



 **TSC Foresight**

Innovation Outlook

Version 1.0 増補版

環境・化学分野

2026年6月

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

目次

3-2 環境・化学分野.....	1
3-2-1 分野の俯瞰.....	1
[1]重要元素のリサイクル技術.....	3
3-2-2[1] 解決すべき社会課題(M).....	3
3-2-3[1] 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向.....	3
(1) 市場動向.....	3
(2) 技術動向.....	7
(3) 政策動向.....	8
3-2-4[1] 社会課題の解決のために取り組むべき領域(F): レアメタルやレアアースなどの重要元素のリサイクル.....	10
3-2-5[1] 取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例.....	16
[2]ネガティブエミッション技術.....	20
3-2-2[2]解決すべき社会課題(M).....	20
3-2-3[2]社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向.....	20
(1) 技術動向.....	20
(2) 市場動向.....	21
(3) 政策動向.....	22
3-2-4[2]社会課題の解決のために取り組むべき領域(F): ネガティブエミッション技術/海洋 CDR の工業的技術.....	23
3-2-5[2]取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例.....	26
3-2-6[2]ネガティブエミッション技術/海洋 CDR の工業的技術における 手段を進める上での道筋.....	27

3-2 環境・化学分野

3-2-1 分野の俯瞰

環境・化学の技術分野を、図 3-2-1 に示す。気候変動問題を克服し持続可能な社会を実現するためには、サーキュラーエコノミーの実現、産業分野の化石資源消費量の削減、環境影響物質の対策、大気等からの CO₂ 除去といった取組が重要である。

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

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

図 3-2-1 環境・化学分野の活動分野俯瞰図

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

産業分野の化石資源消費量の削減の観点では、鉄鋼・化学産業など CO₂ 排出削減が困難とされる産業分野において、原料や燃料の非化石資源への転換や、未利用熱の活用、製造プロセス省エネルギー化などの化石資源消費量を削減する技術が不可欠である。

GHG(温室効果ガス)排出量の大部分を CO₂ が占めており、気候変動の観点からは CO₂ 排出削減が最重要課題である。地球環境の保全に向けては、CO₂ だけでなく様々な環境影響物質の対策技術が必要であり、例えば、SLCFs¹(短寿命気候強制因子)の対策技術や、近年、欧米を中心に規制強化の議論が進められている PFAS²対応技術についても注視が求められる。

¹ 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。CO₂ 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。

² 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 CO₂ 排出(残余排出)があるため、カーボンニュートラルの実現には、大気から CO₂ を除去するネガティブエミッション技術も必要不可欠である。

本増補版では、[1]サーキュラーエコノミーの実現のための「リサイクル技術」及び[2]大気等からの CO₂ 除去のための「ネガティブエミッション技術」に焦点を絞って、俯瞰分析を行った。

[1]重要元素のリサイクル技術

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

3-2-2[1] 解決すべき社会課題(M)

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

このうちレアメタルやレアアースをはじめとする重要元素は、スマートフォン・家電・電気自動車・再生可能エネルギー設備・データセンターなど、日常生活に密接した機器から産業用途に至るまで欠かすことのできない資源であり、さらにはグリーントランスフォーメーション(GX)やデジタルトランスフォーメーション(DX)の推進にも不可欠である³。一方で、これらの重要元素を含む鉱物は、埋蔵国の偏在や、経済合理性・環境規制・労働環境等の課題に起因する製錬品生産国の寡占化などにより、調達リスクが高まっている。このため、経済安全保障の観点から、『重要元素の持続可能な供給』は我が国にとって喫緊の社会課題である。

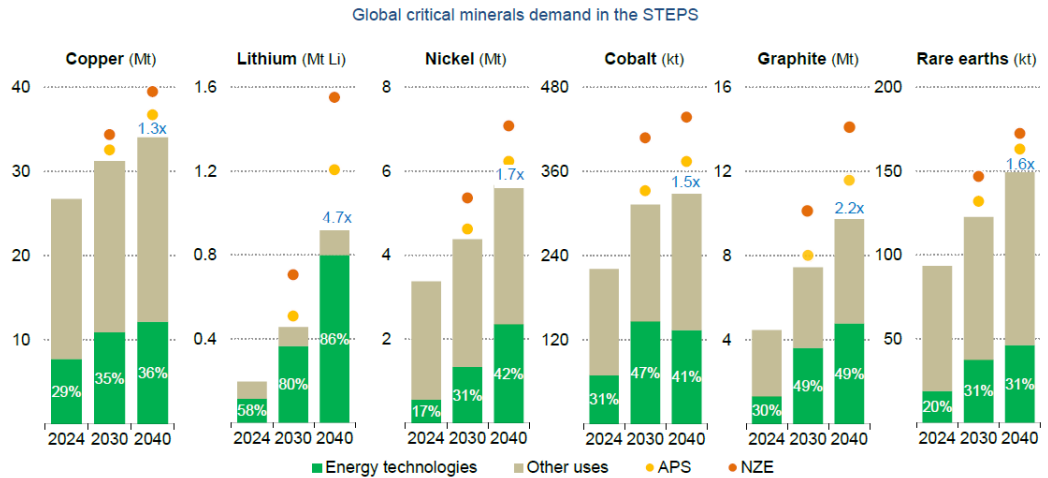
3-2-3[1] 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向

(1) 市場動向

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

³ 日本政府により 2023 年に公表された『重要鉱物に係る安定供給確保を図るための取組方針』では、重要鉱物の対象は、以下のとおり。金属鉱産物(マンガン、ニッケル、クロム、タングステン、モリブデン、コバルト、ニオブ、タンタル、アンチモン、リチウム、ポロン、チタン、バナジウム、ストロンチウム、希土類金属、白金族、ベリリウム、ガリウム、ゲルマニウム、セレン、ルビジウム、ジルコニウム、インジウム、テルル、セシウム、バリウム、ハフニウム、レニウム、タリウム、ビスマス、グラファイト、フッ素、マグネシウム、シリコン、リン及びウランに限る。)

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



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

図 3-2-2 STEPS シナリオにおける重要元素の需要予測

出所: Global Critical Minerals Outlook 2025(IEA)

また、エネルギー転換に加え、デジタル技術、AI・ロボット、航空宇宙などの産業も大きく発展することが見込まれており、例えば世界の AI 市場規模は 2025 年から 2030 年にかけて約 3 倍⁴、宇宙産業の市場規模についても 2035 年までに約 3 倍⁵の規模に拡大すると予測されている。これらの産業でもエネルギー関連鉱物を含む様々な重要元素が使用されていることから(表 3-2-1)、各種の重要元素の需要拡大が見込まれており、例えばガリウムでは、データセンターだけでも需要が 2030 年までに 11%も増加する可能性があるとの報告もある⁶。

表 3-2-1 今後の発展が見込まれる産業で使用される重要元素

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

出所: 公開情報を元に NEDO イノベーション戦略センター作成

⁴ 総務省「令和 7 年版 情報通信白書」において、Statista を元に推計
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r07/html/nd219100.html>(2026 年 3 月閲覧)
⁵ Space industry worldwide - statistics & facts (Statista, 2025)
<https://www.statista.com/topics/5049/space-exploration/#topicOverview> (2026 年 3 月閲覧)
⁶ Global Critical Minerals Outlook 2025(IEA, 2025)

