

令和 7 年度経済安全保障の確保に資する 「新興技術」の動向等に係る調査研究

調査研究報告書

2026年3月

株式会社NTTデータ経営研究所

目 次

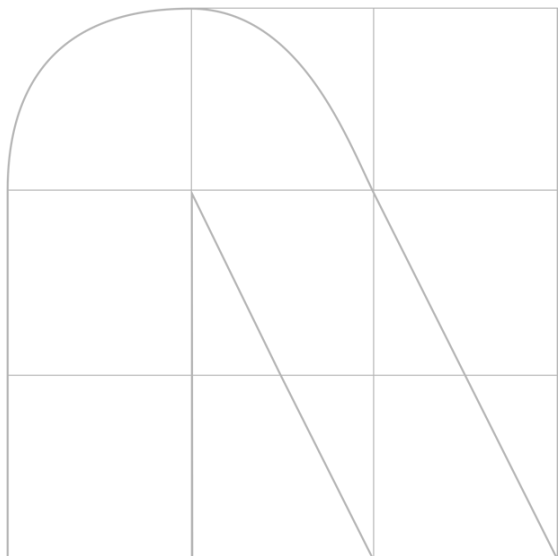
1. 調査概要
 1. 調査の背景と目的
 2. 調査方針
 3. 調査対象とする技術領域
2. 経済安全保障の観点から重要となる「新興技術」分野・領域の特定
3. 特定した分野・領域における、今後先端的な重要技術たりえる具体的技術の導出

1. ■ 調査概要

1.1 調査の背景と目的

1.2 調査方針

1.3 調査対象とする技術領域



1. 調査概要

1.1 調査の背景と目的

- 我が国をはじめ、各国においては、経済安全保障の確保に関する各種政策、特に先端的な重要技術の研究開発の促進やその成果の活用に向けて鎬を削っているところである。
- 今後、中・長期的に我が国が国際社会で確固たる地位を確保し続けるためには、経済安全保障の確保に資する重要技術について、これまで研究開発等の支援の対象としている基盤技術のみならず、いわゆる「新興技術」といわれる、未だ普及段階には至っていないものの、今後社会に大きな影響を与える可能性のある技術に関しても、積極的に保護・育成を図る必要がある。
- このため、我が国として将来的に保護・育成を図るべき経済安全保障の確保に資する「新興技術」の動向等を明らかにすることにより、「経済施策を一体的に講ずることによる安全保障の確保の推進に関する法律」（令和4年法律第43号）に基づく特定重要技術の開発支援等を効果的に推進するための検討を行う。

1. 調査概要

1.2 調査方針

- 本調査では、新興技術の分野・領域の特定及び具体的技術の導出に当たり、分析単位（機能領域）の設定、EMS評価による分野・領域の整理、技術導出及び技術分析の手順に基づき調査を実施した。

調査内容

2. 経済安全保障の 観点から重要となる 「新興技術」 分野・領域の特定	2.1 分析単位 （機能領域）の設定	- 新興技術を、既存の個別分野（海洋・宇宙等）ではなく、将来の経済安全保障上の「機能・役割」の観点から整理する。 - 複数の基盤技術が組み合わさることで発揮される共通的な分析単位（機能領域）を設定し、技術の広範な波及効果を捉える。 - 将来的な研究開発構想の「タネ」を網羅的に把握する。
3. 特定した分野・領域 における、今後先端的 な重要技術たりえる 具体的技術の導出	2.2 EMS評価による 分野・領域の特定	- 設定した分析単位に対し、EMSの評価軸（E：非連続性、S：戦略的重要性、M：社会・市場の動き）を用いて検討を行う。 - 現在および将来の国家安全保障に直結する重点分野・技術を特定する。
3. 特定した分野・領域 における、今後先端的 な重要技術たりえる 具体的技術の導出	3.1 技術導出の考え方	- 各分野・領域について、研究開発テーマを3つずつ設定し、それぞれ一つずつ、今後重要となる技術のうち、技術例として抽出した上で、対象技術の詳細情報を調査する。 - 調査対象技術選定の考え方を示す。
	3.2 各分野・領域における 具体的技術の導出	我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を整理し、総合的なギャップ分析を行う。

1. 調査概要

1.3 調査対象とする技術領域

- 本調査では、調査対象とする重要技術領域として下表の5つの分野を設定し、この枠組みに基づき各領域における研究開発テーマ及び先端的な重要技術たり得る具体的技術を整理した。

調査対象とする5分野・領域と研究開発テーマ・技術

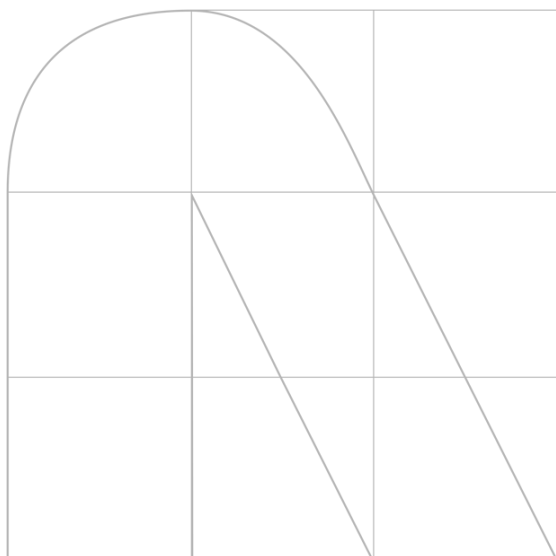
機能領域	分野・領域（技術グループ）	研究開発テーマ	先端的な重要技術たりえる具体的技術
A	A1 自律移動・無人輸送	1. 非GPS環境等の自律航法技術 2. 協調型マルチエージェント制御 3. 次世代無人機用高効率動力源	1. 慣性航法型位置推定技術 2. 自律船・有人船混在フリート制御技術（全体最適アルゴリズム） 3. ドローン用高エネルギー密度水素燃料電池
B	B1 次世代情報・サイバー基盤	1. ゼロトラスト・データ主権保護 2. ソフトウェア供給網の信頼性確保 3. エッジ計算・分散処理基盤	1. 秘密計算・連合学習プラットフォーム 2. 高信頼SBOM自動生成・脆弱性解析技術 3. 自律分散型セキュアOS／プロトコル
C	C2 海洋・海上安全	1. 海底インフラ監視 2. 水中通信ネットワーク 3. 海洋状況表示（MDA）統合分析	1. 海底ケーブル異常検知（音響・振動AI／DAS等） 2. 水中光無線通信 3. ローカル最適MDA
D	D3 先端製造・デバイス	1. 高度レーザー加工・光製造基盤 2. 超精密デバイス微細加工技術 3. 高度付加製造（3Dプリンティング）	1. フェムト秒レーザー直接描画（FDLW）による3D光回路・ガラス微細構造 2. サブミクロンCu-Cuハイブリッドボンディング（D2W/W2W） 3. インプロセス監視＋機械学習による欠陥検出・閉ループ制御
E	E3 バイオ・ヘルスケア先端	1. AIによる高度タンパク質・ゲノム設計 2. 細胞・遺伝子治療の製造自動化 3. 合成生物学による高機能物質生産	1. 基盤モデル型低データ対応タンパク質設計AI 2. in-vivo（生体内）直接細胞プログラミング・配送技術 3. 戦略鉱物バイオ抽出・高度濃縮デザイナー微生物

2. 経済安全保障の観点から重要となる「新興技術」分野・領域の特定

2.1 機能領域・技術グループの設定

2.2 EMS評価軸・項目による評価

2.3 調査対象とする技術分野・領域の特定



2.1 機能領域・技術グループの設定

2.1.1 新興技術抽出のための機能領域の設定

- 「経済安全保障上の重要技術領域」を横断的に支え、将来の「自律性」と「不可欠性」を決定づける共通の「機能・役割」に着目し、本調査の分析単位として5つの機能領域を設定する。

- ①Seedsの特定： 内閣府「統合イノベーション戦略 2024」において、宇宙や海洋といった「応用分野」を横断的に支える「基盤技術分野」として排他的に定義されている5つの技術（AI技術、量子技術、バイオテクノロジー、マテリアル、フュージョンエネルギー）を、本調査の分析対象（Seeds）として設定した。
- ②SeedsからFunctionsへの変換： ①の5つのSeedsは、技術単体ではなく、組み合わせることで特定の「機能」を発揮する。経済安全保障を強化する上での「機能・役割」に着目し、実務的な5つの機能領域に再編した。
- ③技術領域の横断性： A～Eの領域は、政府が「応用分野」としている「海洋・造船、航空、デジタル、エネルギー、医療、宇宙等の重要技術領域」を横断し、各領域に非連続な進化をもたらす「機能的共通基盤」として設定する。

技術基盤（Seeds）から機能領域（Functions）の設定

① 基盤技術（Seeds）	② 経済安全保障上の機能・役割（変換の視点）	③ 機能領域（Functions）
1. AI技術	判断・操作の自律化により、人手不足等の構造的課題を克服し、社会インフラの自律性を維持する	A. 自律・無人・制御
2. 量子技術	物理限界を突破する基盤の変革により、デジタル社会の信頼性を担保し、国際的な不可欠性を確保する	B. 計算・通信基盤変革
1. AI技術（デジタル・センサー）	不確実性を予見・制御するレジリエンスの構築により、外部からの行為に対し国家の自律性を死守する	C. 信頼・予測・レジリエンス
3. マテリアル ・ 4. フュージョンエネルギー	資源・環境制約を技術で代替・克服し、サプライチェーンの強靱化と日本の産業的優位性を維持する	D. 製造・供給制約対応
5. バイオテクノロジー	生命機能の高度な制御により、感染症等の脅威から国民を保護し、医療・食料の供給主権（自律性）を確立する	E. 生命・生体制御

出典： 内閣府「統合イノベーション戦略 2024」（令和6年6月4日 閣議決定）

2.1 機能領域・技術グループの設定

2.1.2 機能領域の考え方

- 前ページで設定した5つの機能領域は、特定の応用分野そのものではなく、**重要技術領域を横断的に共通して不可欠となる「機能」の創出**を目指すものである。

5つの機能領域の考え方

項目	内容
応用分野ではない	✓ 本調査で設定する5領域は、提言に掲げられた12の重要技術領域そのものではない
	✓ 各重要技術領域において共通的に必要とされる「機能・役割」に着目する
単独技術ではない	✓ 各機能領域は、単一の基盤技術によって成立するものではなく、AI／量子／バイオ／マテリアル／エネルギーなど、複数の技術の組み合わせによって実現される
	✓ 新興技術の影響は、技術の組合せとして顕在化するとの前提に立つ
評価は行わない	✓ 不連続な技術革新の可能性を踏まえ、将来のR&Dの「タネ」を広く捉えることを優先し、この段階では重要性／優先度等の判断は行わない
	✓ あくまで、後続の評価を行うための分析単位を設定することを目的としている

2.1 機能領域・技術グループの設定

2.1.3 政府方針等に基づく重要技術領域

- 「経済安全保障上の重要技術領域（12領域）」※を母集団とし、それらを本調査の分析単位である「5つの機能領域」へマッピングすることで、政策的要請を網羅的にカバーする枠組みとする。

機能領域と重要技術領域の分類

機能領域	対応する重要技術領域※	説明
A. 自律・無人・制御	② 航空関連技術領域 ⑦ モビリティ・輸送・港湾ロジスティクス ⑧ AI・先端ロボット関連技術領域	自律性の向上 ：人流・物流を支える基盤を自動化・無人化し、人手不足等の構造的課題を克服して社会インフラの自律性を維持する
B. 計算・通信基盤変革	③ デジタル・サイバーセキュリティ関連 ⑨ 量子関連技術領域 ⑫ 宇宙関連技術領域	不可欠性の確保 ：デジタル社会の信頼性を担保する基盤（データセキュリティ等）を確立し、国際社会における日本の技術的優位を確保する
C. 信頼・予測・レジリエンス	① 海洋・造船関連技術領域	自律性の維持 ：四方を海に囲まれた日本の構造的弱点（シーレーン、海底インフラ等）を監視・防護し、国家の安全を経済面から守る
D. 製造・供給制約対応	④ 資源・エネルギー・GX関連 ⑥ 製造・マテリアル（重要鉱物・部素材） ⑩ 半導体・通信関連技術領域 ⑪ フュージョンエネルギー関連技術領域	優位性・不可欠性の維持 ：供給制約を技術で克服し、サプライチェーンを強靱化。特に半導体等の生産基盤確保により、日本の存在を不可欠なものとする
E. 生命・生体制御	⑤ 創薬・医療・バイオ・フードテック関連	供給主権の獲得 ：生命維持に不可欠な医療・食料を、外部に過度に依存せず自ら「設計して作る能力」を確保し、国民の安全を担保する

