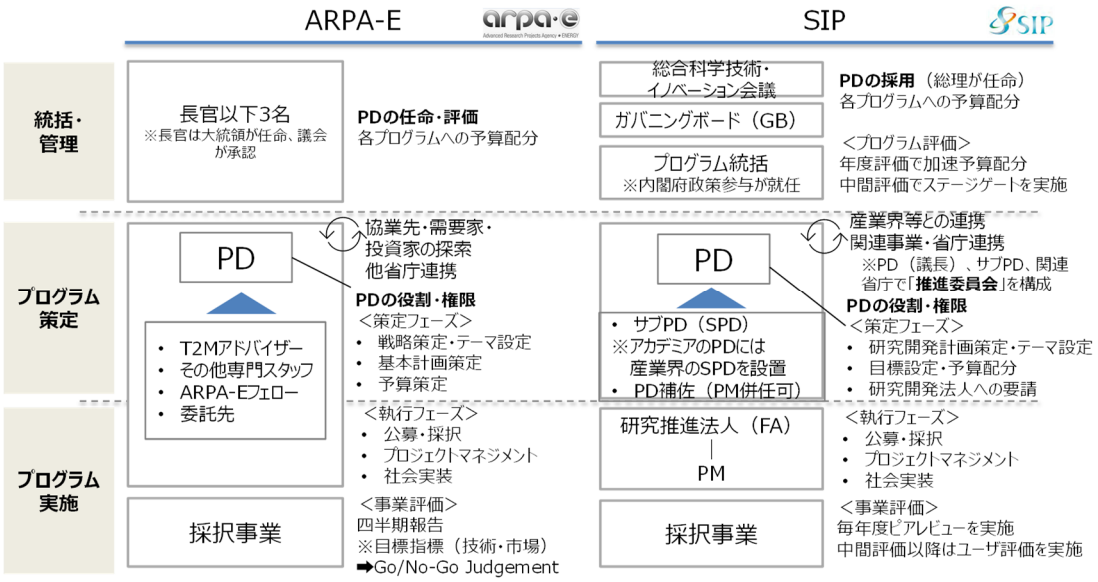
3）技術開発のみならず、ビジネス展開のサポート（事業主体の設立、経営リソースのマッチング、ユーザー企業や金融機関等とのマッチング、オープンクローズ戦略などのビジネスモデルの検討等）を行う。

こうしたマネジメントを行う上で、プログラムディレクター（PD）が肝になる。個別の研究開発テーマの責任者ではなく、フロンティア領域全体の責任者として、フロンティア領域における研究課題テーマのアイデア収集、企画立案、評価を踏まえた見直しやテーマの追加、事業化支援などを一貫して行うものである。PD には、個別研究開発テーマの専門性よりも、領域全体を俯瞰した上で価値創出を目指すプロデューサーとしての役割が求められる。PD の役割は大きく、そうした人材の確保、育成とともに、そのサポート体制を構築することも重要になる。

フロンティア領域の推進にあたっては、TSC 内に PD を配属・配置し、TSC や NEDO の関係部と連携しながら、その業務を遂行することとしている。また、ARPA-E や SIP などの事例（コラム 1-1-7）を参考として、我が国における PD 人材の状況や、予算・会計・人事制度、民間の事業・投資環境なども踏まえ、ガバナンスの仕組みや Tech to Market や Tech to Policy の社会実装に向けた仕組みなど、実行可能で、効果が出る仕組みを検討していく。

コラム 1-1-7

米国の ARPA-E と日本の SIP での PD を中心としたガバナンス体制



出所：各種資料を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

1-2 Innovation Outlook の調査分析手法

Innovation Outlook は、社会課題を解決しつつ、将来像を実現するため、各分野での市場、技術、政策の動向を俯瞰的に把握し、それを踏まえ、我が国が新たに取り組むべき領域（フロンティア領域）、又は、取組を強化すべき領域を提案するとともに、各領域について研究開発から社会実装に向けた道筋を描くものである。

まず、2 章では、目指すべき将来像として、NEDO がミッションとして掲げるエネルギー・地球環境問題の解決や産業技術力の強化に関する国際的な枠組みや国の目標・計画・戦略などを整理するとともに、これまで TSC が策定してきた『イノベーションの先に目指すべき「豊かな未来」－大切にすべき価値軸 / 実現すべき社会像とは－』や『持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針 2023』、また各分野の将来像として『自然共生経済』や『デジタル社会の将来像－人々の自律と共栄を支えるデジタル社会－』について紹介する。なお、Ver. 1.0 ではこれまで TSC が策定してきた将来像全体のアップデートは行っていないが、状況の変化に応じて、今後アップデートを検討する。

3 章では、2 章で掲げた将来像の実現に向けて、各技術分野（Innovation Outlook Ver. 1.0 では TSC の技術分野単位で、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 6 分野を対象とした。）の市場、技術、政策の動向を俯瞰的に分析し、我が国が新たに取り組むべき領域を抽出し、フロンティア領域等として提案する。

Innovation Outlook で提案するフロンティア領域は、経済産業省イノベーション小委員会の中間とりまとめ（1-1（2）参照）を踏まえ、「将来的なポテンシャルが大きい一方で、技術開発や市場の不確実性といったリスクの高さ、巨額の研究開発設備投資の必要性などの理由で、国としては重点投資していきたいにもかかわらず、個社だけでは投資が進みにくい領域」の定義に沿うものを基本としている。不確実で、巨額の資金が必要だからこそ国が支援し、日本の産業界の強みをさらに強化し、戦略的不可欠性を高める領域を探索するということである。したがってディープテックは、Innovation Outlook の中でフロンティア領域の一つとして深掘り検討の対象となる。

また、Innovation Outlook で扱う領域は、全く新たなフロンティア領域に必ずしもとらわれず、領域間の融合や既存領域の強化など各技術分野において取組を強化すべき領域も含みうることから、『フロンティア領域等』と表現している。

Innovation Outlook では、両利きの経営（1-1（4）参照）の考えを踏まえ、新規領域の実験と行動に軸足を置いて、技術的に研究開発成果の確度が読み切れないことや、十分な需要があるか不透明などの理由により従来の政策では取り上げられなかった領域も、積極的に取り上げている。その結果として、Innovation Outlook に記載するフ

ロンティア領域等は、TSC が独自の観点で提案するものであり、各分野の既存の政策・計画と必ずしも整合性がとれないものとなる場合もある。

また、目指す社会像・社会課題を考える上で 10 年以上先の 2040 年前後を一つの目安とし、分野ごとに有識者などの意見を踏まえ動向等の仮説を立て、バックキャスト・アプローチを中心に今取り組むべき領域を検討したものである。

仮説設定やフロンティア領域を特定する際の観点などにはいろいろな意見・見解があると思われるが、NEDO TSC として新たな角度から検討したフロンティア領域と理解いただきたい。

その上で、Innovation Outlook で提案したフロンティア領域等は、関係省庁や関係行政機関に情報提供を行い、政策やプロジェクトの企画立案に活かすとともに、産業界、中小企業、スタートアップ、金融機関、ベンチャーキャピタル、メディア、海外 FA・公的シンクタンクなどに対しても積極的に情報発信を行うことにより、研究開発やその投資など社会実装に向けた取組につなげていく考えである（コラム 1-2-1）。

コラム 1-2-1

所管省庁との関係性（Arm’s Length）に関する試行と考察について

表 2 より Arm’s Length が短い場合、省庁の顕在化したニーズ・情報を踏まえた一体的な活動が可能となる等により政策へのフィードバックが容易となる一方で、近視眼的な視点や個別分野の視点に立った活動になりがちになる等が想定される。逆に、Arm’s Length が長い場合、既存の政策に縛られず中長期的な視点、分野横断的な視点での議論が可能でトランスフォーマティブな提言が期待できる一方で、省庁内のニーズ・情報との乖離が生じたり、ステークホルダーの巻き込み等にコストを要し、政策への機動的かつ迅速なフィードバックが難しくなったりすることが想定される。実際に、図 2 において Arm’s Length が相対的に長いとされた 4 機関・部門においては、自律的かつ独立した立場で所管省庁への提言が可能ではあるものの、ステークホルダーの巻き込みにコストを要する点や、具体的な政策に繋げていくためには、政策意思決定者とのコミュニケーション上の工夫が必要である点について述べられていた。

表 2　Arm’s Length の長短とその特徴

Arm’s Length	メリット	デメリット
長い	● 既存の政策に縛らず、中長期的視点、分野横断的視点に立ちやすい。 ● 所管省庁以外のステークホルダーの巻き込みや働きかけが容易である。	● 省庁内のニーズ・情報との乖離が生じる。 ● ステークホルダーの巻き込み等にコストを要し、政策への機動的かつ迅速なフィードバックが難しくなる。
短い	● 省庁内の顕在化したニーズ・情報と一体的な活動が可能である。 ● ステークホルダーの巻き込み範囲が限定的なため負担が少なく、政策へのフィードバックが容易である。	● 既存の政策に縛られることで、近視眼的な視点、個別分野の視点に立ちやすい。 ● 所管省庁のニーズへの対応や働きかけのみとなってしまう。

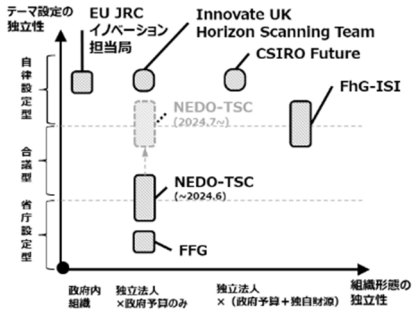


図 2　Arm’s Length に関する試行的マッピング

出所：トランスフォーマティブ・イノベーションの実現に向けた技術インテリジェンス機能の在り方に関する一考察、第 38 回研究・イノベーション学会年次大会一般講演要旨（NEDO、2024）

以下の項では、Innovation Outlook で用いた具体的な調査分析手法を説明する。

（1）策定のアプローチとフレームワーク

トランスフォーマティブ・イノベーション（1-1（1）参照）に向けては、社会課題を起点とした議論を通じて、社会システムの変革のために必要となる価値・機能を特定して、個別の技術や産業の枠を越えて、技術開発のみならず、事業モデルの構築、ルール・標準の整備、社会受容性の醸成などに一体的に取り組むことが必要である。

また、非連続なイノベーションの出現や他分野での代替技術が先行する場合、地球環境問題や地政学的な変化など経済社会情勢の変化により技術開発を取り巻く環境が変化する場合など将来の動向は予測しづらい。従来の技術開発では、まず有望な技術を特定した上でゴールを目指すフォアキャスト・アプローチによるリニアな研究開発が多かったが、将来の技術開発やそれを取り巻く状況が読みづらい中、一つの特定技術の開発に偏るのはリスクもある。

そこで Innovation Outlook では、目指す社会像と社会課題を起点とし、バックキャスト・アプローチにより、社会課題解決に求められる機能・提供価値を抽出し、フロンティア領域や取組を強化すべき領域を特定し、同様の機能・提供価値をもつ複数の技術や技術の社会実装に向けたアイデアをパッケージ化して捉える分析を行うこととした。

上記理由から、Innovation Outlook では、Arthur D. Little（ADL）により開発され商標登録された技術経営のフレームワークの一つである MFT®（Mission/Market、Function、Technology）フレームワークを参考として、ロジックモデルを構築し、フロンティア領域等の探索を行った。

本ロジックモデルを用いることで、以下のような考え方でフロンティア領域等の検討を行うことが可能となる（図 1-7）。

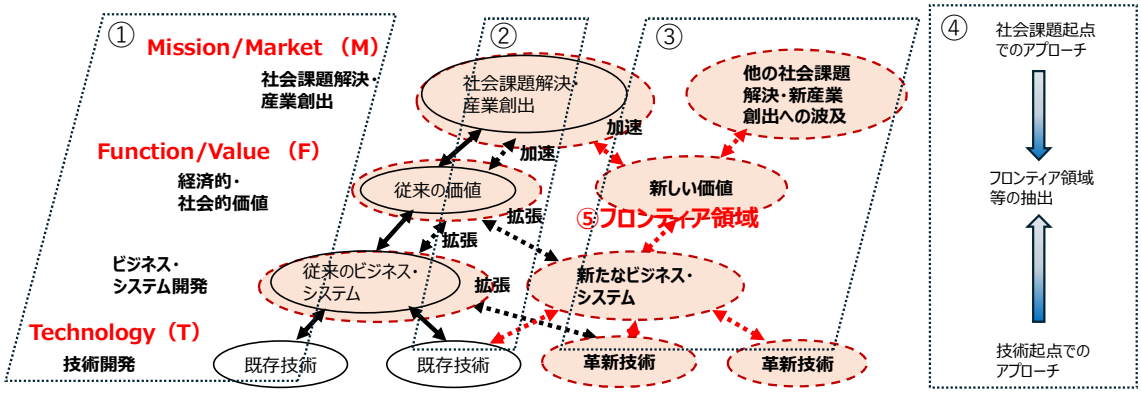


図 1-7　Innovation Outlook のロジックモデル

①社会課題の解決や新たな産業の創出に向けて、革新技術の開発が期待されているが、単一の技術（T）のみではなく、技術（T）と技術（T）を組み合わせ、技術（T）群をシステムとして組み立て、ビジネスとして設計することで、経済的・社会的な価値を生み出す機能（F）となり、その機能を継続的に発現することによって、社会課題解決や産業創出（M）につながる。

②また、革新技術（T）の開発によって、従来のビジネス・システム、さらには、従来の価値（F）が拡張され、社会課題解決や産業創出が加速される。（従来の NEDO プロジェクトに見られる漸進的イノベーション）

③革新技術（T）と革新技術（T）が、革新技術（T）と既存技術（T）が組み合わさって、新たなビジネス・システム、さらには新しい価値（F）が創出される。新しい価値（F）は社会課題解決や産業創出を加速するとともに、他の社会課題解決や新産業創出に波及する可能性もある。（非連続イノベーション）

④革新技術（T）が社会課題解決や産業創出（M）につながる流れとしては、技術が何の価値につながり、どのように社会課題解決や産業創出につながるか、技術起点で考えるアプローチと、対応すべき社会課題や目指すべき産業の姿から、生み出すべき価値を考えて、それにつながる技術を特定していく社会課題起点でのアプローチが両面ある。（オールキャストアプローチ）

⑤フロンティア領域は価値（F）を基準として設定することにより、様々な社会課題解決や産業創出（M）につながるか、また、価値（F）を創出するためにどの技術（T）が必要なのか、技術（T）と技術（T）をどう組み合わせるべきか、どの技術（T）とどの技術（T）を比較すべきか、どの技術（T）を革新技術（T）として開発すべきか、また、社会実装するために新しいビジネス・システムをどう構築すべきかといった議論が可能となる。（フロンティア領域の推進の仕組み）

(2)取り組むべき領域の特定の観点

2025 年 1 月経済産業省イノベーション小委員会において、イノベーション・環境局は、「将来性(成長性・社会課題)」「技術・アイディアの革新性」「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」の 5 つの観点を総合評価して、重点フロンティア領域を特定することが示された(図 1-8)。

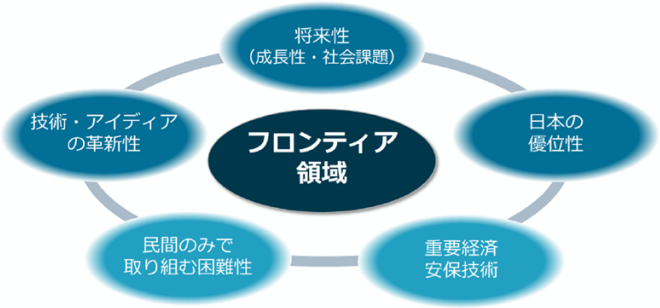


図 1-8　フロンティア領域を評価する 5 つの観点

出所:https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/innovation/pdf/005_04_00.pdf

他方、今回の Innovation Outlook では当該 5 つの観点も踏まえつつも、上記 1-2 に記載のとおり、TSC が独自の観点・アプローチにより、TSC が考えるフロンティア領域等を提案するものである。

TSC では上記のロジックモデルを用いて、社会課題(M)起点、技術(T)起点の両面からアプローチを行い、価値を基準としてフロンティア領域等を抽出することとしているが、5 つの観点については、それぞれのアプローチの中で含むべきものである。具体的には、「将来性(成長性・社会課題)」は将来像の実現や社会課題の解決に貢献すること、「技術・アイディアの革新性」は価値を創出するために必要とされる革新技術・アイデアを抽出、創造すること、「日本の優位性」は部材・素材など技術の強みに加え、自然災害や少子高齢化など課題先進国であることや日本人の気質・日本の住みやすさ・働きやすさなどの環境を活かすこと、「民間のみで取り組む困難性」「重要経済安保技術」は市場・技術・政策の視点から国・公的研究機関が支援する意義として、考える必要がある(図 1-9)。

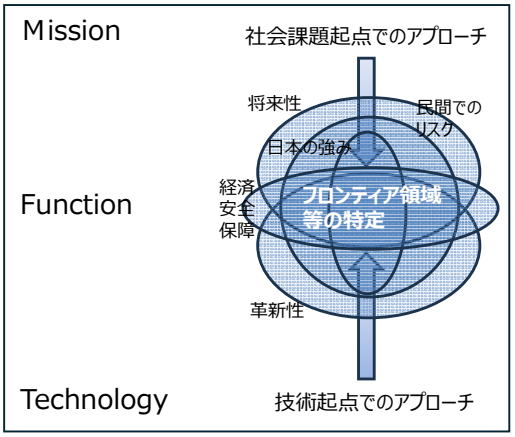


図 1-9　TSC のロジックモデルと 5 つの観点との関係

また、TSC としては、これらの 5 つの観点は必ずしも定量的に測れるものではなく、Horizon Scanning 手法などにより、各分野のエキスパートの意見を幅広く収集することが重要であると考えている。また、観点の間に、技術の革新性よりも既存技術を活かし社会課題の解決を優先するかなど、トレードオフ関係が生じることもあり、どの観点を優先するかは、政策当局、産業界、スタートアップ、アカデミア、国民など立場によって異なることがあると認識している。

今後、当該 5 つの観点やそれ以外の観点も踏まえ、代替・競合技術やサプライチェーン、戦略的不可欠性などを分析し、フロンティア領域等としての重要性を評価していきたい。

Innovation Outlook Ver. 2.0 以降でさらに検討していくが、注目している領域・技術の切り口を紹介しておく。

1）日本の強みを活かした価値創出（1-1（3）参照）

NEDO 調査においては、対象とするモノの製品数 969 品目のうち、日系企業群のシェアが 60%以上と高いシェアにある製品数が 224 品目と、米中欧と比較して圧倒的に多く、中でも素材・部材が 163 品目を占めている。

ウリケ・シェーデ教授は、この状態を「技のデパート」と呼び、これらを有効に活用する「舞の海戦略」を提唱している。一つ一つは巨大市場とは言えないが、隣接する複数の技術を占有することや、複数の日本企業が一つの技術を支配することで、日本国・日本企業は優位性が獲得できるとしている。

なお、こうした強みを有している技術を守る知的財産戦略も合わせて検討する必要がある。

2）戦略的不可欠性をもつディープテックの活用

新しい産業の創出や新市場の獲得という観点では、多くのスタートアップが新たなアイデアやビジネスモデルを生み出し事業を立ち上げてきたが、こうした斬新なアイデア・ビジネスモデルは普及や改善の段階に入り、状況は少し落ち着いてきた感がある。スタートアップの次の主なターゲットとしてディープテックが浮上してきている。まさに、日本の強みが活かされるときが訪れるのではないかと期待される。

図 1-10 にあるとおり、ディープテック開発は、時間を要し不確実性が高く、多額の資金が必要である。新規参入者は資金負担の大きさや、取組に時間を要することから参入・追い上げは容易ではない。もしディープテックの世界で強みをもつことができれば、先行者利益を享受できる。

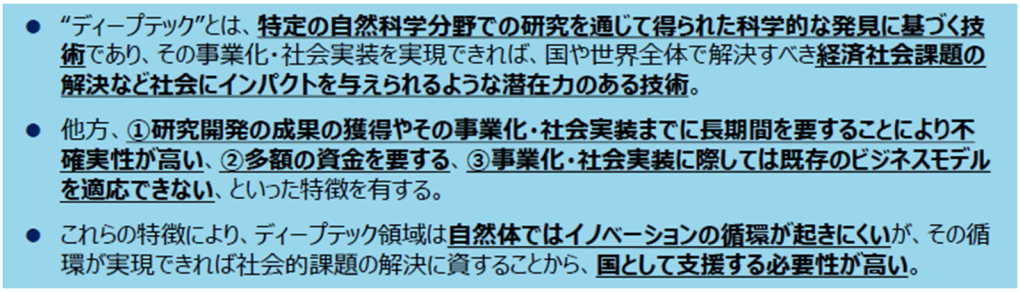


図 1-10　ディープテックとは

出所：ディープテック・スタートアップ支援事業について（経済産業省、2023）
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/kenkyu_innovation/pdf/026_05_00.pdf

日本産業界の強みである強固な産業基盤、例えば巨額の投資が必要な研究開発設備やプロセスプラント、また実装化に向けた広いすそ野産業などはディープテックの世界では強力な武器になるだろう。技術の蓄積、既存のサプライチェーン・市場アクセス能力なども相まって日本の強みとして活かされる。ディープテックの世界は、今後の日本発のイノベーション創出の鍵になるのではないかと期待される。

なお、ディープテックの活用には、積極的に外部技術を取り入れるオープン・イノベーション戦略の適用が重要である。

また、当然のことながら稼ぐ観点も重要である。マテリアル産業（素材・プロセス・部品）は強み・戦略的不可欠性を有している技術が多い分野であるが、マテリアルを活用した他国の最終製品が多くの利益を得ていることもある。サプライチェーンのプロフィットプール分析などで、日本にとっての新たな収益源となり得る領域を見いだすことも Innovation Outlook Ver. 2.0 以降の課題である。

1-3 Innovation Outlook の構成

1 章では Innovation Outlook の背景・意義、調査分析手法、構成について紹介した。

2 章では目指す社会像を、国際的な枠組み、国の目標・戦略の観点から概観し、TSC が描く将来像を紹介する。

3 章では、目指す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示す。

冒頭部では TSC が所掌する分野全体について Ver. 1.0 で検討した内容をまとめる。

1～6 節は TSC の六つの技術分野ごとの俯瞰である。各節の中で以下について説明する。

1 項 解決すべき社会課題（M）

2 項 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向

3 項 社会課題の解決のために取り組むべき領域（F）

4 項 具体的な手段（技術開発とその他の社会実装に向けた取組）（T）

最後に 7 節として技術分野全体を俯瞰している。

4 章では、終章として、今回 Innovation Outlook Ver. 1.0 を策定したことの振り返りや、Innovation Outlook Ver. 2.0 以降に向けた課題などを述べる。

2 章　目指すべき社会像

全世界的に取り組まなければ解決が困難な社会課題（経済、環境・エネルギー、経済安全保障等）について、国際的枠組の創設や各国による取組がおこなわれている。ここでは全体に関係する主な国際的な枠組み、日本及び海外の目標・計画・戦略、それらを踏まえてこれまでに NEDO TSC が提言してきた将来像を紹介する。

2-1　国際的な枠組み

本節では、次世代イノベーション、とりわけ環境・エネルギー関連分野等を中心とする持続可能な社会の実現に向けた国際的枠組について概観する。

2-1-1　持続可能な開発目標（SDGs）

持続可能社会の実現に向けた国際的枠組として、2015 年 9 月の国連サミットで採択された SDGs（持続可能な開発目標）がある。SDGs は 2000 年採択の MDGs（ミレニアム開発目標）を引き継ぐ国際開発目標の枠組であり、持続可能な社会の実現に向けた 17 分野について 2030 年までの目標を定めている。

SDGs における環境・エネルギー関連の主要目標としては、目標 7「エネルギーをみんなにそしてクリーンに」及び目標 13「気候変動に具体的な対策を」があり、これらが他の目標と相互に関連しながら、環境保護・クリーンエネルギーの促進を通じた持続可能な社会の実現を目指している。

各目標における目標の最新の達成・進捗状況について、目標 7 は SDGs の中でも進展が顕著な目標の一つであり、例えば再生可能エネルギーによる一人当たりの発電容量は 2015 年から 2022 年にほぼ倍増し、直近 5 年間の年平均成長率は過去最高の 8.1%を記録した。一方、エネルギー効率化への国際投資は 2030 年までに 3 倍に拡大する必要がある等、資金調達面の課題も挙げられている。目標 13 についての進展は限定的であり、2022 年の世界全体の人為的 GHG（温室効果ガス）排出量が過去最大を記録する等、排出量削減ペースは目標に届いていない。また、国際的な気候資金は年間 1,000 億ドルの調達遅れが出ている[4]。

SDGs 全体の進捗は COVID-19 やウクライナ紛争等の影響により限定的であり、目標の 48%が進捗遅れ、18%が停滞ないし後退しており、2030 年までの目標達成には更なる努力と国際協力が必要とされている[4]。

[4] The Sustainable Development Goals Report 2024（UNSD）
https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2024.pdf

2-1-2 国連気候変動枠組条約締約国会議（COP）

国際的な気候変動対策の枠組として、UNFCCC（国連気候変動枠組条約 UNFCCC）、及びそれに基づく国際会議体としてCOP（気候変動枠組条約締約国会議）は重要な役割を果たしている。

国際的気候変動対策枠組の端緒となったUNFCCCは1994年3月に発効し、地球温暖化対策の基本的な枠組として、全締約国の義務として GHG 削減の計画策定・実施報告を求めるとともに、先進国の追加義務（2000 年までに GHG 排出量を1990 年水準に戻す努力目標、途上国への資金供与や技術移転の推進）が規定された[5]。

また、気候変動枠組条約の発効に伴い国際会議体として COP が発足し、後に『京都議定書』『パリ協定』等の気候変動対策にかかる文書が採択された。2015 年採択（2016 年発効）のパリ協定は具体的で包括的な枠組を規定しており、主要な長期目標として、気温目標（世界の平均気温上昇を工業化以前と比べて 2℃未満に抑えるとともに、1.5℃に抑える努力を追求すること）及び 21 世紀後半におけるカーボンニュートラルの実現が規定された。また、全ての締約国が NDC（国が決定する貢献）を設定し取組を実施するとともに、5 年ごとに NDC を見直し強化することを義務付けた[6]。

COP の最新状況としては、2024 年 11 月にバクーで開催されたファイナンスのCOPと呼ばれるCOP29において、気候変動対策のための資金調達に重点が置かれ、2025 年以降の新たな気候資金目標が設定された。主要成果として、Baku Climate Unity Pact（バクー気候連帯協定）では、気候資金に関する新規合同数値目標（NCQG）が設定され、2035 年までに少なくとも年間 3,000 億ドルの途上国向け気候行動のための資金目標が決定された[7]。

[5] 外務省「気候変動に関する国際的枠組み」
https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page22_003283.html
[6] パリ協定の概要（仮訳）（環境省）
https://www.env.go.jp/earth/ondanka/cop21_paris/paris_conv-a.pdf
[7] 外務省 https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/pagew_000001_01129.html

2-1-3 主要国間の合意枠組（G7・G20）

前項までの国連を母体とした国際的枠組の進展と並行して、近年では主要国間の枠組として G7・G20 においても環境・エネルギー関連の取組推進が主要アジェンダとなっている。

G7 における GX（グリーントランスフォーメーション）関連の枠組として、次の目標が共有されている：電力部門の脱炭素化（2035 年までに電力部門の完全又は大宗を脱炭素化）、再生可能エネルギーの拡大（2030 年までに世界全体の再生可能エネルギー発電容量を 3 倍）、エネルギー効率の改善（2030 年までに世界平均のエネルギー効率改善率を年率 2 倍）、石炭火力発電のフェーズアウト（各国のネットゼロの道筋に沿って、2030 年代前半、又は気温上昇を 1.5℃に抑えることを射程に入れ続けることと整合的なタイムラインで、排出削減対策が講じられていない既存の石炭火力発電をフェーズアウト）、化石燃料からの移行（2050 年ネットゼロに向けて、公正で秩序ある衡平な方法で、エネルギーシステムにおける化石燃料から移行）。

また、G20 の枠組においても GX 関連の取組方針に係る議論が進展している。2024 年 10 月の G20 エネルギー移行大臣会合では、SDGs 及び COP における目標を確認し、世界全体での再生可能エネルギー発電容量を 3 倍・エネルギー効率改善率を年率 2 倍にする取組を支持するとともに、G20 議長国ブラジルにより GCEP（エネルギー計画世界連合）の設立が表明された[8]。

[8] 経済産業省ニュースリリース（2024 年 10 月 7 日）
https://www.meti.go.jp/press/2024/10/20241007001/20241007001.html
JETRO ビジネス短信（2024 年 10 月 07 日）
https://www.jetro.go.jp/biznews/2024/10/22d56801b4166298.html

2-2 主要国の関連政策

前節では、環境・エネルギー関連取組に係る国際的な枠組について概観した。これらの国際的枠組に基づき、各国でも環境・エネルギー政策や GX 推進に向けた政策的目標や、その実現に向けた投資・イノベーション等の推進政策が実施されている。本節では、主要国のうち特に当該分野の先進地域である米国・欧州の関連政策について概観するとともに、日本の関連政策・ビジョン等について概観する。

2-2-1 米国

米国の環境・エネルギー政策は民主党バイデン政権下で大きな進展を見せ、とりわけ 2021 年のパリ協定への復帰決定後、複数の重要な政策目標が打ち出されている。

2021 年 1 月の『国内および世界の気候危機に対処するための大統領令』、気候危機を外交政策・国家安全保障政策の中核に位置付け、連邦政府主導の持続可能な経済に向けたインフラ再構築・経済機会の創出を表明した。同年 11 月に発表された長期戦略（Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050）では、2050 年までに GHG 排出量のネットゼロ実現の方針が示され、電力セクターの脱炭素化、輸送部門の電化推進、難しい分野でのクリーン燃料利用、既存技術の省エネ化とクリーンエネルギー源への移行、CO_2 以外の GHG の削減、CO_2 除去技術のスケールアップ等の主要方針が示された[9]。同時に、脱炭素・ネットゼロに向けた中長期的目標も設定され、エネルギー省は、2035 年までの電力供給の 100%カーボンフリー化目標を掲げて、エネルギー・アースショット・イニシアチブ（Energy Earthshots Initiative）では、クリーンエネルギー発電・エネルギー貯蔵コストの削減及び GHG 排出量の削減目標を定めている。

一方で、2025 年 1 月の共和党トランプ大統領の政権復帰によりアメリカ第一主義のエネルギー政策が打ち出され、パリ協定からの再脱退、EV（電気自動車）推進施策の撤廃、石油・天然ガスの生産拡大など、民主党政権で進展を見せた GX 推進路線からの政策転換が行われる公算が高く、今後の動向に注視が必要である。

次に、経済・エネルギー等に関連する主要な経済・投資・イノベーション促進政策について概観する。

2021 年 11 月成立の『インフラ投資雇用法』（Infrastructure Investment and Jobs Act：IIJA）は、インフラ再建と近代化、気候変動対策及び雇用創出を目的とした大

[9] 米国クリーンエネルギー政策最新情報とビジネス機会（NEDO、2023）
https://www.nedo.go.jp/content/100970550.pdf

規模なインフラ投資計画であり、輸送・交通インフラ、クリーンエネルギー、水資源管理、ブロードバンド拡大等の分野への投資計画が定められた。GX 分野では、水素ハブ及び DAC（Direct Air Capture）ハブの設立や、電池製造・リサイクル及び EV 充電インフラ整備、レアアース等重要鉱物の錬成・処理・リサイクル等における大規模投資計画が始動している[9]。

2022 年 8 月成立の『インフレ抑制法』（IRA：Inflation Reduction Act）は、米国史上最大の気候・エネルギー分野への投資政策となった。主要な内容として、エネルギー安全保障と気候変動分野における 10 年間で約 3,960 億ドルの投資計画を定め、クリーンエネルギーと運輸サプライチェーンに 600 億ドル以上を供給、太陽光パネル、風力タービン、蓄電池の製造に 300 億ドルの生産税額控除、クリーンエネルギー製造設備建設への 100 億ドルの投資税額控除等が規定された。なお、政府のインフラ投資計画については、『バイ・アメリカン政策』が導入され、インフラ投資・政府調達において米国製品の使用を優先する方針が相次いで示されている[10]。

関連イノベーション推進の個別施策としては、2023 年 6 月に『国家クリーン水素戦略』が発表され、2030 年までに年間 1,000 万トン、2040 年までに年間 2,000 万トン、2050 年までに年間 5,000 万トンのクリーン水素製造の目標が示された[11]。また、AI 研究開発においては、人工知能（AI）に関する責任あるイノベーションの推進策が示され、全米科学財団（NSF）が 1 億 4,000 万ドルを拠出し、七つの AI 研究機関を設立し倫理的で信頼性のある AI システムの研究開発や AI 人材の開発等の取組を推進している[12]。

これらの政策により、クリーンエネルギー技術の開発、インフラ整備、国内製造の促進、そして先端技術分野でのイノベーション加速に向けた多角的な取組が進展している。

[10] JETRO ビジネス短信（2022 年 03 月 07 日）
https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/03/e65bb07f5ec30555.html
[11] JETRO ビジネス短信（2023 年 06 月 07 日）
https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/06/65db7adb253fdb86.html
[12] JETRO ビジネス短信（2023 年 05 月 08 日）
https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/05/7c5bc3a8bf11f2ff.html

2-2-2 EU 及び欧州主要国

EU における環境・エネルギー関連の投資・イノベーション促進政策

EU は環境・エネルギー政策において積極的な取組を展開している。特に 2019 年 12 月に発表された欧州グリーンディールは EU の気候・環境政策の中核となる包括的な戦略として位置付けられる。欧州グリーンディールの中では、2030 年までに GHG 排出量を 1990 年比で 55%削減、2050 年までにカーボンニュートラルの達成が規定され、目標達成に向けた各種関連施策が発表された。

環境・エネルギー分野に関する主要な政策としては、2021 年に Fit for 55（欧州脱炭素化政策パッケージ）が公表され、再生可能エネルギー指令等の各種規制の見直し・導入が行われた。2022 年にはリパワーEU（REPowerEU）の一環として、『EU Solar Strategy』が策定され、2030 年までに 600GW の新規導入、『水素加速化計画』により 2030 年に 2,000 万トン導入等の目標が設定された[13]。2023 年公表の『グリーンディール産業計画』（GDIP）では、（1）投資環境を改善するための規制緩和、（2）投資誘致のための財政支援、（3）人材育成、（4）ネットゼロ技術や原材料の確保のための貿易推進、という四つの柱からなる計画が策定され、2021 年～2027 年までの 5,700 億ドル規模の投資計画が策定された[14]。規制緩和に向けては『ネットゼロ産業法案』により、規制環境整備・許認可の迅速化ともに、太陽光・風力、バッテリー、ヒートポンプ、電解槽・燃料電池、バイオ燃料、CCS（CO_2 の回収・貯留）、グリッド技術等のネットゼロ戦略プロジェクト指定のセクターについて 2030 年までの域内供給比率 40%を目指す目標設定が行われた[15]。

投資支援策としては、EU イノベーション基金が発足し、革新的な低炭素技術、CCUS（CO_2 の回収・利用・貯留）、再生可能エネルギーの革新的生産、エネルギー貯蔵、運輸・建設分野におけるネットゼロ等の分野を対象に、2020 年から 2030 年までに約 400 億ユーロ規模の資金供給がなされる見通しである。また、InvestEU プログラムでは、持続可能なインフラ、研究・イノベーション・デジタル化、中小企業、社会的投資等の分野において、2021-2027 年の間に 262 億ユーロの EU 予算保証を提供することにより、2027 年までに少なくとも 3,720 億ユーロの追加投資の動員が計画され、投資の 30%以上を気候変動関連の投資に充てる計画である[16]。

---

[13] 欧州におけるエネルギー関連政策の動向（NEDO、2023）
https://www.nedo.go.jp/content/100970552.pdf

[14] JETRO ビジネス短信（2023 年 12 月 15 日）
https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2023/1101/692bdf5a7cb9b22e.html
EU グリーンディール産業計画～米国への対抗策と産業競争力の強化（三井住友銀行 CA 本部企業調査部、2023）
https://www.smbc.co.jp/hojin/report/investigationlecture/resources/pdf/3_00_CRSDReport136.pdf

[15] 欧州におけるエネルギー関連政策の動向（NEDO、2023）
https://www.nedo.go.jp/content/100970552.pdf

[16] デイリーウォッチャー（CRDS、2022 年 5 月 2 日）
https://crds.jst.go.jp/dw/20220502/2022050231824/

欧州主要国の個別政策

前項では EU としての環境・エネルギー関連の政策枠組及び投資計画等について概観した。本項では欧州主要国の個別政策について、EU 加盟国の主要国であるドイツ・フランス、及び非 EU 加盟国の英国の政策について概観する。

ドイツでは、2021 年 5 月に連邦気候保護法の改正が行われ、主な目標として、2030 年までに GHG 排出量を 1990 年比 65%削減、2040 年までに 88%削減、2045 年までにカーボンニュートラル達成が規定された[17]。翌年には『気候保護緊急プログラム 2022』が導入され、2022 年から 2025 年にかけて、建築、交通、製造業、土地利用、農業、エネルギー産業などの分野に総額 80 億ユーロ以上の拠出が計画された。また、2020 年 6 月には『国家水素戦略』が発表されており、グリーン水素の生産・供給を推進も行われている。

フランスでは、2021 年 8 月に気候変動対策・レジリエンス強化法が成立し、社会全体での包括的な気候変動対策を目指す方針が定められた。主要な措置として、2030 年以降の高排出量車の新車販売終了、2024 年末までに人口 15 万人超の都市での低排出ゾーン導入義務化、建物のエネルギー効率改善義務化、土地の人工化抑制、製品・サービスの環境負荷を示す『エコスコア』導入、化石燃料関連広告の規制強化等が定められている[18]。

EU 非加盟国の英国においても独自の環境・エネルギー関連のイノベーション推進政策が進展している。2020 年 11 月に『10-Point Plan』(グリーン産業革命のための 10 項目計画)が発表され、気候変動対策と経済成長の両立を目指す包括的な政策が策定された。同計画では、2050 年までのネットゼロ達成に向けた長期的戦略を策定するとともに、総額 120 億ポンドの供給及び 25 万人の雇用創出・支援の目標が示された。2023 年 3 月には『Powering Up Britain』政策が発表され、クリーンエネルギーによる長期的なエネルギー供給保証と自給強化を目指す、CCUS プロジェクトの実施、ネットゼロ水素製造基金への 2.4 億ポンドの投資、EV 充電インフラへの 3.8 億ポンドの投資、ヒートポンプ利用拡大への 3,000 万ポンドを拠出等の政策が発表された[19]。クリーンエネルギー開発の一環として、SMR(小型モジュール原子炉)プログラム 2021 年度から 2 億 1,500 万ポンドを投資原子炉概念設計の加速と民間投資の誘致を目指すとともに、SMR の初号機と AMR(先進的モジュール炉)の実証炉を 2030 年代初頭に完成させる目標が示されている[20]。

---

[17] 2045 年の気候中立達成へ向け、法整備や官民の取り組みが進む(ドイツ)(JETRO、2021) https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2021/0401/c3c52dd15a11ba6d.html

[18] 市民からの政策提言を基に環境法を策定・施行(フランス)(JETRO、2021) https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2021/46c5285cbc7ab47a.html

[19] 英政府 エネルギー投資新政策を公表:供給保証と自給が目標(原子力産業新聞、2023) https://www.jaif.or.jp/journal/oversea/17082.html

[20] 英政府が SMR と先進的原子炉設計を設計認証審査の対象に、申請ガイダンスを公表(電気事業連合会、2021)https://www.fepc.or.jp/pr/kaigai/kaigai_topics/1260453_4115.html

2-2-3 日本

日本においても、グローバル・諸外国の潮流を背景として、持続可能な社会やウェルビーイングの実現等に向けた将来ビジョン・イノベーション戦略が進展を見せている。

日本の科学技術・イノベーション政策の根幹をなす『科学技術・イノベーション基本計画』においては、2016 年閣議決定の『第 5 期科学技術基本計画』で Society 5.0 という未来社会像が初めて提唱され、「国民の安全と安心を確保する持続可能で強靱な社会」と「一人ひとりの多様な幸せ（well-being）が実現できる社会」を目指す方針が示された。最新版である 2021 年閣議決定の『第 6 期科学技術・イノベーション基本計画』（図 2-2-1）でも Society 5.0 が踏襲され、同時に気候危機等の世界規模の脅威や、日本の国際的研究力の相対的低下への対応が指摘された[21]。現在検討中の『第 7 期科学技術・イノベーション基本計画』においては、研究力の強化・人材育成、イノベーション力の向上、経済安全保障との連携が主な論点とされている。

現行の第 6 期科学技術・イノベーション基本計画の中では、Society 5.0 の実現に向けた科学技術・イノベーション政策として、デジタル化の推進とデータ戦略の完遂（次世代インフラ・技術の整備・開発（Beyond 5G、量子技術等））、地球規模課題への対応（カーボンニュートラルに向けた研究開発、循環経済への移行）、レジリエントで安全・安心な社会の構築（重要技術の特定と研究開発、社会実装の推進）、イノベーション・エコシステムの形成（スタートアップ支援、産学官共創システムの強化）、都市と地域づくり（スマートシティ・スーパーシティの創出と展開）、社会課題解決のための研究開発・社会実装（総合知の活用、エビデンスに基づく国家戦略の策定）等の政策が進展しており、5 年間で政府の研究開発投資の総額 30 兆円、官民合わせた研究開発投資の総額 120 兆円という目標が示されている。

[21] 第 6 期科学技術・イノベーション基本計画 （内閣府）
https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index6.html



図 2-2-1　第 6 期科学技術・イノベーション基本計画（概要）

環境・エネルギー関連の取組については、2025 年 2 月に『第 7 次エネルギー基本計画』が閣議決定され、2040 年に向けたエネルギー政策の方針が示された。具体的には、DX（デジタルトランスフォーメーション）や GX の進展による電力需要増加に対応するため、太陽光や風力等の再生可能エネルギー電源や既存炉、次世代革新炉推進を含む原子力発電の最大限活用の方針等が盛り込まれており、S+ 3E の原則[22]は維持しつつ、気候変動対策と経済成長の両立実現に向けた基本的な方向性が掲げられている。また、第 7 次エネルギー基本計画の関連文書として公表された 2040 年度エネルギー需給の見通しでは、2040 年度温室効果ガス 73%削減（2013 年度比）、2050 年カーボンニュートラル実現といった野心的な目標に向けて、将来からバックキャストする考え方の下、2040 年度の電源構成として、再生可能エネルギー：4～5 割程度、原子力：2 割程度、火力：3～4 割程度という見通しが提示されている[23]。

また、同じく 2025 年 2 月に閣議決定された『GX2040 ビジョン』は、地政学リスク、DX の進展、経済安全保障の要請などの不確実性が高まる中で、GX に向けた投資

[22] S+3E：安全性（Safety）、安定供給（Energy Security）、経済効率性（Economic Efficiency）、環境適合性（Environment）

[23] エネルギー基本計画について（資源エネルギー庁）
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/

の予見可能性を高めることを目的とし、同ビジョンに基づき、エネルギー安定供給の確保、経済成長、脱炭素化の同時実現を目指す政策展開の方針が示された。具体的には、GX 産業の創出（水素、CCUS（貯留）、次世代バッテリーなどの GX 技術の社会実装加速、新たな脱炭素関連市場の拡大）、エネルギー転換（再生可能エネルギーの拡大、原子力発電の活用、LNG 火力のトランジション手段としての利用）、産業構造の転換（組織やビジネスモデル全体の抜本的な再構築、サステナブルな成長の実現）、国際貢献（アジアを中心とした世界の脱炭素化への貢献）、公正な移行（雇用や地域に配慮した GX の推進）等の方針が提示された[24]。

Society 5.0 の持続可能な社会と並ぶ柱である強靭な社会の実現については、2023 年 7 月に『国土強靭化基本計画』が閣議決定され、大規模自然災害等に備えて長期計画が策定された。同計画の中では、四つの基本目標（人命の保護、国家・社会の重要な機能の維持、国民の財産及び公共施設に係る被害の最小化、迅速な復旧復興）が設定された。同計画では、災害に強い自律・分散・協調型社会の促進や、環境と調和したインフラの強靭化・老朽化対策のほか、気候変動・GX 実現やエネルギー・食料安全保障等の社会情勢の変化も念頭に、国土強靭化推進における 5 本柱（国民の生命と財産を守る防災インフラの整備・管理、経済発展の基盤となる交通・通信・エネルギーなどライフラインの強靭化、デジタル等新技術の活用による国土強靭化施策の高度化、災害時における事業継続性確保をはじめとした官民連携強化、地域力における防災力の一層の強化）の推進方針が示された[25]。

[24] GX2040ビジョン～脱炭素成長型経済構造移行推進戦略 改訂～（経済産業省、2025）https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218004/20250218004-1.pdf

[25] 国土強靭化基本計画（内閣官房） https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/kihon.html

2-3 TSC が描く将来像

TSC では前節までで述べたような国際的な枠組み、並びに諸外国・地域及び我が国の政策動向等を踏まえて、これまで持続可能なよりよい社会づくりやウェルビーイングの実現に向けて TSC としての調査・分析に基づき描く将来像やその実現に向けた指針をまとめている。本節では、これらの社会像である、広く人類として目指すべき社会像について検討した『イノベーションの先に目指すべき「豊かな未来」－大切にすべき価値軸 / 実現すべき社会像とは－』（以下「豊かな未来レポート」という。）、その中でも持続可能な社会像について検討した『持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針 2023』（以下「総合指針 2023」という。）、『将来像「自然共生経済」』（以下「自然共生経済」という。）、及び多様な幸せに関する社会像についてデジタルの視点で検討した『デジタル社会の将来像 －人々の自律と共栄を支えるデジタル社会－』（以下「デジタル社会の将来像レポート」という。）についてそれぞれの社会像を概観する。

2-3-1　豊かな未来レポート

2021 年 6 月に公表した豊かな未来レポートでは、経済社会の発展の度合いや取り巻く環境によって、その時々の社会が求めるイノベーションの内容は変化をしてきているものの、それぞれのイノベーションには、「社会をより良くしたい」との共通した思いが込められているとの仮説を基に、国内外の豊かさに関する報告書や各種政府白書、未来予測に関する報告書など計 75 編について共起ネットワーク分析などを用いて俯瞰的に分析した。その結果として、イノベーション活動を推進していく上で『大切にすべき 6 つの価値軸」と「実現すべき 12 の社会像」を明らかにした。これらの価値軸と社会像を基に、現在の経済社会情勢を踏まえた「現代社会が取り組むべきイノベーション事例」についても豊かな未来レポートの別冊で紹介している。

「大切にすべき 6 つの価値軸」は、29 編の豊かさに関する報告書に記載された豊かさの構成要素を共起ネットワーク分析し、そこで抽出された 22 の単語グループを関連性の高さで整理し、デルファイ法を用いて「健康で安定な生活の実現」「自分らしい生き方の実現」「持続可能な経済成長の実現」「持続可能な自然共生世界の実現」「強靭で快適な社会基盤の実現」「安全・安心な国の実現」としてまとめたものである（図 2-3-1）。これらは表 2-3-1 に示すように、第 6 期科学技術・イノベーション基本計画に記載の三つの方向性（多様な幸せ、強靭性、持続可能性）とも一致したものとなっている。

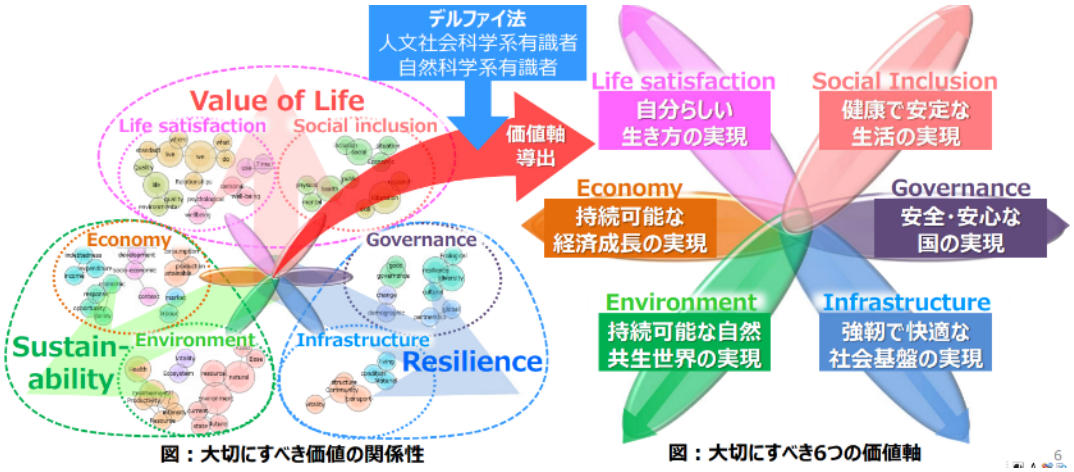


図 2-3-1　未来を豊かにするために大切にすべき「6 つの価値軸」

表 2-3-1　第 6 期科学技術・イノベーション基本計画の方向性と豊かな未来の価値軸

第 6 期科学技術・イノベーション 基本計画の方向性	豊かな未来の 6 つの価値軸
多様な幸せ	自分らしい生き方の実現 健康で安定な生活の実現
強靭性	安全・安心な国の実現 強靭で快適な社会基盤の実現
持続可能性	持続可能な経済成長の実現 持続可能な自然共生世界の実現

一方、「実現すべき 12 の社会像」は、29 編の国内外の豊かさに関する報告書で取り上げられている指標をキーワードとして共起ネットワーク分析し、「大切にすべき 6 つの価値軸」それぞれに関連が深いキーワード群を抽出し、デルファイ法により導出したものである。12 の社会像として具体的には、「誰もが健康で食事に困らない社会」「多様性を認め合える全員参加型社会」「誰もが潜在能力を発揮し自己の理想を実現できる社会」「誰もが無理なく働き続けられる社会」「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」「持続可能で自然にやさしい社会」「環境と調和した持続可能なエネルギー社会」「快適で活力に満ちた社会」「強くてしなやかな社会」「誰もが自由で安全に活動ができる社会」「透明性・信頼性の高い社会」を導出した（図 2-3-2）。

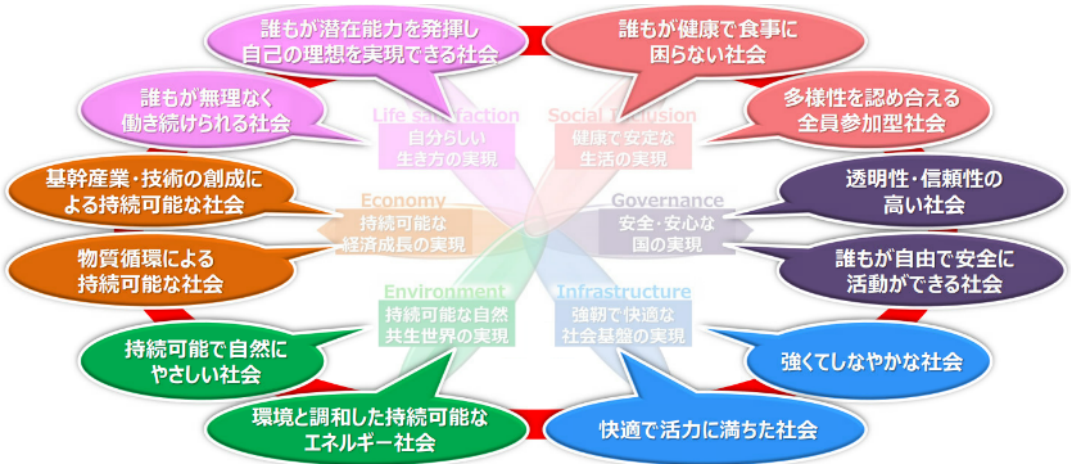


図 2-3-2　実現すべき 12 の社会像

さらに、2021 年時点での経済社会情勢・課題を踏まえ、政府白書、日本学術会議提言、国内外の官民による未来予測、NEDO 技術戦略等 46 編を分析し、以上の 6 つの価値軸及び 12 の社会像に関連する「現代社会が取り組むべきイノベーション」の事例として 40 例を創案・抽出している（表 2-3-2）。

表 2-3-2　現代社会が取り組むべきイノベーション事例

6つの価値軸		12の社会像	イノベーション例
Value of Life（多様な幸せ）	健康で安定な生活の実現	誰もが健康で食事に困らない社会	生活習慣病・難病の克服(P6)、誰もが望む医療・介護を享受(P8)、健康リスク制御の実現(P10)、感染症対策(P11)、資源循環型食料生産の実現(P12)、食のサプライチェーンの強靭化(P13)、食の充実による満足度の向上(P14)
		多様性を認め合える全員参加型社会	価値共創基盤の構築(知識のデジタル化)(P16)、開かれたコミュニティ×技術(P17)、インクルーシブ・イノベーション(P18)
	自分らしい生き方の実現	誰もが潜在能力を発揮し自己の理想を実現できる社会	人間理解の深化(P21)、人間の能力の限界への挑戦(P22)、未開領域への挑戦(P23)、五感の活用による究極のバーチャル空間の実現 (P24)、バーチャル空間上でなりたい自分を実現(P25)
		誰もが無理なく働き続けられる社会	やりがいのある仕事への変革(P27)、柔軟な働き方の実現(P28)
Sustainability（持続可能性）	持続可能な経済成長の実現	基幹産業・技術の創成による持続可能な社会	多品種少量生産の実現(P31)、DX推進によるモノのサービス化(P32)、データ駆動型材料開発(P33)
		物質循環による持続可能な社会	循環性の高いビジネスモデルへの転換(P35)、環境にやさしいものづくりの追求(P36)
	持続可能な自然共生世界の実現	持続可能で自然にやさしい社会	炭素循環社会の実現(P39)、地域循環共生圏の構築(P40)、バイオマス産業都市の構築(P41)
		環境と調和した持続可能なエネルギー社会	エネルギーネットワークの脱炭素化・強靭化(P43)、エネルギー技術の転換(P44)、水素社会の実現(P45)
Resilience（強靭性）	強靭で快適な社会基盤の実現	快適で活力に満ちた社会	自然と共生する持続可能都市(P48)、自立・分散型社会の実現(P49)、デジタル対応都市の実現(P50)
		強くてしなやかな社会	社会インフラのレジリエンス機能向上(P52)、持続可能インフラの整備(P53)、デジタル・通信インフラの整備(P54)、交通・物流革命(P55)
	安全・安心な国の実現	誰もが自由で安全に活動ができる社会	モビリティ革命の実現(P58)、地域コミュニティの活性化(P59)、安全性確保と信頼性醸成(P60)
		透明性・信頼性の高い社会	データ駆動型社会の実現(P62)、行政の在り方変革(P63)

豊かな未来レポートは、自らのイノベーション活動の検証や、今後の活動展開のよりどころとして活用されることで、狭義のイノベーション関係者を超えて豊かな未来の実現に携わる幅広い組織や個人にも参考とされ、その実現に向けた検討や取組が活性化していくことを期待するものである。「大切にすべき 6 つの価値軸」は、組織（企業、研究所、大学等）が保有している技術や開発している製品等をマッピングすることにより、現在の取組の全体像把握と、取組を強化すべき点の洗い出し等イノベーション活動の全体像把握に活用することを想定している。また、「実現すべき 12 の社会像」は、取り組んでいるイノベーション活動をマッピングすることにより、組織における現在の取組の全体像を把握し、今後のプロジェクトの方向性や相互連携の構築に活用することを想定している。

2-3-2 総合指針 2023

2015 年のパリ協定では、世界の平均気温上昇を 2℃より十分低く保つ（2℃目標）とともに、1.5℃に抑える努力を継続（1.5℃努力目標）し、21 世紀後半に「脱炭素社会」の達成が必要であるとしており、脱炭素社会を実現する技術開発や社会実装への取組の重要性が増している。

将来にわたり、世界が経済的に豊かで、環境に優しく、自然と共生し、自然界・生態系の多様性が維持、発展され、現世代の社会的ニーズを満たしつつ、将来世代により良い社会を実現するために目指すべき方向性として、2020 年 2 月に「持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針 2020」（以下「総合指針 2020」という。）を策定、発表した。総合指針 2020 では、「持続可能な社会を実現する 3 つの社会システム」として、「サーキュラーエコノミー」「バイオエコノミー」「持続可能なエネルギー」を定義し、炭素循環から見た社会システムの概念図（図 2-3-3）から、持続可能な社会を実現していくための道筋の検討を行った。

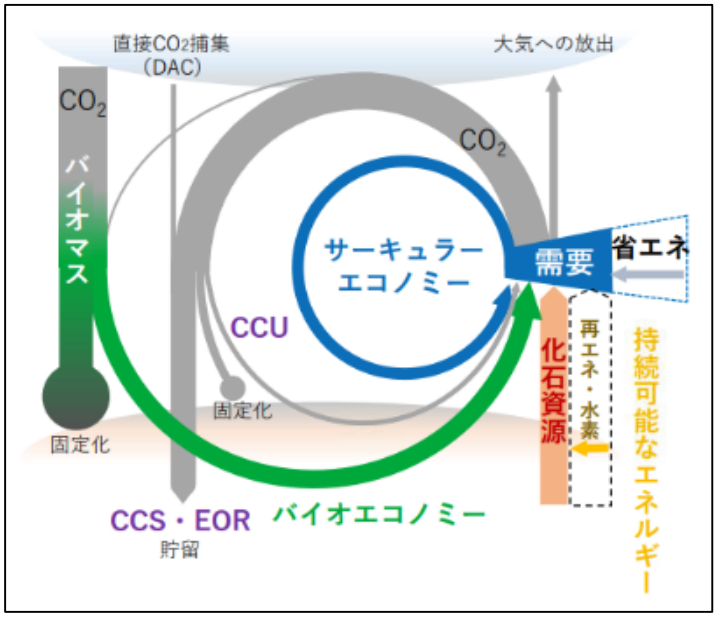


図 2-3-3　炭素循環から見た社会システムの概念図

これら 3 つの社会システムの実現を一体的・有機的に推進することが重要と捉えた上で、技術開発・実証に取り組むべき革新技術の評価の一助となることを目的に、2050 年を見据え、CO_2 削減に大きな効果のある技術を総合的、客観的に評価することを提唱するとともに、代表的な革新技術の CO_2 削減ポテンシャルと CO_2 削減コストの試算結果を提供した。

総合指針 2020 を公表後、世界各国から 2050 年カーボンニュートラルを基調とする GHG 削減目標が発せられ、我が国でも 2020 年 10 月に、『2050 年カーボンニュ

ートラル』が宣言された。2023 年 2 月には、GX を通じて脱炭素、エネルギー安定供給、経済成長の三つを同時に実現するべく、『GX 実現に向けた基本方針』が、取りまとめられた。さらに、サプライチェーンでのセキュリティリスクが、同時に克服すべき社会課題として顕在化したことから、2023 年 8 月に総合指針 2020 を改定した総合指針 2023 を策定し、公表した。総合指針 2023 では、前述の 3 つの社会システムを具現化し、連携させるための基盤として DX（デジタルトランスフォーメーション）を追加し、持続可能な社会の実現に不可欠な 3 つの社会システムが継続的に発展し、互いに関連し合い、影響し合い、最適な調和が図られているとともに、これらの基盤として DX が支えている状態を表現した（図 2-3-4）。また、最新の社会・技術動向に基づき、重要性の増した「3 つの社会システムとそれを支える DX」に関連する技術を俯瞰・評価し、代表的な重要技術の二酸化炭素（CO_2）削減ポテンシャルとコストの具体的な試算根拠・方法・結果を整理しながら定量的に評価・提示した。

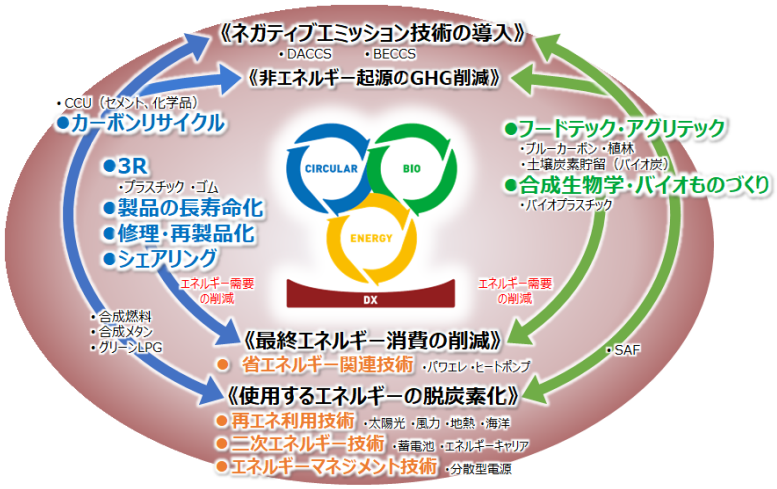


図 2-3-4　持続可能な社会を実現する 3 つの社会システムと
それを支えるデジタルトランスフォーメーション

2-3-3 自然共生経済

2024 年 7 月には、持続可能な社会の実現に向けて、カーボンニュートラル、サーキュラーエコノミー、そしてネイチャーポジティブを等しく実現するための将来像として『自然共生経済』を提案した（図 2-3-5）。「自然共生経済」は、「産業」や「市民／消費者」と「自然」の各主体が互いに補完し合い、それらの価値の総和を高め、社会問題の解決と持続的な経済発展を実現する循環型経済を指しており、その実現のためには、「①再生可能な自然資本の活用、②廃棄物の再資源化と資源の循環性向上、③自然の維持・再生」の三つのアクションが経済合理性をもって進められることが重要であり、そのために、アクションによって得られる環境価値を可視化／指標化することにより経済価値化することの重要性を示している。



図 2-3-5　自然共生経済の全体像

それぞれのアクションは、カーボンニュートラル、サーキュラーエコノミー、ネイチャーポジティブのいずれか一つの実現に影響を及ぼすというものではなく、複数に影響を及ぼすものである。自然共生経済におけるこれら三つの実現に貢献する重要な取組として、バイオエコノミー[26]に着目した推進シナリオを検討し、自然と産業エコシステムとがスパイラルアップしながら発展することで、持続的な経済発展だけでなく市民の幸福度が増していく流れを生み出す可能性を示した。

[26] バイオエコノミーは、『バイオエコノミー戦略』において「バイオテクノロジーや再生可能な生物資源等を利活用し、持続的で、再生可能性のある循環型の経済社会を拡大させる概念」と定義される。

2-3-4 デジタル社会の将来像レポート

2025 年 1 月には、AI やロボットなどのデジタル技術が社会に浸透していく中で、個人の暮らしや仕事に焦点を当て、デジタル技術の浸透がもたらす将来像を描き、期待される効果や懸念される影響を検討した結果を『デジタル社会の将来像　－人々の自律と共栄を支えるデジタル社会－』としてまとめた。

本レポートでは、デジタル技術が活用されるイノベーション例を豊かな未来レポートの 12 の社会像にマップし、4 領域に分類した（図 2-3-6）。この 4 領域の中で、「Life satisfaction の価値軸に係る領域」は、「人間中心の社会」という価値に関連して、近年著しく発展した生成 AI をはじめとするデジタル技術が社会に浸透していくことで大きな変革がもたらされることが想定される。そのため、この領域に焦点を当て、デジタル技術の浸透を想定してその解像度を上げることでデジタル社会の将来シーンを導出している。

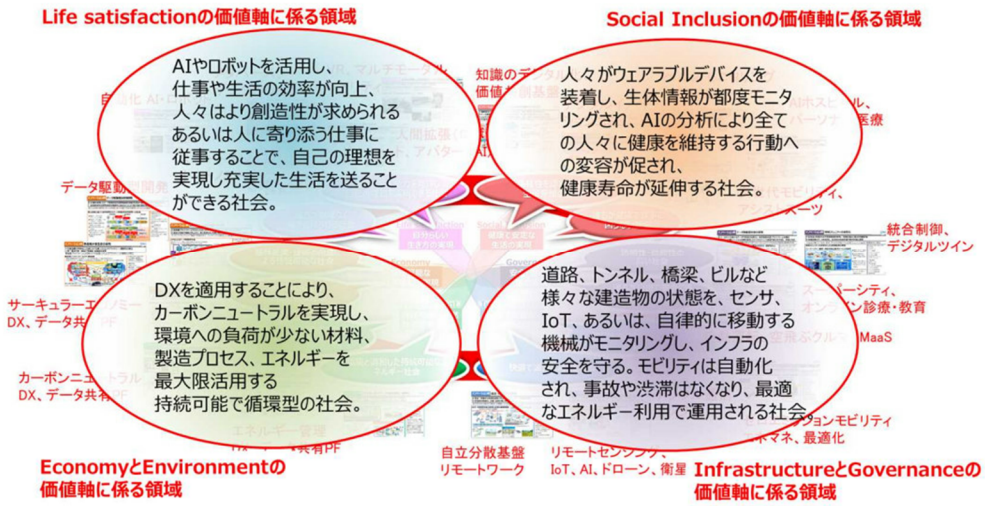


図 2-3-6　デジタル技術が活用されるイノベーションがもたらす価値に係る四つの領域

導出された将来シーンでは、デジタル技術の浸透により期待されるポジティブな効果と懸念されるネガティブな影響についても分析を行っている。ポジティブな効果を実現するためには、便利なデジタル技術の開発のみではなく、デジタル技術を受容・活用できる社会の進化のために必要な規制や施策などの取組、これを実現する新たな機関の設置などによってネガティブな影響を払拭し、望ましいデジタル技術の将来像として「自律と共栄を支えるデジタル社会」の実現に近づくものと考えている。

以上で概観したこれらの将来像を目指すに当たっては、世界各国・地域とのつながりがかつてないほど密接に関連しているグローバルな国際環境における各種の市場・技術・政策の現状を把握・分析・整理して、目指すべき将来像とのギャップを社会課題として認識して、その課題を解決していくことが必要である。そこで、次の 3 章では、これらの将来像のうち、最も幅広い社会像である豊かな未来を起点として、それに関連するそれぞれの社会像を実現する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について、TSC の所掌する各技術分野について記述する。

3 章　解決すべき社会課題と取り組むべき領域

TSC が所掌する技術分野の概要

前章の目指すべき社会像で記載した国際的な枠組み、主要国の関連政策、TSC が描く将来像を踏まえ、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示す。

本章は計 7 節からなっており、先ず章の冒頭では TSC が所掌する技術分野の概要を述べ、3-1～3-6 は技術分野ごと、最後の 3-7 では各分野を俯瞰した上での横断的な視点での融合領域や何れの技術分野も所掌していない領域について述べる。各技術分野については、3-1 サステナブルエネルギー、3-2 環境・化学、3-3 アグリ・フードテック、3-4 デジタル、3-5 マテリアル、3-6 バイオエコノミーの順に述べる。

3 章冒頭部の構成として、1 項では解決すべき社会課題（M）、2 項では社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向、3 項では取り組むべきフロンティア領域等（F）について述べる。3-1～3-6 では、1 項に各分野の俯瞰（俯瞰図）を示し、以降は 3 章冒頭部と同様に解決すべき社会課題、市場・技術・政策動向、取り組むべき領域について述べる。さらに 5 項では具体的な手段（技術開発とその他の社会実装に向けた取組）（T）、6 項では手段を進める上での道筋について説明する。なお、手段を進める上での道筋の詳細については、領域ごとにイノベーション戦略（案）としてまとめていく予定である（Innovation Outlook Ver. 1.0 では先行して検討する一部領域の概要のみを述べる）。

なお、本章で論じる取り組むべき領域については、本来であれば 1 章で記載したとおり、フォアキャストとバックキャストを繰り返すアプローチで検討すべきものであるが、本 Ver. 1.0 では各技術分野におけるフォアキャストによって浮き彫りにしたものを述べている。分野横断的な融合領域については更なる議論が必要であり、本 Ver. 1.0 の 3-7 では 6 分野を横断的に俯瞰した上での融合領域について一例を示した上で、Ver. 2.0 以降でより具体化していくこととする。

解決すべき社会課題（M）

将来像については、前章で述べたとおり TSC が描く将来像として豊かな未来レポートの「6 つの価値軸」となる。3 つの社会システムとそれを支える DX（デジタルトランスフォーメーション）についてはデジタルイノベーション分野の一部として、豊かな未来レポートの 6 つの価値軸全てに関連するものとなる。よってここでは DX のみ位置付けが異なるため例外的に「持続可能性」に包含されないものとする（図 3-1）。なお、本内容についてはデジタル分野の節で後述する。



図 3-1　大切にすべき価値の関係性

豊かな未来における「3 つの社会システム」（総合指針 2023）の位置付け

社会課題については以降の 3 章各分野の節にて MFT 分析により示されるが、ここでは先に結論（総論）として以下（表 3-1）にまとめる。

表 3-1　各分野が提示する社会課題

分野	社会課題
サステナブルエネルギー	・カーボンニュートラルエネルギーの十分な量の確保 ・再生可能エネルギーの導入拡大・価値向上
環境・化学	・廃棄物問題や気候変動問題等の環境制約の解消 ・資源需要と地政学的なリスクの高まりに対応するための資源安定確保
アグリ・フードテック	・持続可能な食料システムの構築 ・食料安全保障の強化（健康的な食事を含む）
デジタル	・働き方改革、労働人口減少への対応 ・脱炭素・環境調和経済 ・エネルギー脱炭素化・強靭化 ・レジリエントな社会・情報インフラ ・自然共生持続可能／自立分散社会 ・社会の需要に即した開発（少量多品種、アジャイル）
マテリアル	・基幹産業・技術の創成による持続可能な社会の実現
バイオエコノミー	・カーボンニュートラルの実現 ・サーキュラーエコノミーの実現 ・ネイチャーポジティブの実現 ・ヘルスケアエコノミーの実現

社会課題については、本来であれば 2 章で述べた社会像「大切にすべき価値の関係性」（多様な幸せ、強靭性、持続可能性）及び技術視点からの両方（バックキャスト、フォアキャスト）からのアプローチにて行い、特にバックキャストでは網羅的に検討して社会課題を抽出する。しかしながら Ver. 1.0 は、各技術が解決に貢献し得る社会課題を列挙する形でまとめている。なお、社会課題設定の具体的な考え方については以降の 3-1～3-6 で各分野ごとに述べる。

図 3-2 は社会像から社会課題(M)についての相関(つながり)を示したものである。前章 2-3-1 の豊かな未来レポートで述べたとおり、「大切にすべき 6 つの価値軸」から展開される「実現すべき 12 の社会像」があり、それぞれの社会像について関連する社会課題を示している。

