

2.5.2 元素戦略・希少元素代替技術

(1) 研究開発領域の定義

物質・材料の特性・機能を決める特定元素の役割を理解し有効活用することで、物質・材料の特性・機能の発現機構を明らかにし、希少元素や有害元素に依存することなく高い機能を持った物質・材料を開発する研究開発領域である。近年、重希土類元素であるジスプロシウムを一切使わない永久磁石をハイブリッド車用駆動モータに実用化するなど、社会実装への動きも活発化している。

(2) キーワード

元素戦略、Critical Materials、Critical Raw Materials、Critical Minerals、希少元素、希土類元素、循環、減量、代替、材料設計、構造制御

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

ハイブリッド自動車やスマートフォンなど、私たちの日常生活を支えている製品の中には希少元素が使用されているものが数多く存在する。希少元素とは地球上で採掘可能な量が少なくないうえに産出国が偏在している元素群（わが国ではレアメタルとも呼ばれる）である。そのため希少元素を用いる製品開発を行う各国においては、世界的な供給量不安定化や価格高騰を含めた資源問題が潜在的に存在する。特に工業製品を輸出の主軸としつつも天然資源に乏しいわが国にとっては死活的な問題になりかねない。2010年に起こったレアアースショック以降、資源問題は一過性のものでなく構造的な問題として国際的に協調して対処すべきとの風潮が一気に強まり、日米欧を中心に資源問題に対して政策的な取り組みが開始され、日本発の「元素戦略」が持続可能社会実現に向けて取り組むべき重要課題として世界中で認知されることとなった。

[研究開発の動向]

【日本】

わが国においては、資源は供給されるものという従来の考え方から脱して、資源をデバイス・部材の中でいかに効率よく使うか、いかに新たな機能を引き出して材料の選択肢を広げるかという視点に立ち、資源の持続可能な利用や高付加価値製品の安定生産をめざすための研究コンセプト「元素戦略」を、2004年に諸外国に先駆けて提唱した。

「元素戦略」は以下の5つの柱によって構成される物質材料科学の基盤を構築する戦略である。

- ① 代替：特定の元素に依存することなく、豊富で無害な元素により目的機能を代替する
- ② 減量：希少元素・有害元素の使用量を極限まで低減する
- ③ 循環：希少元素の循環利用や再生を推進する
- ④ 規制：有害物質の使用量規制や基準を乗り越える高い技術を戦略的に開発する
- ⑤ 新機能：元素の秘められた力を引き出すことで新たな機能を生み出す

一般に「元素戦略=希少元素や有害元素を無害かつありふれた元素に置き換えること」と解釈されがちであるが、それは上記①にすぎない。本質は「物質・材料における各元素の役割を理解し、機能発現メカニズムを解明すること」であることに注意が必要である。また、この概念の特徴としては、化学、物理、金属、セ

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
物質と機能の設計・制御

ラミックスや磁石など、多彩な学界が共通して取り組めるという点にある。

元素戦略・希少元素代替材料技術に関する研究開発は、2007年に文部科学省による「元素戦略プロジェクト<産学官連携型>」、および密な連携を行う経済産業省による「希少金属代替材料開発プロジェクト」に始まる。前者は元素を特定せず、元素の特性を深く理解することで物質・材料科学のパラダイムシフトを実現し、新しい物質・材料の創製につなげる基礎研究を長期的視点で実施することを目標とした。一方、後者は産業上重要となるいくつかの希少元素を特定し、5年を目処としてそれらの使用量に対する削減目標値（30～50%）を達成するための短期的テーマを推進した。後の府省連携施策の原型となる極めて先進的な国家プロジェクトであり、内閣府を積極的に巻き込みつつ、共同での公募や、役割分担に沿った審査の相互乗り入れを行うなど、従来になかった協力体制で取り組まれた。