※「経済安全保障の更なる推進に向けた提言」（2026 年 1 月 30 日 経済安全保障法制に関する有識者会議）より

2.1 機能領域・技術グループの設定

2.1.4 各機能領域における技術グループの設定

- 政府資料等に基づく広範な政策領域を「基盤・動態・将来性」の3軸でブレイクダウンし、我が国の「自律性・不可欠性」を左右する戦略的ボトルネックを網羅的に特定する。また、近年の動向を反映し、重要インフラ防護の視点を強化した。

技術グループの設定

機能領域	技術グループ	設定根拠
A. 自律・無人・制御	A1. 自律移動・無人輸送 A2. 高速・高機動モビリティ A3. 知能化制御・ロボット基盤	「平時から有事」までの社会維持能力の確保：航空・輸送分野等を網羅（A1～A3）。平時の効率的な物流から有事の極限域作業まで、人手に頼らず社会機能を維持し続けるための自律性を確保する
B. 計算・通信基盤	B1. 次世代情報・サイバー基盤 B2. 量子情報技術 B3. 宇宙情報インフラ	「国家の脳・神経・目」の自律化と統合：デジタル（B1）、量子（B2）、宇宙分野（B3）を包含。情報の収集・伝達・処理を担う一連のインフラを全方位で他国に依存せず、日本の技術的不可欠性を確立する
C. 信頼・予測・レジリエンス	C1. 重要インフラ・レジリエンス C2. 海洋・海上安全基盤 C3. 予測・意思決定基盤	「社会の急所と島国の弱点」の死守：近年の方針に基づき、医療等の基幹インフラを外部からの妨害行為から守る（C1）。海洋安全（C2）と合わせ、島国である日本の存立基盤を予見・防衛（C3）する
D. 製造・供給制約対応	D1. エネルギー・資源循環基盤 D2. 重要鉱物・機能材料 D3. 先端製造・デバイス基盤	「資源から制御まで」の垂直的な優位性維持：資源・エネルギーから半導体・製造基盤までをカバー。資源（D2）を動力（D1）に変え、デバイス（D3）で制御する供給網全体の優位性を維持する
E. 生命・生体制御	E1. 食料供給・バイオセキュリティ E2. 医療・公衆衛生テクノロジー E3. バイオ・ヘルスケア先端	「設計して作る能力」による供給主権の獲得：既存の医療・公衆衛生の維持（E2）に加え、バイオ技術による食料供給（E1）や創薬の「設計能力（E3）」を確保することで、根本的な供給自律性を獲得する

2.1.5 各技術グループにおける研究開発テーマの想定

- 政府方針が示す12の重要技術領域を包含する15の技術グループに対し、それぞれ「戦略的機能（S）」「技術的非連続性（E）」「市場動態（M）」の観点から3つの研究開発テーマを設定した。これにより、国家の自律性・不可欠性を左右する技術的ボトルネックを網羅的に特定する。

5分野・領域と技術グループ、研究開発テーマ

技術グループ	研究開発テーマ
A1 自律移動・無人輸送	1. 非GPS環境等の自律航法技術 2. 協調型マルチエージェント制御 3. 次世代無人機用高効率動力源
A2 高速・高機動モビリティ	1. 極超音速・高高度飛行制御 2. 高出力密度・耐熱推進システム 3. 統合航空交通管理基盤
A3 知能化制御・ロボット基盤	1. 極限環境対応の遠隔・自律操作 2. 人機協調型マニピュレーション 3. 高環境耐性センシングデバイス
B1 次世代情報・サイバー基盤	1. ゼロトラスト・データ主権保護 2. ソフトウェア供給網の信頼性確保 3. エッジ計算・分散処理基盤
B2 量子情報技術	1. 量子耐性暗号とセキュア通信 2. 高感度・高精度量子センシング 3. 量子計算ハードウェア・ミドルウェア
B3 宇宙情報インフラ	1. 低軌道衛星コンステレーション運用 2. 衛星間光通信・地上連携技術 3. 宇宙状況把握（SSA）分析基盤
C1 重要インフラ・レジリエンス	1. OT/IoT環境の妨害行為検知 2. システム障害からの自律回復技術 3. 異業種インフラ間リスク波及解析
C2 海洋・海上安全	1. 海底インフラ監視 2. 水中通信ネットワーク 3. 海洋状況表示（MDA）統合分析

技術グループ	研究開発テーマ
C3 予測・意思決定基盤	1. 地政学リスクの多変量予測AI 2. サプライチェーン脆弱性可視化 3. ハイブリッド脅威の早期検知
D1 エネルギー・資源循環	1. 次世代太陽電池・高効率風力 2. 大容量・高速充放電二次電池 3. 水素・アンモニア供給網基盤
D2 重要鉱物・機能材料	1. 希少資源の代替・低減・循環利用 2. 高付加価値・高機能新素材開発 3. 自律型マテリアルズ・インフォ
D3 先端製造・デバイス	1. 高度レーザー加工・光製造基盤 2. 超精密デバイス微細加工技術 3. 高度付加製造（3Dプリンティング）
E1 食料供給・バイオセキュリティ	1. 環境耐性・高付加価値作物の設計 2. 高効率肥料・代替タンパク質技術 3. 病原体検知・バイオテロ対策基盤
E2 医療・公衆衛生	1. 迅速ワクチン開発・製造プラットフォーム 2. 遠隔医療・デジタルヘルス基盤 3. 医療用データセキュリティ技術
E3 バイオ・ヘルスケア先端	1. AIによる高度タンパク質・ゲノム設計 2. 細胞・遺伝子治療の製造自動化 3. 合成生物学による高機能物質生産

2.2.1 新興技術としての評価の考え方

- 重要技術領域を、経済安全保障の観点から多角的かつ客観的に評価するため、以下の4つの基本指針を設定する。本評価は単なる技術の優劣を判定するものではなく、将来の国家戦略やR&D構想を議論するための基盤を揃えることを目的とする。

考え方	説明
① 新興技術は多様であり、すべてを同時に扱うことはできない	- 新興技術には、成熟度・影響範囲・実用化時期などに大きな幅がある - 限られた調査資源の中で、検討対象を一定程度絞り込む必要がある
② 単一の観点では、新興技術の本質を捉えきれない	- 技術的な新規性が高くても、政策的な重要性が低い場合がある - 一方で、技術自体は既存であっても、戦略環境の変化により重要性が高まる場合もある - そのため、複数の観点（EMS評価等）を組み合わせた評価が必要となる
③ 経済安全保障の観点からは、時間軸について考慮する必要がある	- 新興技術は、短期間の成果が見えにくいものも多く、中長期的な時間軸で取り組むべき技術領域がある - 将来的な依存関係や競争環境の変化を踏まえ、本調査では、特に「将来のR&Dのタネ」となり得る非連続な技術の進展に注目して検討する
④ 評価は結論を出すためではなく、議論の土台を揃えるために行う	- 本調査における評価は、 - 技術の優劣を決めるものではない - 政策的な意思決定を直接行うものでもな - あくまで、後続の詳細検討に向けた共通の議論基盤を整えることを目的とする

2.2 EMS評価軸・項目による評価

2.2.2 EMS評価軸と主な評価観点

- 本調査では、下表に整理したEMSの各軸で評価を行うこととし、技術や研究開発テーマの特性を共通の視点から捉えることを目指す。
- 一次評価としてESの観点で**対象技術そのもの**の評価を行ったのち、二次評価として実際それらの**技術の動きがみられるか**というMの観点で評価する。

EMS評価軸の考え方

評価軸	評価の問い	評価における着目点（例）
E: Emergence (非連続性・新規性)	既存の技術体系や社会構造を根底から変革し、 非連続な進化をもたらす「タネ」 となり得るか	✓ 技術成熟度が低く（TRL1～4）、将来のR&D構想の核となる不確実性と飛躍的なポテンシャルを併せ持つか ✓ 複数の技術的アプローチが併存し、国際的な勝ち筋が未確立な競争環境にあるか ✓ 既存のシステムや産業構造を根本的に置き換え、新たなパラダイムを創出する可能性を持つか
S: Strategic Criticality (戦略的重要性)	将来の日本の「自律性」および「不可欠性」を左右する、 致命的な要因 となり得るか	✓ 自律性の向上・維持：外部からの行為や供給途絶により、社会機能や安全保障の維持が困難になる「戦略的急所」に該当するか ✓ 優位性・不可欠性の確保：その技術の高度化により、国際社会において日本の存在が不可欠となる「チョークポイント」を確保できるか
M: Momentum (社会・市場の動き)	国家戦略やグローバルな市場動向において、社会実装や競争優位の確立に向けた 具体的な「加速の兆し」 が確認できるか	✓ 国内外において、国家戦略への位置づけや公的R&D投資・政策的支援の拡大が確認できるか ✓ スタートアップや主要企業による事業化の動き、あるいは国際的な標準化・ルール形成の主導権争いが始まっているか ✓ 市場創出や社会実装に向けた具体的な「実装のシグナル」が、学術・産業の両面から捉えられているか

2.2.3 一次評価（ES）における評価の進め方

- 一次評価（ES）は、2.2.2で定義した評価軸に基づき、技術グループ単位で実施する。将来の「自律性・不可欠性」を左右する戦略的価値（S）と、既存体系を打破する非連続な進化の可能性（E）の観点から、客観的な外部資料を用いて相対評価を行う。

ES評価軸の進め方

項目	説明
①評価対象	- 一次評価（ES）の対象は、複数の研究開発テーマを包含する「技術グループ」とする - 個別テーマの精査に先立ち、技術分野全体が持つ経済安全保障上の特性や、将来の「タネ」としての位置づけを俯瞰的に把握することを目的とする
②使用した主な公開資料（共通）	- 評価の一貫性および作業効率を確保するため、以下の公開資料を全技術グループに共通して参照する - ASPI “Critical Technology Tracker” （国際的な集中度、特定国への依存リスク等） - OECD / WEF による横断的技術レポート （技術成熟度、産業構造への影響力等） - 必要に応じて、政府白書や最新の政策提言等の補足資料を活用する
③評価の手順	- 共通資料から、各技術グループの「非連続性（E）」および「戦略的重要性（S）」に関する情報を抽出する 2.2.2で定めた「自律性・不可欠性」等の着目点に照らし、各要素の該当状況を整理する - 個別要素の積み上げに加え、将来の国家戦略への寄与度を踏まえた総合的な相対比較を行う - その結果を○/△/×の三段階で整理し、評価の根拠を明確化する
④評価結果の表現方法	- 評価記号は、各軸における相対的な位置づけを示すものであり、定量的な優劣を意味しない - 各判定には、判断の根拠となった主要な事実（特定国への集中状況や変革の可能性等）の要旨を付記する

2.2.4 二次評価（M）における評価の進め方

- 二次評価（M）は、2.2.2で定義した評価軸に基づき、技術グループ単位で実施する。研究開発の進捗（R）、社会実装に向けた制度整備（I）、および国際的な競争・投資動向（G）の観点から、国内外の公的資料を用いて相対評価を行う。