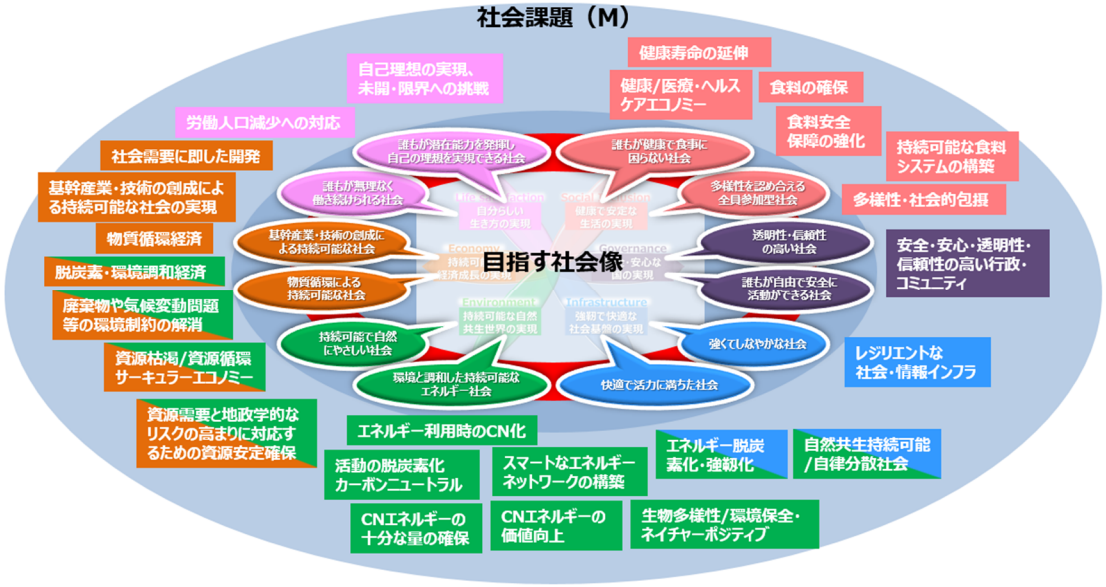


図 3-2　MFT 全体俯瞰(社会像→社会課題 M)

なお、二つの社会像と相関のある社会課題もあり、これらの社会課題についても(図内の配色で)表記している。

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）

本項では、これまで述べた社会像（及びその背景となる市場・技術・政策動向）、社会課題を踏まえ、社会課題解決のために取り組むべき領域（フロンティア領域等）について、表 3-2 及び図 3-3 に示す。

表 3-2　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）

＊下線は特に優先して取り組むべきとする領域

分野名	領域
サステナブルエネルギー	・太陽光発電のさらなる導入 ・風力発電の洋上への展開 ・地下未利用資源の活用 ・海外からの再エネの調達 ・トランジション技術の活用 ・変動性再エネ最大活用のための長期エネルギー貯蔵 ・自然や社会との調和
環境・化学	・環境影響物質の排出削減、代替物質開発、モニタリング ・製造プロセスのエネルギー消費削減 ・CO_2 除去（ネガティブエミッション技術） ・ベースメタルリサイクル ・プラスチックリサイクル ・カーボンリサイクル（燃料・化学品分野） ・化学品炭素源の化石資源からの抜本的な転換 ・カーボンリサイクル（炭酸塩・コンクリート分野）
アグリ・フードテック	・【環境整備】就農者の確保、環境負荷低減、GHG 削減、エネルギー等の国内調達、森林資源循環利用 ・【量の確保】DX の促進、生産性向上、食品ロスの削減、スマート農業 ・【質の確保】ヘルスフードテック、健康・栄養
デジタル ※多数あるため提案領域のみを記載	・省電力・高速情報処理 ・社会インフラのモニタリング・予測基盤 ・自動化・省人化・デジタル化
マテリアル	・量子・電子制御により革新的な機能を発現するマテリアル ・極限機能を有するマテリアル（極限マテリアル） ・高度な機能発現を可能とするマテリアル ・革新的なエネルギー変換を可能とするマテリアル ・マテリアルの高度循環のための基盤技術
バイオエコノミー	・大気中の CO_2 の除去 ・化石原料から再生可能原料への転換 ・開発・生産プロセスの高度化 ・持続可能な自然資本の維持 ・環境負荷の低減、環境浄化 ・環境モニタリングによる状態可視化 ・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 ・新しいモダリティによるヘルスケア

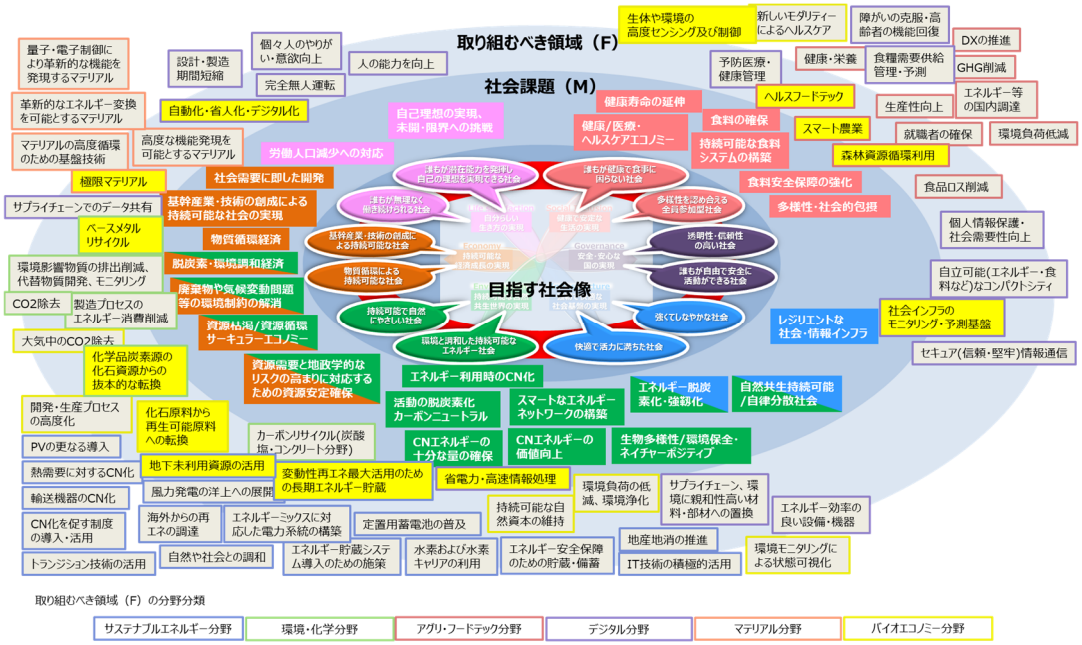


図 3-3　MF 全体俯瞰（社会像 M→取り組むべき領域 F）

以上の内容が（市場・技術・政策動向を背景とした）社会像を起点に社会課題（M）及びそれを踏まえて特定されたフロンティア領域等の説明となる。なお、これらの領域を実現するための具体的な手段（技術開発とその他の社会実装に向けた取組）（T）については、以降の節で分野ごとに述べる。

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。近年、エネルギーの脱炭素化が大きな課題となる中、今回の Innovation Outlook では、主に再生可能エネルギー（以下「再エネ」という。）や CCS（CO_2の回収・貯留）等によりカーボンをオフセットした化石エネルギーなどの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[27]。

『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）、化学的エネルギー（蓄電池、エネルギーキャリアなど）といった別の形態に変換されたエネルギーを蓄える技術のほか、熱を熱のまま、あるいは電力を熱に変換し、蓄熱する技術などがある。

『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。

---

[27] 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。

ただし、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も留意が必要である。

今回の Innovation Outlook では、四つの過程のうち『創る』『貯める』に焦点を絞って議論する。他の二つについては次回のバージョン以降において議論する予定である。

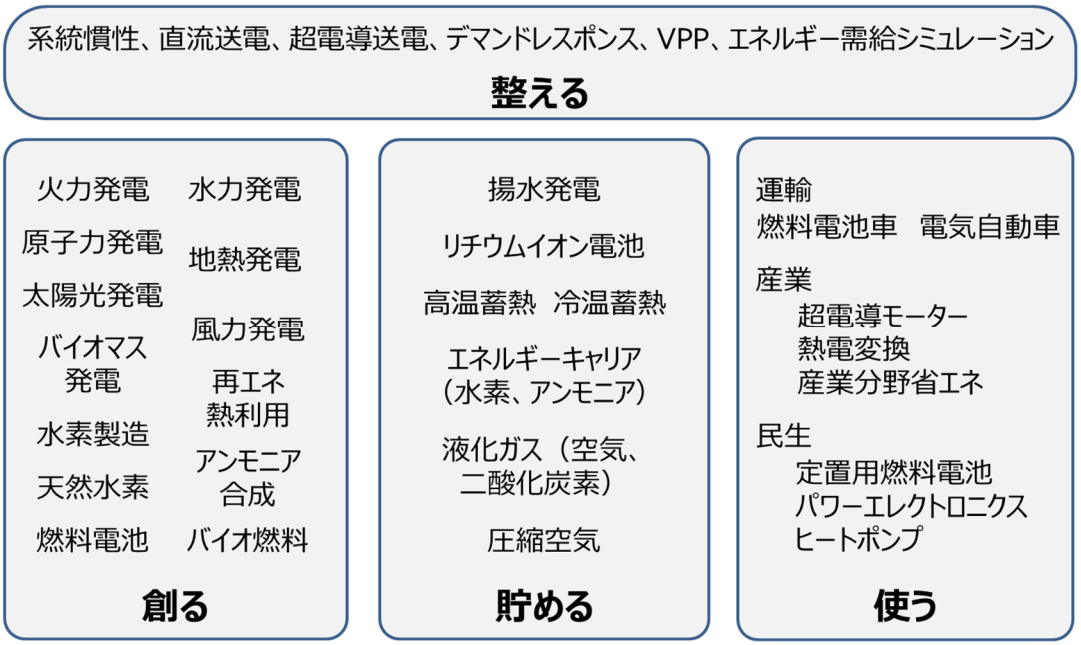


図 3-1-1　エネルギー技術の全体俯瞰図(記載の技術はあくまで例示)

3-1-2 解決すべき社会課題(M)

2015 年にフランス・パリで開催された国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(COP21)で『パリ協定』が採択され、この中で「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力を追求する」という長期目標が掲げられた。その目標達成に向け、2019 年、欧州委員会は欧州グリーンディールを公表し、2050 年までにカーボンニュートラル(以下「CN」という。)を達成するためのロードマップを提示した。日本は 2020 年、2050 年 CN の実現を目指すことを宣言した。2025 年 2 月時点で、2050 年等の年限付きのカーボンニュートラルの実現を表明している国・地域は合計で 146 にのぼっている[28]。

各国政府は CN 推進を経済政策の一環と捉え、CN へのトランジションに向け、政策を推進してきた[29]。その結果、先進国の二酸化炭素排出量は減少している[30]。一方、全世界で見た場合、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)は、このままの排出削減ペースでは 2100 年までに気温上昇は約 2.7℃に達する可能性が高いとしている[31]。また、IEA(国際エネルギー機関)は STEPS(Stated Policies Scenario:全ての法規化された政策や目標値を反映した場合)では 2100 年に 2.4℃、APS(Announced Pledges Scenario:法制化にかかわらず、公表された全ての目標が達成された場合)では 1.7℃気温が上昇すると予想している[32]。

こうした中、アラブ首長国連邦・ドバイで開催された COP28(2023 年)では、2050 年までに GHG(温室効果ガス)排出を実質ゼロにするネットゼロ目標に向け、全ての国に「公正で秩序ある衡平な方法で、エネルギーシステムにおける化石燃料からの移行を進め、今後 10 年間で行動を加速させる」ことを表明した[33,34]。併せて、2030 年までに再エネ発電容量を世界全体で 3 倍に、エネルギー効率改善率の世界平均を年率 2 倍にするという新たな目標を採択した。

アゼルバイジャン・バクーで開催された COP29(2024 年 11 月 11 日～11 月 24 日)では、これまで 1,000 億ドルだった途上国支援目標を「2035 年までに少なくとも年間 3,000 億ドル」と定めることに合意した。くわえて、有志国イニシアチブとして、『COP29 世界エネルギー貯蔵・送電網誓約』が発表された [34]。ここでは 2030 年までに世界全

---

[28] 令和 4 年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書 2023) 第 1 部第 3 章第 1 節 脱炭素社会への移行に向けた世界の動向(資源エネルギー庁) https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/html/1-3-1.html

[29] TSC Foresight 『TSC トレンド COP27 に向けたカーボンニュートラルに関する海外主要国(米・中・EU・英・独・インドネシア・エジプト・インド)の動向 ～再生可能エネルギー・化石エネルギーの観点から～』(NEDO、2022) https://www.nedo.go.jp/library/ZZNA_100076.html

[30] IEA World Energy Outlook 2024

[31] Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change(IPCC、2022) https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf

[32] IEA World Energy Outlook 2024

[33] https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/pagew_000001_00076.html

[34] https://unfccc.int/event/cma-5?item=4

体のエネルギー貯蔵容量を 1,500 GW まで拡大すること、送電網に関しては 2030 年までに世界全体で 2,500 万 km を増設又は改修することを目標としている[35]。

以上を踏まえ、エネルギー分野において実現を目指す社会像の中心として、2 章に述べた 12 の社会像のうちの「環境と調和した持続可能なエネルギー社会」に据え、エネルギーに関する四つの過程それぞれに対する社会課題を整理する。

(1)社会課題:『CN エネルギーの十分な量の確保』(『創る』)

2025 年 2 月に発表された『第 7 次エネルギー基本計画』では、再エネを「主力電源として最大限導入する」と位置付けた。2040 年度におけるエネルギー需給の見通しでは発電電力量の 4～5 割程度を再エネとし、このうち、太陽光は 23～29%程度、風力が 4～8%程度、水力が 8～10%程度、地熱が 1～2%程度、バイオマスが 5～6%程度としている。

日本のエネルギー起源の CO_2 排出量は、図 3-1-2 に示すように、今のところ 2013 年をピークに着実に減少している[36]。2023 年度の CO_2 排出量は 9.22 億トンで、前年度比 4.1%の減少であった。電源構成は再エネが 22.9%(前年比 1.0 ポイント増)で、原子力と合わせた非化石発電比率は、東日本大震災以降で初めて 30%を超える 31.4%となった。エネルギー自給率(IEA ベース)は前年度比 2.6 ポイント増と東日本大震災以降で最高の 15.3%となった。

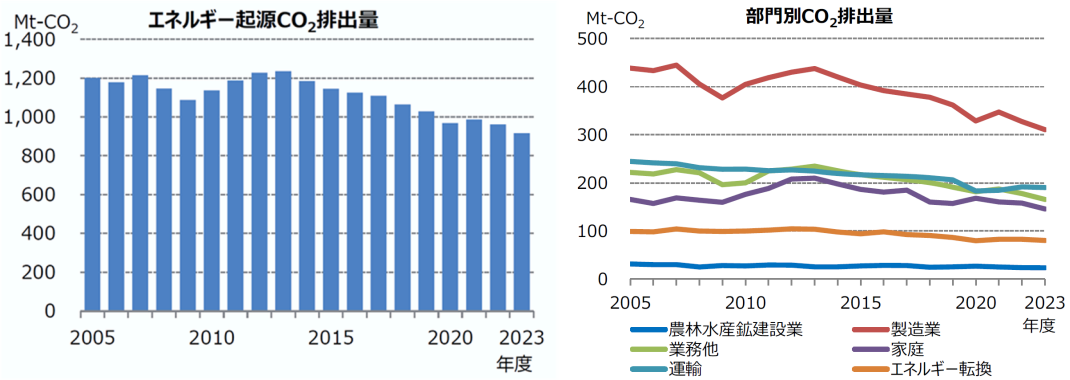


図 3-1-2　日本の CO_2 排出量の推移

出所:2023 年度エネルギー需給実績(速報)参考資料
https://www.meti.go.jp/press/2024/11/20241122001/20241122001-1.pdf

[35] https://cop29.az/en/pages/cop29-global-energy-storage-and-grids-pledge
[36] 令和 5 年度(2023 年度)エネルギー需給実績を取りまとめました(速報)(経済産業省)
https://www.meti.go.jp/press/2024/11/20241122001/20241122001.html

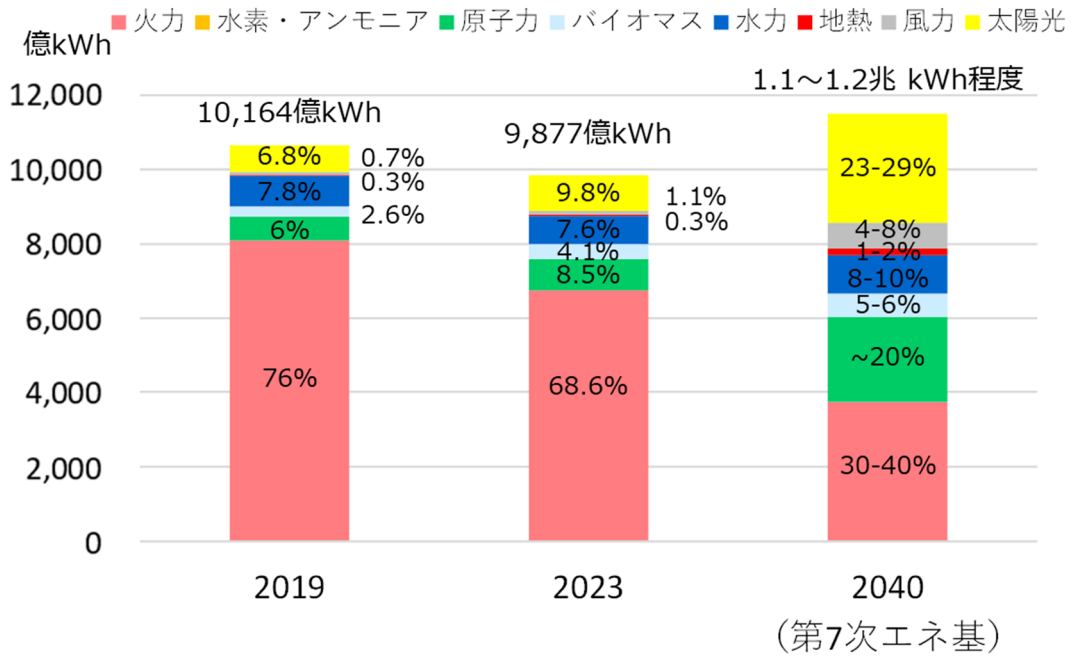
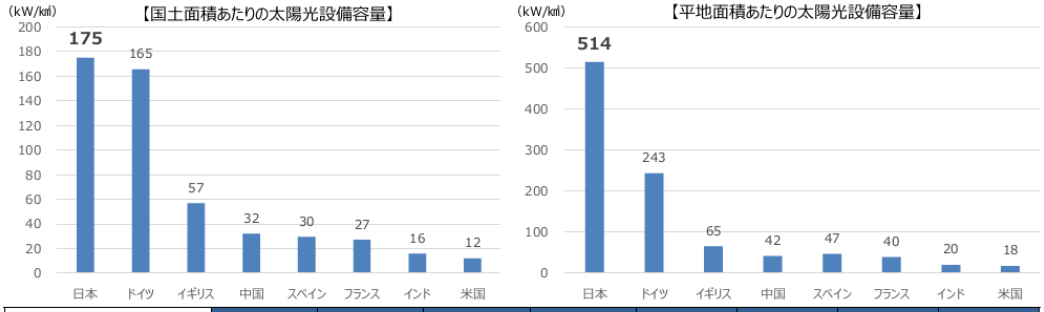


図 3-1-3　日本の電源構成

出所：総合エネルギー統計 2023 年度エネルギー需給実績確報値（資源エネルギー庁、2025 年 4 月 25 日）、及び 2040 年度におけるエネルギー需給の見通し（資源エネルギー庁、2025 年 2 月 18 日）を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

日本の電源構成は図 3-1-3 のとおりで、今後も太陽光、風力、地熱、バイオマスいずれも一層の拡大が求められている。しかしながら、例えば太陽光発電に関しては、FIT（固定価格買取制度）等の政策により、国土面積あたりでも平地面積あたりでも、主要国の中で群を抜いて導入が進んでいる（図 3-1-4）。すなわち、経済規模に比して国土、平地の少ない日本において一層の導入を進めるには経済的支援のみならず、技術開発も伴った一体的な支援が必要と考えられる。

このような適地制約は風力、地熱等その他の再エネにおいても大きな課題となっている。また、再エネ導入拡大に向けては、自然や社会と調和した形で導入する必要がある。



	日	独	英	中	仏	西	印	米
国土面積	38万km2	36万km2	24万km2	960万km2	54万km2	51万km2	329万km2	983万km2
平地面積※ (国土面積に占める割合)	**13万km2 (34%)**	24万km2 (68%)	21万km2 (87%)	740万km2 (77%)	37万km2 (68%)	32万km2 (63%)	257万km2 (78%)	674万km2 (68%)
太陽光の設備容量（GW）	**66**	59	14	308	15	15	52	118
太陽光の発電量（億kWh）	**861**	500	124	3,392	151	216	719	1,462
発電量（億kWh）	**10,328**	5,909	3,080	85,010	5,505	2,709	16,512	43,490
太陽光の総発電量 に占める比率	8.3%	8.5%	4.0%	4.0%	2.7%	8.0%	4.4%	3.4%

図 3-1-4　主要国の国土面積もしくは平地面積あたりの太陽光設備の導入状況

出所：再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会　第 52 回　資料 1
今後の再生可能エネルギー政策について（資源エネルギー庁、2023 年 6 月 21 日）

(2)社会課題：『再生可能エネルギーの導入拡大・価値向上』(『貯める』)

太陽光発電の普及により日中の発電量が大きくなり、余剰が生まれる一方で、朝、夕の電力が不足する現象が生じている。国内では主に火力発電の出力調整や揚水発電、広域連系系統を活用し、需給のギャップを埋めている。しかし、それらでは足りず、東京電力パワーグリッドを除く全国の一般送配電事業者において再エネの出力制御が行われている。また、海外では長期的な気象変動の中で数日あるいは数週間にわたって曇天が続いたり、無風が続いたりすることによって変動型再生可能エネルギー（以下「変動性再エネ」という。）の発電量が減少し、電力が不足する事象が度々報告されている[37]。変動性再エネなどを供給過剰時には蓄え、不足時に取り出すことを可能とするエネルギー貯蔵技術が高度化し、社会実装が進めば、変動性再エネの導入余力が高まるとともに価値向上につながるものと考えられる。

電力を電力のまま長期間貯蔵する技術に加え、電力以外の例えばバイオ燃料、水素、アンモニアのような化学媒体で貯蔵する技術も考えられる。化学媒体による貯蔵は、国内の余剰エネルギーの有効活用のほか、国外からの調達や有事に備えたエネルギーの備蓄を可能にする側面もある。ここでは、変動性再エネの導入余力を高め、価値向上につなげる観点から、電力を入力にしてエネルギーを長期間貯蔵する技術に着目する。

[37] 欧州で電力急騰　天候不順で再エネ不調、ガス高に波及も（日本経済新聞、2024 年 12 月 17 日）

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)市場動向

2024 年時点でのエネルギー分野の市場規模は、年間投資額の推計から 3 兆ドル程度であり、このうち再エネや電力系統等のインフラ、エネルギー利用の効率化など、CN エネルギーに関わる分野は約 2 兆ドルとなっている。シナリオによって異なるものの、CN エネルギー分野は 2035 年までに現在の約 1.4～2.5 倍に市場規模が大きくなることが予想されている(図 3-1-5)。

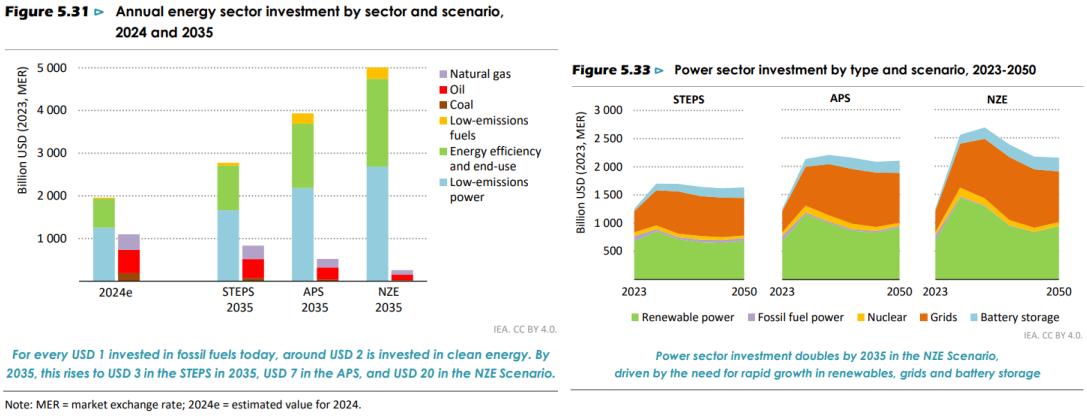


図 3-1-5　シナリオごとのエネルギー分野における 2035 年の投資額と電力分野における 2050 年までの投資額の推移

出所:World Energy Outlook 2024(IEA)

また、電力分野に関してみると、再エネの導入拡大によって現在の 1.3 兆ドルが STEPS シナリオや APS シナリオでは 2035 年までに 1.7～2.2 兆ドルの規模に達し、2050 年に向けて再エネの導入拡大は落ち着くものの全体の市場規模としては同程度を維持する。電力分野の中では再エネの占める割合が一貫して大きいが、系統整備(送配電設備の新増設)や電力貯蔵の市場規模が現在に比べて大きく成長することが予想されている。NZE(Net Zero Emissions by 2050 Scenario:ネットゼロ目標が期限どおりに達成された場合)シナリオでは、2030 年の時点で系統整備に約 7300 億ドル、電力貯蔵に約 1400 億ドルの投資が必要とされている[38]。

『創る』に着目すれば、図 3-1-6 に示すように、IEA は 2050 年の NZE に向け、電力需要が大幅に増加するため、太陽光発電、陸上風力発電、洋上風力発電、その他の再エネの大幅な導入拡大が必要だとしている。

[38] World Energy Investment 2024(IEA) https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2024/overview-and-key-findings

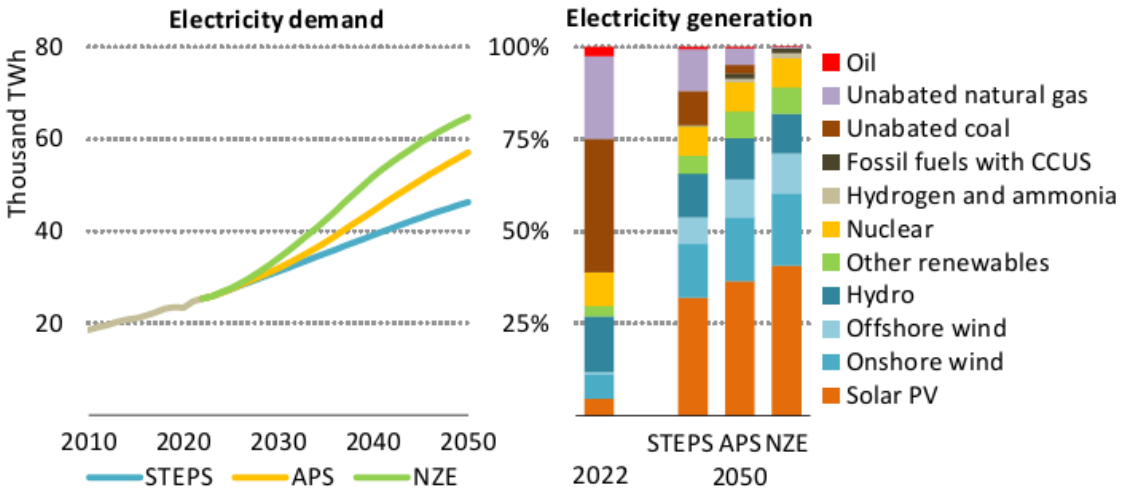


図 3-1-6　IEA が描く 2050 年の世界のエネルギー構成

出所：World Energy Outlook 2023（IEA）

また、海外では電力需要の増加と脱炭素電源を求める動きが既に顕著なものとなっている。特に、米国主要IT企業は、データセンター等の稼働に必要となる脱炭素電源が成長の制約要因とならぬよう、再エネの確保に加え、次世代革新炉や次世代型地熱発電などの革新技術への投資拡大を戦略的かつスピーディに進めている[39]。

国内でも今後、DX（デジタルトランスフォーメーション）や GX（グリーントランスフォーメーション）の進展により、電力需要が増加に転じることが見込まれており、サステナブルエネルギーのニーズは高まると考えられる。

（2）技術動向

日本は国土を最大限に利用するため、軽量なペロブスカイト太陽電池、浮体式洋上風力の開発が進んでいる。中でもペロブスカイト太陽電池はプラスチックフィルムの上に作成することができ、フレキシブルで軽い太陽電池が実現できることから、これまで設置が困難だった建物壁面や耐荷重が小さい屋根等への適用が期待されており、その開発競争は、日本のみならず、世界的に激化している。

また、海外では『天然水素』への関心が近年急速に高まっており、米国や欧州を中心に政府機関やベンチャー企業が研究開発を加速している。米国エネルギー省（DOE）のエネルギー高等研究計画局（ARPA-E）では、潜在的に破壊的な新技術の開発につながる高リスクの研究開発を行う『Exploratory Topics』の一つとして、

[39] 第 7 次エネルギー基本計画（資源エネルギー省、2025）
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_01.pdf

2024 年に天然水素（Geologic Hydrogen）が取り上げられた。米国地質調査所は地質学的評価を行い、米国内の天然水素ポテンシャルマップを公開している[40]。

『貯める』過程に関しては、蓄電池の技術開発競争が激化している。電気自動車を想定した研究開発が中心だが、ウエアラブルを想定したフレキシブルバッテリー[41]の開発も本格化しつつある。

海外では蓄電池以外の蓄エネも注目されている。米国 DOE が Long Duration Storage Shot として、2030 年までに 2021 年比 90%コスト削減達成を目指す 10 時間以上のエネルギー貯蔵技術として以下の四つのエネルギー形態について、10 の有望な長期エネルギー貯蔵技術を特定している。

- 熱エネルギーによる貯蔵（溶融塩システム及びその他の熱貯蔵技術）
- 力学的エネルギーによる貯蔵（圧縮空気エネルギー貯蔵及び揚水発電）
- 電気化学的エネルギーによる貯蔵（フロー電池、鉛蓄電池、リチウムイオン電池、ナトリウムイオン電池、スーパーキャパシタ、亜鉛電池）
- 化学的エネルギーによる貯蔵（双方向水素貯蔵）

さらに、ARPA-E の DAYS（Duration Addition to electricitY Storage）プログラムでは、10 時間から約 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を開発し、電力網の回復力とパフォーマンスを向上させるストレージシステムの開発を目指し、熱エネルギーによる貯蔵（固体熱電池、Laughlin-Brayton サイクルエネルギー貯蔵、揚水式熱エネルギー貯蔵（PTES）、ブレイトン複合サイクル）、力学的エネルギーによる貯蔵（改良型揚水発電）、電気化学的エネルギーによる貯蔵（亜鉛臭素フロー電池、水性硫黄フロー電池、硫黄とマンガンベースフロー電池）、化学的エネルギーによる貯蔵（マグネシウムマンガン酸化物、熱化学エネルギー貯蔵モジュール、過酸化水素燃料電池）に取り組んでいる。また、次のステップとして、季節間の需給ギャップを埋め、レジリエンスの向上に資する 100-1,000 時間の電力貯蔵技術の開発を計画している。

（3）政策動向

各国政府はエネルギー関連技術を国の重要技術に指定し、技術開発の推進、技術流出の防止に取り組んでいる。

米国は CETs（Critical and Emerging Technologies）として 18 の技術をリストしているが、そのうち、「先進ガスタービンエンジン技術」「再生可能エネルギーの生成と貯蔵」「指向性エネルギー」がエネルギーに関係する。中国では『第 14 次五か年

[40] Developed by Robert Miller, Scott Kinney, Scientific Analysis by Sarah Gelman, Jane Hearon, and Geoffrey Ellis "Geologic Hydrogen Prospectivity in the Conterminous United States"（2025）https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/hydrogen/

[41] Top 10 Emerging Technologies of 2023（World Economic Forum）

計画』の「国家実験室の再編や国家科学センターの建設の対象分野」に指定した 7 分野の中に「次世代エネルギーシステム」がリストされている。独国ではホワイトペーパー技術主権の『国際競争力、安全保障、経済と社会の強靭化に重要な基盤技術』の中に「持続可能なエネルギー技術」があげられている。

3-1-4 （1）社会課題の解決のために取り組むべき領域（F）：地下未利用資源の活用

『カーボンニュートラルエネルギーの十分な量の確保』において取り組むべき主要な領域の全体像を図 3-1-7 に整理した。この中で『地下未利用資源の活用』をこの社会課題の下でフロンティア領域に提案する。その理由について以下に述べる。

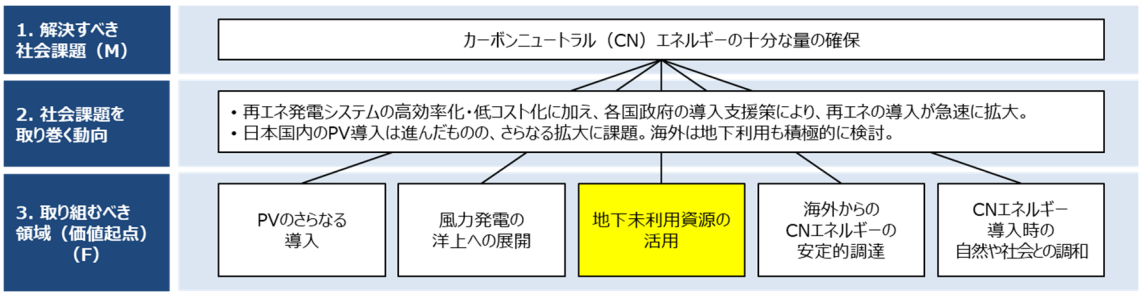


図 3-1-7　CN エネルギーの十分な確保のために取り組むべき領域

（1）『創る』技術の俯瞰

先に述べたとおり、我々がエネルギーを利用するためには、自然界や周囲の環境に存在する様々なエネルギーを捉え、目的に応じてまとまった量を電力、燃料、熱といった利用できる形に変換する（以下「発電等」という。）必要がある。発電等の元になるエネルギーの形態は大きく分けて、電磁エネルギー、力学的エネルギー、化学的エネルギー、熱エネルギー、核エネルギーの五つがある。そこで、それぞれに対し、考え得る発電等をリストアップした。

これら多様な発電等は、利用する環境に応じて必要となる技術やコストが大きく異なる。例えば、風力発電については、陸上風力、着床式洋上風力、浮体式洋上風力で必要となる技術や難易度が大きく異なる。水力発電についても、大型の貯水池を建設する水力発電と川や水路の流れを利用する小水力発電では必要な環境や設備コストが異なる。

そこで、図 3-1-8 に発電等それぞれの技術が求められる空間を整理した。発電であれば発電する場所、燃料であれば原料や資源が存在する場所を表している。縦軸は高さで、地下・海底から地上、上空、宇宙までとした。横軸は国内の内側から海を超えて海外に向かう方向を表す。左から内陸の山林、農地、住宅・商業地域、工業地域、近海、遠洋、国外とした。技術が求められる空間の違いや技術の利用方法によって個別の技術名称が与えられている場合はその名称を記載した。

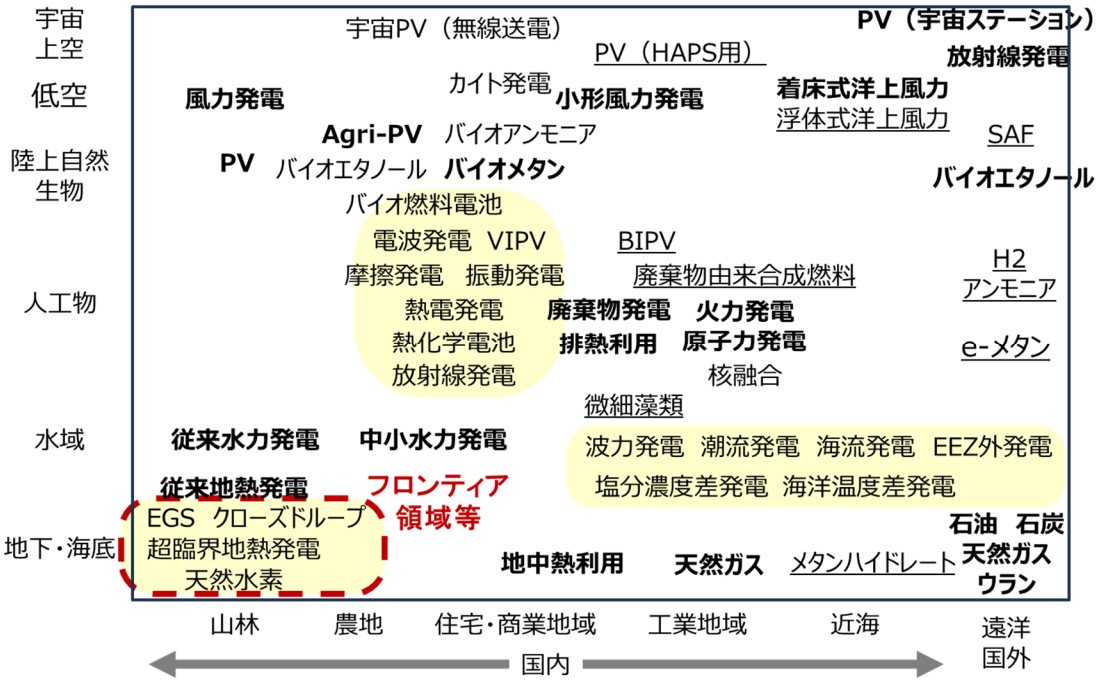


図 3-1-8　日本における発電等エネルギーに関する空間利用の可能性

太字：事業実績が豊富な既存技術
下線：国内で実証や検討が進んでいる技術

この図において、太字は事業実績が豊富な既存技術、下線は国内で実証やその検討が進んでおり、近い将来事業化が期待されるものである。

日本は平地の割合が少なく、太陽光設備容量は既に主要国の 2 倍以上となっており[42]、適地不足に直面している。そこで、BIPV（Building Integrated PV）、VIPV（Vehicle Integrated PV）、Agri-PV（営農型太陽光発電）などとして設置場所を拡大すべく、ペロブスカイト太陽電池の開発を通じて軽量化、フレキシブル化、建材等との一体化などに取り組んでいる。

海に囲まれた日本は洋上風力の大きなポテンシャルを有している。このため、陸上風力に加えて洋上風力の導入が進められている。洋上風力では水深によって様々な形式が検討されており、実績のある着床式から導入が始まっている。遠浅な海域が少ない日本では浮体式洋上風力発電への期待が大きく、現在、浮体式洋上風力発電の研究開発に国を挙げて取り組んでいる。

こうした研究開発の結果として国内の空間の多くは何らかの形で利用されておりもしくは、利用されようとしている。しかしながら、人工物領域、近海から遠洋にかけての領域、地下の領域は、多様な技術が検討されているものの比較的利用が進んでいないように見受けられる。

[42] 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会第 52 回資料 1
『今後の再生可能エネルギー政策について』（資源エネルギー庁、2023 年 6 月 21 日）

人工物領域で活用が期待される熱電発電や振動発電などの環境発電に関しては、一つのデバイスで得られる発電量が比較的小さいため、センサーや通信用の電源、将来はスマートフォンのような携帯端末等の電源として期待される。発電効率の向上とあわせ、利用技術の省エネルギー化、それらを組み合わせたシステム化技術の開発が求められる。

近海から遠洋にかけての海洋利用については、設備の規模に比して得られるエネルギー量が少ないため、他の技術や特徴ある環境との組合せを通じて活用することが期待される。

地下については豊富な資源の存在が見込まれるものの、活用し切れていない状況にある。

例えば、地熱発電は、太陽光発電や風力発電と異なり、電力を安定的に供給できることからベースロード電源となりうる発電技術である。我が国では、1966 年に我が国初の松川地熱発電所（岩手県）が運転を開始して以降、1996 年まで設備容量が増加した。日本は全国各地で温泉利用が盛んで、地熱発電の有望地点の多くは温泉利用が先行しており、先行利用者との調整が難航することや、多くが火山地域にあり、国立・国定公園の指定に基づく開発制限があること、地熱発電の開発には大きな初期投資が必要な一方で、掘削後に十分な噴気が得られる保証がなく、事業リスクが大きいことなどにより、その後開発が進んでいなかった。近年は各種の支援制度の導入等により、2024 年に安比地熱発電所（岩手県）や南茅部地熱発電所（北海道）が運転を開始するなど、少しずつではあるが再び増加しつつある。

現在の各国の地熱発電ポテンシャルと設備容量を表 3-1-1 に示す。日本の地熱資源ポテンシャルは約 23GW と世界第 3 位の資源量を有していながら、設備容量では世界 10 位にとどまっており、利用率は 2%以下となっており、設備容量の増加率を見ても各国に見劣りする。

また、天然水素に関しては、白馬八方温泉にて観測されており、北海道には水素発生の起源となるかんらん岩が地表付近にみられることから、国内のポテンシャルにも期待が高まっている。しかしながら、エネルギー源として積極的に利用しようとする試みはあまり行われておらず、国内のどこでどの程度採取可能かといった調査も行われていない。

表 3-1-1　地熱発電ポテンシャルと設備容量

	ポテンシャル（資源量）		累積設備容量（2020年）		2010年からの設備容量増加量【MW】	設備容量/ポテンシャル【%】
	順位	【MW】	順位	【MW】		
アメリカ	①	30,000	①	3,700	250	12
インドネシア	②	27,790	②	2,289	949	8
日本	③	23,470	⑩	550	31	**2**
ケニア	④	7,000	⑤	1,193	599	17
フィリピン	⑤	6,000	③	1,918	48	32
メキシコ	⑤	6,000	⑥	1,105	-11	17
アイスランド	⑦	5,800	⑨	755	90	13
トルコ	⑧	4,500	④	1,549	1,152	34
ニュージーランド	⑨	3,650	⑦	1,064	59	29
イタリア	⑩	3,270	⑧	916	0	28

(2)フロンティア領域としての『地下未利用資源の活用』

エネルギーを『創る』場として比較的利用が進んでいない空間的領域のうち、地下については、資源の豊富さ、あるいは資源埋蔵の期待に比して、十分な活用が進んでいないと言え、開発の可能性が高いと思われる。そこで、『地下未利用資源の活用』をフロンティア領域に提案する。その中には次世代地熱発電（EGS（増進型地熱システム）、クローズドループ地熱発電、超臨界地熱発電）と天然水素がある。こうした技術の開発過程で高度化が進むと考えられる掘削技術や資源探査技術は、エネルギー貯蔵や鉱物資源の採掘にも転用できる可能性がある。なお、本フロンティア領域の①将来性（成長性・社会課題）、②技術・アイディアの革新性、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）

従来型地熱の 23.5 GW のポテンシャルに加え、次世代地熱発電を利用することで 77 GW 超の新たなポテンシャルが期待されている[43]。地熱発電は、365 日 24 時間、天候に左右されずに安定的に供給可能な再生可能エネルギーであることから、次世代型地熱発電の実用化によりエネルギー安全保障や CO_2削減等への貢献が期待される。

[43] 資源・燃料政策を巡る状況について（第 43 回総合資源エネルギー調査会　資源・燃料分科会の資料 3）（資源エネルギー庁資源・燃料部、2024）
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/pdf/043_03_00.pdf

地下に貯蔵されている天然水素はグローバルで数十億～数千兆トンとみられている。地球の表面積に対する日本の国土面積の割合 0.074%を乗じても数百万～数兆トンの規模となり、2050 年の日本の水素導入目標である 2,000 万トンを十分まかなえる可能性がある[44]。水素の増進生産を実現することで、一次エネルギーとしての更なる貢献拡大も期待される。その場合の CO_2 削減効果は 1,656 万トン-CO_2/年（国内）となる[45]。また、天然水素の採掘コストとしては 1 ドル/kg（14 円/Nm^3-H_2）程度[46]との試算がある。条件の相違や実現可能性の観点から、単純な比較はできないものの、2050 年の日本政府の水素価格目標 20 円/Nm^3-H_2 であることを踏まえれば、十分市場性をもつ可能性がある。

②技術・アイディアの革新性

DOE は次世代地熱発電の可能性に焦点を当てた報告書『Pathways to Commercial Liftoff』を発表し、2050 年までに米国の地熱エネルギー生産量を 20 倍にする見込みとしている。そのほか、IEA も 2024 年に報告書『The Future of Geothermal』にて、技術向上とプロジェクト費用の削減により、地熱は 2050 年までに世界の電力需要成長の 15%を賄う可能性があるとし、次世代型地熱発電の技術的潜在能力は、再生可能エネルギー技術の中で太陽光発電に次ぐ規模を誇り、世界の電力需要を 140 倍満たすことができるという内容を発表するなど、国際的な場でも注目を集めている。

天然水素に関しては、前述のとおり、海外では近年急速に注目が高まり、米国や欧州を中心に政府機関やベンチャー企業が研究開発を加速している。また、関連技術をもつ企業の参入を喚起することを目的とした天然水素に特化した国際会議 Hnat が開かれるなど注目を集めている。

天然水素に関する論文は 2019 年ごろから投稿され始め、これまでの総発表件数の約 7 割が過去 2 年に発表されている（図 3-1-9）[47]。国別ではフランスが最も多い 32 件だが、これは 2023 年にロレーヌ地域北東部炭田下にて天然水素鉱床が発見されたことがきっかけとなっている（図 3-1-10）。特許出願件数は今のところ 30 件程度にとどまっている。このように、天然水素の研究開発は黎明期にあり、今後の研究開発の余地が大きい。

---

[44] UNDERSTANDING THE POTENTIAL FOR GEOLOGIC HYDROGEN RESOURCES（USGS）https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review23/arpae005_ellis_2023_o-pdf.pdf

[45] 本値は 2050 年水素導入目標 2,000 万トン/年の 15%となる 300 万トン/年が天然水素によって供給されて LNG を代替する場合を想定したもの。天然水素の資源ポテンシャル及び価格競争力が十分高い場合は、天然水素導入量が増え、削減効果は導入量に比例してより大きくなり得る。

[46] 150 円/1 ドルとして換算。

[47] （Exploration、Appraisal など）及び（Natural Hydrogen、Native Hydrogen、Geologic Hydrogen、Serpentinization など）を含む論文で検索。

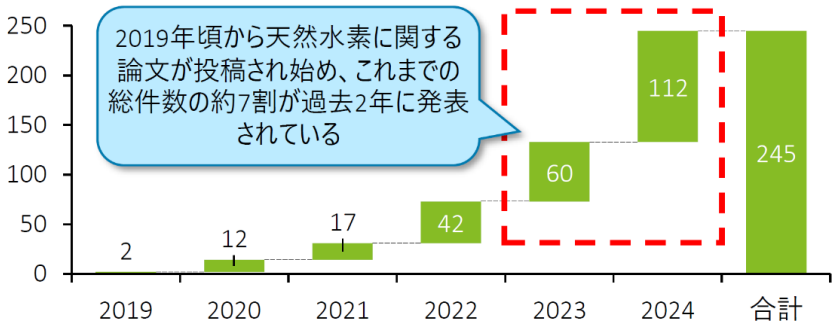


図 3-1-9　天然水素に関する年ごとの論文投稿件数の推移

出所：地熱発電および地中利用に関する技術俯瞰調査（NEDO、2025）

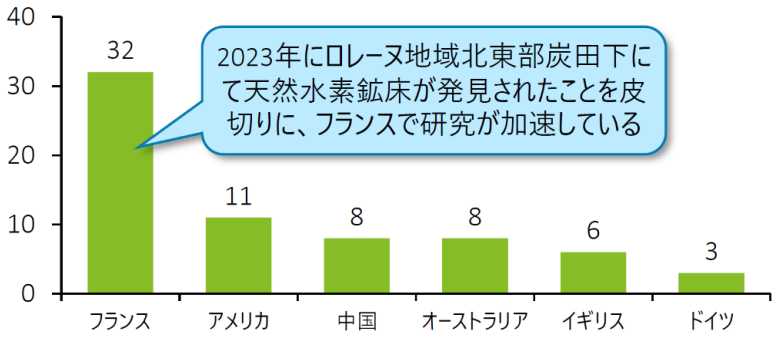


図 3-1-10　天然水素に関する国別論文投稿件数

出所：地熱発電および地中利用に関する技術俯瞰調査（NEDO、2025）

③日本の優位性

日本の国土は火山帯、プレート境界に位置し、地熱及び天然水素生成に必要な貴重な岩石を地表近くで得ることができる。EGS やクローズドループ地熱発電を導入する際、比較的浅い掘削で利用できるものと期待できる。海洋プレートが潜り込む位置にあることから、地下に海水を巻き込み、超臨界地熱が利用できる可能性も高い。くわえて、EGS や天然水素の生成に必要な水も地中に豊富にある。

また、日本は火山、地震などの研究が古くから行われていることもあり、地質学分野の研究者が豊富にいる。しかも、地熱開発、石油開発、重工業など、関係する国内企業も多い。燃料電池や水素分離など水素に関する技術開発は幅広く、世界に先駆けて進められ、膨大な技術的蓄積がある。

このようにエネルギー分野における地下利用は、地理的利点、地質データや関連技術の活用といった我が国の強みを複合的に活かすことで新たな価値を創出できる分野と考えられる。

④民間のみで取り組む困難性

地下の開発は不確実性を伴う上に、掘削等に多額の初期投資が必要であり、民間で全てのリスクを負うのは困難である。また、次世代型地熱発電について、クローズドループ地熱発電や EGS においては日本の複雑な地質構造下での掘削及び流体の循環確保や、超臨界地熱においては大深度の掘削及び超臨界流体の存在確認など、世界的も実証例がなく、不明な点が多いためリスクが高い。天然水素は賦存量、生成メカニズムなど不明な点が多くリスクが高い。

⑤重要経済安保技術

地熱発電はともより、天然水素も国内に賦存が期待されており、純国産エネルギーとして自給率の向上につながるもので、エネルギー安全保障の観点から重要である。好適な環境を有していても技術や担い手がないため他国に開発を依存することのないよう、日本自らがポテンシャルを評価し、技術開発、サプライチェーンの構築に取り組む必要がある。

3-1-5 (1)具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T)

フロンティア領域『地下未利用資源の活用』における具体的な手段としては EGS、クローズドループ地熱発電、超臨界地熱発電、天然水素、CCS、資源回収、エネルギー貯蔵などに関する技術開発と実証に加え、社会受容性の醸成などがあげられる。

【EGS】[48]

従来型の地熱発電に対し、水蒸気・熱水の生産量が低下した地熱貯留層に水を補給(涵養)して生産量の回復を図ったり、人工的に地熱貯留層を拡大・造成したりする地熱発電をEGS(増進型地熱システム:Enhanced Geothermal System)と呼ぶ。

具体的には、既存の貯留層に水を注入して得られる高温蒸気を利用する涵養型EGS(Type 1)、坑井刺激により既存の貯留層の拡張、透水性の改善、周辺の天然貯留層との連結を行う能力増進型 EGS(Type 2)、より深部の高温岩体のうち脆性領域に水圧破砕により人工的に貯留層を新たに造成する脆性域高温岩体発電(Type 3)、延性領域に孤立型の貯留層を新たに造成する延性域高温岩体発電(Type 4)がある(図 3-1-11)。脆性域高温岩体発電は肘折(山形県)や雄勝(秋田県)にて過去に実証事業を行っている。海外でも米国ニューベリー、豪州クーパーベイズンやパララナ、仏国ソルツ、独国ランダウ、スイスバーゼル、韓国浦項にて実証事業が行われている。

【クローズドループ地熱発電】

近年、石油・天然ガスの掘削技術が高度化し、数千 m の地中の水平掘削や掘削方向の制御が可能になっている。その技術を活用し、地中にて二つの坑井をつないで地上から地中を経由して地上に戻る水のループを形成して発電や地域冷暖房に利用する技術が開発されている。これをクローズドループ地熱発電と呼ぶ。カナダのスタートアップである Eavor が世界に先駆けて地下数千メートルに網目状のループを形成する技術を開発し、カナダ・アルバータや米国ニューメキシコ、ドイツのバイエルンにて実証している。

[48] TSC Foresight Vol.12『地熱発電分野の技術戦略策定に向けて』(NEDO、2016)

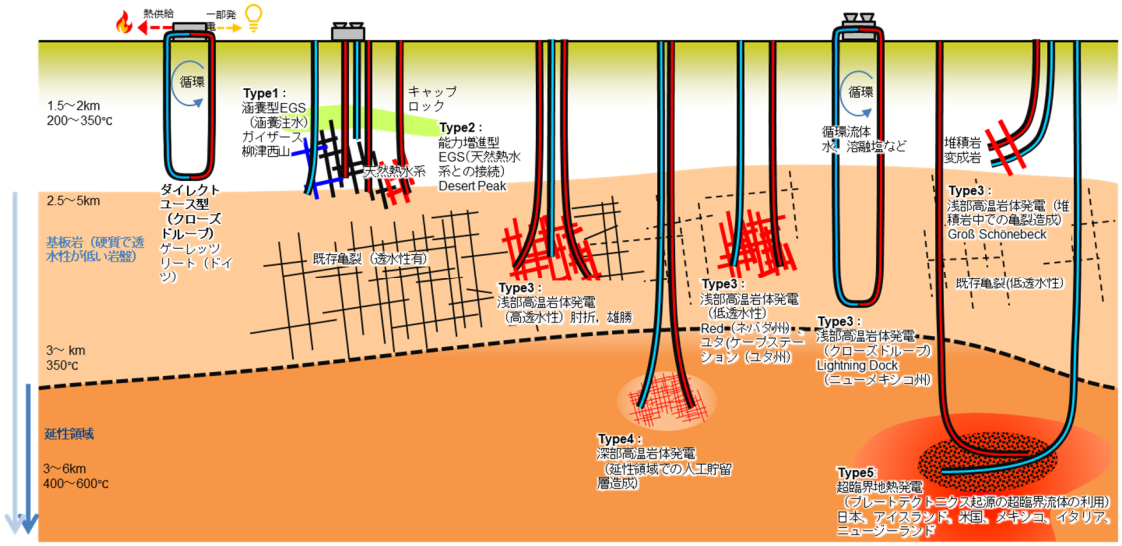


図 3-1-11　様々な次世代地熱発電技術

出所：産業技術総合研究所浅沼宏氏作成資料を基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2024）

【超臨界地熱発電】

我が国を代表とする沈み込み帯の近傍では、プレートテクトニクスによって地下に引き込まれた海水に起因する水分が高温・高圧（超臨界状態）で賦存していると考えられている。超臨界地熱発電は、この地熱資源を活用しようというものである（図 3-1-11）。

在来型地熱発電が 1 地域あたり数十 MW 程度の規模であるのに対して、超臨界地熱資源が使えれば 1 地域あたり 100 MW 以上の規模が実現できると見込まれている。

超臨界地熱資源の蓋然性が高い地域（実際に高温度領域が確認された地点）は国内に 15 地域以上存在し、新しい地熱資源として期待されている。

2050 年頃の導入予測として、発電容量は最大で約 11GW[49]、発電量は 781 億 kWh、市場規模予測（売電分）は約 1～2 兆円、CO_2 削減効果（国内）は約 4,500 万トン-CO_2/年が見込まれる。

今後、調査井によるポテンシャルの検証や高温、高圧環境での掘削技術の開発が求められる。

[49] 2019 年度成果報告書　超臨界地熱発電技術研究開発/2019 年度超臨界地熱資源ポテンシャル調査（NEDO）

【天然水素】

近年、地下に埋蔵されている天然水素が低炭素水素の新たな供給源として世界的に注目されている。国内では長野県の白馬八方温泉などで観測されている。天然水素は地下でカンラン岩が水と反応して蛇紋岩となる反応に伴って生成することが知られている。カンラン岩や蛇紋岩は超塩基性岩あるいは超苦鉄質岩に分類されるが、日本国内には多数の超塩基性岩体あるいは超苦鉄質岩体の存在に関する報告がある。数十メートルから数キロメートルまでサイズも様々で、水素発生反応の進行を示すカンラン岩と蛇紋岩の分布といった特徴も様々であるが、個々の岩体についての地質学的な研究・記載はあるものの、天然水素の貯留層の可能性という視点から、これらの岩体の量や特徴をまとめた例はこれまでに存在しない。そのため、これらの岩体の情報を集約することが、その開発・利用方法を含めた基礎となると考えられる。

現在、日本国内をはじめ、オマーン、モンゴルや深海底などのマントル岩石の調査とともに、室内での蛇紋岩化、炭酸塩化の水熱反応実験が行われている。また、蛇紋岩化反応に伴う岩石破壊プロセスについての実験及び数値シミュレーションや、海洋プレート内の蛇紋岩化による水素発生プロセスについて放射光施設を用いた評価などが進められている。

天然水素の採掘は排出原単位（強度）が小さく（0.4 kg-CO_2/kg-H_2 程度）、低コスト（1 USD/kg）であり、ブルー水素・グリーン水素の補完的な役割を担う、純国産の一次エネルギーになる可能性がある。

その一方、現時点において

- 天然水素の生成メカニズムやポテンシャルが不明
- 実効的な探査方法、可採埋蔵量の把握、経済性の算定方法が現時点では困難といった課題がある。

3-1-6 (1)手段を進める上での道筋

フロンティア領域のうち代表的な手段として、超臨界地熱発電及び天然水素を取り上げ、それらを進める上での道筋を以下に整理する。

【超臨界地熱発電】

これまでの研究開発を通じて、超臨界地熱資源の蓋然性が高い地域(実際に高温度領域が確認された地点)は国内に 15 地域以上存在している。今後は、調査井によるポテンシャルの検証が必要となる。具体的には、これまで実施した 3D モデルによる数値シミュレーションの整合性を確認するとともに超臨界地熱流体の存在について確証を得るとともに、光ファイバーによる地震波モニタリングを実施する。超臨界地熱流体の噴気までアプローチする場合は、噴気量等からより高精度な発電量予測を行う。また、噴気流体の性状(有害、酸性流体など)から対策の立案を実施する。

くわえて、高温、高圧環境での掘削技術の開発が求められる。具体的には、高温用セメントの開発、耐食性ケーシングの開発、坑内冷却技術、ドリルビットの開発などがある。

【天然水素】

日本は天然水素に対して注目が集まり始めたところである。このため、大学等では学術的な視点で水素発生メカニズムの研究が行われているものの、エネルギー用途を意識した研究開発はほとんど行われてこなかった。そこで、メディアや出版物を通じて広く社会に訴えるとともに、特に興味を持っている関係者を集めたワークショップを開催するなどして、天然水素の開発に関する機運を高める。

並行して研究開発プロジェクトを推進する。水素分子は小さく散逸しやすいために自然貯留は希であり、回収可能な量(天然水素ポテンシャル)は、貯留可能な地質、大気放出までの保持期間、地中での消費、さらには人工的水素生産増進等に大きく依存すると考えられている。すなわち、生成メカニズムの深い理解と増進技術の開発がポテンシャルを引き上げる。

上記の成果も活用し、広く国内の資源探査を進める必要がある。それには上空からのリモートセンシングや微量水素の検出など最先端の技術の積極的な活用も検討する。

貯留水素の採掘でも人工的水素生産増進であっても、現時点では環境負荷についての知見が不足している。同時に産出されるメタンのみならず水素自体の漏洩が与える環境影響、採掘自体が与える環境影響、プロセスごとの二酸化炭素排出量などの評価と影響軽減の方策の検討が必要である。

将来は事業化、工業化に向けた生産プロセスの具体的設計やコストの評価も行う。

こうした研究開発やポテンシャル調査、試掘等について、JOGMEC（金属鉱物資源機構）と連携し、協力して推進する必要がある。図 3-1-12 に想定される取組を示す。

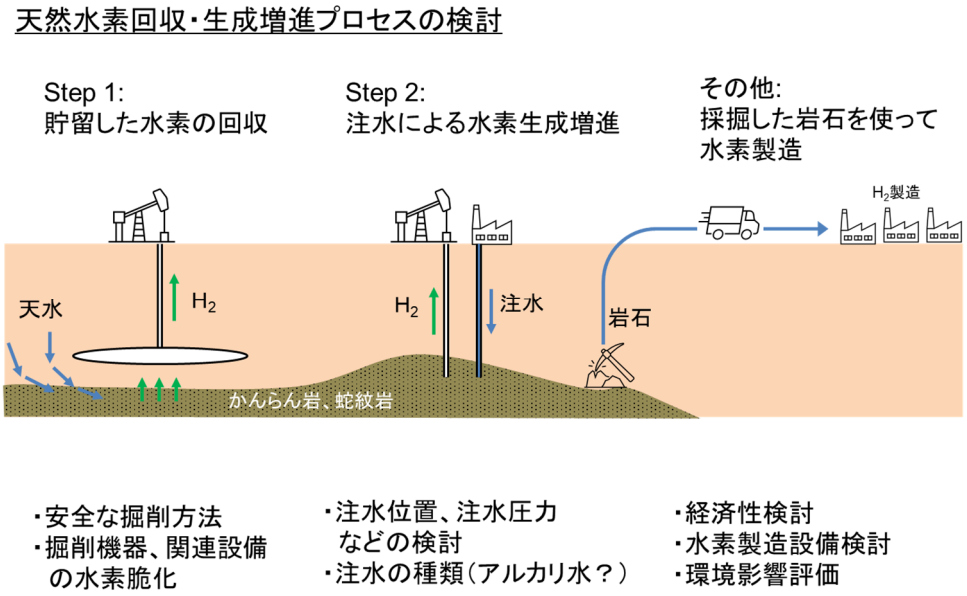


図 3-1-12　天然水素の想定される取組

3-1-4 (2)社会課題の解決のために取り組むべき領域(F):変動性再エネ最大活用のための長期エネルギー貯蔵

『貯める』に深く関係する社会課題『再生可能エネルギーの導入拡大・価値向上』において取り組むべき主要な領域の全体像を図 3-1-13 に整理した。この中で『変動性再エネ最大活用のための長期エネルギー貯蔵』をこの社会課題の下でフロンティア領域に提案する。その理由について以下に述べる。

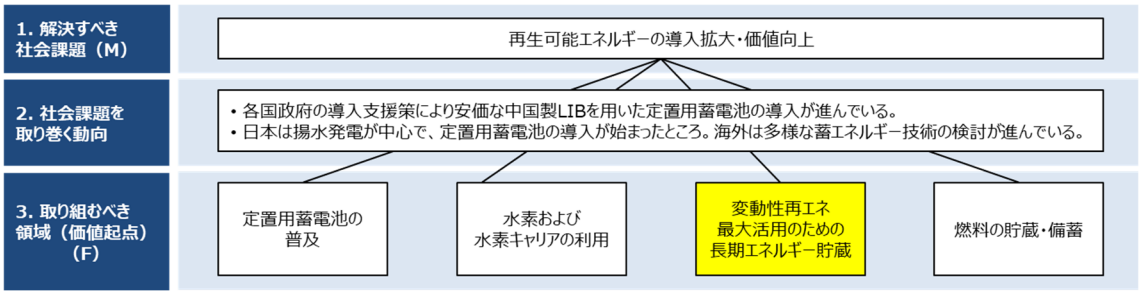


図 3-1-13　再エネの導入拡大・価値向上のために『貯める』に関して取り組むべき領域

(1)エネルギー貯蔵全体の俯瞰

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の導入が加速している。しかし、これらの電源は天候や時間帯により出力が大きく変動するため、大規模な導入には以下のような課題がある。

1)需給バランスの確保

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。

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。そのため、火力発電や揚水発電などの調整力をもつ電源や、調整機能を強化する技術の導入が求められる。

3)長期的な変動への対応

太陽光発電も風力発電も季節による発電量の変動が大きく、数年にわたる気象現象の変化にも左右される。そのため、短期的な調整だけでなく、長期的なエネルギーの貯蔵・供給の仕組みが必要である。

このような課題を解決するためには、エネルギー貯蔵技術の活用が不可欠である。

『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）をとって表現した（図 3-1-14）。

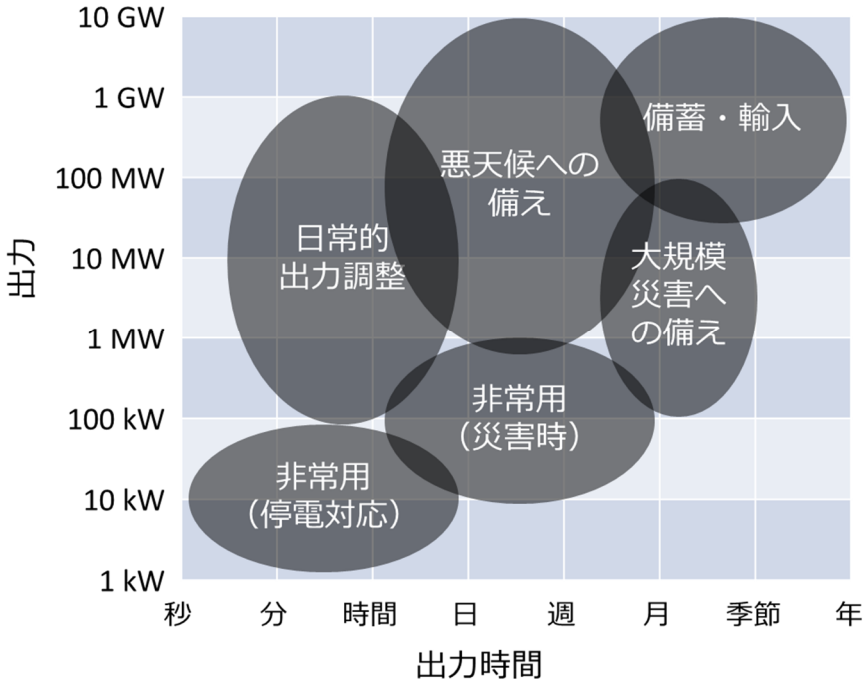


図 3-1-14　エネルギー貯蔵の社会的需要

図 3-1-15 に示すように、これらのうち、数 kW から GW の出力範囲、時間でいえば数分から季節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。しかし、CN 社会の実現にはこれらを代替する技術が必要である。

1）短時間の調整（秒～数時間）

太陽光や風力の短周期変動を平準化するために、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。

2）日単位の調整（数時間～1 日）

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が、導入可能な適地が限られているため、拡張には制約がある。

3）長期のエネルギー貯蔵（週～季節単位）

季節変動への対応には、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）、合成燃料等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が、製造コストの低減や輸送・貯蔵の効率向上が課題である。

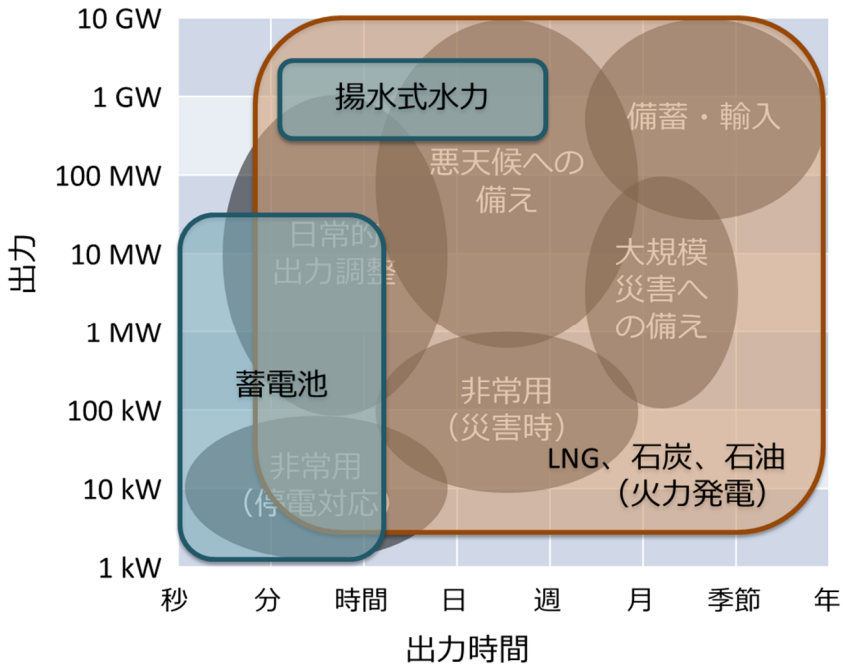


図 3-1-15　社会的需要に対する現在のエネルギー貯蔵技術

化石燃料が担ってきた範囲を完全にカバーするには、必要な容量が大きく、蓄電池を用いるとすると、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。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おり、十分な量の水素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。こうした現状を踏まえれば、蓄電池や水素を補うとともに、カバーし切れていない領域を埋めるエネルギー貯蔵技術が求められている（図3-1-16）。

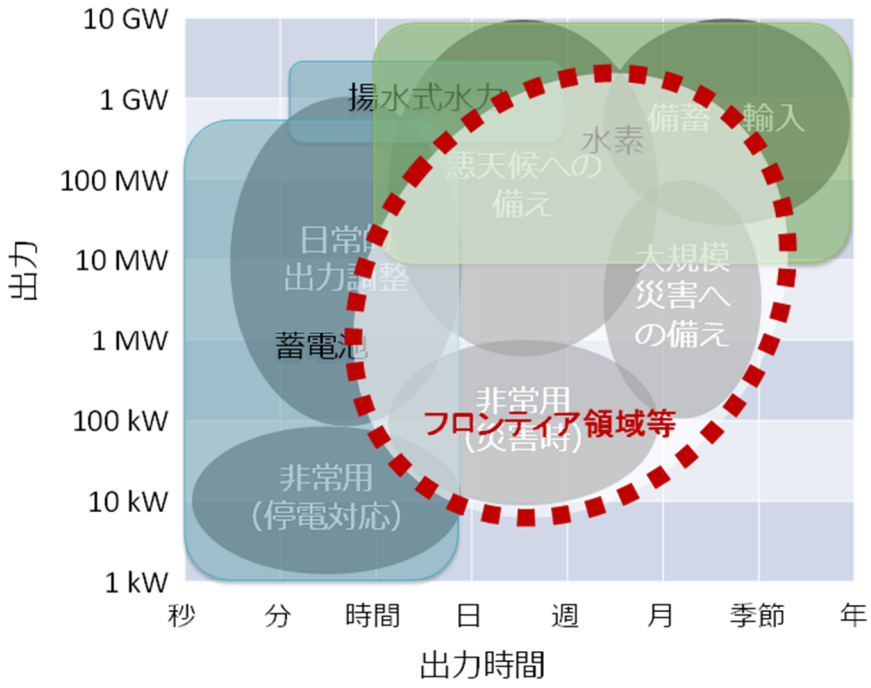


図 3-1-16　エネルギー貯蔵技術のフロンティア領域等

(2)再生可能エネルギーの導入拡大・価値向上の観点から取り組むべき領域

再エネの価値向上の観点からは、「貯める」技術として、以下のような領域に取り組む必要がある。

【変動性再エネ最大活用のための長期エネルギー貯蔵】

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、さら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、変動性再エネの季節による発電量の変動や暗い凪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。