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

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

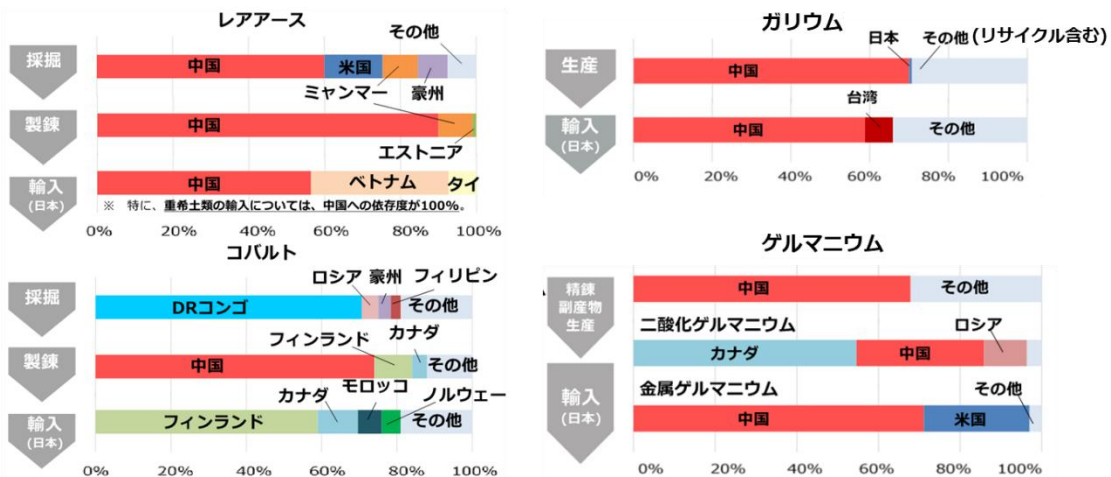


図 3-2-3 レアアース、コバルト、ガリウム、ゲルマニウムの生産・製錬国と日本の輸入先

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

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

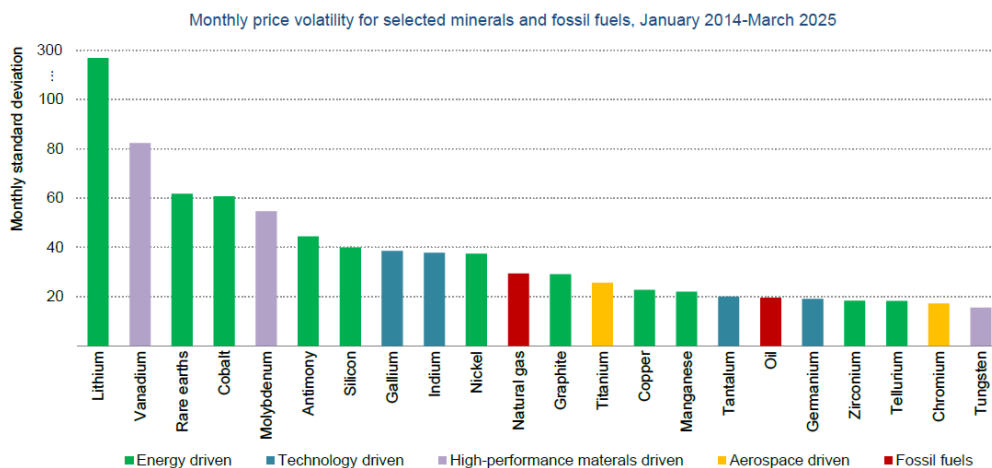
表 3-2-2 重要元素に係る輸出管理規制の例

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

出所: 各種公開情報を元に NEDO イノベーション戦略センター作成

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

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

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


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

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

出所: Global Critical Minerals Outlook 2025(IEA)

(2) 技術動向

(i) 製錬・精製技術の強化

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

(ii) リサイクル

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

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

また、非鉄製錬ネットワークを活用したリサイクルも行われている。銅製錬、亜鉛製錬、鉛製錬では、製錬副産物等を相互にやり取りする非鉄製錬ネットワークを活用して銅、亜鉛、鉛鉱石中に微量含まれる希少金属を回収しており、この回収技術を活用してリサイクル原料から金や銀、レアメタルなどの重要元素を再資源化している。この方法は処理量が大きく、多様な元素を回収できるという特徴を有し、重要元素のリサイクルにおいて重要な役割を担っている。日本国内の主要な非鉄製錬メーカーは、製錬におけるリサイクル原料の処理量増加の方針を打ち出している⁷。

(iii) 使用量削減・代替素材開発

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

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

⁷ JX 金属

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

三菱マテリアル

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

battery)の普及が拡大しており、IEAによれば、2024年時点で電気自動車の約半数に採用されている⁸。また、コバルトの使用が微量または不要なマンガンリッチ系電池や、リチウムを使用しないナトリウムイオン電池の開発も進展している。

電気自動車や風力発電向けの永久磁石分野においては、ジスプロシウムやテルビウムといった重希土類の使用量を低減するため、これらを局所的に使用する技術や、重希土類を使用しない磁石の研究開発が推進されている。NEDOにおいては、「経済安全保障重要技術育成プログラム(K Program)」の一環として、「重希土フリー磁石の高耐熱・高磁力化技術」に係る研究開発が実施されている⁹。

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

(3) 政策動向

(i) 日本

2022年5月に公布された『経済安全保障推進法』に基づき、「特定重要物資」の一つに「重要鉱物」が指定され、サプライチェーン強靱化に向けた各種支援が進められている。また、2023年1月には『重要鉱物に係る安定供給確保を図るための取組方針』が策定され、探鉱・フィジビリティ調査、鉱山開発、製錬能力強化、技術開発、リサイクル等を組み合わせた包括的施策を推進し、資源権益獲得から国内での製錬・加工、循環利用に至るまでの一貫した供給確保体制の構築が図られている。これらの方針に基づき、これまでに鉱山開発支援、製錬能力・技術強化、リチウムイオン電池リサイクル促進などの複数の供給確保計画が認定され、支援が行われている¹⁰。さらに、2025年11月には日本成長戦略会議において、官民連携による危機管理投資、成長投資を促進する17の戦略分野の一つとして、マテリアル(重要鉱物・部素材)分野が指定され、国家戦略上の重点領域として強化する方針が示されている¹¹。2026年3月には『重要鉱物に係る安定供給確保を図るための取組方針』が改定され、重要鉱物の対象が追加されている¹²。

(ii) 欧州

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

⁸ Global Critical Minerals Outlook 2025(IEA, 2025)

⁹ 「経済安全保障重要技術育成プログラム」で重希土フリー磁石/レアアースフリー磁石開発と次世代磁石に適したモーターの設計開発に着手(NEDO, 2024)

https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101765.html(2026年3月閲覧)

¹⁰ JOGMEC HP

https://www.jogmec.go.jp/metal/metal_10_00001.html(2026年3月閲覧)

¹¹ 日本成長戦略会議 第1回、第2回(内閣官房)

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

¹² 2026年3月時点で、マンガン、ニッケル、クロム、タングステン、モリブデン、コバルト、ニオブ、タンタル、アンチモン、リチウム、ボロン、チタン、バナジウム、ストロンチウム、希土類金属、白金族、ベリリウム、ガリウム、ゲルマニウム、セレン、ルビジウム、ジルコニウム、インジウム、テルル、セシウム、バリウム、ハフニウム、レニウム、タリウム、ビスマス、グラファイト、フッ素、マグネシウム、シリコン、リン、ウランが対象となっている

https://www.meti.go.jp/policy/economy/economic_security/metal/critical_minerals_torikumihoshin.pdf(2026年3月閲覧)

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

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

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

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

(iii) 米国

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

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

3-2-4[1] 社会課題の解決のために取り組むべき領域(F): レアメタルやレアアースなどの重要元素のリサイクル

3-2-3[1]で述べた社会課題である重要元素の持続可能な供給の解決に向けて取り組むべき領域としては、製錬品調達先の多角化、天然資源開発、製錬・加工技術強化、リサイクル、備蓄、使用量削減や代替素材開発などが挙げられる。本増補版では、これらの領域から、リサイクルに取り組むべきフロンティア領域等として俯瞰する。