M評価軸の進め方

項目	説明
①評価対象	- 二次評価（M）の対象は、一次評価（ES）同様に「技術グループ」とする - 一次評価で整理した戦略的重要性を前提に、現在の「進展度・加速の勢い」に着目して整理を行う
②評価の観点	- 研究開発（R）：国家戦略としての位置づけ、公的R&D投資の継続性 - 実装・制度（I）：実証試験の進捗、社会実装に向けた法規制・制度整備の動向 - 国際競争・投資（G）：主要国間での投資競争、国際標準化、市場獲得の勢い
③使用した主な公開資料（共通）	- 評価の客観性と一貫性を確保するため、全技術グループに共通して以下の資料を参照する - 内閣府「統合イノベーション戦略2024」（国内の研究開発・実装動向） - JST「主要国の新興技術政策動向」（国際的な投資・競争動向）
④評価の手順	- 資料から、各技術グループのR・I・Gに関する具体的情報を抽出する 2.2.2で定めた「加速の兆し」等の着目点に照らし、各要素の進捗状況を整理する - 個別要素の積み上げに加え、将来の「R&Dのタネ」としての成長速度を重視して判断する - 共通その結果を○/△/×の三段階で整理し、評価の根拠を明確化する
⑤評価結果の表現方法	- 評価記号は、各軸における相対的な位置づけを示すものであり、定量的な優劣を意味しない - 各判定には、判断の根拠となった主要な事実（特定国への集中状況や変革の可能性等）の要旨を付記する

2.2.5 ES×M評価に基づく統合的整理

- 一次評価（ES）による戦略的価値の判定と、二次評価（M）による加速度の判定を統合し、本調査における技術深掘りの優先順位を以下の通り整理する。

ES×M評価結果

技術グループ	E	S	M	判定	統合的な位置づけ・検討優先度
A1 自律移動・無人輸送	○	○	○	S	戦略性・進展度ともに高く、直ちに重点対応
A2 高速・高機動モビリティ	○	○	△	A	将来の有力なタネ。技術的不確実性の解消を注視
A3 知能化制御・ロボット基盤	△	△	△	C	既存技術の延長。本調査での個別深掘りは行わない
B1 次世代情報・サイバー基盤	○	○	○	S	国家基盤として不可欠。即応的なレジリエンス確保
B2 量子情報技術	○	○	○	S	物理的限界を打破する非連続な進化。最重点で深掘り
B3 宇宙情報インフラ	△	○	○	A	国家能力の中核（目と神経）。運用・実装を加速
C1 重要インフラ・レジリエンス	△	○	○	A	社会存立の基盤。実装を前提とした実務的な対応
C2 海洋・海上安全基盤	○	○	○	S	領域把握の変革。日本の構造的弱点を補完する急所
C3 予測・意思決定基盤	○	○	△	A	意思決定プロセスの変革。将来の自律性確保の鍵
D1 エネルギー・資源循環基盤	○	○	○	S	供給体系の構造転換。国家の自律性確保に向けた重点
D2 重要鉱物・機能材料	△	○	△	B	供給安全性確保が主眼。サプライチェーン施策と連動
D3 先端製造・デバイス基盤	○	○	○	S	日本の強み（装置・工法）を維持。産業施策と一体で対応
E1 食料供給・バイオセキュリティ	×	△	△	C	デジタル最適化が中心。本調査の優先度は限定的
E2 医療・公衆衛生テクノロジー	△	○	○	A	公衆衛生基盤の維持。データ統合による高度化を継続
E3 バイオ・ヘルスケア先端	○	○	○	S	生体操作の根本変革。将来の主導権を左右する重点領域

※ESM3つのうち、○が3を「S」、2つを「A」、1つを「B」、○がないものを「C」とした。

2.3 調査対象とする技術分野・領域の特定

2.3.1 調査対象技術グループの選定

- ESM評価において、上位（S・Aランク）の12技術グループを対象に、本調査の趣旨（日本の自律性・不可欠性の確保、即応性、施策的判断等）を踏まえて、各機能領域において一つずつ調査対象を選定した。

調査対象技術グループの選定

機能領域	技術グループ	ESM評価	選定	評価・選定理由
A	A1 自律移動・無人輸送	S	◎	物流・補給等の物理フローの継続性を自国で完結・維持するための最優先基盤として、自律性の観点から選定
	A2 高速・高機動モビリティ	A	－	戦略的価値は高いが、用途が限定的。より汎用的なA1の社会実装を優先
B	B1 次世代サイバー基盤	S	◎	今そこにある「データ主権」の防衛と、重要インフラのレジリエンス確保に関する優先度を考慮し、自律性の観点から選定
	B2 量子情報技術	S	－	将来の不可欠性は最大だが、社会実装（自律性への寄与）の時間軸が2030年代以降と遠い
	B3 宇宙情報インフラ	A	－	自律的な「目と神経」として重要だが、基盤となるB1の安全性確保が先行すべき課題
C	C1 重要インフラ・レジリエンス	A	－	社会の自律的維持に不可欠だが、既存技術の高度化の側面が強い
	C2 海洋・海上安全	S	◎	島国日本の「構造的弱点（海）」を「技術的優位（常時把握）」へ転換する急所であり、不可欠性の観点から選定
	C3 予測・意思決定基盤	A	－	国家運営の自律性に関わるが、単独テーマというよりは、A1やC2等に統合される要素と考えられる
D	D1 エネルギー・資源循環	S	－	エネルギー主権に直結するが、既存の大型施策との重複を避け、本調査では「製造能力」の維持を深掘り
	D3 先端製造・デバイス	S	◎	D1に比べて、日本の強みである「製造装置・工法（チョークポイント）」の保持を最優先とし、不可欠性の観点から選定
E	E2 医療・公衆衛生	A	－	レジリエンス上重要だが、デジタル化に留まり、E3の「作る能力」による革新的な自律性を優先
	E3 バイオ・ヘルスケア先端	S	◎	生物設計・製造能力の獲得により、医薬・素材の供給主権（外部依存の解消）確保という自律艇の観点から選定。非連続な進化と将来性も期待

2.3 調査対象とする技術分野・領域の特定

2.3.2 調査対象技術分野・領域の特定と研究開発テーマの想定

- 以上の議論を踏まえて、下表の分野・領域を調査対象と設定し、研究開発テーマを3つずつ設定する。
- 次ページ以降では、各分野・領域ごとに、各研究開発テーマにおいて今後重要となる技術のうち、1つずつ例として抽出した上で、調査対象技術の詳細情報を整理する。

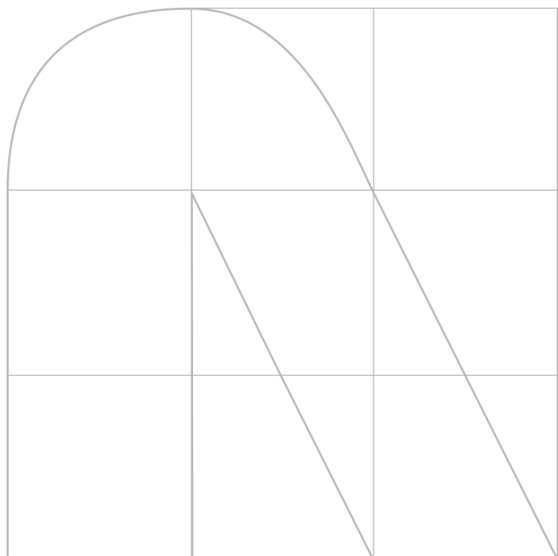
調査対象とする5分野・領域と研究開発テーマ

機能領域	分野・領域（技術グループ）	選定理由・狙い
A	A1 自律移動・無人輸送	• 物流・補給網を無人化し、外部依存せず維持する能力は、自律性の観点から重要 • 一方で、この領域は汎用技術が多く、日本固有の「急所」とするには特定部品の深掘りが必要ことから、不可欠性は限定的な可能性
B	B1 次世代情報・サイバー基盤	• 「データ主権」を自国で防衛し、重要インフラを自立的に守る能力であり、自律性の意味は極めて大きい • 不可欠性に関しては、国際標準に依存する部分が多いが、信頼性確保（Trust）の枠組みで優位を狙う意図はあり得る
C	C2 海洋・海上安全	• 海底ケーブル等の重要インフラを自力で監視・防護する能力は自律性の観点から重要 • 海中通信やMDAIにおける日本独自の高度なセンシング・制御技術は不可欠性の観点においても極めて重要
D	D3 先端製造・デバイス	• 製造能力は維持するが、原材料・資源の外部依存を解消できるわけではない点で、自律性における重要性は高くはない • 一方不可欠性の観点では、高度レーザー加工等、世界が日本に依存せざるを得ない「装置・工法」でありきわめて重要
E	E3 バイオ・ヘルスケア先端	• 医薬・素材を自国内で「設計・製造」し、供給制約を回避する能力は、自律性の観点から重要 • 不可欠性の観点でも、特定の生物設計プラットフォームや高度な自動化製造プロセスは重要と言える

3. 特定した分野・領域における、今後先端的な重要技術たりえる具体的技術の導出

3.1 特定した分野・領域における研究開発テーマの設定

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査



3.1 特定した分野・領域における研究開発テーマの設定

3.1.1 特定した分野・領域における研究開発テーマの設定

- 以上の議論を踏まえて、下表の分野・領域を調査対象と設定し、研究開発テーマを3つずつ設定する。
- 次ページ以降では、各分野・領域ごとに、各研究開発テーマにおいて今後重要となる技術のうち、1つずつ例として抽出した上で、調査対象技術の詳細情報を整理する。

調査対象とする5分野・領域と研究開発テーマ

機能領域	分野・領域（技術グループ）	研究開発テーマ
A	A1 自律移動・無人輸送	1. 非GPS環境等の自律航法技術 2. 協調型マルチエージェント制御 3. 次世代無人機用高効率動力源
B	B1 次世代情報・サイバー基盤	1. ゼロトラスト・データ主権保護 2. ソフトウェア供給網の信頼性確保 3. エッジ計算・分散処理基盤
C	C2 海洋・海上安全	1. 海底インフラ監視 2. 水中通信ネットワーク 3. 海洋状況表示（MDA）統合分析
D	D3 先端製造・デバイス	1. 高度レーザー加工・光製造基盤 2. 超精密デバイス微細加工技術 3. 高度付加製造（3Dプリンティング）
E	E3 バイオ・ヘルスケア先端	1. AIによる高度タンパク質・ゲノム設計 2. 細胞・遺伝子治療の製造自動化 3. 合成生物学による高機能物質生産

3.1.2 調査対象技術選定の考え方

- 調査対象として選定した各分野・領域、研究開発テーマにおいて、深掘り対象となる「調査対象技術」を選定するにあたっては、以下の4つの観点に基づき、我が国の経済安全保障を担保する上で戦略的優位性・不可欠性の核となる要素を特定する。

調査対象技術選定の考え方

#	項目	考え方
1	対象の定義 (What)	単なる基礎研究に留まらず、将来的に 自律的なサプライチェーンの構築や、日本の技術的不可欠性の確立 に寄与し、具体的な政策実装（Kプログラム等）の対象となり得る技術群を抽出する
2	時間軸と立ち上がり方 (When / How fast)	現時点では萌芽的であっても、今後3～5年程度で非連続的な進展（Emergence）が見込まれ、 国際的な依存関係や技術的パワーバランスを大きく変容させる可能性 を重視する
3	重要技術との差別化軸 (How different)	既存の「重要技術」の改良にとどまらず、用途の未確定性や横断的な波及効果に着目し、 将来の戦略的ボトルネック（チョークポイント）を早期に把握・捕捉する 視点で整理する
4	日本としてのアクション合理性 (So what for Japan)	諸外国との技術格差分析に基づき、日本が「 自国で設計・製造を完結し供給リスクを回避する能力（自律性） 」、 または「国際社会が日本に依存せざるを得ない特異な製造技術や装置（不可欠性）」 を確保できる合理性を基準とする