その後、2010年にはJST戦略的創造研究推進事業CREST「元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出」（研究総括：玉尾皓平・理化学研究所顧問（当時）、2010～2017年度）およびさががけ「新物質科学と元素戦略」（研究総括：細野秀雄・東京工業大学教授、2010～2016年度）が発足した。さらに2012年から10年間の事業として開始された文部科学省「元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>」においては、磁性材料、電子材料、触媒・電池材料、構造材料を各研究開発テーマとする4つの研究拠点が形成され、「材料創製」「解析評価」「理論」が三位一体となった研究体制が構築されている。

一方、経済産業省・NEDOは比較的短期間での実用化をめざす「希少金属代替材料開発プロジェクト」を進めてきた。2008～2013年度は委託事業として、元素ごとのリスク評価に加えて、リスクの増大が懸念される透明電極向けインジウム（In）、希土類磁石向けジスプロシウム（Dy）、超硬工具向けタングステン（W）、排ガス浄化向け白金族（PGM）・セリウム（Ce）、精密研磨向けセリウム（Ce）、蛍光体向けテルビウム（Tb）・ユーロピウム（Eu）等を対象元素とした代替材料の開発や使用量低減技術の開発を行った。2012～2015年度には産業界での希少金属の使用量低減を促進するため、民間企業から広くテーマを公募し、早期の活用が期待される研究開発として、鉛フリーはんだ（Bi）、樹脂難燃剤（Sb）、ランガサイト型圧電素子（La, Ga, Ta）、レアアースレスモータ（Nd, Dy）、レアアースレス蛍光体（Eu, Ce, Y）、排ガス浄化触媒（Pt, Pd, Rh）、超硬工具（W）、太陽電池波長変換膜（Y）等に対して助成を行った。これらの研究開発を推進するとともに、関連する研究開発動向の調査、事前検討、中長期戦略立案に関する事業など幅広い取り組みを行っている。さらに、2012年からは経済産業省による未来開拓研究プロジェクトのなかで「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発」を開始し、その後NEDOが引き継ぎ形で2014～2021年度の8年間という長期プロジェクトが推進されている。

他にも、JSPS科研費の新学術領域研究、内閣府のSIP「革新的構造材料」（2014～2018年度）およびSIP第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（2018～2022年度）、文部科学省の「東北発素材技術先導プロジェクト」（2012～2016年度）、JSTの「先端的低炭素化技術開発（ALCA）」、「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」、「革新的次世代高性能磁石創製の指針構築」、日-EU共同研究「希少元素代替材料」などの多くの関連プロジェクトも推進されてきた。また、レアメタルにかかる安定したマテリアルフローを実現したサプライチェーンの確立をめざした東北大学レアメタル・グリーンイノベーション研究開発センター（2014年1月設立）などの研究開発拠点も整備されつつある。

【米国】

米国では日本に追随する形で、2010年にエネルギー省（Department of Energy：DOE）が「Critical Materials Strategy」を発表し、Li、Mn、Co、Ni、Ga、Y、In、Te、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Tb、

Dyをキーマテリアルとして、電気自動車、太陽光発電、風力タービンなどのエネルギー産業において米国がリーダーシップをとるためにも希少元素の確実な供給と、需要を減らす代替技術、循環技術を確認すべき対象としたうえで、研究プロジェクトの組織化や国際協力の提案を行っている。また、2012年からInnovation Hub for Critical Materials Researchという拠点形成も進め、Ames研究所にCritical Materials Institute (CMI) が設立された。CMIでは5年間で約1億2000万ドルの資金が導入され、2018年7月に5年間の延長が認められている。