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

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

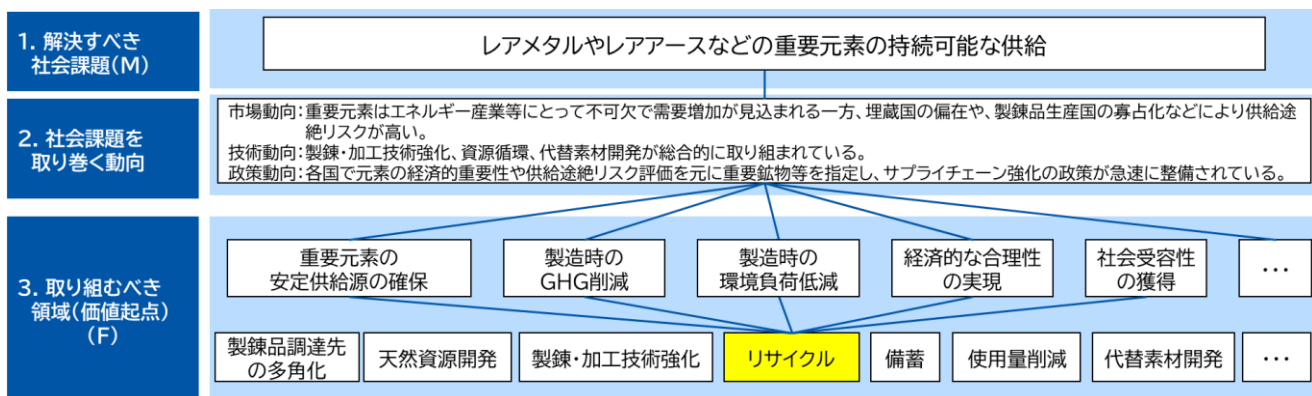


図 3-2-5 レアメタルやレアアースなどの重要元素のリサイクルの MF ロジックモデル

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

種を挙げており¹³、これらの元素は、リサイクルによる安定調達の寄与が期待される(図 3-2-6、図 3-2-7)。

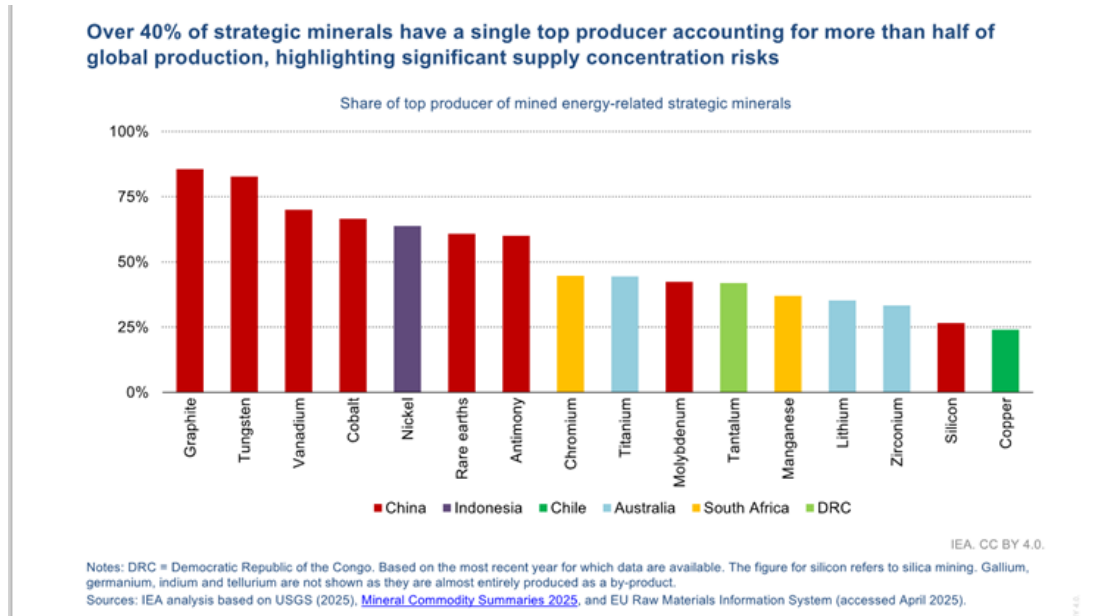


図 3-2-6 IEA の「エネルギー関連戦略鉱物」における、鉱石生産トップシェア国
出所:Global Critical Minerals Outlook 2025(IEA)

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

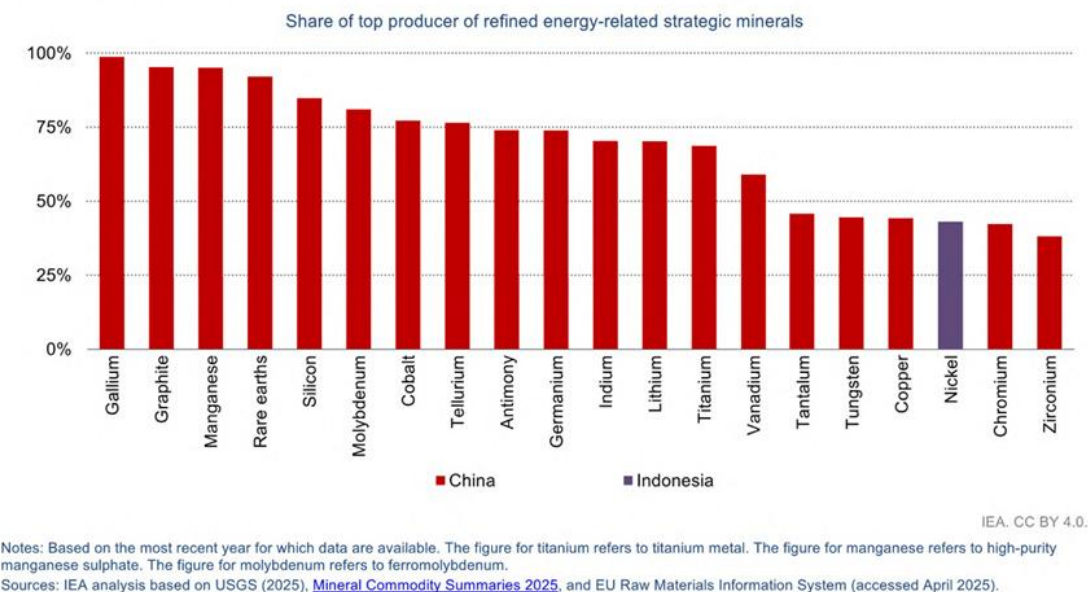


図 3-2-7 IEA の「エネルギー関連戦略鉱物」における、製錬品生産トップシェア国
出所:Global Critical Minerals Outlook 2025(IEA)

¹³ Global Critical Minerals Outlook 2025(IEA, 2025)

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

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

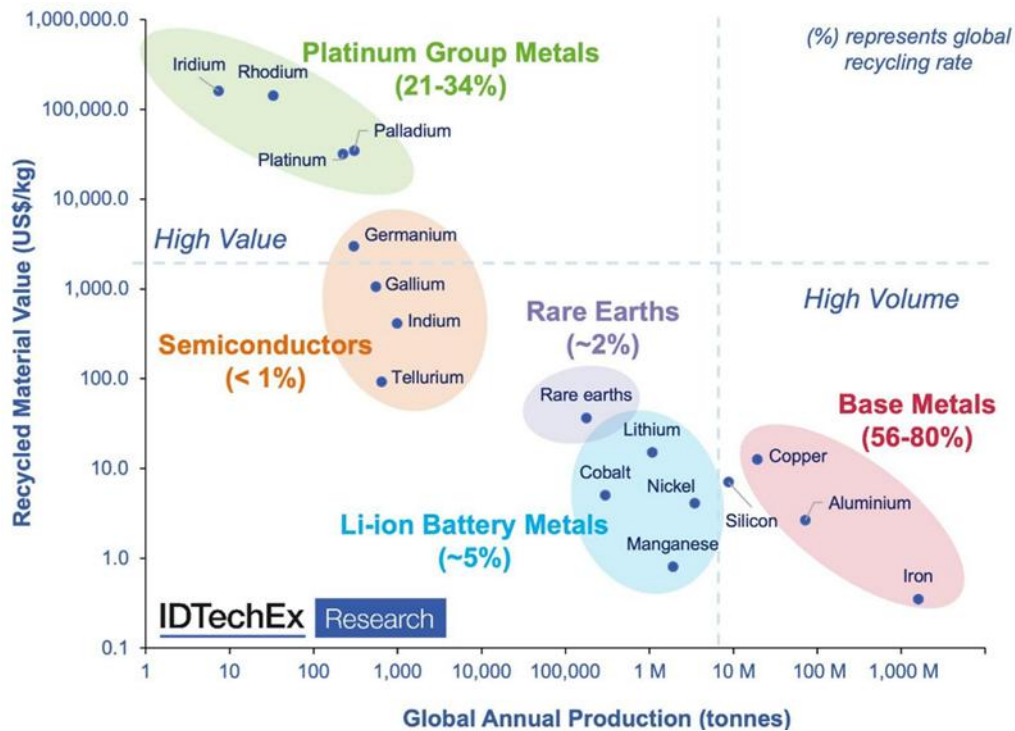


図 3-2-8 各元素のリサイクル率(世界)

