

2.5.2 次世代元素戦略

（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、有害元素や海外依存度の高い希少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。最近では、単一性能の向上だけではなく複数機能の同時実現のために、複数の元素を用いることによる材料の多元素化やハイエントロピー化、準安定相などの多種多様な安定相（準安定相も含む広義の意味）の設計技術や、材料の使用後の劣化・分解性能まで含めた元素間の結合分解制御技術の重要性が高まっている。

（2）キーワード

元素戦略、希少元素、Critical Materials、Critical Minerals、代替、減量、循環、新機能、多元素化、ハイエントロピー化、準安定相、ハイスループット実験、コンビナトリアル、データ科学、オペランド計測、マテリアルズ・インフォマティクス、プロセス・インフォマティクス、結合分解制御、循環型材料、サーキュラーエコノミー

（3）研究開発領域の概要

【本領域の意義】

日本発の研究開発戦略である「元素戦略」は、2010年の中国/レアアースショックを契機として世界中から注目を集めることになったが、産業的観点からの重要性のみならず、元素の新たな機能や隠れた効果を探索して新材料設計に活かそうとする、科学的洞察をベースとして産学連携・異分野融合を促進する取り組みであった。こうした日本の施策を皮切りに、欧・米・中でも類似の戦略・施策が次々に推進されている。米国では、2010年にエネルギー省が「Critical Materials Strategy」を策定、電池や磁石などエネルギー産業上重要となる希少元素の確保と代替物質開発が進められている。その後、トランプ政権・バイデン政権下における希少元素のサプライチェーン脆弱性への対処を謳った大統領令に伴う研究開発プログラムの開始、直近では経済安全保障政策との関係もあいまって、激変する国際環境のなかその位置づけ・重要性が再定義されている。欧州では2011年以降、重要希少元素（Critical Raw Materials）リストを定期更新し、フレームワークプログラムHorizon 2020、Horizon Europeを通じて希少元素の持続可能な供給の促進、資源循環効率の向上などを掲げたプロジェクトを多数推進している。

わが国においては、世界に先駆けて希少元素や有害元素を対象として元素機能を科学的に解明し、代替技術や使用量削減技術の研究開発を行ってきた。今後は、これらの蓄積した成果をもとに発展的展開を図り、例えば、四元系や五元系など多元素化・複合化を伴うより複雑な組合せによる新機能創出や、データサイエンスを活用することによるそれら新材料の合成プロセスの予測・設計などの諸課題に、産業界とともにチャレンジすることが課題として挙がる。マイクロプラスチックによる海洋汚染などがクローズアップされるなか、材料への要請は使用時の高機能に留まらず、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。そのため、物質・材料のライフサイクル全体を最適化する新たな材料科学の体系化が求められる。学界が将来を見据えて豊かな科学基盤の土壌を保ち、研究力向上の礎となることが求められる。

【研究開発の動向】

【日本】

わが国においては、必要な資源は入手できるという旧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研究コンセプトである。

- 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。また、この研究コンセプトの特徴としては、化学、物理、金属、セラミックスや磁石など、多彩な学術界が共通して取り組めるという点にある。

元素戦略や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「元素戦略プロジェクト〈産学官連携型〉」および経済産業省「希少金属代替材料開発プロジェクト」に始まる。これらは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年には文部科学省が設定する戦略目標「レアメタルフリー材料の実用化及び超高保磁力・超高靱性等の新規目的機能を目指した原子配列制御等のナノスケール物質構造制御技術による物質・材料の革新的機能の創出」の下に、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、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、2010～2016年度）が発足し、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、多くの興味深い基礎的な成果が創出された。2012年からは10年間の事業として文部科学省「元素戦略プロジェクト〈研究拠点形成型〉」（2012～2021年度）が開始され、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た。事業終了後の2022年に実施された事後評価では、「いずれの拠点の事業目標も元素戦略のコンセプトに沿っており、各目標は、拠点ごとに達成度の高低はあるが、全体としては達成された。」と評価されつつも、各拠点内の知財戦略をより明確にすべきだった点や、元素戦略コンセプト定着に向けた今後のサポート体制への懸念点が示された。特に、本プロジェクトで蓄積された材料データを2022年度開始のデータ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクトへ引継ぎ、さらに発展させる必要があるとの言及がなされた。

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」の他、2012年からは「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2021年度まで推進された。また、経済産業省は2020年3月に、エネルギーレジリエンスの向上に向けた資源の確保に加えて、“アジア大”の視点、気候変動問題を一つとして捉える政策指針となる「新国際資源戦略」を発表した。この中で「レアメタル等の金属鉱物のセキュリティ強化」のための対応方針として、1) 鉱種ごとの戦略的な資源確保策の策定、2) 供給源多角化の促進、3) 備蓄制度の見直し等によるセキュリティ強化、4) サプライチェーン強化に向けた国際協力の推進、5) 産業基盤等の強化が挙げられている。