さらに2017年12月、トランプ政権から大統領令「A Federal Strategy To Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals (安全かつ信頼できる希少鉱物の確保のための連邦政府戦略)」が発令された。ここでは、内務省に対して60日以内の希少鉱物リストの作成、さらには商務省、国防総省、農務省、財務省、エネルギー省などに対して、希少鉱物リスト公開から180日以内に対応方針に関する報告書を提出するよう求めている。内務省は2018年2月に「希少鉱物リスト草案」を公表し、パブリックコメントを実施したうえで、同年5月に「希少鉱物の最終リスト」として希少鉱物35種を特定している。2019年6月には、商務省が政府機関全体の行動計画を含む希少鉱物の供給確保戦略を発表し、リサイクルや代替技術の開発、サプライチェーン強化など希少鉱物の対外依存度低減に向けた方策を打ち出している。

加えて、2020年9月には再びトランプ政権から大統領令「Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain from Reliance on Critical Minerals from Foreign Adversaries (希少鉱物を外国の敵対勢力に依存することによる、国内サプライチェーンへの脅威への対処)」を発令している。内務長官に対して「関係機関長と協議のうえ、希少鉱物に関する米国の敵対国への依存状況の調査および必要な行政措置を提言する報告書を提出すること」、および内務長官、エネルギー長官はじめ関係機関の長に対し、「ガイダンスの発行、規制の改正、許認可の迅速化など希少鉱物の米国内サプライチェーンの保護および拡大のための措置をとること」を指示している。

【欧州】

欧州では2008年に公表された「Raw Materials Initiative」の下、重要な元素群を「Critical Raw Materials (CRMs)」と命名し、2011年に14種、2014年に20種、2017年に27種、2020年に30種、と3年ごとにCRMsリストを更新している。2014～2020年にかけての研究開発枠組みプログラム (Framework Program: FP) であるHorizon 2020において、希少鉱物関連プロジェクトに総額10億ユーロを投じて、専門家ネットワーク形成プログラムや、リサイクル、マイニング等に関するプロジェクトを実施している。次期FPであるHorizon Europe (2021～2027年) では、全体予算案955億ユーロのうち、第2の柱 (社会的課題の解決) の中の6つの社会的課題群 (クラスター) の1つ「デジタル・産業・宇宙」(総額155億ユーロ) の一部にRaw Materialsを位置づけており、欧州圏の循環型経済確立に向けた取り組みが活発化していくものと思われる。

【中国】

中国は2020年4月にレアアースを使った新材料や応用技術開発の拠点となる「国家レアアース機能材料イノベーションセンター」の設立許可を発表した。中国産の「戦略資源」であるレアアースを使って磁石、発光体、合金など高機能材料を開発し、自国のハイテク産業を強化しようとするもので、脱輸出依存モデルをめざす取り組みの一環である。

【その他】

鉱物資源国として、オーストラリアが2019年に「オーストラリア希少鉱物戦略 (Australia's Critical Minerals Strategy)」、カナダも2019年に「カナダ鉱物・金属計画 (The Canadian Minerals and Metals Plan)」を発表しており、それぞれ自国の鉱工業を保護・育成しつつ、戦略的に資源を活用したイノベーションを推進している。

国際協調という観点からは、2011年から毎年「Trilateral EU-US-Japan Conference on Critical Materials」という施策上重要な物質に関する日米欧三極会議が行われている。ここでは、レアアース等の希少元素主要消費国である三極の技術者・研究者が、代替・削減技術および鉱石や製品からの効率的な精製分離技術等について密接な情報交換を行うことで、当該分野の研究促進を図るとともに、希少元素消費国間の連携状況を国際的に発信することを目的としている。

(4) 注目動向**【新展開・技術トピックス】**

最近特に米国と欧州において、希少資源に関するデータソースの拡充、安定供給ルート確保に向けた取り組みが活発化しようとしている。

前述の通り、米国においてはトランプ大統領による2つの大統領令に象徴される。1つは米国の経済と安全保障に対して脆弱性の要因となりうる希少鉱物の輸入依存の低減と安定供給ルートの確保を目的とした大統領令「A Federal Strategy To Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals (安全かつ信頼できる希少鉱物の確保のための連邦政府戦略)」である(2017年12月に発令)。もう1つは、希少鉱物を外国の敵対勢力に依存している状況の解消を目的とした「Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain from Reliance on Critical Minerals from Foreign Adversaries (希少鉱物を外国の敵対勢力に依存することによる、国内サプライチェーンへの脅威への対処)」(2020年9月に発令)である。特に2つ目の大統領令では、今後取りうる行政処置として輸入制限を明示しており、今後の米国の動きを注視しておく必要がある。