【燃料の貯蔵・備蓄】

これまでも水素やアンモニアによるエネルギー貯蔵が検討されており、GI 基金事業をはじめとする大規模な研究開発が進められている。バイオエタノール、e-Fuel といった合成燃料も利用することができる。いずれにしても大量の燃料を製造・確保することが課題となる。貯蔵・備蓄する燃料に応じた技術開発や設備の導入が必要となる。

(3)フロンティア領域としての『変動性再エネ最大活用のための長期エネルギー貯蔵』

『変動性再エネ最大活用のための長期エネルギー貯蔵』については、日本だけでなく世界で必要性が高いもので、日本に強みがあり、また日本の自然環境、市場環境に適合した技術開発が必要であることなどから、フロンティア領域に提案する。当該フロンティア領域の①将来性(成長性・社会課題)、②技術・アイディアの革新性、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)

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 100 GWh 規模の蓄電容量が必要となるとの試算がある。

また、世界的には表 3-1-2 に示す導入量が予想されており、今後長期エネルギー貯蔵システムが大量に必要とされることが考えられる。世界の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もある。これは、CAGR(年平均成長率)で 14.8%に相当する[50]。

[50] Dimension Market Research レポート https://dimensionmarketresearch.com/report/energy-storage-market/#overview/

表 3-1-2　長期エネルギー貯蔵の導入目標

地域	目標年	導入目標	コスト	備考	引用元
US	2050	225-460GW	330億ドル		BNEF
UK	2050	20GW			BNEF
オーストラリア	2030	12.7GW			BNEF
全世界	2040	8TW	4兆ドル	ネットゼロ達成のため必要	LDES Council
US	2050	600GW		ネットゼロ達成のため必要	LDES Council

BNEF　2024 Global Long-Duration Energy Storage Update
LDES Council　LDES Council 2024 Annual Report

②技術・アイディアの革新性

長期エネルギー貯蔵に関しては、欧米を中心として研究開発が行われ、スタートアップ企業も立ち上がり始めている。電力を一旦別のエネルギーの形で蓄えた後に電力に戻す方法は多くあり、新規手法が研究されている。例えば、熱エネルギーを高効率で保存する蓄熱技術や、超長期のエネルギー貯蔵が可能な地下圧縮空気エネルギー貯蔵（CAES）などが注目されている。また、次世代電池として金属空気電池、固体酸化物電解セル、フロー電池といった技術が研究されており、これらは従来のリチウムイオン電池に比べて大容量・長寿命化が期待される。くわえて、再生可能エネルギーからの水素製造（Power to Gas, P2G）や、アンモニア・メタン合成による化学的エネルギーとしての長期貯蔵も実証研究が進んでいる。

③日本の優位性

電力の長期エネルギー貯蔵には、電力をその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必要となる。熱エネルギーによる貯蔵でいえば、日本に強みのあるヒートポンプ技術や蓄熱や断熱等の材料技術を活かすことができる。材料に加えて機械的なシステムとして高温を扱う最先端のガスタービン技術も日本に強みがある。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係する「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[51]。

④民間のみで取り組む困難性

実際の変動性再エネ導入量や電力の需要量の予測には不確実性を伴う上に、長期エネルギー貯蔵システムの導入には多額の初期投資が必要であるため民間だけで開発リスクを負うのは困難である。特に、長期エネルギー貯蔵の分野で

[51] 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）

は、一般的な蓄電池の使い方と比べると充放電のサイクルが長く、充放電による収益機会が少なくなることから、短期的な収益を求める民間企業だけでの取組は難しい。さらに、送電網の整備や規制の枠組みの調整が不可欠であり、こうしたインフラ投資や制度設計には政府の支援が不可欠となる。そのため、公的資金の投入や政策支援、官民連携によるリスク分散が求められ、政府の長期的なビジョンのもとで産業界が協力して開発を進める必要がある。

⑤重要経済安保技術

米国が CETs（Critical and Emerging Technologies）として選んだ 18 の技術の中に、「先進エンジニアリング材料」「先進ガスタービンエンジン技術」「再生可能エネルギーの生成と貯蔵」が挙げられている。長期エネルギー貯蔵は、エネルギー安全保障の強化、経済の安定化、そして CN 社会の実現に不可欠な技術であり、経済安全保障の観点からも戦略的に重要視されている。エネルギー供給の多様化と安定性を確保し、地政学的リスクや市場の変動に強いエネルギーシステムを構築するためには、長期エネルギー貯蔵技術の開発・導入が不可欠である。

3-1-5 (2)具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T)

『変動性再エネ最大活用のための長期エネルギー貯蔵』を実現するための手段として、大きくは 4 分野(力学的エネルギー貯蔵、熱エネルギー貯蔵、電気化学的エネルギー貯蔵、化学的エネルギー貯蔵)に分けられる(図 3-1-17、表 3-1-3)。

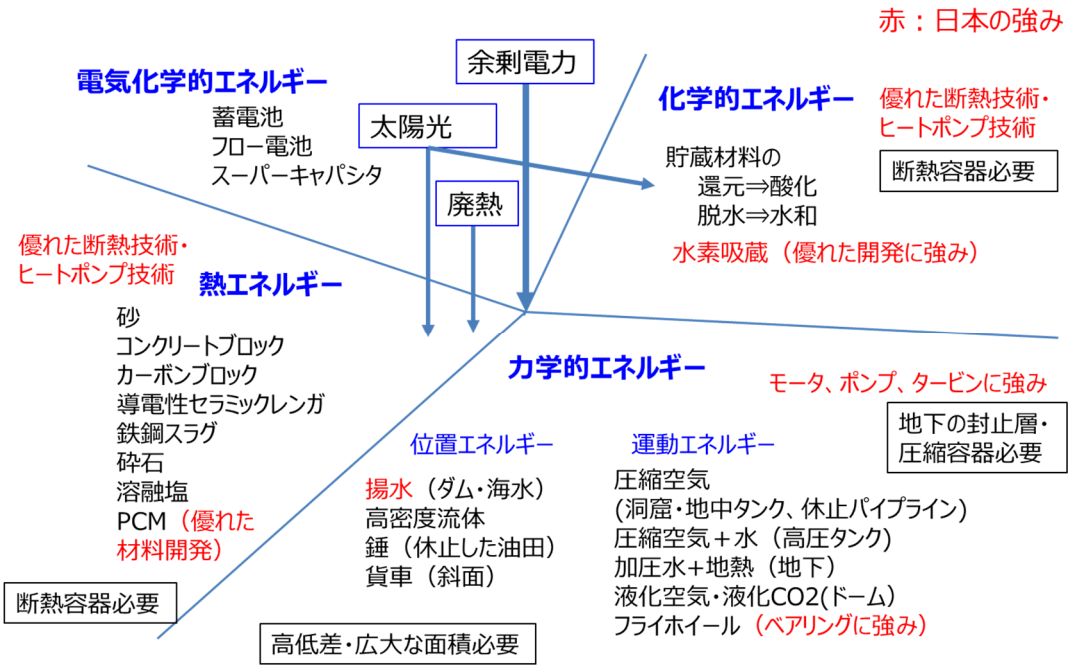


図 3-1-17　長期エネルギー貯蔵の俯瞰

表 3-1-3　種々の長期エネルギー貯蔵技術の概要

分類	名称	概要
力学的エネルギー貯蔵	揚水発電(PHES)	発電所をはさんで上部と下部に調整池を設置して、余剰電力によりポンプ水車を逆回転させて上部調整池に揚水・貯蔵し、発電時は下部調整池への放流によりポンプ水車を回転させて発電する
	圧縮空気貯蔵(CAES)	余剰電力により圧縮機で空気を圧縮し、高圧状態で貯蔵する。電力が必要な際は、圧縮空気を膨張させて発電する。ガスタービンを併設するケースが多い。プラントによっては、圧縮時に生じた熱を膨張時に用いている
	液体空気貯蔵(LAES)	余剰電力により空気を冷却・液化し、断熱タンクで保存する。電力が必要な際は、液化空気を大気熱や排熱で膨張させ、発電する
	重力エネルギー貯蔵	余剰電力により列車やコンクリートブロックなどの重量物を引き上げ、位置エネルギーとして保存する。重量物を下ろした際の運動エネルギーで発電する。
	フライホイール貯蔵	円盤（フライホイール）や円柱を電力で回転させることで、電力を運動エネルギーとして蓄電し、再び電力に変換する
熱エネルギー貯蔵	顕熱貯蔵	再エネによる余剰電力が発生したときに電気を熱に変換し、熱として一時的に蓄え、電力需要が高くなる必要な時に熱を電気に変換して電力を供給。熱貯蔵媒体として、砂、岩石、コンクリート、レンガなどの物質の温度変化（顕熱）を利用して熱エネルギーを蓄える
	潜熱貯蔵	再エネによる余剰電力が発生したときに電気を熱に変換し、熱として一時的に蓄え、電力需要が高くなる必要な時に熱を電気に変換して電力を供給。熱貯蔵媒体として、溶融塩などPCM(物質が固体や液体などの状態（相）を変化する材料)が吸収・放出する熱（潜熱）を利用して蓄熱
化学的エネルギー貯蔵	酸化還元による貯蔵	酸化物を還元するときの吸熱反応と、酸化するときの発熱反応を利用して熱エネルギーを貯蔵する。長期の使用や季節貯蔵が可能
	水和による貯蔵	水和状態にある物質から蒸気の放出時の吸熱反応と脱水状態の物質に蒸気を加えるときの発熱反応を利用して熱エネルギーを貯蔵する。長期の使用や季節貯蔵が可能
	水素化物による貯蔵	水素吸蔵合金が水素を吸蔵するときの発熱反応および放出するときの吸熱反応をときの可逆的な化学反応を利用して熱エネルギー貯蔵する。長期使用や季節貯蔵が可能
電気化学的エネルギー貯蔵	フロー電池	金属や有機物などのイオンの酸化還元反応を利用して充放電を行う。電極や電解液の劣化がほとんどなく長寿命であり、発火性の材料を用いていないことや常温運転が可能
	スーパーキャパシタ	電気二重層を誘電体とした対面電極のコンデンサ構造をし、活性炭電極と電解液の界面に電荷を蓄積2 つの電極の間を電解質溶液で満たし、絶縁多孔質膜で分離された多孔質電極に電荷を蓄積する。大きな比容量と高い出力か、非常に迅速に充電および放電できる。

【力学的エネルギー貯蔵】

力学的エネルギーを用いる電力貯蔵では、既に実績のある揚水発電の他に、CAES（圧縮空気エネルギー貯蔵）、LAES（液化空気エネルギー貯蔵）、液化 CO_2 エネルギー貯蔵、フライホイールによる運動エネルギー貯蔵、錘によるエネルギー貯蔵などが挙げられる。特に、既存の環境を有効に活用することによる低コスト化の検討が活発化している。例えば、廃鉱や地下空間を利用した CAES や、既存の建造物を活用した重力エネルギー貯蔵技術が検討されている。

【熱エネルギー貯蔵】

熱エネルギーによる電力貯蔵では、熱エネルギーを保持する媒体が必要で、それには、顕熱貯蔵と潜熱貯蔵の二つの主要な方式がある。顕熱貯蔵では、砂や砕石、コンクリートブロック、セラミックレンガなどを貯熱媒体として使用し、熱を直接蓄える。一方、潜熱貯蔵では、溶融塩やその他相変化物質を熱貯蔵媒体として用い、相転移の際に生じる熱を貯蔵する。近年、安価で長時間保持できる媒体や、体積変化を伴わないことから利用しやすい潜熱貯蔵媒体といった新たな熱貯蔵技術の開発が進んでいる。さらに電力と熱の相互変換技術としてヒートポンプを活用し、電力を用いて媒体を加熱（又は冷却）し、熱エネルギーとして蓄える方式が研究されている。

今後、熱貯蔵媒体の材料開発、電力−熱相互変換技術の高度化、高性能断熱技術の活用などにより、エネルギー密度の向上、長時間貯蔵、放熱ロスの最小化が可能となることが期待される。

【電気化学的エネルギー貯蔵】

電気化学的エネルギー貯蔵の代表的な技術として、フロー電池がある。フロー電池は、電気を用いて電解液を反応させてエネルギーを貯蔵し、必要に応じて電気を取り出すことができる。電解液をタンクに蓄えることで、大容量で長時間のエネルギー貯蔵に適している。特に、バナジウムレドックスフロー電池（VRFB）は、サイクル寿命が長く、安全性が高いことから、大規模エネルギー貯蔵システムとしての実用化が進められている。また、亜鉛−臭素（Zn−Br）フロー電池や鉄−クロム（Fe−Cr）フロー電池など、コスト低減を目指した新しい電解液材料の開発も進行中である。

【化学的エネルギー貯蔵】

化学的エネルギー貯蔵は酸化・還元反応や脱水・水和反応を利用し、エネルギーを化学結合の形で貯蔵する技術である。例えば、水素の吸蔵・放出が可能な金属水素化物や、酸化還元特性をもつ金属酸化物を利用した技術が研究されている。これらの技術は、長期間にわたってエネルギーを安定的に貯蔵できることが特長である。特に、日本が強みをもつ材料科学の知見を活かし、高エネルギー密度や反応速度・エネルギー効率を向上させた貯蔵材料の開発が期待される。

3-1-6 (2)手段を進める上での道筋

長期エネルギー貯蔵には、個別の利用目的に応じて求められる性能は様々（出力、貯蔵期間、価格等）であるが、必ずしも高度な技術は必要ではない場合も多い。数多くのソリューションがあるため、どこでどう使うかなど自由で多様な発想が求められる。

3-2 環境・化学分野

3-2-1 分野の俯瞰

環境・化学の技術分野を、図 3-2-1 に示す。サーキュラーエコノミーの実現は、2 章に記載したとおり、気候変動問題を克服し持続可能な社会を実現するための 3 つの社会システムの一つであることから、活動の最重要分野として位置付けており、本 Innovation Outlook の次項以降で俯瞰分析を実施した。

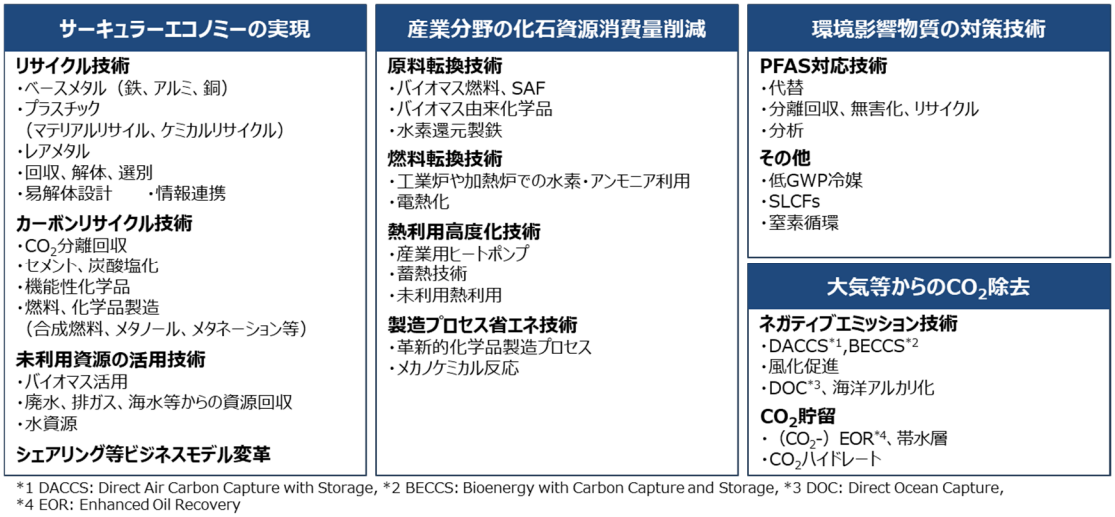


図 3-2-1　環境・化学分野の活動分野俯瞰図

鉄鋼・化学産業など CO_2 排出削減が困難とされる産業分野では、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などの化石資源消費量を削減する技術が欠かせない。

GHG（温室効果ガス）排出量の大部分は CO_2 であり、気候変動の観点からは CO_2 排出削減が最重要課題ではあるが、地球環境の保全に向けては、CO_2 だけでなく様々な環境影響物質の対策技術対応が必要であり、例えば、SLCFs[52]（短寿命気候強制因子）の対策技術や、近年欧米において規制強化の議論が進む PFAS[53]対応技術についても注視が必要と考えられる。

---

[52] 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_2 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。

[53] 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_2 排出（残余排出）があるため、カーボンニュートラル実現には、大気等から CO_2 を除去するネガティブエミッション技術も必要不可欠な技術である。

3-2-2 解決すべき社会課題（M）

サーキュラーエコノミーは、特に欧米で新事業や雇用創出の一手段としても期待され、取組が強化されている。これまで我が国における資源循環は、最終処分場のひっ迫や不法投棄問題への対処が中心であったが、資源安全保障の手段として取組が行われてきた。一方近年は、資源採掘や消費の抑制による CO_2 排出削減の効能にも着目されている。

鉄・銅・アルミニウムのいわゆる『ベースメタル』とプラスチックは製造時の CO_2 排出量が大きく、リサイクルが原料調達の観点から改めて注目されている。また、これらの素材は、CO_2 排出量が大きい素材の中で、調達リスク[54,55]の一つの指標と考えられる重み付け HHI が大きい点からもリサイクルは重要と考えられる（図 3-2-2）。

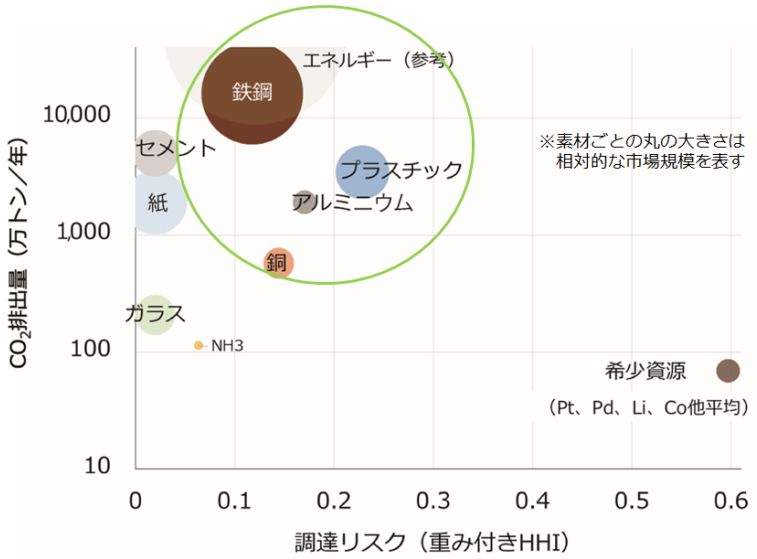


図 3-2-2　日本における主要素材に関する製造時 CO_2 排出量、調達リスク及び相対的な市場規模

出所：各種資料[56]を基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2018）

さらに、CO_2 を資源として循環利用するカーボンリサイクルは、CO_2 の削減に加え、炭素資源の有効活用にも寄与する。CO_2 に水素を反応させて合成ガスやメタノールに転換し、燃料や基礎化学品として利用する技術が重要となるほか、水素を用いずに

---

[54] 重み付き HHI（ハーフィンダール指数）により評価したもの。資源調達における調達安定性は「ハーフィンダール指数（HHI）」という統計的な指標を活用することで評価でき、調達先の供給リスクを考慮した値を「重み付き HHI」と呼ぶ。図の評価では権益分、開発輸入、リサイクルを考慮しており、HHI の値は調達先の限定により大きく、権益の保有、資源開発への参加、高いリサイクル率により小さくなる。

[55] 銅については将来の調達リスクの大きさが懸念されており、経済産業省の 2024 年度補正予算により安定供給源の多角化や権益確保に向けた支援が措置されている。

[56] CO_2 排出量は排出原単位 × 生産量を元に循環率を考慮、プラスチックは焼却含む。市場規模は単価 × 生産量。産業連関表（2018 年 7 月時点）のほか、リサイクルデータブック（産業環境管理協会、2018）、ゼロカーボン・スチールへの挑戦（日本鉄鋼連盟、2018）を参照。

機能性化学品、セメント原料やコンクリートを製造する技術の早期社会実装も期待されている。

エネルギー消費量及び CO_2 排出量の観点で見ると、化学産業は、原料やエネルギーとしての化石資源の利用量が最も多く、CO_2 排出は鉄鋼、セメント業界に次ぐ量である（図 3-2-3）。

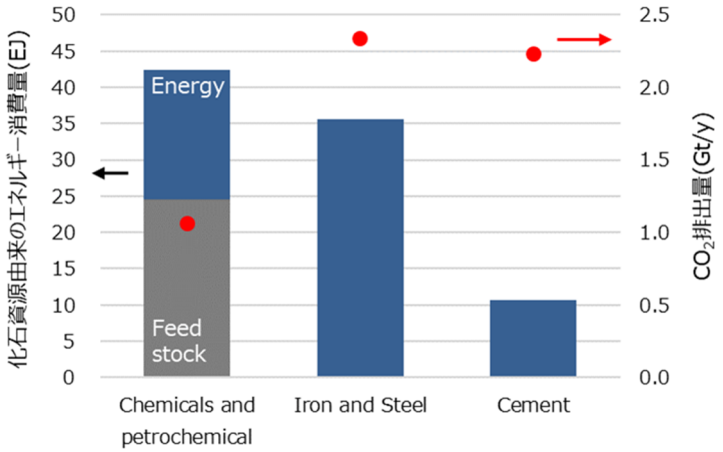


図 3-2-3　エネルギー消費量及び CO_2 排出量の多い製造業（世界）

出所：Energy Technology Perspectives 2017（IEA）を基に NEDO イノベーション戦略センター作成
※棒グラフは化石資源由来のエネルギー消費量（左軸）。
プロットは CO_2 排出量（右軸）で、プロセス由来を含む直接排出分
※Iron and Steel においては、還元剤利用の化石燃料消費を含む

化学製品の主骨格は炭化水素であり、エネルギー使用量の削減や脱炭素化を行っても、原料としての炭素利用は避けられない。使用済製品の焼却による CO_2 排出を低減するために、プラスチックリサイクルやカーボンリサイクルは重要である。

上記から、次項では、鉄、銅及びアルミニウムのベースメタル及びプラスチックの資源循環に加え、化学品分野の原料転換に有効な水素を利用するカーボンリサイクル（化学品・燃料分野）について取り上げることとする。

3-2-3 （1）資源循環分野における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

素材別及び資源循環関連産業の市場規模について、以下に記す。

（ア）ベースメタル

ベースメタルの世界全体の年間生産量は、鉄は約 19 億トン、アルミニウムは約 1.1 億トン[57]、銅は約 0.3 憶トン[58]である。鉄の需要は 2050 年に向けても堅調であり、アルミニウムと銅は、いずれも GX（グリーントランスフォーメーション）を担う素材として世界各地で需要の増加が見込まれている（図 3-2-4）。

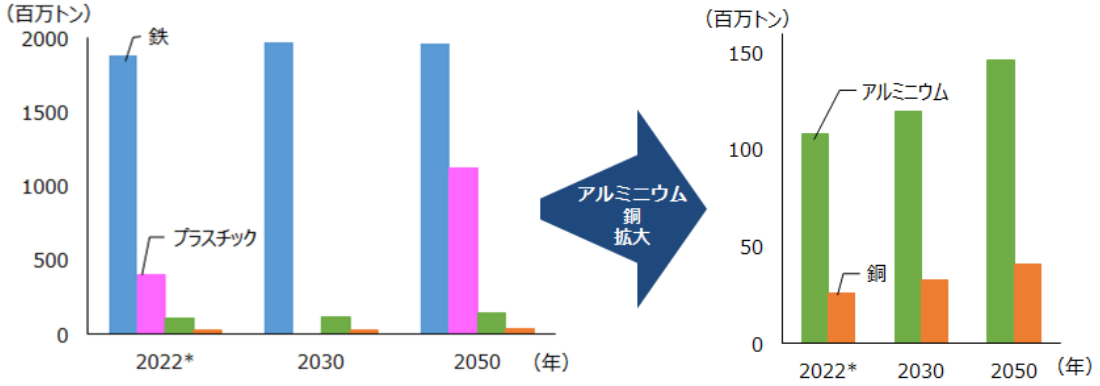


図 3-2-4　ベースメタルとプラスチックの需要見込み

＊ 銅については 2023 年

注）プラスチックの 2030 年の予測値なし

出所：各種資料を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

鉄、アルミニウム [57]

銅 [58]

プラスチック（2022 年データ）[59]

プラスチック（2050 年データ）[60]

なお、製造時の CO_2 排出が低い素材として、水素還元法等によるグリーンスチールや再生可能エネルギーを用いたグリーンアルミニウムに注目が集まっている（表 3-2-1、表 3-2- 2）。

---

[57] 鉄、アルミニウムとも
Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5℃ Goal in Reach 2023 update（IEA）
https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach

[58] Global Critical Minerals Outlook 2024（IEA）
https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024

[59] Plastics – the fast Facts 2023（Plastic Europe）
https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/

[60] The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics（Ellen MacArthur Foundation、2016）
https://www.ellenmacarthurfoundation.org/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics

表 3-2-1　グリーンスチールブランドの例

グリーン鉄の方式	企業名	ブランド	手法
①製造プロセスの改善等による排出削減量を割り当てることで排出量を下げた製品	日本製鉄	NSCarbolex	製造プロセスの変革・改善等により削減したCO2排出量を任意の製品に割当
	JFE	JGreeX	GHG排出削減技術によるGHG排出削減量を任意の鋼材に割当
	神戸製鋼	Kobenable Steel	鉄鉱石の一部を還元鉄に置換することでコークス使用量を減らすなど、削減したCO2削減量を環境価値として任意の製品に割当
	thyssenkrupp	bluemint®	鉄鉱石の一部を還元鉄に置換することでコークス使用量を減らし、削減したCO2削減量を環境価値として任意の製品に割当
	ArcelorMittal	XCarb®	バイオ炭使用、コークスガスの高炉への吹込みや転炉でのスクラップ利用拡大などにより削減したCO2排出削減量をグリーンスチール証明書として販売
	Voestalpine	greentec steel	コークスの一部を水素含有還元剤に置換により創出したCO2排出削減量をクレジット化
	TATA STEEL	Zeremis Carbon Lite	社内全体で創出されたCO2排出削減量を任意の製品に割当
	POSCO	Greenate	低炭素プロセス・技術の採用等の対策によって削減されたCO2削減量を任意の製品に割当
②脱炭素化技術によって製造された製品の製造プロセスの排出量を表示	SSAB	SSAB Fossil-free™ steel	水素還元製鉄により製造された製品について製造プロセスの排出量を表示
	POSCO	Greenate	新規に導入する電炉から製造される製品について製造プロセスの排出量を表示
③電炉で使用する電力に係る排出量を証書等により下げた製品	東京製鐵		電炉で生産された製品が持つ排出量を電力RE100対応の証書類やDR（ディマンド・レスポンス）の活用等によって削減

出所：GX 推進のためのグリーン鉄研究会　とりまとめ（経済産業省、2025）[61]

表 3-2- 2　低炭素アルミニウム（グリーンアルミニウム）ブランド／指標の例

COMPANY	BRAND/ INDICATOR	CARBON FOOTPRINT THRESHOLD	BOUNDARY
Hydro	REDUXA 4.0	4tCO_2e/t Al	Cradle-to-gate (up to and including ingot casting). Scope and methodology not fully disclosed
Rio Tinto	RenewAl	4tCO_2e/t Al	Unclear - appears to be smelter only
Alcoa	ECOLUM	2.5tCO_2e/t at smelter and 4tCO_2e/t Al cradle-to-gate	Separetely defined for both boundaries. Scope and methodology not fully disclosed
Rusal	ALLOW	4tCO_2e/t Al	Scope 1 & 2 emissions of smelter (level 1 of IAI guidelines)
Aluminium Stewardship Initiative	Performance standard	8tCO_2e/t Al (by 2030 for existing smelters)	Scope 1 & 2 emissions of smelter (level 1 of IAI guidelines)
Harbor Aluminum	US MW P1020 green aluminum spot premium	4.5tCO_2e/t Al	Scope 1 & 2 emissions of smelter (level 1 of IAI guidelines)

出所：The case for low carbon primary aluminum labelling（The Carbon Trust、2020）[62]

[61] https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/green_steel/20250123_report.html
[62] https://www.carbontrust.com/our-work-and-impact/guides-reports-and-tools/the-case-for-low-carbon-primary-aluminium-labelling

また、IEA（国際エネルギー機関）の試算[63]でも、スクラップの投入比率や再生材の市場シェアが大きく上昇するとの予測が示されており（図 3-2-5）、スクラップ量の確保に加え、これまで活用されてこなかった、不純物が多いなど質の低いスクラップ活用のニーズが高まっている。

（イ）プラスチック

プラスチックは、世界で約 4 億トン[64]、日本で約 1 千万トンが生産され、様々な製品に使用されている。国内には樹脂や製品がそれぞれ 200 万トン超輸入されている。

近年、各国の政策や社会の関心の高まりを受けて、再生プラスチックの高比率使用をうたった製品が数多く市場導入される中、前述の IEA や OECD の試算[65]において、再生プラスチックの市場シェアが大きく伸びるとの予測が示されており[66]、原料となる廃プラスチックについての質と量の両面からの取組ニーズが高まっている。（図 3-2-5）

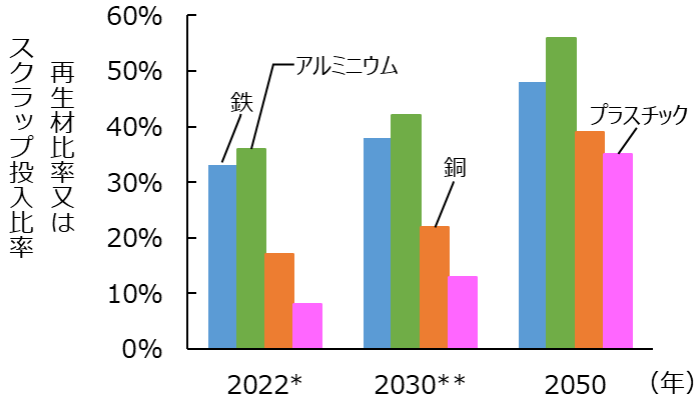


図 3-2-5　再生材比率又は製造時のスクラップ投入比率の現状と見通し

※　鉄のみスクラップ投入比率
*　銅については 2023 年
**　銅については 2035 年
出所：A Global Pathway to Keep the 1.5 ℃ Goal in Reach 2023 Update（IEA）及び Recycling of Critical Minerals（IEA、2024）を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

[63] Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 ℃ Goal in Reach 2023 Update（IEA）
https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach

[64] 2020 年時点で 4.35 億トン（OECD）
https://www.oecd.org/en/topics/plastics.html

[65] OECD Global Plastics Outlook（2022）
https://www.oecd.org/en/publications/global-plastics-outlook_aa1edf33-en/full-report.html

[66] 民間機関の試算でも、国内外で市場の大きな伸びが予測されている。なお、製造時の CO_2 排出量が少ないプラスチックとしてはバイオマスプラスチックも注目されており、素材そのものの特性や顧客の環境対応要請に応じ、素材や製品の上市が開始されている。

（ウ）資源循環関連産業の市場規模等

アクセンチュアの調査報告[67]によれば、リユース等を含むサーキュラーエコノミーモデルへの転換により、2030 年には年 4.5 兆ドル、2050 年には 25 兆ドルの経済価値が生まれるとされている。

国内の廃棄物処理・リサイクル関連産業も既に一定程度の市場規模を有していると推計されている[68]一方で、コストや品質、循環価値の可視化や評価の欠如、リサイクル企業の規模などに起因する、効率性や再生材の安定供給等に関する課題が指摘されている。

（2）技術動向

（ア）鉄

CO_2 排出量を削減するために、近年電炉による鉄スクラップを主原料とした鉄鋼生産への関心が世界的に強まるとともに、高炉と同様の幅広い種類の鋼材生産を目指し、高級鋼の製造が可能な革新的な大型電炉の導入の動きが活発化している。スクラップを精練する場合、スクラップ中の銅などの不純物を十分に除去できないことなどから、高級鋼の製造に向けて、不純物の少ないスクラップの流通量拡大のための方策の検討や、不純物元素の除去・無害化などに関する技術の開発が国内外で行われている。

（イ）アルミニウム

展伸材のうち使用済みの缶やサッシは、原料スクラップの量と質両面の使いやすさから、国内では他の製品に比べていわゆる水平リサイクルの比率が高い。一方、他製品の展伸材スクラップについては、回収物が一般的に混合スクラップとなることや合金規格が複雑であることなどの問題から、不純物元素の許容範囲が比較的広い鋳造材へとカスケードリサイクルされるのが一般的となっている。アルミ合金中に含まれる不純物を除去する技術については技術的難易度が高いとされている。

---

[67] Waste to Wealth サマリ（アクセンチュア、2015）
https://thecirculars.org/content/resources/Accenture-Waste-Wealth-Exec-Sum-FINAL.pdf
Accenture Newsroom（2015 年 9 月 28 日）
https://newsroom.accenture.com/news/2015/the-circular-economy-could-unlock-4-5-trillion-of-economic-growth-finds-new-book-by-accenture

[68] 環境産業の市場規模・雇用規模等に関する報告書（環境産業市場規模検討会、2024 年 3 月）
https://www.env.go.jp/policy/keizai_portal/B_industry/r5/r5houkokusho.pdf

（ウ）銅

スクラップのうち銅純度の高いものは電線や銅箔の製造に、真鍮や青銅といった合金のように銅の含有比率や成分が明らかなものは伸銅品の製造に使用されている。一方で、銅の含有量が不明で不純物を一定以上含む場合や、貴金属回収を主な目的とした廃基板等は銅製錬プロセスに投入され再生される。銅の循環率の向上に特化した新規技術の開発は国内ではそれほど活発でない。さらに国内循環率を高める観点から、より低品位のスクラップを利用するための技術の高度化ニーズが大きいと考えられる。

（エ）プラスチック

プラスチックは金属に比べて循環率が低く、国内外とも埋立てや焼却（エネルギー回収を含む）が主体となっており、エネルギー回収以外の手法として、工程内端材や飲料用ペットボトル等、汚れや不純物の比較的少ないごく一部のものを対象とした、主にダウングレードのマテリアルリサイクルが先行して導入されてきている。

一方、バージン材同等の原料品質が得られるケミカルリサイクル技術の開発・実証が、特に欧米において活発化しているが、国内での検討は小規模かつ、汚れや不純物の少ないものを対象としたものにとどまっている。

（オ）解体、破砕、選別

センシングなどの個別技術は概ね成熟していると考えられており、抜本的な新規要素技術開発の動きはあまり活発ではない。インプット原料に応じた個別技術の組合せや、ロボットによる自動化を追求する取組が一般的となっているが、国内循環率向上のためには精錬の原料となるスクラップ等の品質の向上が不可欠であることから、AI 技術やデータ連携技術を解体や選別の精緻化などに活用する検討が国内外で始まっている。

（3）政策動向

（ア）欧州

欧州連合では、域内産業の競争力向上の機会としてサーキュラーエコノミーへの転換が位置付けられ、『サーキュラーエコノミー行動計画』に基づく各種規制等の見直しでは、幅広い分野の製品で再生材の利用が求められ、うち自動車や容器包装で数値目標が設定されている。さらに、『持続可能な製品のためのエコデザイン規則』においても、再生材の使用、リサイクルのしやすさ、情報開示を含む様々な観点での対応が求められている。

また、『重要原材料規則』[69]においては、ボーキサイトや銅を含む重要原材料について、循環率などの数値目標が設定され、各種支援措置が講じられることとされている。

（イ）米国

米国では基本的に資源循環に関する法制度は整備されていないが、アルミニウムと銅が重要材料／重要鉱物として指定され、リサイクルの税制面支援が行われているほか、プラスチックについては、産学官協定によるリサイクル数値目標と行動計画の策定や、リサイクル技術の開発に対する政府助成が行われている。また、カリフォルニアなどの州レベルでも資源循環推進に関する政策の推進が行われている。

（ウ）日本

日本では、資源循環は長年にわたって廃棄物の適正処理の一環として位置付けられてきたが、『循環型社会形成推進基本法』の制定以降は循環の概念が上位に位置付けられ、現在の『第五次循環型社会形成推進基本計画』では、ベースメタルやプラスチックの資源循環促進策が盛り込まれている。また、GX に係る各種戦略文書においてカーボンリサイクルや資源循環関連産業が重要産業として挙げられているほか、『第 7 次エネルギー基本計画』では、カーボンニュートラル実現に向けたイノベーションの一つとして資源循環産業が挙げられている。

素材別にみると、例えば、鉄については、経済産業省の『GX 推進のためのグリーン鉄研究会 とりまとめ』（2025 年 1 月公表）[70]において、「関係事業者間の更なる連携を通じて、鉄スクラップの有効活用を促進していく」ことが今後の取組として適当とされた。また、プラスチックについては、資源循環に特化した政策文書や法律が策定され、自治体を含めた官民の取組が順次始まっている。

---

[69] https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en#actions-under-the-critical-raw-materials-act

[70] GX 推進のためのグリーン鉄研究会 とりまとめ（経済産業省製造産業局金属課、2025）https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/green_steel/20250123_report.html

3-2-3 (2)カーボンリサイクル(化学品・燃料分野)における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

IEA の見通しによると、2050 年のカーボンニュートラルを実現する NZE シナリオ(Net Zero Emissions by 2050 Scenario:ネットゼロ排出シナリオ)では、カーボンリサイクル技術により製造される燃料である合成燃料が 2035 年以降増加する見込みである(図 3-2-6)[71]。一方、石油需要は、図 3-2-7 に示すとおり STEPS(Stated Policies Scenario:公表政策シナリオ)に比べ、NZE において大幅に減少するが、石油化学分野では NZE でも大きな減少はなく、化学製品の主骨格である炭化水素への需要が継続すると考えられる。現在化学品分野における主原料は燃料製造の連産品であるナフサとなっているが、今後燃料需要の減退に伴い、炭化水素の炭素源を確保するためのカーボンリサイクルへのニーズが高まると考えられる。

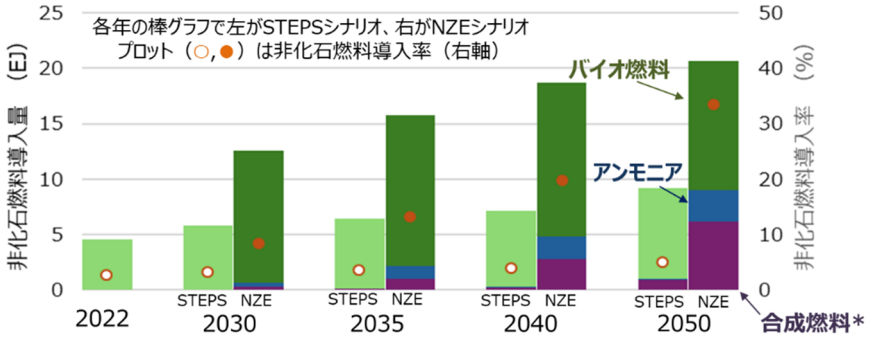


図 3-2-6 液体燃料に関する IEA の将来見通し

出所:World Energy Outlook2024(IEA)を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

[71] World Energy Outlook 2022(IEA)

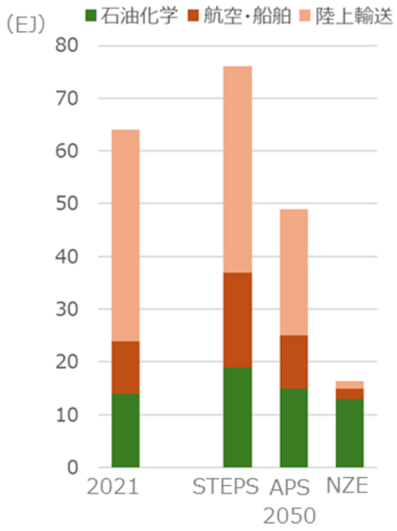


図 3-2-7　2050 年の石油の分野別需要予測

出所：World Energy Outlook2022（IEA）を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

（2）技術動向

IEA の統計を基に世界のカーボンリサイクルプロジェクトの動向を分析すると、水素を用いない CCU（CO_2 の回収・利用）ではコンクリートへの利用が、水素を用いる CCU では燃料製造に関するプロジェクトが多く、化学品製造のプロジェクトは同じく水素を用いる燃料製造プロジェクトに比べると少ない（図 3-2-8）。

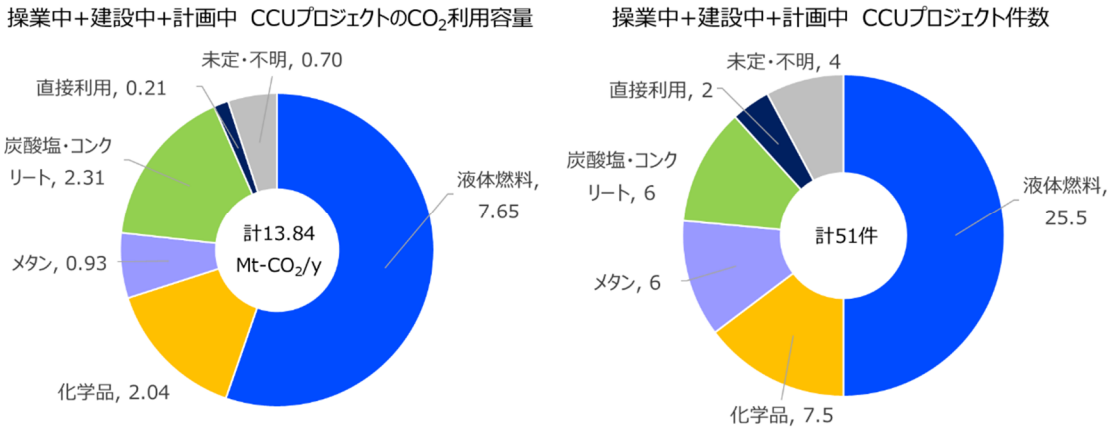


図 3-2-8　CCU プロジェクトの製品用途

※Project Type が CCU で、稼働中、建設中、計画中のものを分析。
CCU 製品の用途は NEDO イノベーション戦略センター調査によるもので、
複数の用途が想定されるものは主用途を元に分類した。

出所：IEA CCUS Projects Database 2024 を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

(3)政策動向

欧州では『Fit for 55(欧州脱炭素化政策パッケージ)』の『RED Ⅲ』[72]において輸送部門での再生可能エネルギー割合を定めると同時に合成燃料等の RFNBO(Renewable Fuels of Non-Biological Origin)[73]で賄うことが義務化され、『ReFuel EU Aviation』では SAF(持続可能な航空燃料)について、『FuelEU Maritime』では船舶燃料について、2050 年までの定量的な GHG 削減目標や合成燃料の導入目標が発表されるなど、カーボンリサイクル燃料の数値目標が設定されている。[74]

米国では『SAF Grand Challenge』において、SAF 導入に関する税制優遇策や製造量目標が発表された[75]。

日本では、経済産業省資源エネルギー庁から 2023 年 6 月に『合成燃料(e-fuel)の商用化に向けたロードマップ』[76]が策定・公表され、合成燃料の 2030 年代前半までの商用化を目指すことが示された。

航空燃料や船舶燃料は、ICAO(国際民間航空機関)[77]や IMO(国際海事機関)[78]といった国際的な民間団体が 2050 年までの GHG 削減戦略を示しており、カーボンリサイクル燃料へのニーズが高まっている。

化学品製造については政策的な数値目標の設定はなされていないが、国内では、2023 年 6 月 23 日に各府省連名でとりまとめられた『カーボンリサイクルロードマップ』[79]において、脱炭素化と産業政策やエネルギー政策を両立するための鍵となる重要なオプションの一つとして、CO_2 を有価物として捉え再利用するカーボンリサイクルの役割が示され、オレフィン類、ベンゼン、トルエン、キシレン等の基礎化学品に関する 2040 年以降の更なる製造コストの低減に向けた転換率・選択率の向上が課題として示されている。

以上のとおり、ベースメタルとプラスチックの資源循環においては、再生材の活用に向けた市場形成が活発化してきている。また、化学品の炭化水素に対する需要は将来も高いが、燃料分野での化石資源利用が減少する見通しの中で、化学品炭素源を化石資源から転換させることは喫緊の課題である。カーボンリサイクルはこの重

[72] Renewable Energy Directive 改正版
[73] https://setis.ec.europa.eu/renewable-fuels-non-biological-origin-european-union_en
[74] ReFuelEU Aviation 、FuelEU Maritime とも Fit for 55 の一環
[75] 我が国における SAF の普及促進に向けた課題・解決策(運輸総合研究所・三菱総合研究所、2022)
[76] 合成燃料(e-fuel)の導入促進に向けた官民協議会 2023 年 中間とりまとめ(資源エネルギー庁、2023 年 6 月)
[77] https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/10/a09b7eb79a104e10.html
[78] https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx
[79] https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_recycle_rm/pdf/20230623_01.pdf

要な解決手段であるが、経済合理性が不十分なため現状ではほとんど進んでいない。また、プラスチックリサイクルは、化学品分野の炭素源転換手段として重要なものとなる。

　このため、次項以降では、プラスチックリサイクルもカーボンリサイクルと共に化学品分野の転換手段と捉え、『ベースメタルの資源循環』と『化学品炭素源の化石資源からの抜本的な転換』の 2 領域に分けて、社会課題の解決のために取り組むべき領域と具体的な手段について説明する。

3-2-4 (1)社会課題の解決のために取り組むべき領域(F):ベースメタルの資源循環

3-2-3(1)までに述べたように、ベースメタルである鉄、アルミニウム、銅の資源循環は、バージン材の使用量と資源採掘やバージン材製造にかかる化石エネルギーの投入量を削減することができ、『環境制約の解消』と『資源安定確保』といった大きな社会課題の解決手段として大きく注目されている。これらの資源循環は過去より取り組まれている一方、再生できるスクラップの品位が限られ、また得られる再生材の品質が不十分である、などといった問題がある。

よって、資源循環における『廃材と再生材の利用範囲の大幅拡大(ベースメタル資源循環)』は、社会課題の解決に向けて取組を強化すべき重要な領域である(図 3-2-9)。

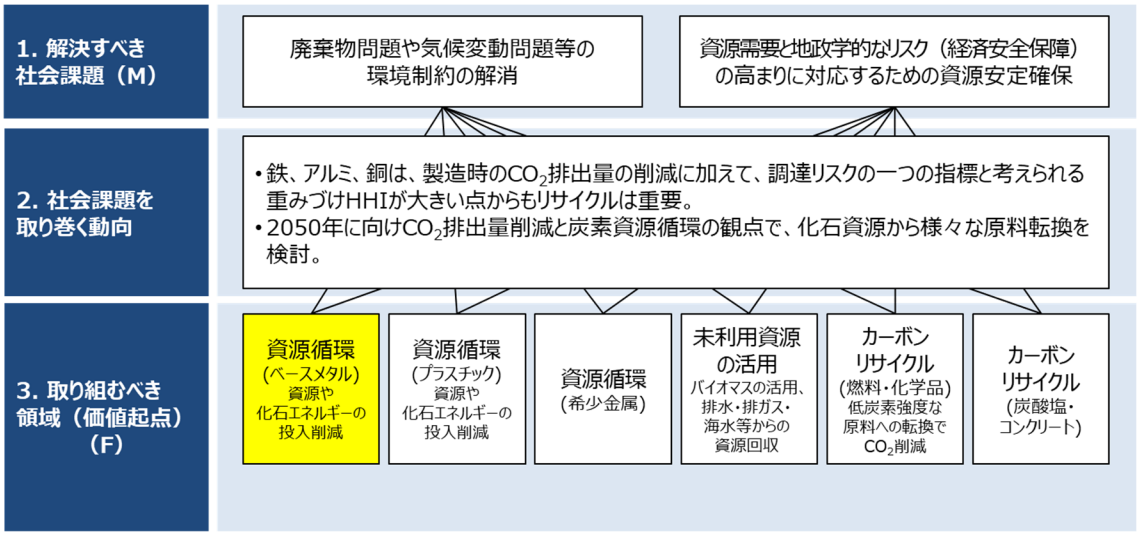


図 3-2-9　ロジックモデル(MFT)で見た社会課題とフロンティア領域案①

本領域の提案理由については以下のとおり。

①将来性(成長性・社会課題)

ベースメタルの製造業は、国内製造業の中で非常に大きな生産額を誇り、国内産業の競争力の源泉となる機能性や付加価値の高い基礎材料を提供している。さらに、2050 年カーボンニュートラルに向けた取組が内外で加速し、CO_2 排出量の低い素材として再生材のニーズがますます高まっていることを受けて、供給側としての国内産業の取組も盛んになっている。例えば、鉄鋼業界は、これまで高炉で製造されていた鋼材を電炉で製造するための技術開発をカーボンニュ

ートラル行動計画の一部に位置付けており[80]、また、アルミニウム圧延業界は、再生材の供給比率の大幅な向上への取組を公表している[81]。

②技術・アイディアの革新性

再生材の量を増やすだけでなく、リサイクル原料を品位ごとにきめ細かく利活用しアップグレーディングを図るといった、質に着目した技術は、内外含め未成熟で革新的である。また、地域の産業立地や廃棄物排出の実情、素材の特性等に合わせて、小規模拠点による分散回収、ソーティングセンター等による大規模選別、またそれらの組合せなどの資源循環のための社会システムが検討されており新たな産業の芽として期待できる。これら複数の社会システムの最適化や、それの実現に必要な技術要素を特定し開発するための取組は、現時点ではほとんど行われておらず、革新的である。

③日本の優位性

日本は国土の狭さや資源の対外依存を背景に、世界でいち早くリサイクルに取り組んできた歴史があり、分別排出のレベルが高く、廃製品の回収率が高い（表 3-2-3、表 3-2-4）。日本の強みである地域に密着した資源循環の取組を活かし、回収、選別、製造、販売などの資源循環のサプライチェーンの連携を強化することですり合わせ力を発揮できる可能性が高い。

[80] カーボンニュートラル行動計画（一般社団法人日本鉄鋼連盟）
https://www.jisf.or.jp/business/ondanka/kouken/keikaku/

[81] アルミニウム圧延業界の 2050 年カーボンニュートラルに向けたビジョン（一般社団法人日本アルミニウム協会、2022）
https://www.aluminum.or.jp/wp-content/themes/dp-colors/img/en_followup_04_2021.pdf
上記において、展伸材における再生地金使用比率を 10%から 50%に向上させるとしている。

表 3-2-3　日欧諸国における使用済み家電製品の回収率等

	市場販売量*1 (1,000 ton)	回収量 (ton)	再資源化量 (ton)	一人あたり回収量 (kg/人)	回収率 (%)	資源化率 (%)
日本（2012）	913,644	468,022	395,567	3.68	51*2	85
デンマーク（2012）	138,988	76,206	64,292	12.7	46	84
アイルランド（2011）	96,360*3	41,092	34,759	7.6	43	85
フィンランド（2010）	148,157	50,886	45,003	9.5	34	88
ラトビア（2010）	15,289	4,287	—	2.0	28	85*4
スウェーデン（2012）	220,000*5	167,000*6	140,000*7	17.5	76	84
イギリス（2012）	1,426,244	504,563	257,000*8	7.9	35	51
フランス（2012）	1,600,000	470,556	390,000	7.4	29	83

EU 諸国のデータは，European Commission-DG Environment[2]
*1：日本は，大型家電製品のみ（エアコン，テレビ，冷蔵庫・冷凍庫，洗濯機）。1 台あたりの重量を回収・再商品化された製品の平均値を用いて推計した。テレビについては，出荷をすべて平面テレビとみなし，回収・再商品化された平面テレビの平均重量を用いた
*2：メーカーの再資源化施設で受け入れたもののみを評価している。自治体処理，産廃資源化は考慮していない
*3：2010 年
*4：11 カテゴリーの WEEE 資源化率の平均
*5：文献 2）の 23 kg/人から人口 956 万人として計算した
*6：文献 2）の 17.5 kg/人から人口 956 万人として計算した
*7：文献 2）の資源化率から計算した
*8：文献 2）の回収率から計算した

出所：家電リサイクルの日欧比較- EPR の意味 -
（廃棄物資源循環学会誌 Vol. 26、No. 4、2015）[82]

表 3-2-4　使用済み PET ボトルの回収率等

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
日本	リサイクル率(%)	82.6%	86.7%	84.0%	84.9%	84.6%	85.9%	88.8%	86.0%	86.9%	85.0%
	回収率(%)	93.5%	91.1%	88.8%	92.2%	91.4%	93.1%	97.0%	94.1%	94.4%	92.5%
	販売量(千トン)	569	563	596	587	626	593	551	581	583	636
	回収量(千トン)	532	513	529	541	572	552	535	546	550	589
	再資源化量(千トン)	470	488	501	498	529	510	490	500	506	541
欧州	リサイクル率(%)	39.3%	41.2%	41.0%	41.8%	36.3%	39.6%	41.0%	42.7%		
	回収率(%)	57.2%	59.1%	59.8%	61.5%	56.1%	57.5%	55.5%	56.8%		
	販売量(千トン)	3,062	3,119	3,146	3,207	3,648	3,637	3,757	3,764		
	回収量(千トン)	1,752	1,842	1,881	1,972	2,047	2,090	2,087	2,138		
	再資源化量(千トン)	1,204	1,285	1,291	1,340	1,323	1,441	1,540	1,608		
米国	リサイクル率(%)	21.6%	21.7%	20.1%	21.1%	20.5%	19.9%	18.2%	19.6%		
	回収率(%)	31.0%	30.1%	28.4%	29.5%	29.3%	28.3%	27.1%	28.6%		
	販売量(千トン)	2,653	2,708	2,800	2,682	2,844	2,887	2,962	3,056		
	回収量(千トン)	822	815	795	792	832	818	802	875		
	再資源化量(千トン)	572	588	562	566	582	574	539	598		

出所：PET ボトルリサイクル推進協議会[83]
データ出所：（欧州）Wood Mackenzie 社（2018 年調査方法の精査修正）、（米国）NAPCOR
原注：1）リサイクル率の分母を PET ボトル販売量に統一して、PET ボトルリサイクル推進協議会で再計
2）元データの出所　米国＝NAPCOR、欧州＝PETCORE、2017 年からは、Wood Mackenzie、
日本＝PET ボトルリサイクル推進協議会

[82] https://www.jstage.jst.go.jp/article/mcwmr/26/4/26_268/_pdf
[83] 日米欧のリサイクル状況比較（PET ボトルリサイクル推進協議会、閲覧日：2025 年 2 月 14 日）
https://www.petbottle-rec.gr.jp/data/comparison.html

④民間のみで取り組む困難性

ベースメタルは合金として、製品においては他の素材と組み合わせて使用されることが多く、資源循環のサプライチェーンが長く複雑である。また、合金規格は非常に複雑であり、循環に必要な各種情報を各主体が利用しやすくする仕組みや再生材の価値をコスト面も含めて可視化し、バリューチェーン全体で共有する仕組みの整備が現時点では不十分である。

質の高い再生材の最適なサプライチェーンを迅速に構築するには、企業単独の取組や、個別連携だけでは限界があり、かつ、廃棄物処理をはじめとする各種規制や政策の影響を大きく受ける分野であるため、大学や公的研究機関、また政府や自治体を巻き込んだ取組が重要である[84]。

2023 年度から経済産業省が主導する産官学連携促進パートナーシップ『サーキュラーパートナーズ』を通じ、鉄鋼、建設をはじめとする様々な業界におけるサーキュラーエコノミー推進に向けた目標やロードマップの策定に向けた検討に対する支援が開始されている。

⑤重要経済安保技術

ベースメタル供給はサプライチェーン上流に位置する産業であり、特に銅については、3-2-3（1）に記載のとおり、既に欧州と米国において重要原材料として位置付けられ、様々な取組に対する支援が行われている。

⑥その他特筆すべき理由

現在 ISO（国際標準化機構）等において、欧州等からの提案に基づく資源循環に関する規格化の動きが活発化している。また、合金規格については、アルミニウムなど、海外業界団体の規格が事実上の国際標準となっているケースもある[85]。TC（Technical Committee：専門委員会）等への参画や海外審議団体等との連携を通じ情報収集等を強化するともに、日本主導での国際標準化を実現すべく、官民の取組を早期に強化していく必要がある。

また、特にベースメタルの資源循環においては、合金構成元素やスクラップ中に混入する目的物以外のベースメタルは不要とされ、一部を除き有効利用されないことも多いが [85]、調達リスクや生産時 CO_2 排出量が低いものばかりとは限らず、これらの元素も併せて有効利用するための方策を総合的に検討・実施していくことが必要である。

また、鉄、アルミニウム、銅はそれぞれ、用途や合金の種類、回収・利用されるスクラップの品質、再生材の製造方法等の特徴が異なる。ここでは、それぞれの金

[84] 2023 年 3 月に経済産業省が策定した『成長志向型の資源自律経済戦略』においても、「サーキュラーエコノミーへの転換には個社ごとの取組だけでは経済合理性を確保できない」「サーキュラーエコノミーでの全体最適の実現のためには、関係主体が連係し、ライフサイクル全体で取り組む必要がある。」とされている。

[85] 2024 年度実施有識者ヒアリングに基づく

属に対して、廃材と再生材の利用範囲の拡大に向けた特徴的な課題や求められる取組について述べる。

【鉄】

鉄鋼業界はカーボンニュートラルに向けた方策の一つとして、スクラップを使用した電炉の拡大による資源循環に取り組んでいる。鉄リサイクリング・リサーチの試算によると、2050 年に向けて国内の鉄鋼蓄積量からのスクラップ回収率が現状と同等に維持された場合はスクラップ供給量が増加するが、品位が比較的高い加工スクラップの比率（生産量に依存）は減少し、不純物や忌避物を多く含む低品位な市中回収スクラップの比率が相対的に増加する見込みであり、今後、高炉で製造されていた鋼材を革新的な大型電炉で生産するニーズが一層高まることから 2050 年には高品位スクラップの需要が供給を上回ることが想定されている。

この試算を前提とすれば、市中回収スクラップの品位を向上させた上で国内で最大限活用するための技術が重要になると考えられる。（図 3-2-10）

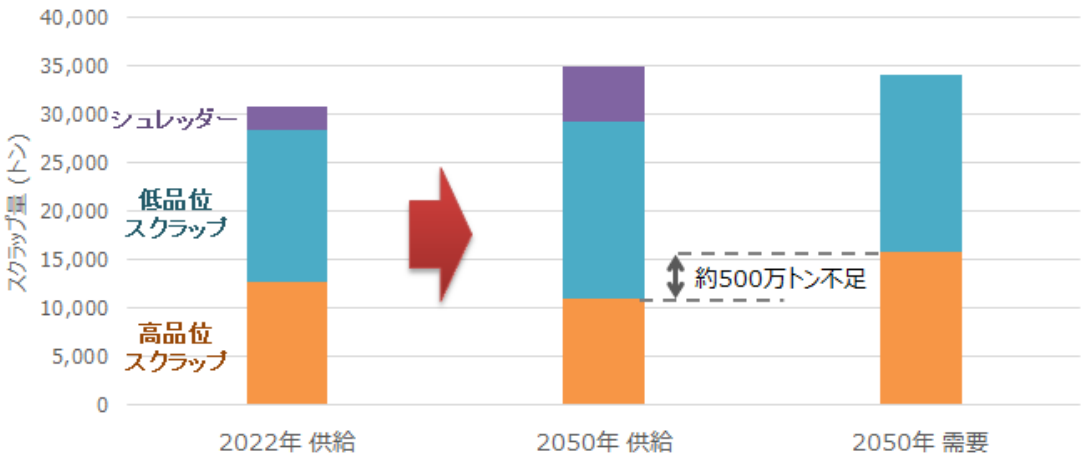


図 3-2-10　2050 年の鉄スクラップ品位別需給予測

出所：2024 年電炉鋼材フォーラム「CN に向けた電炉化の状況と鉄スクラップ需給の展望」（鉄リサイクリング・リサーチ 林誠一）を基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2025）

【アルミニウム】

3-2-3（1）に記載のとおり、現状では、ごく一部を除いて展伸材から鋳造材へのカスケードリサイクルが主流であり、国内循環の経済合理性に乏しいスクラップは輸出されて海外でリサイクルされる。

用途としては自動車向けの割合が非常に高く、スクラップ発生及び再生材需要とも、自動車の需要による影響が大きい。EV 化の進展や燃費向上のための

軽量化要求の増大に伴い、鋳造材需要の鈍化と展伸材需要の増加が見込まれ（図 3-2-11）、このため、展伸材や鋳造材の水平リサイクルの拡大に加え、鋳造材から展伸材へのアップグレードリサイクルの実現が求められている。これを効果的に行うためには、合金種ごとに廃製品やスクラップを回収・選別できるようにするなどの仕組みの構築とそれを支える技術の開発が必要となる。

なお、近年、内外の自動車関係メーカーにおいて、複数部品から構成されていた自動車構造体を一体成型で製造するギガキャスト技術の開発が開始されている。ギガキャスト向け鋳造合金の組成や需要量は今後の検討に応じ不確定要素はあるものの、今後製造される二次合金種の組成や需要比率、スクラップ需要の質が変化し、それに伴い、資源循環にも新たな技術が必要とされる可能性が考えられる。

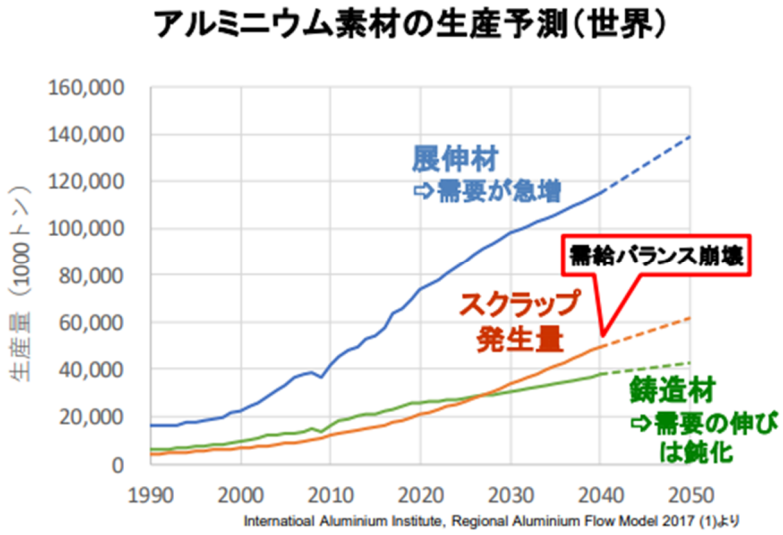


図 3-2-11　アルミニウムの材別需要見通し

出所：Regional Aluminium Flow Model 2017（International Aluminium Institute）を基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2019 年）

以上のような今後の想定変化を情報収集・考慮し、資源循環を最大化させるための絵姿を描いた上で（図 3-2-12）、排出、回収されるスクラップの質と量を考慮した資源循環の形を構成することが重要である。

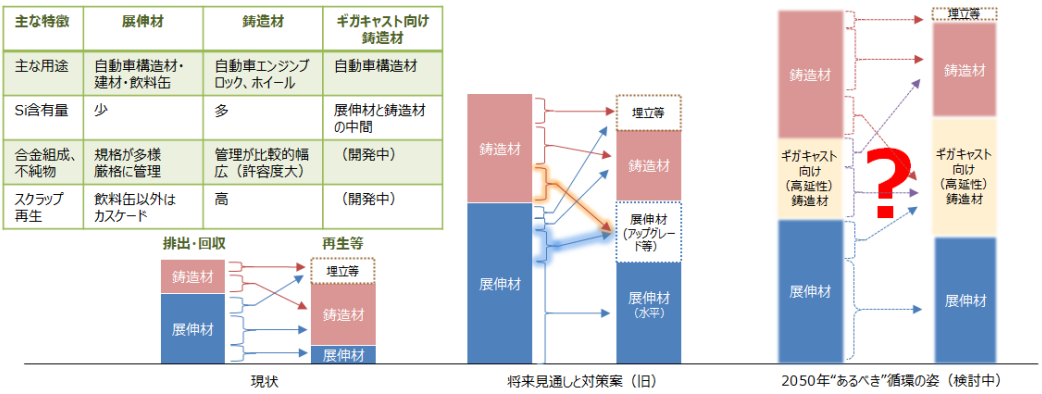


図 3-2-12　アルミニウムの 2050 年循環最大化ケース（イメージ）

（注）棒の高さはおよその相対関係を示すものであり、正確な比率を示すものではない。
出所：各種資料を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

【銅】

IEA の予測では、銅の需要は 2040 年に 3,000 万トン近くまで増加する見通しとなっているが、新規開発を含めた銅鉱山からの供給（1,600 万トン）だけでは需要を賄えないことが示唆されており[86]、スクラップの活用と併せて資源循環を最大化することが非常に重要である。

電線など純度の高い銅や工程内で発生する一部の銅合金は再溶解によるリサイクルが可能であるが、スクラップ中の合金不純物が多く高純度化が必要な場合は、製錬工程において銅精鉱が加えられ、不純物除去（有価金属がある場合は抽出）を経て再生されている。銅製錬工程へのスクラップ投入量は熱バランス等により制約があるとされるため、高品位スクラップの回収量を高め再溶解での再生を最大化しつつ、併せて製錬プロセスでのスクラップ処理能力を向上することが求められる。

[86] Critical Minerals Outlook2024（IEA）

3-2-5 （1）具体的な手段（技術開発とその他の社会実装に向けた取組）（T）

ベースメタルの資源循環を早期に最大化するためには、廃製品や構造体（以下「廃製品等」という。）の回収、解体、破砕、選別、再生（不純物除去）、加工といった各プロセスにおいて、企業・大学及び公的研究機関の知見を結集して革新的な技術と仕組みを開発し、実装することが必要である。

表 3-2-5 にベースメタルの資源循環拡大における課題とその解決に寄与すると考えられる有望技術の例をまとめた。

表 3-2-5　ベースメタル資源循環拡大における課題と解決に寄与する有望技術

	回収～解体・破砕・選別	再生	加工
課題（問題）	・求められる再生材の量や質に対し、原料スクラップ等の素材別・合金別の選別精度が十分でない。 ・人による解体や選別では、処理速度や人手の確保に限界があるとともに作業者負担が大きい。 ・解体・選別の機械化に必要な各種データが未整備。	・鋳造用合金の製造において不純物元素が蓄積する。 ・製錬プロセスによる再生ではスクラップ投入量に制限があり、エネルギー消費も大きい。	・不純物を一定量以上含む再生材の場合、加工製品の品質が低下する。 ・安全性を要求される部材の場合は要件緩和に慎重（ex.自動車構造材）
解決策（テーマ例）	**選別精度の向上による高品位スクラップ量の拡大**	**スクラップ中の不純物除去による高品質再生材の製造**	**不純物を無害化する加工技術による高品質製品の製造**
全般	・AI技術の活用による解体・選別の効率化・高度化		
鉄	・画像データのAI適用によるスクラップの等級判定・異物検出（検収）	・反応剤活用等による忌避（不純物）元素（銅、スズ等）除去	
アルミ		・固体溶融塩電解製錬などによる不純物（Si等）除去	・強化剤添加による物性低下抑制 ・ロールキャストやひずみ加工による微量不純物結晶微細化・無害化（物性低下抑制）
銅			
再生を容易にする製品設計	・易解体設計 ・モノマテリアル化		
スクラップや再生材の価値創造	・ユーザーニーズを踏まえたスクラップや再生材の等級設定と分析データに基づいた運用 ・規格によるスクラップや再生材の価値創造		

出所：ベースメタル及びプラスチックの資源循環に関する俯瞰調査（技術編）（NEDO、2024）を基にNEDO イノベーション戦略センター作成

主な技術としては、以下のようなものが考えられる。

選別：画像データの AI 活用による選別精度の向上

再生：反応剤活用による忌避（不純物）元素の除去

加工：強化剤添加による物性低下抑制

微量不純物結晶の分散化による物性低下抑制

技術開発の成果を確実に社会実装に結びつけるためには、廃棄後に解体や選別をしやすい設計とするとともに、3-2-4（1）に記載したように、廃製品等やそれに含まれる金属等の種類、解体に必要な情報、スクラップの類型や含まれる金属の種類、などといった情報を、関係者が必要に応じて利用しやすくする仕組みの構築が併せて求められる。

また、再生材の供給側と需要側、さらには製品などの最終消費者等が協力して、再生材の性質・品質と用途ごとの素材の要求水準とを突合できる仕組みを構築し、素材の要求を資源循環最大化の観点から見直したり、再生材の価値が市場において評価される仕組みを構築したりすることも必要である。

上記のような様々なステークホルダーの協働には、政府や公的機関による場の構築が、また、価値の評価に関しては、たとえば、標準化などの活動を推進していくことが有効であると考えられる。

サーキュラーエコノミー実現のために必要な学術分野は、マテリアルフロー解析やライフサイクルアセスメント、ビジネスモデル構築、行動変容なども含まれ、横断的・境界的な領域であるとの指摘もある[87]。ただし、国内では金属工学専攻の大学院生は1990 年代以降減少しており（図 3-2-13）、ベースメタル資源循環に係る技術力強化に向けては、大学の研究力を十分活用する仕組みの構築も急務である。

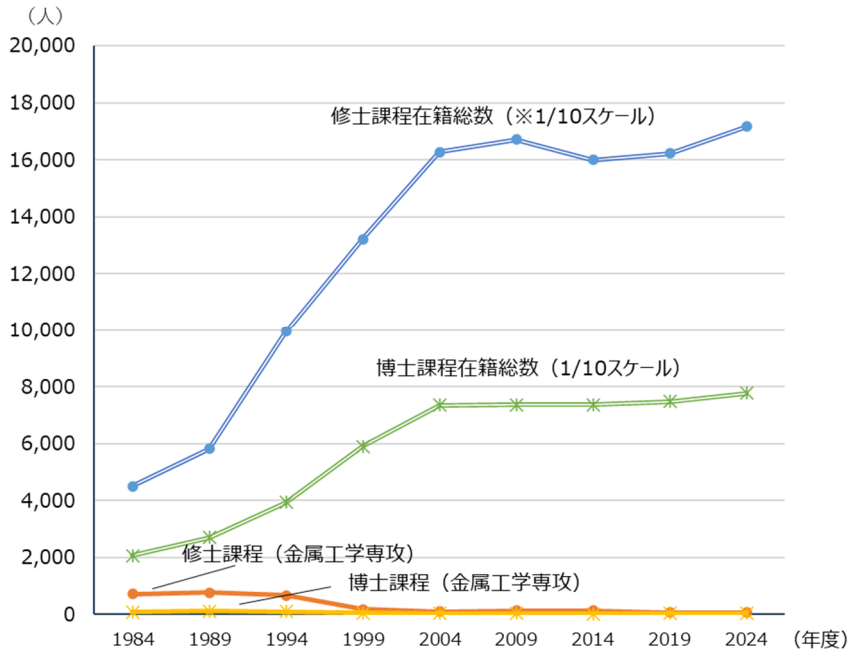


図 3-2-13　大学院生総数と金属工学専攻の大学院生数の推移

出所：文部科学省　学校基本調査[88]を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

[87] 資源循環とカーボンニュートラルの両立に向けた課題と日本が取り組むべきサーキュラーエコノミー対策（日本学術会議 材料工学委員会・環境学委員会・総合工学委員会合同 SDGs のための資源・材料の循環使用検討分科会報告、2023）
https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-25-h230915-2.pdf