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.1 A1 自律移動・無人輸送

- 各研究開発テーマから、調査対象とする技術を1つずつ抽出する。
- A1 自律移動・無人輸送について、各研究開発テーマから、一つずつ具体技術を抽出・例示する。

調査対象領域から抽出した3つの技術

研究開発テーマ	具体技術	技術の説明	技術の選定理由
1. 非GPS環境等の自律航法技術	船舶 慣性航法型位置推定技術	GNSSに依存せず、IMU（加速度・角速度）や船体運動モデル、外界センサ（レーダー・LiDAR等）を組み合わせることで、港内・狭水域・妨害環境下においても自己位置・姿勢を高精度に推定する技術	自律航行においてGNSS妨害・遮断は現実的かつ地政学的リスクであり、特に港湾・沿岸・有事環境では航行安全や物流継続に深刻な影響を及ぼす。慣性航法型位置推定を中核とすることでGNSS依存を低減し、外部干渉に強い航行能力を確保できるため、重要インフラ・海上物流のレジリエンス向上や経済安全保障の観点からも不可欠
2. 協調型マルチエージェント制御	船舶 自律船・有人船混在フリート制御技術（全体最適アルゴリズム）	自律船・遠隔操船舶・有人船が混在する環境下で、航路、速度、役割分担、待機・優先順位を統合的に最適化するフリート運用制御技術。単船最適ではなく、船団全体としての安全性・効率・レジリエンスを最大化する	自律船の社会実装は段階的に進むため、当面は有人船との混在運用が前提となる。フリート単位での制御能力は、物流効率だけでなく、有事・災害時の船腹・航路の優先制御などにも直結する
3. 次世代無人機用高効率動力源	ドローン等 ドローン用高エネルギー密度水素燃料電池	水素と酸素の電気化学反応により発電する、ドローン向けの高効率電源技術。リチウム電池に比べ高いエネルギー密度を有し、長時間・長距離飛行を可能にする。近年はPEM型燃料電池の小型化・軽量化やバッテリーとのハイブリッド化が進み、UAVの航続距離や運用時間を大幅に向上させる電源として注目されている。広域監視、海洋観測、災害対応など、長時間・長距離ミッションを担うドローン運用を支える基盤技術と位置づけられる	無人機の航続性能を制約する電源課題を解決し、AIフリートや広域監視ネットワークの実装を可能とする点で水素燃料電池は重要性が高い。加えて、電池材料への資源依存低減やエネルギー多様化に資する技術であり、海洋監視やインフラ防護などのデュアルユース用途とも親和性が高いことから、経済安全保障の観点でも戦略的に動向把握・技術確保を進める必要がある

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.1 A1-1 非GPS環境等の自律航法技術（1 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	研究機関/研究例
米国	Northeastern University、US Coast Guard : レーダー・GPS・INS融合による自律水上船の軌跡推定と動的障害物対応の実証を実施。実用化課題として、ブリッジ下等におけるGPS欠損環境でのレーダー等による自己位置補正、カメラ/LiDAR統合などセンシング強化等を課題として指摘
中国	Dalian Maritime University : USV向けにGNSS/INS融合航法の精度と安定性を実海域で検証。GNSSの精度低下時に誤差が拡大し、外部環境の変動による影響の抑制や各種センサとの併用を課題として指摘 Dalian Maritime University : INS×GNSS航法で船の姿勢と速度制約を取り入れた自律航法アルゴリズムを実船で評価し、GNSSを一時的に喪失した際にも比較的安定的に航位推定可能であることを示した。他方、長時間のGNSS喪失や海上変動への適応などを課題として指摘
EU	ポーランド/Gdynia Maritime University : 内陸水域USVでGNSS/INS融合航法の精度を実証。RTK補正（基準局からの補正信号）喪失時の誤差増大や、通信依存性、INS単独航法での精度向上を実用化課題として指摘 ノルウェー/Norwegian University of Science and Technology : GNSSが不安定な港湾環境での航行に向け、視覚・音響・慣性センサーを統合したGNSS不要の航法システムを提案。DVLと視覚タグを用い、EKFでデータ融合しUSV実験により高精度航法と冗長性向上を検証
韓国	Yonsei University等 : GPS妨害に強い非GPS系の地上無線測位システム（eLoran）を対象に、狭水路での測位誤差要因（ASF）の効率的な測定・補正手法を提案し、回帰クリギングにより測位精度向上を実証

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.1 A1-1 非GPS環境等の自律航法技術（2 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	開発状況（まとめ）
米国	INS中核のマルチセンサ融合航法の高度化 ：狭水路・都市水路ASVを対象に、INS/IMUとレーダ・LiDAR・電子海図を統合し、船体運動モデル（NMHE・NMPC）やSLAMを組み合わせた状態推定を実水域で実証している。レーダ追跡やMoving Horizon Estimationを用いて、GNSS依存を低減しつつ高精度な自己位置・姿勢推定を成立させている
中国	北斗高度化とINS統合の強化 ：測位主権確保を背景に、北斗（BDS）を軸とした測位能力の整備・発信が進展。INS/IMUと衛星測位の統合により、妨害・遮蔽局面での航法継続性を高める方向を中核として位置づけている
EU	港湾・内水面向け冗長化慣性航法の実証 ：GNSS/INS統合の精度検証に加え、視覚（ランドマーク）・音響計測（例：DVL）・慣性を融合した拡張カルマンフィルタ型推定を港湾・水路で実験評価している。GNSSノイズやドロップアウト条件下でも安全操船を維持できる冗長航法構成を実証している
韓国	非GPS測位（eLoran）によるGNSS非依存航法研究 ：GPS妨害等への対策として、eLoranを用いた補完測位技術を研究。狭水路における測位誤差要因（ASF）の効率的な測定・補正手法を提案し、回帰クリギングを用いた補正により測位精度の向上を実証している

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.1 A1-2 協調型マルチエージェント制御（1 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	研究機関/研究例
米国	MIT、Applied Ocean Physics & Engineering Woods Hole Oceanographic Institution : 同期クロックと音響測距・角度計測を組み合わせ、複数のAUV（自律型無人潜水機）の相対位置推定を高精度に行う航法手法を提案。通信・位置推定・協調制御を統合し、多機協調運用の効率化を実証
中国	Dalian Maritime University : 自律船と有人船が混在する海域を想定し、船舶間の交渉モデルに基づく協調衝突回避手法を提案。単独学習により安全航行戦略を導出し、混在航行環境での衝突回避性能を検証
EU	Netherlands Maritime Technology Foundation : 内陸水路船と海上船の船隊（プラトウニング）航行を実現する自動航行・通信技術を開発。先導船に追従する隊列航行により輸送効率向上や燃費削減を目指す実証研究を実施 National Engineering Research Center for Water Transport Safety等 : An Improved Bald Eagle Search Algorithm for Global Path Planning of Unmanned Vessel in Complicated Waterways
韓国	Inha University : 自律船と有人船の共存に向け、AISデータから機械学習で航海士の回避判断タイミングを解析。これを回避システムに統合し、シミュレーションで有効性を検証
シンガポール	Nanyang Technological University : 複数船舶の協調航行と衝突回避を対象に、通信機能付きマルチエージェント強化学習（MADDPG）を適用。部分観測環境下でも通信を通じた協調行動により安全航行と衝突回避が可能であることを示した

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.1 A1-2 協調型マルチエージェント制御（2 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	開発状況（まとめ）
米国	自律船と有人船が混在する海域での協調的衝突回避アルゴリズムの研究が進展 ：MIT・Woods Hole Oceanographic Institutionは、Zeuthen戦略とベイズ学習に基づく船舶間交渉モデルを提案し、情報非対称環境下でも不要な回避行動を削減しつつ安全性と航行効率の向上を図る手法を検証
中国	混在航行環境を想定した船舶間相互作用モデルに基づく自律航行・衝突回避研究が進展 ：Dalian Maritime Universityは船舶間の交渉モデルを用いた協調回避手法を提案し、単独学習により安全な航行戦略を導出、シミュレーションにより混在環境での衝突回避性能を検証
EU	船隊（プラトニング）航行を前提とした自動航行・通信技術の開発が進展 ：Netherlands Maritime Technology Foundation等は内陸水路船・海上船舶の隊列航行を対象に先導船追従型の協調制御を研究し、輸送効率向上や燃費削減を目的とした実証研究を推進
韓国	AISデータを活用した航海士意思決定モデルに基づく回避判断研究が進展 ：Inha Universityは機械学習により有人船の回避判断タイミングを解析し、その知見を自律船の回避システムへ統合、シミュレーションにより混在航行環境での有効性を検証
シンガポール	複数船舶の協調航行を対象としたマルチエージェント強化学習研究が進展 ：Nanyang Technological Universityは通信機能付きMADDPGを用いた協調制御手法を提案し、部分観測環境下でも船舶間通信による協調行動により安全航行と衝突回避が可能であることを実証

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.1 A1-3 次世代無人機用高効率動力源（1 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	研究機関/研究例
米国	U.S. Naval Research Laboratory : 軽量PEM水素燃料電池（約1.5 kW）を開発しUAV「Stalker」に統合。高比エネルギー・低シグネチャ電源として飛行時間延長を実証し、地上部隊用電源（H-SUP）としての応用も検証 U.S. Army Research Lab : 小型UASの長時間任務に向け、軽量高効率の350W級SOFC電源を開発・統合。従来電池の航続制約を克服し、ISR任務など軍事用途での運用時間と信頼性向上を目指す
中国	Northwestern Polytechnic University : 燃料電池とバッテリーを併用するハイブリッドUAV向けに、ファジィ論理に基づくエネルギー管理手法を提案。出力配分を最適化することで燃料消費低減とシステム効率向上を図り、シミュレーションにより有効性を検証
EU	KTH Royal Institute of Technology : 水素燃料電池UAVの航続性能向上を目的に、機体設計とエネルギー消費特性を分析。飛行条件や電力需要を考慮したシステムモデルを構築し、燃料電池推進UAVの性能と運用可能性をシミュレーションで評価
英国	University of Lincoln : 高高度（10～11km）での運用を想定した1kW級PEM燃料電池UASの設計要件を分析。機体形状や質量・速度・航続時間を推定し、設計制約図により実現可能な機体設計条件と課題を評価した
オーストラリア	University of Technology Sydney : 小型UAV向けに燃料電池とスーパーキャパシタのハイブリッド電源を提案。低計算量EMSにより電力配分を最適化し、電圧安定化とSC劣化抑制を実現

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.1 A1-3 次世代無人機用高効率動力源（2 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	開発状況（まとめ）
米国	軍事用途を背景に 軽量PEMFCやSOFCを用いたUAV電源の実証が進展 ：U.S. Naval Research Laboratoryは約1.5kW級PEMFCをUAV「Stalker」に統合し航続時間延長を実証、U.S. Army Research Labは350W級SOFC電源を小型UASへ適用しISR任務向け長時間運用を志向
中国	燃料電池×バッテリーのハイブリッド電源を前提としたエネルギーマネジメント研究が活発 ：Northwestern Polytechnical Universityはファジィ制御に基づくEMSを提案し、出力配分最適化による燃料消費削減とシステム効率向上をシミュレーションで検証
EU	機体性能評価とエネルギー消費特性のシステム解析を中心に研究が進展 ：KTH Royal Institute of Technologyでは水素燃料電池UAVの航続性能向上を目的に、飛行条件や電力需要を考慮したシステムモデルを構築し性能・運用可能性を評価
英国	高高度長時間飛行を想定した燃料電池UASの機体統合設計研究が進展 ：University of Lincolnは1kW級水素燃料電池システムをUASに搭載する設計を提案し、燃料電池・水素タンク・電力システムを統合した機体構成と運用性能を解析
オーストラリア	小型UAV向けハイブリッド電源と低計算量EMSの研究が進展 ：University of Technology Sydneyは燃料電池とスーパーキャパシタを組み合わせた電源構成を提案し、EMSにより電力配分を最適化して電圧安定化とSC劣化抑制を実証

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.2 B1 次世代情報・サイバー基盤

- 各研究開発テーマから、調査対象とする技術を1つずつ抽出する。
- B1 次世代情報・サイバー基盤について、各研究開発テーマから、一つずつ具体技術を抽出・例示する。