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

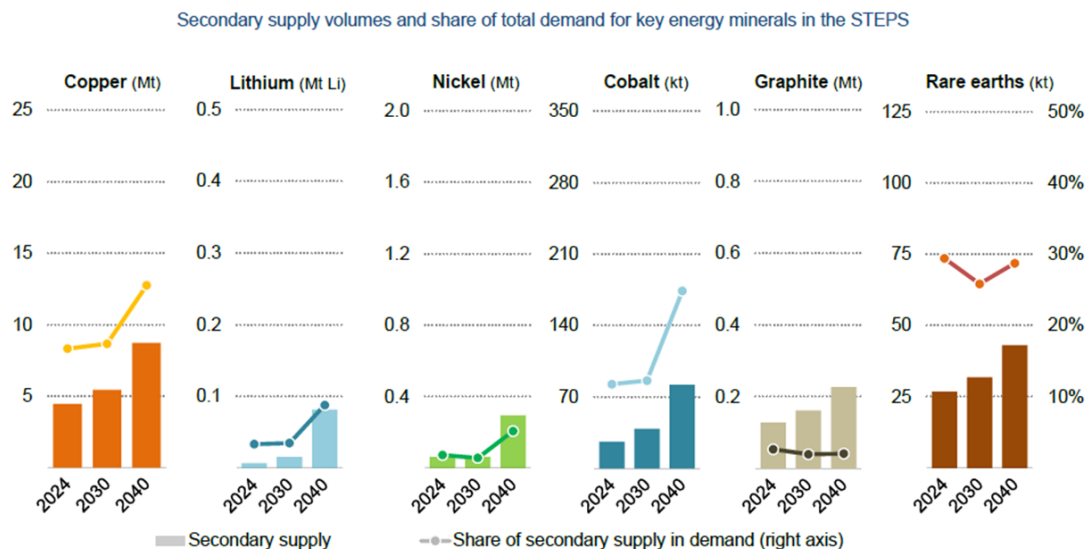
以下に、重要元素のリサイクルについて、将来性(成長性・社会課題)、技術・アイデアの革新性、日本の優位性、民間のみで取り組む困難性、重要経済安保技術、その他特筆すべき理由の観点から示す。

① 将来性(成長性・社会課題)

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

例えば、重要元素のうちリチウムイオン電池や再生可能エネルギーに使用されるエネルギー関連元素は、2030年以降に再生材供給量が急速に増加し(図 3-2-9)、再生材の市場規模は2050年までに現在の約5倍の2,000億ドル¹⁴に達する見込みである。

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



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

IEA, CC BY 4.0.

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

② 技術・アイデアの革新性

図 3-2-8 に示すように、リチウムイオン電池やレアアース磁石などでは一部でリサイクルが取り組まれているが、リサイクル率は数%程度にとどまり、半導体用途などの重要元素はほとんどリサイクルが行われていない。これらに対する経済合理性も兼ね備えたリサイクル技術は革新的である。

¹⁴ Recycling of Critical Minerals(IEA, 2024)

通常、元素ごとに個別のリサイクルプロセスが確立されるが、軽微な条件変更やモジュール組み換え等によるプロセス変更によって、多様なリサイクル原料が処理できると共に、複数元素を柔軟に回収できれば、元素の需要変動や供給ショックの影響を受けにくいレジリエントなリサイクルシステムとして革新的である。

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

③ 日本の優位性

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

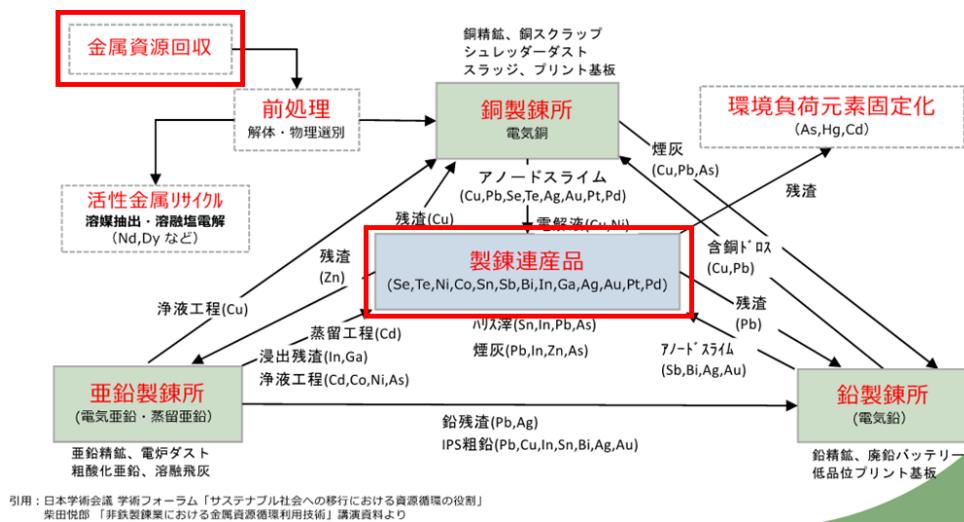


図3-2-10 非鉄製錬ネットワークによる重要元素回収

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

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

④ 民間のみで取り組む困難性

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

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

⑤ 重要経済安保技術

経済産業省が策定した「重要鉱物に係る安定供給確保を図るための取組方針」において、リサイクル技術開発、設備投資が施策の一つとして挙げられている。リサイクルの拡大によって他国に依存しない自国内の供給源を確保することは、我が国の経済安全保障の強化に対し重要な意義を有する。

⑥ その他特筆すべき理由

鉱石の採掘や製錬は大量のエネルギーを消費するとともに、多量の排水や有害廃棄物の発生も伴う。IEA によると、ニッケル、コバルト、リチウムなどのエネルギー関連鉱物では、リサイクルによる生産は天然資源からの生産に比べて GHG 排出量を平均して約 80%削減できると報告されている¹⁵。また、レアアースについても、地球温暖化に加えて、酸性化、富栄養化及びヒトへの毒性などを含む環境影響を、リサイクルによって 64%～96%削減できるとの報告がある¹⁶。

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

¹⁵ Global Critical Minerals Outlook 2025 (IEA, 2025)

¹⁶ A Systematic Literature Review of Selected Aspects of Life Cycle Assessment of Rare Earth Elements: Integration of Digital Technologies for Sustainable Production and Recycling (R. G. Mugion et al., Sustainability 2025,17)

3-2-5[1] 取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例

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

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

表 3-2-3 重要元素のリサイクルにおける解決すべき主な問題点

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

こうした問題点に対する技術的対策としては、以下が考えられる。

(1) 易リサイクル設計

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

(2) 廃製品から部素材を分離・選別し、元素を高濃度化する前処理技術

個別リサイクルや非鉄製錬ネットワークでの精製・高純度化を実現するには、破碎・選別・抽出などの前処理により、元素含有量の高い分画を得ることが極めて重要である。破碎工程では、複合材界面を選択的に破断する高電圧パルス破碎や超音波キャビテーション破碎など、低エネルギーで高選択性を達成する技術開発が行われている¹⁷。選別工程では、従来の比重選別や磁力選別に加え、樹脂を選択的に溶解して金属層を露出させる溶媒処理や、超臨界水・超臨界 CO₂ を用いて高回収率で金属を抽出する技術も報告されている¹⁸。さらに、AI 画像認識や RFID (Radio Frequency Identification) のような識別技術は、高精度な分離に貢献すると考えられる。

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

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

¹⁷ A toolbox for improved recycling of critical metals and materials in low-carbon technologies(G. Zante et al., RSC Sustainability, 2024, 2, 320–347)

¹⁸ Recovery of metals and valuable chemicals from waste electric and electronic materials: a critical review of existing technologies(S. Gulliani et al., RSC Sustainability, 2023, 1, 1085–1108)