[88] https://www.e-stat.go.jp/statistics/00400001

3-2-6 (1)手段を進める上での道筋

世界的なスクラップと再生材需要の急増に対応するため、既存の選別技術を AI 技術と適切に組み合わせて選別精度の大幅向上を早急に実現し、投入スクラップの質を上げ、再生材の生産力を向上させる。この際、需要側のニーズと供給側の能力の両方の実情を踏まえつつ、スクラップの品質規格の整備、製品設計の見直しや、素材メーカーやリサイクル企業といった関係者間の情報連携システムの構築[89]、さらには、再生材の価値評価の仕組みの整備を平行して早急に進める。

再生工程における忌避(不純物)元素の効率的除去や再生材加工工程における物性低下抑制技術については、現状では基礎的な研究段階のものも多く、様々な合金種に適用を可能とし受容可能なコストとするため、一定の優先順位を設定した上で、再生材の需要側での受入条件緩和の検討と併せて、中長期的に研究開発を進めていく。この際、マイナーな合金構成元素や混入ベースメタルの有効利用策についての総合的な検討も進める。

上記の取組にあたっては、国際標準化などの活動を併せて推進していく。

なお、前述のとおり、需要に見合った再生材の安定的な製造を実現するためには廃製品やスクラップ回収量をこれまで以上に増加させる必要があるが、回収量の増加には、経済合理性のみに依らない、政策的措置も含めた促進策が期待される(図 3-2-14)。

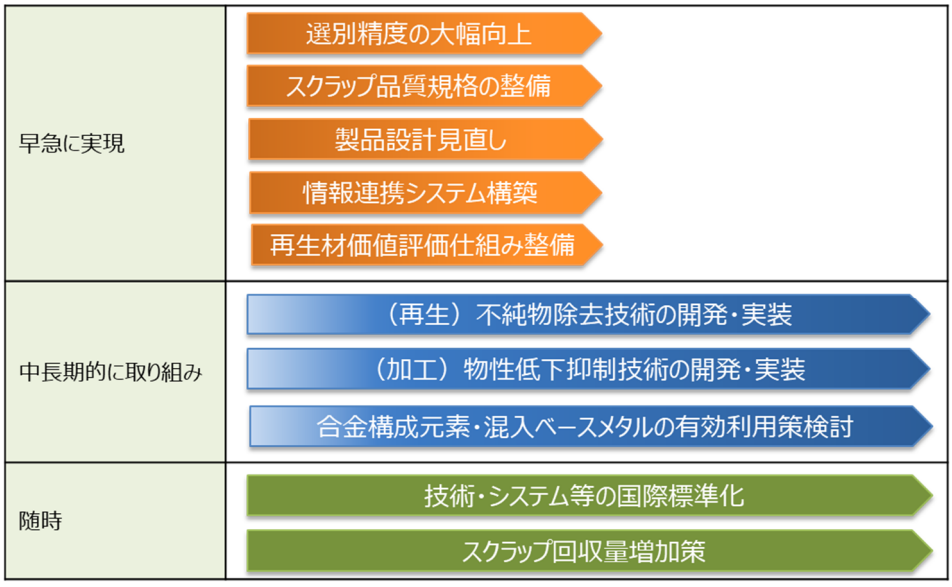


図 3-2-14　ベースメタル資源循環領域に関するロードマップ(案)

[89] サーキュラーパートナーズ(前述)の「サーキュラーエコノミー情報流通プラットフォームワーキンググループ」において、製品・素材の情報や循環実態の可視化のためのプラットフォームの立ち上げを目指した検討が行われている。

3-2-4 (2)社会課題の解決のために取り組むべき領域(F):化学品炭素源の化石資源からの抜本的な転換

3-2-3(2)で述べたように、化学品原料を化石資源から低炭素強度な非化石資源へ転換することは、CO_2 排出量の削減と化学品の炭素源の確保に貢献することから、『環境制約の解消』と『資源安定確保』といった社会課題を解決する手段として重要である。プラスチックリサイクルとカーボンリサイクルはこのための手段であるが、プラスチックリサイクルのうち廃プラスチックを化学品原料に戻す『循環型ケミカルリサイクル』[90]と CO_2 を化学品原料として活用するカーボンリサイクルは、現状ではほとんど社会実装されておらず、さらに技術開発の取組を強化すべき領域である(図 3-2-15)。

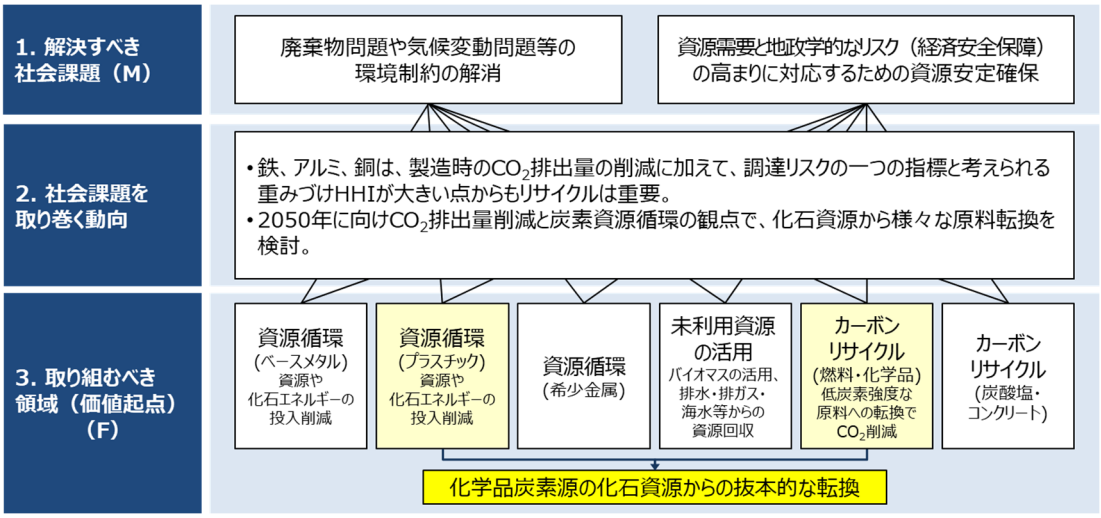


図 3-2-15　ロジックモデル(MFT)で見た社会課題とフロンティア領域案②

本領域の提案理由については以下のとおり。

①将来性(成長性・社会課題)

化学産業は国内製造業の中で非常に大きな生産額を誇り、付加価値は第 2 位の 18 兆円(2022 年)に上り、国内産業の競争力の源泉となる、機能性や付加価値の高い基礎素材を提供している[91]。将来需要は堅調であり、同じ炭化水素である液体燃料の需要が減少する見込みであることとは対照的な見通しとなっている。

---

[90] 一般社団法人日本化学工業協会が示した分類に基づき、モノマー化、ガス化、油化など廃プラスチックを化学品原料に戻すケミカルリサイクルを指す。(『廃プラスチックのケミカルリサイクルに対する化学産業のあるべき姿』、日本化学工業協会 2020 年 12 月 18 日発行)

[91] グラフでみる日本の化学工業 2024
https://www.nikkakyo.org/system/files/%E3%82%AF%E3%82%99%E3%83%A9%E3%83%95%E3%81%A6%E3%82%99%E8%A6%8B%E3%82%8B%E6%97%A5%E6%9C%AC%E3%81%AE%E5%8C%96%E5%AD%A6%E5%B7%A5%E6%A5%AD2024_A4_2.pdf

また、今後 GX（グリーントランスフォーメーション）が進む中で需要が高まる CO_2 排出量の低い素材や高機能性素材の提供を担う国内産業の基盤となる産業であり、将来にわたって国内における重要な産業である。

②技術・アイディアの革新性

IEA のネットゼロ排出シナリオでも、化学品原料の多くは化石資源が想定されており、炭素源を化石資源から抜本的に転換することはハードルが高い。

廃プラスチックリサイクルにおいては、現状では工程端材など高品位な廃プラスチックの活用やカスケードリサイクルしか行われておらず、低品位廃プラスチックの活用技術や、化学品原料を高収率で得る循環型ケミカルリサイクル技術は未成熟となっている。

カーボンリサイクルにおいては、一部に成熟技術が存在するが、成熟技術であってもコストが課題であり、プロセスの見直しを含め、収率や消費エネルギーの改善は重要である。また、コストへの影響が大きい原料（水素や CO_2）製造など、低コスト化に向けた技術革新が必要な分野である。

③日本の優位性

3-2-4（1）でも述べたとおり、日本は国土の狭さや資源の対外依存を背景に、世界でいち早くリサイクルに取り組んできた歴史があり、分別排出のレベルが高く、プラスチックを含む廃製品の回収率が高い。

また、カーボンリサイクルのコストは原料である水素と CO_2 の調達コストの影響が大きいが、CO_2 分離回収については国内に高い技術力を有している。

④民間のみで取り組む困難性

化学品は多種多様であり、また、他の素材と組み合わせて使用されることも多く、ベースメタル同様に、資源循環のサプライチェーンが長く複雑である。また、循環に必要な各種情報を各主体が利用しやすくする仕組みや再生材の価値をコスト面も含めて可視化し、バリューチェーン全体で共有する仕組みの整備が現時点では不十分である。

事業採算が規模に依存する要素が高く、事業化まで時間軸が長く巨額の研究開発投資が必要である。

なお、カーボンリサイクルやプラスチックリサイクルの環境価値に関する基準作りでは、国際的な協調も必要である。

⑤重要経済安保技術

基礎化学品はサプライチェーン上流に位置する産業であり、下流には高機能製品や経済安全保障上重要な半導体等の産業などにもつながっている。プラスチックリサイクル・カーボンリサイクル技術は経済安全保障上重要である。

中国では石炭由来のメタノール経由の化学品製造技術が既に社会実装されており、CO_2 をメタノール原料とするサプライチェーンが構築されると、いわゆる『グリーンケミカル市場』において脅威となる可能性がある。

⑥その他特筆すべき理由

原料としての水素の製造適地は海外に多く、調達のために実装可能な技術を早期に確立する必要がある。

燃料・化学品分野の炭素源を化石資源から転換するための技術体系を図 3-2-16 に示す。

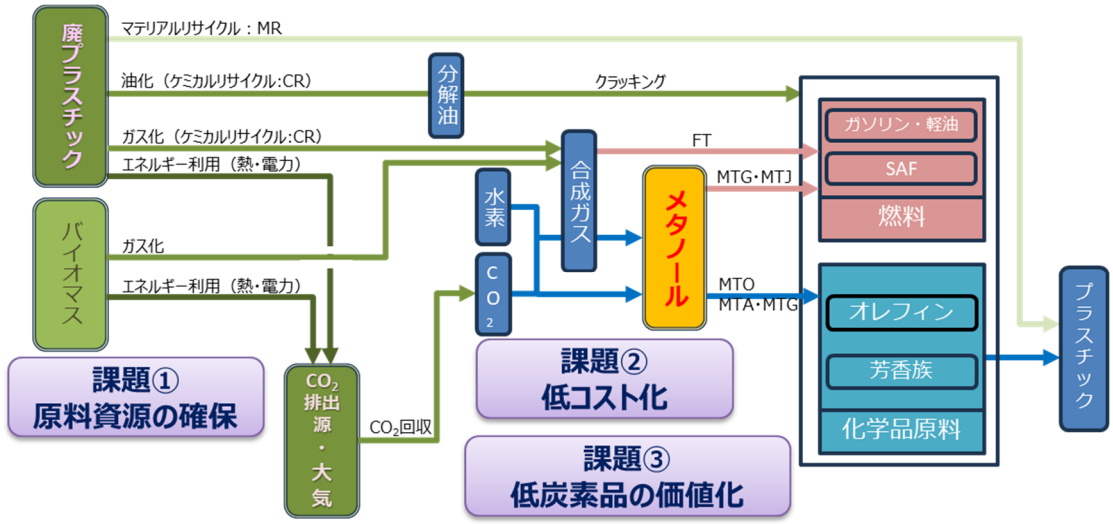


図 3-2-16　燃料・化学品分野の炭素源の化石資源転換に係る技術体系

非化石炭素源としてバイオマスや廃プラスチックは有用な資源である。バイオマス利用のルートは図 3-2-16 に示したルートの他に、油脂や発酵エタノールを用いて燃料や化学品を製造するルートもあり、既に航空燃料や自動車燃料を中心に利用されている。IEA の試算によれば、2050 年における SAF 供給源はバイオマスだけでは不足する見込みであり、化学品原料をバイオマスですべて賄うことは難しいと考えられる[92]。

廃プラスチックは国内で資源循環できる貴重な炭素資源であり、できる限り有効に活用すべきであるが、3-2-4(1)に記したとおり、現状ではその活用量は限定的であ

[92] 2050 年における化学産業の原料化石資源利用量は 20EJ 以上が見込まれており、SAF のバイオマス由来の約 5EJ はその 1/4 に過ぎない。
Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach – 2023 Update（IEA）
https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach

る。今後、マテリアルリサイクルの拡大に加えて循環型ケミカルリサイクルの技術が確立できれば、その利用を増やせる余地があると考えられる。一方、基礎化学品原料はすべてプラスチックとして利用されているわけではなく、廃プラスチックも化学品原料の原料転換に十分な供給が見込めるとは考えにくい。

廃プラスチックやバイオマスへの原料転換で賄えない化学品炭素資源としては、CO_2 を原料としたカーボンリサイクル技術による転換、特にメタノールを経由する転換が重要となる[93]。MTO（Methanol to Olefin）や MTA（Methanol to Aromatics）の技術を用いるとほとんどの化学品を製造でき、メタノールは石油ナフサに代わる基礎化学品原料として期待できる[94]。

[93] 化学産業の低炭素化に向けたメタノールケミストリーに係る調査（NEDO、2022）
[94] 化学産業低炭素化に向けたメタノールケミストリー推進に関するバイオマス活用に係る調査（NEDO、2022）

3-2-5 (2)具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T)

3-2-4(2)にて、取り組むべき領域として、化学品炭素源の化石資源からの抜本的な転換領域について、資源循環の観点からプラスチックリサイクルとカーボンリサイクルが重要であることを述べてきた。ここではこの領域における具体的な手段を示す。

まずプラスチックリサイクルについて、図 3-2-17 に現状と 2050 年の循環最大ケース(あるべき循環の姿)における循環のイメージを示す。

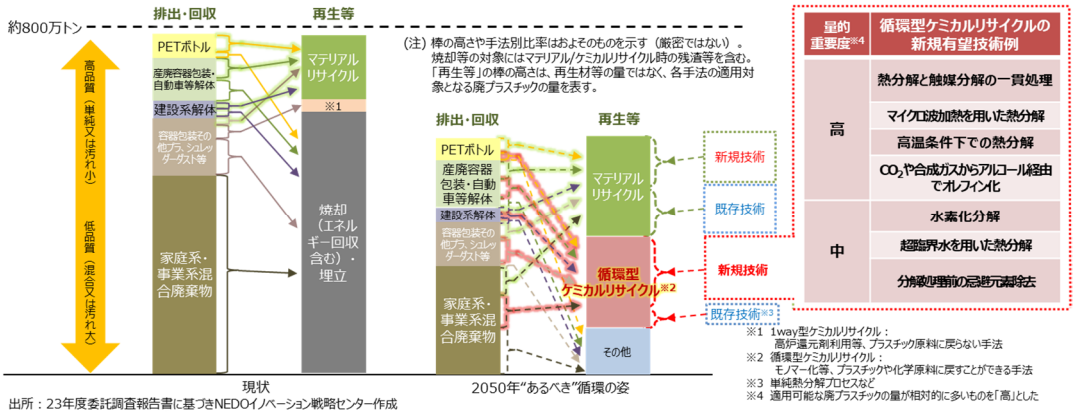


図 3-2-17　現状と 2050 年の循環最大ケースにおけるプラスチック循環のイメージ

2050 年におけるプラスチックの循環率を向上させるためには、マテリアルリサイクルによる循環量を現状よりも増やすと同時に、現状はほとんど行われていない循環型ケミカルリサイクルの量を大幅に増やす必要がある。また、品位が低い、すなわち、他の樹脂種、汚れや忌避物質を多く含み、マテリアルリサイクルや循環型ケミカルリサイクルに適さない廃プラスチックについては、焼却による処理も有効利用の一手段ではあるが、この際エネルギーと CO_2 を可能な限り回収・利用し、単純焼却を限りなくゼロに近づける必要がある。

特に、循環型ケミカルリサイクル技術については、廃製品を解体・破砕・選別した後の廃プラスチックの品位を判定する基準の定量化や、低品位の廃プラスチックを適応可能な再生技術に関する検討は未着手であり、循環型ケミカルリサイクル技術の早期の社会実装のためには、早急に検討に着手する必要がある。

解体・破砕・選別の個別技術はおおよそ成熟しているとされ、要素技術の組合せにより、再生技術において必要とされる廃プラスチックの品質を、経済合理性をもって提供できるかが重要となる。また、リサイクルを容易にする製品設計も重要である。

プラスチックリサイクルにおいて、今後の技術開発が必要と考えられる取組を以下に示す。

（ア）再生技術

今後の取組が必要と考えられる技術として、循環型ケミカルリサイクルに関する有望技術の例を表 3-2-6 に整理した。2030 年頃までに技術確立が可能なものとしては熱分解と触媒分解との一貫処理や高温条件下での熱分解が、2030 年以降の技術確立を目指す有望技術としては CO_2 や合成ガスからアルコール経由でオレフィン化する技術や水素分解などが有望であると考えられる。

表 3-2-6　循環型ケミカルリサイクルの有望技術の例

量的重要度	有望技術	現状のTRL	技術の特徴等
高	熱分解と触媒分解の一貫処理	3~5	**熱分解油を触媒分解してオレフィンを高収率で得る。**収率（選択性）や触媒寿命が課題。
	マイクロ波加熱を用いた熱分解	3~5	**加熱効率**が高く、**グリーン電力を利用**すればCO_2排出量が少ない。スケールアップやプロセスの連続化に課題。
	高温条件下での熱分解	5	**ガス化温度を低温化し、オレフィンなどの化学品や軽質油の生成選択率を高める。原料の制約は少ない。**オレフィンや軽質油の収率向上や、後工程での精製・改質の検証が課題。
	CO_2や合成ガスからアルコール経由でオレフィン化	4～5	**原料制約が少ない**が、プラスチックとして再生するまで多段階であり高コスト。また、アルコール化には再エネ水素が、ガス化には高温加熱が必要。
中	水素化分解	3	**反応温度が低く、発熱反応**なので、エネルギー消費量が少ない。**廃プラスチック中の忌避元素を水素化精製できる可能性あり。**また、触媒のコストや活性及び寿命は改善の必要あり。
	超臨界水を用いた熱分解	7~8	**原料の制約が比較的少ない。また、均一加熱が可能で過分解を抑えることで分解効率が高い。**高圧系のため、原料供給や残渣の抜取プロセスに工夫が必要。
	分解処理前の忌避元素除去	要調査	硫黄/窒素/酸素/塩素を含む廃プラスチックを熱分解等に適用可能にする。

出所：循環型経済・脱炭素社会実現に資するリサイクル技術・社会動向関連調査（NEDO、2023）を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

（イ）リサイクルを容易にする製品設計

複数の樹脂種や素材から構成される製品について、単一樹脂種への転換（モノマテリアル化）とは別の手法として、易解体性接着が着目される。当該技術は、光や熱、超音波、電気、薬剤などをトリガーとして接着・接合を解体し、他の樹脂種や金属などといった異素材を分離できるようにするものであり、リサイクルプラントへの投入原料の品質向上を通じた、再生材や化学品の質の向上が期待される。

CO_2 を原料としたカーボンリサイクル技術による転換、特にメタノールを経由する原料転換が重要であることを 3-2-2 で述べたが、社会実装のためには、低コスト化による経済合理性の獲得が重要である。そのためには成熟度の高い技術でもスケールアップやプロセス改良によるコストダウンが必要であり、加えてコスト影響の大きい原料 CO_2 供給やまだ TRL（技術成熟度）の低い技術について革新技術を開発することが重要である（図 3-2-18）。

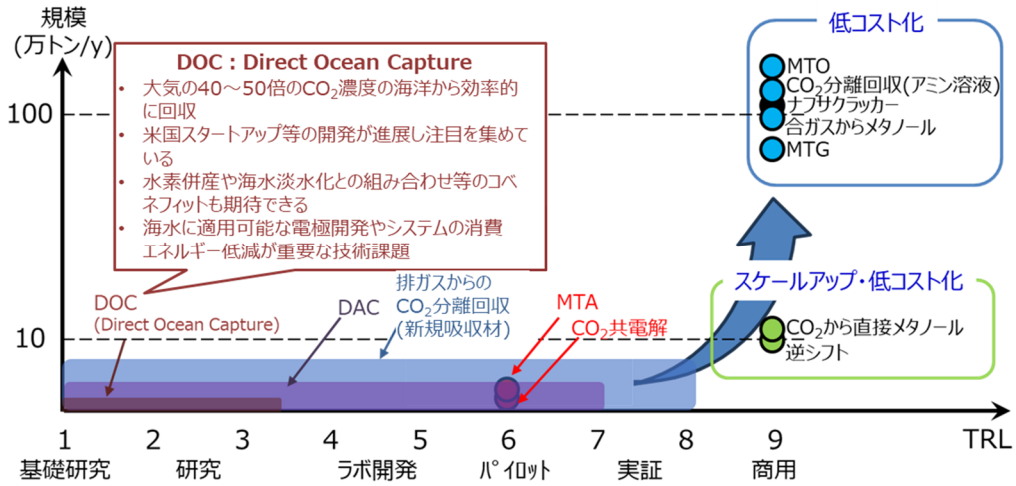


図 3-2-18　カーボンリサイクル（化学品分野）の研究開発テーマ例

（ア）原料 CO_2 供給

原料 CO_2 については、当面は発電所や工場等の排ガスから回収した CO_2、特にバイオマス起源の CO_2 の有効活用が、CO_2 排出量削減と経済性のバランスから有効と考えられる。カーボンリサイクル技術において、原料 CO_2 のコストは原料水素に次いで大きなウエイトを占めており[95]、CO_2 分離回収コストの画期的な低減は重要である。将来は大気からの原料 CO_2 利用も重要になると考えられるが、大気中の CO_2 を直接回収する DAC（Direct Air Capture）は、CO_2 濃度が低いため高コストである[96]。将来に向けて、これらの技術の CO_2 回収コストを画期的に低減できる技術開発も重要である。

海水から直接 CO_2 を回収して大気と海洋の循環を利用して大気中の CO_2 を低減する DOC（Direct Ocean Capture）技術も最近注目を集めている[97]。DOC は海水から電解技術などを用いて pH を調節することで CO_2 を海水から回収するもの

[95] 化学産業の低炭素化に向けたメタノールケミストリーに係る調査（NEDO、2022）
[96] https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/levelised-cost-of-co2-capture-by-sector-and-initial-co2-concentration-2019
[97] https://capturacorp.com/wp-content/uploads/2023/10/Captura-Carbon-Dioxide-Removal-Pathway.pdf

で、海水に適用できる電極開発や CO_2 回収システムのエネルギー消費削減などの技術課題があるが、水素の併産や海水淡水化との組合せなど、コベネフィットも期待できる。日本は海洋に囲まれており、この海洋資源を活用して低コストでの CO_2 回収が可能となれば画期的である。

（イ）技術成熟度（TRL）の低い技術

CO_2 利用や化学品製造のプロセスでは、成熟技術のスケールアップやプロセス改良に加え、CO_2 変換技術やメタノール変換技術で未成熟なものの開発や、革新技術による更なるコストダウンが重要である。現在 TRL が低い技術の中で成熟技術を上回るポテンシャルをもつ技術の開発を推進することで、社会実装に向けた低コストなプロセスの確立が期待される。メタノールの原料となる合成ガスの一成分である CO は逆シフト反応で製造できるが、高温かつ水素が必要となるため、低コスト化に向けた課題の一つである。CO_2 共電解は水の電解と CO_2 の還元を同時に行うもので、合成ガスへの展開を一段で行うことで効率化できる可能性がある。現在は小規模なパイロット研究が行われているが、更なる高効率に向け、電極触媒の開発や電解装置のスケールアップが必要である。

メタノールからエチレンやプロピレン等のオレフィンを製造する MTO 技術は成熟しているが、ベンゼンやトルエン等の芳香族を製造する MTA 技術については技術成熟度が低い。全ての化学品について化石資源からの原料転換を達成するためには、これらの芳香族の製造技術の確立が重要である。

中国では MTA 技術が年 3 万トン規模（芳香族生産量ベース）で商用化されているとの情報はあるが[98]、その実態はあまり開示されておらず、国内企業への技術供与も受けられない可能性が高い。中国以外の国では研究開発がほとんど行われておらず、年数十万トン規模で社会実装可能な技術は未確立である。

日本の MTA 技術開発については、PET の原料となるパラキシレンを製造する技術について NEDO プロジェクトで開発が行われているが[99]、ベンゼン、トルエンを含む芳香族全体の製造技術の開発も重要である。

[98] 2022 年度 NEDO イノベーション戦略センター調査「化学産業の低炭素化に向けたメタノールケミストリーに係る調査」

[99] https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101331.html
https://osakikamijima-carbon-recycling.nedo.go.jp/research-theme/

3-2-6 (2)手段を進める上での道筋

前述したとおり、化学品炭素源を化石資源から抜本的に転換するためには、バイオマス、廃プラスチック利用の最大化と、カーボンリサイクル製品の活用が重要である。

バイオマス活用に関しては、国内資源を最大限活用できるようバイオマスの増産、利用技術向上に取り組むとともに(3-6 バイオエコノミー参照)、未利用資源の活用に早急に着手し、迅速に進めていく必要がある。

廃プラスチック利用については、循環型ケミカルリサイクル技術の社会実装が鍵を握るため、廃プラスチックの品位データの定量化など基盤データを整備しつつ、様々な品位に対応できる循環型ケミカルリサイクル技術に取り組み、2030 年以降に順次社会実装を目指す(図 3-2-19)。

しかし、これらの原料では基礎化学品原料の化石資源の全てを転換できないため、不足分は CO_2 と再エネ由来水素を原料としたグリーンメタノールを基幹物質としたメタノール経由の技術により製造することが必須となる。低炭素原料への転換は化石資源に比較して高コストとなるため、技術開発による低コスト化の検討に加え、低炭素品の価値を明確にする評価法や市場の確立についても併せて取り組んでいく。

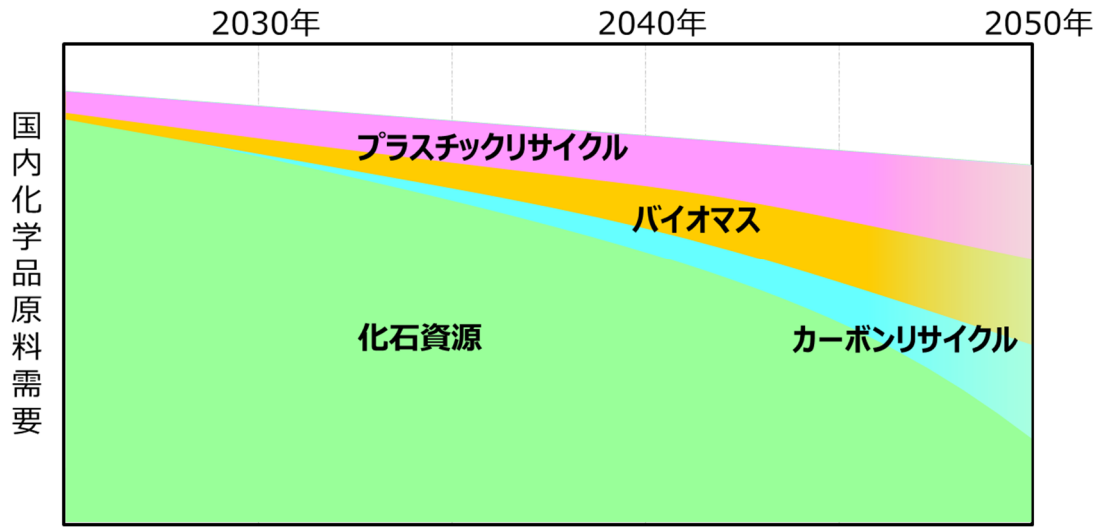


図 3-2-19　化学品炭素源の抜本的転換領域のロードマップ(イメージ)

3-3 アグリ・フードテック分野

3-3-1 分野の俯瞰

(1)現状

世界の食料事情に目を向けると、世界の食料需要量は、人口の増加(2050 年に 97 億人)を受けて 2010 年比で 1.7 倍に増加すると推計されている(図 3-3-1)。また、発展途上国の経済発展や所得向上により畜産物の需要量は 1.8 倍に増加する見込みである(図 3-3-2)。このように世界の食料市場は拡大を続けており、食品産業は成長産業ということができる。一方で、飢餓人口の増加や、タンパク質の供給が需要を満たせなくなるプロテインクライシスも懸念されており、先進国は自国の食料供給力を高めるとともに、輸出増加にも努めるなど、世界の食料需要量の増加への対応が求められている。

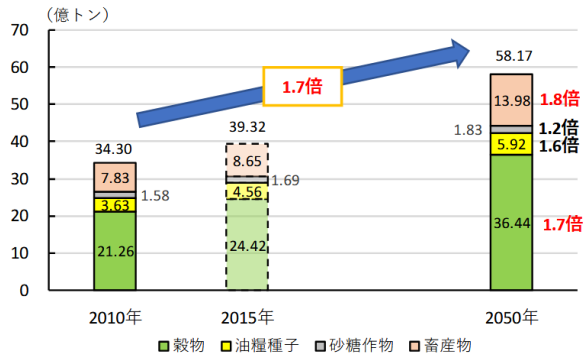


図 3-3-1 世界全体の品目別食料需要量の見通し

出所:2050 年における世界の食料需給見通し(農林水産省、2019)[100]

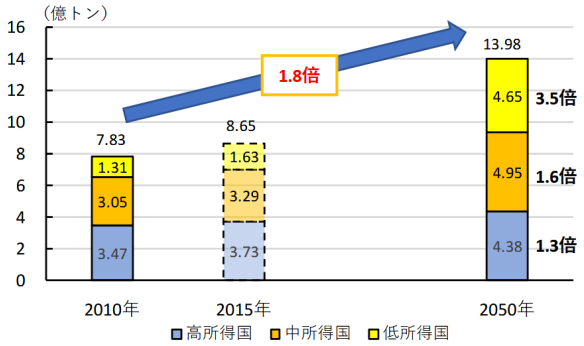


図 3-3-2 所得階層別の畜産物の需要量の見通し

出所:2050 年における世界の食料需給見通し(農林水産省、2019)

[100] 2050年における世界の食料需給見通し(農林水産省、2019)
https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/14120909/www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_zyukyu_mitosi/attach/pdf/index-12.pdf

また、農林水産業を取り巻く外部要因として、気候変動は災害の激甚化や砂漠化のリスクを高めることが言われており、人為的要因も相まって土地の劣化をもたらしている。温暖化の影響は農作物に高温障害となって現れ品質や収量の低下にもつながっている[101]。

国際情勢の外部要因も農林水産業に大きく影響する。ロシアによるウクライナ侵攻により、主要穀物やエネルギー価格が高止まりしている[102]。肥料等の農業生産資材の高騰は農業経営の悪化につながり、各国の食料安全保障を脅かす事態となっている。各国はこのような海外紛争等の不測の事態への備えも求められている。

次に日本の農林水産業・食品産業の状況を詳細に見ていく。

日本の農林水産業を取り巻く環境は日々厳しさを増している。日本では人口の減少・高齢化が進展し、農山漁村は特に人口の減少が著しい。農業生産を支える基幹的農業従事者は今後 20 年間で 4 分の 1 にまで減少すると推計されており（図 3-3-3、図 3-3-4）、農業生産の基盤が脅かされている。後継者不足に起因する耕作放棄地も増加している[103]。

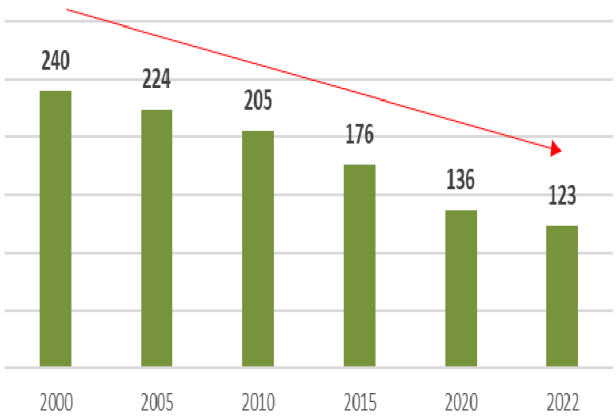


図 3-3-3　基幹的農業従事者数の推移

出所：食料・農業・農村基本法 改正のポイント（農林水産省、2025）[104]

[101] 令和 5 年 地球温暖化影響調査レポート（農林水産省、2024）
https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/attach/pdf/index-154.pdf
[102] 世界の食料需給の動向（農林水産政策研究所、2024）
https://www.maff.go.jp/primaff/seika/attach/pdf/240329_2033_01.pdf
[103] 農業・農村をめぐる情勢について（農林水産省、2025）
https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/nousin/bukai/R0702_chiho/chushi/attach/pdf/siryou-5.pdf
[104] 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

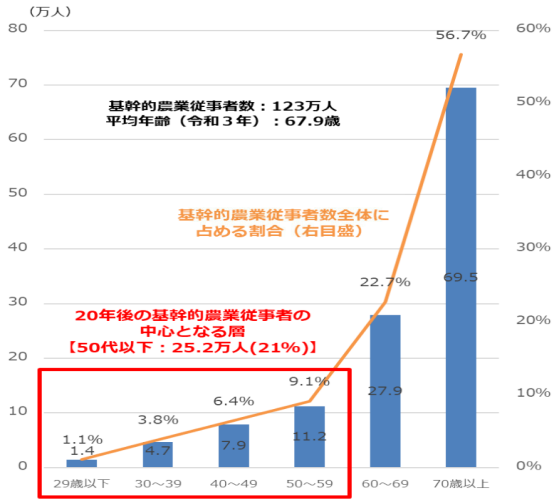


図 3-3-4　基幹的農業従事者の年齢構成（2022 年）

出所：食料・農業・農村基本法 改正のポイント（農林水産省、2025）[104]

農林水産業は地方の主要な産業となっている。農山漁村における人口減少は地域コミュニティの維持にも支障を及ぼしつつあり、人と野生動物の活動の境界となる里山の不十分な管理は鳥獣被害の拡大にもつながっている[105]。

経営に目を向けると、日本の農業経営体は世帯で事業を営む個人経営体が圧倒的に多い（個人経営体 97%、団体経営体 3%）（図 3-3-5）。法人化への移行は増えているが、新技術を導入するための資金力に乏しく、他業種と比較して DX（デジタルトランスフォーメーション）が遅れている。食品産業も中小企業が多く、同様に DX が遅れている傾向にある[106]。日本産農林水産物・食品の輸出のうち、約 4 割が加工食品であり、輸出拡大のためには食品産業の体制強化も求められている[107]。

[105] 生物多様性国家戦略 2023-2030（環境省、2023）
https://www.env.go.jp/content/000124381.pdf
[106] 農業のデジタルトランスフォーメーション（DX）について（農林水産省、2023）
https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12125273/www.maff.go.jp/j/kanbo/dx/attach/pdf/index-11.pdf
[107] 農林水産物・食品の輸出実績　令和 6 年確々報値（農林水産省、2024）
https://www.maff.go.jp/j/shokusan/export/e_info/zisseki.html

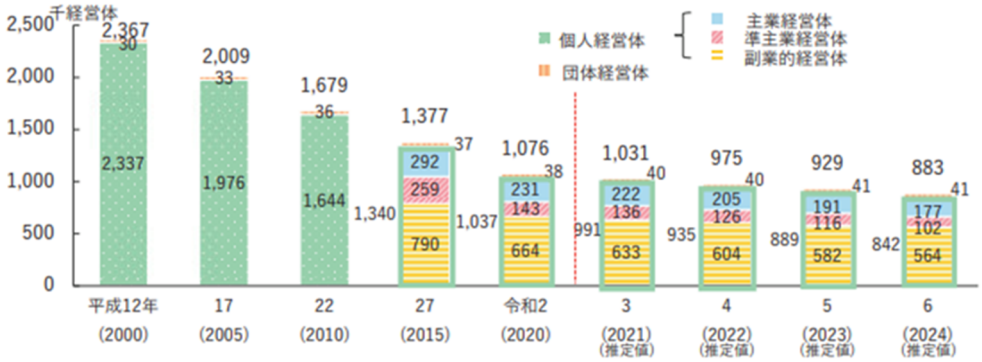


図 3-3-5　農業経営体数

出所：令和 6 年度食料・農業・農村白書（農林水産省、2025）[108]

また、気候変動の影響は、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。

農林水産業は GHG（温室効果ガス）吸収源としての機能はあるが、施設園芸や漁船は大量の重油を消費し GHG 排出源となっている（図 3-3-6）。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。

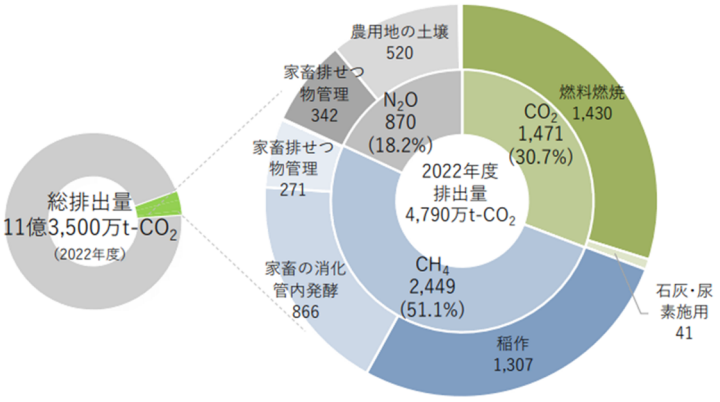


図 3-3-6　日本の農林水産分野の GHG 排出量

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）[109]

[108] 令和 6 年度食料・農業・農村白書（農林水産省、2025）
https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/r6/pdf/1-2-03.pdf

[109] 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/kankyo/seisaku/attach/pdf/index-87.pdf

日本は畜産物をはじめとする食料の多くを海外に依存しているだけでなく（食料自給率 38%（2023 年度）、食料自給率の推移（図 3-3-7））、肥料や飼料等の農業生産資材や天然ガス等のエネルギー資源も海外に依存している状況にある[110,111]。上述した国際情勢の外部要因の影響を受けやすいため、農業生産資材も含め国内供給力を高めていく必要がある。



図 3-3-7　食料自給率の推移

出所：日本の食料自給率（農林水産省、2023）[112]

なお、日本産食品は国内消費者のニーズに対応して品質が高いことがよく言われている。海外においても品質・おいしさが高く評価されている。和食文化の浸透・拡大により、更なる輸出の拡大が期待され、食品産業の海外展開（現地生産）の後押しにもつながる[113,114]。また、日本だけでなく世界各国も高齢化が進展し、健康志向が高まることが想像される[115]。消費者の健康志向を踏まえた日本産食品は高齢化する世界において注目される可能性がある。

[110] 肥料をめぐる情勢（農林水産省、2025）https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s_hiryo/
[111] 飼料をめぐる情勢（農林水産省、2025）https://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/lin/l_siryo/
[112] 日本の食料自給率（農林水産省、2023）
[113] インバウンド消費動向調査（国土交通省、2025）
https://www.mlit.go.jp/kankocho/tokei_hakusyo/gaikokujinshohidoko.html
[114] 食品産業をめぐる情勢（農林水産省、2023）
https://www.maff.go.jp/j/shokusan/kikaku/jizoku/attach/pdf/index-13.pdf
[115] 令和 6 年版高齢社会白書（内閣府、2024）
https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2024/zenbun/06pdf_index.html

(2)活動俯瞰図

現状を基に、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』[116]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活動俯瞰図として示した(図 3-3-8)。この中には、過年度に取りまとめた TSC Foresight や TSC 調査分析レポート、調査の対象も含まれている。

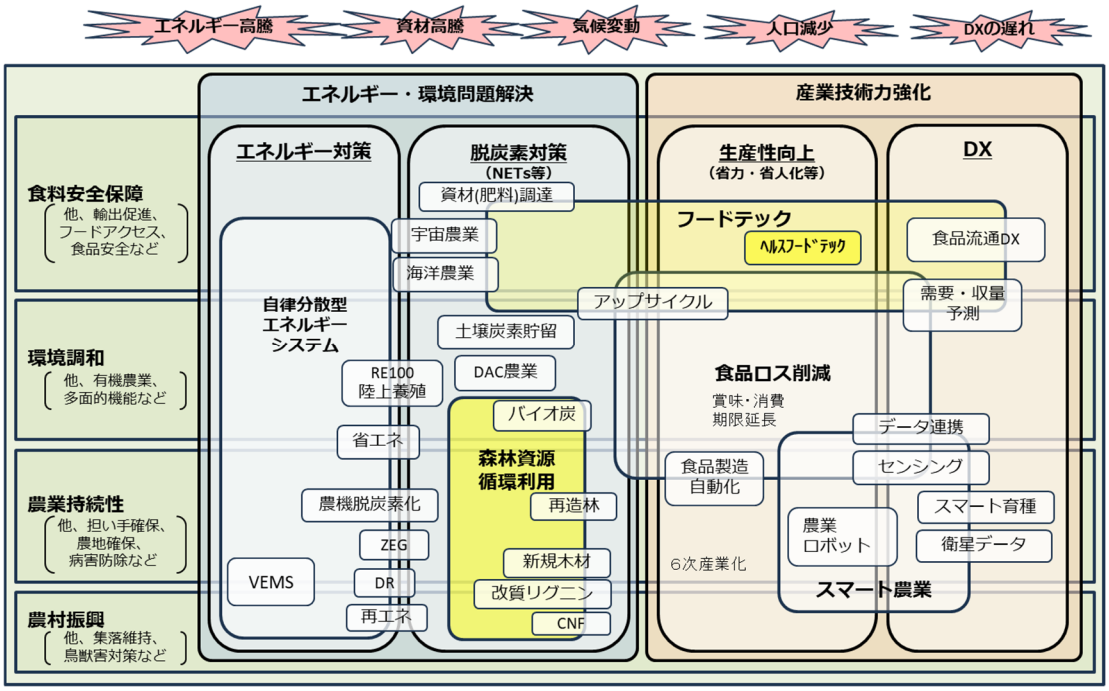


図 3-3-8　活動俯瞰図

[116] 食料・農業・農村基本法(農林水産省、2024)https://www.maff.go.jp/j/basiclaw/index.html

3-3-2 解決すべき社会課題(M)

3-3-1 の(1)現状で述べたように、農林水産業及び食品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ネス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、前述した安定的、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。

なお、食料安全保障の議論として、国際的には質の確保(健康的な食事)も課題となっている。食料の供給にあたって、量だけでなく質にも配慮することは日本産食品の強みであり、付加価値となる。消費者ニーズに対応した高品質(栄養価が高いなど)な食料の供給と食生活の改善により健康的な食事につながり、健康寿命の延伸に貢献できる。

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

食料の需要に関して、世界の食料需要量は人口増加を受けて 2050 年に 58 億トン(2010 年比 1.7 倍)に増加する見通しである[100]。この需要増加に対応するため、各国は国内生産の拡大に取り組んでいるが、農用地面積が頭打ちにあるため、単位面積当たりの収量(単収)の増加に努めており、単収の増加につながる肥料と農薬の世界市場規模は 2030 年にそれぞれ 5,400 億ドル、1,400 億ドルに拡大する見込みである[117,118]。

また、欧米ではデータを活用した精密農業の取組が拡大しており、農業機械の自動化までを含むスマート農業の世界市場規模は、2023 年の 173 億ドルから 2032 年までに 357 億ドルに達すると見込まれている[119]。国内におけるスマート農業の市場規模は 2024 年度では 331 億円、2030 年度には 788 億円まで拡大すると予測されている[120]。

また、環境負荷低減として農薬や化学肥料を使用しないオーガニック食品の世界市場規模は 2032 年に 5,300 億ドル(2024 年 2,000 億ドル)に増加すると見込まれている[121]。

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[122]。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[123]。

タンパク質の生産において従来の畜産業より GHG 排出が少ない代替タンパクや健康志向を受けた機能性表示食品など多様な食の需要に対応した新たな食ビジネス

---

117 肥料:市場シェア分析、産業動向・統計、成長予測(2025 年～2030 年)(Global Information、2025)

118 農薬市場:タイプ別、用途別-2025 年～2030 年の世界予測(Global Information、2024) https://www.gii.co.jp/report/ires1595288-pesticides-market-by-type-bactericides-fungicides.html

119 スマート農業市場レポート:農業タイプ、提供、農場規模、地域別、2024 年～2032 年(Global Information、2024)https://www.gii.co.jp/report/imarc1521285-smart-agriculture-market-report-by-agriculture.html

120 スマート農業に関する調査を実施(2024 年)(㈱矢野経済研究所、2025) https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/3740

121 オーガニック食品市場規模(FORTUNE BUINESS INSIGHTS、2025) 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

122 グリーンイノベーション基金事業「食料・農林水産業の CO_2 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

123 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、2024) https://www.reportocean.co.jp/industry-reports/biochar-market

（フードテック）の世界市場規模は 2050 年に 280 兆円に拡大する見通しである（うち、代替タンパク関係が約 60%、ヘルスフードテック関係が約 20%を占める。）[124]。国内ではフードテック官民協議会の活動が拡大しており（参加会員人数約 1,550 人、令和 7 年 4 月）、フードテックによる新開発食品は輸出拡大も期待される（『農林水産物・食品の輸出拡大実行戦略』：2030 年度政府目標 5 兆円）[125]。

健康の視点では高齢化の進展は無視できない状況にある。高齢者の比率は日本では 28%に達し、アメリカでは 18%、近年急激に高齢化が進行する韓国でも 19%となっている [115]。高齢化が進行する中、日本のセルフケア産業（公的保険外）の市場規模は 2050 年に 77 兆円に達すると見込まれ、うち食関連は 8.7 兆円の規模と見込まれている[126]。日本では食に対する健康志向が高く、日本政策金融公庫の調査では 40%を超えるとの報告がある[127]。

（2）技術動向

上記の市場に関連する技術のうち、主なものとして、効率性や環境負荷低減・脱炭素、フードテックに関連する技術を例示する。

農林水産業・食品産業の効率化のために、データの活用、AI、IT、ロボットの導入が進みつつある。温度、湿度、CO_2 濃度や光量、土壌診断等のデータを活用した統合環境制御技術や、ロボットによる自動化・省人化が可能となり、これらの技術の活用を促す営農支援サービスの提供も拡大しつつある。データの活用はノウハウの見える化・伝承を容易とし、他業種からの新規就農を促す効果も期待される[128]。

農業生産に関するデータ連携のプラットフォームとして、SIP 第 1 期『次世代農林水産業創造技術』の開発において、WAGRI（農業データ連携基盤）が整備されている。この WAGRI は営農支援サービスのほかに、収量予測の精緻化等にも利用されている[129]。海外では大手 IT 企業等が営農プラットフォーマを目指しており、ドイツの総合化学メーカーBASF が開発した営農管理支援システムと日本の大手産業機械メーカークボタの営農支援システムが連携する動きもある。

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

---

[124] 令和 2 年度フードテックの振興に係る調査委託事業（農林水産省、2020）
https://www.maff.go.jp/j/shokusan/sosyutu/attach/pdf/itaku-15.pdf

[125] フードテックをめぐる状況（農林水産省、2025）
https://www.maff.go.jp/j/shokusan/sosyutu/attach/pdf/meguji.pdf

[126] 新しい健康社会の実現に向けた「アクションプラン 2023」（経済産業省、2023）
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/kenko_iryo/pdf/20230824_1.pdf

[127] 消費者動向調査（日本政策金融公庫、2023）
https://www.jfc.go.jp/n/release/pdf/topics_230914a.pdf

[128] スマート農業をめぐる情勢について（農林水産省、2025）
https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/smart_meguji.pdf

[129] 農業データ連携基盤 WAGRI の推進（農林水産省、2020）
https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/forum/R2smaforum/oudan/seika85.html

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。

食品廃棄物もその処理にエネルギーを要しGHG排出につながることから、環境への負荷となる。食品ロスを削減するための鮮度保持・容器包装技術や、バイオマス資源としての循環利用を進めるための肥料化・堆肥化、アップサイクル技術の開発も取り組まれている。GHG削減として、水田や堆肥、家畜からのメタン発生を抑制する技術、バイオ炭などの炭素貯留技術などの研究開発も取り組まれている。

フードテックに関しては、タンパク質の確保のため、これまでの農業・畜産業とは異なる代替タンパク(Plant Base Food や培養肉、昆虫タンパクなど)の開発による新事業創出が国内外で進んでいる。消費者ニーズを捉え健康機能性の向上につながる食品の開発や個別化栄養と言われる個人の体調(遺伝情報や腸内細菌叢などの情報も)に合わせたメニューの提供を行うサービスの研究も行われている。

(3)政策動向

食料安全保障に関しては、2024年に改正された『食料・農業・農村基本法』において、環境と調和のとれた食料システムの確立とともに食料安全保障の確保が新たに基本理念に位置付けられた[116]。

同年、『スマート農業技術活用促進法』が成立・施行し、スマート農業に取り組む農業者、スマート農機の開発に取り組む企業の支援が法的に整備された[130]。スマート農業の普及・拡大に向けて、スマート農機のシェアリングを行うサービス事業体の育成や通信環境の整備も進められている。

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[131]。2025年に閣議決定された『地球温暖化対策計画』[132]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』[133]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付けられている。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』[134]にも位置付けられ、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。

---

130 スマート農業技術活用促進法について(農林水産省、2024)
https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/houritsu.html

131 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/

132 地球温暖化対策計画(環境省、2025)https://www.env.go.jp/content/000291669.pdf

133 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

134 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

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』[135]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。

フードテックに関しては、2019 年に策定された『バイオ戦略』が 2024 年に『バイオエコノミー戦略』に改定され[136]、フードテックが新たに位置付けられた。フードテックの取組として代表的な培養肉はアメリカ、シンガポールが先行し、レギュレーションの整備、販売等が進んでいるが、日本はレギュレーションの整備が遅れている。イタリアのように培養肉を禁止する動きもある。

国連食糧農業機関や国連食料システムサミットでは、食料安全保障の課題として、量だけでなく質（健康的な食事）の確保も議論している。また、2025 年 2 月に改定された『健康・医療戦略』において、「『健康に良い食』を科学的に解明し、ヘルスケアサービスに直結し得る個々人の食事・栄養素等のビッグデータを活用し、個々人の体調、嗜好、習慣等に応じた食設計に関する研究開発」への言及があり、個別化栄養の取組が期待される[137]。

[135] 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
[136] バイオエコノミー戦略（内閣府、2024）https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/bio_economy.pdf
[137] 健康・医療戦略（内閣府、2025）
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kenkouiryou/suisin/ketteisiryou/kakugi/r070218senryaku.pdf

3-3-4 社会課題の解決のために取り組むべき領域(F)

社会課題『持続可能な食料システムの構築』『食料安全保障の強化(健康的な食事を含む)』について、持続性や環境との調和に関連する解決策(『環境整備』)、食料安全保障のうち食料自給率の向上に関連する解決策(『量の確保』)、食料安全保障のうちの質に関連する解決策(『質の確保』)に分解して、複数の解決策(F)を整理し(図 3-3-9)、それぞれについて、「将来性(成長性・社会課題)」「技術・アイディアの革新性」「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」の観点で重要度を検討した(表 3-3-1)。表の詳細については後述する。

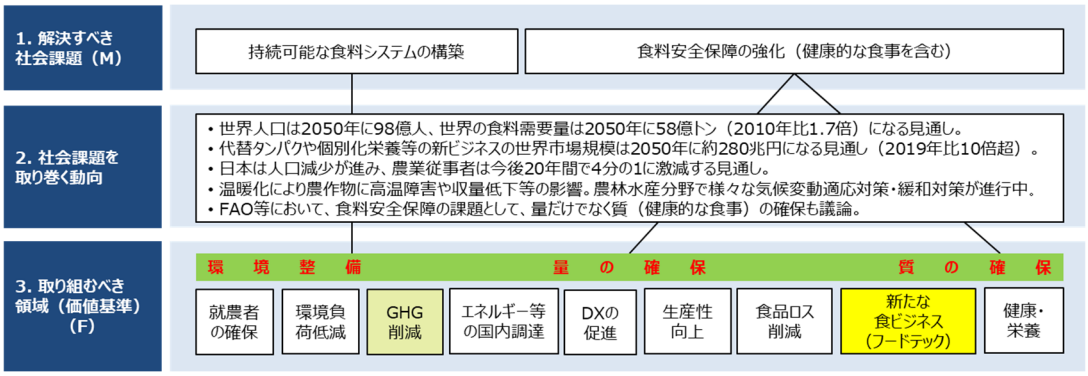


図 3-3-9　解決すべき社会課題とその解決のために取り組むべき領域

表 3-3-1　解決策(価値 F)の重要度の検討結果

社会課題に資する機能・領域		将来性	革新性	日本の強み	民間での困難性	重要経済安保	想定される取組例
①環境整備	就農者の確保	◎ 食料供給に必須	-	-	○ 政策的手段	○ 食料安全保障に貢献	金融、研修等の経営支援
	環境負荷低減	○	△ IPM、RNA農薬等	○	△ 公的機関の取組	○ 食料安全保障に貢献	土づくり、RNA農薬、バイオスティミュラント
	GHG削減	◎ クレジット拡大	○ 新素材	◎ 豊富な森林資源	○	- (政策的重要度◎)	バイオ炭、エリートツリー、新規木材、ブルーカーボン、クレジット取引
	エネルギー等の国内調達	○	○	○	○ 農山漁村単位での取組	○ エネルギー安全保障に貢献	農山漁村EMS、ヒートポンプ、下水汚泥リン回収
②量の確保	DXの促進	◎ スマート農業市場増加	○	◎ クボタ、井関等が特許に強み	○ 標準化等	◎ 食料安全保障に貢献	営農支援システム、品種開発、収穫ロボット、自動走行トラクター
	生産性向上						
	食品ロス削減	○ 継続した取組	○	◎ 鮮度保持、包装技術	○ データ連携は個社では難しい	○ 食料安全保障に貢献	容器包装、収量・需要予測、啓発、商慣習見直し、寄付
③質の確保	新たな食ビジネス (フードテック)	◎ 食品市場・輸出拡大	○	◎ 培養、ゲノム等に強み	○ 規制整備が必要	◎ 食料安全保障に貢献	代替タンパク、陸上養殖、宇宙農業、海洋農業、機能性表示食品、個別化栄養
	健康・栄養	◎ 食品市場・輸出拡大	○	◎ 課題先進国	◎ 消費者の受容	◎ 食料安全保障に貢献	

※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)

(1)環境整備

『環境整備』の解決策として、【就農者の確保】【環境負荷低減】【GHG 削減】【エネルギー等の国内調達】のほか、規模拡大のための【ほ場整備】、ICT 等の活用のための【通信環境の整備】も合わせて必要な解決策として挙げられる。それぞれの解決策に関する重要度の検討は以下のとおり。

【就農者の確保】

①将来性(成長性・社会課題)

農業従事者の減少・高齢化が進展するなか、国内消費者に食料を安定的に供給するために就農者の維持・確保に継続して取り組む必要がある。

②技術・アイディアの革新性

ー(金融支援、研修、補助事業等の政策的解決策が有効である。)

③日本の優位性

ー

④民間のみで取り組む困難性

政策的解決策は国や自治体等の公的機関が推進する必要がある。

⑤重要経済安保技術

就農者の維持・確保により食料安全保障に貢献する。

⑥その他特筆すべき理由

・非常に重要性が高い解決策(F)ではあるが、主に政策的解決策により取り組むべきと考えられる。

・農業従事者の減少・高齢化への対応として、アシストスーツやロボットなど労働力を省力・省人化する技術も有効である。これらの技術は、後述する DX の促進、生産性の向上と関連が強い。逆に、DX の促進、生産性の向上に関連する技術は、就農者の確保に貢献する可能性がある。

【環境負荷低減】

①将来性(成長性・社会課題)

・農薬や化学肥料に頼らない農法として有機農業が世界の有機食品売上は増加傾向にあり、2022 年では約 1,419 億ドル(約 18.7 兆円:1 ドル=132 円)と推計される。

・我が国の有機食品の市場規模は、消費者アンケートにより、2009 年に 1,300 億円、2017 年に 1,850 億円、2022 年に 2,240 億円と推計される。『みどりの食料システム戦略』を受けて、有機農業は拡大する見込みである。[138]

[138] 有機農業をめぐる事情(農林水産省、2025)
https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/yuuki/index.html

②技術・アイディアの革新性

・総合的病虫害管理技術（IPM）や、輪作・抵抗性品種を使用した土壌病害の回避、天敵等を利用した害虫対策による化学農薬の使用低減が取り組まれている。

・次世代有機農業技術としては、RNA 農薬（害虫に RNA 干渉を引き起こす農薬）、レーザー狙撃による物理的防除方法（ムーンショット）等の研究開発が進展している。

③日本の優位性

・日本の有機農業の取組面積は拡大傾向にあり、特に有機 JAS は 10 年で 9 割拡大している。[138]

・農業データ連携基盤（WAGRI）を活用した土壌管理、施肥管理が進む。[139]

・日本の気候・土壌に合わせた技術が開発されており、海外との差別化が可能である。

・日本の化学メーカーは農薬の新規剤の開発力が高い。

④民間のみで取り組む困難性

・地域ごとの作目、品種、異なる環境条件など多種多様な条件が存在することや、消費者理解等の点からも、国が地域や関係機関とともにこれらの推進に取り組む必要がある。

⑤重要経済安保技術

・肥料の低減は食料安全保障に貢献する。

・肥料は重要経済安全保障での「特定重要物資」に指定され、その安定供給技術が「特定重要技術」に指定されている。化学的手法や生物学的手法による肥料成分の生産が想定されており、現在取り組まれている事例として下水汚泥からのリン回収技術等が挙げられる。

⑥その他特筆すべき理由

・農薬・化学肥料の削減に関する技術は、土壌環境・生物多様性の保全や、GHG 削減等に貢献する可能性がある。

・技術開発の主体は国研や公設試験場と考えられる。

【GHG 削減】

①将来性（成長性・社会課題）

・高機能バイオ炭等の供給・利用技術の開発は、2050 年に約 2,900 万トンの GHG 削減効果、約 1.5 兆円の経済効果をもたらすと推計される [122]。また、世

[139] 土づくりの現状と課題（農林水産省、2019）
https://www.maff.go.jp/kyusyu/syohianzen/nouchiku/attach/pdf/1909_symposium-5.pdf

界のバイオ炭市場は、市場の成長は、2025 年の 8 億 5,904 万ドルから 2032 年までに 20 億 9,772 万ドルに成長すると予測されている[123]。

・森林資源の利用のうち、改質リグニンは電子基板や自動車用部材等への置き換えにより、1000 億円超の市場規模と推計される[140]。

・国内における木材の総需要量は増加傾向であり、2018 年の 8,200 万 m^3 から 2030 年には 8,700 万 m^3 の見通しである[141]。

・J-クレジットの方法論において、農業分野ではバイオ炭や家畜排泄物管理、家畜の餌料等や、林業分野では植林・再造林等に関する方法論が登録されている。今後も方法論の追加、取引の拡大が期待される。

・地球温暖化対策計画（前出）では、2040 年度目標として農地土壌炭素吸収源 900 万 $t-CO_2$、森林吸収源 7,200 万 $t-CO_2$、ブルーカーボン 200 万 $t-CO_2$ 等が掲げられている。

・水産分野は、ブルーカーボンの CO_2 吸収量評価手法が確立途上にあり、新たなクレジットとして期待される。

②技術・アイディアの革新性

・ネガティブエミッション技術の一つであるバイオ炭に微生物機能を付与する取組は世界的に少なく、新規性が高い。

・改質リグニン[142]などの木質新素材により、林業の枠を超える新たな産業の創造が期待される。

③日本の優位性

・日本では森林面積が国土の約 3 分の 2 を占めており、人工林の約 6 割は 50 年生を超え本格的な利用期を迎えている[141]。

・森林率については、日本は OECD 加盟国の中でフィンランド、スウェーデンに次いで第 3 位である[141]。

・我が国の木材輸出は、中国等における木材需要の増加等を背景に増加傾向である[141]。

・海洋国家である日本はブルーカーボンの CO_2 吸収量評価手法の検討をリードしている。

④民間のみで取り組む困難性

・ネガティブエミッション技術について、経済産業省において市場創出に向けた検討が進行中である。

---

[140] SIP リグニン（森林総合研究所）https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/sip/files/lignin.pdf

[141] 令和 5 年度 森林・林業白書（林野庁、2024）
https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r5hakusyo/zenbun.html

[142] 「改質リグニンの今後の展開に向けた勉強会」とりまとめ（林野庁、2024）
https://www.rinya.maff.go.jp/j/rinsei/attach/pdf/240418-8.pdf

・木材需要に応じた最適な生産流通経路を実現し、原木を安定的に供給・調達できるようにするためには、サプライチェーン全体で俯瞰し、原木の生産流通ロットの拡大、優良材・並材の選別、川上と川中との協定取引や直送等の取組を進めていく必要がある。
・更なる需要拡大に向けては、高付加価化や革新的な素材開発が必要である。

⑤重要経済安保技術

ー（政策的重要度は高い）

⑥その他特筆すべき理由

・木材産業や建築産業、ESG 投資において民間企業が関われる領域と考えられる。

【エネルギー等の国内調達】

①将来性（成長性・社会課題）

・EMS（エネルギーマネジメントシステム）の国内市場は 2022 年の約 1.3 兆円から 2035 年には約 2.7 兆円（2.1 倍）へと拡大すると予測される[143]。
・見える化を経てエネルギー削減のフェーズへ移行し、運用改善や省エネルギー、再生可能エネルギー利用に関するシステムやサービスの市場が拡大している。
・人手不足により設備管理の省力化ニーズが高まり、自動化や省力化関連の市場も伸びていく。

②技術・アイディアの革新性

・バーチャル空間を活用し精密な需要予測を行う仮想エネルギー需給制御技術が研究開発されている。
・既存の交流の送配電ネットワークに段階的に直流電力を組み入れ、低コストで効率のよい直交流連系型のマイクログリッドの仕組みについての研究も進められている。

③日本の優位性

・電力の監視制御技術等に関する電気メーカーの高い開発力が強みである。中国を除いた出願者上位では、日立を筆頭に 15 位までに日系企業が 8 社入っており、日本企業の技術開発力は中国以外の中では相対的に高い。

④民間のみで取り組む困難性

・マイクログリッドの事業収益化、地方自治体や民間事業者といった関係者間における協力関係の構築、発電出力が変動する再生可能エネルギーを有効活用するための需給管理技術が求められる。

[143] プレスリリース第 24014 号（富士経済グループ、2024）
https://www.fuji-keizai.co.jp/press/detail.html?cid=24014&la=ja

・高度 EMS 導入によるコストアップを打ち消す社会的な評価（インセンティブ等）が必要である。
・他地域へ再エネを供給する効率的・安定的なシステムの構築が必要である。

⑤重要経済安保技術
・農山漁村に豊富に存在する地域資源（再生エネルギー源）を活用した GHG 削減や、災害に対するレジリエンスが期待される技術であり、エネルギー安全保障に貢献する。

⑥その他特筆すべき理由
・2022 年 10 月に TSC Foresight レポート『農山漁村における自律分散型エネルギーシステム分野の技術戦略策定に向けて』[144]を公開している。現在、関連する取組が SIP 第 3 期、NEDO 先導研究プロにおいて実施中である。

その他、【ほ場整備】と【通信環境の整備】については、【就農者の確保】と同様、政策的手段により実現可能であり、研究開発事業ではなく土地改良事業などにより推進されるものと考えられる。

環境整備のまとめ

『環境整備』で挙げたそれぞれの解決策について、①から⑥の観点、技術的解決策であるかどうか、主体が民間であるかどうか、過年度の取組等を検討し、「GHG 削減」に関する解決策は優先度が高いと考えられた。食料生産を持続可能な活動にするための気候変動緩和対策として、特に、森林資源のポテンシャルは高く、クレジット取引の拡大可能性も高く、想定される技術例は他の解決策（エネルギー調達）への効果が期待される。

3-3-2 で述べている社会課題（M）視点からのバックキャストと技術（T）視点からのフォアキャストの両方から取り組むべき領域（F）の抽出を試み、MFT を構築した結果、取り組むべき領域（F）として『森林資源循環利用』を特定した。

[144] TSC Foresight Vol.110『農山漁村における自律分散型エネルギーシステム分野の技術戦略策定に向けて』（NEDO、2022）
https://www.nedo.go.jp/content/100953243.pdf

(2)量の確保

『量の確保』を推進する解決策として、【DX の促進(データの活用)】【生産性向上】【食品ロスの削減】が考えられるほか、フードアクセスのための【流通効率化】、販路の一つとしての【輸出拡大】【適正備蓄】も合わせて必要な解決策として挙げられる。

【DX の促進及び生産性向上】 ※関連性が高いため、組み合わせて整理。

①将来性(成長性・社会課題)

・スマート農業市場は、世界では 2023 年の 173 億ドルから 2032 年までに 357 億ドル、日本国内においては 2023 年度の 322 億円から 2029 年度には 700 億円まで増加すると予測されている[119]。

・食品の輸出額は堅調に増加している。2024 年は 1.5 兆円を超え、2030 年の目標として 5 兆円が設定されている[107]。

②技術・アイディアの革新性

・我が国の農業の特徴は、多品目生産、中山間地での小規模分散農地、アジアモンスーン気候による病害虫の発生などが挙げられる。これらに対応するスマート化技術は、大規模・乾燥地帯での生産となる欧米とは異なり、独自性のある技術となる。

③日本の優位性

・農業データ連携基盤が整備され、AI 収量予測や営農支援サービスの高度化の取組が進む。これらの取組を可能するセンシング技術の開発も進む。

・出願人別ファミリー件数(2010-2019)では、上位 5 者にクボタ、井関農機、ヤンマーが入っている[145]。

④民間のみで取り組む困難性

・社会実装に向けて自動走行に関する規制などに国と民間が協力して対応する必要があり、またほ場改良の実施や標準化・ルールメイキング等も併せて進める必要。

・複数の営農支援システムが連携する仕組みが必要と考えられ、個社での取組に限界がある。

・実装にあたっては、民間が取り組む各技術を複合的に組み合わせる基盤整備も必要である。

⑤重要経済安保技術

・局所施肥による肥料低減は経済安全保障に貢献する。

・国内での食料供給力の強化につながり、食料安全保障に貢献する。

---

[145] 特許出願技術動向調査 スマート農業(特許庁、2020)
https://www.jpo.go.jp/resources/report/gidou-houkoku/tokkyo/document/index/2020_01.pdf

⑥その他特筆すべき理由

・2024 年にスマート農業技術活用促進法が制定され、研究開発・普及を支援する仕組みが創設されている。農水省を中心とする関係省庁において、技術開発・実証、通信環境整備等が進行中である。国の支援を受けてクボタが自動走行トラクタの開発を進めるほか、民間において既に AI を活用した病害虫検知、収量予測、営農支援サービスの提供なども進んでいる。

・生産性向上に関しては、高収量や高温耐性、病害耐性を有する品種の開発も有効である。

・関連する技術は、ノウハウの伝承を促し【就農者の確保】に貢献するほか、局所施肥により【環境負荷低減】にも貢献する。

【食品ロスの削減】

①将来性（成長性・社会課題）

・2022 年度の我が国の食品ロス量は 472 万トンと推計される。食品ロスによる経済損失は 4.0 兆円と推計され、食品ロスの削減は継続して取り組む必要がある[146]。

②技術・アイディアの革新性

・フードチェーン全体にわたるデータ活用基盤を整備し、データ活用システムの技術開発・導入を進めることにより、一層の食品ロス削減が期待される。

・技術開発対象としては「需要予測と収量予測のデータ連携」「商品状態の見える化とダイナミックプライシング」等が有望と考えられる。

③日本の優位性

・フードチェーンの各段階に応じた技術開発は、スタートアップ、大手 SIer、機器メーカー等を中心に既に進められており、一定の要素技術が確立されている（鮮度保持技術（包装技術、急速冷凍等）、スマートラベル、需給最適化プラットフォーム等）。

・諸外国の食品ロスの定義・削減ターゲット・取組内容が異なるため、日本の優位性の判断は難しい面があるが、容器・包装技術は比較的優位にあると考えられる。

④民間のみで取り組む困難性

・「需要量と供給量のマッチング」はフードチェーン全体の課題（サプライチェーン最適化）であり個社での対応が難しい。フードチェーンの多段階にわたるデータ連携の一層の推進等、解決へ向けた更なる取組が必要である。

---

[146] 令和6年度 食品ロスによる経済損失及び温室効果ガス排出量に関する調査業務調査報告書（概要版）（三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング、2024）
https://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_policy/information/food_loss/efforts/assets/consumer_education_cms201_240924_02.pdf

⑤重要経済安保技術

・食品をできるだけ無駄なく有効に消費することは食料安全保障に貢献する。

・食品ロスにより発生する食品廃棄物の処理に多大なコストとエネルギーが必要であり、そのコストとエネルギーの低減につながる食品ロス削減はエネルギー安全保障にも貢献する。

⑥その他特筆すべき理由

・2024 年 9 月に TSC 調査分析レポート『フードチェーンにおける食品ロスの現状と削減に向けた技術的課題』[147]を公開。

・関連する技術である収量・需要予測は「DX の促進」の価値につながる。また、アップサイクルや肥料・飼料化技術は、「環境負荷低減」に貢献する。

その他、【流通効率化】は DX 技術が一定程度寄与すると考えられるが、物流問題への対応として主に政策的な解決策と考えられる。【適正備蓄】は令和の米騒動で話題になるが、統計手法や流通構造の課題として主に政策的な解決策と考えられる。【輸出拡大】については、サプライチェーンの構築や新規食品の開発が一定程度寄与すると考えられるが、主に政策的な解決策であると考えられる。