調査対象領域から抽出した3つの技術

研究開発テーマ	具体技術	技術の説明	技術の選定理由
1. ゼロトラスト・データ主権保護	データ基盤 秘密計算・連合学習プラットフォーム	データを暗号化したまま、中身を一切外部に明かすことなく高度な統計解析やAI学習を可能にする技術基盤。複数の組織が保有する機微なデータを、物理的に一箇所に集約することなく安全に連携させることが可能になる	本技術の確立は、医療や金融等の機微情報の海外移転や漏洩リスクを最小化し、国内での「自律的」なデータ利活用を可能にする。データ主権を維持しつつ価値を創出する能力は、将来の自立的な意思決定を支える不可欠な基盤となる
2. ソフトウェア供給網の信頼性確保	ソフトウェア基盤 高信頼SBOM自動生成・脆弱性解析技術	ソフトウェアの構成部品（ライブラリ等）を可視化するSBOMの自動生成と、それらに含まれる潜在的な脆弱性やバックドアをAI等で高度に自動解析する技術。サプライチェーンを通じたサイバー攻撃の早期検知実現を目指す	海外製ソフトウェアに依存する現状において、その安全性を自国で客観的に検証する能力（検証主権）を確保し、「自律性」を向上させる。また、高度な解析技術自体を日本独自の「不可欠な検証基盤」とし、国際的な信頼性の門番としての地位を狙うもの
3. エッジ計算・分散処理基盤	端末・通信基盤 自律分散型セキユアOS／プロトコル	通信が不安定な環境やクラウドへの接続が遮断された状況下でも、端末（エッジ）側で高度なセキュリティを維持しながらリアルタイムに処理を継続するOSおよび通信プロトコル。特定の中央サーバーに依存しない分散管理を実現する	重要インフラが特定の外国製クラウドやサーバーに過度に依存するリスクを低減し、事変や攻撃時にも機能を継続させる国家神経系の「自律性」を担保します。この「止まらないインフラ」を実現する根幹層（チョークポイント）を握ることで、戦略的な優位性を確保する

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.2 B1-1 ゼロトラスト・データ主権保護（1 / 2）

- 我が国と諸外国（5 か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の研究開発機関例

国・地域	研究機関 / 研究例
米国	- Microsoft Research / Azure Confidential Computing Trusted Execution Environment (TEE) を用いたConfidential Computing基盤を開発。クラウド環境でもデータを暗号化状態のまま処理可能なセキュアデータ共有・AI処理基盤を実装し、金融・医療等高機密データの安全な共同分析を実証 (Microsoft, Azure Confidential Computing, 2023–2024) - Google Research Federated LearningおよびSecure Aggregation技術を用いた分散AI学習基盤を開発。データを中央集約せずに複数組織間でAIモデルを共同学習する技術を実装し、モバイル端末・医療データなどのプライバシー保護型データ活用を実証 (Bonawitz et al., Secure Aggregation for Federated Learning, updated implementations 2023)
中国	清華大学 (Tsinghua University) / Institute for AI Security プライバシー保護機械学習および暗号計算を用いた分散AI学習基盤を研究。Secure Multi-Party Computation (MPC) やFederated Learningを用いた安全なデータ連携AIの実装研究を推進 (Liu et al., Privacy-Preserving Machine Learning, IEEE, 2024)
EU	- Fraunhofer AISEC (ドイツ) Confidential ComputingおよびTrusted Cloud技術を研究。TEEやハードウェアセキュリティを用いたクラウド環境での安全なデータ処理技術を開発し、欧州データ主権基盤 (GAIA-X等) への応用を推進 (Fraunhofer AISEC, Confidential Computing research programme, 2023) - ENISA (EU Agency for Cybersecurity) 欧州公共機関向けZero Trust Architecture導入指針を整理。クラウド・分散環境における認証・アクセス制御・データ保護を統合したセキュリティアーキテクチャを提示 (ENISA, Zero Trust Architecture – Implementation guidance, 2023)
イスラエル	Technion – Israel Institute of Technology プライバシー保護型機械学習およびSecure Multi-Party Computation (MPC) の研究を推進。複数組織間でデータを共有せずに機械学習モデルを共同構築する分散AI基盤を研究し、医療・金融分野での機密データ分析への応用を実証 (Technion Cryptography and Privacy Research Group)
インド	Indian Institute of Science (IISc) / IIT研究グループ Federated Learningおよびプライバシー保護AIの研究を推進。データを中央集約せずに分散環境で機械学習を行う技術を研究し、機密データ共有の課題を解決するアーキテクチャを提案 (2025年)

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.2 B1-1 ゼロトラスト・データ主権保護（2/2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	開発状況（まとめ）
米国	国家主導の社会実装加速 ：2025年末に発出された大統領令「Genesis Mission」等により、連邦政府保有の膨大な科学データセットの安全な活用を加速。GoogleやMicrosoft等のビッグテックが秘密計算プラットフォーム（Confidential Computing）を商用提供し、市場を牽引している
中国	法整備と技術自立の同時推進 ：データ安全法に基づき、国家主導で秘密計算技術の「国産化」を強力に推進。アリババやテンセント等のプラットフォームが、プライバシー保護計算を組み込んだデータ流通市場の構築を先行させている
EU	信頼性と標準化の先行 ：GDPR（一般データ保護規則）を背景に、欧州独自のデータ主権を確保するためのプロジェクト（GAIA-X等）が進展。AI法の施行に伴い、透明性とプライバシーを両立する「秘密計算・連合学習」を法的遵守のコア技術として位置づけている
イスラエル	サイバーセキュリティ特化型イノベーション ：軍および情報機関由来の高度な暗号技術を民生転換するスタートアップが多数存在。秘密計算ハードウェアや、医療・金融分野での高度なプライバシー保護技術の社会実装において世界的なハブとなっている
インド	大規模実装の試験場 ：膨大な人口データを背景に、公衆衛生や金融包摂（フィンテック）の分野で、プライバシーを保護したままデータを高度活用する秘密計算の実証が急速に拡大している

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.2 B1-2 ソフトウェア供給網の信頼性確保（1 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の研究開発機関例

国・地域	諸外国の研究機関/研究例
米国	Carnegie Mellon University (Software Engineering Institute, SEI) ソフトウェアサプライチェーンセキュリティおよびSBOM (Software Bill of Materials) の研究を推進。依存関係解析や脆弱性管理を自動化する手法を開発し、政府・重要インフラ向けのソフトウェア供給網リスク管理フレームワークを提示 (CMU SEI, <i>Software Supply Chain Security Initiative</i>, 2023) Google / OpenSSF (Open Source Security Foundation) オープンソースソフトウェア供給網の安全性確保を目的とした SLSA (Supply-chain Levels for Software Artifacts) フレームワークを開発。ビルドプロセスの完全性検証や改ざん検知を可能とするソフトウェア供給網セキュリティモデルを提案 (OpenSSF, <i>SLSA Framework</i>, 2023–2024)
EU	ENISA (European Union Agency for Cybersecurity) 欧州域内におけるソフトウェア供給網攻撃の分析を実施。SBOM、依存関係管理、セキュア開発ライフサイクルなどを含む供給網セキュリティ対策の政策指針を整理 (ENISA, <i>Threat Landscape for Software Supply Chain Attacks</i>, 2023)
中国	清華大学 (Tsinghua University) ソフトウェア供給網攻撃および依存関係解析の研究を推進。オープンソースパッケージ管理システムにおける脆弱性拡散や依存関係リスクを分析し、供給網リスク評価手法を提案 (Tsinghua University Software Security Research Group)
英国	University of Oxford / Global Cyber Security Capacity Centre オープンソースソフトウェア供給網のリスク評価および依存関係分析を研究。ソフトウェアサプライチェーン攻撃 (dependency confusion等) の検知手法を提案
ドイツ	Fraunhofer Institute for Secure Information Technology (Fraunhofer SIT) ソフトウェア構成要素の自動識別およびSBOM生成技術を研究。ソフトウェア依存関係解析と脆弱性データベースを統合し、サプライチェーン攻撃の早期検知を可能とするツールを開発 (Fraunhofer SIT, <i>Software Supply Chain Security research programme</i>, 2023)

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.2 B1-2 ソフトウェア供給網の信頼性確保（2 / 2）

- 我が国と諸外国（5 か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	開発状況（まとめ）
米国	法的義務化の先導 ：大統領令14028号に基づき、政府調達におけるSBOM提出を事実上義務化。CISA（サイバーセキュリティ・インフラセキュリティ庁）が、脆弱性管理とSBOMの運用に関する標準化を強力に推進している
EU	サイバーレジリエンス法（CRA）による規制 ：EU域内で販売されるデジタル製品に対し、SBOMの保持や脆弱性対応の義務付けを法制化。違反企業への制裁金を伴う強力な枠組みを通じて、欧州主導の「信頼基準」の確立を目指している
中国	脆弱性情報の国家管理 ：ネットワーク製品脆弱性管理規定に基づき、発見された脆弱性情報の政府への迅速な報告を義務化。国家主導でOSS（オープンソース）の「国産代替」と、ソースコードレベルでの安全検証体制を構築している
英国	重要インフラのサプライチェーン保護 ：通信法（Telecoms Security Act）等を通じ、基幹インフラにおけるベンダーリスク管理を厳格化。高リスク・ベンダー排除のための技術的検証能力の向上に注力している
ドイツ	産業オートメーションの信頼性確保 ：BSI（連邦情報セキュリティ庁）が、製造業等のOT（制御技術）領域におけるSBOM活用ガイドラインを策定。マテリアルや製造基盤（D群）と連動した、産業競争力維持のためのセキュリティを重視している

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.2 B1-3 エッジ計算・分散処理基盤（1 / 2）

- 我が国と諸外国（5 か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の研究開発機関例

国・地域	諸外国の研究開発機関例
米国	- University of California, Berkeley (RISELab / Sky Computing) クラウドとエッジ環境を統合する分散計算基盤「Sky Computing」アーキテクチャを提案。複数クラウドやエッジノードを横断する分散AI処理を可能とする次世代クラウド基盤を研究 (Stoica et al., Sky Computing, 2022-2024) - Carnegie Mellon University (Edge Computing Research) エッジAI・IoT向け分散処理基盤を研究。センサー・エッジ・クラウドを統合したリアルタイムAI処理アーキテクチャを開発し、自動運転・スマートシティへの応用を実証
欧州	Fraunhofer Institute for Open Communication Systems (FOKUS) 5G/6Gネットワークと連携するエッジクラウド基盤を研究。ネットワークエッジでの低遅延AI処理や分散アプリケーション実行環境を開発
中国	- 清華大学 (Tsinghua University) モバイルエッジコンピューティング (MEC) および分散AIの研究を推進。5Gネットワークと連携したエッジ処理基盤を開発し、IoTおよびスマートシティ向け分散データ処理を研究 - 中国科学院 (Chinese Academy of Sciences) クラウド・エッジ協調型分散処理アーキテクチャの研究を実施。AI推論処理をネットワークエッジ側に分散配置する技術
北欧	- KTH Royal Institute of Technology (スウェーデン) 分散クラウドおよびエッジコンピューティングの研究を推進。IoT・スマートシティ向けの分散データ処理アーキテクチャを開発し、都市インフラのリアルタイムデータ解析を実証 (KTH Distributed Systems Lab) - Aalto University (フィンランド) Edge AIおよび分散機械学習の研究を実施。クラウドとエッジノードを連携させた低遅延AI推論基盤を開発し、通信ネットワーク最適化やスマート産業への応用を研究
台湾	- National Taiwan University (NTU) エッジAIおよび分散コンピューティングの研究を推進。IoT環境における低遅延AI推論基盤を開発し、スマート製造や都市インフラ向け分散AIシステムを研究 - Academia Sinica (中央研究院) クラウド・エッジ統合型分散システムの研究を実施。大規模データ処理やAI推論をエッジ側で実行する分散計算アーキテクチャを開発

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.2 B1-3 エッジ計算・分散処理基盤（2 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	開発状況（まとめ）
米国	軍民両用のエッジ強化 ：国防総省による「JADC2（合同全領域指揮統制）」構想に基づき、極限環境下での分散処理能力を強化。民間でもハイパースケーラーがエッジOS（AWS Greengrass等）を普及させ、市場を独占している
欧州	分散型信頼モデルの追求 ：GAIA-Xや産業メタバース構想を通じ、特定プラットフォームに依存しない分散型のデータ流通・計算基盤の構築を重視。透明性の高いオープンソースOSの開発に注力している
中国	自国OSの強力な普及 ：HarmonyOS等の国産OSをスマホから産業機器まで広範に展開。国家主導でエッジ計算と5G/6G、AIを統合した「デジタル・チャイナ」の構築を加速し、囲い込みを図っている
北欧	高信頼・通信インフラの先導 ：EricssonやNokiaを核に、通信インフラとエッジ計算を高度に統合。ゼロトラストに基づいた高セキュリティな分散プロトコルの標準化をリードしている
台湾	ハードウェア・ミドルウェアの垂直統合 ：半導体・製造能力を背景に、エッジAI処理に特化した専用チップと、それらを最適に制御する低レイヤOSの開発において、世界的なサプライチェーンの要を形成している