(3) 低環境負荷・低コストで元素を高純度化するリサイクル技術

精製・高純度化では、環境負荷が低く、低コストな技術の確立が必要である。そのため、使用する溶媒やエネルギー使用量を最小化しつつ、高い選択性を示す分離精製プロセスの開発が求められる。具体的には、深共晶溶媒やイオン液体を用いた低温選択溶解、吸着材やイオン交換材料、膜分離による高効率な分離・回収の研究開発が行われている。乾式プロセスにおいてもマイクロ波加熱^{19,20,21}やプラズマ処理^{22,23}などの省エネルギー型の技術が報告されている。

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

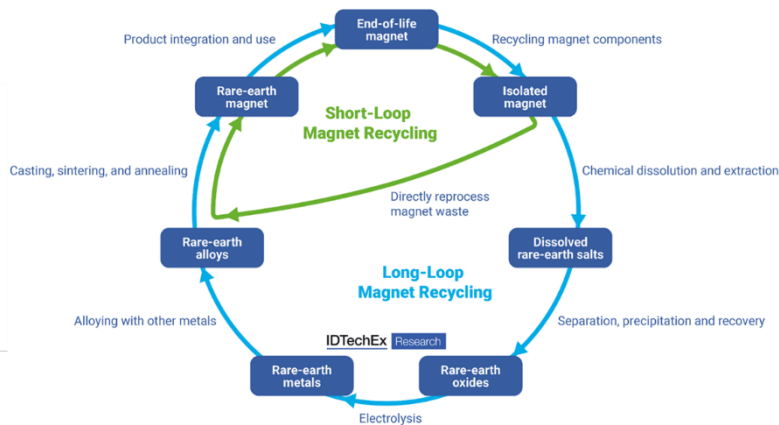


図 3-2-11 レアアース磁石におけるロングループ及びショートループリサイクル

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

(4) 元素の需要変動や供給ショックの影響を受けにくいレジリエントなりサイクル技術

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

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

¹⁹ Microwave-Mediated Extraction of Critical Metals from LED E-Waste (A. B. Bourlinos et al., ChemEngineering, 2025, 9, 47)

²⁰ Green and Sustainable Rare Earth Element Recycling and Reuse from End-of-Life Permanent Magnets (Z. Cherkezova-Zheleva et al., Metals, 2024, 14, 658)

²¹ Recycling of e-waste power cables using microwave-induced pyrolysis – process characteristics and facile recovery of copper metal (S. Horikoshi et al., RSC Adv., 2024, 14, 29955–29964)

²² Applications of Plasma Technologies in Recycling Processes (R. Kusano et al., Materials, 2024, 17, 1687)

²³ <https://news.mit.edu/2025/6K-cleans-critical-minerals-using-microwave-plasma-0207> (2026年3月閲覧)

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

このようなリサイクル技術は、需給変動や供給ショックの影響を受けにくい、経済合理性と資源安定供給を両立するレジリエントなリサイクルシステムとして有望である。

(5) 未利用資源からの元素回収技術

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

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

[2]ネガティブエミッション技術

3-2-2[2]解決すべき社会課題(M)

NEDO が国内外の市場・技術・政策動向を俯瞰した Innovation Outlook Ver. 1.0 では、豊かな未来レポート²⁴をもとに、イノベーション推進において「大切にすべき 6 つの価値軸」をあげた。そのうち「持続可能な経済成長の実現」では、「基幹産業・技術の創成による持続可能な社会」「物質循環による持続可能な社会」の二つを目指すべき社会像として示した。

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

『持続可能な経済成長の実現』に向けて、気候変動の原因である CO₂ への対策が喫緊の社会課題である。

3-2-3[2]社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向

(1) 技術動向

IPCC AR6²⁵の WG3 報告書で取上げられた温度上昇を 1.5°C に抑えるための四つの例示的緩和経路(IMP)は、何れも速やかかつ大幅な GHG 排出削減の共通の特徴をもつが、各緩和戦略は大きく異なる。しかしながら、カーボンニュートラルを達成するための取組として、使用するエネルギーの脱炭素化、最終エネルギー消費の削減、ネガティブエミッション技術(NETs)の導入の三つの取組が共通して重要であり、くわえてエネルギーだけに限らず、あらゆる原料の脱炭素化が重要であることが示されている(図 3-2-12)。

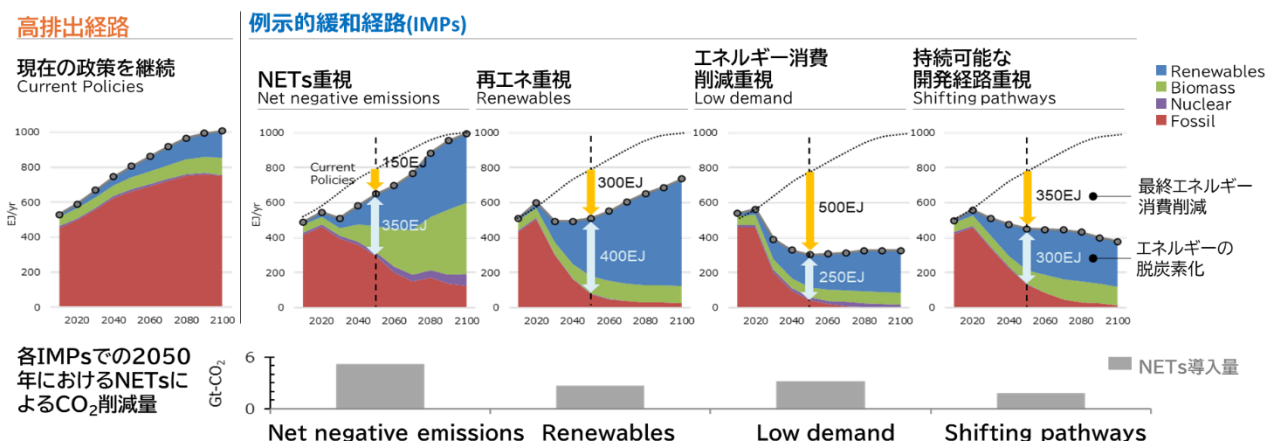


図 3-2-12 カーボンニュートラルを達成するための重要な取組

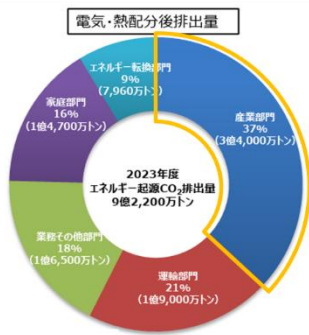
出所: AR6(IPCC) Figure 3.7, 12.3 を基に NEDO イノベーション戦略センター作成(2023)

²⁴ イノベーションの先を目指すべき「豊かな未来」(NEDO TSC、2021)
https://www.nedo.go.jp/library/future_2.html(2026年3月閲覧)

²⁵ 第6次評価報告書(AR6)(IPCC、2021)

図 3-2-13 に示すように、我が国では、2023 年時点でエネルギー起源 CO₂ 排出量の約 4 割を産業部門が占めている。なかでも、鉄鋼業や化学工業がその半分以上を占めるが、これらの産業は名目 GDP の 26%(152 兆円)を占める製造業・建設業に対して原料・素材を広く提供する重要な基盤産業であり、そのため関連産業のグローバルな競争力確保の観点からも低炭素化は必須である。しかし、鉄鋼・化学・セメントといった産業はハード・トゥ・アベートであり、低炭素化に向けては素材や製造プロセス等における脱炭素化の推進に加えて、低コストな CO₂ 除去(CDR: Carbon Dioxide Removal)技術の活用が重要となる。