また、欧州においては、2018年1月に「Report on Critical Raw Materials and Circular Economy (希少原材料と循環型経済に関する報告書)」が公開されている。ここでは、循環型経済の一環として希少資源確保に向けたデータソースの提供、ベストプラクティスの促進、実行可能なアクションプランを特定することを目的として、欧州における関連政策やプロジェクト、CRMsの需要動向について記載している。2018～2022年の間にCRMsに関する活動(CRMsの入手改善、欧州圏内のCRMsの回収率向上、CRMsの輸入依存の低減、欧州圏内での専門家コミュニティの強化など)に2億5000万ユーロ以上の投資が予定されている。さらに、2020年9月に「Action Plan on Critical Raw Materials (希少鉱物に対する行動計画)」を発表した。ここでは、CRMsが幅広い産業において必要不可欠であり、その調達にEUが推進する欧州グリーンディールにおいても戦略上の重要性を持つこと、新型コロナウイルス感染拡大による世界的なサプライチェーンの脆弱性の露呈に対応するため、CRMsのより安定的かつ持続可能な供給のための基盤整備を含む行動計画を示した。

一方、わが国においては、対象を絞りそこに技術と知識を集約して解決する集中型の研究開発により、元素戦略の5つの柱の中の「代替」「減量」に関する取り組み、および、ありふれた元素(earth-abundant elements)で従来を凌駕するあるいは新規の機能発現をめざす創成型の研究開発が主に行われている。特

に、特定元素がなぜその機能を発揮しているのかについて科学的に解明し、その機能発現原理をナノスケールの物質構造（原子配列、格子欠陥、結晶粒、磁区構造、分子構造、表面・界面構造など）からデザインすることによって、希少元素・有害元素の代替に留まらない、「新機能」に関する取り組みを推進することが重視されている。前述のCRESTにおいては、物質の特性・機能を定める特定元素の役割を理解し有効活用することで、既存の延長線上にはない物質・材料の革新的な特性や機能の創出をめざした研究開発が行われた。さきがけでは、クラーク数上位の元素を駆使して、ナノ構造や界面・表面、欠陥などの制御と活用による革新的な機能物質や材料の創成と計算科学や先端計測に立脚した新しい物質・材料科学の確立をめざした研究開発が行われた。元素間融合による新規ナノ合金の開発、アルケンのヒドロシリル化用鉄・コバルト触媒の開発、反強磁性スピントロニクスにつながる新たな磁性体の発見など、さらなる発展をめざして新たな研究プロジェクトに採択される多くの興味深い基礎的な成果が創出された。

国内外に共通する新しい展開として、近年の計算科学・シミュレーション技術や計測評価技術、マテリアルズ・インフォマティクス進展によって、これまでは複雑すぎて人間が扱えなかった領域の解析や予測が可能になりつつあることがあげられる。実際にマテリアルズ・インフォマティクスによって新規電池材料の発見をはじめとする新規機能性材料の予測・発見、実験装置の自動化による研究環境のDX化など、元素戦略を含む多くの材料開発の手法が大きく変わりつつある。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

2012年から10年間の事業として開始された文部科学省「元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>」における4つの研究拠点の目的を以下に示す。

- **磁性材料研究拠点 (Elements Strategy Initiative Center for Magnetic Materials : ESICMM)**

磁石の性能に与える元素の役割を基礎物理に遡って解明することにより、ハイブリッド自動車の駆動モーター等に用いられている現在の最高性能を有する希土類永久磁石と同等の性能を有する磁石を、希少元素を用いることなく作成することをめざす。