他にも、JSPS 科研費の新学術領域研究や内閣府SIP、文部科学省・JSTにおいて多くの関連プロジェクトが推進されてきた。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ている。

【米国】

米国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、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、循環技術確立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た。また、2013年にAmes研究所にCritical Materials Institute(CMI)が設立され、5年間で約1億2000万ドルの資金が導入された。フェーズⅠ（2013-2018）、フェーズⅡ（2018-2023）に続き、2023年からフェーズⅢ（年間3000万ドル×5年）が開始されている。

さらに、トランプ政権下の2017年12月に発令した大統領令「希少鉱物の安全かつ信頼できる供給確保のための連邦政府戦略（Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals）」に基づき、2018年2月に内務省（Department of the Interior：DOI）は米国の経済および国家安全保障上の観点から35種の希少鉱物のリストを作成した（パブリックコメントを経て、同5月に確定）。これらを踏まえ、2019年6月には商務省（Department of Commerce：DOC）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。2020年9月には大統領令「希少鉱物を敵対的な外国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（Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain from Reliance on Critical Minerals from Foreign Adversaries）」が発出された。本大統領令は米国内の希少鉱物サプライチェーンの確保と拡大に向け、輸入制限措置をはじめ資源マッピングやリサイクル、プロセス技術への資金提供など必要な行政措置を整備するよう関係省庁に指示するものである。本大統領令に基づき、DOEは新たに「国内重要鉱物・材料サプライチェーン支援戦略」を発表した。同戦略は、供給の多様化、代替品の開発、再利用とリサイクルの改善、の3つを柱としている。

DOEは2021年1月に化石エネルギー局内に鉱物持続可能性部門（Division of Minerals Sustainability）を立ち上げた。同部門は上流から下流まで、環境的、経済的、地政学的に持続可能な希少鉱物のサプライチェーンを促進することを目的とし、希少鉱物の抽出、処理、使用、処分等に関するDOEの技術開発と展開を管理するほか、エネルギー、商業、防衛等に関連した連邦政府機関間の調整や、同盟国との国際協力を任務としている。

また、バイデン政権下の2021年2月に発令した大統領令「米国のサプライチェーン（America's Supply Chain）」において、100日以内に希少鉱物および材料のサプライチェーンの脆弱性を見直すことを命じ、同年6月のサプライチェーン評価では、希少鉱物・材料について海外供給元や敵対国に過度に依存することが、国家や経済の安全保障上の脅威となっていることが明らかにされた。それに基づき、バイデン大統領は、行政や産業界のリーダー等と会談し、希少鉱物および材料の国内生産への大規模な投資を発表した。具体的には、DODの産業基盤分析・維持プログラムにおいて、MP Materials社がカリフォルニア州マウンテンパスの施設で重希土類元素を分離・加工し、現在中国が市場の87%を占めている永久磁石サプライチェーンを国内で完結させることを目指して、3,500万ドルを獲得した。MP Materials社は、2024年までにさらに7億ドルを投資し、磁石サプライチェーンにおいて350人以上の雇用を創出するとしている。また、DOEは超党派インフラ法（BIL）の資金提供を受けた1億4,000万ドル規模で、石炭灰やその他の鉱山廃棄物から希土類元素や希少鉱物を回収する実証プロジェクトを行っている。さらに、DOIは、鉱山の許可と監視に関する立法・規制の改革を主導する省庁間ワーキンググループ（IWG）を設立し、時代遅れの1872年鉱業法および規制を更新するとともに、2020年エネルギー法に従い、経済および国家安全保障に不可欠で、混乱に対して脆弱な鉱物をリストアップした連邦希少鉱物リストを更新する予定となっている。2022年10月には、上記サプライチェーン評価を踏まえた「米国電池材料イニシアティブ」が開始された。同イニシアティブは、重要鉱物・材料を含む電池サプライチェーン全体の開発を加速するために、連邦政府の投資や活動および国内外の協力を調整する取り組みである。本イニシアティブ発表に合わせ、DOEはBILを資金源として電池製造・

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
物質と機能の設計・制御

加イニシアティブ28億ドルの助成金を授与した。

【欧州】

EUでは2008年に打ち出した「原材料イニシアティブ (Raw Materials Initiative)」のもと、3年ごとに希少元素リストを作成・更新している (2011年: 14種、2014年: 20種、2017年: 27種、2020年: 30種、2023: 34種 (うち、特に重要かつリスクの高いものを戦略的重要原材料 Strategic Raw Materials に指定))。2020年版リストでは、e-モビリティへの移行に欠かせないリチウムが初めて追加された。