エネルギー起源CO₂排出量の部門別内訳



産業部門からのエネルギー起源CO₂排出量の業種別内訳

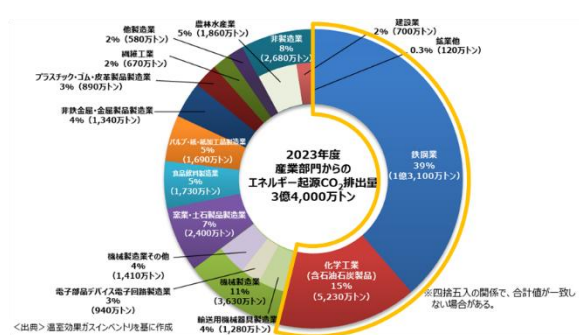


図 3-2-13 日本のエネルギー起源 CO₂ 排出量の部門別、業種別内訳

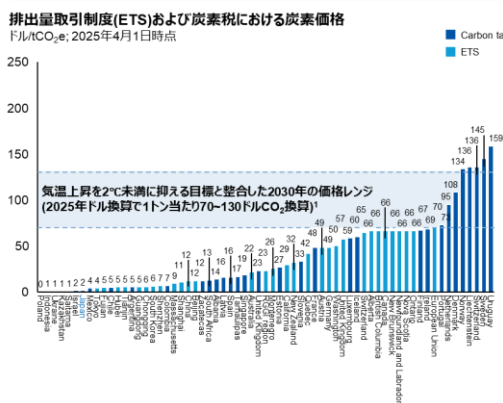
出所:「2023 年度温室効果ガス排出量及び吸収量について」(環境省、2025)を基に
NEDO イノベーション戦略センター作成

(2)市場動向

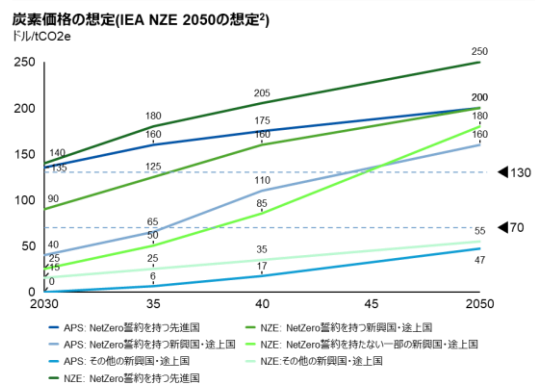
脱炭素に向け、NetZero への目標を掲げる先進国・新興国では、2050 年にかけて 160~250 ドル/tCO₂ 水準の炭素価格想定を見据えた市場形成が進む可能性がある(図 3-2-14)。低コストな CDR 技術は経済合理性を有し、持続可能な経済成長の実現に資すると考えられる。

- 現在の炭素価格および将来の炭素価格シナリオ

現状



2050年ネットゼロ実現に向けた将来シナリオ



1. 炭素価格に関するハイレベル委員会の報告書における動向に基づき、インフレを調整した値
2. "Global Energy and Climate Model", IEA, 2024. ASPは公表済協約シナリオ、NZEは2050年ネットゼロ排出シナリオ
データの出所: The World Bank (2025) State and Trends of Carbon Pricing 2025(2025年7月1日参照)

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

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

(3) 政策動向

日本の「第 7 次エネルギー基本計画」では、CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage) を、「エネルギー安定供給、経済成長、脱炭素の同時実現に不可欠なもの」として明記している。また、CDR についても、「2050 年カーボンニュートラル実現のため、最大限排出削減をしたとしても最終的に CO₂ の排出が避けられない分野からの排出(残余排出)を相殺する手段として、必要となる」と記載されており、政策面においても重要な取組と位置づけられている(図 3-2-15)。

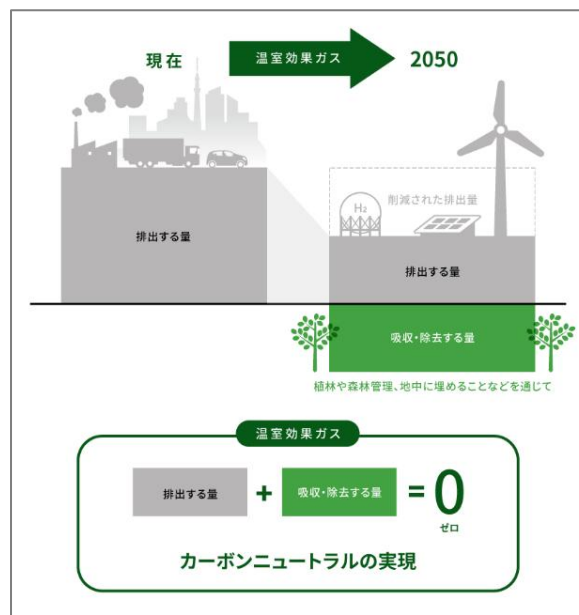


図 3-2-15 第7次エネルギー基本計画における温室効果ガスの吸収・除去の必要性
 出所:「カーボンニュートラルって何?」(METI Journal ONLINE、2022)

3-2-4[2]社会課題の解決のために取り組むべき領域(F): ネガティブエミッション技術/海洋 CDR の工業的技術

『持続可能な経済成長の実現』に向けて、気候変動の要因である CO₂ への対策が喫緊の社会課題であり、その解決のためには『ネガティブエミッション技術の導入』が経済合理性を伴って推進されることが重要である。

現存のネガティブエミッション技術の現状を図 3-2-16 に整理した。CO₂ 除去技術である CDR は、大気からの CO₂ 吸収アプローチに基づき、自然ベースと、工業的アプローチに大別される。将来的な技術進展も見据えて技術を評価すると、工業的アプローチは CO₂ 除去の潜在的なポテンシャルが大きく、CO₂ 固定の恒久性や MRV (Measurement, Reporting, Verification) の観点で優位性をもつ。一方で、環境リスクの検証や国際的な枠組み形成は途上にあるが、今後の社会実装が期待される技術として注目に値する。

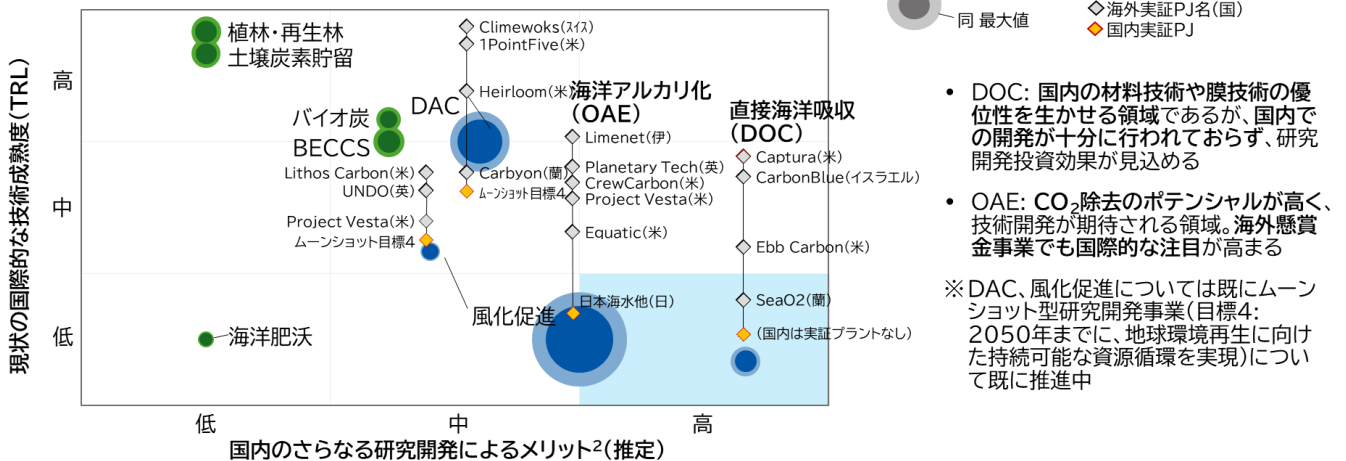
ネガティブエミッション技術		CO ₂ 除去 ポテンシャル	恒久性	MRV	コスト	環境リスク	回収CO ₂ の可用性	備考
自然ベース アプローチ	植林・再生林	△	△	△	○	△	×	成長期の吸収は速いが、伐採や火災などの長期的安定性低い
	土壌炭素貯留	△	△	△	○	○	×	低コストだが環境条件での変動が多く放出リスクも高い
	バイオ炭	△	○	○	○	○	×	長期の安定性高いが、供給の物流や原料確保に制約
	BECCS	△	◎	◎	△	△	×	長期の安定性高いが、バイオマス供給や土地・水資源との競合に課題
	海洋肥沃	△	△	△	△	△	×	CO ₂ 吸収量の定量が困難であり、生態系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