- **電子材料研究拠点 (Tokodai Institute for Element Strategy : TIES)**

エレクトロニクス産業を支える電子部材（半導体、透明電極・伝導体、誘電体等）を中心として、幅広い材料分野に有効な新しい材料科学を、基礎物理、計算科学、先端解析技術の協働により構築して、希少元素や環境負荷の高い元素を用いない代替材料の開発をめざす。

- **触媒・電池材料研究拠点 (Elements Strategy Initiative for Catalysts and Batteries : ESICB)**

今日の環境産業やエネルギー産業に欠かせない触媒および二次電池の部材について、固体及び気体/液体との間での元素の複雑系反応を基礎科学と実験科学の緊密な連携を通じて解明することにより、触媒及び二次電池に対する元素の機能を予測し、貴金属や希少元素を用いない代替材料の開発をめざす。

- **構造材料研究拠点 (Elements Strategy Initiative for Structural Materials : ESISM)**

材料の「強度」(変形への抵抗)と「延性」(破壊への抵抗)といった相反する性質を基礎科学の段階から解明することで、社会基盤を支え、安全・安心な社会に不可欠な構造材料において、現在大量に使用されている希少元素を抜本的に削減した代替材料の開発をめざす。

本プロジェクトでは、2015、2018年度にそれぞれ中間評価を行い、2021年度に事後評価を行うこととしている。2018年度の第2回目の中間評価においては、「事業開始時に設定した目標達成に向け、事業開始後

約6年間の取り組みとして概ね良好に進捗している」と評価されつつも、「出口戦略や性能目標も具体化されているが、その一方で、「磁石材料拠点」や「触媒・電池材料拠点」では、ターゲットを限定しすぎたことにより、元素戦略の展開に制約が出ていないか留意する必要がある」とされている。また「今後は成果の取り纏めの時期に入ることから、知財戦略の策定や、産業応用の可能性がある成果については積極的に特許化を進めること等の対応が必要である」とされ、残りの研究期間の間に基礎研究を早期に社会実装へつなげる仕組みを構築し、国が主導する研究開発事業のモデルケースとなることを期待されている。さらに、2019年12月に開催された国際評価会議 Element Strategy Initiative Advisory Council (ESIAC) において、国際委員から、人材の多様性の確保、若手研究者育成のための拠点横断型取り組みの必要性、スタートアップ企業化に向けた活動の推奨などについてコメントがあった。

経済産業省からNEDOに移管した「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発」(2014～2021年度)において、レアアースに依存しない革新的高性能磁石の開発、モータを駆動するためのエネルギーの損失を少なくする高性能軟磁性材料の開発ならびに新規磁石、新規軟磁性材料の性能を最大限に生かして更なる高効率を達成できるモータ設計の開発を行っている。次世代自動車や家電、産業機械の心臓部であるモータの省エネ化を図り、競争力を確保し、わが国産業全体の活性化に寄与することが目的である。

これら一連の取り組みの顕著な成果として、2016年7月に大同特殊製鋼と本田技術工業から、重希土類元素を使わないネオジム磁石の開発に成功したことが共同発表され、2016年秋発売のハイブリッド自動車に採用された。さらに、同年11月には東芝と東芝マテリアルから、重希土類フリー高鉄濃度サマリウムコバルト磁石の開発に成功し、サンプル出荷を開始したことが共同発表された。また、2018年2月には、トヨタ自動車がネオジムのランタンやセリウムに置き換えても磁力・耐熱性の悪化を制御できる新技術を生み出し、これによりネオジム使用量を最大50%削減しても従来のネオジム磁石と同等レベルの耐熱性能を持つ磁石「省ネオジム耐熱磁石」の開発に成功したことを発表した。