量の確保のまとめ

『量の確保』のカテゴリーにおいて、それぞれの解決策について①から⑥の観点、技術的解決策であるかどうか、過年度の取組等を検討し、【DX の促進及び生産性向上】に関する解決策は優先度が高いと考えられた。また、想定する技術は、フォアキャストにより、就農者の確保等の他の解決策（F）への効果が期待される。

3-3-2 で述べている社会課題（M）視点からのバックキャストと技術（T）視点からのフォアキャストの両方から取り組むべき領域（F）の抽出を試み、MFT を構築した結果、取り組むべき領域（F）として『スマート農業』を特定した。なお、『スマート農業』は重要な領域ではあるもの、既に様々な取組がなされている。その動向を引き続き注目する必要がある。

[147] TSC Foresight TSC 調査分析レポート『フードチェーンにおける食品ロスの現状と削減に向けた技術的課題』（NEDO、2024）https://www.nedo.go.jp/content/100981978.pdf

(3)質の確保

前述したとおり、国連食糧農業機関等において、食料安全保障の課題として、『質(健康的な食事)の確保』が議論されている。栄養素の一つであるタンパク質については、将来プロテインクライシスが懸念され、代替タンパクの取組が進んでいるところであり、『量の確保』にも貢献するものである。

『質の確保』を推進する解決策として、【新たな食ビジネス(フードテック)】や【健康・栄養】のほか、【食品安全】【食育】も考えられる。

【新たな食ビジネス(フードテック)】

①将来性(成長性・社会課題)

・フードテックの世界市場規模は、2020 年の約 24 兆円から 2050 年には約 279 兆円に拡大と推計。このうち、代替タンパク関係は、タンパク質需要増加を受けて約半分を占める規模に拡大する可能性[124]。また、ヘルスフードテック関係は、高齢化、健康志向を受けて 20%を占める規模に拡大する可能性。

・国内において、通信会社や電力会社等の異業種による陸上養殖の取組が拡大している。

②技術・アイディアの革新性

・フードテック官民協議会において、代替タンパクに関する作業部会のほか、SPACE FOOD やヘルスフードテックに関する作業部会も設置し、技術課題等を議論中である[125]。

③日本の優位性

・代替タンパクについては、JST(科学技術振興機構)事業やCOCN(産業競争力懇談会)の活動等を通して、東京大学、早稲田大学、島津製作所等により研究成果を蓄積中。COCN の推進テーマにおいて社会実装に向けた検討も推進中である。

・培養肉を開発する日本のスタートアップにおいて、成長因子を不要とする培養系の構築に成功している。成長因子を作る技術や大量培養に向けた可食性足場も開発が進んでいる。

④民間のみで取り組む困難性

・代替タンパクのうち培養肉については海外で規制の整備が先行している。昆虫食とともに、消費者の受容性に困難性がある。

⑤重要経済安保技術

・国内での食料供給力の強化につながり、食料安全保障に貢献する。

⑥その他特筆すべき理由

・精密醗酵や細胞性食品は、一部の国を除いて規制の整備や消費者の受容が進んでいない。フードテック分野における世界の投資も 2023 年に大きく減少している。

【健康・栄養】 ※【新たな食ビジネス（フードテック）】と一部と考えられる。

① 将来性（成長性・社会課題）

・国内のヘルスケア産業（公的保険外）の市場規模は 2050 年に約 77 兆円、うち食関連は約 8.7 兆円の見通しである。世界も高齢化が進み、課題先進国である日本の技術は海外への展開が期待される[148]。

②技術・アイディアの革新性

・日本食の健康機能性の解明に関する研究が取り組まれている。

・フードテック官民協議会において、代替タンパクに関する作業部会のほか、SPACE FOOD やヘルスフードテックに関する作業部会も設置し、技術課題等を議論中である。

③日本の優位性

・高齢化社会をむかえ、日本は健康食・介護食等の食だけでなく、ヘルステック全般の技術に強みがあると考えられる。

④民間のみで取り組む困難性

・消費者のニーズに合致するヘルスフードテック関係は、消費者の受容性の障壁が低く、ELSI の取組により社会実装が一気に進む可能性がある。

⑤重要経済安保技術

・国内での生産供給により食料安全保障に貢献する。

⑥その他特筆すべき理由

・ヘルスフードテック分野は、課題先進国である日本の強みを発揮でき、世界の高齢化が進むなか、海外への展開も期待できる分野である。

・一人ひとりに適した食を提案・提供する個別化栄養技術は、食品の無駄を省き食品ロス削減に貢献することが期待される。

その他【食品安全】については、有害物質・微生物の検出・定量技術の高度化、基準の設定があり、分析技術については国立医薬品食品衛生研究所など国立研究開発法人が中心となって研究を行っている。『食品衛生法』に基づく食品・添加物等の規格基準やテストガイドラインの検討に、民間企業よりも国研が主体的に関わっている。また、農林水産省においても、食品安全、動物衛生、植物防疫等に関する問題の発生や発生後の被害拡大を防止するための施策・措置を科学的根拠に

[148] 新しい健康社会の実現に資する経済産業省における施策について（経済産業省）
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/kenko_iryo/pdf/005_05_00.pdf

基づいて検討するために、レギュラトリーサイエンスに属する研究を推進している。これらの研究も民間企業より国研が主体的に関わっている。

【食育】については、食育推進法に基づき政策的な取組が進められているように、政策的な解決策と考えられる。

質の確保のまとめ

『質の確保』のカテゴリーにおいて、それぞれの解決策について①から⑥の観点、技術的解決策であるか、主体が民間であるかを検討し、「新たな食のビジネス（フードテック）」と「健康・栄養」に関する解決策は優先度が高いと考えられた。また、想定される技術例からのフォアキャストで、「食品ロス削減」など他の解決策への効果が期待される。

3-3-2 で述べている社会課題（M）視点からのバックキャストと技術（T）視点からのフォアキャストの両方から取り組むべき領域（F）の抽出を試み、MFT を構築した結果、取り組むべき領域（F）として『ヘルスフードテック』を特定した。

(4) 全体まとめ

2 章(2-3-1)で紹介している豊かな未来レポートの 12 の実現すべき社会像のうち「誰もが健康で食事に困らない社会」はアグリ・フードテック分野における実現すべき社会像(V)と位置付けられる。Vを最上位に設定し、想定される技術例をTとしてMFTを構築した(図 3-3-10)。

注目すべき領域として、環境整備から『森林資源循環利用』、量の確保から『スマート農業』、質の確保から『ヘルスフードテック』を抽出した。このうち、『ヘルスフードテック』と『森林資源循環利用』の領域をフロンティア領域候補と特定し、『スマート農業』の領域は参考とする。

次項の具体的手段で技術開発等を整理する。

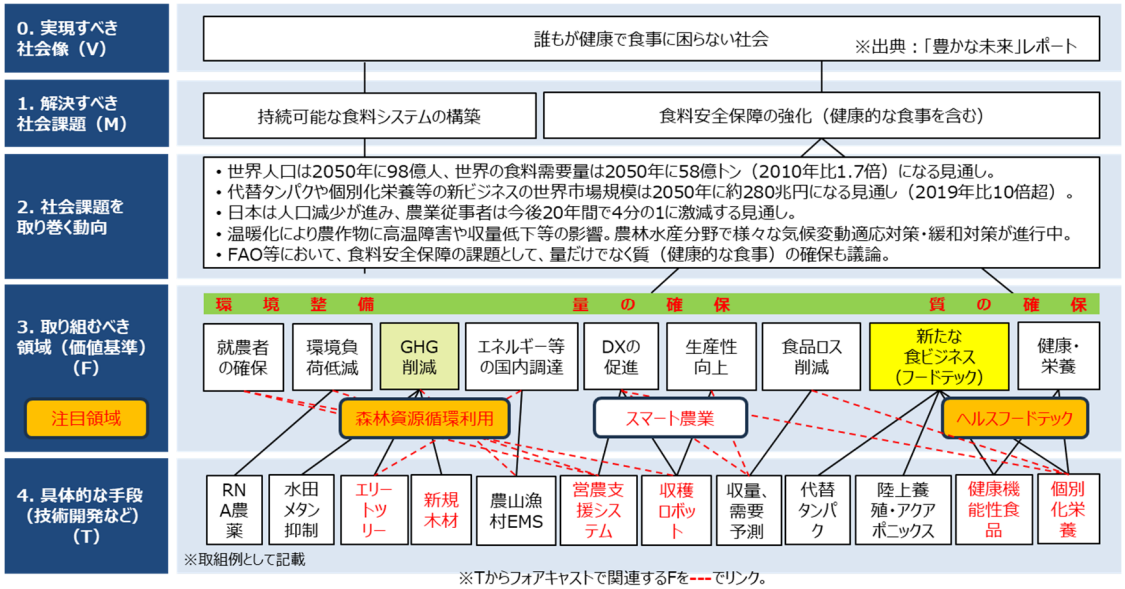


図 3-3-10　再構築した MFT ロジックモデル

3-3-5 具体的な手段（技術開発とその他の社会実装に向けた取組）（T）

日本は世界的に消費者の安全志向が高い。高齢化の進展もあり健康志向も高い。

食品の健康機能性や味覚の解明とともに、個々人の遺伝特性、摂取栄養素や生体データなどを定量的かつ簡易に把握・分析する技術の開発により、健康目標を達成するための食の最適化が期待される。社会実装に向けて消費者の受容性の確保と行動変容を促す仕組みづくりも課題となる。

以下、技術の事例を紹介する。健康機能性だけでも血圧調整や睡眠改善など様々なターゲットがあり、個々の技術の市場規模は必ずしも大きくないが、腸内細菌叢やメタボロミクスの解明によって食による健康寿命延伸が期待される。

【健康機能性に着目した食品開発】

健康機能性に着目した食品として、開発済み又は現在開発中の食品の例をいくつか挙げる。

ゲノム編集技術を用いて、ストレス緩和や血圧の上昇を抑える GABA を多く含むトマトが開発されている。栽培・品質管理等で GABA 含有量を安定させ、125 ㎎/100g の GABA を蓄積させることに成功している。世界で高血圧症に苦しむ 10 億人以上の人たちの健康向上に貢献できる可能性がある。スタートアップの動向としては、サナテックシードが社会実装に取り組み中である。

高 GABA トマト以外にも、ゲノム編集技術を用いて、プラチナバイオがアレルギー低減卵の開発に取り組み、農研機構と理研等は天然毒素（ソラニン等）が生成しにくいジャガイモの開発に取り組み中である。

このような消費者メリットがある、健康機能性に着目した食品は消費者に受け入れやすいため、今後も開発が期待される。なお、その効果の検証のために動物実験やヒト介入試験等が必要となる点に留意する必要がある。

【味覚認知の探究・おいしさの見える化】

産業技術総合研究所では、舌の上で感じる甘味の感覚強度を評定する装置を開発している。3 種の甘味料（ショ糖、スクラロース、アセスルファム K）の経過時間（150 秒間）による甘味強度の差を測定することが可能となる。コーヒーに 3 種の甘味料を添加した場合、経過時間による甘味強度変化に差が生じないことを定量的に確認することができる。

また、高感度分光分析技術により非破壊で機能性表示成分を測定する装置を開発中である。生育モニタリング中で酸や糖を測定することも可能であり、スマート農業への展開も期待される。

【個別化栄養技術】

血中や尿中のマイクロ RNA を分析して疾病を発症前に予防する「未病判定」と「食事を用いた未病状態からの改善」をセットで提供する取組が進められている（キューピー）。スタートアップの動向としては、ウェルナスが、血圧データ等に基づいた個別栄養最適食（AI 食）の提供に取り組み中である。

SIP 第 2 期『スマートバイオ産業・農業基盤技術』[149]（図 3-3-11）において、軽度不調（個人が主観的に感じている軽度な心身の不調）の改善に効果がある G-Plus 食品の制度検討が行われた。1,000 人を対象にした観察研究データの分析によって、軽度不調には 17 種類の栄養成分（葉酸、ビタミン B6、パントテン酸、ビオチン、β-クリプトキサンチン、不溶性食物繊維、カリウムなど）に改善効果があることを解明し、個人の軽度不調に応じた食事の提供を可能とするなど食によるヘルスケア産業の創出に貢献している。

個人の健康増進に向けて、個人の腸内細菌叢やメタボローム、遺伝情報などの解析が必要となる。

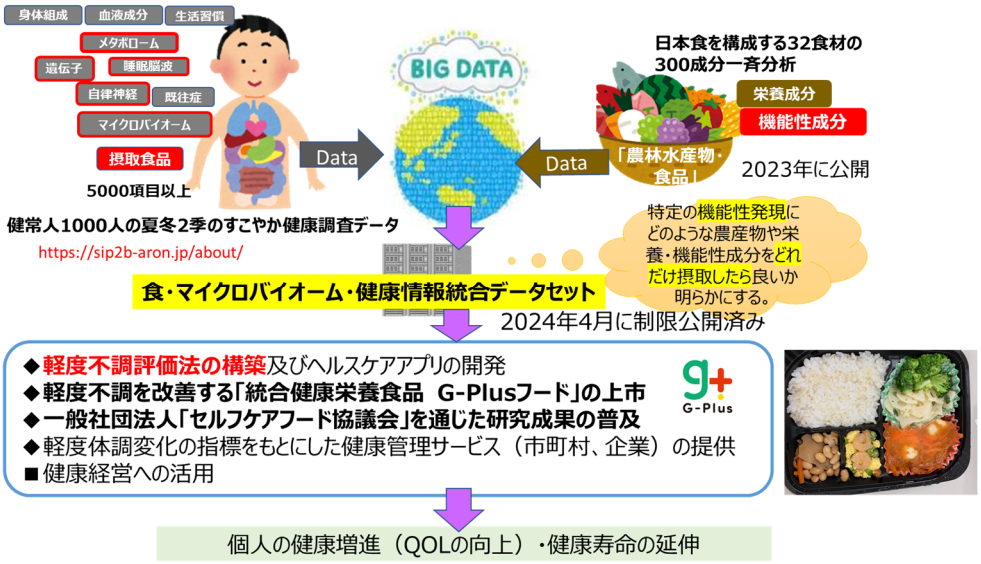


図 3-3-11　食によるヘルスケア研究概要（2018-2022 年度）

【その他】

本領域においては、様々なアイデアが提案されることが期待される。咀嚼・嚥下機能が衰えた高齢者や入院患者に対して、3D フードプリンタを用いて個人に適したテクスチャーの介護職・病院食の開発が可能である。

[149] 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期（内閣府）
https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sip2pd.html

3-3-6 手段を進める上での道筋

食品の健康機能性の解明と商品化のためには、複数年にわたるヒト介入試験や動物実験の実施と分析、必要により食品衛生法の規格・基準等の法規制への対応、消費者受容のためのアウトリーチ活動が必要となる。

複数の食材を組み合わせた個別化栄養技術につなげるためには、それぞれの食材が有する健康機能性成分のデータ収集やデータベースの構築、提供に当たっての3D フードプリンタの開発、さらには個人情報となるデータの取扱いのガイドライン整備に取り組む必要がある。

フードテック官民協議会が 2023 年に公表した『フードテック推進ビジョン』[150]において、消費者理解の確立として、「安全性を確保する取組や、適切な表示により消費者の合理的な選択の機会を確保する取組、消費者への情報開示やコミュニケーションを重視する取組等により、消費者の信頼を確保する必要がある。」と求められているように、消費者の受容は社会実装のために特に重要となる。

今後、技術開発以外の規制や、消費者の受容のための表示等への対応について深掘りし、詳細なロードマップを明らかにする。

[150] フードテック推進ビジョン（フードテック官民協議会、2025）
https://www.maff.go.jp/j/shokusan/sosyutu/attach/pdf/index-19.pdf

森林資源循環利用

3-3-5 具体的な手段（技術開発とその他の社会実装に向けた取組）（T）

日本に豊富な森林資源を GHG 吸収源として有効利用するためには、サプライチェーン全体を俯瞰して、木材需要に応じた最適な生産流通システムの構築と、需要拡大に向けた高付加価化や革新的な素材・新規木材の開発が必要となる。以下、技術の事例を紹介する。

【再造林】

森林・林業において、従事者不足が進展し、管理コストが上昇している結果、管理不十分でドローンが入らない森林が拡大している。スマート林業技術も活用し、レーザー計測データやドローンを活用した森林情報のデジタル化とオープン化や、エリートツリー、コンテナ苗拡大、低密度植林等の技術開発が求められている[151]。また、効率的な森林経営を可能とするため、京都大学において、森林植生判別 AI による森林資源把握の効率化が取り組まれている。

【バイオ炭】

グリーンイノベーション基金において、微生物機能を付与し農作物収量の向上を図る高機能バイオ炭の開発に取り組まれている。具体的には、微生物候補の探索、微生物のバイオ炭への活着、異なる土壌や農作物での効果検証などが研究中である[152]。主な原料として籾殻や剪定枝などが利用されているが、多くの森林資源が利用可能である。スタートアップの動向としては、TOWING が大規模製造プロセスの開発に取り組み中である。

【木質バイオマス】

木質バイオマスは主にエネルギー利用されているが、付加価値の高いマテリアル利用も可能である。世界的にカーボンニュートラルの取組が進められる中、産業界から化石資源由来プラスチックを代替するバイオマス由来の新素材が求められている。日本の固有種であるスギを原料とする「改質リグニン」[153]は、他樹種と比較して品質面や価格面で優位性があるとともに、スギ資源の優位性から国際競争力をもつことが期待される。

---

[151] 林野庁の再造林の促進施策について（林野庁、2023）
https://www.rinya.maff.go.jp/kinki/sidou/gijyutukaihatu/attach/pdf/230921-1.pdf

[152] グリーンイノベーションプロジェクト部会　産業構造転換分野 WG 説明資料（経済産業省、2025）
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/industrial_restructuring/pdf/029_05_00.pdf

[153] 第 10 回プラチナ大賞最終審査発表会（株式会社リグノマテリアほか）
https://platinum-network.jp/wp-content/uploads/2023/03/08riguno.pdf

安定供給とスケールメリットを活かした低コスト製造に向けて、大規模製造に適した製造技術の開発、生産効率向上、省エネ向上等も実現する必要があり、リグニン誘導体の品質の確保のほかに、リグニン以外の成分であるセルロース、ヘミセルロースの利用拡大も求められる。セルロースを利用したセルロースナノファイバー（CNF）は医療用や食用にも利用が拡大している[154]。

改質リグニンの実装に向けては海外展開も見据えた高付加価値化が重要であり、抗酸化剤、化粧品原料、絶縁・放熱・フィルム材料、FRP といった材料使用に資する特性や物性的向上、純度向上を図り、市場へ浸透できる製品化を目指した技術開発を行い、市場へ浸透が期待される特性をもった製品化に向けた技術開発を行う。

【都市の木造化】

高層建築物等の木造化設計技術や木造化に資する新規木材の開発により、大量の炭素を長期間貯留することが可能となる[155]。スタートアップの動向としては、SAKIYA が木材の生産効率や歩留まりを向上するための非破壊検査システムの開発に取り組み中である。

産業技術総合研究所において、X 線等を利用した木材品質の可視化計測技術の開発に取り組んでいる。高級家具等に使用する広葉樹の立木や丸太の内部構造を可視化し、木材の内部構造を測定することが可能となる。これにより、広葉樹の内部構造に応じた取引や、高級家具に適した製材（美しい木目・節）ができ、広葉樹の高付加価値化や流通・取引の合理化の可能性が期待される。

[154] 林業イノベーションハブセンター技術リスト（林野庁、2024）
https://www.rinya.maff.go.jp/j/kaihatu/morihub/attach/pdf/morihub-125.pdf
[155] 建築物への木材利用の促進に向けた取組（林野庁、2024）
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/building_lifecycle/dai1/siryou6.pdf

3-3-6 手段を進める上での道筋

2019 年に林野庁が策定した『林業イノベーション現場実装推進プログラム』（2022 年改訂）[156]において、1.森林調査、伐採・造林計画、2.境界確定、3.伐採・集材・運搬・造林作業、路網設計・施工、生産管理、4.育種、苗木生産、5.新素材開発、6.森林保護（獣害対策等）、7.情報管理、8.通信に関するロードマップが提示されている。

森林資源循環利用において、これらのロードマップを参照しつつ、特に 5.新素材開発では、耐火性等の性能評価など建築基準法への対応や仕様の標準化などに留意し、社会実装を推進する必要がある。

今後、技術開発以外の規制や、普及に向けた標準化等への対応について深掘りし、詳細なロードマップを明らかにする。

[156] 林業イノベーション現場実装推進プログラム（林野庁、2022）
https://www.rinya.maff.go.jp/j/press/ken_sidou/attach/pdf/220715-2.pdf

（参考）スマート農業

3-3-5 具体的な手段（技術開発とその他の社会実装に向けた取組）（T）

スマート農業に関しては、前述したように、スマート農業技術活用促進法が制定され、関係省庁による研究開発・実証、社会実装に向けた環境整備にも取り組まれている。自動走行や収穫ロボット、AI を用いた収量予測技術などの開発が進み、データを活用した営農支援サービスが提供されている。スマート農業に関連する技術として、スマート育種基盤技術の開発が取り組まれている。以下、技術の事例を紹介する。

他産業におけるロボット技術の農業分野への展開、営農支援システムを連携する仕組みの構築、AI の進歩に応じたスマート農業での AI 利用が期待される。

【自動走行】

農業現場での自動走行確立に向けては、トラクタでは対応インプルメントの拡大、遠隔監視可能な通信環境（低遅延、広範囲化、対遮蔽物、セキュリティ確保等）の構築、カメラ・センサー等の機能向上が必要である。また、現場データの収集を行いデジタルツイン等による効率的な移動経路・計画の構築や、営農支援システムとの連携等も必要となる[157]。

【営農支援システム】

クボタは農業経営課題の解決をサポートするインターネットクラウドを利用した営農・サービス支援システムを開発・展開している。電子地図を用いたほ場管理、作業の記録、進捗状況の把握など農業経営の「見える化」が可能となる。BASF（ドイツ）は衛星データを活用したシステムにより可変施肥マップを日本でも提供を開始しており、クボタのシステムと連携も進められている。

海外では、大手 IT 企業等が営農プラットフォーマを目指す動きがあることに留意する必要がある。

【収穫・除草ロボット】

画像認識技術を用いて、トマトの房検出や熟度判定を実施。また、奥行き情報を推定するアルゴリズムを活用しているほか、認識したトマトの位置情報を元にアームの軌道生成も実行可能となっている（デンソー）。

産業技術総合研究所では、自律移動ロボット技術を用いたコンパクトで低コストな除草ロボットの開発に取り組んでいる。

---

[157] スマート農業の現状と将来の可能性（農研機構、2021）
https://www.inpit.go.jp/content/100872175.pdf

【収量予測】

収量予測技術については、既に様々な企業が技術開発に参入している。土地利用型作物（稲、小麦、大豆等）、野菜（キャベツ、ブロッコリー、エダマメ等）については、圃場データ、気象データ、過去の出荷実績等から単位面積当たりの収量を予測する技術開発に取り組まれている。また、施設園芸等の集約型の農作物（トマト、イチゴ、キュウリ等）については、上記に加え開花情報、施設環境データを使った生育モデルを構築し収量・収穫時期を予測する技術開発に取り組まれている[158]。

スタートアップの動向として、AGRIST では収穫ロボットのカメラで撮影した作物の画像を解析し、果実の大きさや色、形状などの情報を収量予測モデルに組み込んでいる。

社会実装に向けて、予測に使用するデータの高度化、更なる予測精度の向上を図る必要がある。

【農業用生成 AI】

農業分野への AI の活用は様々あるが、農業特化型の生成 AI の開発が取り組まれている。具体的には、農業の専門知識を学習させた国内初の生成 AI を開発し、普及指導員の営農指導業務の一部を生成 AI で効率化し、より高度な技術指導の提供に貢献することを目指している[159]。

【スマート育種】

AI やゲノム情報等のビッグデータを活用して育種に関わる評価や選抜を自動化することにより高速に品種を育成するスマート育種の技術が開発されている。スマート育種は、スマート農業に適した品種の開発にも有効な技術となる[160]。

[158] 農業データの利活用の推進について（農林水産省、2025）
https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/attach/pdf/index-276.pdf
[159] プレスリリース「国内初の農業特化型生成 AI を開発」（農研機構、2024）
https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/rcait/166108.html
[160] みどりの品種育成方針（農林水産省、2022）
https://www.affrc.maff.go.jp/docs/press/attach/pdf/221221-2.pdf

3-3-6 手段を進める上での道筋

農林水産省を中心とした関係省庁において、『スマート農業推進総合パッケージ』（2020 年策定、2022 年改訂）[161]に基づく施策が着実に実行されている。具体的には、

1.スマート農業の実証と分析
2.導入コスト低減に向けた農業支援サービスの育成・普及
3.更なる技術の開発等
4.技術対応力・人材創出の強化
5.実践環境の整備
6.海外への展開

の 6 本柱を施策の方向性として提示し、「2025 年までに農業の担い手のほぼすべてがデータを活用した農業を実践」することを目標として、

（ア）実証で培われた技術・ノウハウを有する生産者、民間事業者等からなるスマートサポートチームによる、新技術を積極的に取り入れる産地の支援、
（イ）農業支援サービスの活用による、スマート農業に関心があるが、自力では取り組むことが困難な生産者・産地の支援、
（ウ）普及指導員による、データに基づく生産者・産地指導への支援

を総合的に行うこととしている。

また、ISO（国際標準化機構）において、スマート農業に係る戦略諮問グループ（SAG）が設置され、スマート農業に係る標準化のロードマップの提示、実施すべきアクションの提言等が行われている。この提言を受けて、データ駆動型アグリフードシステムに関する新たな TC（Technical Committee：専門委員会）が設立され、検討が行われている[162]。

さらに、NEDO では、ロボット技術戦略の策定及びプロジェクトの早期開始に向けて、社会課題の解決につながるロボット活用を推進するための方向性を大局的に整理・検討した「ロボット分野における研究開発と社会実装の大局的なアクションプラン」（ロボットアクションプラン）を公表している[163]。このロボットアクションプランでは、ロボット活用が期待される 8 分野（農業を含む）について、今後、各分野での課題をさらに深掘りするとともに、社会実装と次世代技術開発の両輪で社会課題の解決に取り組むこととしている。

以上のように、研究開発・実証と人材育成、データ標準化を含めた環境整備、海外展開等の取組が期待される。

---

[161] スマート農業推進総合パッケージ（農林水産省、2022）
https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/package.html
[162] ISO/TC347 の活動と今後の対応（農林水産省、2025）
https://www.maff.go.jp/j/jas/attach/pdf/iso_general-12.pdf
[163] 「ロボット分野における研究開発と社会実装の大局的なアクションプラン」を公表（NEDO、2023）
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101639.html

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。

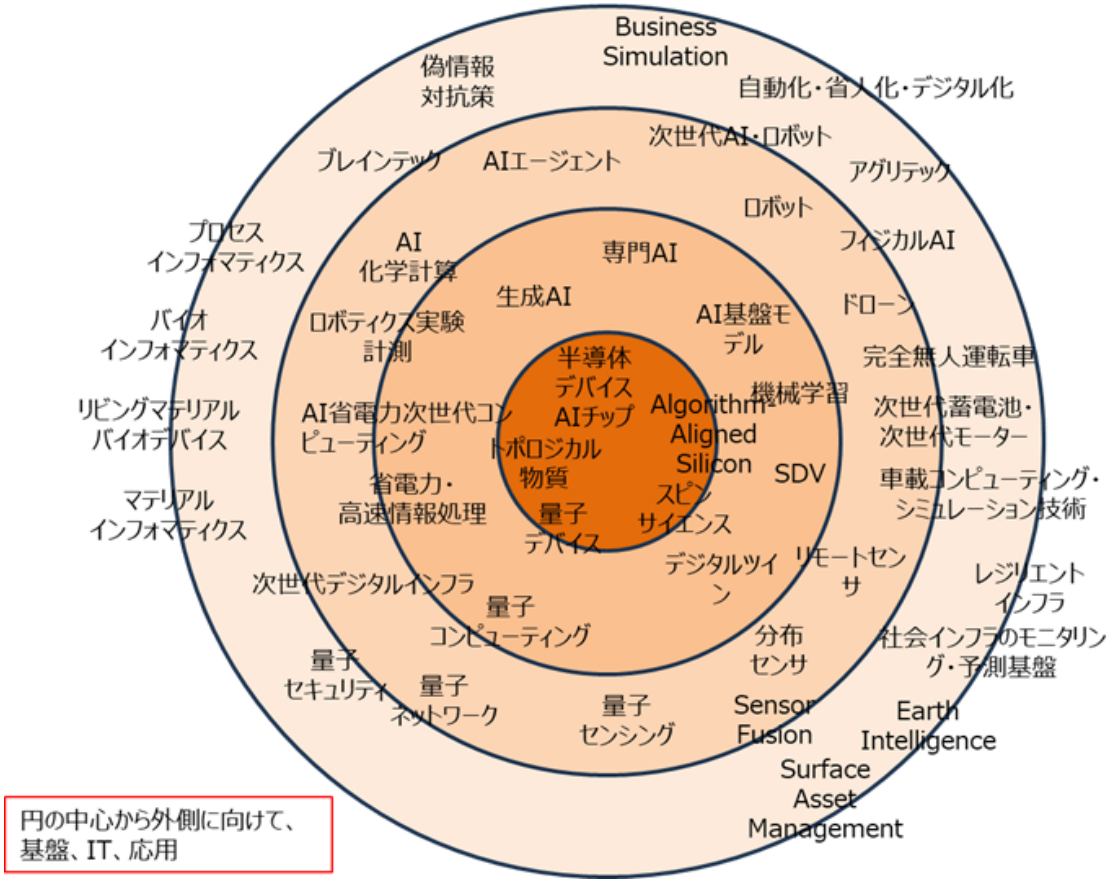


図 3-4-1　デジタル分野の俯瞰図

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（エッジコンピューティング）、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、コーディネーション	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、CAD	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、継ぎ・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、エスカレータ	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、ベースメーカ、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、G5、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、〇〇pay、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	鉄鉱業	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、表 3-1 に記載されている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(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・強靭化
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を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。グローバリゼーション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るとは言い難い。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、すべ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（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・強靭化

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、すべ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、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

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、さら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											○				○	○

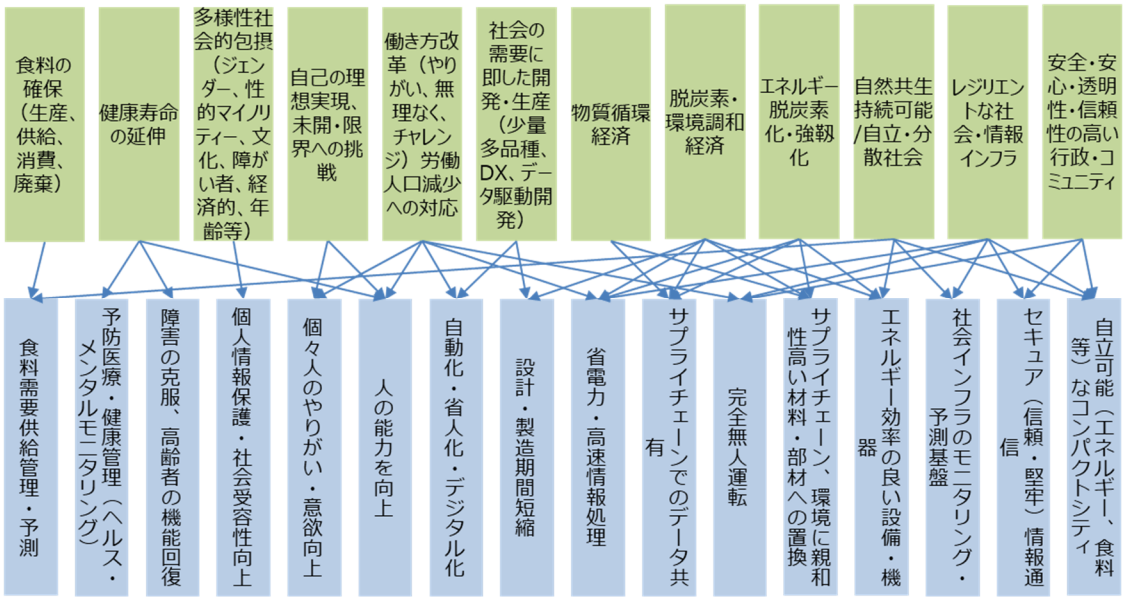


図 3-4-2　デジタル分野が関わる解決すべき社会課題と取り組むべき領域の関係

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 つの価値軸にうち、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）、〇（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	〇の基準	△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_2 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_2 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、分析は比較的実現可能なため、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:ー　経済:〇　環境:△　社会基盤:△

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:ー　社会基盤:ー

F-3 障がいの克服・高齢者の機能回復

病気や怪我、あるいは老齢化によって、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:〇　環境:ー　社会基盤:ー

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:△　環境:ー　社会基盤:ー

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:〇　経済:〇　環境:△　社会基盤:ー

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:〇　経済:◎　環境ー　社会基盤:ー

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。関係する産業は、金融、EC など主にサーバー空間で進められる分野だけでなく、製造等、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:◎　環境ー　社会基盤:ー

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 がロボットにも導入されることで、人が身体機能を用いて行う作業にも拡大することが予想される。産業用ロボット及びサービス用ロボットの世界市場は拡大傾向にある。

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関わらず、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：〇　経済：〇　環境：〇　社会基盤：ー

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、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：〇　経済：◎　環境：◎　社会基盤：〇

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の国内での実施するため、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、廃棄に渡って関わるステークホルダーで、製品に関わ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_2 排出量は、部素材に係る CO_2 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_2 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:ー　経済:◎　環境:◎　社会基盤:ー

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、自治体の併せ持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:〇　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力化し、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:〇　環境:ー　社会基盤:〇

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：〇　経済：△　環境：◎　社会基盤：〇

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	―	〇2022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	〇　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	〇日本ニート人口74万人	〇新規事業創出、スタートアップ起業	△	―	5
人の能力を向上	〇	◎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	〇	〇	〇2020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	〇	◎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	〇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	―	〇	△基盤としてであり、直接的効果ではない	―	3
完全無人運転	〇	〇	―	◎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	―	△	〇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	〇日本森林火災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	△	〇災害,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	―	〇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	〇10万人都市×数カ所か	△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・エネルギー送電ロスなどが削減（試算未）	〇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、さらに普及に 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。

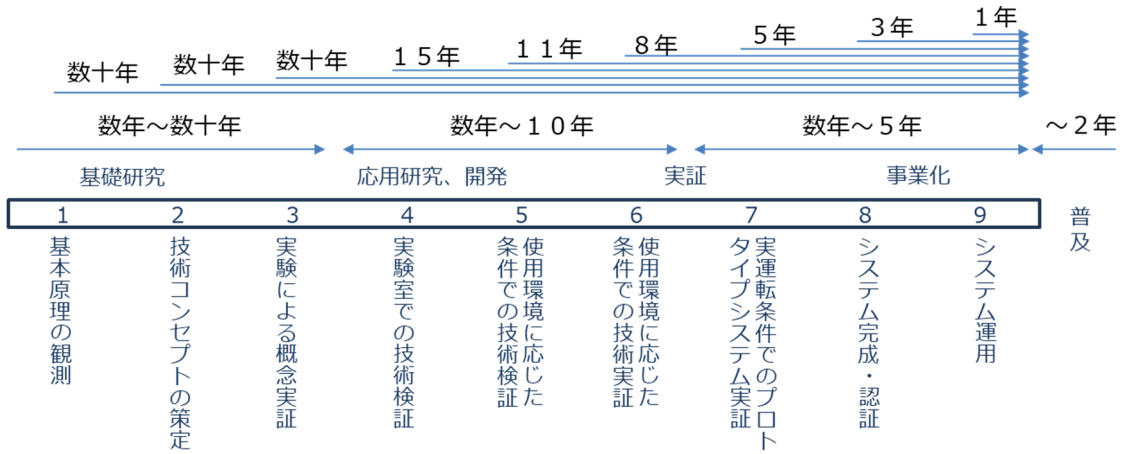


図 3-4-3　TRL と普及が実現するまでにかかる年数の推定

出所：Technology Readiness Levels（Horizon Europe Work Programme 2021-2022）を基に NEDO イノベーション戦略センター作成
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

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て、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。

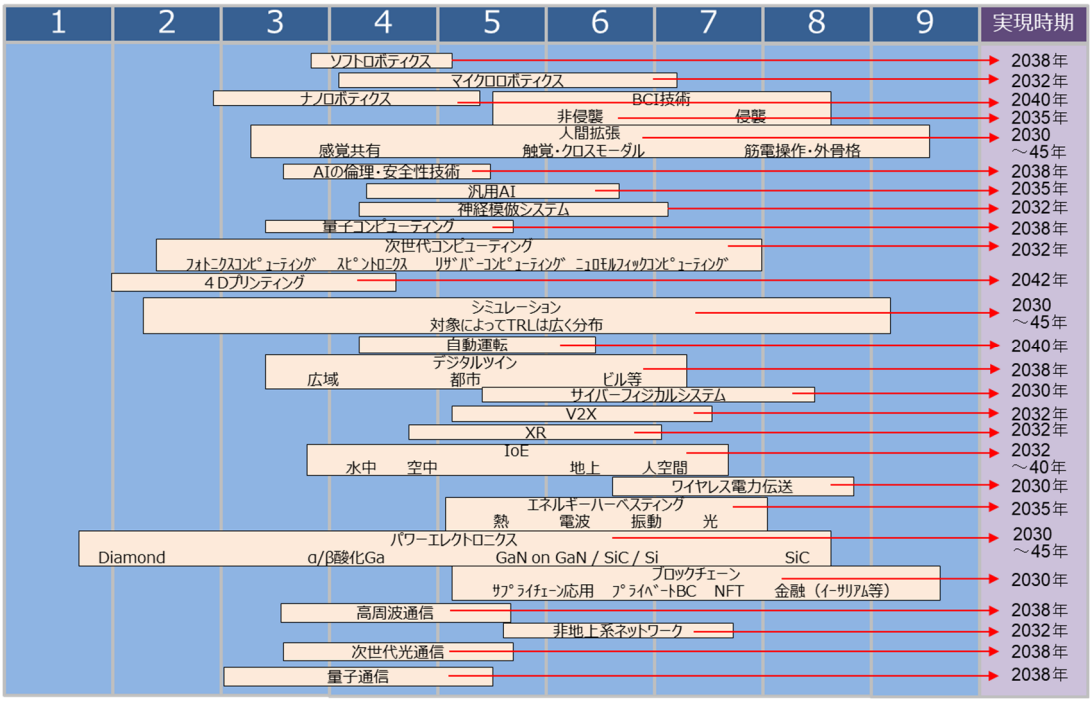


図 3-4-4　主要な技術が実現する時期の推定

機能・領域	実現に寄与する主要技術	実現時期
食料需要供給管理・予測	IoE、ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ	2030年
予防医療・健康管理（ヘルス・メンタルﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ）	ｾﾝｻ、AI、ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ	2035年
障害の克服、高齢者の機能回復	BCI, XR, 汎用AI,ｿﾌﾄﾛﾎﾞ	2035年
個人情報保護・社会受容性向上		
個々人のやりがい・意欲向上		
人の能力を向上	AI、人間拡張、BCI	2040年
自動化・省人化・デジタル化	汎用AI, AI倫理・安全, ｿﾌﾄﾛﾎﾞ、ﾏｲｸﾛﾛﾎﾞ, BCI	2035年
設計・製造期間短縮	AI、ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ、ﾃﾞｼﾞﾀﾙﾂｲﾝ	2040年
省電力・高速情報処理	神経模倣, 汎用AI,量子ｺﾝﾋﾟｭｰﾃｨﾝｸﾞ	2035年
サプライチェーンでのデータ共有	CPS	2030年
完全無人運転	V2X, 自動運転, AI, IoE, CPS	2050年
ｻﾌﾟﾗｲﾁｪｰﾝ、環境に親和性高い材料・部材への置換	MI（ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ）	2050年
エネルギー効率の良い設備・機器	ﾊﾟﾜｰｴﾚｸﾄﾛﾆｸｽ	2040年
社会インフラのモニタリング・予測基盤	ﾃﾞｼﾞﾀﾙﾂｲﾝ, IoE, 4Dﾌﾟﾘﾝﾃｨﾝｸﾞ, ﾏｲｸﾛﾛﾎﾞ,	2040年
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
自立可能（ｴﾈﾙｷﾞｰ、食料等）なコンパクトシティ	ﾃﾞｼﾞﾀﾙﾂｲﾝ, V2X, 汎用AI, IoE	2050年

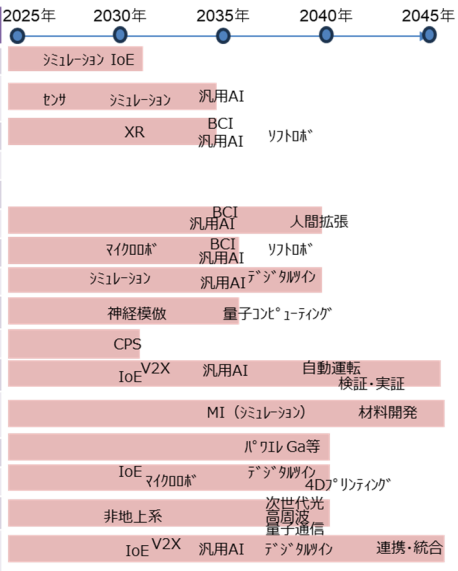


図 3-4-5　取り組むべき領域が社会実装される時期を主要技術の実現時期から推測

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	ー	○	△	△	4
予防医療・健康管理（ヘルス・メンタルﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ）	ｾﾝｻ、AI、ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ	2035年	◎	◎	ー	ー	6
障害の克服、高齢者の機能回復	BCI, XR, 汎用AI,ｿﾌﾄﾛﾎﾞ	2035年	◎	○	ー	ー	5
個人情報保護・社会受容性向上			◎	△	ー	ー	4
個々人のやりがい・意欲向上			○	○	△	ー	5
人の能力を向上	AI、人間拡張、ﾛﾎﾞﾃｨｸｽ、BCI	2040年	○	◎	ー	ー	5
自動化・省人化・デジタル化	汎用AI, AI倫理・安全, ｿﾌﾄﾛﾎﾞ、ﾏｲｸﾛﾛﾎﾞ, BCI	2035年	◎	◎	ー	ー	6
設計・製造期間短縮	AI、ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ、ﾃﾞｼﾞﾀﾙﾂｲﾝ	2040年	○	○	○	ー	6
省電力・高速情報処理	神経模倣, 汎用AI,量子ｺﾝﾋﾟｭｰﾃｨﾝｸﾞ, 分散ｺﾝﾋﾟｭｰﾃｨﾝｸﾞ	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	ー	○	△	ー	3
完全無人運転	V2X, (自動運転, AI), IoE, ｴﾈﾊﾙﾍﾞ, WPT, CPS	2050年	○	○	ー	◎	7
ｻﾌﾟﾗｲﾁｪｰﾝ、環境に親和性高い材料・部材への置換	MI	2050年	ー	△	○	△	4
エネルギー効率の良い設備・機器	ﾊﾟﾜｰｴﾚｸﾄﾛﾆｸｽ、MI、ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ	2040年	ー	◎	◎	ー	6
社会インフラのモニタリング・予測基盤	ﾃﾞｼﾞﾀﾙﾂｲﾝ, IoE, 4Dﾌﾟﾘﾝﾃｨﾝｸﾞ, ﾏｲｸﾛﾛﾎﾞ,	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	△	○	ー	○	5
自立可能（ｴﾈﾙｷﾞｰ、食料等）なコンパクトシティ	ﾃﾞｼﾞﾀﾙﾂｲﾝ, V2X, 汎用AI, IoE	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でプロットしたものが図 3-4-6 である。

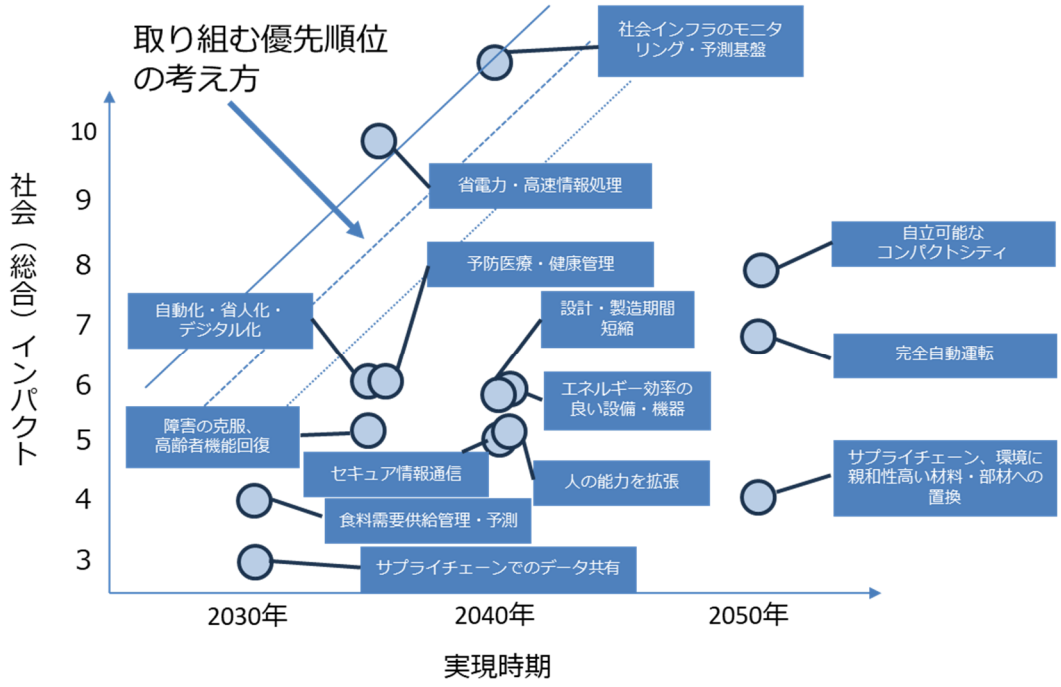


図 3-4-6　取り組むべき領域の社会インパクトと社会実装の実現時期

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、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する。

(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

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、上位 3 点の取り組むべき領域について、詳細を述べる。

(1)省電力・高速情報処理

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付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、益々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。

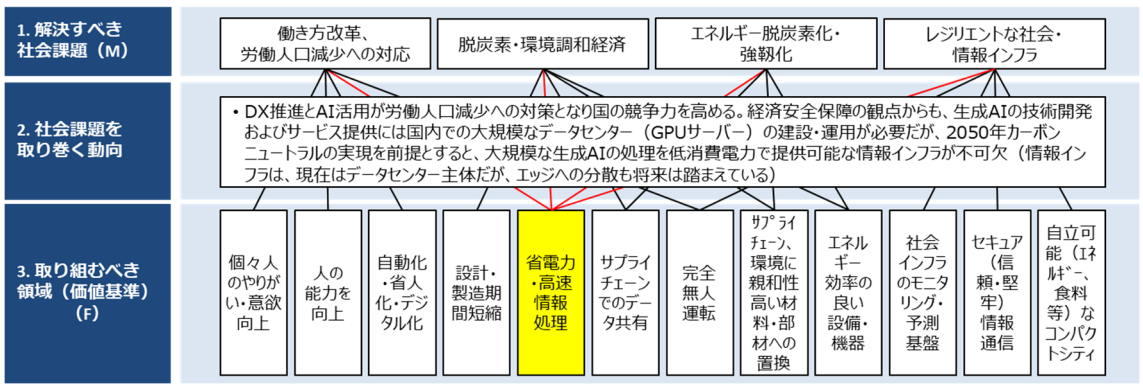


図 3-4-7　『省電力・高速情報処理』に関する社会課題との関係図

本領域の具体的手段としては、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。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。

(2)社会インフラのモニタリング・予測基盤

近年、災害の甚大化が問題となっており、その被害を最小限に抑えることは、ガバナンス、インフラ、経済そして、住む人々の Well-being からも重要な課題である。デジタル分野の技術としては、災害の発生時期、規模、被害範囲などを予測するとともに、万一発生した場合にいち早く検知して対処が必要な組織・人に通知、被災を最小限にする避難経路や支援物資輸送計画、復旧計画などに貢献する。主に、情報収集、分析、予測、通知といった機能を実現することが求められる。災害対応は一時的で公共的対応が求められる内容であるが、平時の社会インフラの維持・運用を経済循環に組み込むことが重要であり、これにより社会システムとしての頑健性を高めることにもなるため防災・減災に限定せず、レジリエントな社会インフラの実現を目指すものとする。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 3-4-8 に示す。

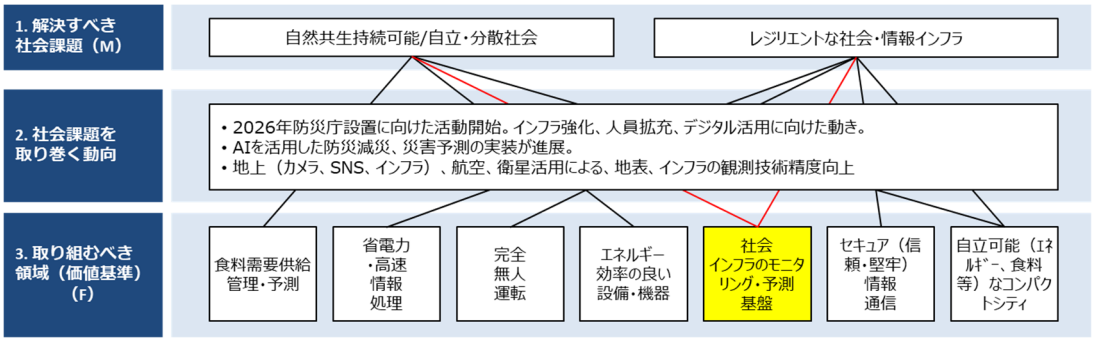


図 3-4-8　『社会インフラのモニタリング・予測基盤』に関する社会課題との関係図

我が国の地理情報、道路・上下水道・電力送電網・ガス管などの社会インフラ、光ファイバー・移動体無線基地局などの情報インフラ、等々を含めてサイバー空間上でデジタルツインを構築し、気象や災害の予測シミュレーションに活用したり、地形の変化をいち早く探知したりすることが可能になる。技術開発としてはシミュレーション技術やモニタリング技術が、社会実装に向けた取組としてはデジタルツインの活用アイデアの募集などが想定される。

(3) 自動化・省人化・デジタル化

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、農業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る。熟練技術者が持つ豊富な知識、ノウハウを形式化して伝承するとともに、生成 AI 等を活用した AI エージェントやロボットに知識を移し、自動化・省人化を実現する技術開発が必要となっている。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 3-4-9 に示す。

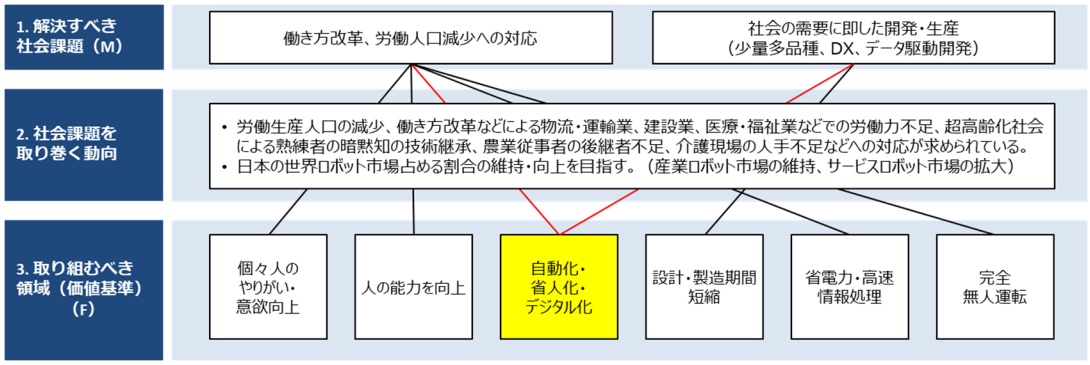


図 3-4-9　『自動化・省人化・デジタル化』に関する社会課題との関係図

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。代表的な分野と求められる課題は以下のとおりである。

・製造現場における熟練者の豊富な知識やノウハウの技術継承
・物流倉庫や製造工場での作業の自動化及び業務効率化
・介護現場での見守り・介助・移動支援
・医療現場における問診及び診断支援
・農業従事者の農業作業の自動化支援及び技術継承
・教育現場の学習支援サービス
・先端 AI・IT 分野の専門家支援サービス

3-4-5 具体的な手段（技術開発とその他の社会実装に向けた取組）（T）

優先的に取り組むべき領域の 3 点について、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

現在、生成 AI のモデル生成及び推論を実行するために多用されている方法は、脳神経回路を模倣した多層のニューラルネットワークをソフトウェアにより実装し、NVIDIA の GPU など、先端半導体回路による汎用的演算機能により、実行することで実現されている（図 3-4-10）。

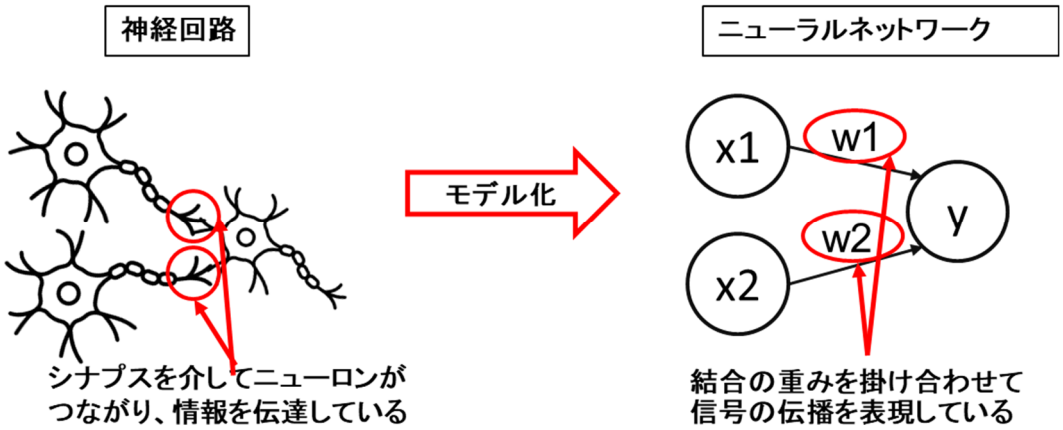


図 3-4-10　神経回路とそれを模倣したニューラルネットワークの基本構成

様々なアルゴリズムを試しながら研究開発を行っている段階では、汎用的な処理基盤を用いることが、研究開発の効率は高いが、固定したアルゴリズムが社会実装として用いられる段階では、ニューロモルフィックコンピューティングやリザバーコンピューティングのように、半導体回路などを用いてニューラルネットワークをハードウェアによる実装を行うことで、処理性能が向上したり消費電力が低減したりする可能性がある。また、処理にかかる電力消費を削減するためのアプローチとしては、汎用的な処理基盤であっても、従来電子の挙動で実装していたものをスピントロニクスや光、あるいは量子状態などを用いて同等の処理を実装することで省電力化が図られる可能性がある。

なお、学習済みの多層ニューラルネットワークのモデルに蒸留技術を用いることで、モデルの構築が低コストで可能との報告がある。ソフトウェア上の工夫とハードウェア上の工夫は相互に補完するものであり、総合的に取り組むことが望ましい。

①将来性（成長性・社会課題）

- 生成 AI の市場は年 30%で成長し 2040 年の世界市場規模としては 1 兆ドルを超え、ほぼ全ての産業分野において応用され効率の向上が期待されている。
- AI を国内で安全に有効活用していくためには、国内でのデータセンター増設が必要となるが、現状の方法（GPU を用いた計算）では、多くの電力を必要とすることから電力消費量が懸念事項である。
- AI 活用における電力消費の革新的な低減には、次世代コンピューティング技術が有望である。

②技術・アイディアの革新性

- ニューロモルフィックやリザバーを機械学習に適用する取組は進められているが、生成 AI に適用する取組はこれからである。
- ニューロモルフィックやリザバーのような物理的な特性などを活用した新しい原理の計算手法の他にも、電子の代わりに光やスピンや量子などの媒体で四則演算を行い、高速化・省電力化を目指す手法も存在している。
- どの手法も生成 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

- 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。
- 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せ的なアプローチが有用である。
- エネルギー自給率の低い日本では省電力化に取り組む強いモチベーションが働く。

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。
- 生成 AI のモデルを構築するためには、大規模な計算リソースが必要である。ハードウェアに実装する場合にも、比較・評価のために大規模な計算リソースは必要であり、民間企業のみでは困難である。

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。
- AI の学習、推論のための基盤を国内で保有することは AI ガバナンス、データガバナンスの観点から重要と考えられる。

以下、実現に有力な技術について示す。

〇具体的手段 1:ニューロモルフィックコンピューティング

深層学習で用いられるシナプスとニューロンを多段に組み合わせたニューラルネットワークを、メモリスタ等を用いて実装する試みが進められている。表 3-4-9 に世界で進められているニューロモルフィックチップの研究開発例を示す。

表 3-4-9　世界のニューロモルフィックチップ例[164]

組織	名称	構成	性能など	参考情報
IBM	NorthPole	12nm プロセス、800mm^2、220 億トランジスタ	8bit 演算デジタル型、NVIDIA A100 の 1.4 倍のスループットで電力は 20%以下	https://research.ibm.com/blog/northpole-ibm-ai-chip https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.adh1174
Intel	Loihi2	Intel 4 プロセス、31mm^2、23 億トランジスタ	100 万個のニューロンをシミュレート可能	https://download.intel.com/newsroom/2021/new-technologies/neuromorphic-computing-loihi-2-brief.pdf
	Hala Point	Loihi2 を 1152 基搭載	11 億 5000 万の人工ニューロンと 1280 億の人工シナプスで構成し 1 秒間に 2 京回。GPU 使用より 50 倍の速度	https://newsroom.intel.com/artificial-intelligence/intel-builds-worlds-largest-neuromorphic-system-to-enable-more-sustainable-ai#gs.83x4kb
Innatera	Spiking Neural Processor T1	SNN, CNN, CPU を一つの SoC に実装	リアルタイムにセンシング	https://innatera.com/products/spiking-neural-processor-t1

[164] https://open-neuromorphic.org/neuromorphic-computing/hardware/

生成 AI のモデルのアーキテクチャであるトランスフォーマーは、ニューラルネットワークを含むものの、それ以外にも複雑な処理が必要となるため、従来のニューロモルフィックの実装範囲では、生成 AI の低消費電力化には限定的な効果しか得られない可能性がある。一方、自己注意機構を簡略化、高速化してニューロモルフィックコンピューティングで実装する研究[165]や、多層パーセプトロンとして高次元変換を行う行列積をスパースな加算によって高速化、低精度の計算で効率化する研究[166]も行われており、実現可能性は認められる。

〇具体的手段 2:リザバーコンピューティング

ランダムなネットワーク結合でリザバーとして実装し、リアルタイム解析や信号処理を高速・省電力に実行するアプローチも進んでいる（図 3-4-11）。

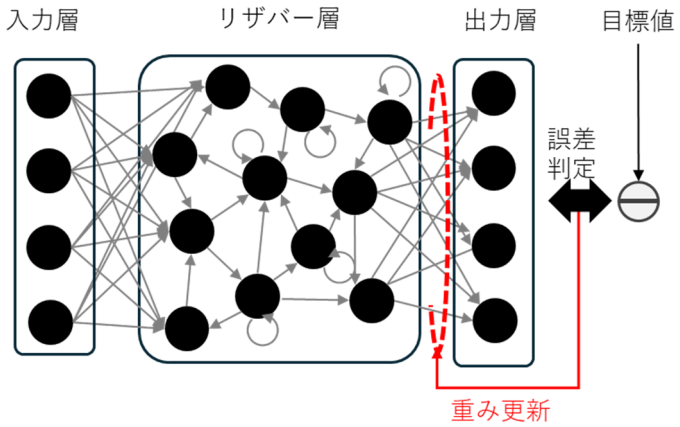


図 3-4-11　ニューラルネットワークによるリザバーコンピューティングの構成例

ニューロモルフィックコンピューティングと同様に、トランスフォーマーの一部機能をリザバーで代替するアプローチも研究されており、自己注意機構に組み込んで学習に必要なパラメータ数を大幅に削減したり[167]、リザバーを用いることで長い時系列データを効率的に扱ったりすることが可能になるなどの期待がある。

[165] https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2024.1372257/full
[166] https://ar5iv.labs.arxiv.org/html/2104.08378
[167] https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.014039

○具体的手段 3：生成 AI の革新的省電力システム実装

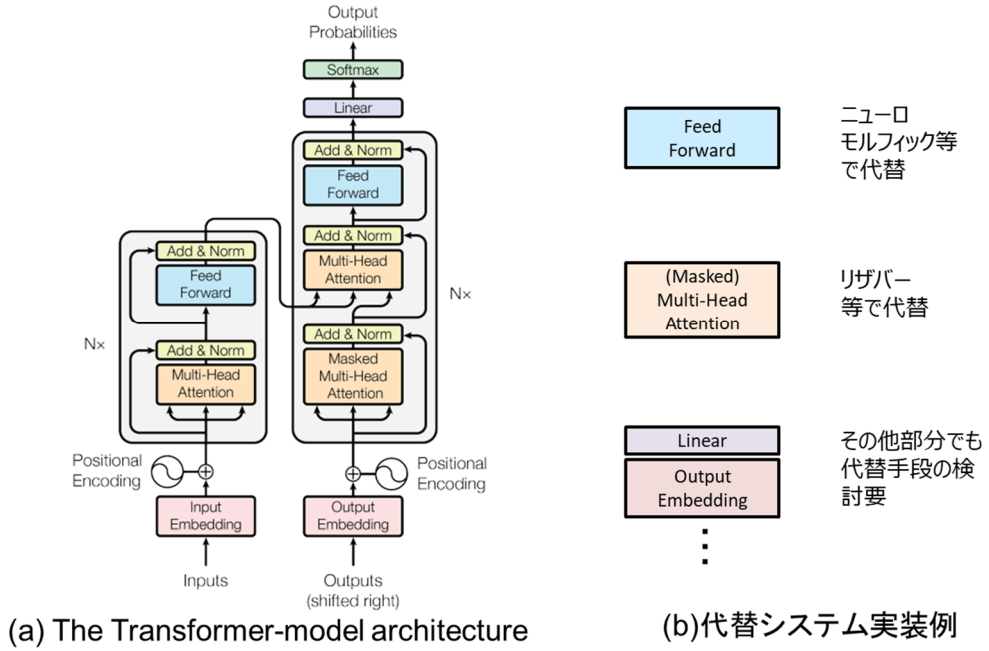


図 3-4-12　(a)：生成 AI の Transformer モデル
図 3-4-12　(b)：革新的省電力のための代替システム実装例

出所：(a) https://arxiv.org/pdf/1706.03762

トランスフォーマーの機能をニューロモルフィックやリザバーを用いて実装することで、省電力のシステム実装を目指す（図 3-4-12）。積和演算はニューロモルフィックで実装可能だが、パラメータ数が多いため、大規模化が必要である。注意機構は大規模な行列演算であるが、リザバーで処理結果を代替できる可能性がある。

○具体的手段 4：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。

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。

〇具体的手段 5：量子コンピューティング

ゲート型量子コンピュータのユースケースの一つとして、量子機械学習や自然言語処理への応用が検討されている。現時点では、ゲート型量子コンピュータは、エラー訂正、緩和の試験的実装が試みられている段階であり、量子機械学習などのユースケースを実現することはできていない。そこで、量子古典ハイブリッドなど既存計算技術との融合を図り、産業化課題の早期抽出を進めることにより、量子機械学習を実行可能なエラー耐性型量子コンピュータ（FTQC）を実現するために必要となる論理量子ビット数やゲート操作回数、入出力操作の容易性など、スペックと課題を抽出する試験評価を行うことが、初期段階での取組と考えられる。

(2)社会インフラのモニタリング・予測基盤

リアルなフィジカル空間に配置された様々なセンサー、IoT 機器により環境の情報を収集する技術、収集された情報に基づいてサイバー空間にデジタルツイン(メタバース)を構築する技術、収集されたデータに基づいてデジタルツイン上で環境変化の予測・シミュレーション技術、予測・シミュレーション情報に基づく対処計画及びその計画による影響評価の技術などが本領域には必要となる。

社会インフラのレジリエンスは、自然災害への対応だけでなく、COVID-19 のようなパンデミックへの対応も含めて考えることができる。

平時における経済循環に組み込むことを想定すると、例えば、環境情報を収集するセンサー、IoT などは、農作物の種まき・収穫時期の予測などに使うとともに、災害の予兆にも使われる。シミュレーション技術に AI を活用して精度を向上する取組も進んでいるが、このような技術も、災害への対応だけでなく、農作などへのサービスと併用することが期待される。

①将来性(成長性・社会課題)

- ・地球環境の変化に伴う気象災害の激甚化や、将来日本付近で発生することが確実な超巨大地震に発生時に、基本的なインフラ機能などを保持し、また災害からの悪影響に対し抵抗できる強い芯を持ち、しなやかに回復できるシステム、コミュニティ、個人及び社会の力が、災害後の復興に必要となっている。

②技術・アイディアの革新性

- ・ライフラインインフラ(運輸、エネルギー、通信、水など)のメンテナンス体制は個別確立するも、それらを統合したデータ環境は未構築である。
- ・スーパーコンピュータによる、気象、地殻シミュレーション技術はこれまでも研究開発されてきたが、デジタルツイン上で社会インフラ等への影響度評価などは十分に行われていない。
- ・今後多数の打ち上げが想定される小型衛星による地理データのリアルタイム利用は、インフラモニタリングにおいても重要なデータソースとなる。

③日本の優位性

- ・我が国の国土に関するシステムであり、社会インフラに関する情報は我が国だけが有するもの。
- ・災害大国として、過去における災害データの蓄積が多い。
- ・スーパーコンピュータを用いた流体シミュレーションなど、シミュレーション技術は優れたものがある。
- ・センシング技術も重要な要素であるが、日本の強みが活かせる分野である。

④民間のみで取り組む困難性

・ライフラインインフラのデータは、エネルギー、通信などの複数領域企業及び自治体や政府の中にあり、中にはクローズしなければならないデータも存在するがその連結が必須であるため、政策主導でデータの統合とオープンクローズ領域の設定を行う必要があるため、民間企業のみでは困難である。

⑤重要経済安保技術

・重大災害発生時、サプライチェーン分断による経済の停滞、他国代替手段転換による国内産業衰退の可能性などから、重要経済安保技術と考えられる。

・また、国土に関わる情報統合プラットフォームとなるため、経済安保上重要である。

具体的な手段のテーマ例を、以下に示す。

〇具体的手段：設備・施設・インフラのデジタルツイン化

複数のデータ形式の異なるデータ群を統合し、デジタルツイン運用基盤を構築するとともに、各種シミュレーションや監視へ適用する。衛星画像やセンサー情報を組み合わせることで、地上に存在する設備・施設・インフラを包括的に管理・解析し、通常時の監視から災害時のリスク評価まで幅広く応用することを目指す。

本領域については、大変重要であるが、現在 SIP 第 3 期において「スマートインフラマネジメントシステムの構築」（図 3-4-13）プロジェクトの中でも進められており、NEDO として取り組むべき技術開発課題があるかの精査が必要である。



図 3-4-13　インフラのデジタルツインの研究例

出所：令和 5 年 11 月 17 日 SIP「スマートインフラマネジメントシステムの構築」キックオフシンポジウム資料
https://www.pwri.go.jp/jpn/research/sip/offerform/kickoffsympo_006.pdf

(3)自動化・省人化・デジタル化

我が国では、労働生産人口の減少、少子高齢化により、物流・運輸業、建設業、医療業、農林水産業等における深刻な人材不足の問題がある。2024 年の働き方改革により、物流・運輸業、建設業、医療業における労働力不足、2025 年には、団塊世代のおよそ 800 万人が後期高齢者となり、医療・介護現場における対応が迫られている。そこで、日本の強みである作業現場において、自動化・省人化・デジタル化を行い、人材不足という社会課題を解決する。

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。
- ・生成 AI は、ロボットと人との協働能力を飛躍的に向上させるとともに、ロボットの多様な作業能力を可能にする。
- ・20 世紀は、自動車の世紀であった。生成 AI を具備したロボットは、21 世紀をロボットの世紀にする。
- ・生成 AIとともに、人の指示を理解し、計画実行して、複雑な問題を解決する、自律性をもつ AI エージェントの市場も拡大が期待されている。

②技術・アイディアの革新性

- ・世界トップクラスのロボット技術とその利用技術に AI 技術を融合して、人とロボットの共生を実現することが期待される。

③日本の優位性

- ・生成 AI を用いた製造業のノウハウの継承など、実用的な生成 AI エージェントの形成・活用に強みがある。
- ・安全安心のきめ細かな AI エージェントやサービスロボットを実現することには日本の文化や慣習が活きる。
- ・内視鏡画像診断、創薬、物流などの応用分野における AI の活用は日本において活発である。

④民間のみで取り組む困難性

- ・製造ノウハウの知識化には、スキルと時間がかかり、熟練作業者には多大な負担がかかるため、効率的かつ迅速的に知識を伝承することが課題となっている。特にこの傾向は、日本のものづくりで重要な位置を占める中小企業において顕著である。
- ・アカデミアのシーズと企業のニーズを融合した、先端技術開発の場の形成が遅れている。
- ・産業分野における AI やデータサイエンティストの人材が不足しており、国としての人材育成と連携して進める必要がある。

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。

具体的な手段のテーマ例を、以下に示す。

○具体的手段 1：熟練作業者の技能を受け継ぐ AI エージェント

AI エージェントは、人の指示を理解し、計画実行して、複雑な問題を解決する自律型の AI である。高度な推論能力と意思決定力を持ち、人との協働作業、様々な業務対応を実現し、これらの分野の労働力不足の問題を解決する大きな可能性をもつ技術である。

生成 AI を活用し、これまでに蓄積されてきた作業に関するデータのみならず、熟練作業者のインタビュー内容等の記録データなどを分析・モデル化・形式化することで、熟練作業者のノウハウ等を知識化した AI エージェントを構築する。AI エージェントは、収集した形式知の体系化、強化、その価値創出への活用において、作業者を支援する。AI エージェントの汎化能力により、熟練作業者のスキルフルな作業を、作業者に伝承したり、ロボットに転移したりし、様々な作業で使うことを可能にする（図 3-4-14、図 3-4-15）。



生成 AI ロボットの試作品がレーザーポインターを手渡す様子。「プレゼンに使う道具」などの抽象的な指示を解釈し、手元にある物品の中から適切なものを選ぶことができる