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

図 3-2-16 ネガティブエミッション技術における工業的 CDR の可能性

なかでも直接海洋吸収(DOC: Direct Ocean Capture)や海洋アルカリ化(OAE: Ocean Alkalization Enhancement)といった海洋 CDR の工業的技術は、研究開発による発展可能性が高く、CO₂除去ポテンシャルの高い技術であるにもかかわらず、国内での開発が十分に行われていない技術である(図 3-2-17)。海水中には大気中の約 100 倍の CO₂ が存在しているため、大気からの直接回収と比べて、より低コストで CO₂ 除去を実現することが期待される。

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



出所:以下の資料、考え方を基にNEDOイノベーション戦略センター作成
1. 現状の国際的な技術成熟度: IPCC Sixth Assessment Report "Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change" Table 12.6 and P1271、DOCについては明示されておらず、他海洋CDR技術と同程度以下とした
2. 国内のさらなる研究開発によるメリット: 機能実現・大規模化・コスト低減等に対するメリットについて、国内技術や地理的環境に優位性がある一方で国内技術のTRLが低く向上余地が大きい、あるいは、国内技術のTRLが高いが持続可能な社会実装に向けたコスト低減等の改善余地が大きい、等の観点から総合的に評価
3. 大気からCO₂を吸収するアプローチに基づき、工業的アプローチと自然ベースアプローチに分類

図 3-2-17 CO₂回収・貯留技術の除去ポテンシャル、技術成熟度及び国内の更なる研究開発によるメリット

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

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

図 3-2-18 海洋 CDR の工業的技術の重要性

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

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

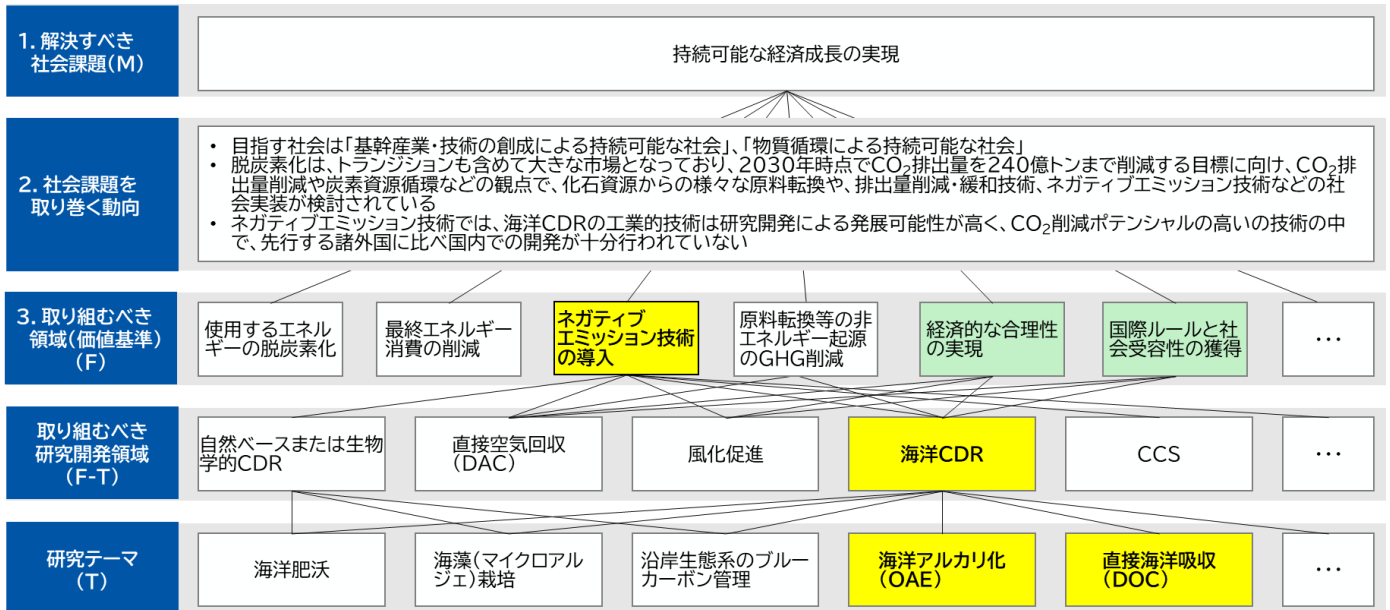


図 3-2-19 海洋 CDR の工業的技術の MFT ロジックモデル

3-2-5[2]取り組むべき具体的な手段(T)のテーマ例

海洋 CDR の工業的技術の実現のための具体的な手段の事例を図 3-2-20 に示す。海洋 CDR の工業的技術の低コスト化に向け、投入エネルギーの削減、装置コスト削減、耐久性改善、消耗品コスト削減が重要である。電気透析や電気分解により生成した酸を用いて海中の CO_2 を放出させる技術の低コスト化を目指したシステム改善が期待される。また、工業的 OAE 向けのアルカリ生成の低コスト化技術は、DOC における低コストな酸生成と共通する技術として位置づけられる。さらに、DOC の低コスト化に向けては、これらの電気化学的手法を使用せずに海水から直接 CO_2 を回収する材料や膜等の開発も期待される。

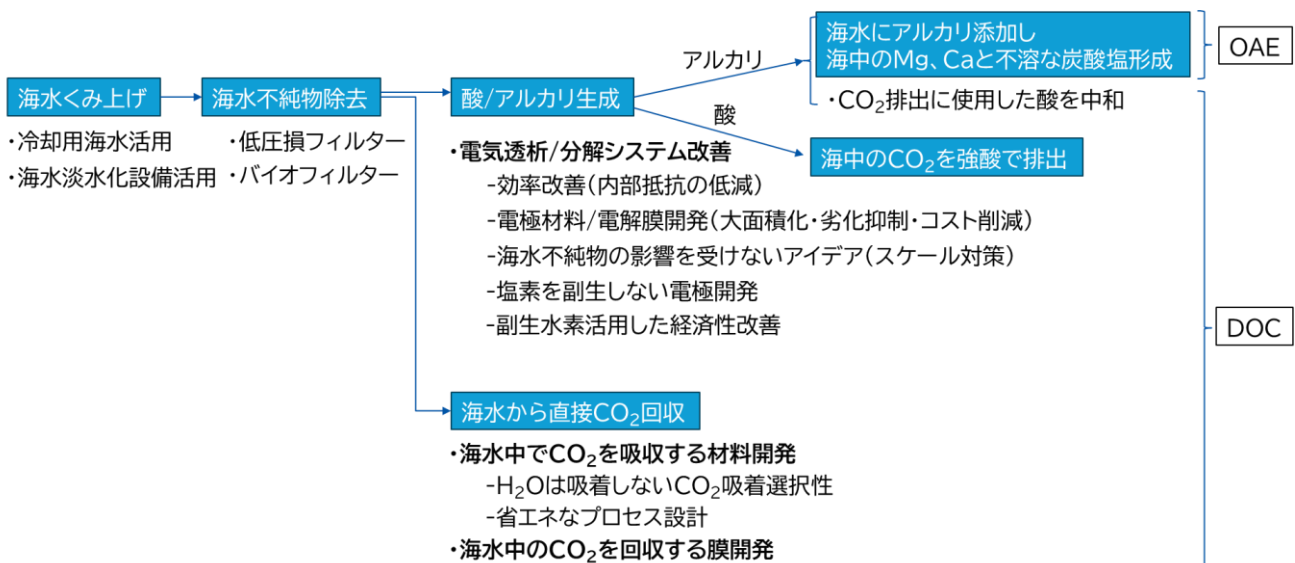


図 3-2-20 海洋 CDR の工業的技術の研究開発要素(例)