米国DOEの傘下、Critical Materials Instituteは2020年6月、産業化に焦点を当て、希少鉱物に対する国内サプライチェーン確立をめざし、総額400万ドルの「CMI Open Innovation Project」を公表した。

(5) 科学技術的課題

材料開発が原子レベルで行われるようになり、材料の分析手段も原子レベルで行われる必要が出てきており、放射光施設や高性能な電子顕微鏡を用いることで材料の静的な構造などは詳しく解析されるようになっている。しかし、例えば触媒材料開発に注目すると、実際の反応場で材料(触媒)がどのように振る舞っているかの多くは未だ解明されておらず、例えば、鉄触媒研究においては鉄触媒活性種が不安定かつ常磁性状態が安定になりやすいため、溶液中での反応機構の解析手法、それにもとづく合理的な触媒設計や触媒反応設計が確立していない。鉄触媒反応に限らず、さまざまなメカニズムの解明は材料開発にとって不可欠であり、新たな指針を与えるものである。そのためにはその場観察(オペランド)実験手法の確立が必要となる。なかでも高分解能電子顕微鏡のオペランド観察は、反応場における原子の動きを実際に観測することができ、非常に強力な手段と考えられる。日本では最先端の電子顕微鏡があまり普及していないが、欧州では国立研究所(Ernst Ruska-Centre)と電子顕微鏡メーカー(FEI)などが共同開発を行い、実際の反応条件と同等の環境で観察を行える環境制御型電子顕微鏡の開発がさかんに行われており、材料開発を促進している。

(6) その他の課題

元素機能の発現機構は、物理、化学、金属などの既存の学問領域が単独で解明できるものではないため、

異分野の力を結集することが重要である。異分野連携・融合によってさまざまな学問領域の視点から機能発現機構を解明することが材料挙動の原理解明に直結し、材料の革新につながる可能性が高いと考えられる。しかし、この異分野連携・融合が自然発生的に生まれることは一般的には期待できず、政策的な誘導が必要である。JST-CRESTにおいては、各研究チームに理論グループの参画を必須とする等、トップダウンによって異分野連携を促進したが、そのCRESTも2017年度末で終了している。元素戦略プロジェクトやNEDOプロジェクトを補完、またはサポートする新たな方策が必要であると考えられる。

1つの方向性として、これまで主に希少元素や有害元素を対象として元素単体の役割を解明し代替技術、使用量削減技術開発を行ってきたが、今後は複数元素の組み合わせによる機能創出をめざした新たな元素戦略を推進することが期待される。近年、社会ニーズの高度化に伴い、材料が多元素化・複合化もしくは準安定状態の利活用へと向かっている潮流とも合致する。さらに、マイクロプラスチックによる海洋汚染などの社会的問題がクローズアップされるなか、材料循環の意識を高めることも重要である。つまり、材料に求められる機能が「使用時」の機能だけに留まらず、「使用後」の分解・分離といった循環機能にまで拡大しているため、材料のライフサイクル全体を最適化する材料科学の構築が求められる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	文部科学省、経済産業省、JST、NEDOなどにおける各プロジェクトの推進により基礎学理の構築および研究コミュニティが形成されている。政府が策定予定の「マテリアル戦略」において、レアメタルの安定供給に関する検討が始まっている。
	応用研究・開発	◎	↗	上記のプロジェクトで開発された成果をもとに新物質・新材料の実用化が進みつつある。特にジスプロシウムやネオジムなどの希土類元素の使用量を大幅に削減した永久磁石の開発に成功し、一部は既に市販車に導入されている。
米国	基礎研究	○	↗	Critical Materials Instituteの第2フェーズの開始、希少鉱物に関する2つの大統領令が発令されるなど、今後研究開発が活発化される可能性がある。
	応用研究・開発	○	↗	上述の大統領令により、各省庁が希少鉱物の安定供給ルート確保、敵対国に対する依存度解消に向けた対応策を討議中であり、今後産業応用へ向けた取り組みが活発化する可能性がある。
欧州	基礎研究	○	↗	循環型経済（Circular Economy）の観点で、欧州圏内の希少鉱物の埋蔵量、偏在性の把握に関する活動が活発化している。
	応用研究・開発	○	↗	希少鉱物の安定供給に対する意識が上がってきている。Horizon 2020に引き続き、Horizon Europeにおいても産業化をめざした研究開発プロジェクトが推進される模様。「希少鉱物に対する行動計画」が発表されるなど、今後産業化へ向けた取り組みが活発化する可能性がある。
中国	基礎研究	○	→	貴金属代替（削減）材料開発に関する論文が急増している。積極的に先端技術を導入して基礎研究が進められている。
	応用研究・開発	○	↗	レアアースを使った新材料や応用技術開発を目的とした「国家レアアース機能材料イノベーションセンター」の設立許可が出されるなど、レアアースを使って自国のハイテク産業の強化をめざす動きをみせている。今後、応用研究・開発が活発化する可能性がある。資源保有国の強みを有し、ネオジム磁石は他国の追随を許さない生産量を誇っている。