図 3-4-14　生成 AI ロボット例

出所：デンソーの「生成 AI ロボット」は何ができる？「体」を手に入れた生成 AI の衝撃の実力（Seizo Trend） https://www.sbbit.jp/article/st/140316

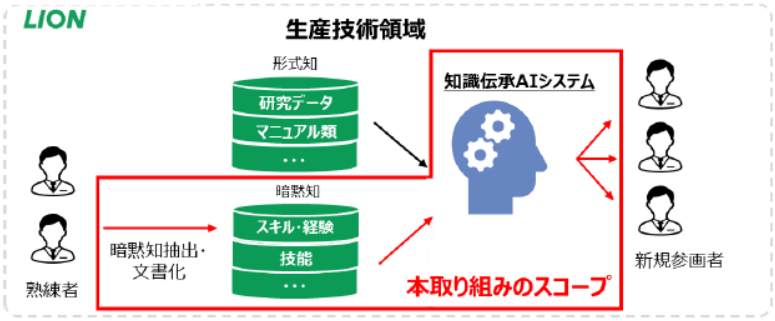


図 3-4-15　熟練作業者の技能を受け継ぐ AI エージェントのイメージ

出所：ライオン株式会社　株式会社NTTデータ プレスリリース（2024 年 6 月 3 日）
https://doc.lion.co.jp/uploads/tmg_block_page_image/file/9885/20240603_02.pdf

○具体的手段 2：協働型多機能自律ロボット

多様な作業能力、扱いやすいヒューマンインターフェースを備え、様々な環境で働くことのできるヒューマノイドロボット（図 3-4-16）を含む多機能自律ロボットを実現する。

人が使用する道具や環境に適合して、バーバル及びノンバーバル[168]なコミュニケーションにより、新たなプログラムレスで、人と協働するヒューマノイドを含む様々な環境で働く多機能自律ロボットを構築し、ロボットの新たな世界市場を開拓する。マルチモーダルな入力を基に End to End で自律的に様々な作業を実行するための基盤モデルに、専門作業知識のオンデマンド事後学習を行うフィジカル AI エージェントを構築する。

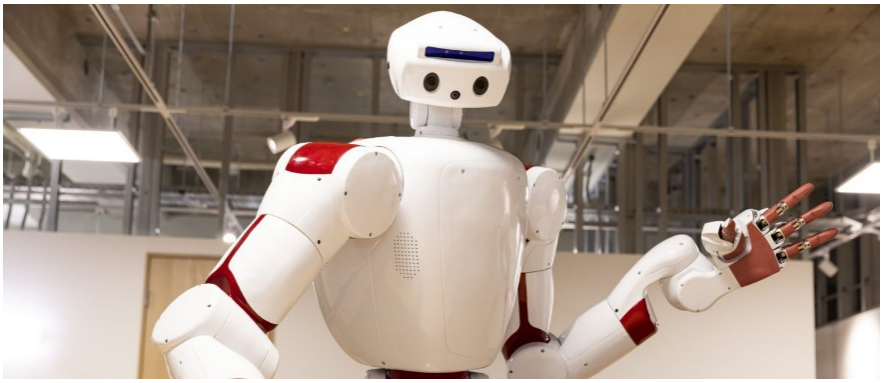


図 3-4-16　ヒューマノイドロボット例

提供：JST ムーンショット型研究開発事業「目標 3」菅野重樹 PJ

[168] BCI（ブレインコンピュータインターフェイス）、BMI（ブレインマシンインタフェース）を含む

○具体的手段 3:物流現場における作業の自動化及び業務効率化

物流現場における作業の自動化及び業務効率化を実現するために、荷待ち・荷役の削減、積載率の向上、再配達削減のための、AI エージェント開発を進める。

荷待ち・荷役の削減は、AI がカメラ映像から自動検知したトラックドライバーの荷待ち・荷役の時間を計測し、時間を要した動作の分析を行い、業務効率化につなげる。

積載率を向上するために、AI による画像解析を用いて、トラック内の積載量を算出し、積載率の低い路線や便を算出する。さらに、生成 AI の意味的情報より、荷物の構成を算出して効率化を図る。

再配達削減は、スマートメーターの電力データを AI で解析して、在宅・不在を予測し、AI による最適ルートで配送する。国内では、世界初の「AI 活用による不在配送問題の解消」フィールド実証実験にて、不在配送を約 20%削減した事例がある。

○具体的手段 4:デジタルツインによる自動運転の開発の効率化

デジタルツイン、シミュレーション、モデルベース開発による自動運転の開発の効率化を実施する。

デジタルツインは、仮想 3 次元空間に、製品、施設物、プロセスをデジタルで複製することで、実際のシステムの挙動をリアルタイムで監視し、最適化することにより、走行・運転シミュレーション、工場製造ラインに適用して、開発の効率化を図る。シミュレーションは、複雑な交通状況、天候の変化、進路状況等を緻密に模倣した世界において、様々なシナリオの自動車の多様なふるまいをテストし評価する。モデルベース開発は、シミュレーターで可視化された動きを実際に見て検証する。

○具体的手法 5:不足する AI・IT 専門家を補助する AI エージェント

AI・IT 専門家人材不足に対応する、AI エージェントによる業務自動化及び効率化を図る。AI によるプログラム補助作業、AI によるコード生成、AI によるバグ検出及び修正、AI による膨大なデータ分析補助、AI によるドキュメントの自動生成の開発を行う。

○具体的手段 6:量子機械学習による創薬の開発

AI と量子技術を融合した量子機械学習（QML）による創薬の開発は、分子結合配向の探索及び薬物吸収等の複雑な最適化に適しており、新薬の開発期間

を大幅に短縮し、新薬開発の成功率を上げることが期待される。我が国は世界有数の創薬国であり、AI 創薬においてスタートアップ企業と製薬企業の連携が進んでいる。

○具体的手段 7：医療 AI による医師の負担軽減及び効率化

画像診断支援 AI、問診支援 AI、遠隔診療 AI 及び Ai 処方の開発による、医療現場における医師等の負担軽減、診断の精度向上、事務作業の効率化及び医師過誤の防止等を図る。

日本の画像診断支援 AI システムの世界市場の占有率は世界トップであり、最先端の研究開発が進められている。今後、当該分野の世界市場は一層拡大することが予想されている。

3-5 マテリアル分野

3-5-1 分野の俯瞰

本節では、『マテリアル』に焦点を当て、社会課題とマテリアルの関係についての調査結果と、調査結果等の分析によるフロンティア領域の特定について記載する。

本節における『マテリアル』の定義については、単に物質という意味でなく、素材、部材に加え、それらを用いた部品、デバイス等を含む意味で用いている。さらに『マテリアル産業』を考える場合には、マテリアルを製造するためのプロセス技術についても考慮する。具体的には図 3-5-1 に示す多種多様な品目や技術を含む分野と理解される。

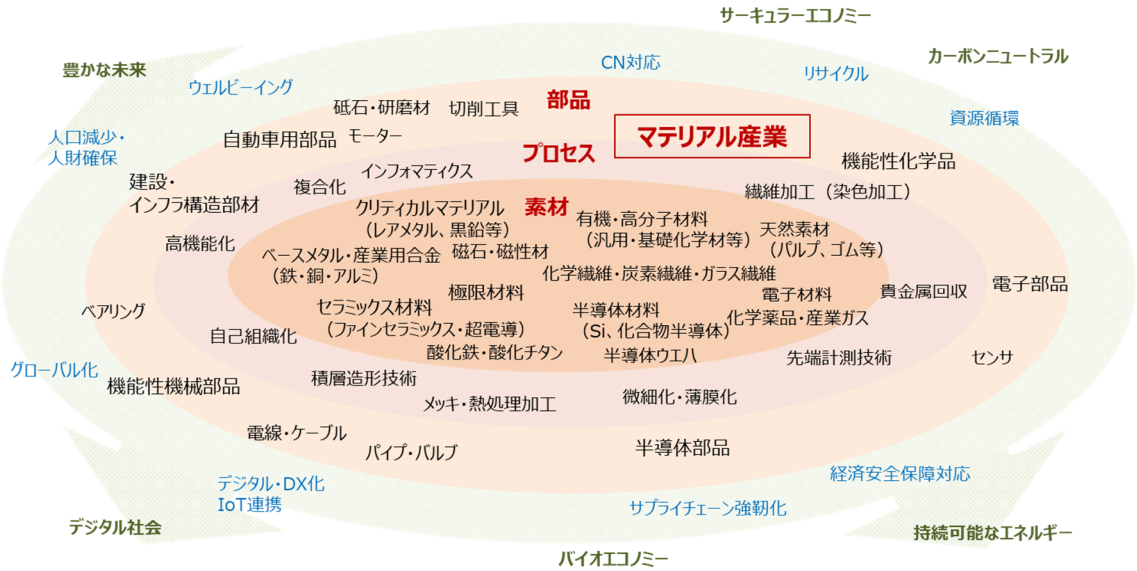


図 3-5-1　マテリアル分野の俯瞰

日本のマテリアル産業について 2021 年 4 月に公表された『マテリアル革新力強化戦略』では、マテリアル開発の歴史に触れ、「人類の歴史は、鉄、金属、プラスチック、ファインセラミックス、エレクトロニクス材料といった、マテリアルの発展の歴史でもあり、マテリアルは世界を支える存在である。」「マテリアルは、これまで、何度も世界を大きく変えてきている」としている。「我が国は、積み上げ型の開発を得意とし、技術を磨きあげることにより、革新的なマテリアルを生み出してきた。」とあり、人間社会の物的側面の根幹をマテリアルが担っており、その研究開発において日本が大きな役割を果たしてきたことが述べられている。そして、この役割を未来に向けて継続することが求められている。

NEDO では、日本のマテリアル産業の特徴を明らかにすべく、継続的に調査を実施している。本節では、以下の調査で得られた情報を、フロンティア領域を特定する上での基礎とした。

【マテリアル分野における俯瞰調査】

［調査 1］ 超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト/情報収集事業/材料技術分野における俯瞰調査（2019 年度）

［調査 2］ デジタル技術との連携によるマテリアル産業競争力強化に係わる調査（2021 年度）

［調査 3］ マテリアル領域の俯瞰分析に関する調査（2024 年度）

調査 1 については、「ナノテクノロジー・材料技術分野の激しい国際競争を我が国が勝ち抜くための技術開発事業の企画立案、マネジメント等に資するための情報基盤を構築するため、ナノテクノロジー・材料技術分野の国内外の政策や技術開発の進展等最新の情報を把握すると共に、世界の市場やプレーヤーが急速に変化、多様化し、各国の基礎研究や先端技術への取組は、精力的・戦略的になっており、材料技術分野の研究開発と実用化の好循環を実現し、世界の中で日本が存在感を発揮するために、国内外の政策や技術開発の進展等最新の情報を把握する必要がある。本調査では、10 年～15 年後の将来に予測される社会や、日本の技術の状況を想定したうえで、今後日本として取り組むべき技術、解決すべき課題を整理することを目的」[169]として調査を実施した。

文献・資料の調査とマテリアル分野の有識者 30 名に対するヒアリング議事録に対し、テキストマイニングの手法を用いてマテリアル関係の語句の抽出と語句間の関係性を分析した。その結果に基づく 58 項目の「科学技術的課題」を定義し、同課題を結節点とした社会課題-科学技術的課題-技術シーズ（例）の相関関係を整理した。その上で、各科学技術的課題の重要度を社会的評価（社会スコア）と技術的評価（技術スコア）の 2 軸で評価し、必要に応じて整理・統合した上で最終的にはマテリアル分野に関する 18 項目の重要な科学技術的課題にまとめた。

[169] 超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト/情報収集事業/材料技術分野における俯瞰調査（NEDO、2019）より引用。

18 項目の重要な科学技術的課題とは以下のとおりである。

社会課題(1) 持続可能な社会・地球環境 関連
　項目 1 交通・通信部門の環境負荷低減
　項目 2 再生可能エネルギー効率化・低コスト化
　項目 3 CO_2 の回収・貯留・利用
　項目 4 革新的蓄電池
　項目 5 水素エネルギー利用(製造・貯蔵含む)
　項目 6 資源の回収・分離・再生・有効活用:サーキュラーエコノミー
　項目 7 人工光合成
　項目 8 水資源の安定確保
社会課題(2) 快適で豊かな人間性尊重社会
　(他の項目と統合)
社会課題(3) 平和で安全・安心な社会 関連
　項目 9 レジリエントな社会実現のためのインフラ
　項目 11 海洋・地球外の活用
社会課題(4) 健康・長寿のヘルスケア・医療・介護 関連
　項目 10 人にやさしい材料
社会課題(5) 共通基盤 関連
　項目 12 材料開発を支える高度計算・解析技術
　項目 13 超低消費電力・超大容量不揮発メモリ(高度情報化社会を支えるデバイス)
　　(社会課題(2) 快適で豊かな人間性尊重社会より移動)
　項目 14 超低消費電力高機能/高速デバイス(高度情報化社会を支えるデバイス)
　　(同上)
　項目 15 高密度 3 次元実装と熱設計(高度情報化社会を支えるデバイス)
　　(同上)
　項目 16 各種センサー
　　(社会課題(4) 健康・長寿のヘルスケア・医療・介護より移動)
　項目 17 3D プリンティング等の生産技術
　　(社会課題(2) 快適で豊かな人間性尊重社会より移動)
　項目 18 材料・プロセスの自動設計
　　(同上)

調査 2 については、俯瞰の視点を変えてマテリアル産業におけるビジネスモデルに注目した俯瞰を実施した。まず、マテリアル産業をマテリアルの種類によらず三つの事業タイプ（高機能品タイプ、優良グレード品タイプ、汎用品タイプ）に分類し（図 3-5-2）に分類可能ではないかという初期仮説をおいた。

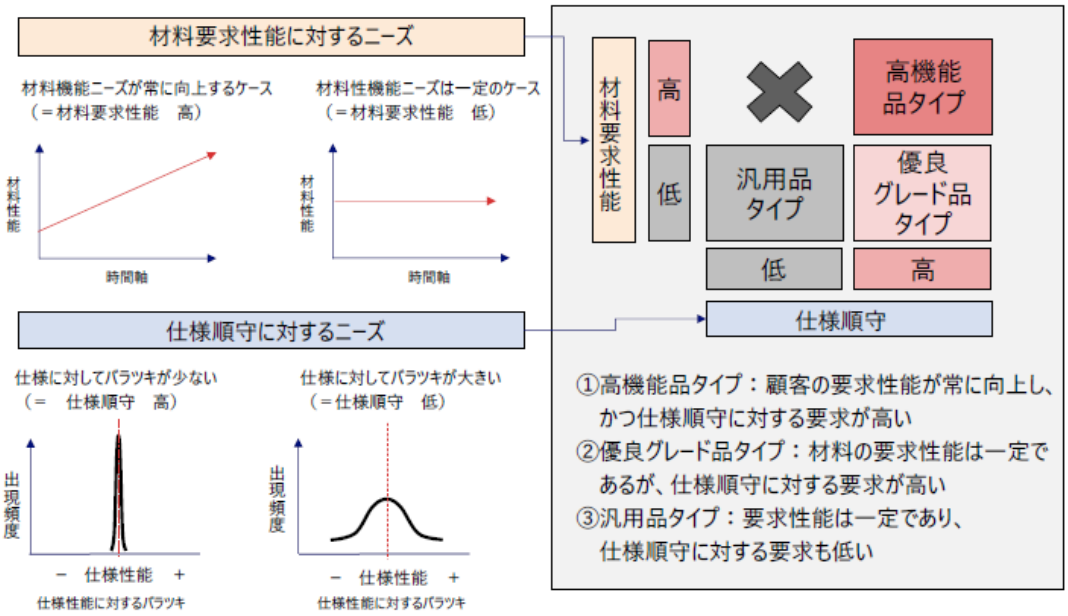


図 3-5-2　マテリアル事業タイプ分類における初期仮説

出所：デジタル技術との連携によるマテリアル産業競争力強化に係わる調査（NEDO、2022）

本仮説の検証も含め、それぞれの事業タイプにおける現状と課題について国内のマテリアル関連産業 21 社にヒアリング調査を実施した。ヒアリング調査より判明した事項は以下の 2 点に要約される。

- 日本のマテリアル産業の高機能品タイプと優良グレード品タイプは依然として競争力を有する。
- 日本企業は主として性能の差別性によって競争力の強化を図っている。一方、海外マテリアル企業は顧客の業務プロセスに対するソシューション提案に注力している。海外マテリアル企業の一部はデジタル技術を活用して、優良グレード品タイプへの展開を加速しており、我が国マテリアル企業の脅威となっている。

企業ヒアリングによって得られた情報の一つ目として、高機能品タイプの動向について示す。

高機能品タイプでは、世界の先端ユーザーであるセット企業（例えば、最先端半導体製造企業等）との『すり合わせ』による技術開発力が強みの源泉となっている。セット企業から技術課題が提示されると、過去に蓄積された暗黙知の中から新たな材料を提供している。すり合わせの業務は「ユーザー要求の理解」「要求に対応した材料組成構造の設計力」「仕様に即した製品生産力」に分解される。これらの機能についてデジタル技術を活用することにより強化できれば、国際競争力の維持・強化が期待できる。粘り強く顧客とすり合わせを通じて顧客の求める品質目標にこだわり一丸となって遂行するという日本人の気質と合致していることが強みとなっている。

顧客の要求を満たす新しい材料の開発を行うためには、研究開発力、その材料を安定的に生産できる製造装置ならびに材料製造ノウハウが重要となる。この三つがそれぞれ進化することによって、常に新しい材料を開発できることを強みとしている。すなわち競合他社がコピー商品によりキャッチアップするスピードを上回り、常に進歩することが高機能品タイプでの強みとなっている（図 3-5-3）。

従来、対象とする先端ユーザーは日系企業であったが、近年は対象となる先端企業が海外にシフトしている。高機能品タイプの事業を行っている企業は、今後もこの事業のやり方は有効であるとの回答が寄せられた。

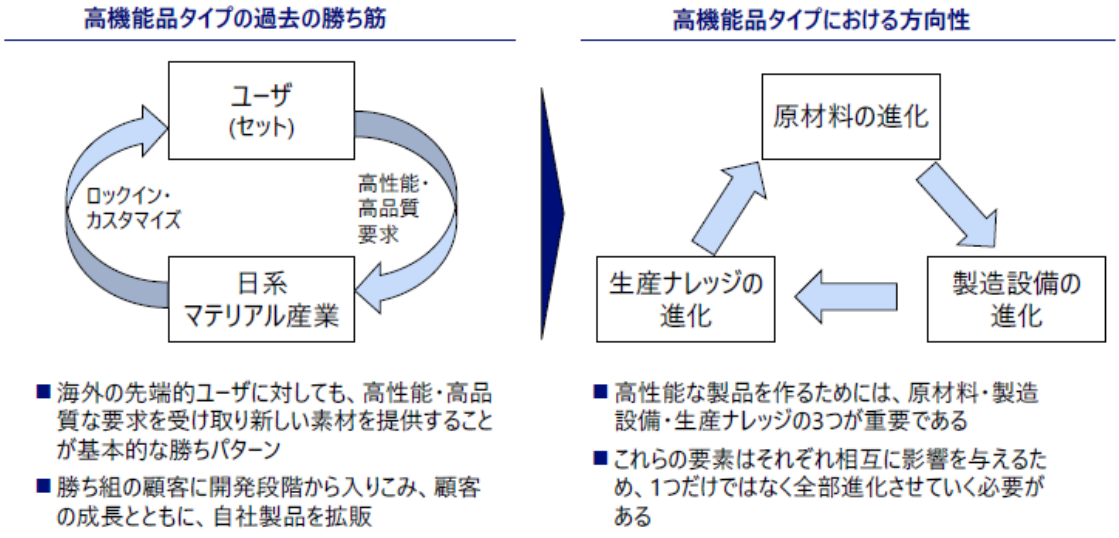


図 3-5-3　高機能品タイプの現状と今後の方向性

出所：デジタル技術との連携によるマテリアル産業競争力強化に係わる調査（NEDO、2022）

企業ヒアリングによって得られた情報の二つ目として、優良グレード品タイプの動向について示す。

優良グレード品タイプの場合、材料性能に対する要求が一定水準に到達するとそれ以上の改善は求められなくなり材料品質での差別化が難しくなる。このため材料品質や加工精度に対する高い仕様順守を維持して供給することが顧客に対する提供価値となっている。ヒアリング結果を図 3-5-4 に示す。仕様順守率の高いマテリアルをつくる上で現場に蓄積された量産工程でのモノづくりのナレッジが強みの源泉となっている。

材料品質面で競合他社との差別性は少ないが、量産品質の安定性や材料加工レベルの差異により他社と差別化する事業タイプである。優良グレード品タイプは、日本国内工場の現場の製造能力に支えられ競争力を維持できている。

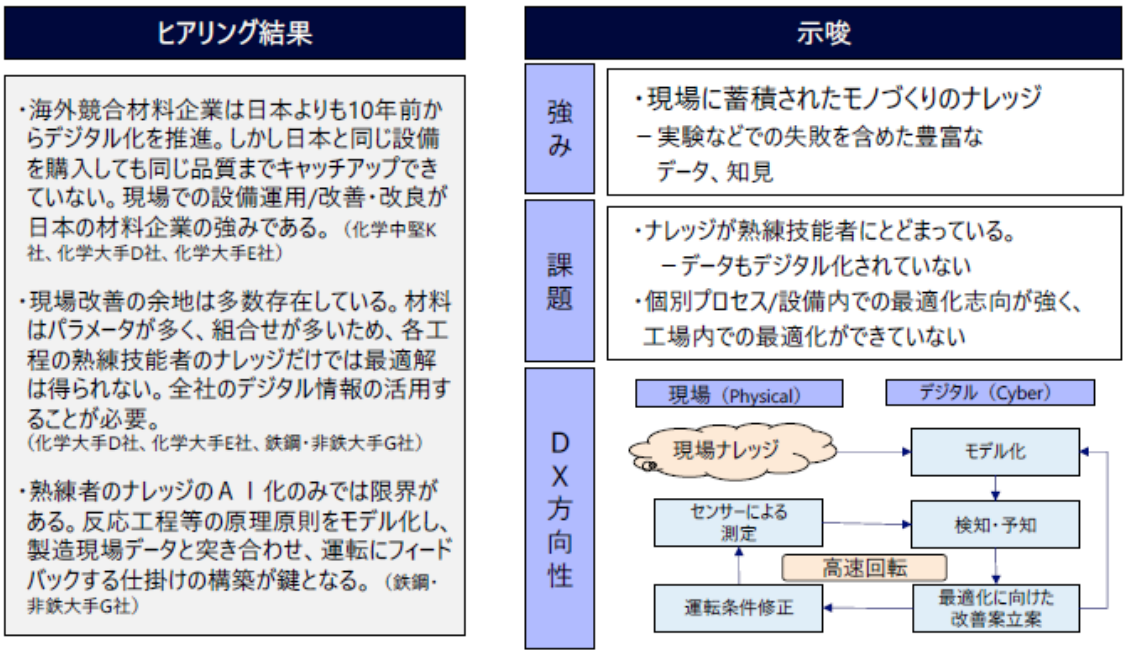


図 3-5-4　優良グレード品タイプの強みのヒアリング結果

出所：デジタル技術との連携によるマテリアル産業競争力強化に係わる調査（NEDO、2022）

3-5-2 解決すべき社会課題（M）

前項の調査結果は、マテリアルが関与する社会課題が多岐にわたることを示している。TSC は「実現すべき 12 の社会像」[170]を公表したが、関与の程度の大小はあっても、マテリアルが実現に関与しない社会像はないと言える。その中で、マテリアルで実現すべき根本的な社会課題としては、『基幹産業・技術の創成による持続可能な社会の実現』を据えるのが、他の社会像に実現につながる意味から妥当であると考える。

すなわち、新たなマテリアルの創成や既存マテリアルの新たな組合せ等の研究・開発が日本において不断に行われ、メイド・イン・ジャパンのマテリアルを搭載した画期的な製品が継続的に社会実装されることにより、マテリアル産業における日本の優位性が将来にわたって維持・強化されることが、マテリアルの「持続可能な社会」の実現に対する基本的な役割であると考えられる。

社会像の実現のためには、以下の 3 点がマテリアルの研究・開発の「勝ち筋」として重要であることが前項の調査結果より示された。

- ○種々の社会課題の解決に対し重要と判断されるマテリアルを適切に見定めること。
- ○重要とされるマテリアルにおいて日本の得意分野である高機能品タイプのマテリアルを継続的に生み出すこと。
- ○さらに高機能品タイプを起点として市場の大きな優良グレード品タイプに展開する道を確保し、市場の創出あるいは拡大に寄与すること。

上述の勝ち筋を踏まえ、注目する社会課題の解決に関与し、かつ高機能品タイプとなり得るマテリアルの領域を特定し、これをもってマテリアル分野におけるフロンティア領域の提案に資することとする。

[170] 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、2021）

3-5-3 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向

調査 1 で重要とされた科学技術的課題に対し市場競争力や技術競争力を個別に調査した[171]。

マテリアルの種類という観点から調査 1 の結果（技術シーズ例）を見直すと、

・AI やパワー系の用途をはじめとする半導体
・宇宙を対象とした用途に用いられる材料
・様々な用途のセンサー
・量子の特徴を応用した材料
・再利用容易性や生分解性などの特色を有する材料
・エネルギー分野で用いられる触媒
・（基盤的な技術として）材料に係わる計測、予測技術

が複数現れており、マテリアルの勝ち筋として示した、「社会課題の解決に対し重要と判断されるマテリアルを適切に見定める」という観点からは、上記マテリアルが示す領域に重要性があるという結論が見て取れる。

【マテリアル革新力強化戦略における考え方】

前述のマテリアル革新力強化戦略では、目指すべき姿として、「マテリアル革新力を高めることにより、経済発展と社会課題解決が両立した、持続可能な社会への転換に、世界の先頭に立って取り組み、世界に貢献」とある。また、当該戦略では、マテリアルの特徴として、次のように捉えている。最終製品の構成物である一方で、最終製品の各種機能の源泉であり、我が国産業経済の強みの一つである。しかしながら、実社会では、最終製品の性能にのみ光が当たり、それを実現しているマテリアル自体の機能が広く認知されることは少なく、マテリアルは、必ずしも正当に評価されていない。例えば、AI、バイオ、量子技術、半導体といった先端技術分野の発展には、我が国が得意とする、シリコンや光ファイバーの製造技術といった、マテリアル分野の寄与が極めて大きい。一方で、マテリアル関連製品のライフサイクルが短縮し、製品は短期間でコモディティ化している。マテリアルの高機能化が常に求められ、絶えず、コストが問われ、過当競争にさらされている。一方で、多様な組合せを含めれば、考え得るマテリアルの種類に限りはなく、人類のフロンティアともいえる領域が広がっており、そこにマテリアルの研究開発の醍醐味（ワクワク感）がある。開発した製品の活用先、いわゆる出口を新規に開拓する努力を強いられる場合も多いが、開発したマテリアルが社会に貢献できたときの達成感は非常に高い。

[171] 超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト/情報収集事業/材料技術分野における俯瞰調査（NEDO、2019 年度）

さらに当該戦略では、社会課題の解決に必要となるイノベーション創出に向けた「重要な技術領域」として関係省庁が連携して取り組む必要性が述べられていて、そのうち、バックキャスト型研究で戦略的に取り組むべき重要な技術領域例としては、以下戦略で記載の順で、

・高度な機能発現を可能にするマテリアル[172]

・量子・電子制御により革新的な機能を発現するマテリアル[173]

・革新的なエネルギー変換を可能とするマテリアル[174]

・マテリアルの高度循環のための基盤技術[175]

・極限機能を有するマテリアル[176]

が挙げられ、マテリアルデータや製造プロセス技術、先端共用設備を最大限活用した取組を推進し、世界に先駆けて飛躍的な成果を創出し、迅速な社会実装につなげることが目標達成に向けた方策として述べられている。マテリアル革新力強化戦略における重要な技術領域の考え方も、本節でフロンティア領域を特定する上で参考とすべき考え方である。また、市場・技術・政策の動向の詳細については、3-5-4 項でまとめて説明する。

[172] パワーエレクトロニクスデバイス、IoTセンサー、アクチュエータ、MEMSなど。
[173] 量子センサー、スピントロニクスデバイス、量子暗号通信、ナノエレクトロニクスデバイスなど。
[174] 高出力大容量蓄電池、エネルギー変換材料、高性能モーター、熱電素子など。
[175] リユース・リサイクルを前提とした材料・製品設計技術、希少元素代替技術、資源利用量低減技術、CO_2 分離・回収・利用技術、材料分離技術、生分解性材料技術など。
[176] 超耐熱・耐火材料、軽量・高強度材料、極限環境構造材料など。

3-5-4　社会課題の解決のために取り組むべき領域(F):極限マテリアル

マテリアルにおけるフロンティア領域を特定する方針として、近年市場面・技術面の注目度が増していること[177]に加え、複数の社会課題への関連が想起されるマテリアルを選択するという基本的な考え方に基づき、調査 1 において重要視された技術シーズ例をさらに大括りすることを試みた。すなわち、マテリアルの性能、例えば耐熱性や強度、耐食性などの材料特性や、光学特性や磁性、熱伝導、導電性などの材料物性が極限に迫る領域まで要求される、あるいはマテリアルの耐久性の極限に迫るような環境、例えば超高温、超高圧、超高磁場やプラズマ環境で使用されることが必要とされているものが散見されること、またこれらのマテリアルは常にマテリアルの機能向上が当該マテリアルの持つ限界に漸近する形で求められている(すなわち調査 2[178]でいう「高機能品タイプ」に属する[179])ことを考慮し、上記マテリアルを一括して『極限マテリアル』と呼ぶこととした。

極限マテリアルを用途の点から見ると、調査 1 の結果にもあるとおり「宇宙を対象とした用途に用いられる材料」等が近年いっそう注目されている。

ロジックモデルで見た当該分野の俯瞰を改めて図 3-5-5 に示す。解決すべき社会課題として『基幹産業・技術の創成による持続可能な社会の実現』を根本におくことで、様々な社会課題の解決にマテリアルが貢献することを目指す。マテリアルの領域としては、前述のマテリアル革新力強化戦略に五つの領域が述べられているが、フロンティア領域として『極限マテリアル』の可能性を以下に記載する。極限マテリアルの具体例としては、高温超電導導体及びパワーレーザー等に用いられる超高性能光学マテリアルを主に取り上げて検討する。

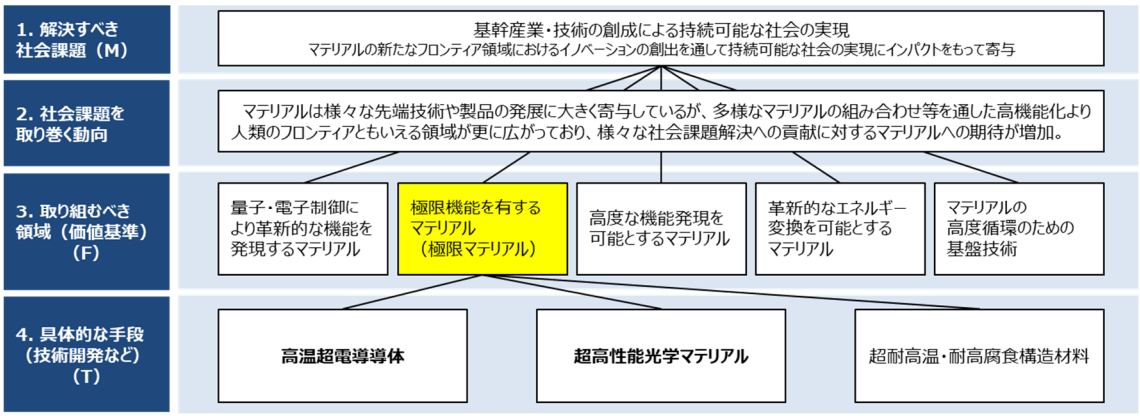


図 3-5-5　ロジックモデル(MFT)で見た社会課題とフロンティア領域(極限マテリアル)

[177] 将来性(成長性・社会課題)、技術・アイディアの革新性としてフロンティア領域選定の基準となる考え方。
[178] 情報収集費/デジタル技術との連携によるマテリアル産業競争力強化に係わる調査(NEDO、2021 年度)
[179] 日本の強みが発揮できるという意味でフロンティア領域選定の基準となる考え方。

極限マテリアル分野の開発により創出が予想される市場について様々なデータから独自の分析を行うとともに、技術動向や政策動向についても調査を行った結果について示す。

(1)市場分析から見た日本の強み

NEDO 調査データ[180]に基づく各製品の市場の伸びの分析によれば、極限マテリアルはマテリアル全体と比較して成長率の高い領域(図 3-5-6 の矢印部)に製品数のピークが見られ(、日本の新しい産業分野を切り開くキーマテリアルとして期待されていることが示唆されている。

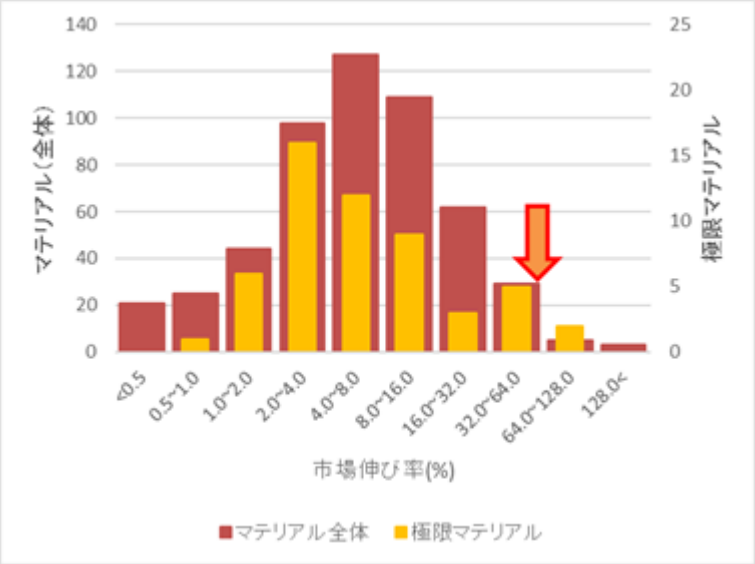


図 3-5-6　マテリアル関係市場伸び率の分布

出所:2023 年度 日系企業のモノと IT サービス、ソフトウェアの国際競争ポジションに関する情報収集のデータを基に NEDO イノベーション戦略センター作成

創出される市場規模については、上記成長率を考慮すると、極限マテリアル全体としてマテリアル市場全体に占める割合が 5%(2022 年)→10%(市場創出額は金額ベースで 100 兆円(2040 年時点、世界全体))を見込む[181]。

[180] 日系企業のモノと IT サービス、ソフトウェアの国際競争ポジションに関する情報収集

[181] 上記 NEDO 調査を基に、極限マテリアルの直近 5 年間の CAGR が 9.1%、マテリアル全体の CAGR が 6.2%であることから推算。

以下、具体的なマテリアルを例として市場予測を述べる。極限マテリアルの一例として、超電導導体[182]を用いた製品群の市場規模予測(国内、海外)を示す(表 3-5-1)[183]。

表 3-5-1　超電導技術の市場規模一覧(単位:億円)

技術分野	国内市場(2030 年予想)	海外市場(2030 年予想)
MRI	12,000	95,000
産業用モータ	899	10,300
NMR	1,530	10,000
超電導ケーブル	1,347	8,586
船舶用モータ	185	3,305
風力発電機	28	3,276

出所:平成 26 年度　超電導機器の市場形成に資する技術戦略策定に向けた調査報告書(2015)

極限マテリアルのその他の例としては、超高温など極限的な条件で用いられる構造材料(極限環境構造材料と称する)がある。極限環境構造材料の代表格であるセラミックス基複合材料(CMC)の世界市場規模は、2035 年時点で約 35,000 億円と予想されている[184]。また、金属系の代表格であるタングステンの世界市場規模は 2031 年時点で約 13,000 億円[185]、モリブデンの世界市場規模は 2030 年時点で約 15,000 億円[186]と予想されている。

[182] 以下特に断らない限り、超電導には低温超電導と高温超電導を含む。
[183] 平成 26 年度　超電導機器の市場形成に資する技術戦略策定に向けた調査報告書(2015)
[184] 「世界のセラミックマトリックス複合材料市場に関する調査レポート　ー　予測 2023 - 2035 年」(Research Nester Inc.、2023)に基づき TSC にて日本円に換算。
[185] 「タングステン市場:用途別(金属合金、炭化タングステン、圧延製品)、最終用途別(自動車部品、航空宇宙部品)、地域別の情報 - 2031 年までの予測」(Straits Research、2024) に基づき TSC にて日本円に換算。
[186] 「モリブデンの世界市場-2023 年～2030 年」(グローバルインフォメーション、2023) に基づき TSC にて日本円に換算。

(2)市場支配の観点から見た日本の強み

日本の強みについては、市場の伸びに加え、市場支配の観点から前述の NEDO 調査のデータを分析した。すなわち、ある製品の市場シェアにおいて一国が 50%以上を占めている場合に、「(その国が)当該製品の市場を支配している」と定義する。このような定義のもとでマテリアルを国別に比較すると、マテリアル全体(品目数ベース)では日本が約 30%の品目を支配しているのに対し、極限マテリアルでは日本の支配率は 50%近くに増加する(図 3-5-7)。さらに本分析からわかったことは、極限マテリアル領域には中国の支配が及んでいないことである。中国の支配の及んでいないこのような領域においていち早く日本の市場支配を確立することが、日本の勝ち筋を考える上で重要と考えられる。

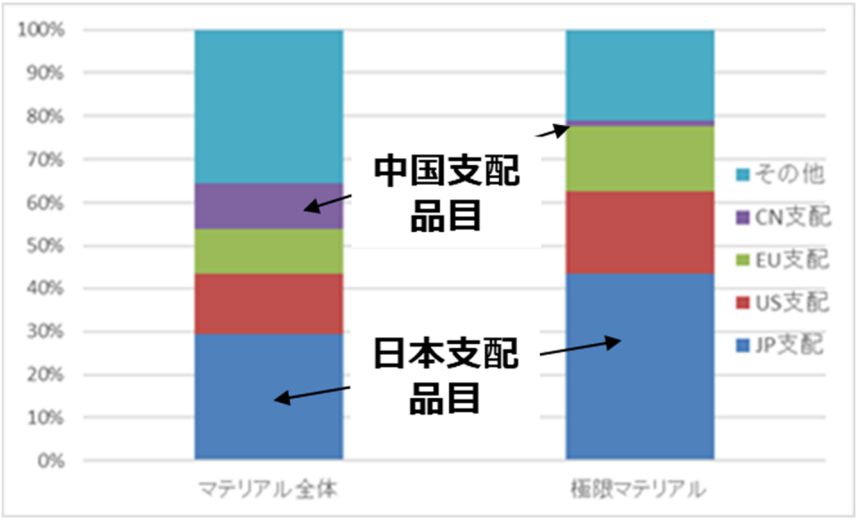


図 3-5-7　マテリアル関係市場の各国支配状況(品目数ベース)

(3)技術動向

技術的発展については、極限マテリアル関連で世界的に見て技術開発が活発に行われていることがわかった。TSC の調査では、マテリアル分野の投稿論文数の伸び率は直近 20 年の平均で 6.7%を示すが、極限マテリアルに関係する投稿論文は実数としては少ないものの、直近 20 年の平均で 10.9%の伸びを示し、本分野の研究開発がマテリアルの中でもとりわけ注目されていることを示している[187]（図 3-5-8）。

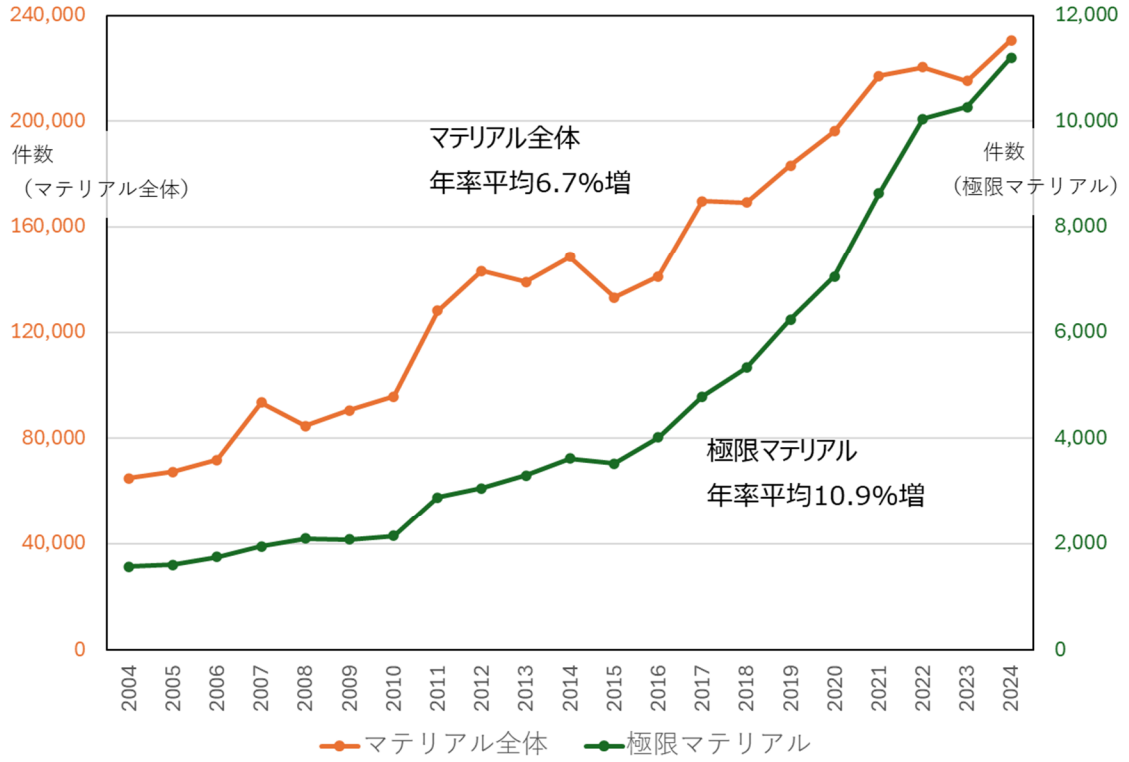


図 3-5-8　直近 20 年のマテリアル関係投稿論文数の推移

出所：Web of Science™ データを基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2025）

[187] うち、日本の占める割合は 4.3%で 5 位。

極限マテリアル分野における日本の位置付けを理解するため、極限マテリアルと称するカテゴリーの論文が出始めた 1990 年代から現在に至る論文投稿数（各国の研究者 100 万人あたり）の経年変化を国別に調査した（図 3-5-9）。

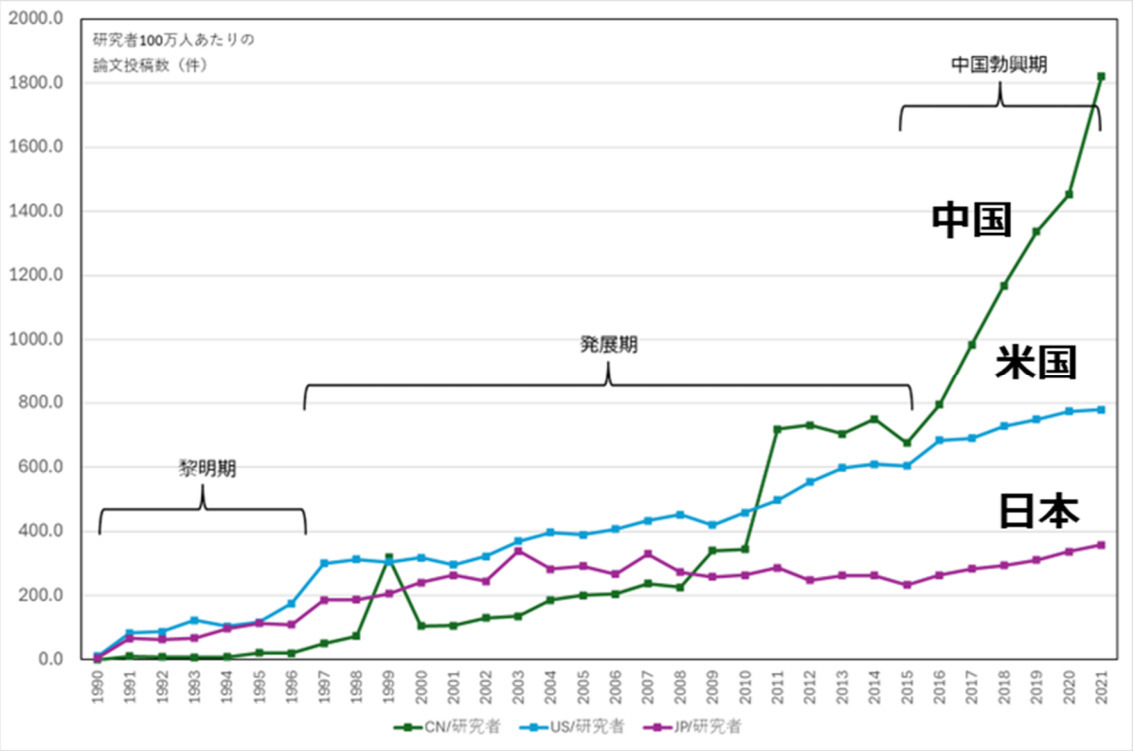


図 3-5-9　極限マテリアルに関する論文投稿数（研究者 100 万人あたり）の経年変化（国別）

出所：Web of Science™ 並びに NISTEP データ[188]を基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2025）

図 3-5-9 における折れ線の傾きから、極限マテリアルの研究開発時期を大きく次の三つに分けて考える。

・黎明期（～1990 年代前半）
　極限マテリアルに関する研究成果が発表され始めた時期
・発展期（1990 年代後半～2010 年代後半）
　極限マテリアルに関する研究が活発になってきた時期
・中国勃興期（2010 年代後半～）
　中国の論文投稿が際立って増加した時期

[188] 研究者数の出所：科学技術指標 2024　統計集　P83　表　2-1-3　主要国の研究者数の推移（NISTEP、2024）

表 3-5-2 に全調査期間及び黎明期における主要研究機関（学術、企業を問わず）を投稿件数の多い順にリストした。

表 3-5-2　極限マテリアルに係わる主要研究機関

順位	全期間（1990~2025）	黎明期（1990~1994）
1	CHINESE ACADEMY OF SCIENCES(CN)	UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY DOE(US)
2	UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY DOE(US)	CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS(FR)
3	CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS(FR)	INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES IBM(US)
4	UNIVERSITY OF CHINESE ACADEMY OF SCIENCES CAS(CN)	UNIVERSITY OF CALIFORNIA SYSTEM(US)
5	UNIVERSITY OF CALIFORNIA SYSTEM(US)	UNIVERSITY OF TOKYO(JP)
6	HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY(CN)	OSAKA UNIVERSITY(JP)
7	INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY SYSTEM IIT SYSTEM(IN)	TOHOKU UNIVERSITY(JP)
8	TSINGHUA UNIVERSITY(CN)	NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY(US)
9	HELMHOLTZ ASSOCIATION(DE)	HITACHI LIMITED(JP)
10	ZHEJIANG UNIVERSITY(CN)	UNIVERSITY OF TEXAS SYSTEM(US)
11	RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES(RU)	AT & T(US)
12	XI AN JIAOTONG UNIVERSITY(CN)	HELMHOLTZ ASSOCIATION(DE)
13	UNIVERSITY OF SCIENCE TECHNOLOGY OF CHINA CAS(CN)	NIPPON TELEGRAPH TELEPHONE CORPORATION(JP)
14	SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY(CN)	NOKIA BELL LABS(US)
15	SWISS FEDERAL INSTITUTES OF TECHNOLOGY DOMAIN(CH)	RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES(RU)
16	HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE TECHNOLOGY(CN)	UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE(US)
17	CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE CNR(IT)	NATIONAL AERONAUTICS SPACE ADMINISTRATION NASA(US)
18	UNIVERSITY OF SCIENCE TECHNOLOGY BEIJING(CN)	STANFORD UNIVERSITY(US)
19	SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY(CN)	UNITED STATES NAVY(US)
20	SICHUAN UNIVERSITY(CN)	UNIVERSITY OF CAMBRIDGE(EN)

出所：Web of Science™ のデータを基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2025）

全期間では中国のアクティビティーを反映して多くの中国組織がランクインしているのに対し、黎明期の特徴は 3 点あることが判明した。1 点目の特徴は、東大、大阪大、東北大などの日本の大学が本領域に既に注目しており論文投稿の上位にランクインしていることである。これらの大学組織は黎明期以来、米国や欧州の研究機関と遜色ないアクティビティーを保っており、日本における研究開発拠点として機能していることがわかった。また、国研としては上位 20 位には入っていないが産総研や物質材料研究機構が黎明期より論文投稿しており、これらの国研組織も黎明期から極限マテリアルの研究開発拠点として活動していることがわかった。

2 点目の特徴としては、特に米国では宇宙関係や軍事防衛関係の研究機関が上位にランクインしていることである。極限マテリアルの黎明期においては、極限マテリアルの性能を宇宙・防衛用途に用いる関心が高かったと推測される。このような関心の高さが発展期における米国の論文投稿数の増加に結びついたと考えられる。

3 点目の特徴としては、表中に赤字で示したとおり、日本と米国において黎明期から極限マテリアルに注目していた企業が存在することである。

企業の極限マテリアルに対する研究開発の取組をより詳細に分析するため、当該領域で論文投稿の多かった以下の企業について論文投稿数の経年推移を比較した[189]。

【日本】

日立製作所　黎明期から現在まで 1～10 件/年の頻度で論文投稿を継続。

東芝　黎明期から 2010 年代後半まで 1～10 件/年の頻度で論文投稿を継続。2010 年代後半から活動低調に。

日本製鉄　黎明期から現在まで数件/年の頻度で論文投稿を継続。

NTT　黎明期から現在まで数件/年の頻度で論文投稿を継続。

【米国】

IBM　黎明期から現在まで 1～10 数件/年の頻度で論文投稿を継続。

AT&T　黎明期から 2000 年まで数件/年の頻度で論文投稿するも、それ以後ほとんど投稿なし。

NOKIA（ベル研）　黎明期から 2000 年まで数件/年の頻度で論文投稿するも、それ以後ほとんど投稿なし。

Intel　2000 年以降、数件～10 数件/年の頻度で論文投稿を継続。

[189] NEDO イノベーション戦略センター調べ（2025）。

米国では極限マテリアル領域で継続的に論文投稿を続けている企業が IBM や Intel などのマテルアルのユーザー企業に限られているのに対し、日本では日本製鉄のようなマテリアルのサプライヤー企業が継続的に論文投稿している点が特徴的である。年に数件でも論文投稿が見られるということは、当該企業において極限マテリアルの研究開発を行う組織があり、研究開発活動が行われているということを意味する。企業が研究開発拠点をおいて長期間の研究開発を地道に行っていることが日本の大きな特徴である。

各国別の論文投稿で見た主要研究機関の上位 100 位で比較しても、日本では上述の企業のほかに富士通、NEC、パナソニック、JSR、東京エレクトロン、神戸製鋼、三菱電機、ルネサス、JFE など多くの企業がランクインしているのに対し、米国では、IBM と Intel のみ。ドイツや中国ではランクインなしである[190]。このように極限マテリアルの開発に対し日本の多くの企業が並々ならない関心を抱いているのは、黎明期から極限マテリアルの研究開発に連綿と取り組んでいる大学や国研、企業の存在が大きいと考えられる。

このような分析結果から、日本における極限マテリアルの研究開発は、世界の先頭を切って注目し研究開発を継続する研究開発拠点が産学官を問わず存在している点に特徴がある。このような産学官を挙げた極限マテリアルへの取組は国外に例がなく、成功事例だけなく失敗事例を含めた知見の集積、あるいは人材を継続的に輩出している点において日本の強みになっていると考えられ、今後もこのような強みを維持・強化する取組が必要である。発展期の米国において極限マテリアル分野の論文投稿数の伸びに宇宙・防衛用途が寄与したように、日本でも産業界から極限マテリアルの用途を示しアカデミアを活性化するような取組が求められる。

[190] NEDO イノベーション戦略センター調べ（2025）。

【超電導技術分野】

次に特許出願に関する調査結果を示す。まず、極限マテリアルの個別技術例である超電導技術分野に焦点を当てる。

この分野では、近年出願数の増加が見られ（図 3-5-10）、世界的に見て超電導関係の発明が活発になされていることがわかる。また出願人の国籍別比較では 2000 年～直近までの特許公開件数（積算）で日本は中国、米国についで 3 位となっている（図 3-5-11）。

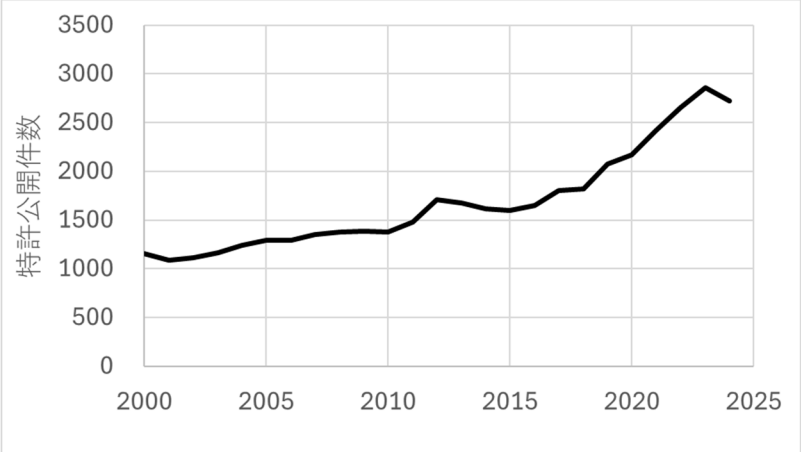


図 3-5-10　超電導技術に係わる特許出願件数の年次推移

出所：Derwent™ Innovation のデータを基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2024）

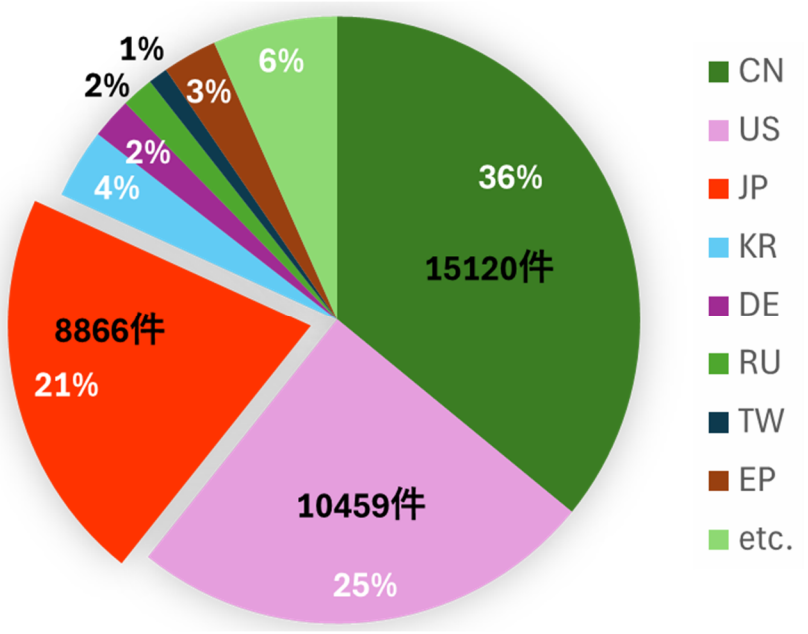


図 3-5-11　超電導技術に係わる特許件数の出願人国籍別比較（2000～2024 年）

出所：Derwent™ Innovation のデータを基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2024）

表 3-5-3 に、超電導分野における主要出願人の一覧を示す。線材メーカーである住友電工、フジクラ、古河電工が上位 10 社にランクインしており、線材において日本がリードしている立場にあることがわかる、また超電導コイル等を製造するメーカーである日立、東芝、三菱電機も上位にあることから、線材を使用する有力なユーザー企業も国内に存在していることがわかる。

表 3-5-3　超電導技術に係わる主要な特許出願人一覧

	2000～2024年	
	出願箇所	件数
1	**SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES（日）**	1170
2	**TOSHIBA（日）**	680
3	**HITACHI LTD（日）**	590
4	IBM（米）	522
5	SIEMENS AG（独）	520
6	**FUJIKURA LTD（日）**	435
7	GEN ELECTRIC（米）	376
8	INST ELECTRICAL ENG CAS（中）	295
9	**MITSUBISHI ELECTRIC CORP（日）**	269
10	**FURUKAWA ELECTRIC CO LTD（日）**	249

出所：Derwent™ Innovation のデータを基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2024）

超電導技術に関する投稿論文の調査では、2000～2023 年に至るまで、超電導関係の投稿論文数はコンスタントに全世界で 7,000～8,000 件程度公表されていることがわかる（図 3-5-12）。そのうち日本の投稿論文数は、米国に次ぐ 2 位となっている（図 3-5-13）。

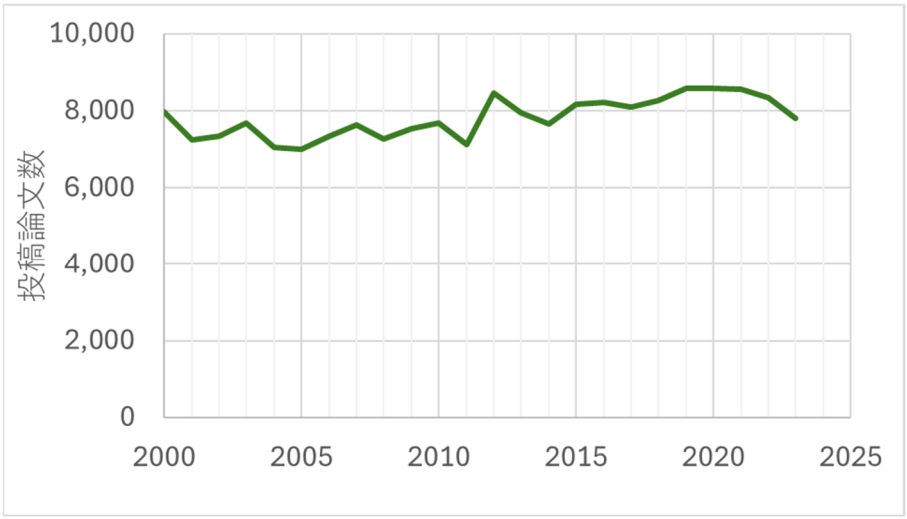


図 3-5-12　超電導技術に関する投稿論文数の推移

出所：Web of Science™ のデータを基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2024）

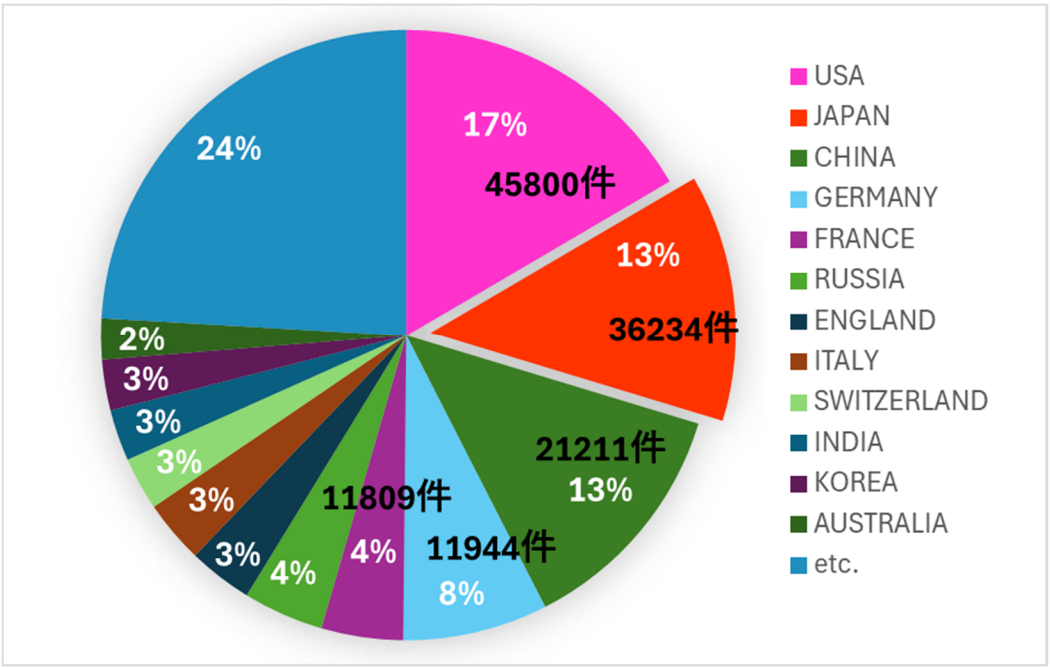


図 3-5-13　超電導技術に関する投稿論文数の国別比較（2000～2023 年）

出所：Web of Science™ のデータを基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2024）

表 3-5-4 に超電導に関する主な投稿論文著者の所属機関別を示す。2000～2023 年ではトップ 20 組織の中に日本が 5 組織を占めており、組織の数としてはトップとなっている。

表 3-5-4　超電導技術に関する主な投稿論文著者の所属一覧（2000～2023 年）

	論文著者所属	国	件数
1	UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY DOE	米	14,472
2	CHINESE ACADEMY OF SCIENCES	中	12,821
3	CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS	仏	7,105
4	RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES	露	6,894
5	**UNIVERSITY OF TOKYO**	**日**	6,013
6	HELMHOLTZ ASSOCIATION	独	5,890
7	UNIVERSITY OF CALIFORNIA SYSTEM	米	5,393
8	MAX PLANCK SOCIETY	独	4,796
9	CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE CNR	伊	4,123
10	UNIVERSITY OF WOLLONGONG	濠	4,074
11	**TOHOKU UNIVERSITY**	**日**	4,033
12	**NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE(NIMS)**	**日**	3,744
13	SWISS FEDERAL INSTITUTES OF TECHNOLOGY DOMAIN	瑞	3,682
14	INSTITUTE OF PHYSICS CAS	中	3,547
15	CEA	仏	3,345
16	MICHIGAN STATE UNIVERSITY	米	3,159
17	STATE UNIVERSITY SYSTEM OF FLORIDA	米	3,093
18	UNIVERSITE PARIS SACLAY	仏	3,074
19	**KYOTO UNIVERSITY**	**日**	3,073
20	**NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE TECHNOLOGY AIST**	**日**	2,820

出所：Web of Science™ のデータを基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2024）

【レーザー関連分野】

極限マテリアルのもう一つの例として、レーザー関連分野に着目する。

レーザーに関係するマテリアルの出願特許件数の年次推移を図 3-5-14 に示す。毎年継続的に出願されているが、特に 2015 年以降出願件数が増加しており、当該材料に関係する研究開発は旺盛と推定される。

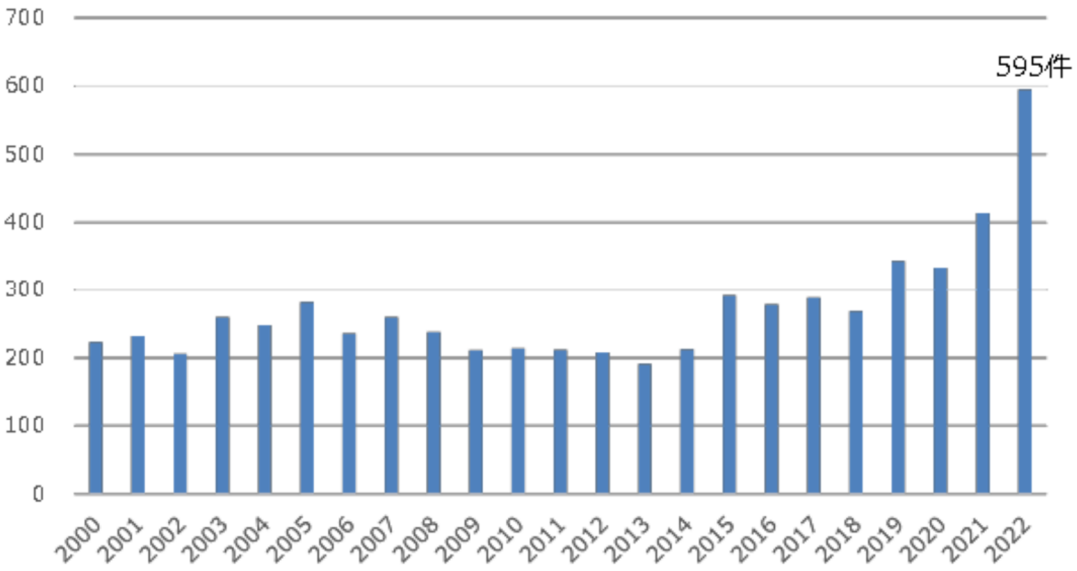


図 3-5-14　レーザー関係マテリアルの特許出願年次推移

出所：Derwent™ Innovation のデータを基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2024）

また、特許出願における日本のポジションについて図 3-5-15 に示す。日本国籍の出願は中国、米国についで 3 位の出願数であり、上位 3 国で約 80%を占めている。日本における当該分野の研究開発は世界の中でも盛んであることがわかる。

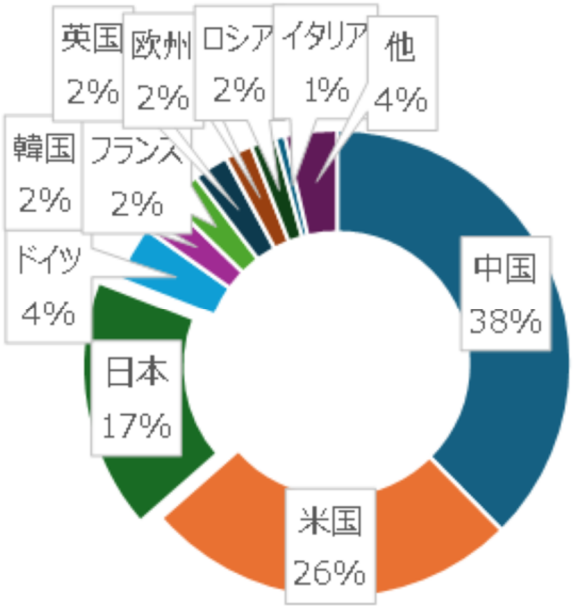


図 3-5-15　レーザー関係マテリアルの出願人国籍別特許出願割合

出所：Derwent™ Innovation のデータを基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2024）

主な出願人のリストを表 3-5-5 に示す。出願数の多い中国では、研究機関や大学の出願が多い。一方日本では、フジクラ、富士通、富士フィルムの 3 メーカーが上位 10 位に入っている。

表 3-5-5　レーザー関連マテリアルに関する主な出願人一覧

No	譲受人/出願人	国	出願件数
1	Fujian Institute of Research on the Structure of Matter Chinese Academy of Sciences	中国	262
2	Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences	中国	128
3	Shandong University,	中国	120
4	IMRA America Inc.	米国	65
5	Photop Technologies Inc.	中国	53
6	Fujikura Ltd.	日本	52
7	RAYTHEON COMPANY	米国	51
8	IPG PHOTONICS CORPORATION	米国	50
9	Fujitsu Limited	日本	47
10	FUJIFILM Corporation	日本	30

出所：Derwent™ Innovation のデータを基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2024）

レーザー関連マテリアルに係わる投稿論文数の年次推移を図 3-5-16 に示す。毎年継続的に発行されているが、特に 2015 年以降投稿論文数が増加しており、当該材料に関係する研究開発は旺盛と推定される。

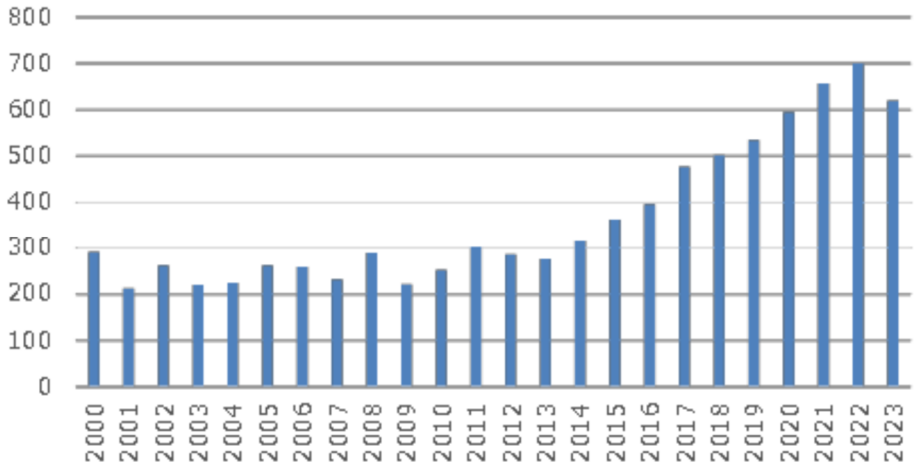


図 3-5-16　レーザー関連マテリアルに関する投稿論文数の年次推移

出所：Web of Science™ のデータを基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2024）

また、投稿論文における日本のポジションについて図 3-5-17 に示す。日本は中国、米国、ドイツについで 4 位の投稿論文数であり、3 位のドイツとは僅差となっていて、日本における当該分野の研究開発は世界の中でも盛んであることがわかる。

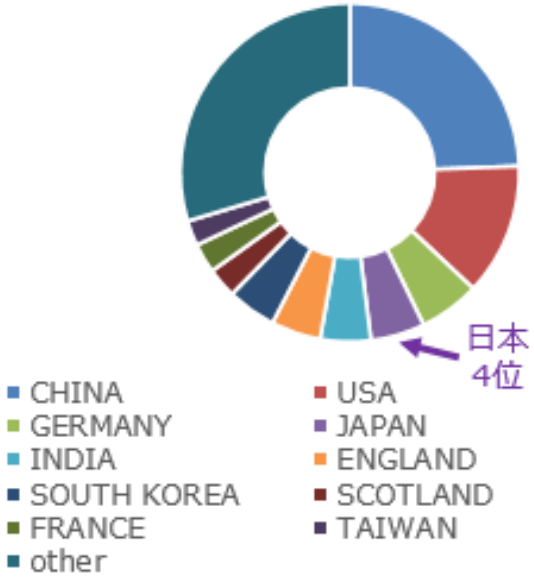


図 3-5-17　レーザー関連マテリアルに関する投稿論文数の国別比較（2000～2023 年）

出所：Web of Science™ のデータを基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2024）