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.3 C2 海洋・海上安全

- 各研究開発テーマから、調査対象とする技術を1つずつ抽出する。
- C2 海洋・海上安全について、各研究開発テーマから、一つずつ具体技術を抽出・例示する。

調査対象領域から抽出した3つの技術

研究開発テーマ	具体技術	技術の説明	技術の選定理由
1. 海底インフラ監視	インフラ監視 海底ケーブル異常検知（音響・振動AI／DAS等）	光ファイバを用いた分布型音響センシング（DAS）や海底音響・振動センサとAI解析を組み合わせ、海底ケーブルやパイプライン周辺で発生する異常振動や接近行為を検知する技術。切断や損傷の兆候を早期に把握することを目的とする	海底ケーブルは通信・エネルギー供給の基盤であり、損傷時の影響が極めて大きい。一方で、物理的な常時防護は困難であるため、異常の早期検知と被害の最小化を図る技術が現実的な防護手段として重要となる
2. 水中通信ネットワーク	水中通信 水中光無線通信	青色・緑色レーザーやLEDを用いて水中で光信号を伝送する高速無線通信技術。AUVや海中センサー間で観測データを共有する用途を想定し、音響通信より高速・低遅延の通信が可能	海底インフラ監視や海洋観測では高速データ通信の需要が増加しており、音響通信の速度制約を補完する技術として重要である。また、水中通信基盤を自国で確保することは、海洋監視や重要インフラ防護の観点から経済安全保障上の自律性確保にも資する
3. 海洋状況表示（MDA）統合分析	海洋状況把握 ローカル最適MDA	港湾周辺、沿岸域、EEZの特定エリアなど、限定された海域を対象に、AIS、沿岸レーダー、衛星データ、音響センサ等を統合し、当該海域に特化した高解像度の海洋状況認識・分析を行う技術。広域MDAを補完し、重点海域における船舶行動や異常兆候を継続的に把握する	広域を一律に監視するMDAでは、重要海域における解像度や即応性に限界がある。港湾・海峡・海底インフラ周辺など、経済・安全保障上の重要度が高いエリアに資源を集中させるローカル最適MDAは、現実的かつ段階的に導入可能なアプローチである

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.3 C2-1 海底インフラ監視（1 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	研究機関/研究例
米国	Colorado School of Mines : ガスパイプラインの漏洩に伴う音響信号をDASで検知する手法を検証し、漏洩位置の特定と早期検知の可能性を示す
中国	Southern University of Science and Technology : 光ファイバーを用いた分布型音響センシング（DAS）にAIを導入し、音響イベントの分類・認識やデータ処理の高度化を実現する技術を解説。交通・エネルギー・安全分野での高精度監視への応用可能性を示した
EU	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) : 光ファイバー分布音響センシング（DAS）を用い、配管壁を伝播する音響波を高速計測し衝撃や圧力波を高精度に検知・位置特定する手法を実証 AP Sensing : 光ファイバセンシングにより海底電力ケーブルの振動・温度等を長距離で監視し、損傷や外部干渉の早期検知を可能とする監視技術を開発
英国	National Oceanography Centre等 : 海底光ファイバDASデータを用いた水中音源の検知・位置推定・追跡手法を検証し、船舶等の活動を広域把握できる可能性を示した
オーストラリア	Curtin University : 海底光ファイバDASによる海域音響の受動観測を検証し、船舶や海洋生物等の音源を広域・継続的に監視できる可能性を示した

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.3 C2-1 海底インフラ監視（2 / 2）

- 我が国と諸外国（5 か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	開発状況（まとめ）
米国	DASによるパイプライン漏洩検知技術の研究 ：光ファイバ分布型音響センシング（DAS）を用い、ガスパイプライン漏洩時に発生する音響信号を検知する手法を検証。漏洩位置の特定や早期検知を可能とするインフラ監視技術として研究が進められている
中国	海底光ファイバDASによる海底振動・海洋イベント観測の研究 ：海底光ファイバケーブルを利用した分布型音響センシングにより、微小地震や海底振動、船舶活動等の検知性能を評価。海底観測や海洋イベント検知への応用可能性を検討している
EU	海底インフラ監視向け光ファイバセンシング技術の開発 ：光ファイバDASを用いてパイプライン周辺の掘削・衝撃等の異常振動を検知し、発生位置を特定する監視手法を提案。加えて光ファイバセンシングにより海底電力ケーブルの振動・温度等を長距離で監視し、損傷や外部干渉の早期検知を可能とする技術開発が進められている
英国	海底光ファイバDASデータによる水中音源検知・追跡技術の研究 ：海底光ファイバDASを用いて水中音源の検知・位置推定・追跡手法を検証。船舶等の活動を広域で把握する海洋監視技術としての応用可能性が示されている
オーストラリア	海底光ファイバDASによる海域音響モニタリングの研究 ：海底光ファイバを用いた分布型音響センシングにより海域音響の受動観測を実施。船舶や海洋生物等の音源を広域・継続的に監視できる可能性が示されている

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.3 C2-2 水中通信ネットワーク（1 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	研究機関/研究例
米国	Lincoln Laboratory：海中光通信技術を開発。レーザーを用いた水中光通信により、海中プラットフォーム間での高速・高帯域・低遅延通信の実現可能性を示した
中国	Chongqing Normal University等：490nm青色VECSELレーザーと音響光学変調器を用いた水中光通信システムを開発。約108mの無線光通信伝送の実証を行い、長距離高速通信の可能性を示した Beijing University of Posts and Telecommunications：LEDを用いたリアルタイム水中無線光通信システムを開発。通信実験と伝搬モデル解析により、通信距離の推定手法と実用化に向けた課題を検証
EU	University of Rome Tor Vergata：光通信と音響通信を組み合わせたAUV群による海洋監視ネットワークを分析。通信性能や接続性を評価し、群ロボットによる広域海洋観測の有効性を検証 University of Cyprus等：水中光通信とセンシングを統合したISACシステムに光給電を組み合わせた方式を検討。船舶姿勢変動が通信・給電性能に与える影響を解析し、安定運用条件を検証
韓国	Korea Maritime & Ocean University等：水中光無線通信（UWOC）を用い、AUVの姿勢制御指令とカメラ画像・姿勢データをリアルタイム双方向通信する制御構造を提案。水槽実験で姿勢制御と1Mbps通信の有効性を実証した
シンガポール	National University of Singapore等：水中光無線通信（UOWC）におけるOFDM-IM信号の自動変調認識手法を提案。Swin Transformerと転移学習を用いることで低SNR環境でも高精度認識を実現し、実験で96%の認識精度を確認した

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.3 C2-2 水中通信ネットワーク（2/2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	開発状況（まとめ）
米国	レーザーを用いた水中光通信技術の研究開発 ：MIT Lincoln Laboratoryが水中光無線通信技術を開発。レーザーを用いた通信により、海中プラットフォーム間で高速・高帯域・低遅延通信を実現できる可能性を示している
中国	レーザー・LEDを用いた水中光通信システムの実証研究 ：490nm青色VECSELレーザーを用いた水中光通信により約108mの無線光通信伝送を実証。さらにLEDを用いたリアルタイム水中光通信システムを開発し、通信距離推定手法や実用化課題の検証が進められている
EU	光通信・音響通信を組み合わせた海洋通信ネットワーク研究 ：水中光通信と音響通信を組み合わせたAUV群による海洋監視ネットワークを分析。通信性能や接続性を評価し、群ロボットによる広域海洋観測への応用可能性を検証している。また光通信・センシング統合（ISAC）と光給電を組み合わせた水中通信方式の研究も進められている
韓国	水中無線光通信システムの通信特性評価研究 ：水中光無線通信システムの設計と通信特性を評価。水中環境条件が通信品質に与える影響を解析し、安定通信に向けた性能向上手法の検討が進められている
シンガポール	水中光通信の伝送特性評価研究 ：水中光無線通信の伝送特性を実験的に評価。水中環境条件や光学特性が通信品質に与える影響を分析し、水中光通信の高性能化に向けた技術課題の整理が進められている

3.2.3 C2-3 海洋状況表示（MDA）統合分析（1 / 2）

- 我が国と諸外国（5 か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	研究機関/研究例
米国	Department of Homeland Security S&T：海洋状況認識（MDA）強化を目的とした研究開発プログラムを実施。レーダー・光学・音響等の多様なセンサー技術を統合し、海域監視能力の高度化を図る取組を推進
中国	Shanghai Maritime University：VTSの監視能力向上のため、AISデータとVHF音声情報を融合する手法を提案。BERT-BiLSTM-CRFで音声から船名・位置・意図を抽出し、時空間条件と名称類似度によりAISと統合し高精度監視を実現 National University of Defense Technology：船舶AISデータに教師なし深層学習を適用し、船舶識別情報の異常検知手法を検証。不審船舶やID偽装の検知への有効性を示した
EU	EMSA：EUの海洋監視機関間で海上監視情報を共有するための情報基盤を構築。各国当局のデータ連携を通じ、海洋状況認識の高度化を図る German Aerospace Center：AIS航行データに機械学習を適用し、船舶航行パターンの異常検知手法を検証。海上交通監視や不審行動の早期把握への有効性を示した
英国	Lloyd’s List Intelligence：AIS・衛星画像・レーダー等の多様なデータを統合し、船舶動向や海域状況を可視化する海洋状況認識サービスを提供。海上監視能力の高度化を図る

3.2.3 C2-3 海洋状況表示（MDA）統合分析（2/2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	開発状況（まとめ）
米国	多様なセンサー統合による海洋状況認識（MDA）技術の研究開発 ：米国国土安全保障省（DHS S&T）がMDA強化を目的とした研究開発プログラムを実施。レーダー・光学・音響等の多様なセンサーを統合し、海域監視能力の高度化を図る取組が進められている
中国	AISデータ解析による船舶行動分析・異常検知技術の研究 ：AISデータや海洋観測情報を活用した船舶行動分析手法を検討。機械学習や深層学習を適用し、航行パターン解析や船舶識別情報の異常検知など海上監視への応用可能性が示されている
EU	海洋監視情報共有基盤とAI解析技術の整備 ：EMSAが海上監視情報を共有するための情報基盤（CISE）を構築し、各国当局間のデータ連携を推進。また研究機関ではAISデータに機械学習を適用した船舶航行パターンの異常検知技術の研究が進められている
英国	多様な海洋監視データを統合した海洋状況認識サービスの展開 ：AIS・衛星画像・レーダー等のデータを統合し、船舶動向や海域状況を可視化する海洋状況認識サービスを提供。海上交通監視や海域状況把握の高度化が進められている

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.4 D 先端製造・デバイス 調査対象技術の抽出

- 各研究開発テーマから、調査対象とする技術を1つずつ抽出する。
- D 先端製造・デバイスについて、各研究開発テーマから、一つずつ具体技術を抽出・例示する。

調査対象領域から抽出した3つの技術

研究開発テーマ	具体技術	技術の説明	技術の選定理由
1. 高度レーザー加工・光製造基盤	光製造基盤 フェムト秒レーザー直接描画（FDLW）による3D光回路・ガラス微細構造	極短パルスレーザーをガラス内部に集光し、屈折率を局所的に変化させることで、3次元的な光導波路や微細構造を直接形成する技術。平面リソグラフィの制約を打破し、ガラス基板内の全空間を自在に活用した超高密度な光配線を実現する	従来の2次元実装を根底から覆す 非連続的な高密度配線を可能 とし、次世代光電融合の基盤を成す。耐環境性に優れたガラス製光チップは、 宇宙・防衛等の極限環境で代替不能な戦略的不可欠性を有し、通信インフラの自律性の確保 に寄与する
2. 超精密デバイス微細加工技術	精密デバイス サブミクロンCu-Cuハイブリッドボンディング（D2W/W2W）	チップやウェハ同士を、はんだバンプを介さず銅電極と絶縁層で直接接合する技術。1μm未満の精度で接合することで端子密度を飛躍的に高め、チップレット構造において複数のチップをあたかも単一の巨大チップとして機能させることができる	前工程の微細化限界を補完する「後工程」の核心であり、 先端AIチップやハイブリッドボンディングメモリの性能を左右する戦略的不可欠な技術 。世界的な投資が加速する強烈なモメンタムの中にあり、この 製造装置・材料の保持が技術的抑止力の核 となり得る
3. 高度付加製造（3Dプリンティング）	高度付加製造 インプロセス監視＋機械学習による欠陥検出・閉ループ制御	製造中にセンサで加工状態をリアルタイム監視し、AIが欠陥や予兆を即座に検知して加工条件を自動補正する技術。事後検査に頼ることなく、加工プロセスそのものを「自己最適化」させ、不良品の発生を未然に防止する	熟練技能をAI化して高度な製造基盤を維持する戦略的不可欠性が求められている 。「作りながら品質を保証する」非連続な生産モデルへの転換により、 有事のサプライチェーン断絶時における迅速な国内代替生産（レジリエンス）を可能にする