2020年9月に欧州委員会は「希少原材料に関する行動計画 (Action Plan on Critical Raw Materials)」として、欧州外の第三国への依存を低減し、一次・二次供給源からの供給を多様化し、資源の効率と循環を改善すると同時に、責任ある資源調達を世界的に促進するための推進方策を発表した。同行動計画に基づく政策の一環として、欧州委員会は同9月に欧州原材料アライアンス (European Raw Materials Alliance: ERMA) を発足させた。これはレアアースをはじめとする希少原材料の戦略的確保を目指す産、学、官、投資機関、労働組合、NGO、市民等のステークホルダーを巻き込んだ協働モデルで、EU域内でのレアアースの開発や循環を向上させて、EUの自立性を包括的に高めることを目指している。Horizon 2020 (2014年～2020年) では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た。Horizon Europe (2021年～2027年) では全体予算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) の一つ「デジタル・産業・宇宙」 (155億ユーロ) の一部に「原材料供給の安全を有する戦略的バリューチェーンでの産業リーダーシップと自律性向上」を位置付けており、欧州圏の循環経済確立に向けた取組がより活発化していくと予想される。実際に、2022年9月には「欧州重要原材料法 (European Critical Raw Materials Act)」を制定することが発表され、2023年3月に法案を公開、同年11月に政治合意された。先述の希少元素リストが初めて法的に位置づけられるとともに、再生可能エネルギー拡大、EV普及、デジタル化などにおいて特に重要で、世界の採掘量が限られている希少元素を「戦略的原材料 (Strategic Raw Materials)」と指定され、今後4年ごとに更新されることとなった。資源確保のため、探査、採掘、精製、リサイクルに至るまで全てを支援・規制することを目的とし、(1) 欧州域内生産能力の強化 (採掘、加工、リサイクル) と重要原材料毎のベンチマークの設定、(2) 輸入依存が継続するとの前提の下での調達先多様化、(3) 市場監視機能の整備、(4) サーキュラリティ・持続可能性の向上の4本を柱としている。

また、重要鉱物の安定供給を市場に大きく依存しているとの認識を持つ英国は、2022年に国内の採掘・研究開発能力の拡大や、国際パートナーとの協業などを軸とした「重要鉱物戦略 (The UK's Critical Minerals Strategy)」を発表した。さらに、フランスは産業の活性化の加速を目指した新たな措置およびエネルギー転換に必要な重要鉱物・金属に特化した投資基金の設立を2023年5月に発表した。

【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目指す取組の一環である。また、2021年1月には中国工業情報化省が「新興産業の発展と国防科学技術の進歩」の観点から重要であるとして、レアアース管理条例の草案を発表した。鉱山開発から精錬分離、金属精錬などの生産、利用、製品流通までのサプライチェーン全体を統制の範囲とし、国がこれらの分野での科学技術革新と人材育成を支援してレアアース新製品、新材料、新技術の研究開発と産業化を支持することが盛り込まれている (2023年8月からガリウムとゲルマニウムの輸出規制を開始)。さらに、2021年12月には、レアアースの技術開発、探査、分離製錬、精密加工、実用化、プラント、産業インキュベーター、技術コン

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
物質と機能の設計・制御

サルティング、輸出入事業に特化した国有企業「中国希土集团有限公司」を設立した。同時期（2021年12月）、工業・情報化部は「第14次5か年計画における原材料工業発展計画」の詳細を公表し、原材料工業の今後5年の全体的な発展方向と今後15年の長期目標を明確にした。加えて、「自動車排ガス浄化用高効率希土類触媒材料及び適用技術」プロジェクトが2021年11月に立ち上げられ、総投資額は9,000万元（約18億円）で、そのうち中央財政からの支出額は2,000万元（約4億円）とされている。プロジェクトには天津大学をはじめとする研究開発機関や大手企業が参画している。国内自動車用触媒産業のサプライチェーンを確保し、国内の自動車業界に安全で信頼できる安定的な技術支援を提供することを目的としている。また、2023年12月に「中国輸出禁止・制限技術目録」を改定し公表した。今回の改定は技術発展の状況や技術貿易管理のニーズの変化に応じて、法律に基づく定期的な調整であるとしつつも、レアアース関連技術に関して輸出禁止項目の要件を一部具体化・細分化したほか、輸出制限項目に「レアアースの採掘、選鉱、製錬技術」が追加された。具体的には「レアアースの抽出・分離工程技術」「希土類金属および合金材料の製造技術」「サマリウムコバルト、ネオジム鉄ボロン、セリウム磁性体の調製技術」「希土類カルシウムオキシボレートの調製技術」の4項目の技術の輸出を禁止するとしている。