投稿論文の多い著者所属先のリストを表 3-5-6 に示す。日本では大阪大学が上位 20 位以内に入っている。

表 3-5-6　レーザー関連マテリアルに関する主な投稿論文著者の所属一覧（2000～2023 年）

No	著者所属	国	件数
1	CHINESE ACADEMY OF SCIENCES	CHINA	675
2	HERIOT WATT UNIVERSITY	ENGLAND	260
3	SHANDONG UNIVERSITY	CHINA	245
4	UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY DOE	USA	226
5	UNIVERSITY OF CHINESE ACADEMY OF SCIENCES CAS	CHINA	210
6	CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS	FRANCE	209
7	RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES	RUSSIA	162
8	SUN YAT SEN UNIVERSITY	CHINA	143
9	UNIVERSITY OF CALIFORNIA SYSTEM	USA	134
10	SHENZHEN UNIVERSITY	CHINA	112
11	HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE TECHNOLOGY	CHINA	100
12	INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY SYSTEM IIT SYSTEM	INDIA	96
13	UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE	USA	95
14	SHANGHAI INSTITUTE OF OPTICS FINE MECHANICS CAS	CHINA	93
15	HELMHOLTZ ASSOCIATION	GERMANY	88
16	OSAKA UNIVERSITY	JAPAN	84
17	HONG KONG POLYTECHNIC UNIVERSITY	CHINA	82
18	NANYANG TECHNOLOGICAL UNIVERSITY	SINGAPORE	82
19	SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY	CHINA	82
20	TSINGHUA UNIVERSITY	CHINA	82

出所：Web of Science™ のデータを基に NEDO イノベーション戦略センター作成（2024）

(4)カーボンニュートラルへの貢献

『持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針 2023』によれば、超電導技術の実用化による世界レベルでの CO_2 削減ポテンシャルは表 3-5-7 のように算出されている。

表 3-5-7　超電導技術の実用化による CO_2 削減ポテンシャル一覧

技術分野	CO_2 削減ポテンシャル（億 tCO_2/年）
産業用モーター	0.13
発電機	0.12
鉄道用直流電線	0.028
磁気誘導加熱装置	0.013
高圧地中送電ケーブル	0.0051
MRI	0.0001

出所：平成 26 年度　超電導機器の市場形成に資する技術戦略策定に向けた調査報告書（2015）

(5)政策動向

日本の政策に関しては、極限マテリアル全体について、2021 年に策定された『マテリアル革新力戦略』では、目標として「重要なマテリアル技術・実装領域での戦略的研究開発の推進」を掲げるなかで、バックキャスト型研究で取り組むべき技術領域の例として、「Society 5.0 への貢献が期待される、パワーエレクトロニクスデバイス、IoT センサー、アクチュエータ、MEMS などの「高度な機能発現を可能とするマテリアル」」や「世界一安全・安心なレジリエンス国家実現のための、超耐熱・耐火材料、軽量・高強度材料、極限環境構造材料等の「極限機能を有するマテリアル」」が記載されており、国として極限マテリアルの開発を支援する重要性が述べられている。

具体的な極限マテリアルの例として高温超電導技術分野における国家プロジェクトの動向を表 3-5-8 に示す。NEDO プロジェクトを含め、以下のような事業が実施されている。

表 3-5-8　日本の高温超電導関係国家プロジェクト一覧

国	機関	名称	期間	総予算	主な実施内容
日本	NEDO	超電導応用基盤技術研究開発（第Ⅰ期）	1998 ～2002年度		高温超電導体の基本設計(IBAD法、PLD法の確立) REBCO線材：長さ46m,臨界電流密度74A/cm幅
↑	NEDO	超電導応用基盤技術研究開発（第Ⅱ期）	2003 ～2007年度	38億円	長尺化・高機能化、IBAD法/PLD法の改良 REBCO線材：長さ500.5m,臨界電流密度349.6A/cm幅
↑	NEDO	Nd-Fe-B 系磁石を代替する新規永久磁石及	2009 ～2011年度	30億円	高機能化(エキシマレー ザ PLD)、高生産技術開発 REBCO線材：長さ1050m,臨界電流密度534A/cm幅
↑	NEDO	高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術	2016 ～2019年度		REBCO線材：高生産技術開発 人工ピン⇒安定化技術、全長Ic低下率15%以下
↑	NEDO	高温超電導高安定磁場マグネットシステム技	2016 ～2019年度		ＭＲＩ、REBCO接続技術 REBCO線材：長さ500m,臨界電流密度150A/cm幅
↑	JST	キロアンペア級の交流電流を流せる高温超伝	2019 ～2023年度		REBCO集合導体開発。長さ 5 m、交流損失を1/10 に低減、1kA の交流通電に成功
↑	JST	(ALCA-Next)低交流損失と高ロバスト性を両	2024 ～2028年度		【開発目標】交流損失を従来の1/10、200Hz 駆動コイルでの損失低減対策、2kA の大電流容量、曲げ半径
↑	JST	(K Program)【公募中】多様な機器・システムへの応用を可能とする超伝導基盤技術	2025年度 ～最長5年	最大40億円	【開発目標】商用化を含む社会普及を目的とし、①製造プロセスを革新する基盤技術、②革新的材料探索・設計、新規デバイス開発を達成するための課題解決について公募

線材の開発や用途として小型のモーターや送電ケーブルを想定した開発が行われており、例えば線材の長さとしては最長 1km のものが国家プロジェクトの成果として得られている。

さらに超電導技術を活用した機器開発のプログラムを表 3-5-9 に示す。

表 3-5-9　超電導を活用した機器開発プロジェクト一覧

国	機関	テーマ名	期間	総予算	主な実施内容
日本	NEDO	超電導電力貯蔵システム技術開発(SMES)	199 9 ～2003年度	38億円	Bi系，Y系：コイルコスト低減
↑	NEDO	超電導電力ネットワーク制御技術開発	2004 ～2007年度	53億円	Y系：コイルコスト低減、実系統連系による実証
↑	NEDO	イットリウム系超電導電力機器技術開発プロ	2008 ～2012年度	140億円	超電導電力ケーブル、超電導変圧器、超電導電力貯蔵、超電導電力機器用線材に関する実用化研究
米国	DOE ARPA-E	REACT project	2010 ～2012年度		SMES
日本	NEDO	超電導電力応用技術開発プロジェクト	1988 ～1999年度		NbTi系、7 万 kW 級モデル機を開発。負荷試験や系統連系試験
↑	NEDO	超電導電力応用技術開発プロジェクト	2000 ～2003年度		NbTi系、超電導発電機のコスト低減と大容量化技術
日本	NEDO	液体水素冷却高温超電導発電機の開発	2022 ～2024年度	3 億円	液体水素冷却超電導発電機の要素技術開発。 1,800rpm で 10kW 級の発電検証
独		HTS-Geno project	2011～2014	€4M	超電導発電機
日本	NEDO	高温超電導ケーブル実証プロジェクト	2007 ～2013年度	32.25億円	６６ｋＶ/２００ＭＶＡ級三心一括型超電導ケーブルシステムの開発・実系統連系試験
日本	NEDO	次世代送電システムの安全性・信頼性に係る	2012 ～2014年度	3.58億円	超電導ケーブルを電力系統へ導入するための信頼性･安全性
↑	経済産業省	高温超電導直流送電システムの実証研究	2012 ～2014年度	25億円	高温超電導直流送電システム試作。実系統から送電→技術的、制度的な課題抽出
↑	経済産業省	高温超電導技術を用いた高効率送電システム	2013 ～2015年度	15億円	電送システムの効率化の関わる技術的・制度的課題の抽出・整理
独		AmpaCity project	2011 ～2015	€13M	ケーブル、限流器
日本	NEDO	高温超電導実用化促進技術開発	2016 ～2020年度	30億円	鉄道き電線・長距離循環冷却システム MRI
↑	JST	高温超電 導線材接合技術の超高磁場ＮＭＲと	2017 ～2026年度	年間4億円	NMR, 送電
日本	NEDO	航空機用先進システム実用化プロジェクト	2015 ～ 2023年間	年間2.5億円	電動航空機
欧州	Horizon2020	ASuMED - Advanced Superconducting	2017 ～2020	年間1.2億円	航空機 超電導モータ

また、レーザー関係のマテリアルでは、表 3-5-10、表 3-5-11 に示す国家プロジェクトが各国で実施されている。

表 3-5-10　レーザー関係マテリアルの国家プロジェクト一覧（その 1）

国	年代	テーマ	期間	予算	内容
日本	2000	フォトン計測・加工技術の研究開発	1997-2001年	72億円	固体レーザー フォトン応用加工、フォトン応用計測等
↑	2010	次世代素材等レーザー加工技術開発	2010-2014年	47億円	パルスファイバーレーザー、 CFRP等次世代加工技術
↑	2020	高輝度・高効率 次世代レーザー技術開発	2016-2021年	108億円	短波長パルスレーザー、半導体レーザー光源、加工プラットフォーム
↑	↑	NEDO先導研究	2021-2022年	1億円/件以内	ICT、深紫外半導体 1.「ICTデータ活用型アクティブ制御レーザー加工技術開発」 2.「ワットクラス深紫外半導体レーザーの研究開発」
↑	↑	NEDO先導研究	2023年～	1億円/件以内	高出力深紫外半導体 「超高出力・多波長・集積型深紫外半導体レーザーの研究開発」
↑	↑	Kプロ 1. 高出力ファイバーレーザー（44億円／5年） 2. 高品質・高出力な半導体レーザー（2億円／年）	2024-2028年	46億円	1. 高出力ファイバーレーザー 全固体型PBGF開発 2. 高品質・高出力な半導体レーザー 車載用LiDAR用途調査
米国	2000	DARPA（DOD）	2006-2008年	0.5億ドル	半導体ファイバーレーザー
↑	2010	Lightweight & Modern Metals Manufacturing Innovation Institute (LM3I)	2014-2018年	140億円 （民間50%）	－
↑	2020	DARPA LUMOS program （Lasers for Universal Microscale Optical Systems）	2021-2025年	15億ドル以上／5年間	(1) 高性能レーザーと光増幅器の米国内高度フォトニクス製造ファウンドリへの取り込み (2) マイクロ波アプリケーション用の高速フォトニクスプラットフォーム上で高出力レーザーと増幅器の開発 (3) 可視スペクトルアプリケーション用の精密レーザーとフォトニック集積回路の開発。

表 3-5-11　レーザー関係マテリアルの国家プロジェクト一覧（その 2）

国	年代	テーマ	期間	予算	内容
ドイツ	2000	Laser2000	1993-2002年	6億ユーロ	• NOVALAS 半導体レーザー • MDS 半導体素子 • FST フェムト秒レーザー
↑	↑	Optical Technology	2002-2011年	8億ユーロ	• BRIOLAS 高輝度半導体レーザー • Femtonic フェムト秒レーザー • INLAS 2008－2012 27億円 高出力レーザー用光学系 • MABRILAS 2009－2012 28億円 レーザープロセス
↑	2010	LIFT	2009-2013年	10億円	－
↑	↑	POLYBRIGHT	2009-2013年	7億円	－
↑	↑	ALPINE	2009-2012年	6億円	－
↑	↑	UKP	2011-2015年	24億円	超短パルスレーザー及び加工
↑	↑	Leichtbau	2013-2016年	36億円	高輝度レーザープロセス
欧州	2020	IMPULSE（ELIプロジェクト） (Integrated Management and Reliable Operations for User-based Laser Scientific Excellence)	2020-2024	2000万ユーロ	・Horizon 2020 プログラムによって資金提供
国際連携	2020	パワーレーザーの国際連衡	2023-2027年	－	・日本学術振興会研究拠点形成事業（先端拠点形成型）「パワーレーザーの国際連衡による超域プラズマ科学の国際研究拠点」を開始 ・米国、フランス、ドイツ、ルーマニアと連携し、パワーレーザー科学を発展
ルーマニア	2020	超高強度レーザー科学研究所（ELI-NP、イーライ・エヌピー）	2022	－	・総額292億ユーロ規模の「国家復興・レジリエンス計画（PNRR）」基金の前払い分を拠出を計画
英国	2020	CLF：Central Laser Facility	2023	8500万ポンド	・イギリスの科学技術施設会議（STFC）のレーザー施設「CLF：Central Laser Facility」は、2023年9月27日、世界で最も強力なレーザーとなり得る「Vulcan 20-20」の大規模なアップグレードを発表した。予算は、英国研究・イノベーション機構（UKRI）から、8500万ポンド（約154億8000万円）を獲得した。

極限マテリアルは研究開発に時間がかかるものの、日本にはマテリアルの高機能化に資する多くの要素技術や知見等を有していて、データ駆動型マテリアル開発を含めた開発の加速に必要な多くの情報を有している点で優位性がある。また単一の極限マテリアルの開発だけでは新しい製品（すなわち新価値創造）が成立しないことから、既存のマテリアルとの融合（いわゆるすり合わせ）が必要で、多くのマテリアル製品を有している日本の優位性がここにも存在する。極限マテリアルの開発ポテンシャルは、国内だけでなく海外からも大きな期待が寄せられている。

個別の例では、超電導技術分野において前述の表 3-5-3 のとおり、線材メーカーである住友電工、フジクラ、古河電工が特許出願の上位 10 社にランクインしている。サプライチェーンの観点から考えれば、マテリアルの上流側（材料・素材側）において日本が世界をリードしている立場にあるだけでなく、下流側（最終製品側）である超電導コイル等を用いた製品を製造するメーカーである日立、東芝、三菱電機も当該分野における有力企業であり、当該マテリアル分野のサプライチェーンにおいて有力なプレーヤーが存在していることを示している。マテリアルの社会実装を促進する上でサプライチェーン上のプレーヤー間の共創関係が重要である点を考慮すると、国内で共創関係が成立しうる超電導技術分野は極限マテリアル分野のなかでも社会実装が実現しやすい状況にあると予想される。

以上の調査・分析を踏まえ、マテリアル分野で優先して取り組むべき領域として『極限マテリアル領域』を提案する。

3-5-5 具体的な手段（技術開発とその他の社会実装に向けた取組）（T）

極限マテリアルに係わらず、マテリアルを次々と開発し、社会実装させていくためには、マテリアルの基礎的な研究開発もさることながら、研究開発の早い段階で用途を想定し用途にかなった研究開発目標を設定することが、早期に社会実装につなげる上で重要である。極限マテリアルにおいては、単に極限性能を追求するだけでは社会実装の方向性とは必ずしも一致しない点に留意が必要である。「技術で勝って事業で敗れる」轍を踏まないためには、社会課題の解決に関わりの深い、すなわち社会実装の方向性がある程度展望できるマテリアルの中で、日本の強みとなる極限性をどう発揮するかを重視すべきと考えられる。

一方、極限マテリアルの中には社会の期待が高いにもかかわらず、今までなかなか社会実装されてこなかったマテリアルが少なからず存在すると考えられる。そのような極限マテリアルには、何かしらの大きなボトルネックが存在し、社会実装を阻んできたことが推測される。経済産業省が所管する国家プロジェクトにおいては、極限マテリアルの社会実装を阻んできたボトルネックの解消という点も重視すべき観点である。例えば、極限マテリアルにかかわらず新しいマテリアルの採用には開発素材～部品（デバイス）～製品までのバリューチェーンを構成するメンバーが一体となった取組が必要で、新マテリアルの採用により製品の他のマテリアルに与える影響をバリューチェーンの別の箇所で解消するなどの取組が必要になることが少なくない。極限マテリアルが極限的であればあるほど他のマテリアルへの影響が大きいことは容易に想像がつく。場合によっては一企業での対応が難しく、国の支援が必要なケースがあると考えられる。

さらに国が支援するのであれば、他国の追い上げを意識したスピード感も重視する必要がある。国の支援が公表されるやいなや他国の追従の標的となる可能性がある。DX（デジタルトランスフォーメーション）技術等を活用して従来多大な時間を要していたマテリアルの開発期間をできる限り短縮することが日本の勝ち筋を具現化する上で重要である。くわえて極限性能あるいは極限環境を評価する技術（先進計測技術等）をマテリアル技術の開発と合わせて検討することにより、評価・計測技術を標準化し、最終的には JIS 規格や ISO（国際標準化機構）規格の制定を目指すことが重要である。このような取組は日本の極限マテリアルにおける優位性を維持強化する可能性を高めることにつながると考えられる。

以下、極限マテリアルの具体的な課題例として、高温超電導導体開発及びレーザー関連マテリアル（光学材料、光学デバイス等）に関する課題につい高温超電導物質て述べる。

高温超電導導体において機能を発揮するには、イットリウムをはじめとするREBCOと呼ばれるレアアースを含む系、ビスマス系、鉄系等の物質が知られており、その中には液体窒素温度以上で超電導現象が発現するものがある。これらの物質を用いた

線材（HTS 線材）の構造を REBCO 系物質による高温超電導線材の例で説明すると、図 3-5-18 に示す構造、すなわちハステロイ基板（金属基板）上に、中間層、超電導層、保護層の多層構造で構成されている。中間層は超電導層をエピタキシャル成長[191]させるためのベースとなるもので、超電導現象を発現させる上で必要な結晶方位が制御された酸化膜を形成する上で重要である。この中間層の上に、レアアース元素、Ba、Cu、O などを成分とする酸化物結晶（REBCO）からなる超電導層を、結晶軸を一方向に揃えて形成している。保護層は，遮水や酸化物層からの酸素が抜ける現象の抑止などのために、Ag をスパッタや真空蒸着により成膜している。製品幅にスリット後、超電動層の保護·局所的な発熱の発散やクエンチ時に電流をバイパスする役割を果たす安定化層 Cu を積層し、絶縁加工を行った上でテープ状の HTS 線材（テープ線材）が完成する。日本には高温超電導材料を用いたテープ線材を製造する有力なメーカーが複数あり、当該マテリアルに強みを有している。

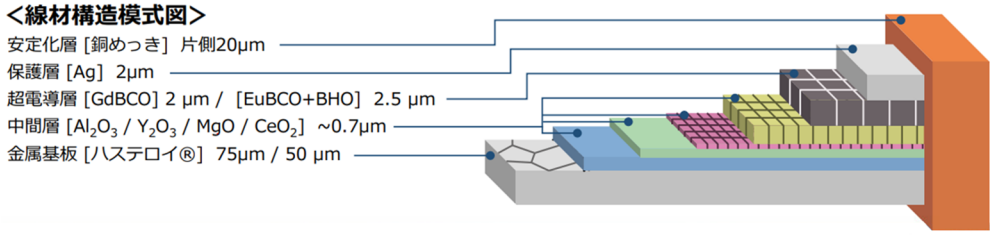


図 3-5-18　REBCO 線材の構造模式図

出所：株式会社フジクラ製品情報
https://www.fujikura.co.jp/products/superconductors/images/Fujikura_superconductor_202407_JP.pdf

高温超電導線材の産業用途として注目されている極限性は、高磁場において安定に超電導状態を保持する性能である。高温超電導導体の高磁場における極限性能に迫ることは、従来の磁石の強度を飛躍的に向上させることを意味し、MRI などにおいては解像度の向上や動力分野では強力なモーターの飛躍的な小型化による航空機の動力源への応用、ひいては核融合におけるプラズマの閉じ込め等に用いる強力なマグネットの開発など、幅広い応用が期待されている。したがって、高温超電導線材の社会実装は今後の日本のイノベーションの起点となり、日本の産業競争力の維持強化につながると考えられる。

しかし、これだけ期待の大きいテープ線材の社会実装は未だ実現していない。関係者に対して TSC が行った調査では、テープ線材をコイルに巻いて電磁石にする過程で大きなボトルネックのあることが判明した。すなわち、テープ線材は単体では非常に脆く、従来の材料でコイルを製造するスピードではとても製造に堪えないということである。そこで、脆いテープ線材に何らかの加工を施して、より取扱が容易なケーブル

[191] 結晶と特定の方位関係にある結晶膜を堆積成長させる方法

様の導体とすることが新たに必要と言われている[192]。具体的な研究開発課題としては、マグネット用途で強くかつ大きく変動する磁場にさらされた場合でも超電導状態を安定に維持すること（導体レベルでの臨界磁場強度の向上）がある。また MRI やプラズマ封じ込め用途等を想定すると、高温超電導導体を巻いた直径の大きい超電導コイルにおいて十分な臨界磁場強度が得られることが必要である。そのためには導体の構造レベルでの検討（「ピン留め」技術、テープ線材の加工法等の技術）や、導体の巻線数を減らすための高電流密度化、交流など電流値が変動するマグネットの場合は電流の変動によって生じる損失の低減等の課題がある。くわえて超高磁場下でコイルにはたらく電磁力や、コイルを高速で巻線する際の張力に耐える導体としての強度向上、場合によっては耐放射線（中性子）性能向上など、いろいろな意味で物質性能の極限に迫る開発が求められる。さらに産業技術の面では、大型の磁場コイルを製造するために必要な長尺の線材の品質安定化や導体をコイルに巻いた場合の巻線速度の向上等、生産性に係わる技術課題が存在する。このような技術開発を通じて、高温超電導技術のバリューチェーンのなかでテープ線材を導体化する新たなプレーヤーの育成を目指す。

コラム 3-5-1

フジクラにおける高温超電導線材の開発

HTS 線材のトップメーカーの一つであるフジクラは、1990 年代より REBCO 系 HTS 線材の開発を行っている。超電導マグネットや送電ケーブル等の用途を想定した長尺線材の開発を目指し、着実に技術を伸ばしながら現在 1km 級の長尺線材が生産可能である[193]。折からフュージョン炉に関する世界的な研究開発機運の高まりにより、プラズマの封じ込めに用いる超電導マグネット用 HTS 線材の R&D 向け需要が急激に高まっている。しかし REBCO 線材を直接巻線して磁場コイルを製造することは、当該線材が脆いこともあり生産技術的には困難を伴う。産業的には、より巻線が容易な導体の形状に加工することが求められている。

[192] 高温超電導導体については R&D レベルで検討はなされているものの未だ技術は実用化されていない。

[193] NEDO も NEDO プロ等で支援を実施。

レーザー関連マテリアル（光学材料、光学デバイス等）においては、レーザーの用途がここ数年で増加していることを反映し、高品質な材料・デバイスへの期待が高まっている。背景の一つは、レーザー光の高出力化と小型化が進んだことである。もう一つの背景は、利用する側のニーズの変化や拡大である。多数の基地局を利用する第 5 世代移動通信システム（5G）の拡大やドローンの台頭、さらに自動運転に利用する LiDAR（レーザーレーダー）の低コスト化、半導体や回路基板の高度化／多品種少量生産、VR（仮想現実）ゴーグルや AR（拡張現実感）グラスの改善などのニーズが拡大している。

レーザー技術におけるマテリアルと関係の深い課題として、レーザー出力向上の課題がある。図 3-5-19 に示すように、レーザーの種類によりビーム品質や平均出力は様々であるが、おしなべてレーザーに高出力化に対する要望は高いと言える。

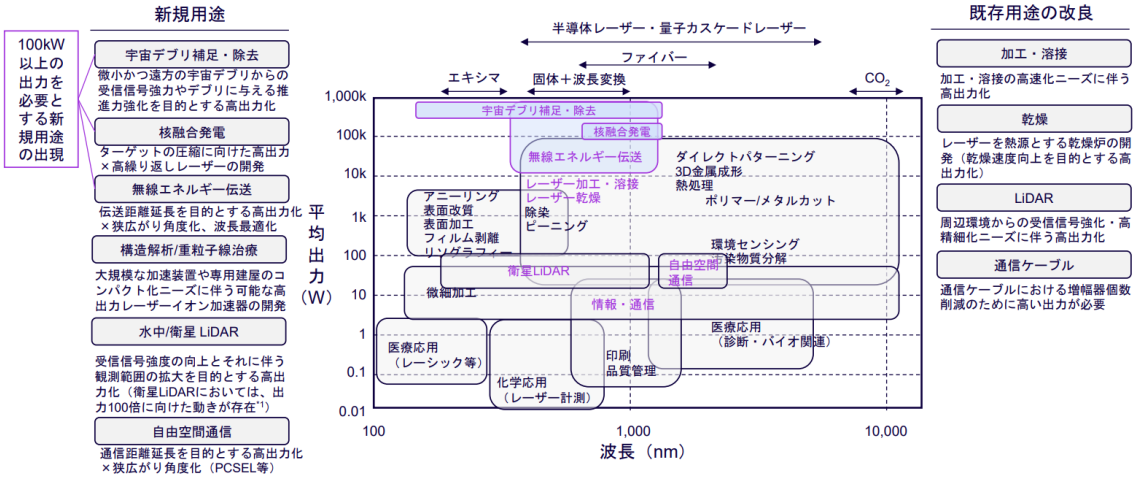


図 3-5-19　レーザーの用途による俯瞰

出所：マテリアル領域の俯瞰分析に関する調査（NEDO、2024）

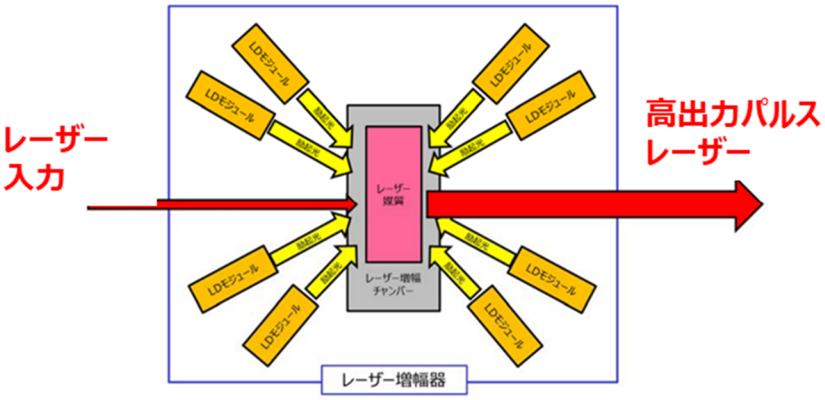
レーザー関連マテリアル（光学材料・光学デバイス）の課題としては、例えば、発振媒体や光学素子として、高出力・高効率な材料、高出力による発熱に対応できる高熱伝導性・集光性、発振波長対応性、高い形状加工性、他素材との接合性、高い機械的強度、極限環境での高耐食性、光学損傷耐性、高信頼性等が挙げられる。

コラム 3-5-2

高出力パルスレーザー及びレーザー用超高性能光学材料の開発

難加工物質の加工や空間エネルギー伝送、宇宙デブリ除去、金属の表面改質などの用途に応用先を広げるためには、数 100 ジュール以上の高パルスエネルギーが必要であり、更なる高エネルギー化のためのマテリアル技術開発が期待される。

具体的には、新レーザー媒質の探索、発振媒質他の高効率冷却技術、耐光・耐熱コーティング技術、等が挙げられ、浜松ホトニクスをはじめとする日本の有力な光学機器メーカーが開発を行い、神島化学工業、京セラなどの材料メーカーが基本となる高品質な部材を提供している（下図）。最近では、レーザー核融合に対する世界的な注目の高まりから、大阪大学などのアカデミア、EX-Fusion などのスタートアップも高出力レーザーの開発を加速している。



高出力パルスレーザーの構成例

出所：浜松ホトニクス・NEDO 発表資料
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101448.html

3-5-6 手段を進める上での道筋

本項では、前項で取り上げた高温超電導導体の社会実装を進める上での道筋について述べる。

高温超電導導体の社会実装には、適当な冷媒が安価かつ容易に利用できることが重要である。高温超電導導体の技術が実用化すると、従来液化ヘリウム温度が必要であったものが液化窒素の温度での動作するため、冷熱供給という意味ではエネルギー的、資源的な制約が大きく緩和される。これにより超電導技術の普及はこれまで以上に進むと考えられるが、2050 年のカーボンニュートラルを目指し種々の新エネルギーが検討される中で、液体水素の利用が増加すれば高温超電導導体の普及に対する更なる追い風となると考えられる。

COCN（産業競争力懇談会）の調査によれば[194]、液体水素インフラの各地への設置により、冷熱の利用がさらに進むとともに、水素を燃料としたタービン発電用の発電機に超電導コイルが採用されることも考えられ、発電時のエネルギーロス低減が期待される。また超電導導体の開発を通じて送電ケーブル用途の導体コストも同時に削減されることが予想され、送電線への超電導導体の適用も増えて高温超電導導体の市場拡大に寄与すると考えられる（図 3-5-20）。

[194] COCN 編 「水素・超電導コンプレックス（2024）



図 3-5-20　水素・超電導コンプレックスのシナリオ（COCN）

出所：COCN 編「水素・超電導コンプレックス」（2024）

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を俯瞰すると下記の図のように示すことができる。図 3-6-1 は市場・製品視点で示したもので、バイオエコノミー分野が対象市場とする領域が非常に多様であること及び多くの社会課題解決の実現に関係することを示している。また、図 3-6-2 は、バイオエコノミー分野の俯瞰を技術視点で示したものであり、市場・製品だけでなく、対象となる技術も多様であることが分かる。くわえて、後述するように、バイオテクノロジーに関する技術は基礎科学研究の成果でも短期間で破壊的イノベーションを起こす可能性を秘めている。なお、バイオエコノミー分野を構成する要素技術には、バイオテクノロジーだけではなくデジタル技術や化学、工学、電子・電気など周辺の関連する技術も含まれるため、更なる研究開発の効率化や産業化推進のためには、これらの技術に関する知見も重要であると考えられる。

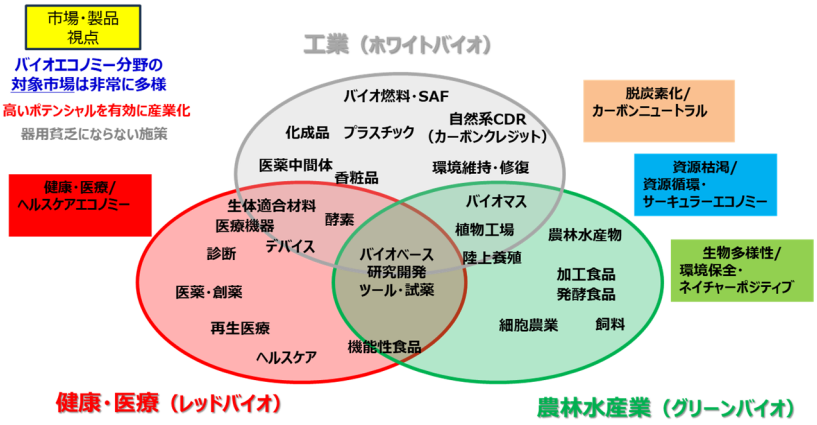


図 3-6-1　バイオエコノミー分野の俯瞰図（市場・製品視点）

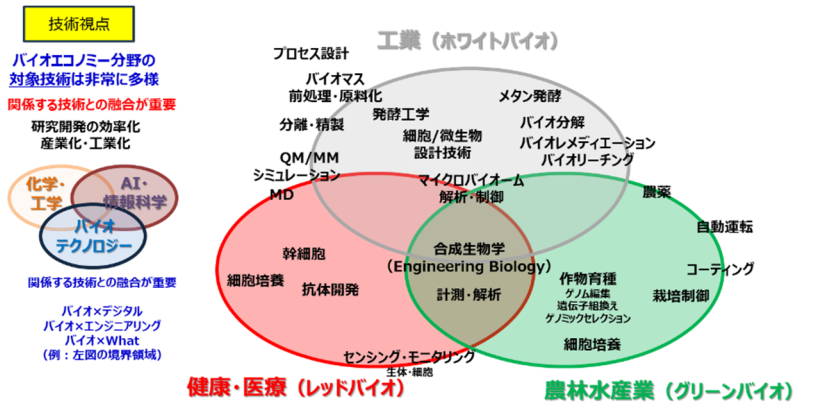


図 3-6-2　バイオエコノミー分野の俯瞰図（技術視点）

本節では、Innovation Outlook の対象をバイオエコノミー分野と設定して、以下 MFT 分析を行うとともに、俯瞰した上でのフロンティア領域等の候補選定について議論していく。

3-6-2 解決すべき社会課題(M)

今回は、我が国の『バイオエコノミー戦略』[195]に基づいて提案した重要な社会問題である、気候変動、資源枯渇、生物多様性の損失を対象とし、これらの社会問題に紐付いた解決すべき社会課題(M)として、カーボンニュートラルの実現、サーキュラーエコノミーの実現、ネイチャーポジティブの実現を挙げた。これらの社会課題の解決においては、地球環境という共通の対象を扱うがゆえに、各々の課題を扱う際に別の課題に対してもシナジーやトレードオフが生じうることを考慮した上で、それぞれの課題を等しく解決させることが必要である。くわえて、日本が先行して直面する超高齢化に伴う解決すべき社会課題(M)として、ヘルスケアエコノミーの実現を設定した。これらの各々の社会課題の実現について、現在の国としての目標は、下記のように示されている。

- カーボンニュートラルの実現(地球温暖化対策計画[196] :2030 年度温室効果ガス 46%削減(2013 年度比)、2050 年達成)
- サーキュラーエコノミーの実現(循環型社会形成推進基本計画[197] :2030 年度資源生産性約 60 万円/トン、循環利用率約 19%(入口)・約 44%(出口)等)
- ネイチャーポジティブの実現(生物多様性国家戦略 2023-2030[198] :2030 年ネイチャーポジティブ(自然再興)、の実現:自然を回復軌道に乗せるために、生物多様性の損失を止め、反転させる(30by30 等))
- ヘルスケアエコノミーの実現(健康・医療戦略(第 2 期)[199]:2040 年までに健康寿命を男女とも 3 年以上延伸し、75 歳以上とすることを目指し、2024 年度までに 1 年以上延伸)、健康・医療戦略(第 3 期)[200]:健康寿命と平均寿命との差が縮小傾向にあるなかで、平均寿命の増加分を上回る健康寿命の増加を目指す。

---

195 https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/index.html
196 地球温暖化対策計画(環境省)https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/211022.html
197 循環型社会形成推進基本計画(環境省)https://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku.html
198 「生物多様性国家戦略 2023-2030」の閣議決定について(環境省)
https://www.env.go.jp/press/press_01379.html
199 健康・医療戦略(第2期)
https://www8.cao.go.jp/iryou/council/20200109/pdf/sankou1.pdf
200 健康・医療戦略(第 3 期)
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kenkouiryou/suisin/ketteisiryou/kakugi/r070218senryaku.pdf

3-6-3 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

3-6-1 バイオエコノミー分野の俯瞰（俯瞰図）の項でも述べたようにバイオエコノミー分野の関連市場は極めて多様であり、全体像を限られた紙面で記載することは困難ではあるが、トレンドと考えられる点について記載していく。

世界では、産業構造の脱化石資源化が進む中で、バイオテクノロジーによる経済成長が期待される市場（バイオエコノミー）の規模は 2030 年には 1～4 兆ドル規模に達すると予測されており、大規模の市場創出が期待されている[201,202]。

我が国のバイオエコノミー戦略[203]では、目指す五つの市場領域ロードマップをまとめており、現状の市場規模と 2030 年に目指す市場規模をまとめると表 3-6-1 となり、海外市場への展開を含めて成長分野として期待されている。

表 3-6-1　我が国のバイオエコノミー戦略の五つの市場領域ロードマップ

市場領域	2018年時点	2030年（目標）
バイオものづくり・バイオ由来製品	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
持続的一次生産システム	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）
木材活用大型建築・スマート林業	国内　0.5兆円	国内　1兆円
バイオ医薬品・再生医療・細胞治療・遺伝子治療関連産業	2020年時点	2030年（目標）
	26.6兆円 （国内　1.5兆円） （海外　25.1兆円）	58.6兆円 （国内　3.3兆円） （海外　55.3兆円）
生活習慣改善ヘルスケア、デジタルヘルス	2016年時点	2030年（目標）
	25兆円	39.1兆円

特に、サプライヤー企業から素材製品を購入するユーザー企業においては、使用原料を含むサプライチェーン全体の脱炭素化を目標として設定する企業が増加しており[204]、サプライヤー側への脱炭素要請の動きが顕在化している。将来的に最も供

[201] https://www.oecd-ilibrary.org/economics/the-bioeconomy-to-2030_9789264056886-en
[202] https://www.mckinsey.com/industries/life-sciences/our-insights/the-bio-revolution-innovations-transforming-economies-societies-and-our-lives
[203] https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/index.html
[204] Winning in Green Markets: Scaling Products for a Net Zero World
https://jp.weforum.org/publications/

給不足が懸念される製品領域として化成品やプラスチック、低炭素排出な輸送燃料、（特に SAF：Sustainable Aviation Fuel、持続可能な航空燃料）などがある。

エネルギーや輸送分野は、再生可能エネルギーの利用等による脱炭素化が強く望まれている分野であり、例えば、航空産業は、2021 年に世界の航空会社で構成される業界団体 IATA（国際航空運送協会）、2022 年に国連組織である ICAO（国際民間航空機関）において、2050 年カーボンニュートラル達成の目標を合意している。航空産業においてそのカーボンニュートラルを達成するためには、SAF の活用が最も大きな効果をもつ手段として位置付けられており、バイオものづくりの市場規模（国内外）の内数として、2030 年に 14.7 兆円の市場規模を見込んでいる。IATA においては、2050 年時点において現在の燃料需要よりも多い 4.5 億 kL の SAF が必要と想定している（図 3-6-3[205]）。このような背景の下、各航空会社においては燃料の SAF への置き換えを宣言しており、我が国としては 2030 年時点の SAF 使用量として本邦エアラインにおける燃料使用量の 10%を SAF に置き換えるとの目標を設定している。SAF は未利用資源を含む多様なバイオマスを原料として生産可能であり、原料の確保と共に多様なプロセスの開発や事業化が進められている。

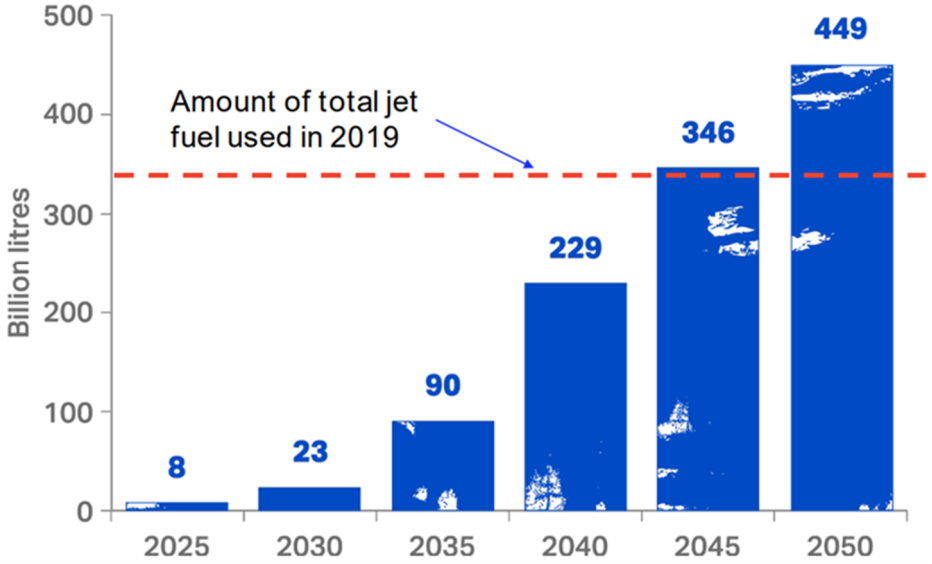


図 3-6-3　SAF の需要見通し

出所：Net Zero−2050 and the role of SAF（IATA）

さらに、再生可能エネルギーの活用などによる脱炭素化が困難な、炭素が製品に組み込まれている素材・材料の分野では、原料を化石炭素源から再生可能炭素源へ移行させる脱化石化が取り組まれている。欧州バイオプラスチック協会

[205] Net zero emissions 2050（IATA）
https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2022/07/04-Net-Zero-2050.pdf

(European Bioplastics e.V.)では、バイオマスを原料としたバイオマスプラスチックの生産能力は今後拡大していき、この移行の流れは着実に進むと推測している(図 3-6-4[206])。

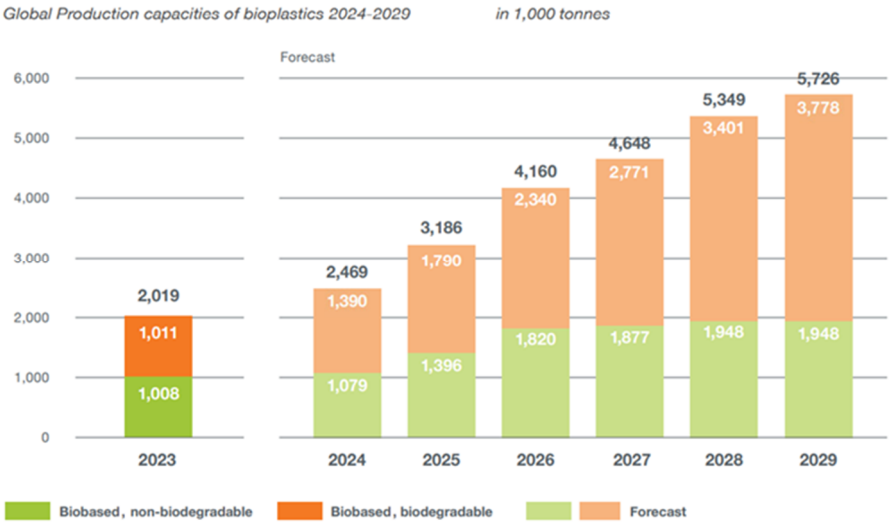


図 3-6-4　バイオプラスチックの生産能力

出所:European bioplastic(2024)

(2)技術動向

バイオエコノミー分野の関連技術は、市場と同様に極めて多様であるため、各技術の詳細は、フロンティア領域の項にて議論することとして、本項ではまず、2000年以降の当該分野に関するノーベル賞受賞テーマを概観し、技術トレンドを探りたい。

バイオエコノミー分野に関連した重要な発明・発見は、基礎研究の画期的な成果にとどまらず、研究開発ツールや新しい創薬モダリティなどの産業利用、社会への成果の還元へとつながる多大なインパクトをもたらしている。ノーベル賞受賞テーマであるタンパク質のイオン化といった生体高分子の同定及び構造解析手法(2002年/化学賞)、生命科学分野の研究等に必要不可欠なツールである緑色蛍光タンパク質(2008 年/化学賞)、溶液中で生体分子を高分解能構造測定するためのクライオ電子顕微鏡(2017 年/化学賞)、有用な酵素の合成に資する指向性進化法(2018 年/化学賞)などは、研究開発を効率的に行うことに大きく貢献する好例である。これらの発明には、日本人受賞者が貢献したものも含まれる。

特に近年は、発明・発見から、成果を応用した産業利用までの期間が短くなっている点も特徴と考えられる。例えば、既に GABA 高蓄積トマトの開発等に用いられているゲノム編集手法(2020 年/化学賞)、新型コロナウイルス感染症に対して有

[206] https://www.European-bioplastics.org/bioplastics-market-development-update-2024/

効性が示された mRNA ワクチン（2023 年/生理学・医学賞）、AI 技術を用いたタンパク質構造予測プログラム（2024 年/化学賞）などは、社会に技術革新をもたらす画期的な発明であるとともに、既にデファクト・スタンダードとなっており、極めて短期間のうちに産業化に至った好例と言える。このように、基礎科学研究の成果でも短期間で破壊的イノベーションを起こす可能性を秘めていることは、フロンティア領域として検討する際に重要な点と考えられる。

次に、バイオエコノミー分野に関連した技術トレンドとして、世界各国・機関が注目するエマージングテクノロジー、クリティカルテクノロジーを概観する。各国政府が公表している当該技術の事例は、経済産業省のまとめ[207]に詳しいが、共通して『バイオテクノロジー』は、ほぼ全ての戦略文書で見ることができ、AI・量子技術などと並び、各国の戦略的な技術分野として、重点的な投資が行われている。例えば、米国は、『CETs（Critical and Emerging Technologies）』（2024/2）における「バイオテクノロジー」、英国は、『英国科学技術フレームワーク』（2023/3）における「エンジニアリング・バイオロジー」、中国は、『第 14 次五か年計画』（2021/3）における「遺伝子とバイオテクノロジー」が挙げられる。（表 3-6-2）また、海外機関の事例としては、例えば、NATO（北大西洋条約機構）『科学技術のトレンド 2020-2040』（2020/3）における「バイオテクノロジーと人間の強化」、CFG（Centre for Future Generations）『今すぐ行動すべき五つのエマージングテクノロジー』（2024/3）における「ニューロテクノロジー」「バイオテクノロジー」などが挙げられる（表 3-6-3）。

さらに、「バイオテクノロジー」の中でも、「合成生物学」「バイオものづくり」「センサー・センシング」などが、多くの戦略文書に共通するキーワードであり、その他、「生物・非生物相互作用」「ブレインテック」「人間拡張」なども挙げられている。これらは、フロンティア領域の候補になると考えられ、産業利用や経済安全保障、バイオセーフティ・バイオセキュリティの観点からも重要な対象技術と考えられる。

[207] 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 資料 3（経済産業省、2025）https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/innovation/005.html

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)	**バイオテクノロジー** ・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次五か年計画 (2021/3)	**バイオメディカル** **遺伝子とバイオテクノロジー** ・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)	**先端バイオテクノロジー** ・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　海外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)	**バイオテクノロジーと人間の強化** ・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**

(3)政策動向

バイオエコノミーの定義や範囲などについての統一されたものはなく、自国のバイオエコノミーの定義を行ったうえで、各国独自のバイオエコノミー戦略を策定し、取組を加速している。図 3-6-5 に概要を示した。



図 3-6-5　各国のバイオエコノミー戦略

我が国では、2024 年 6 月にバイオエコノミー戦略が公表され、その中で、拡大を目指すバイオエコノミー市場として五つの市場（1.バイオものづくり・バイオ由来製品、2.持続的一次生産システム、3.木材活用大型建築・スマート林業、4.バイオ医薬品・再生医療・細胞治療・遺伝子治療関連産業、5.生活習慣改善ヘルスケア、デジタルヘルス）を設定し、民間の投資の喚起を通じて、2030 年に国内外で 100 兆円規模の市場創出を目指す取組の推進を掲げている。

世界各国では、バイオエコノミー推進に当たり、バイオものづくり（Biomanufacturing）を重要な柱と位置付け、研究開発を含む活発な投資が行われている。

米国では、2022 年 9 月の『バイオものづくりイノベーション推進に関する大統領令』[208]に基づき 2023 年 3 月バイオものづくりに関する新たな大胆な目標と優先事

[208] Executive Order on Advancing Biotechnology and Biomanufacturing Innovation for a Sustainable, Safe, and Secure American Bioeconomy（The White House、2022）
https://bidenwhitehouse.archives.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/09/12/executive-order-on-advancing-biotechnology-and-biomanufacturing-innovation-for-a-sustainable-safe-and-secure-american-bioeconomy/

項[209]が公表された。2024 年 6 月に公表された、ファクトシート[210]では、それまでの進捗として、政権発足以来、公共部門と民間部門のバイオものづくりへの投資を 290 億ドル促進した、としている。

しかし、2025 年 1 月に就任したドナルド・トランプ大統領は、就任直後からこれまでの気候変動・クリーンエネルギー政策を大幅に転換する五つの大統領令[211,212]に署名するなど、大きな動きが予想され、目が離せない状況が続くものと考えられる。

欧州では、2022 年 6 月、欧州委員会が、2018 年に策定したバイオエコノミー戦略の進捗評価レポート[213]を公表した。全体的には戦略の実現に向けた取組が順調に進んでいるが、生態系への圧力の回避や一層の持続可能な消費の推進等、更なる強化が必要な分野もあると総括した。その後、2024 年 3 月には、自然と共生したバイオテクノロジー、バイオものづくりの方向性を示す声明[214]を公表している。

英国では、2023 年 12 月、英国科学・イノベーション・技術省（DSIT）が、向こう 10 年間で 20 億ポンドの投資を行うことを含めた『エンジニアリング・バイオロジーのための国家ビジョン』[215]を公表し、Engineering Biology を英国研究イノベーションにとって戦略的に優先する研究分野として位置付けて、研究開発を推進している[216]。

中国では、2022 年 5 月、中国国家発展改革委員会が、ライフサイエンスやバイオテクノロジーを活用したバイオエコノミーの発展方針を定めた『第 14 次五か年計画バイオエコノミー発展計画』[217] を発表した。GDP に占めるバイオエコノミーの比率増加やバイオ産業の研究開発費の大幅な増額、先端技術・人材・資本といったイノベ

---

209 FACT SHEET: Biden-Harris Administration Announces New Bold Goals and Priorities to Advance American Biotechnology and Biomanufacturing（The White House、2023）https://bidenwhitehouse.archives.gov/ostp/news-updates/2023/03/22/fact-sheet-biden-harris-administration-announces-new-bold-goals-and-priorities-to-advance-american-biotechnology-and-biomanufacturing/

210 Fact Sheet: Biden-Harris Administration's Actions to Advance American Biotechnology and Biomanufacturing（The White House、2024）https://bidenwhitehouse.archives.gov/ostp/news-updates/2024/06/25/fact-sheet-biden-harris-administrations-actions-to-advance-american-biotechnology-and-biomanufacturing/

211 PUTTING AMERICA FIRST IN INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL AGREEMENTS https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/01/putting-america-first-in-international-environmental-agreements/

212 ジェトロ環境エネルギー月例レポート（2025 年 1 月）https://www.jetro.go.jp/biznews/2025/02/181a47d49baed9f7.html

213 進捗評価レポート https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/adoption-bioeconomy-strategy-progress-report-2022-06-09_en

214 Building the future with nature: Boosting Biotechnology and Biomanufacturing in the EU https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/statement_24_1610

215 National Vision for Engineering Biology https://www.gov.uk/government/publications/national-vision-for-engineering-biology/national-vision-for-engineering-biology

216 https://www.ukri.org/what-we-do/browse-our-areas-of-investment-and-support/engineering-biology/

217 世界トップレベルのバイオエコノミーを目指す計画発表（中国）https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/05/cf726399a1a88ce2.html

ーションに関わる要素の流動性向上等を図り、2035 年までにバイオエコノミーの総合的な実力を世界トップレベルとすることを目指している。

また、下記のようなルールメイキングの取組もなされている。

原料のサステイナビリティについての認証等の取組について、OECD（経済協力開発機構）[218]、ISO（国際標準化機構）[219]、UNEP（国連環境計画）[220]などの機関が連携して、標準化、認証の取組を進めている。

合成生物学における国際的なルール作りに関しては計測・標準化[221]、規制の面では生命倫理、環境影響、公平な利益分配[222]などの論点が存在し、国際的な議論が進められている。

[218] Sustainable Materials Management: A Policy Perspective https://www.oecd.org/environment/waste/sustainable-materials-management.htm

[219] ISO 20400:2017 Sustainable Procurement https://www.iso.org/standard/63026.html

[220] Global Resources Outlook 2024 https://www.unep.org/resources/Global-Resource-Outlook-2024

[221] Engineering Biology Metrics and Technical Standards for the Global Bioeconomy https://ebrc.org/engineering-biology-metrics-and-technical-standards-for-the-global-bioeconomy/

[222] https://www.insideeulifesciences.com/2022/12/23/outcome-from-cop-15-a-new-global-fund-paid-for-by-life-sciences-companies-that-use-digital-sequence-information-on-genetic-resources/

3-6-4 社会課題の解決のために取り組むべき領域(F)

バイオエコノミー分野の総合俯瞰

上述のように、各国独自のバイオエコノミー戦略を策定して、その取組を加速する中、バイオエコノミー分野を総合俯瞰して、短期的及び中長期的な戦略をローリングで検討・実施・改善することは重要と考えられる。

そこで、バイオエコノミー分野で、CN(カーボンニュートラル)、CE(サーキュラーエコノミー)、NP(ネイチャーポジティブ)、HE(ヘルスケアエコノミー)という、社会課題として、現在一般的にオーソライズされている課題(M)の解決に貢献する提供価値(F)、その具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T)の関係性を明らかにするため、図 3-6-6(概要図)の MFT ツリー俯瞰図を作成した。なお、今後、継続して新たな社会課題の設定を行いながら同様の MFT 分析を行うことにより、これまで気づきにくかった領域における課題解決のためのイノベーション発掘につながり、新たなフロンティア領域の設定も可能となると考えられる。

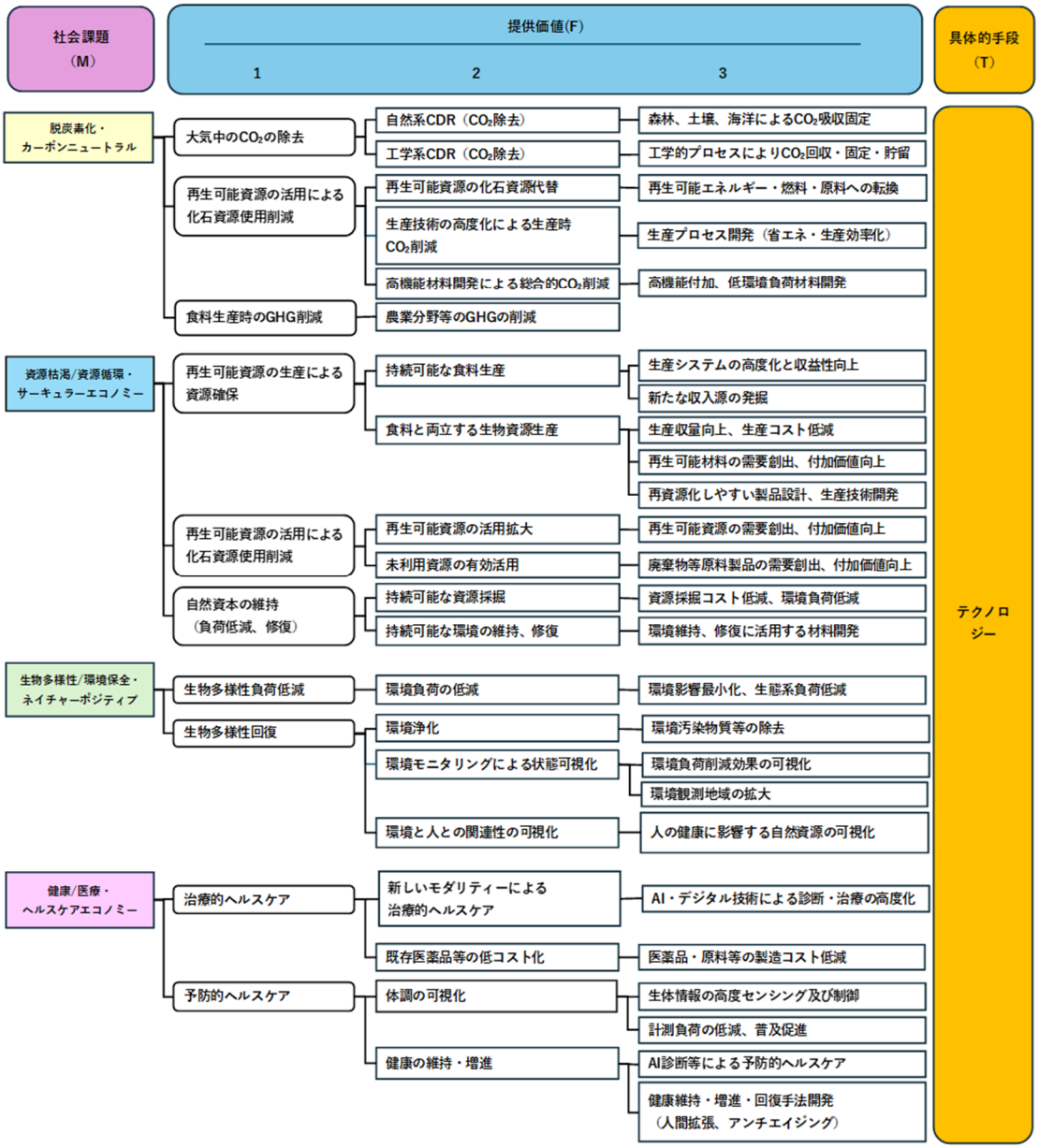


図 3-6-6　MFT ツリー（概要図）

図 3-6-6 の MFT ツリー（概要図）に示すように、CN のための提供価値（F）は、『大気中にある CO_2 の除去』『工業生産時の CO_2 排出抑制』及び『食料生産時の GHG（温室効果ガス）削減』の三つのカテゴリーに大別された。CE は、『再生可能資源の生産』『再生可能資源の活用』及び『自然資本の維持』の三つのカテゴリーに、そして、NP は、『生物多様性負荷低減』と『生物多様性維持・修復』の二つのカテゴリーに分類された。以上のように、CN、CE 及び NP の課題解決に資する提供価値は、いずれも再生可能資源の利活用と環境負荷の低減に関連しており、これらのソリューションは、CN、CE、NP の実現に同時に貢献することが期待される。

また、ヘルスケアエコノミー（HE）のための提供価値は、疾病発症時に大きな役割を果たす治療的ヘルスケアと健康維持・増進、高齢者の健康寿命延伸が期待される予防的ヘルスケアの二つのカテゴリーに分類された。

バイオエコノミー分野において、フロンティア領域を議論するためのロジックモデル（MFT）を図 3-6-7 に概要としてまとめた。

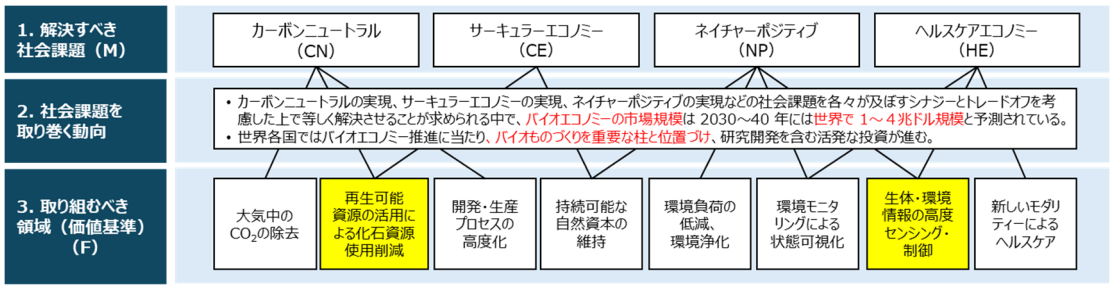


図 3-6-7　ロジックモデル（MFT）で見た社会課題（M）とフロンティア領域（F）

バイオエコノミー分野におけるフロンティア領域を議論する際の指標について、下記に簡単にまとめる。

①将来性（成長性・社会課題）

上述のようにバイオエコノミー分野は成長性が期待できる。その中でもバイオものづくりや高度センシング及び制御を活用したヘルスケアなどは大きな市場規模が想定されている。また、GHG 削減などの気候変動対策も重要な領域である。

②技術・アイディアの革新性

自然系ネガティブエミッション（森林、草木、海洋バイオマス）と再生可能資源であるバイオマスの生産とネイチャーポジティブを組み合わせてクレジット（カーボン、ネイチャー）収入も狙いながら原料生産を行うことは新しい思想である。また、高度センシング及び制御は単にセンシングのみではなく、センシングしたデータを用いてヘルスケアや環境制御に活用する取組である。生体、生物情報の高度な計測、センシング、そのデータ活用等は各国のエマージングテクノロジーとしても注目されている。

③日本の優位性

これまで、バイオテクノロジーの基礎科学では先行してきた。バイオ変換による有用品（アミノ酸、有機酸、化成品、抗生物質、食品添加物など）生産などでは多くの実績を持ち、ヘルスケアでは、生体成分解析、免疫学、幹細胞研究などでノーベル賞受賞者を輩出するなどの実績を有する。近年では、特に人件費や原材料費などのコストの点で課題は多く、また他国からキャッチアップされている状況ではあるが、技術開発力はポテンシャルを多く有する。

④民間のみで取り組む困難性

バイオエコノミー分野は、再生可能資源を用いて多様な工業原料や機能性素材等を製造、供給するセクターとして成長が期待されているが、未だ大きな産業として確立していない。スタートアップ支援をはじめとしてアジャイルな研究開発を行って、事業化を狙うあるいは、大企業とのマッチングを行うことが適切と想定される。

⑤重要経済安保技術

コロナ禍で明らかになったように、サプライチェーンの脆弱性は経済安保の観点から注視すべき点であり、国家間競争が激化する中で、原料系の確保、食料自給率の改善等、戦略的自律性の重要性が増している。また、産業競争力の観点からは付加価値が高く、海外展開できる産業の創出が重要である。

3-6-5 具体的な手段（技術開発とその他の社会実装に向けた取組）（T）

図 3-6-6 で俯瞰した各提供価値（F）について、その提供価値の概要を表 3-6-4 に示すとともに、その実現に向けた技術開発、社会実装の動向を以下に述べる。

表 3-6-4　MFT ツリー（図 3-6-6）で示した提供価値（F）の機能概要

社会課題（M）	提供価値（F）	機能の概要
カーボンニュートラル	F1　大気中のCO_2の除去	
	F2　・自然系CDR（CO_2除去）	森林や土壌、海洋によるCO_2の吸収、固定によるCO_2の除去（CDR：Carbon Dioxide Removal）
	F2　・工学系CDR（CO_2除去）	工学的プロセスによりCO2回収・固定・貯留 ・DACCS：Direct Air Carbon Dioxide Capture and Strage、 ・BECCS：Biomass Energy with Carbon Capture and Strage 等
	F1　再生可能資源の活用による化石資源使用削減	
	F2　・再生可能資源の化石資源代替	化石燃料から再生可能エネルギーやバイオ燃料等への転換
	F2　・生産技術の高度化による生産時CO_2削減	バイオ技術等を活用した製造工程のエネルギー消費とCO_2排出を削減、サプライチェーン整備等を通した生産効率化
	F2　・高機能材料開発による総合的CO_2削減	バイオ材料等を活用した高付加価値素材、低環境負荷素材の開発
	F1　食料生産時のGHG削減	
	F2　・農業分野等のGHGの削減	家畜や肥料由来のGHG（温室効果ガス）排出を抑制

社会課題（M）	提供価値（F）	機能の概要
サーキュラーエコノミー	F1　再生可能資源の生産による資源確保	
	F2　・持続可能な食料生産	環境負荷を抑えながら安定的な食料供給を実現
	F2　・食料と両立する生物資源生産	非食用作物や未利用資源（廃棄物等）を活用して、資源供給と食料安全を両立
	F1　再生可能資源の活用による化石資源使用削減	
	F2　・再生可能資源の活用拡大	生物資源を無駄なく利用し、効率を最大化
	F2　・未利用資源の有効活用	未利用資源（廃棄物等）を再利用し、資源循環を促進
	F1　自然資本の維持（負荷低減、修復）	
	F2　・持続可能な資源採掘	環境負荷を抑えた採掘とリサイクル技術の活用
	F2　・持続可能な環境の維持、修復	生態系を保全しながら、資源利用の基盤を構築

社会課題（M）	提供価値（F）	機能の概要
ネイチャーポジティブ	F1　生物多様性負荷低減	
	F2　・環境負荷の低減	人間活動による環境への悪影響を最小化し、生態系への負荷を軽減
	F1　生物多様性回復	
	F2　・環境浄化	汚染物質や廃棄物を除去し、劣化した生態系を回復
	F2　・環境モニタリングによる状態可視化	環境の状態を監視・可視化し、問題点や変化を早期に検出
	F2　・環境と人との関連性の可視化	人間活動の環境への影響や自然の恩恵を見える化し、持続可能な行動を促進

社会課題（M）	提供価値（F）	機能の概要
ヘルスケアエコノミー	F1　治療的ヘルスケア	
	F2　・新しいモダリティーによる治療的ヘルスケア	AI・デジタル技術を活用した診断技術や、新たな治療技術（遺伝子治療や細胞医療）の開発により、難治性疾患、ガン、加齢関連疾患に対応
	F2　・既存医薬品等の低コスト化	バイオ技術等を活用した、医薬品、中間体、原料等の製造コストの低減
	F1　予防的ヘルスケア	
	F2　・体調の可視化	生体情報の高度センシング・モニタリング技術の開発により、健康状態の観測・制御が高度化（リビングデバイス）
	F2　・健康の維持・増進	体調モニタリング、AI・デジタル技術で体調、健康状態を可視化し健康延伸を支援（デジタルヘルス） ヘルスケアに資する食品や健康成分の最適な摂取により健康維持

(1)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）の課題解決

表 3-6-4 に示すように、CN では、森林や土壌、海洋が CO_2 を吸収、固定化する能力を評価し、その量を増やす技術、また、CO_2 を原料として有用物質を微生物生産する技術が有望であり、グローバルに研究開発が進んでいる。CN と CE のいずれにも貢献する技術として再生可能資源（非可食バイオマス等）を原料とした化石原料代替のバイオ燃料やバイオポリマー、化成品の開発や高度に最適化した微生物を用いた精密発酵による高付加価値素材（食品素材や食品添加物等）の開発、またバイオミミクリー（生体模倣）を活用する技術などについて研究開発が挙げられる。したがって、バイオ燃料やバイオマス由来素材の商業化を加速し、化石資源への依存低減することで、CN 及び CE の実現に大きく近づくと期待される。

日本では、醸造や発酵食品産業が発達し、また、製薬産業においては抗生物質製造を得意としていたことから微生物を利用した物質生産に関する技術的な蓄積がある。一方で、単に微生物を活用した発酵生産の規模を拡大することは、エネルギー消費の増大、資源（バイオマス等）の過剰利用、生態系への新たな負荷といった課題を引き起こす可能性がある。そのため、CN、CE に加えて NP を同時に実現するためには、微生物発酵のバイオマス等の原料を持続可能に入手することが不可欠である。また、経済安全保障の観点から、当該原料を国内で調達することが望ましい。しかしながら、日本ではこの課題が解決されていない状況である。すなわち、バイオ技術を活用した物質生産において生産規模を持続可能に拡大するには、食料と競合しないバイオマス等を利用して安定かつ低コストで発酵原料に変換するための技術開発が鍵となる。また、コスト競争力を維持しつつ生産規模を拡大するための製造プロセス開発も不可欠である。微生物を使った発酵生産では、主に水を主成分とする液体培地を使用する。このことは、有機溶媒等の非水系環境で物質製造を行う石油化学産業とは大きく異なり、水が主成分の培地から、目的物質を効率的に分離、回収、精製するという、特有の課題がある。すなわち微生物を使った持続可能な物質生産を社会実装する上で、原料調達から製造プロセスまでを統合的に検討し、経済性と持続可能性の両立を実現するための一連の技術開発が求められる。

(2)ヘルスケアエコノミー（HE）の課題解決

表 3-6-4 に示すように、HE の社会課題の解決には、治療と予防の両面からの技術開発が期待される。治療的ヘルスケアにおいては、革新的な医薬品や治療技術の研究開発だけでなく、既存医薬品の低コスト化と安定供給の確保が重要である。医薬品のコスト削減は、医療費の抑制に直結し、安定供給はパンデミックや災害などの緊急時にも持続可能な医療提供体制の維持に不可欠である。

また、超高齢化社会が進む中、予防的ヘルスケアの重要性がこれまで以上に高まっており、従来の画一基準に基づく健康管理から、個々の体質やライフスタイルに最適化された個別化アプローチが注目されている。具体的には、個々の遺伝子型や腸内環境（マイクロバイオーム）に基づく精密栄養管理や生活習慣（食生活や運動、睡眠）と連動させるためのウェアラブルデバイスによるリアルタイム健康モニタリングなどが挙げられる。X線やCTなどの画像解析、各種臨床検査マーカー等、生体情報の可視化は、これまでもヘルスケアに大きく寄与してきた。従来、生体分子の観測には、免疫学的手法、酵素反応、光学的手法が多用されてきた。高感度分析においては前処理（分離、精製、濃縮）を必要とするケースも多く、その場合、リアルタイムの計測は不可能である。一方で類似した分子が多数混在する生体内においては、極めて高い選択性で、特定の分子に対して高感度で応答し、リアルタイムに複雑な情報伝達が行われている。今後、このような生物機能を活かして、特異性が高く、高感度で生体の状態をリアルタイムに観測可能なマテリアルやデバイスを開発し、また、観測された情報を活用することにより（AI・デジタル技術の融合）、個人ごとに最適化された疾患予防法の提案、生活習慣改善のための行動変容の促進、ひいては健康寿命延伸への貢献が期待される。さらに、このような特異性が高く、高感度の観測技術は、ヘルスケアだけでなく環境分野での観測・制御などへの適用も期待される。すなわち、生体情報や環境情報の高度センシング技術は、人に限らず生態・生物をも対象とするバイオエコノミー関連の技術開発を大きく推進するポテンシャルを有する。

このような観点から、今回、フロンティア領域候補として『化石原料から再生可能原料への転換：バイオものづくり強化』及び『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：リビングマテリアル・リビングデバイス』を設定した。以下それぞれ詳細を述べていく。

3-6-4 (1)社会課題の解決のために取り組むべき領域(F):化石原料から再生可能原料への転換:バイオものづくり

化石原料から再生可能原料への転換において、再生可能資源としてバイオマスを用いることは重要な一つの方策である。バイオマスは、空気中の薄い濃度の CO_2 を効率よく低コストで固定することができる点や人や生物が生きる過程で生じる有機系廃棄物などの有効活用の点から重要な資源である。その活用における有効な手段の一つがバイオものづくりである。バイオものづくりとは、再生可能資源であるバイオマス等を原料にバイオテクノロジーを駆使して低環境負荷の様々なバイオ製品を生産することをいう。バイオものづくりとバイオエコノミーの関係性を図 3-6-8 に示した。

化石原料から再生可能原料への転換においては、バイオマス等を化学的な方法で処理することや CO_2 を H_2 や光エネルギーで還元してメタノールなどの化合物に変換した後に用いる方法なども有効な手段であり、ターゲットとする製品に対して適切な方法を活用することが重要である。例えばプラスチックでは、アクリル・ポリエステル・ポリアミドは、酸素原子の含有比率が高く、単価も高い。バイオマスは酸素を多く含むため、これらの素材はバイオものづくりの開発ターゲットとして有望と考えられる。ポリオレフィン類は、酸素原子を含まずバイオマス成分の有効活用の視点からは課題がある。