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
物質と機能の設計・制御

韓国	基礎研究	△	→	米国のMaterials Genome Initiativeや日本の元素戦略にならった成果が出ているものの、独自性ある成果はみられない。
	応用研究・開発	×	→	特に目立った動きはみられない。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・分離技術（ナノテク・材料分野 2.1.5）
- ・マテリアルズ・インフォマティクス（ナノテク・材料分野 2.5.3）
- ・複雑系材料の設計・プロセス（ナノテク・材料分野 2.5.7）
- ・ナノ・オペランド計測技術（ナノテク・材料分野 2.6.3）
- ・物質・材料シミュレーション（ナノテク・材料分野 2.6.4）

参考・引用文献

- 1) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「戦略イニシアティブ『元素戦略』」(CRDS-FY2007-SP-04) (2007年10月), <http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2007/SP/CRDS-FY2007-SP-04.pdf>(2021年2月17日アクセス)
- 2) Eiichi Nakamura and Kentaro Sato, "Managing the Scarcity of Chemical Elements", *Nature Materials* 10, no. 3 (2011) : 158-161. doi : 10.1038/nmat2969
- 3) 中山智弘『元素戦略：科学と産業に革命を起こす現代の錬金術』(ダイヤモンド社, 2013) .
- 4) 『日本発、科学で元素資源問題に挑む“元素戦略” 革新的な物質・材料で持続可能な社会を構築する』(2020年12月), https://elements-strategy.jp/images/esi_2020/pdf/elements-strategy.pdf (2021年2月17日アクセス)
- 5) U.S. Department of Energy, *Critical Materials Strategy* (December 2011), http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf(2021年2月17日アクセス)
- 6) Critical Materials Institute, <https://www.ameslab.gov/cmi> (2021年2月17日アクセス)
- 7) The White House, *Executive Order on Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain from Reliance on Critical Minerals from Foreign Adversaries* (September 30, 2020), <https://www.federalregister.gov/documents/2020/10/05/2020-22064/addressing-the-threat-to-the-domestic-supply-chain-from-reliance-on-critical-minerals-from-foreign>(2021

年2月17日アクセス)

- 8) The White House, *Presidential Executive Order on a Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals* (December 20, 2017),
<https://www.federalregister.gov/documents/2017/12/26/2017-27899/a-federal-strategy-to-ensure-secure-and-reliable-supplies-of-critical-minerals>(2021年2月17日アクセス)
- 9) European Commission, *Report : critical raw materials and the circular economy* (January 16, 2018) ,
https://ec.europa.eu/commission/publications/report-critical-raw-materials-and-circular-economy_en(2020年2月17日アクセス)
- 10) European Commission, *Commission announces actions to make Europe's raw materials supply more secure and sustainable*(September 3, 2020),
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1542(2021年2月17日アクセス)