【韓国】

韓国産業通商資源部は、2023年2月に重要鉱物資源のサプライチェーン安定化のための「核心鉱物確保戦略」を発表し、半導体や二次電池などの先端産業の鉱物資源調達の特定国に対する依存度を下げるとともに、国内の鉱物資源を最大限活用することで、自然災害や地政学、価格高騰などのサプライチェーンリスクの低減を目指すとしている。具体的には、2030年までにリチウム、コバルト、黒鉛など、特定国からの輸入依存度が現在80%以上の鉱物資源について、輸入依存度を50%台に引き下げ、2%台となっている重要鉱物資源のリサイクルの割合を20%台に引き上げる。

【その他】

鉱物資源国としてオーストラリアは2019年に「オーストラリア希少鉱物戦略（Australia's Critical Minerals Strategy）」、2023年に「重要鉱物戦略（Critical Minerals Strategy 2023-2030）」（4年間で5,710万豪ドル）を発表した。同じく鉱物資源国のカナダも2019年に「カナダ鉱物・金属計画（The Canadian Minerals and Metals Plan）」および2022年に「重要鉱物戦略（The Canadian Critical Minerals Strategy）」（8年間で最大総額38億カナダドル）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。特に、オーストラリア政府はレアアース鉱石の供給や加工工程における中国依存度を下げることが目的として、レアアース関連の研究事業に2200万豪ドル（2024年1月）、レアアース開発会社アラフラ・リソースズが運営するレアアース鉱山と精製所の複合施設に最大8億4000万豪ドル（同年3月）を支出することを発表している。

国際協調の観点からは、2011年～2020年にかけて毎年「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、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してきた。2021年からは豪州・カナダも参画し「Conference on Critical Materials and Minerals」という会合に名称変更された。ここでは、日米欧豪加の5か国・地域の政策当局者が参加し、重要物質（Critical Materials）に関する各国の政策や研究開発等の取組や今後の課題などについて情報交換、意見交換を行い、今後も重要物質の安定供給確保等に向けた連携体制を構築することを目的としている。また、2022年6月には、クリーンなエネルギー転換に不可欠な重要鉱物資源（ニッケル、コバルト、レアアース等）のサプライチェーンの強靱化を確保するため、米国の主導により、鉱物資源安全保障パートナーシップ（MSP）が立ち上げられた。MSPには米国、英国、フランス、ドイツ、カナダ、イタリア、EU、オーストラリ

ア、フィンランド、ノルウェー、スウェーデン、エストニア、インド、韓国、日本の15か国が参加しており、メンバー国間で情報共有を行い、環境、社会、ガバナンス（ESG）基準に準拠した戦略的な鉱山開発・精錬・加工、投資の呼び込み、鉱物資源のリサイクル・リユースの実現などを目指している。

論文・特許動向

本研究開発領域の論文動向をみると、領域全体および各国の論文数は増加している。特に中国の増加は顕著である。中国に次ぎ、欧州、米国、インドに関しても論文数の増加傾向が続いているが、欧州・米国は中国の勢いに押され論文数シェアは減少傾向である一方、インドは論文数シェアも増加傾向にある。日本は論文数、論文数シェアとも停滞傾向であり、中国の勢いに大きく離されている。また、特許ファミリー件数の各国シェアに関しては、2022年において中国、米国に次ぎ日本は3位を保っているものの、減少傾向である。（詳細は「研究開発の俯瞰報告書 論文・特許データからみる研究開発動向（2024年）」を参照）

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

後述の通り、元素戦略の5つの柱のうち、「新機能」と「循環」に関して、ここ数年で新しい動きが活発になりつつある。

・「新機能」に関する新しい潮流

さまざまな社会的課題の解決に向けて、技術を根本から変革し大幅な性能向上や高機能化などを実現できる材料への要求はますます高まってきており、もはや単純な元素構成、実現容易な安定相（結晶構造）の利用などの従来の材料探索範囲での新材料開発は困難になっている。このため、未知の可能性を秘めている複雑な組成や未利用安定相の活用など未開拓の材料群へ対象を拡げていくことが求められている。また、材料開発競争の激化から、新材料の探索から実際の材料作製に至る材料設計や作製プロセス設計も含めた開発期間の短縮も求められており、材料創製の新たな指針の構築が必要になっている。従来型の専門家の経験や勘に頼った手法だけでは短期間で探索することは不可能に近く、革新的な材料開発のためには、原子レベルで物質の結晶構造や局所構造をミクロに設計するだけでなく、多種多様な安定相を含んだ微細組織や界面などメゾスケールの構造の制御、さらにはバルク材料（素材）としてのマクロスケールにいたる、階層的な不均一構造について、それらの構造情報や特性の要因を明らかにし、材料設計・プロセス設計へとフィードバックすることが極めて重要となる。複数機能の共存や相反する機能の両立など、高い付加価値を持つ材料の研究開発を戦略的に推進していくことが求められている。