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

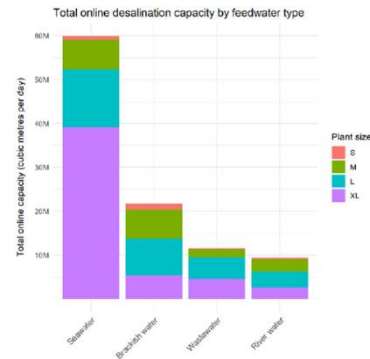
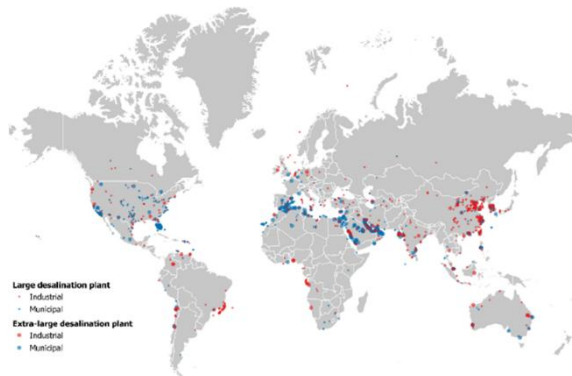
海洋 CDR の工業的技術の低コスト化を進める上での道筋として以下の観点を検討した推進が有効と考えられる。

- (i) 日本は海洋に囲まれ、既存産業においても海水利用が様々に推進されており、海水を利用している既存産業(火力発電所、原子力発電所、石油精製プラント、化学プラント、製鉄所、海水淡水化施設等)に導入することで、揚水コスト、海水ろ過フィルターコストを削減でき、初期導入コストの低減につながり、この用途での大気中の CO₂ 回収コストを DAC より低減し、早期の市場導入拡大を図る。
- (ii) 化石燃料由来 CO₂ を回収・利用しているプラントの CO₂ 回収装置の後処理設備(CO₂ 精製設備、CO₂ 利用設備)を活用し、後処理コスト及び CO₂ 利用コストの削減を図る。将来、プラントの化石燃料使用量が減少し、CO₂ 精製設備・利用設備の処理容量に余剰が生じた場合には、DOC による CO₂ 回収量を増加させることで、CO₂ 関連処理設備を有効かつ長期間にわたり活用することができる。この考えは DAC にも適用できるが、(i)との組合せが可能であること、また回収 CO₂ 量に対する必要敷地面積が小さいことから、DOC が有利となる可能性がある。
- (iii) カーボンニュートラルな電力や水素などの非化石エネルギー・資源への転換が難しい分野に対しては、既存インフラを活用できる利点を活かし、水素と CO₂ から合成した炭化水素を利用することが有効である。(i)、(ii)で示したような既存プラントの燃料を、プラントから回収した CO₂ とカーボンニュートラルな水素から製造した合成燃料として供給し、炭素循環を確立することの経済性が、既存設備活用の観点や原料 CO₂ ならびに製造した合成燃料の輸送コスト低減の観点から期待できれば、プラント運営者自身を初期需要者として社会実装を推進することが可能である。
- (iv) DOC 向けに開発した海水中のイオンを選択的に透過させる膜技術、電解による分離を低エネルギーで行う技術、低コストな酸/アルカリ製造技術を将来的な新規市場に活用し、関連産業への波及効果を図ることも付加価値として研究開発を推進し、社会実装による要素技術へのフィードバックも期待できる。

上記のとおり、例えば、海水を利用している既存産業に DOC 技術を導入することで、揚水コストや海水フィルターコストの削減により、初期導入コストを低減できる可能性がある。既存の海水淡水化プラントへの DOC 技術の統合を例に、その CO₂ 除去ポテンシャルを試算する。

世界には 16,000 を超える淡水化プラントがあり、その総稼働能力は約 9,537 万 m³/日以上ある。既存能力の約 70%は中東(サウジアラビア、アラブ首長国連邦など)及び北アフリカに集中している(図 3-2-21)。また、地中海沿岸諸国やアラビア湾周辺の国々にある大規模淡水化プラントは、主に自治体や公共事業体を通じて家庭用や商業用の水供給を担い、中国、チリ、ブラジルにあるプラントの多くは産業用の水需要を担っている。

淡水化施設と統合した DOC 技術を展開する CarbonBlue²⁶は、15m³/hr の水を処理し、約 40t/年の CO₂ を除去している。仮に同様の能力が世界の全淡水化プラントに導入された場合、約 0.01GtCO₂/年の除去ポテンシャルとなる(図 3-2-22)。これはあくまで理論上の試算値だが、将来の更なる技術進展も踏まえると、既存の淡水化プラントと DOC の統合によって、初期的スケールの CO₂ 除去ポテンシャルが期待される。



Source: GWI DesalData (2021).

Note: S = under 1000 m³/day; M = 1000 to 10,000 m³/day; L = 10,000 to 100,000 m³/day; XL = over 100,000 m³/day. Source: GWI DesalData (2021).

図 3-2-21 大規模(1万~10万 m³/日) 及び
超大規模(10万 m³/日超)の都市用・産業用の
淡水化プラント一覧

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

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

²⁶ <https://carbonblue.cc/> (2026年2月閲覧)

図 3-2-23 にネガティブエミッション技術/海洋 CDR の工業的技術の DOC に関するロードマップ(イメージ)を示す。2030 年までに国内における DOC 設備導入及び回収 CO₂ 販売等の事業プランに応じた LOI(Letter of Intent:意向表明書/基本合意書)等に至る水準を目指し、その後大規模化や CCS 及び CCU の活用を本格化する道筋が期待される。

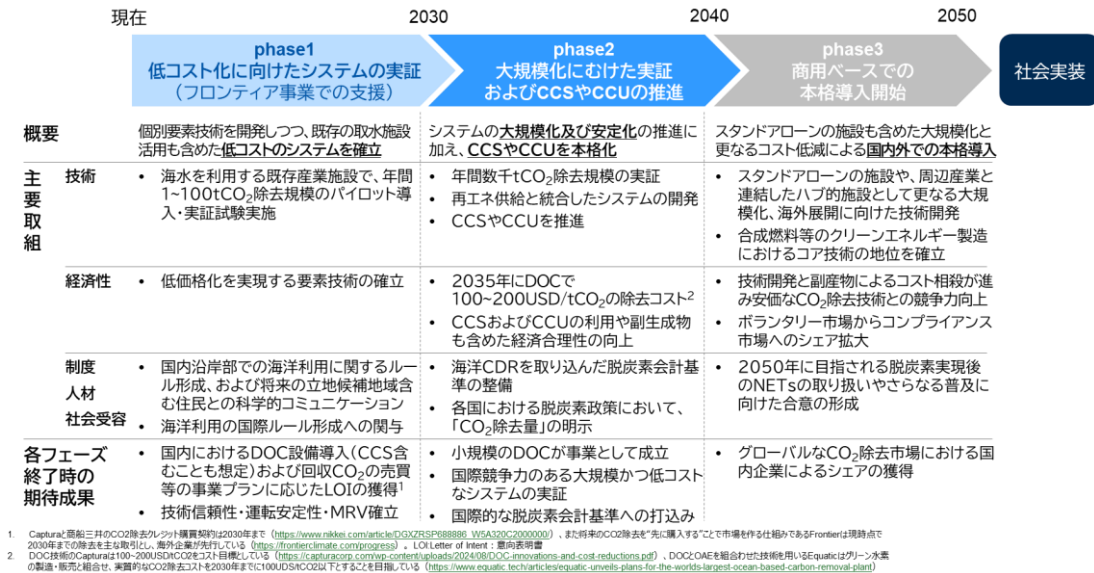


図 3-2-23 ネガティブエミッション技術/海洋 CDR の工業的技術の DOC に関するロードマップ(イメージ)

TSC Foresight

Innovation Outlook Version 1.0 増補版

環境・化学分野

2026年6月1日発行

作成メンバー

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

■センター長	岸本 喜久雄	
■事務局長	田辺 雄史	
■環境・化学ユニット ・ユニット長	坂本 清美 中村 勉	(2025年4月まで)
・研究員	寒川 泰紀 木村 貴	(2026年3月まで)
・フェロー	田口 雅俊 室井 高城	(2026年3月まで)
	藤田 照典 土肥 英幸	
	尾形 敦	
・戦略構築アドバイザー	中村 勉	

●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。