3.2.4 D3-1 高度レーザー加工・光製造基盤（1 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	研究機関/研究例
米国	University of Rochester：超低膨張ガラス内部に二重線型・管状の導波路を直接描画。広い温度範囲で安定したシングルモード伝送を実現し、過酷な宇宙環境や量子計算用インターコネクトへの応用を実証した
中国	Tsinghua University：フェムト秒レーザーを用い、ガラス内部に量子チップを直接描画。98.8%の高精度でベル状態（量子もつれ）を生成する回路の集積化に成功。複雑な量子演算を1チップで実現する道を開いた
ドイツ	Friedrich Schiller University Jena：銀含有リン酸塩ガラスへの3D描画により、二次非線形光学構造を創出。従来の石英の2.5倍の特性を実現し、波長変換や光スイッチングを行う次世代の非線形光学デバイスの製造法を確立した
英国	University of Southampton (Optoelectronics Research Centre)：特殊環境向けの耐放射線・耐熱性3D導波路の開発。極限状況下で動作する光ファイバーセンサーをガラス基板内に構築し、航空宇宙や原子力産業における構造監視技術をリード
オーストラリア	Macquarie University：フッ化物ガラスを用いた中赤外線領域向けの3D光導波路作製。高い屈折率変化（0.02超）を達成し、環境モニタリング用分光デバイスや天文学用干渉計の超小型化において顕著な成果を上げた

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.4 D3-1 高度レーザー加工・光製造基盤（2 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	開発状況（まとめ）
米国	CHIPS法に基づき、 光集積回路（PIC）とガラス内3D配線のハイブリッド集積を重視 。データセンターの省電力化や防衛用センサー開発を主目的とし、エネルギー省（DOE）等の支援を受けた産学連携による標準化が加速している
中国	科学技術部（MOST）の「 2026年重要国家計画 」において、 レーザー精密製造を戦略的技術と定義 。量子通信や次世代ストレージの国産化に向け、大学と国立研究所へ莫大な予算を投じ、社会実装を急いでいる
ドイツ	EUの「Horizon Europe」および国内の「Photonics21」戦略を軸に、 産業用レーザー装置の強みを活かした高精度加工を追求 。医療用マイクロ流路や高精度レンズなど、付加価値の高い「オンデマンド製造」に特化している
英国	EPSRC（技術・物理科学研究会議）主導のもと、 航空宇宙・エネルギー分野に特化したニッチで高付加価値な市場をターゲットとしている 。長期データ保存や特殊環境センサーにおいて、世界的な標準構築を狙う動きが強い
オーストラリア	中赤外フォトニクス分野で世界屈指の研究基盤を有し、特にフッ化物ガラス等の特殊材料への描画技術が突出 。天文学や医療診断など、高度な光操作が求められる分野での国際共同プロジェクトを多数主導している

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.4 D3-2 超精密デバイス微細加工技術（1 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	研究機関/研究例
米国	IBM Research：1μm以下のピッチにおけるスケーリングが電気特性や微細構造に与える影響を解析。熱膨張を利用した拡散緻密化により、微細化に伴う接合抵抗の上昇とばらつきを抑える手法を提示 University of California, Los Angeles：「Foveros Direct」を軸に、サブミクロンピッチのD2W（Die-to-Wafer）におけるアライメント精度とスループットの両立を研究。自己整合的なボンディングプロセスの最適化
中国	Tsinghua University：サブミクロンピッチハイブリッドボンディングにおける原子レベルの接合メカニズムを解明。反応性分子力学（ReaxFF）を用い、SiCN膜の組成とプラズマ処理が接合強度に与える相関を数値化
韓国	Samsung Electronics：ハイブリッドボンディングメモリ4以降に向けたCu-Cu ハイブリッドボンディング技術を実装。16層以上の超多層積層において、ナノ結晶Cuを用いることで接合温度を下げつつボイド（空隙）を完全に抑制する界面制御技術を報告
台湾	TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company)：「SoIC-UHD」技術により、ピッチ0.xμm級、結合密度120万個/\$mm^2\$超を達成。KGD（公認良品チップ）を用いた3D積層で、高い熱効率と信号整合性を実証
ベルギー（EU）	Imec：世界最小レベルの400nmピッチW2W（Wafer-to-Wafer）接合技術を開発。CMP（化学機械研磨）の超精密制御とプラズマ活性化により、空隙のないナノスケール接合インターフェースを確立 NanoIC Project：サブミクロンハイブリッドボンディング向けの初の設計キット（PDK）を公開。大学やスタートアップが微細RDL（再配線層）やD2W接合を設計・試作できるエコシステムを欧州主導で構築

3.2.4 D3-2 超精密デバイス微細加工技術（2 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	開発状況（まとめ）
米国	CHIPS法による NAPMP（国立先端パッケージング製造プログラム） を通じ、 米国内へのパッケージング拠点回帰を推進 。AI特化型チップの計算効率最大化のため、異種チップ集積（チップレット）の基盤技術としてハイブリッドボンディングに注力
中国	国家大基金（Big Fund）第3フェーズの資金を投入。 米国の輸出規制を背景に、後工程（パッケージング）での性能向上による「追い越し」を狙う 。3D NANDの多層化や独自のAIアクセラレータ開発にハイブリッドボンディングを全力を投じる
韓国	「K-半導体ベルト」戦略に基づき、世界シェア首位のメモリ技術とハイブリッドボンディングを融合 。SK HynixがTSMCと提携する中、Samsungは「設計・製造・ハイブリッドボンディングパッケージ」を一括で行うターンキー戦略で差別化を図る
台湾	TSMCを中心に、世界初のサブミクロンハイブリッドボンディング商用化をリード 。政府の「チップベース産業イノベーション計画（IC Taiwan）」に基づき、2nm/A16ノード以降の3D集積化における事実上の世界標準を狙う
ベルギー（EU）	欧州半導体法（European Chips Act）のもと、 研究機関Imecが中核となり、世界中のメーカーに微細ハイブリッドボンディングのロードマップを提供 。基礎研究から製造装置の高度化まで、中立的な立場から標準化を牽引している

3.2.4 D3-3 高度付加製造（3Dプリンティング）（1 / 2）

- 我が国と諸外国（5 か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	研究機関/研究例
米国	NIST：積層造形における機械学習を用いた継続的な知識エンジニアリングを開発。生成される膨大な動的データから積層造形の知識を自己進化させ、自動かつ自律的な閉ループシステムを構築する UCLA/Intel：L-PBFプロセス（金属3Dプリント）におけるインプロセス・モニタリングと制御への機械学習適用を研究。センサーデータを解析し、リアルタイムで補正行動をとるための閉ループ制御フレームワークの最適化を行う
中国	Tsinghua University：レーザー金属積層造形における機械学習ベースの閉ループ制御。マルチモーダルな特徴融合を仮想センサーとして機能させ、部分的な観測からでも欠陥形成の可能性を推定し、制御へフィードバックする
英国	University of Nottingham：指向性エネルギー堆積法（DED）におけるセンサー融合型のインプロセス品質監視。音響エミッションと光学データを組み合わせた機械学習フィードバックにより、内部欠陥をリアルタイムで抑制する
韓国	韓国科学技術院 (KAIST)：自動車製造ラインにおけるIoTと機械学習を統合したリアルタイム故障診断。ランダムフォレスト等の手法でセンサーの異常値を排除し、製造フローの柔軟な制御と品質予測を行う
ドイツ（EU）	フラウンホーファー工作機械・成形技術研究所 (IWU)：板金成形プロセスにおける非接触センサーとインテリジェントアルゴリズムを用いた完全閉ループ制御システムを開発。欠陥の早期認識と自動的な修正措置の推奨により歩留まりを向上させる

3.2.4 D3-3 高度付加製造（3Dプリンティング）（2 / 2）

- 我が国と諸外国（5 か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	開発状況（まとめ）
米国	CHIPS法および国家先端パッケージング製造プログラム（NAPMP）を通じ、半導体および高度製造業における「信頼性第一」の近代化を推進している。NISTを中心に、データ再現性とAIモデルの標準化に注力する特色がある
中国	「中国製造2025」以降の重要国家計画により、スマート製造への投資を加速させている。圧倒的な計算リソースと製造現場から得られるビッグデータを背景に、大規模なニューラルネットワークの社会実装を国家主導で急いでいる
英国	技術・物理科学研究会議（EPSRC）が主導し、航空宇宙やエネルギー分野など高付加価値製造におけるAI適用に特化している。HVM Catapult（高付加価値製造カタパルト）を通じた産学官の緊密な実証環境が特色である
韓国	「K-スマートファクトリー」戦略に基づき、製造業のデジタルトランスフォーメーションを強力に推進している。大手財閥（Samsung, Hyundai等）のサプライチェーン全体にわたるAI実装と、5G/6G通信インフラを活用したリアルタイム制御に注力している
ドイツ（EU）	インダストリー4.0の進化形として「Quality 4.0」を提唱し、欧州委員会（EC）のHorizon Europe枠組みで国境を越えた共同研究を展開している。製造現場の物理モデルとAIを融合させた「ハイブリッドAI」に強みを持つ

3.2.5 E バイオ・ヘルスケア先端 調査対象技術の抽出

- 各研究開発テーマから、調査対象とする技術を1つずつ抽出する。
- Eバイオ・ヘルスケア先端について、各研究開発テーマから、一つずつ具体技術を抽出・例示する。

調査対象領域から抽出した3つの技術

研究開発テーマ	具体技術	技術の説明	技術の選定理由
14-a AIによる高度タンパク質・ゲノム設計	タンパク質設計 基盤モデル型低データ対応タンパク質設計AI	タンパク質のアミノ酸配列と3次元構造を統合学習した基盤モデル。従来の数万件規模の実験データを必要とする手法とは異なり、UniProt等の膨大な配列データで事前学習した知識を、少量の機能データへ転移させる。実験が困難な未知の機能性タンパク質を、数件のサンプルから高精度にデノボ（新設計）で生成することを可能にする	膨大な実験資産を持つ「データの覇者」への依存を打破する 非連続な効率化 をもたらす。他国の非公開データに頼らず、 自国内の限られたデータで自律的に新薬や重要物質を設計 できるため、創薬基盤の戦略的自律性を担保する。 計算資源の確保がそのまま国家の設計能力に直結する戦略的不可欠性も有する
14-b 細胞・遺伝子治療の製造自動化	細胞・遺伝子治療 in-vivo（生体内）直接細胞プログラミング・配送技術	患者から細胞を取り出して体外で加工（ex-vivo）するのではなく、特定のナノキャリア（LNPやウイルスベクター）を用いて体内の標的細胞へ直接遺伝子を届け、生体内で治療細胞へ変える技術。高額な細胞加工施設（CPF）や複雑な製造工程を不要とし、注射一本で完結する次世代の細胞・遺伝子治療を実現する	巨大な製造拠点への依存をゼロにする非連続な医療モデルへの転換を促す。物理的な製造装置や消耗品への依存を最小化できるため、 有事の供給遮断時でも高度医療を継続可能な、究極の戦略的自律性を支える技術 となる
14-c 合成生物学による高機能物質生産	高機能物質 戦略鉱物バイオ抽出・高度濃縮デザイナー微生物	都市鉱山や低品位鉱石から、ガリウムや重レアアース等の戦略鉱物を高効率に回収・濃縮するよう遺伝子設計された微生物技術。化学法に比べエネルギー消費を6割以上削減しつつ、95%以上の回収率を達成している。環境負荷を抑えながら、従来は採算が合わなかった資源からの抽出を可能にする	特定国が供給網を独占する 重要鉱物の“武器化”に対する強力な対抗手段（カウンター・テクノロジー） となる。 輸入依存度の高い資源を国内循環で自給 することで、先端産業のサプライチェーンにおける戦略的不可欠性を根底から支える。 環境規制を回避しつつ資源を確保できるため、国際競争力の源泉となり得る