・「循環」に関する新しい潮流

従来の大量生産・大量消費・大量廃棄型社会から脱却し、循環型社会を構築すべきであるという考え方が欧州の循環型経済（サーキュラーエコノミー）をはじめ世界中で主流になり、ものづくりの在り方を大きく変えようとしている。海洋プラスチックごみ問題にみられるように、使い終わった後にどう廃棄・リサイクルするかといった問題が大きくクローズアップされている。すなわち、安定で劣化しにくい構造をめざしてきたこれまでの材料設計から、使用後に原料などへ分解できる循環型材料へのシフトへの期待が高まっている。この実現に資する「分解の科学」の確立が求められている。近年の有機化学における安定結合活性化技術、高分子化学における分解性材料の設計、材料科学における複合材料の界面制御などの進展を受け、分解の科学の体系的理解と循環型材料の開発に取り組みが活発化している。「分解」をキーワードに異分野の研究者が集うことにより、循環型社会に貢献するサイエンスの確立と分解性の精密制御という新しい付加価値をもつ材料開発の進展への期待が高まっている。

【注目すべき国内外のプロジェクト】

【日本】

・「新機能」に関する注目プロジェクト

文部科学省は、従来の元素戦略で実践してきた物質創製・計算科学・解析評価の融合に加えて、データサイエンス的手法や先端の計測技術などを積極的に取り入れることで、未踏の多元素・複合・準安定物質探索空間を効率的に開拓し、新機能性材料を創出することで、元素間の相互作用などを活用する元素科学を世界に先駆けて構築することを目的として令和3年度戦略目標「元素戦略を基軸とした未踏の多元素・複合・準安定物質探索空間の開拓」を設定した。その後、JST 戦略的創造研究推進事業に下記CREST、さががけが発足している。

- ・CREST「未踏探索空間における革新的物質の開発」(研究総括：北川宏、2021～2028年度)
- ・さががけ「物質探索空間の拡大による未来材料の創製」(研究総括：陰山洋、2021～2026年度)

それ以外には、JST 未来社会創造事業「共通基盤」本格研究「マテリアル探索空間拡張プラットフォームの構築」(研究開発代表者：長藤圭介、2021年度～)、JSPS 科研費特別推進研究「非平衡合成による多元素ナノ合金の創製」(研究代表者：北川宏、2020～2024年度)、科研費新学術領域研究「ハイエントロピー合金」(領域代表者：乾晴行、2018～2022年度)などが推進されている。

・「循環」に関する注目プロジェクト

文部科学省は、材料における結合制御法の開発や寿命を自在に制御できる材料の開発、さらには高機能を発現する材料階層構造の分解制御に関する研究を通じて、結合・分解の精密制御を達成し、安定性と分解性の自在制御を可能にするサステナブル材料の開発、および持続可能な循環型社会の実現に不可欠な「分解の科学」を分子レベルからマクロレベルまで多階層的に理解し、学問的に体系化することを目的として令和3年度戦略目標「資源循環の実現に向けた結合・分解の精密制御」を設定した。その後、JST 戦略的創造研究推進事業に下記CREST、さががけ、ERATOが発足している。

- ・CREST「分解・劣化・安定化の精密材料科学」(研究総括：高原淳、2021～2028年度)
- ・さががけ「持続可能な材料設計に向けた確実な結合とやさしい分解」(研究総括：岩田忠久、2021～2026年度)
- ・ERATO「野崎樹脂分解触媒プロジェクト」(研究総括：野崎京子、2021～2026年度)

2024年3月に令和6年度戦略目標として、応用・開発研究の土台となる複雑・混合系からのモノづくり・物質循環を実現する基礎学理を構築することを目的とした「選択の物質科学～持続可能な発展型社会に貢献する新学理の構築～」を設定した。その後、JST 戦略的創造研究推進事業において下記CREST、さががけが発足している。

- ・CREST「材料創製および循環プロセスの革新的融合基盤技術の創出とその学理構築」(研究総括：岡部朋永、2024～2031年度)
- ・さががけ「材料の創製および循環に関する基礎学理の構築と基盤技術の開発」(研究総括：北川進、2024～2029年度)