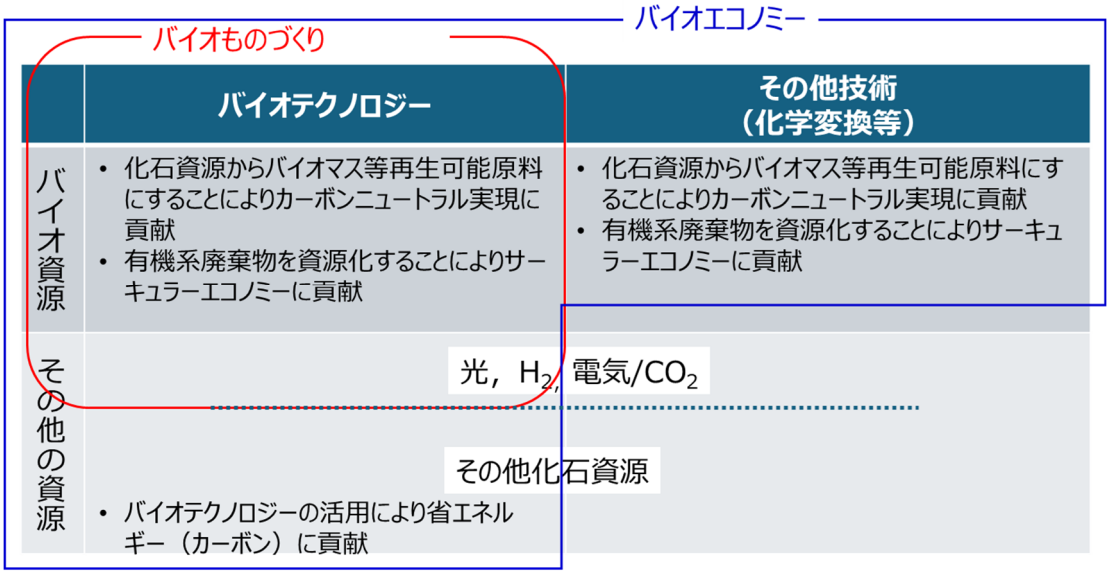


図 3-6-8　バイオものづくりとバイオエコノミーの関係性

バイオものづくり領域では、下記のようなソリューションが期待できる。

- ・化石資源を原材料とする製品生産からバイオマス等の再生可能資源を原材料とする製品生産への転換等により CO_2 排出を削減し、カーボンニュートラルの実現に貢献する提供価値（F）
- ・有機系廃棄物等の資源を有効に活用して、原材料とする製品生産に転換することなどによりサーキュラーエコノミーの実現に貢献する提供価値（F）
- ・自然資本の価値を増加させながら資本として活用することにより、生物多様性の維持（ネイチャーポジティブの実現）に貢献する提供価値（F）

このような提供価値（F）が期待されることに加えて、新産業創出や経済安全保障の観点も含めて、2022 年度よりバイオものづくりの研究開発について、多くの事業が推進されている[223、224、225]。これら事業における成果の創出加速及び最大化を達成することが重要ではあるが、さらに下記の点についての取組を強化することにより、更なるバイオものづくり事業の拡大が可能となると考えられる。

[223] 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 CO2 を直接原料としたカーボンリサイクルの推進」に着手（NEDO ニュースリリース、2023）
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101619

[224] バイオものづくり革命推進事業（NEDO）https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100246.html

[225] バイオものづくり領域（JST GteX（革新的 GX 技術創出事業））
https://www.jst.go.jp/gtex/field/bio.html

バイオものづくりを進めるためには、原料となるバイオマスを含めた再生可能原料が必要であるが、国内では、原料となるバイオマスの量・コストに課題がある（課題 1）。また、バイオものづくりは通常は水溶液の中で生産されるため、安価に分離・精製するなどの製品製造のダウンストリームの強化も課題となる（課題 2）。さらに、サーキュラーエコノミーの視点からは、使用後の製品の再資源化の加速が求められるが、技術的にも社会システムでも課題が多い（課題 3）。また、一般にバイオ製品は高い、という評価があるが、バイオ製品の適正な価値評価とその価値を反映したプライシングも重要な課題と考えられる（課題 4）（図 3-6-9 参照）。

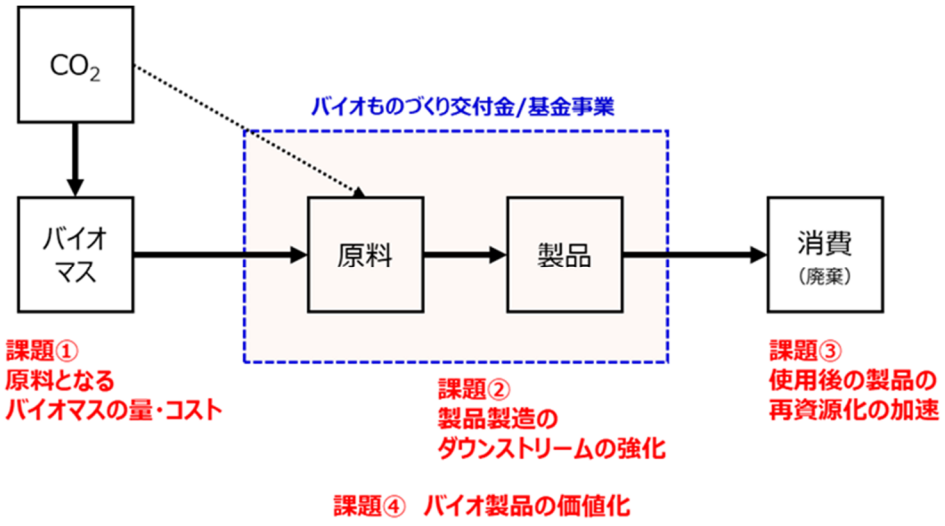


図 3-6-9　バイオものづくりにおいて取組を強化すべき課題

「化石原料から再生可能原料への転換：バイオものづくり強化」という領域でのフロンティア領域を議論する際の指標について、下記に簡単にまとめる。

①将来性（成長性・社会課題）

我が国のバイオものづくりの市場規模は 2030 年には 53.3 兆円（表 3-6-1）、上述のバイデン大統領令ファクトシートでは、バイオものづくりが今後 10 年以内に製造業の世界生産の 3 分の 1 を置き換え、約 30 兆ドルに達するという分析も行っている。数字の妥当性は計算根拠も含めて検証する必要があるが、いずれにしても成長領域であるといえる。

②技術・アイディアの革新性

バイオものづくりは、政府としても重点投資している分野であり、社会実装を最速化、最大化するための課題として、原料系、ダウンストリーム技術などへの取組を強化することが重要である。ゲノム編集の活用やカーボンクレジット・ネ

イチャークレジットなどに必要なデータの計測・取得技術及び活用、バイオベースリサイクル技術など、要素技術のアイデアも多い。

③日本の優位性

日本は広い森林面積[226]や排他的経済水域[227]（EEZ：Exclusive Economic Zone）を有しており、バイオマス生産のポテンシャルは高い。効率的バイオマス生産に重要となる育種技術（ゲノム編集、ゲノミックセレクションなど）にも強みを有する。また、再資源化に関しては、生分解性プラスチックで先行しており、世界で初めて PET の分解酵素を見いだすなど革新的な業績も有している。バイオ製品の価値化については、先行している国や企業は少ない状況であり、日本が優位に立てるポテンシャルを有する。

このような強みを有効に活かすことに加え、古くから発達している発酵工業と近年の合成生物学の台頭をうまく活かすことにより優位性を保つことが期待できる。また、日本の強みである機能化学品、機能製品分野へのバイオ製品の用途拡大を目指すことにより特徴のある製品開発が可能と考えられる。

④民間のみで取り組む困難性

バイオものづくりにおいて原料を安価かつ安定的に確保する点は重要な課題である。制度変更や社会システムの変革などが重要であり個社だけでの対応は困難である。また、バイオ製品の標準化・規格化を通して市場開拓・拡大を図るためには業界と政策が連動しての対応が重要と考えられる。

⑤重要経済安保技術

海外ではバイオセキュリティー・バイオセーフティの観点で安全保障上重要とされており、この観点からの取組が重要と考えられる。また、バイオものづくりなどは、国内資源有効活用において戦略的自律性の観点から重要な領域である。

[226] 森林面積は世界 23 位（森林率は 3 位）
[227] 排他的経済水域は世界 6 位

3-6-5 (1)具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T)

課題 1:原料となるバイオマスの量・コスト

原料となるバイオマスについての課題解決に向けた方策については、A)現在国内に賦存するバイオマスの活用、B)バイオマス増産、の二つのカテゴリーに分けて考察する。国内に賦存するバイオマスの活用やバイオマスの増産は、バイオものづくりだけでなく、化学的・工学的にバイオマスを活用して、化石原料から再生可能原料へ転換するためにも重要であり、バイオテクノロジーと化学・工学技術を駆使することによりターゲット領域の拡幅や最適な技術の活用を行うことが可能となり、再生可能原料への転換を強力に推進することにもつながる。

A)現在国内に賦存するバイオマスの活用

現在国内に賦存するバイオマスの活用については、(1)賦存量、存在場所の可視化、(2)賦存するバイオマスの組成や状態の把握、(3)バイオマスの組成や状態に応じた活用方法の開発、(4)活用方法を考慮したサプライチェーン構築、などが考えられる。

(1)賦存量、存在場所の可視化については、既に統計データがとられているものもあるが、その範囲の拡大(品目の増加)やデータ共有の仕組みづくりが必要である。また、統計データの取得について、既存の測定方法に加えて、より安価・簡便に取得できる測定方法の開発も重要と考えられる。収集されたものは重量計測などで比較的容易かつ精度良く測定が可能であるが、森林の生育している木質資源の存在量などは、樹種・樹齢なども考慮したセンシング・モニタリング方法が必要となる(森林カーボンクレジットではグリーンウォッシュの話題が頻繁に上がる)。海藻などのブルーカーボンなども同様である。このセンシング・モニタリング技術は、自然の中に長期炭素として貯留される自然系 CDR のクレジット化に対するファクト情報としても活用しうる。

(2)賦存するバイオマスの組成や状態の把握については、存在量が多く、収集容易なバイオマスからデータを整備していくことが重要と考えられる。各種糖含量・組成、リグニンや脂質量・組成などが対象となる。

(3)バイオマスの組成や状態に応じた活用方法の開発については、バイオものづくり原料、メタン発酵等原料、バイオマス発電原料、サーマルリカバリーなどから対象となるバイオマスに適した活用方法を適切に選択することに加えて、各活用方法に合わせた前処理方法の開発も重要となる(例えば、バイオものづくり原料化のための革新的成分抽出技術開発やバイオマス糖化技術開発など)。

(4)活用方法を考慮したサプライチェーン構築については、(1)～(3)を進めながら、バイオマスの価値最大化を通して社会システムとして構築していくことが必要となる。

B）バイオマス増産

現在国内に賦存するバイオマスだけでなく、環境負荷を可能な限り抑えたバイオマス増産も重要である。このためには、（1）バイオ技術を活用した有用植物や作物の開発、（2）バイオ技術を用いた土壌等の栽培環境の整備、（3）センシングやAI、ロボティクスを用いた栽培生産管理や制御、（4）環境負荷のモニタリング、などが有効と考えられる。

（1）バイオ技術を活用した有用植物や作物の開発については、ゲノム編集やゲノミックセレクションなどを活用した早生樹の開発や糖含量の高い植物、リグニン含量の低い植物などの開発が行われている。ゲノム編集などを活用した花粉のできない杉[228]の開発などは、花粉症に悩む国民にも受け入れられやすいことも想定され、バイオマス増産につながる事例と考えられる。このように活用場所や各地域に適した有用植物や作物を開発することは普及を考えた場合重要である。

（2）バイオ技術等を用いた土壌等の栽培環境の整備については、土壌微生物のマイクロバイオーム情報を活用した方法[229]やバイオ炭やバイオスティミュラントを活用した方法などの開発が進められている。また、ネガティブエミッション技術として期待されている風化促進では農地や土壌に粉砕岩石を撒くことを想定しており、その際に農地や土壌におけるバイオマス生産に及ぼす環境影響などを同時にモニタリングし、バイオマス増産と連動させることも重要な視点であり、この分野でもバイオ技術の活用が考えられる。

（3）センシングや AI、ロボティクスを用いた栽培生産管理や制御については、各種センサーの活用及びドローンなどを活用した取組が進められている。植物の様々な状態（茎や葉等の状態、クロロフィル量、放出成分など）のセンシングとドローンによる局所農薬・肥料散布による効率生産などの事例がある。また、ブルーカーボンなどの海洋資源に対する栽培生産管理や制御については、更なる技術開発が必要と考えられる。このようなセンシングは、現在、食用作物生産に使われているケースが多いが、バイオマス増産においても開発・活用が期待される。

（4）環境負荷のモニタリングについては、取組を強化すべき点と考えられる。バイオマス活用においては様々な認証制度が進められており、現在の認証制度への対応に加えて、環境負荷を科学的に把握して、認証制度を変える、あるいは新たな認証制度を提案してルールメイキングを主導する必要性も生じると考え

[228] https://www.affrc.maff.go.jp/docs/anzenka/genom_syuzai2021/page3.html
[229] https://www.microbe-soil.sci.waseda.ac.jp/research/

られる。これらの取組においても科学的データの取得は重要であり、必要なデータを簡便かつ安価に取得する技術の開発も非常に重要である。

課題 2:製品製造のダウンストリームの強化

製品製造のダウンストリームの強化については、バイオ製品に有効な新規分離精製技術、既存のプロセス／エンジニアリングとの連携などが考えられる。

通常バイオ製品は、水溶液中で生産されるため水溶液からの回収が必要となる。水分を蒸発させたのち、蒸留回収、有機溶媒等による抽出、結晶化回収などが行われるが、エネルギー費、廃水処理費、装置・設備費などコスト増大の要因も多い。バイオ技術により、生産物濃度を向上させる、より回収しやすい誘導体として生産するなどの技術開発も進められているが、バイオ製品に有効な新規分離精製技術への期待も大きい。これらの例としては、革新的膜分離、電気透析技術や安価イオン液体などの効率的な抽出溶媒などが挙げられる。

既存のプロセス／エンジニアリングとの連携については、新規の技術開発というよりも連携の場の設定などの仕組みづくりが挙げられる。ユニークな技術をもつ中小企業やスタートアップとバイオものづくり事業者が連携することにより新たなイノベーションの創出が期待される。

課題 3:使用後の製品の再資源化の加速

使用後の製品の再資源化の加速については、現状の廃棄物の資源化技術の開発、資源化しやすい製品設計や生産技術、使用後の製品回収の仕組みづくりなどが考えられる。

現状の廃棄物の資源化については、3R（リデュース・リユース・リサイクル）の強化が大前提ではあるが、リサイクルにおいては、より品位の高い状態でのリサイクルが可能となることが好ましい。バイオ技術を用いた事例としては、酵素を用いたポリエチレンテレフタレート（PET）の分解・モノマー回収などが挙げられる。本酵素は日本の研究者が世界で初めて見いだしたが[230]、その後、世界中で開発競争が続けられている。PET 以外のプラスチックの安価な分解方法の開発は今後も期待され、廃棄物のリサイクルに貢献すると考えられる。また、有機系廃棄物はメタン発酵への適用性が高いが、これまでメタン発酵に適さないとされていた廃棄物の適用についても開発が進められている[231]。このような技術開発により、これまで焼却あるいは埋め立て処理されていた廃棄物の資源化が進むことが期待される。

資源化しやすい製品設計や生産技術については、マテリアル・インフォマティクス技術により、マテリアル機能と易分解性を両立させる構造・素材の開発や易リサ

[230] http://science.sciencemag.org/content/351/6278/1196

[231] https://www.nedo.go.jp/content/100948136.pdf

イクル技術（モノマテリアル化、接着面制御）などが挙げられる。易分解性においては、上述の酵素分解の活用や酵素の逆反応などを活用した重合技術なども含まれる。接着面制御においても生分解性を付与した素材の活用などが例として挙げられる。

また、使用後の製品の再資源化の加速のためには、上述のような技術開発に加えて、使用後の製品回収の仕組みづくりも重要である。日本のPETボトルなどの回収の仕組みは世界でも高く評価されているが、個社の試みとして、Corbion/Totalによるポリ乳酸（PLA）ボトルの回収の仕組みづくり[232]なども参考になると考えられる。

課題4：バイオ製品の価値化

一般にバイオ製品の価格（製造コスト）は高いと言われることが多いが、その対策として、上述のようにコストダウン（原料コスト、分離精製コスト）について方策を述べてきた。新たな価値の付与の観点で、再資源化の加速によるサーキュラーエコノミー実現への貢献、自然系CDRによるCO_2除去によるカーボンニュートラル実現への貢献、バイオマス生産・CO_2貯留を通したネイチャーポジティブへの貢献などについても触れた。

これらをどのように価値化していくのかは、製品ごとに異なると思われるが、共通した視点として、環境負荷を科学的に可視化することによる製品の意義や価値の訴求の重要性が考えられる。そのためには、環境評価指標に関するセンシング/モニタリング技術の開発や人材育成を含めたライフサイクルアセスメント（LCA）の強化が必要と考えられる。

このような科学的データを用いて、バイオ製品の価値化に関するルール形成を行っていくことが重要と考えられる。

[232] https://www.totalenergies-corbion.com/news/luminy-pla-water-bottle-with-embossed-label-facilitates-recycled-pla-production/

3-6-4 (2)社会課題の解決のために取り組むべき領域(F):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:リビングマテリアル・リビングデバイス

3-6-4 バイオエコノミー分野の総合俯瞰の項でも記載したが、生体分子を含む生体情報を高度にセンシングして適切な応答を行うことにより生体を制御することは健康・医療、ヘルスケアに大きなイノベーションをもたらすことが期待されている。また、自然環境にも多くの生命体が存在しており、それらの生体情報を高度にセンシングして、適切な応答を行うことにより環境を制御することは、持続的な作物生産や環境保全などに大きく貢献することが期待されている。

センサーは物理量を信号として検出する装置とされるが、使用する原理によって、機械量(加速度、力、振動など)、熱、光・放射線、電気、磁気、化学などの様々なセンサーが開発、使用されている。特に生体内情報や自然環境中の生体情報をセンシングするためには、高度な化学センサーが必要となる。

また、センシングした情報を用いた適切な応答/制御を行うという観点でも具体例として、自動運転自動車などで、地図情報と自車の位置情報、周りの車や人、ものなどの情報を多数のセンサーでセンシングして安全に自動運転(応答/制御)するような例が挙げられる。生体情報や自然環境中の生体情報のセンシングにおいても、様々な原理・種類のセンサーを有効に活用することやデジタル技術と組み合わせることにより高度な応答/制御を行うことが可能となる。

これをヘルスケアで活用する場合は、例えば、疾患や体調から影響を受ける生体内情報をセンシングして、適切な栄養補給、運動、施薬(応答/制御)などを行うことが考えられる。自然環境管理等で活用する場合は、例えば、土壌中の生物群(マイクロバイオーム)をセンシングして、適切な施肥、農薬施用、耕しなどの物理的処理(応答/制御)などを行うことが考えられる。

化学センサーは、ガスセンサー、バイオセンサー、電気化学センサー、光学センサーなどがあり、特徴を活かした活用が行われている。そのなかで、バイオセンサーは、高選択性、高感度という特徴があり、特に生物に関する複雑な化合物などのセンシングが可能というほかにない特徴を有する。さらに、最近では量子センサーの台頭で、細胞や生体分子の物理計測が再興しつつある[233, 234, 235]。温度生物学やメカノバイオロジーなどの新しい研究分野が立ち上がるなど様々な動きも出始めている。

これらのバイオセンサーによるセンシング及び応答/制御に関係して近年注目されている技術分野として、リビングマテリアルやリビングデバイスがある。

---

[233] https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2025/cs/d4cs00650j

[234] https://www.nature.com/articles/s42254-023-00558-3

[235] https://www.nature.com/articles/s41467-024-47542-8

リビングマテリアル（Engineered Living Materials[236]）とは、工学的に操作された完全な生細胞あるいは部分的な細胞機能を用いたマテリアルであり、生体情報や環境情報に対するセンサー細胞やセンシングした上での応答機能などを用いたバイオ治療、オルガノイド（臓器細胞）生産など斬新で様々な用途が期待されている。リビングマテリアルの種類、用語、定義を表 3-6-5[237]に示す。

表 3-6-5　リビングマテリアルの種類、用語、定義について

Table 1. Different types, terminology, and definitions of "living materials" (by the authors).

name	*definition*	*source*
Biogenic materials	materials produced by living organisms	(Lewis et al. 2022)
Biobased materials	materials that are made in whole or in part from renewable biogenic material	(Göswein et al. 2022)
Engineered Living Materials (ELMs)	**Engineered Living Materials (ELMs)** combine synthetic biology and material science to further advance materials inspired by nature. They recapitulate the desirable properties of natural living materials, such as self-assembly, self-repair, and sensing, to create novel, useful materials with tailored functions using genetically engineered organisms.	(Gilbert et al. 2021; Molinari et al. 2021)
	"Engineered materials composed of living cells that form or assemble the material itself, or modulate the functional performance of the material in some manner"	(Nguyen et al. 2018)
Biological ELMs	**Biological ELMs** consist of cells embedded in cell-generated extracellular matrices. They are grown from genetically encoded cells through cell proliferation. This method is considered a **bottom-up approach.**	(Lantada et al. 2022, Jones et al. 2022, Molinari et al. 2021)
Hybrid ELMs	**Hybrid ELMs** consist of living cells and an abiotic scaffold (for example, polymers, carbon-based, and noncarbon-based). They are considered a **top-down creation.**	(Lantada et al. 2022)
Composite ELMs	**Composite ELMs** are a type of hybrid ELMs. They are engineered to create additional functionalities by synergistically growing, assembling, mixing, or layering microorganisms with other materials, such as organic or abiotic substances (synthetic polymer, cellulose, alginate, etc.) These composite materials "exemplify the cooperative programmed action of living cells with externally provided building blocks, pushing the boundaries of performance" of ELMs and "can be used for a variety of applications, including sensing, remediation, bioenergy production, microorganism encapsulation, release of functional molecules, and soft robotics."	(Nguyen et al. 2018)

[236] https://www.horizon-europe.gouv.fr/engineered-living-materials-25028
[237] https://www.acsa-arch.org/proceedings/Annual%20Meeting%20Proceedings/ACSA.AM.112/ACSA.AM.112.4.pdf?v=2

リビングデバイスとは、生物機能を電子・機械システム等と融合させて利用するデバイスである、その技術的特徴や用途から、バイオセンサー/チップ、バイオアクチュエータ、バイオ発電、バイオリアクタ、DNA ストレージ、バイオコンピュータの 6 種に分類でき、それぞれの特徴は表 3-6-6[238]のとおりである。

表 3-6-6　リビングデバイスの分類とその市場規模

デバイス	概要	2030年の市場規模（億ドル）
バイオセンサー/チップ	生体分子の高い基質特異性とシグナル伝達を活用した効率的かつ持続的なセンシング	524
バイオアクチュエータ	筋肉細胞を始めとする生体材料を利用し微細な動作を実現する駆動装置	167
バイオ発電	生物機能と生物由来の物質による発電	34
バイオリアクタ	細胞や微生物の生体触媒や効率的な化学反応を用いた、高効率かつ環境負荷の低い物質生産	188
DNAストレージ	DNAを活用した電子機器よりも高密度に情報を保存する方法	44
バイオコンピュータ	DNAや粘菌の性質を応用生物化学的な反応を利用した情報処理	2

バイオセンサー/チップは、様々な物質の検出や臓器チップ等に応用されつつあり、その市場規模は大きいと予想している。また、生体機能を模倣する人工筋肉や人工臓器などを含むバイオアクチュエータは、医療への応用が試みられており開発が盛んである。

生物は長い進化の過程で、外的環境因子や生体内情報を高精度にセンシングする機能、さらにセンシングした外的及び内的信号に対して適切な応答を行う高度な機能を身に付けてきた。この機能を用いて、生体情報や自然環境の状況を観測し、制御することにより生体や自然環境を適した状態に維持する価値を提供することをここでは、『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:リビングマテリアル・リビングデバイス』と設定した。

『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:リビングマテリアル・リビングデバイス』という領域でのフロンティア領域を議論する際の 5 つの観点について、下記に簡単にまとめる。

[238] 2024 年度 NEDO 成果報告書「生物機能を利用したデバイス分野の技術開発等に関する調査（2024 年度バイオエコノミー分野の定点観測調査）」

①将来性（成長性・社会課題）

ヘルスケア市場は、2,700～2,800 兆円（2034 年）に成長すると予測[239]されており成長領域である。その中で、センサーに関する市場は 2030 年に 524 憶ドル（7.9 兆円）に達すると予測され、同様に成長領域である。

②技術・アイディアの革新性

ヘルスケア、環境管理の観点をはじめとして、バイオものづくり基盤技術などでも、高度センシング及び制御技術は、極めて重要かつ有用な領域である。欧米でもエマージングテクノロジー（バイオテクノロジー：センサー・センシングほか）などとして戦略的に取り組んでいる。制御においてはリビングマテリアル（Engineered Living Materials）が注目されており、活発な研究開発が行われている。

③日本の優位性

後述するが、生物機能をモジュール化する研究は日本が先導してきた（例：無細胞タンパク合成系、生体適合材料など）。現在、欧米や中国の追い上げを許している状況であるが挽回は可能である。

さらに、先進国の中で超高齢化が進む日本において、高度センシングを用いたヘルスケアで、先進的なソリューションを実証できれば、この分野で先行できる可能性は高い。

④民間のみで取り組む困難性

有望用途が期待されるも現状の技術レベルでは事業の視認性が低い。プロトタイピングへの支援が効果的と考えられる。

⑤その他特筆すべき理由

基礎研究段階の技術も対象となるため、テクノロジープッシュに陥ることなく、社会実装を志向してマーケットプルと連動させるアイデア募集及びフィジビリティスタディが重要である。

[239] 医療・健康ビジネスの未来 2025-2034 （日経 BP 社） https://project.nikkeibp.co.jp/mirai/mhbiz/

3-6-5 (2)具体的な手段(技術開発とその他の社会実装に向けた取組)(T)

上述したように、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の価値を提供するための技術開発の事例としてリビングマテリアルやリビングデバイスの活用が考えられる。

これらの技術開発の背景として、生物機能のモジュール化及びその利用という視点から考察していきたい。分子生物学や合成生物学分野の研究の進展に伴って、生体分子情報や分子間のネットワークの知見が飛躍的に増加するとともにデジタル技術の進展によるデータベースの整備、核酸やタンパク質合成の効率化、低コスト化が進んだ結果、欧米主導の形で生体分子システムの人工設計や、モデル細胞における生体分子ネットワークの構築の研究が推進された。

戦略的ファンディングや 2005 年から MIT(マサチューセッツ工科大学)で始まった iGEM[240](The International Genetically Engineered Machine competition)という学生チームの国際コンペティションを通じて、合成生物学的アプローチに基づいた物質生産等の出口を意識した研究が積極的に行われてきた。この動きが、バイオものづくりやセンサー開発などを加速している。この頃、日本では、2007 年に基礎研究者を中心に「細胞を創る」研究会[241]が発足し、アカデミアを中心として異分野間の交流が進められ、その後、経済産業省『革新的バイオマテリアル実現のための高機能化ゲノムデザイン技術開発』(平成 24 年～28 年)[242]、NEDO『植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発』(2016 年度～2021 年度)[243]、さらに後継のプロジェクトや基金事業などの応用研究に対して戦略的なファンディングが進められている。

さらに、欧米では Synthetic Cell(合成細胞)というコンセプトのもと、生物機能を解明し、モジュール化して再構成することにより、細胞の起源についての現象解明という基礎科学的知見を得ることに加えて、これらの再構成した人工細胞を産業利用する構想が進んでいる(図 3-6-10)。

[240] https://igem.org/
[241] http://jscsr.org/ja/
[242] https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/kenkyu_innovation/hyoka_wg/pdf/016_07_01.pdf
[243] https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100118.html

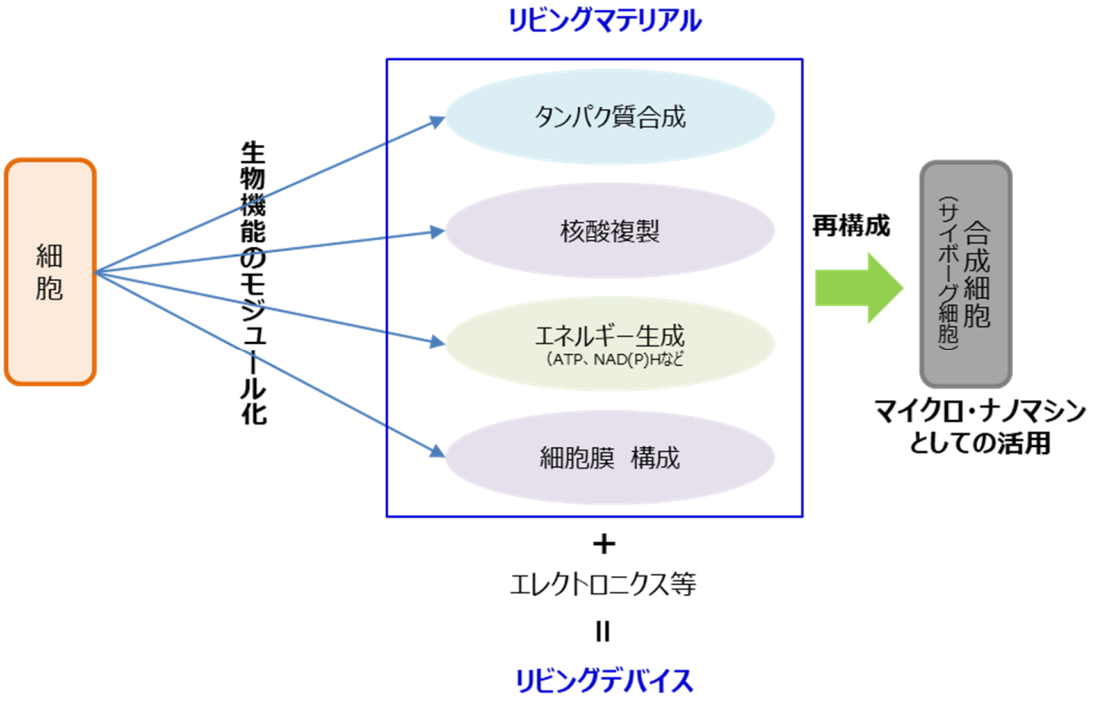


図 3-6-10　生物機能のモジュール化と利用のコンセプト図
（リビングマテリアルとリビングデバイスの関係性）

また、日本で進められてきた「細胞を創る」研究会のコンセプトは非常にユニークで、モジュール化した生物機能の産業利用も進められた。生物が持つタンパク質合成という機能をモジュール化した無細胞タンパク質合成系（Pure System）は、東京大学上田卓也教授のグループにより開発され、現在世界のデファクト・スタンダードとなっているが、Synthetic Cell（合成細胞）というコンセプトによる欧米を中心とした研究開発で追撃を受けている。

Synthetic Cell（合成細胞）に関する論文は、比較的古くから投稿が始まり、2000 年以降コンスタントに増加しており注目度の高さをうかがわせる（図 3-6-11）。ヒトゲノム解析や合成生物学的手法の寄与もあると思われる。

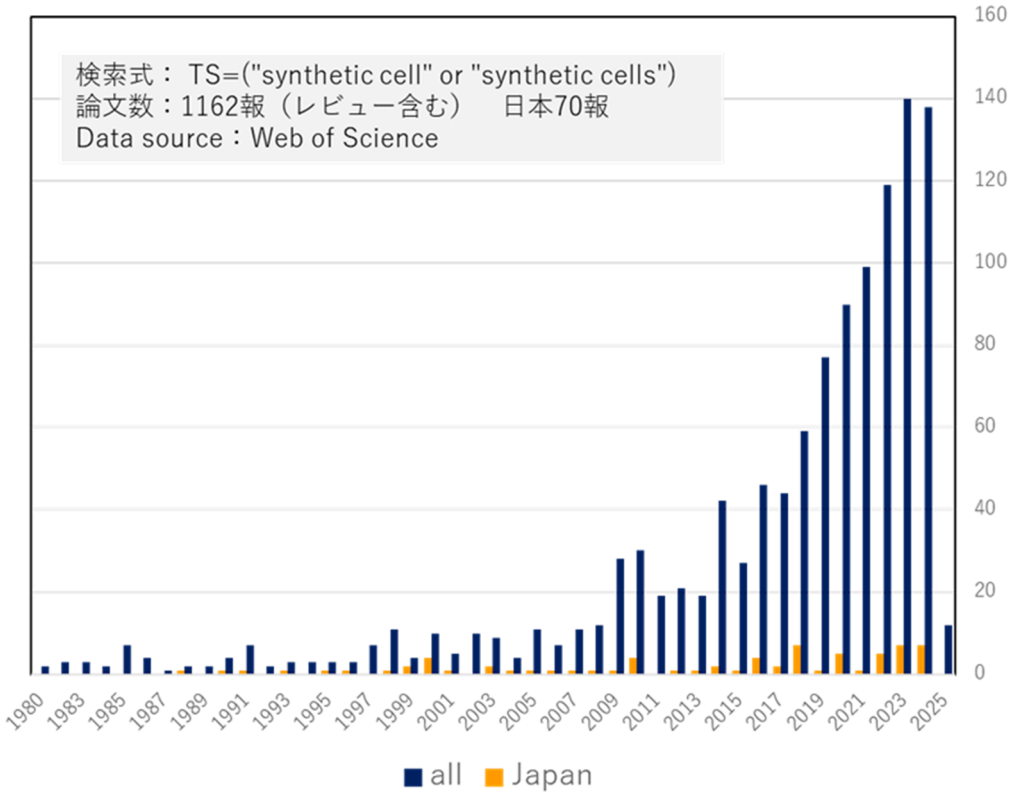


図 3-6-11　Synthetic Cell（合成細胞）に関する論文数の推移

出所：Web of Science™ の検索結果を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

また、リビングマテリアルに関する論文数も、2012 年頃から急激に増加しており、合成生物学的手法の進展による寄与とこの分野の注目度の高さをうかがわせる（図 3-6-12）。日本からの投稿は必ずしも多くはないが、生物機能のモジュール化という観点に立つと日本の存在感の高い領域もあることが分かる（図 3-6-13、図 3-6-14、図 3-6-15）。

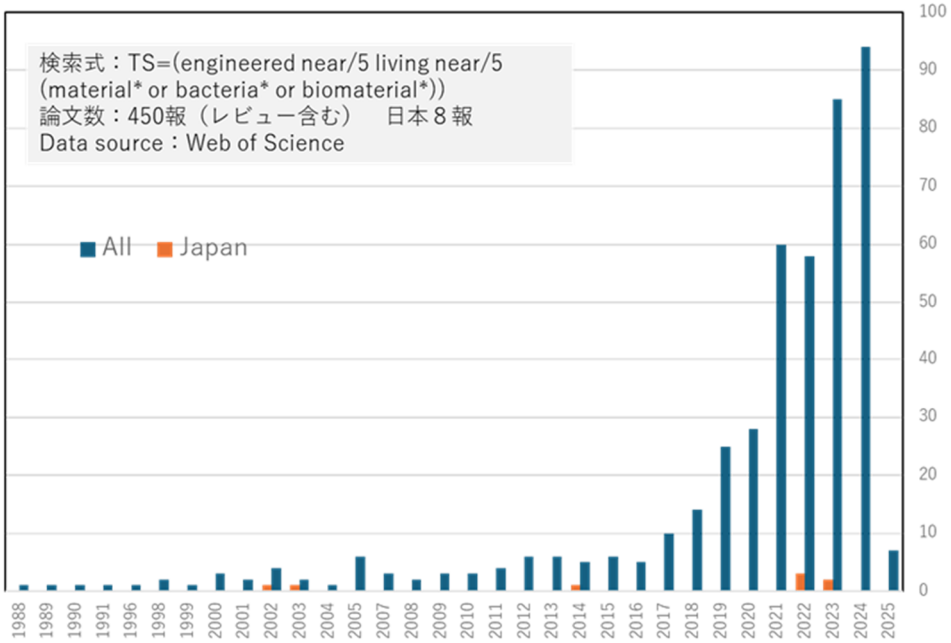


図 3-6-12　リビングマテリアルに関する論文数の推移

出所：Web of Science™ の検索結果を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

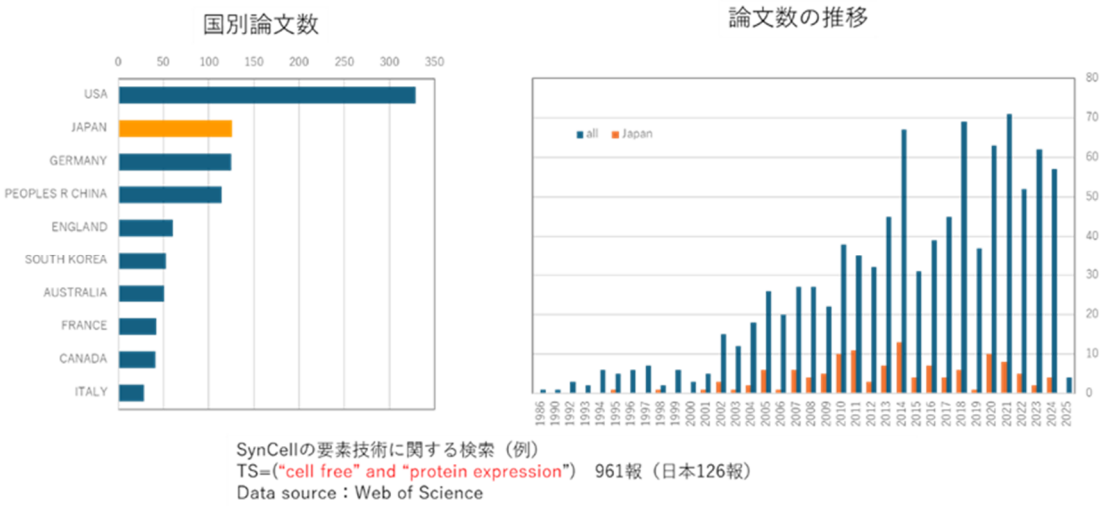


図 3-6-13　生物機能（無細胞タンパク質合成）における論文数の状況

出所：Web of Science™ の検索結果を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

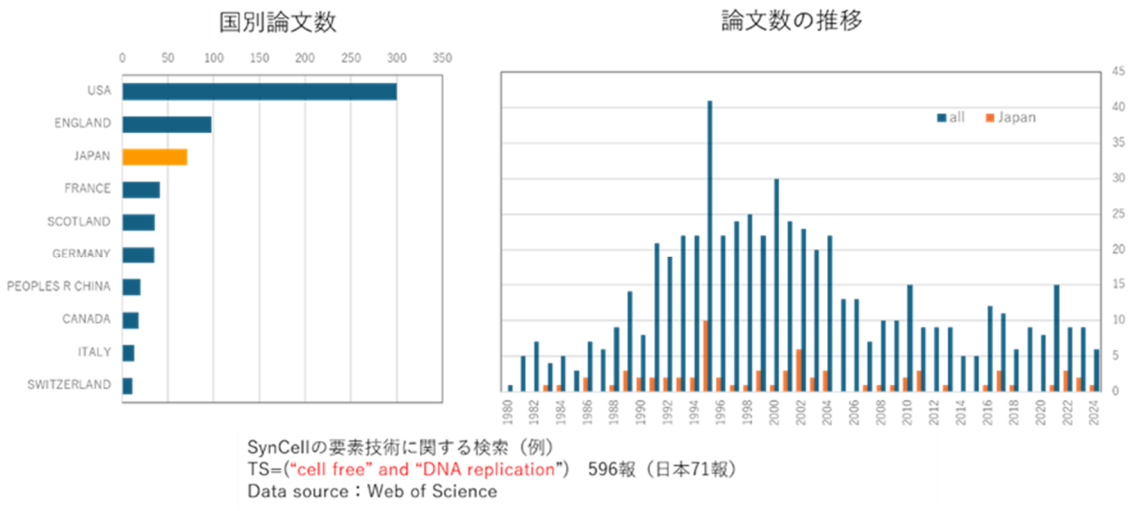


図 3-6-14　生物機能（無細胞 DNA 合成）における論文数の状況

出所：Web of Science™ の検索結果を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

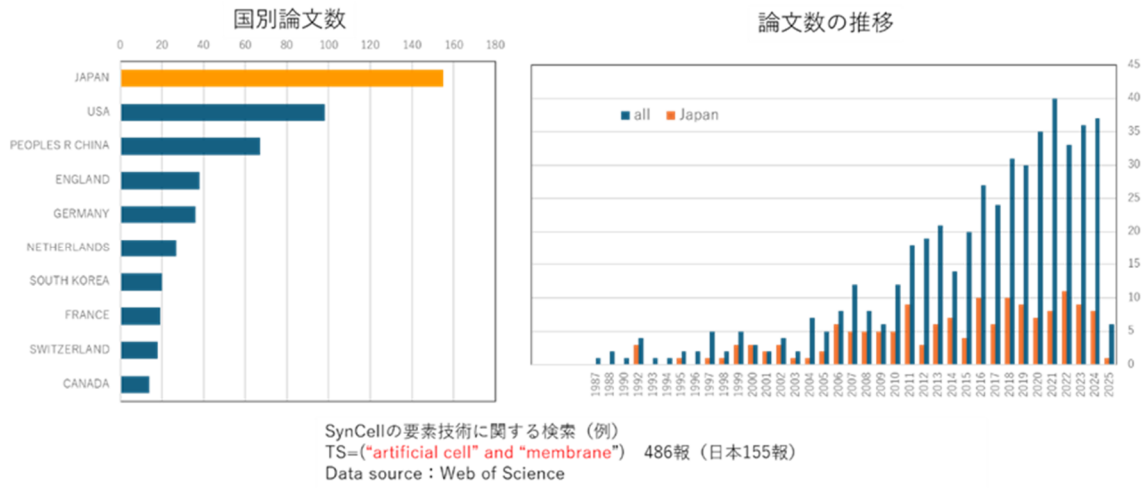


図 3-6-15　生物機能（合成細胞・膜）における論文数の状況

出所：Web of Science™ の検索結果を基に NEDO イノベーション戦略センター作成

Synthetic Cell（合成細胞）も含めて、インパクトファクターや被引用数などの解析により特徴を明らかにして、優位な研究分野やターゲット領域を見極めることが重要である。

リビングマテリアルを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に活用するコンセプトを図 3-6-16 に示す。疾患バイオマーカーや環境シグナルなどをリビングマテリアルが感知して、代謝活性の変化や遺伝子発現の制御、化合物

の合成、放出などの応答を行い、疾患の治療や体調の管理、環境状況の維持、管理などを行うものである。

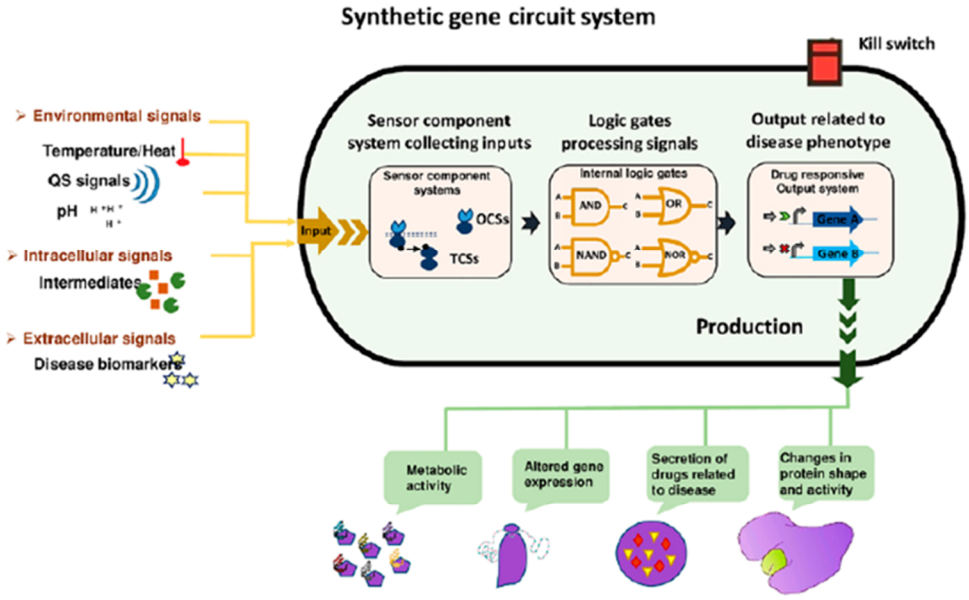


FIGURE 2 | Synthetic gene Circuit System. It has three sections, including a sensing unit that can sense environmental signals (temperature, heat, and pH), intracellular signals (intermediates), and extracellular signals (disease biomarkers). These signals are received by the signal processing unit that processes the signals with the combination of logic gates to actively sense target stimuli. Moreover, AND, NAND, OR, and NOR are complex logic gates employed for multilayered logical processing. Finally, the actuator dictates the output of system parameters, for example, the modulation of gene expression and enzyme proteolysis ultimately hikes desired biological functions and phenotypes, such as cell growth regulation, cell morphology, fate, and motility change. Kill switches are usually used in designed bacteria so that their population can be controlled after accomplishing their task.

図 3-6-16　リビングマテリアルの活用コンセプト
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

出所：Engineered Bacteria-Based Living Materials for Biotherapeutic Applications（Omer et al.、2022）
https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.870675

研究事例として、工学的に機能化した微生物細胞を治療等に用いる研究[244]、ヒアルロン酸を産生する微生物細胞を内包し、角膜の乾燥を緩和するヒアルロン酸を長期間徐放するコンタクトレンズ[245]の事例が挙げられる。また、環境因子に対応する事例などもレビュー[246]にまとめられている。いずれも生体情報や環境情報の高度センシング及び生体や環境の制御を行っている事例であるが、更に多くのアイデアが今後提案されてくることが予想される。そのようなアイデアを広く募集しながらフィジビリティスタディにより検証を行うことが重要と考えられる。

[244] https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/pmid/39443745/
[245] https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/adma.202313848
[246] https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10903423/pdf/BRIEIM-000004-011305_1.pdf

リビングデバイスの分類は前述の表 3-6-6 に示したが、この中で高度なセンシング技術を応用するデバイスとしてバイオセンサー/チップ、バイオアクチュエータの研究が進められている。

人間の健康状態を測定する指標のうち、糖尿病の診断指標の一つである血糖値は長年研究開発が行われてきた測定ターゲットである。糖尿病は悪化すると動脈硬化や網膜症を発症し、また腎症を発症すると透析が必要になるため、正確な血糖モニタリングが非常に重要である。標準的には採血した血漿/血清中のグルコースを生化学的に定量化する検査方法がとられている。また患者が自宅で自己血糖測定（SMBG）装置を使用してモニタリングする方法もある。最近では皮下間質液（ISF）内のグルコースを数分ごとに測定する持続血糖測定（CGM）システムが注目されており、我が国でも『FreeStyle リブレ』が保険適用になっている。これは上腕にパッチを装着し、測定結果はスマホアプリでリアルタイムに表示され行動変容が期待できる機器である。

一方、健常者の生活習慣改善用途での血糖値を非侵襲的に測定する機器の開発は、身体への負担や感染リスクがないため、古くから取り組まれているものの、個人間での差異の補正や給電に課題があると言われている。最近ではマイクロ流路を活用し、汗に含まれる各種マーカーを測定するウェアラブルデバイスの開発もなされている。

生物機能を活用し生体情報や環境情報の高度センシングするリビングデバイスの例として、生物素子での電気化学的相互作用によって生成される電流を測定するセンサーが挙げられる。生物反応は極めて特異的であり、感度も高い。本技術は患部の状態を検知して薬を出すスマート包帯や、生物素子及び検出部を小型化し集積したバイオセンサーの開発が進められている。最近では、ウエラブルデバイスの給電の課題解決策として、グラフェンを利用して創傷の治癒過程を長期にモニタリングする自己給電型のデバイス開発が報告されている[247]。

また、研究開発ツールとして臓器チップ[248]が挙げられる。バイオ医学研究、微細加工、マイクロ流体工学における最近の飛躍的進歩により、OOCs（臓器オンチップ：organs-on-chips）として知られ、人間の臓器を機能単位に分割した上でマイクロチップ上に再現したモデル臓器の開発への道が開かれた。従来の細胞培養モデルでは臓器レベルでの複雑な生理機能の再現や、様々な組織タイプに対して臨床的に関連する疾患の症状を再現できる疾患モデル臓器の構築は困難であったが、OOCs では臓器間の応答が再現できるため、これらの課題が克服できる（図 3-6-17）。さらに、OOCs は流体の動きを調節する機能を提供し、生理的流れ（血液循環や間質流など）によって誘発される機械的刺激など、様々な刺激を再現でき、生体内での複雑な薬

[247] https://www.nature.com/articles/s41467-024-55790-x

[248] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665906924000023

物反応をより包括的かつ正確に予測できる。この革新的な技術は、肝臓、肺、腸、腎臓、脳、心臓、皮膚など、様々な臓器タイプに及び、それぞれは外部からの刺激を検知（高度センシング）し、適切な応答によってホメオスタシスを維持（生体や環境制御）している。

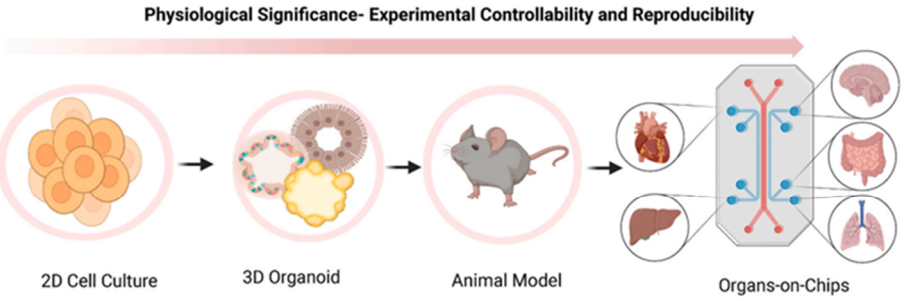


Fig. 1. Illustration depicting preclinical models employed in biomedical research. Conventional 2D/3D cell cultures facilitate rapid and reliable drug response but their ability to fully replicate the physiology and pathology of living organs is limited. Animal models faithfully mimic physiological aspects but lack human compatibility. Microfluidic OOC platforms offer an experimentally controllable cell culture within an organotypic microarchitectural environment, providing a more physiologically significant platform.

図 3-6-17　生物医学研究で使用される前臨床モデルの比較

出所：Biotechnology Notes（Srivastava et al.、2024）
https://doi.org/10.1016/j.biotno.2024.01.001

これらのセンシング関連のリビングデバイス研究に加えて、ゲノム編集をはじめとする遺伝子編集技術の進歩に伴い、任意のタンパク質や DNA を合成することが容易になったこともあり、バイオ発電や DNA ストレージに関する研究開発も世界的に活発化している。前述したように、マイクロ流体工学との組合せやグラフェンを応用することにより、新たな概念のデバイス開発も取り組まれており、リビングデバイスでは、様々なテーマを設定し、研究開発を実行することが肝要である。

前述のように、バイオ分野では一つの技術が広範囲な分野に急速に普及していくことがある。そのため、エマージングテクノロジーに挙げられている技術やその周辺分野は、基礎研究の段階からその進展を注視する必要がある。

これらを進めるにあたり、各国機関が公表しているエマージングテクノロジーでもセンサー・センシング、合成生物学や関連する技術が触れられており、世界的に注目されて競争が激化する可能性がある。また、OECD や科学界にてガバナンスや責任ある研究・イノベーション（RRI）などの議論の中で、アジェンダとして設定されている。合成細胞（Synthetic Cell）や生物封じ込め（Biocontainment）について便益とリスクを分析・評価した上で、ソフト規制及びハード規制などの必要性について議論されていることなどを考慮した上で、研究開発やルール形成を進めていくことが重要と考えられる。

バイオテクノロジー分野では、新たな発見・発明が短期間に破壊的イノベーションを起こし、広く産業利用されるケースも起こり得ることを考慮した上で、基礎科学段階か

ら継続的にウオッチ及び研究費補助などの適切なサポートを行うことが重要と考えられる。特に、リビングマテリアル・リビングデバイスは、センシング以外の産業用途へも波及する可能性があることは注視すべき点である。

3-7　6 分野の横断的考察

本節では、これまでの 3-1～3-6 で述べた各技術分野の MFT 分析結果から、全分野のロジックツリーで領域を整理し横断的に考察する。また、本章末として Ver. 1.0 でやりきれなかったことと今後の取組（Ver. 2.0 以降）について説明する。

Ver. 1.0 で抽出した M や F を俯瞰して分析する。図 3-7-1 は、3 章冒頭部で示した MF 全体俯瞰に対して、第 6 期科学技術・イノベーション基本計画に記載の方向性（多様な幸せ、強靭性、持続可能性）などを念頭に、抽出した M や F の親和性が高いと思われるものを括ったものである。その結果から、よりインパクトの大きな融合領域を創出できる可能性がある一方、F の洗い出しの余地がある領域があることも分かった。こうした課題について、Ver. 2.0 以降で引き続き検討を行っていくこととしたい。

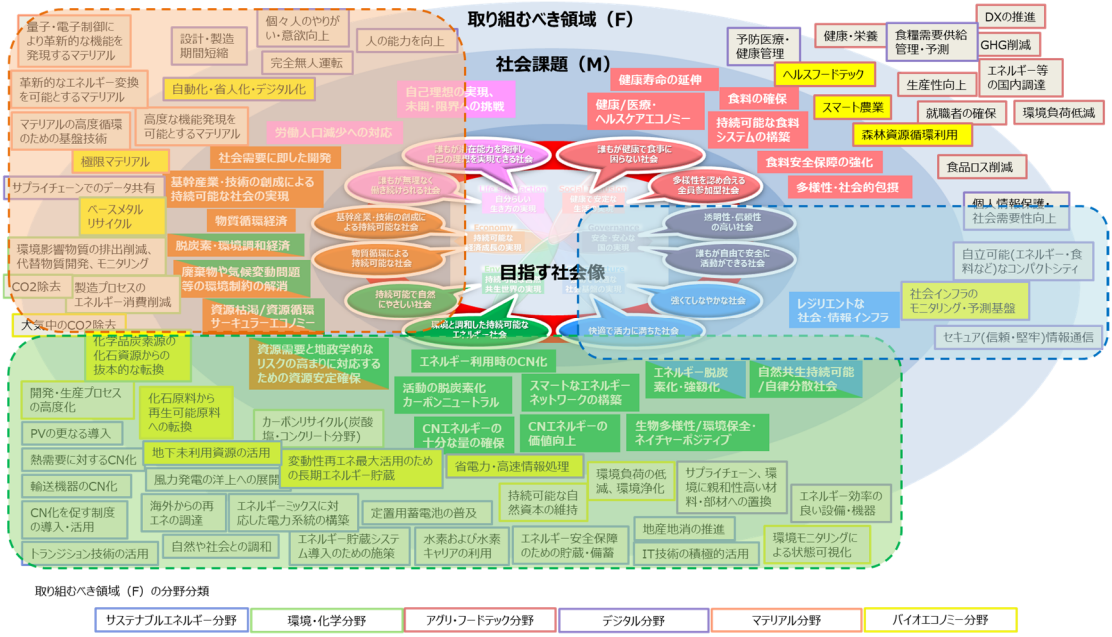


図 3-7-1　MF 全体俯瞰

次に、本俯瞰図の根拠となる全分野の MFT ロジックツリーを図 3-7-2 に示す。これらのロジックツリーは、各技術分野で示された社会課題（M）と提案する提供価値（フロンティア領域等：F）をツリーで分析したものである。図の左に「6 つの価値軸」「12 の社会像」を示しており、そこから関連する各分野の社会課題をつないでいる。また、提供価値（F）については 3 階層に分解し、それぞれの社会課題と提供価値がつながるように分析している。この分析にあたり、各分野から示される内容は黒字、分析にあたり作成した内容を青字の表記で色分けしている。（なお、本図は概略版のツリーとなり、全体を網羅したフルバージョンのツリー図については、巻末付録に提示している。）



図 3-7-2　MFT 全体ロジックツリー（概略版）

これらの分野を跨ぐ俯瞰から、融合領域の可能性について幾つかの例示を踏まえて述べる。表 3-7-1 は、3-1～3-6 で述べた各技術分野の内容から、融合領域として今後検討の余地があると考えられるフロンティア領域と技術の一例をまとめたものである。なお、記載の技術例については各技術分野の内容からキーワードとして抽出している。

なお、融合領域は 1 章で定義したとおり、分野をまたぐ領域（提供価値）同士の融合により新領域となるものである。そのため、基本的には MFT 階層の F と F の対で検討されるものであるが、ほかに T と T の対になるものも有り得る。今回の Ver. 1.0 では、3 章冒頭部で述べたとおり各技術分野の技術視点寄りの内容を統合しており、これらは社会課題起点のバックキャスト・アプローチが十分にされていないものである。そのため、本節で例示する融合領域についても T と T の対になっている。次回（Ver. 2.0）以降アップデートでの課題としては、融合領域を F と F の対で検討し、さらに、これらが具体的にどのように M 及び T につながるかといった観点で分析し提案していくことである。

表 3-7-1　融合領域（F）→技術（T）の一例及び関連する分野

融合 F	融合 T	融合分野
高効率生産プロセス	触媒技術×発酵技術	環境化学×バイオエコノミー
プロセス・インフォマティクスやマテリアル・インフォマティクスによる新規物質の開発早期化	AI×化学／バイオ／マテリアル	デジタル×全分野（創薬など）
生体モニタリング・制御	デジタル×センサーマテリアル×バイオ	デジタル×マテリアル×バイオエコノミー

一つ目に環境・化学とバイオエコノミーの融合領域として、触媒・発酵技術の組合せがあり、具体的な技術（T）の組合せとして、熱分解と触媒分解の一貫処理が挙げられる。これは生産プロセスにおける分解処理を効率的に行うことから考えられるものである。課題としては収率や触媒寿命があり、更なる検討・分析の余地があるものとされている。

デジタル分野では、まず一つ目にプロセス・インフォマティクスやマテリアル・インフォマティクスが挙げられる。これは機械学習や生成 AI 等を用いた新素材の効率的開発や、リサイクルシステムの仕組みづくりといったものである。融合分野としてマテリアル、環境・化学が挙げられる。また、次世代コンピューティング候補の一つである量

子コンピューティングについて、AI を融合した機械学習による創薬の開発が挙げられる。量子コンピューティングは分子結合配向探索など複雑な最適化に適していることから、製薬企業との連携が加速している。一方で量子コンピューティングの実現を含めた課題が多くある。

以上の例から、デジタル分野やマテリアル分野は、他分野の新たな商品開発の核となり、機能・提供価値を創出するポテンシャルを秘めていることや、環境・化学分野では、従来の高機能化に加え、サーキュラーエコノミーに不可欠な分解・分離技術（出口）にも目を向けていることが分かる。ほかに触媒・発酵技術を有するバイオエコノミー分野やアグリ・フードテック分野とも連携することで、シナジーが発揮する可能性があることが分かる。

なお、ここで述べた融合領域については一例であり、Ver. 2.0 では本内容以外の融合領域の可能性についても検討・分析を行い、具体的な提案につなげていく。また、これらの分析を踏まえ、Ver. 2.0 以降では各技術分野の俯瞰調査をさらに進めるとともに、技術分野を横断する全体俯瞰を深掘りすることで、分野をまたぐ融合領域などの探索も進めていく。そして、日本ならでは強みを持った領域の技術を核として、他の分野と融合することで、他国が容易には真似できない（代替が困難な戦略的不可欠性をもつ）強みを生み出せないかなどについても考察していく。

4 章　終章

NEDO TSC として初めて Innovation Outlook Ver. 1.0 を取りまとめた。Innovation Outlook の取組は、今回が始まりであり、課題も残されている。それでも、今回取りまとめたことの意義は大きい。

TSC は 2014 年度に設立以来、技術戦略研究センターとして、個々の技術・産業を起点として技術戦略を策定する取組を進めてきた。技術戦略の政策立案やマネジメントへの活用にあたって課題も見られる中で、TSC の在り方について、設立から 10 年を迎えることを契機として、経済産業省や NEDO 内のみならず、産業界、アカデミア、金融機関、海外の FA・シンクタンクなどからも意見を聴き、顧客ニーズを意識し、見直しを行った。その結果を踏まえ、2024 年 7 月にイノベーション戦略センターに改組し、Innovation Outlook を中心となる活動と位置付けて、将来像の実現に向けて技術分野全体を俯瞰した上で、新たに取り組むべき領域（フロンティア領域）や取組を強化すべき領域を抽出し、技術開発から社会実装までの道筋を描くという新たなチャレンジを開始したものである。

このように今回の取組は、TSC にとっては大きな「方針転換」であり、TSC 内で議論を重ね、試行錯誤しながら進める必要があった。さらに、経済産業省や NEDO 内の関係者から、Innovation Outlook に対する期待や意見がある中で、それらにも応えていく必要があった。そうした中で、まず Innovation Outlook を形にできたこと自体成果と言える。今回の Innovation Outlook Ver. 1.0 に対しては、様々な意見があるかと思うが、そうした議論を喚起できることも Innovation Outlook を発信する狙いである。

Innovation Outlook の活動は、両利きの経営の考え方を踏まえ、新たなフロンティア領域等を探索していくものである。フロンティア領域は技術や市場に不確実性が高く、失敗する可能性も大きいものである。失敗を恐れてはフロンティア領域の取組は進められない。一方、賢くフロンティア領域の取組を進めるためには、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その社会実装の取組をアジャイルに見直しながら進めていきたい。そのため、Innovation Outlook はそれに対する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を行うとともに、Innovation Outlook で掲げたフロンティア領域等について国内外から幅広くアイデアを集め、フィジビリティスタディを実施する仕組みを回していく予定である。

また、Innovation Outlook は、個々の技術開発にとどまらず、事業モデルの構築、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まで見据え、トランスフォーマティブ・イノベーションの創出を目指したチャレンジングな構想につながるものである。そのような構想は TSC のみで実現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、メディアとの連携

が必要不可欠である。TSC としては、Innovation Outlook をこうした多様なステークホルダーに発信することで、それらの機関と連携した研究開発や社会実装に向けた取組につなげていきたい。

国際的にも、AI、量子、バイオをはじめとする新興技術の急速な進化により、社会に対する便益とともに、リスクをもたらす懸念が高まる中で、戦略的インテリジェンスの必要性について議論が進んでいる。OECD の『Framework for Anticipatory Governance of Emerging Technology』(2024)では、政策として、新興技術の予測不可能な性質を認識し、テクノロジーの潜在的な方向性、経済的な利害、社会的な影響の包括的な分析を含む、戦略的インテリジェンスの共有を促進すべきとしている。TSC では、戦略的インテリジェンスの提供を担うシンクタンクとして、Innovation Outlook などの様々な活動を継続的に発展させていきたい。

TSC 内外での議論を総括すると、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る。

1)今回は技術分野ごとに検討したものを統合したため、技術分野ごとのロジックについて整合性が取れていないことや、価値を起点とした技術分野間の融合領域について十分な検討ができていないこと

2)技術分野を俯瞰的に分析することとしているが、限られた時間・リソースの中で限られた情報を元にしていることから、必ずしもカバーできなかった領域も存在しており、また必ずしも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

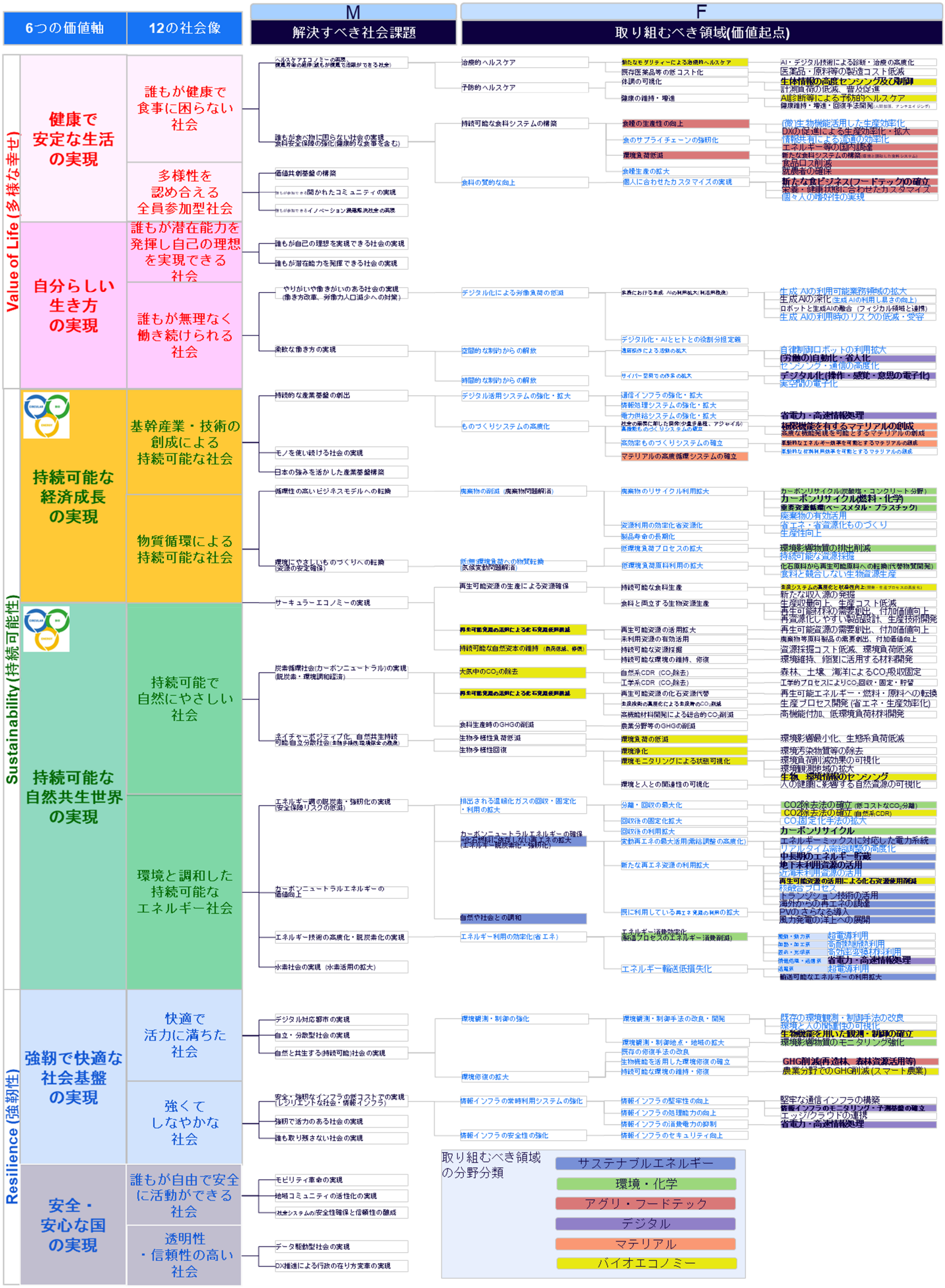
4)COVID-19 や米中対立など大きな経済社会情勢の変化により社会課題の設定自体が揺れ動くことがあること、破壊的なイノベーションは社会課題から必ずしも生まれる訳ではないことなど、不確実性や変動性への対応は、MFT フレームワークを含むあらゆるロジックモデルを活用する際に留意が必要であること

5)今回のフロンティア領域等は価値を基準に特定したものであるが、価値の実現に向けて、今後、技術開発要素を具体化するにあたっては、経済産業省が提示する 5 つの観点や、ディープテックなどの日本の強み、戦略的不可欠性といった観点からの更なる深掘りが必要であること

6)フロンティア領域等の提案にあたっては、技術の正の側面を強調しがちであるが、直接的な効果だけでなく、間接的な影響も含め、技術がもたらす負の側面も考えながら進めることが必要であること

これらの点も踏まえながら、Ver. 2.0 以降の構想を検討していきたい。また、読者の皆様からのフィードバックも期待している。

付録：MFT 全体俯瞰図（詳細版）



編集後記



イノベーション戦略センター
センター長　岸本　喜久雄

TSC は、2024 年 7 月にイノベーション戦略センターとして改組し、新たな体制で活動をスタートしました。そして『Innovation Outlook』の策定を中心的な活動の一つと位置付け、センターのメンバーが一丸となって議論を重ねつつ取組んで参りました。そして、その成果として初版となる『Version 1.0』の公表に至ることができました。『Innovation Outlook』では TSC が所掌する全ての技術分野を俯瞰することにより、フロンティア領域を探索しました。その際に、技術開発視点のみに囚われることなく社会像や社会課題に視点を置き、それに対する解決手段を提案することに重点を置きました。また、個別の技術分野にとどまることなく、横断的な分析を加えて、より大きな括りで提供価値を基準としてフロンティア領域を提案することを目指しました。このような取組みは私たちにとって初めてのものでした。そのため、新 TSC 発足から今度の公表までの間、TSC 内では各技術分野の内容のみならず、全体構成、キーメッセージの設定や分析手法の選定を含め多くの点について議論を重ね、試行錯誤をしながら策定の作業を進めました。その際に、技術分野についての高い知見と、幅広い見識を持つ TSC のフェローやアドバイザーの皆様、さらには外部関連機関の様々な方からの多くのご助言を賜りました。ご協力をいただきました皆様に心より感謝申し上げます。

本書の内容を実効性あるものとするために、選定された各重点フロンティア領域について実際にプロジェクトを推進していくことが期待されます。従来は、不確実性の高いいわゆるフロンティア領域の技術開発に対しては、実際に社会実装まで結びつくのか、成功するのかという評価が難しくなりがちで、国が支援の是非を慎重に判断せざるを得ない傾向にありました。そのためフロンティア領域に相応しいプロジェクトの推進策を講じることが求められます。その具体として、責任者としてプログラムディレクター（PD）を指名し、PD のリーダーシップの下に、社会実装までを視野に入れて、周辺分野の動向も見極めつつプロジェクト内容をアジャイルに見直しながら、プロジェクトを柔軟かつ迅速に推進することが挙げられます。目まぐるしく情勢が変化する現代においては、国内外の市場、技術、政策の動向調査を踏まえつつも、失敗をある程度許容することを前提にプロジェクトを牽引することが求められます。PD の見識にプロジェクトの推進を委ねることがフロンティア領域の研究開発の可能性を高めることにつながると考えます。

この度の取組みを契機に様々なプロジェクトの創成に繋げられるように新たなフロンティア領域を幅広く探索する取組を継続していきます。とくに、分野を横断する融合領域の検討を深めていくことが重要と考えています。そして、フロンティア領域の研究開発を重層的に進めていくことで実現する日本が先導するイノベーションに貢献していきたと考えています。そのためにも、本書の内容を継続的に更新し充実させて参りたいと思います。TSC は『Innovation Outlook』を我が国の次世代の希望につなぐ情報源として発信して参ります。読者の皆様からもフィードバックを期待しております。是非とも改善に向けた提言を頂戴できると幸いです。

Innovation Outlook Version 1.0

2025 年 7 月 1 日発行

イノベーション戦略センター

■センター長　岸本　喜久雄
■事務局長　田辺　雄史
　　植木　健司（2025 年 6 月まで）
■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
　　中村　勉　（2025 年 4 月まで）
■アグリ・フードテックユニット長　宇木　俊晴
■デジタルユニット長　横井　一仁
　　伊藤　智　（2025 年 3 月まで）
■マテリアルユニット長　高町　恭行
　　藤本　辰雄（2025 年 3 月まで）
■バイオエコノミーユニット長　味方　和樹
　　水無　渉　（2025 年 3 月まで）
■標準化・知財戦略ユニット長　玉木　宏冶
■国際戦略ユニット長　田辺　雄史
　　徳弘　雅世（2025 年 6 月まで）
■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。