3.2 各研究開発テーマにおける具体的技術の抽出及び研究開発動向の調査

3.2.5 E3-1 AIによる高度タンパク質・ゲノム設計（1 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	研究機関/研究例
米国	University of Washington：拡散モデルを用いた「RFdiffusion」により、少数の制約条件から複雑な3D構造を持つタンパク質をゼロから設計。既存の自然界には存在しない機能性タンパク質の高精度な創出を実現 Meta AI：大規模言語モデル「ESM-3」を開発。数億件の配列データで事前学習し、実験データが極めて少ない未知のタンパク質に対しても、その機能や立体構造を高い信頼性で予測・設計する手法を確立
中国	Baidu Research：「HelixFold-Single」を開発。進化情報の収集（MSA）を必要とせず、単一の配列から高速に構造予測を行う。データ不足の条件下でも、従来のAlphaFold2に匹敵する精度を低コストで実現 Tsinghua University：幾何学的深層学習を用いた「DiffPack」を提案。タンパク質の側鎖配置を低データ環境下で最適化し、創薬ターゲットに対する結合親和性を効率的に高める計算手法を開発し、設計プロセスの短縮に成功
英国	University of Oxford：抗体設計に特化した生成モデル「AbDiffuser」を研究。特異的な抗原に対して、最小限の学習データで高い結合能を持つ抗体配列を生成する、拡散モデルベースのフレームワークを構築した
カナダ	Mila（モントリオール学習アルゴリズム研究所）：能動学習（Active Learning）を基盤モデルに統合。実験コストが高い新規タンパク質に対し、次にどのデータを取得すべきかをAIが提案し、極少データで効率的に学習を完結させる手法を開発
スイス（EU）	チューリッヒ工科大学（ETH Zurich）：特定の酵素機能を最適化する「ProteinMPNN」の改良版を開発。数個の実験サンプルからでも、目的の触媒活性を維持しつつ安定性を高める変異体を設計するファインチューニング手法を確立 スイス生物情報学研究所（SIB）：従来の機能予測法は似たもの（相同性）を探すMSA（多重配列アラインメント）に依存しており、似たものが存在しないオーファンタンパク質には無力でした。GPSFunは、基盤モデル（ProtT5やESMFold）から得られる内部表現（埋め込み表現）を活用することで、構造情報と配列の文法の両面から、相同性に頼らない高精度な機能予測（GOアノテーション等）を実現した

3.2.5 E3-1 AIによる高度タンパク質・ゲノム設計（2 / 2）

- 我が国と諸外国（5 か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	開発状況（まとめ）
米国	「バイオ・製造イノベーションに関する大統領令（2022年）」に基づき、AIとバイオの融合に巨額を投じている。 巨大テック企業と大学が連携し、圧倒的な計算資源を用いた汎用的な基盤モデル開発で世界を圧倒している
中国	「次世代人工知能発展計画」の下、 バイオコンピューティングを国家重点領域に指定 。国家レベルの大規模データセンターを構築し、官民一体となって膨大な配列データの事前学習と、 創薬・材料開発への応用を加速 させている
英国	「ライフサイエンス・ビジョン」に基づき、NHS（国民保健サービス）の医療データとAI研究の連携を強化。AI Safety Summitを主導するなど、 倫理的枠組みを構築しつつ、DeepMindを核とした基礎アルゴリズム開発で先行 している
カナダ	「パン・カナディアンAI戦略」により、 基礎理論とアルゴリズムのイノベーションに特化 。ヨシュア・ベンジオ教授率いるMilaを中心に、少ない学習効率で最大の成果を出す「 データ効率の良いAI 」の研究において 世界をリード している
スイス（EU）	「デジタル・スイス」戦略の下、世界的な製薬ハブ（ロシュ、ノバルティス等）と密接に連携。 高精度な実験データとAIを直接フィードバックさせる「ウェット・トゥ・ドライ」の高度な融合が特色 であり、実用化に極めて近い

3.2.5 E3-2 細胞・遺伝子治療の製造自動化（1 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	研究機関/研究例
米国	University of Pennsylvania : mRNAを封入した脂質ナノ粒子（LNP）を用い、生体内でT細胞を直接CAR-T細胞へ再プログラミングすることに成功。心線維症の治療において、体外操作なしで標的細胞を改変する革新的な手法を提示
中国	Peking University : AAV（アデノ随伴ウイルス）ベクターを用いて、脳内のアストロサイトを機能的なニューロンへ生体内で直接転換する技術を開発。パーキンソン病モデルにおいて、失われたドパミン作動性ニューロンを再生させ、運動機能を回復させる成果を上げている
英国	University of Oxford / Cambridge : 肝臓内の細胞運命を決定するエピジェネティックな制御機構を解明し、in-vivoでの胆管細胞から肝細胞への転換効率を向上。加齢や損傷に伴う再生能力の低下を、配送型プログラミング因子で補完する技術を追求
ドイツ（EU）	LMU Munich : 脳損傷後の反応性アストロサイトを標的に、Neurogenin2導入でニューロン化を検証。AAVは偽陽性を生みやすく、増殖性グリアを狙うMo-MLVの方が系譜追跡上は信頼性が高いと示し、ベクター選定とfate mappingを重視
イスラエル	Tel Aviv University : Cas9 mRNA + sgRNAをLNPで腫瘍へ送達し、脳腫瘍や播種性卵巣がんではin vivo遺伝子編集を実証。新規イオン化脂質、抗体標的化、局所投与と全身投与の使い分けに注力しており、生体内での直接細胞工学の実装力が高い Israel Institute of Technology : 血液脳関門と相互作用する小分子修飾PEG脂質を組み込んだmRNA-LNPを設計し、AIでBBB透過性候補を予測。アセチルコリン修飾LNPで静脈投与後の脳移行、神経細胞・アストロサイト指向性、ヒトBBB-on-a-chip通過を実証

3.2.5 E3-2 細胞・遺伝子治療の製造自動化（2 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	開発状況（まとめ）
米国	21世紀治験法（21st Century Cures Act）に基づき、 遺伝子治療と配送技術の融合を国家優先事項 としている。NIHやARPA-Hを通じた巨額投資により、大学の基礎研究からバイオベンチャーによる臨床応用までが極めて迅速に連動するエコシステムを構築している
中国	バイオ経済第14次5カ年計画において、 遺伝子編集と再生医療を戦略的技術に指定 している。倫理規制の柔軟性を背景に、臨床に近い段階での動物実験やプロトタイプ開発を加速させており、配送技術のスケールアップ製造において急速に台頭している
英国	ライフサイエンス・ビジョンに基づき、再生医療のハブとしての地位を強化している。 NHS（国民保健サービス）の臨床データを活用し、in-vivoプログラミングの安全性評価手法を標準化する動き を見せており、実用化に向けた規制当局（MHRA）との対話が極めて緊密である
ドイツ（EU）	欧州連合（EU）のATMP（高度管理医療製剤）規則を遵守しつつ、Horizon Europeの枠組みで多国間連携を主導している。 RNA技術の強みを活かし、BioNTech等の企業と連携して「体内を製薬工場化する」次世代ワクチンの応用技術として配送系を高度化 している
イスラエル	国家バイオコンバージェンス戦略（Israel Innovation Authority主導）により、 工学と生物学の融合を強力に推進 している。軍事技術から転用された 精密制御技術やデータ解析力をバイオ配送系に注入 しており、スタートアップによる独創的なデバイス開発が盛んである

3.2.5 E3-3 合成生物学による高機能物質生産（1 / 2）

- 我が国と諸外国（5か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	研究機関/研究例
米国	University of California, Davis：強酸性の鉱山排水からレアアース（REE）を選択的に回収するため、耐酸性デザイナー細菌を開発。ARPA-Eの資金援助を受け、低pH環境下でも特定の希土類イオンのみを吸着する分子精度のバイオ触媒を実証した UBNL/UC Berkeley：クテリオファージを「スマートスポンジ」として遺伝子改変。温度やpHの変化でREEを捕捉・放出する高度な選択的リサイクル技術確立。e-wasteや酸性廃液からのコバルト・リチウム回収への転用も進めている
中国	Central South University：混合硫酸化細菌を用いた生物学的前処理により、炭酸塩鉱石からのメタル回収率を1.4倍に向上。Bacillus属細菌の表面電荷を改変し、酸浸出を助ける表面改質プロセスにより、従来法より低エネルギーでの抽出を実現した
ドイツ（EU）	ヘルムホルツ研究所フライベルク資源技術（HIF）：金属結合ペプチド（ランモジュリン等）やシデロフォアを微生物表面に提示し、サブミクロン単位での選択的分離を実現。特にリチウムイオン電池（LIB）廃棄物から、コバルトとニッケルを個別に濃縮するバイオメタリジープロセスを開発
オーストラリア	オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）：極限好酸性菌のゲノム改変により、低品位のニッケル・コバルト硫化鉱からのバイオリーチング効率を改善。過酷な採掘現場環境でも活動を維持できるデザイナー微生物を開発し、エネルギー消費を50%削減するプロセスの実証を完了 University of Queensland：植物のバイオマスを活用した植物製錬（Phyto-mining）と微生物を連携。土壌中の戦略鉱物を微生物が可溶化し、植物が濃縮するハイブリッド型抽出法により、廃鉱山跡地からのREEおよび金（Au）の持続的回収を実証
カナダ	ケベック国立科学研究所（INRS）：オンタリオ州エリオットレイクの廃止ウラン鉱山尾鉱を対象に、在来の鉄酸化菌・硫酸化菌でREE、U、Th、Scをバイオ溶出。さらにイオン交換樹脂を組み合わせ、「微生物抽出＋選択回収」の一体プロセスとして成立可能性を検証

3.2.5 E3-3 合成生物学による高機能物質生産（2 / 2）

- 我が国と諸外国（5 か国程度）の開発状況の差を踏まえた我が国が更に取り組むべき課題等を以下の通り整理する。

諸外国の開発状況

国・地域	開発状況（まとめ）
米国	CHIPS法およびエネルギー省（DOE）の「Minerals Sustainability Multi-Year Program Plan」に基づき、国内供給網の再構築を急いでいる。 ARPA-Eの「RECOVER」プログラムを通じ、廃水からの100%国内回収を目標とした、合成生物学と抽出技術の融合に巨額投資 を行っている
中国	「バイオ経済発展第14次5か年計画」において、 バイオマイニングを重点領域 に指定。圧倒的な製錬シェアを維持しつつ、環境規制強化に対応するため、国家主導で大規模なバイオファウンドリを構築し、 宇宙バイオマイニングも見据えた極限環境微生物の設計を推進 している
ドイツ（EU）	2024年成立の「欧州重要原材料法（CRMA）」および「Horizon Europe」に基づき、 2030年までにリサイクル由来の供給を25%にする目標を掲げる 。「アーバンマイニング（都市鉱山）」に特化し、 廃電池からのバイオ回収技術を循環型経済の核 としている
オーストラリア	「重要鉱物戦略 2023-2030」に基づき、世界トップクラスの資源埋蔵量を背景に、ESG対応型の輸出基盤を構築。 低コスト・低炭素なバイオ抽出技術を「クリーン・マイニング」として国家ブランド化し、他国との差別化を図っている
カナダ	「カナダ重要鉱物戦略」を通じ、環境・先住民保護と開発の両立を重視。ゲノム・カナダ主導の下、 合成生物学を用いた廃石（テイリング）からの付加価値回収に注力し、鉱業先進国としての地位を「グリーン化」により維持する方針 を採っている



Lighting the way
to a brighter society