また、JST 未来社会創造事業「持続可能な社会の実現」領域の本格研究「製品のライフサイクル管理とそれを支える革新的解体技術開発による統合循環生産システムの構築」(研究開発代表者：所千晴、2019～2024年度)では、高選択的・高効率な物理的分離技術である「新規電気パルス法」を開発し、分解が容易な設計・製造プロセスの提案につなげることで、全く新しい循環生産システムの構築を目指している。さらに、NEDO「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」(2020～2024年度)では、環境負荷が少なく、かつ高効率なプラスチック資源循環システムを実現するため、複合センシング・AI等を用いた廃プラスチック高度選別技術、材料再生プロセスの高度化技術、高い資源化率を実現する石油化学原料化技術、高効率エネルギー回収・利用技術の開発を一体的に推進している。

【米国】

- ・ 2020年2月、DOEは2021年度（2020年10月開始）の予算要求において、既存の希少鉱物関係プログラムをパッケージ化した「希少鉱物イニシアティブ（Critical Minerals Initiative）」を発表した。イニシアティブ全体で1.31億ドルを計上し、DOE国立研究所主導のコンソーシアムを形成して、希土類物性の基礎的理解、使用の削減と代替材料の開発イニシアティブ分離と化学処理の向上、などに取り組む方針が掲げられている。
- ・ 2020年8月、DOEは米国でのレアアースの安定供給確保を目的とした基礎研究課題の採択を発表した。元素の使用および地質源・リサイクル源からの抽出効率の改善のほか、同等またはより優れた特性を持つ代替材料の開発に取り組むとしている。プロジェクトはDOEの5つの国立研究所のチームが主導し、DOE研究所のほか大学の研究者が参加する。5つのチームへの助成総額は3年間で2,000万ドルを見込む。
- ・ 2020年10月、DOEエイムズ研究所CMIは、米国の希少材料サプライチェーン確立に向け産業界と提携する4件の研究開発プロジェクト（合計400万ドル）を採択した。プロジェクトはそれぞれ、磁石製造に必要なレアアースの生産と精製、電池からの希少金属の分離、高濃度コバルト選鉱のための物理的・化学的分離、鉱石からのコバルト回収プロセスに取り組んでいる。
- ・ 2022年8月、DOEは「希少物質の研究・開発・実証・商業化プログラム」（総額6億7,500万ドル）の策定と実施に関する情報提供要請を発表した。本プログラムは、経済的な不利益をもたらすクリーンエネルギーへの移行を阻む、希少物質の国内サプライチェーンの脆弱性に対処するものである。希土類元素、リチウム、ニッケル、コバルトなどの希少物質は、バッテリー、電気自動車、風力タービン、ソーラーパネルなど多くのクリーンエネルギー技術による製造に不可欠なものである。希少物質の国内調達および生産を促進し、世界の製造業のリーダーとしての米国の地位を強化するものである。
- ・ 2019年11月、DOEはエネルギー効率の高いプラスチックリサイクル技術の革新をめざす包括的取組「プラスチック・イノベーション・チャレンジ」の開始を発表した。また2020年2月にはDOEと米国化学工業協会（ACC）でプラスチックリサイクル技術開発の協力覚書を締結した。これらにおいて、材料開発の側面からは、プラスチックのアップサイクリング（高付加価値物質への転換）や、リサイクルを考慮したプラスチック材料の設計などがあげられている。
- ・ 2020年3月、DOEはプラスチックリサイクルの研究開発プログラムBOTTLE（Bio-Optimized Technologies to Keep Thermoplastics out of Landfills and the Environment：熱可塑性プラスチックを埋立地や環境から遠ざけておくためのバイオ最適化技術）を開始した。対象分野は（1）リサイクル性の優れたプラスチックまたは生分解性プラスチックの開発、（2）従来のプラスチックを分解およびアップサイクルする方法の開発、（3）BOTTLEコンソーシアムとの協働体制の構築、の3つである（予算総額は2,500万ドル、プロジェクト期間は3年程度）。なお、BOTTLEコンソーシアムは新プラスチック設計およびリサイクル戦略を開発するための産学官の枠組みで、国立再生可能エネルギー研究所、オークリッジ国立研究所、ロスアラモス国立研究所が主導することになっている。
- ・ 2020年10月、DOEは「プラスチック・イノベーション・チャレンジ」の一環として、先進プラスチックリサイクル技術の開発と、リサイクル可能な新しいプラスチックの設計開発を行う12件のプロジェクト（合計2,700万ドル）を採択した。プロジェクトは、リサイクル性や生分解性の高いプラスチックの開発、プラスチックの分解およびアップサイクリング技術の開発、BOTTLEコンソーシアムとの協働などに焦点を当てている。
- ・ NSFは2020年からEmerging Frontiers in Research and Innovation（EFRI）programの枠組みのなかで使用済みプラスチック材料の解重合技術開発を目的とした「Engineering the Elimination of End-of-Life Plastics（E3P）」プロジェクトを開始した。
- ・ 2022年12月、NSFはオーストラリアCSIROと共同で、「コンバージェンス・アクセラレータ」プログラ

ムの「地球規模課題のための持続可能な材料」領域で16件のプロジェクト（合計1,150万ドル）を採択した。プラスチックやマイクロエレクトロニクスなどの希少材料や重要材料について、基礎的な材料科学から設計・製造・利用・リサイクルに至るまで、ライフサイクル全体を考慮した循環経済型のアプローチを推進する。

【欧州】

- ・2018年12月、UKRIは産業戦略チャレンジ基金（ISCF）の一環として、「スマートで持続可能なプラスチック包装」（SSPP）チャレンジの開始を発表した。ワークショップおよびネットワーキング（200万ポンド）、アカデミア主導の研究開発（800万ポンド）、産業界主導の研究開発（5,000万ポンド）に対する計6,000万ポンドの政府資金配分に加え、民間部門から1億4,900万ポンドの投資を見込んでいる。チャレンジ全体で7回の公募が行われ、57件のプロジェクトに資金が提供されている。
- ・2022年7月、タイヤ大手 Michelin は、プラスチック製の繊維を含む複合廃棄物を付加価値の高い製品に変換する循環型経済の発展を目指した「WhiteCycle」プロジェクトの開始を発表した。欧州委員会の「Horizon Europe」プログラムの共同出資により、本官民パートナーシップには17の組織が参加している。

（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く。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。

特に、多元素系材料開発においては、性能を支配している要因を科学的に解明し、その知見に基づき普遍的な開発指針を確立することが望まれるが、その際の重要な技術の一つが熱力学的な相の制御技術である。準安定相などの多種多様な安定相の設計と制御を行う指針、および実際にそれらを実現するための作製プロセス技術開発が必須であり、マテリアルズ・インフォマティクス、プロセス中のオペランド計測、プロセス・インフォマティクス、それらに基づく高度なプロセス制御技術の開発を進めていくことが不可欠である。

また、材料の安定性と分解性を制御するためには、既存材料における劣化・破壊機構の解明と分離・リサイクルプロセスの科学的な理解を通じて、分解の科学を確立することが必要になる。そのためには、より複雑な現象を扱うことができるシミュレーション技術や計測技術を高度化することが求められる。特に、現状では未成熟である、分解プロセスを含む非平衡・非定常状態におけるシミュレーション技術の開発、反応・プロセスなどの時間発展を追える動的なデータを蓄積したデータベースの構築が望まれる。また、元素間の結合分解制御を可能にする新たな技術の創出とそれを支えるハイスループット実験手法、プロセスの実時間計測手法の開発が必要となる。

（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。既に終了した文部科学省「元素戦略プロジェクト〈研究拠点形成型〉」では、4つ全ての拠点に対し

て「電子論」「解析評価」「材料創製」の3つグループで構成する等、トップダウンによって連携体制の構築を促進した。今後は、データ科学も加えた4つのグループ構成が主となっていくと考えられる。その先駆けとなるデータ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクトが2022年度より本格的に開始されているが、元素戦略プロジェクトと比べると予算が半分であるなど、さらなる支援が必要と考えられる。

また、各国が重要鉱物のサプライチェーン強靱化に受けた動きを活性化させる中、我が国としても工業生産の維持・発展を図るため、これらの重要鉱物の安定供給確保が喫緊の課題となっていることから、「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）」第8条第1項の規定に基づき、「重要鉱物に係る安定供給確保を図るための取組方針」が2023年1月に公表された（2024年3月に改訂）。

さらに、この数年で、カーボンニュートラル宣言とも相まって、ものづくり産業では資源循環を戦略としてとらえるべき機運が高まっていることから、今後は、材料開発の段階から、使用後の資源循環を見据えることが求められる。既にそのような考え方のもと、JSTやSIPなどでは資源循環を主軸としたプロジェクトがスタートしているものの、研究者層・マネジメント層ともに固体を固体のまま分離する技術開発とその学術的体系化の重要性を理解されていない可能性もある。製品が使用済みになってから分離のことを開発検討するような現状にあっては、分離開発研究が材料創成の先端の知見を活用することはできないであろう。材料開発側、分離・リサイクル側それぞれの研究者が、同じ目標に向かって連携・融合を進めていくための、各々の研究者が持つ学術的好奇心と応用への方向性を、意図的に合致させていく仕組みが必要である。

(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。政府が策定した「マテリアル戦略」においてもレアメタルの安定供給に関する検討が始まっている。さらに発展的展開として、四元素系や五元素系など多元素化・複合化を伴うより複雑な組合せによる新機能創出、データ科学活用による新材料の合成プロセスの予測・設計、使用後の分解・分離といった循環機能を含むライフサイクル全体を最適化する新たな材料科学の体系化に繋がるプロジェクトも始まっている。
	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が市販車に導入されている。新国際資源戦略策定によって、レアメタル等の金属鉱物のセキュリティ強化への意識が高まりつつある。
米国	基礎研究	◎	↗	希少鉱物に関する大統領令が多数発令され、希少元素のサプライチェーン強化に向けた研究開発プロジェクトなど、今後も研究開発がより活発化する可能性がある。
	応用研究・開発	◎	↗	炭素鉱石・レアアース・希少鉱物（CORE-CM）イニシアティブの一環として、埋蔵石炭からレアアースや希少鉱物等を抽出する技術の研究開発や、「希少物質の研究・開発・実証・商業化プログラム」を発表するなど、希少元素の国内調達・生産を促進し、世界の製造業リーダーとして米国の地位を強化する取り組みが活発化している。
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高まっている。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ている。「希少鉱物に対する行動計画」に基づく欧州原材料アライアンスや「欧州重要原材料法」の制定など、今後産業化へ向けた包括的な取り組みが活発化するとと思われる。

中国	基礎研究	◎	↗	「国家レアアース機能材料イノベーションセンター」の設立により、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動きが活発化している。
	応用研究・開発	◎	↗	「レアアース管理条例草案」の発表や、国有企業「中国希土集团有限公司」の設立など、レアアースのサプライチェーン全体を統制し、レアアース新製品、新材料、新技術の研究開発と産業化を目指した取り組み活発化している。
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	○	↗	リチウムイオン電池（LIB）、電気自動車（EV）など先端需要産業の成長を支援すべく、リチウム、ニッケル、ネオジム、グラファイトなど10大戦略“核心（コア）”鉱物の戦略的備蓄量を増やす計画を推進するなどの動きが見られる。

（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

参考・引用文献

- 1) 国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター「戦略イニシアティブ「元素戦略」」
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2007/SP/CRDS-FY2007-SP-04.pdf>, (2023年2月19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., <https://doi.org/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』（東京：ダイヤモンド社, 2013）。
- 4) 元素戦略プロジェクト広報誌企画委員会「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」文部科学省 元素戦略プロジェクト〈研究拠点形成型〉, https://elements-strategy.jp/images/esi_2020/pdf/elements-strategy.pdf, (2023年2月19日アクセス) 。
- 5) U.S. Department of Energy, “Critical Materials Strategy, December 2011,” https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf, (2023年2月19日アクセス) 。
- 6) Ames National Laboratory , “Critical Materials Institute,” <https://www.ameslab.gov/cmi>, (2023年2月19日アクセス) 。
- 7) Donald J. Trump, “Executive Order on Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain from Reliance on Critical Minerals from Foreign Adversaries,” The White House, <https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/executive-order-addressing-threat-domestic-supply-chain-reliance-critical-minerals-foreign-adversaries/>, (2023年2月19日アクセス) 。
- 8) Joseph R. Biden Jr., “Executive Order on America’s supply Chains,” The White House, <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/02/24/executive-order-on-americas-supply-chains/>, (2023年2月19日アクセス) 。

- 9) Executive Office of the President, “A Federal Strategy To Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals,” The Office of the Federal Register, <https://www.federalregister.gov/documents/2017/12/26/2017-27899/a-federal-strategy-to-ensure-secure-and-reliable-supplies-of-critical-minerals>, (2023年2月19日アクセス) .
- 10) European Commission, “Commission announces actions to make Europe’s raw materials supply more secure and sustainable,” https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1542, (2023年2月19日アクセス) .
- 11) European Commission, “Critical Raw Materials Act: securing the new gas & oil at the heart of our economy | Blog of Commissioner Thierry Breton,” https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/STATEMENT_22_5523, (2023年2月19日アクセス) .
- 12) 村上進亮「我が国の金属鉱物資源政策について」『日本LCA学会誌』18巻4号(2022): 180-185., <https://doi.org/10.3370/lca.18.180>.

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
物質と機能の設計・制御