

戦略プロポーザル

物質循環を目指した 複合構造の生成・分解制御

～サステイナブル元素戦略～

STRATEGIC PROPOSAL

Control of Generation and Decomposition of Modular Structures for Materials Circulation

- Sustainable Element Strategy -

研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立って行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDSは、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください

<https://www.jst.go.jp/crds/>

エグゼクティブサマリー

「物質循環を目指した複合構造の生成・分解制御～サステイナブル元素戦略～」とは、持続可能な物質循環の実現に向けて、複数のブロックを組み合わせて構成される複合構造の生成・分解を通じて、ブロック間結合の安定性と分解性の自在制御を可能にし、材料の使用後の流れも意識した材料開発を行うことを目的とした研究開発コンセプトである。ここで、「ブロック」とは複合構造の構成単位を意味し、例えば、永久磁石における主相（Ndリッチ相）と副相（粒界相）、複合材料におけるマトリックス（樹脂）とフィラー（繊維）、層状物質を構成する2次元原子層薄膜など、複数の組成・構造で構成されるそれぞれの要素を指す。本研究開発コンセプトに基づいた研究開発を実施することで、単一の物質相（ブロック）では実現できない材料の高機能化・多機能化を可能にすると共に、ブロック間の分解制御性を通して廃棄物処理問題の解消や環境負荷の低減、資源供給リスク低減が期待され、循環型社会の実現に貢献することが可能になる。

SDGsの達成や我が国が提唱するSociety 5.0の実現に向けて、また2019年末に発生した新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の世界的パンデミック以降のデジタルトランスフォーメーション（DX）が加速するなか、様々な製品に対する要求が性能面だけではなく、環境やエネルギー負荷の側面でも高度化する一方である。それらの中核部品を構成する材料に対しても、単一性能の向上だけでなく、多様な機能を同時に満足することが要求されている。

例えば、地球温暖化の一因であるCO₂排出量抑制に寄与する再生可能エネルギーの獲得、DX時代を支える各種デバイス・製品には高機能・多機能材料の存在が欠かせなくなっている。それら材料には多くの希少鉱物が含まれるが、鉱物資源のほぼ100%を輸入に頼っている我が国にとってはその供給リスクが常につきまとい、我が国が提唱した「元素戦略」はますます重要度を増している。近年の諸外国における資源政策の変化やCOVID-19感染拡大を契機とするサプライチェーンの混乱などの脱グローバル化の流れが一部で見え始めている。持続的に資源を確保し、我が国が有する素材・デバイス・製造技術の国際的な競争優位性を保ち続けるため、新たな材料開発戦略を持って臨むことが必要である。

材料や製品の新たな機能や利便性を追求する一方、新素材製品や大量に製造・消費される汎用品の環境負荷への影響、廃棄物問題への懸念が高まっている。従来の大量生産・大量消費・大量廃棄型社会から脱却し、循環型社会へ向けた考え方が、ものづくりの在り方を大きく変えようとしている。特に、昨今のプラスチックごみによる環境汚染問題はその象徴であろう。プラスチックが人類にもたらす多大な便益には疑問の余地はないものの、使用後の劣化・分解性能の改善まで見据えたものづくりが要求されている。我が国で1990年代に提唱された「インバース・マニュファクチャリング」の概念に基づき、様々な製品のリサイクル・システムの構築は進んだ。しかし、大量生産・大量消費・大量廃棄から大量生産・大量消費・大量リサイクルに移行しただけとの見方があり、本来目指すべき持続可能なものづくりなのか、という疑問が残っている。全世界の消費エネルギーの5%が金属分離に使用され、そのうち80%は破碎・粉砕であるとされている。環境低負荷な循環型社会を実現するためには、製品レベルから材料レベルまで資源循環を追求する必要があるが、現状では、アカデミア・産業界ともその取組が不足している。

科学技術的な動向に目を向けると、社会が求める材料機能への要請が高くなるにしたがって、例えば無機材料については単元素材料から多元素材料へと向かう方向、複合材料のように複数の組成が複雑に組み合わさった構造を制御する方向、高分子材料のように高次の階層性を持つ構造を制御する方向、にそれぞれ進化している。特に、複雑な構造や高次の階層構造を精密に制御するための材料科学技術は確立されているとは

言えない状況である。

また、分離・リサイクル技術においては、選鉱から発展した物理的分離技術と、製錬から発展した化学的分離技術（高温分離プロセス、湿式分離プロセス）が個々に発展しながらも、これら2つの分離技術の融合によって、分解したい部分にだけエネルギーを集中させ、局所的・選択的・高精度な分離技術の開発へと進化しつつある。

そのような背景の下、本提言では、材料創製（動脈側）と分離・リサイクル（静脈側）に共通のターゲットとして、複合構造の生成・分解制御に着目する。ブロック間結合の安定性と分解性の自在制御を目標にすることで、持続可能な循環型社会の実現に向けた研究開発を推進することを提案する。これにより、社会が求める材料使用時の機能を満足することに加えて、材料使用後の環境負荷低減や物質循環にも貢献できる可能性があることを示す。本提言を実行する上で取り組むべき研究開発課題として「複合構造の制御による新機能・新材料設計」を挙げ、それを可能にするために必要な「複合構造の生成・分解の科学の確立」「共通基盤技術の高度化」を取り上げる。「複合構造の制御による新機能・新材料設計」の実行においては、①複数のブロックをいかに組み合わせ、材料に要求される高機能化・多機能化を実現するか、②環境負荷低減や物質循環に向けて低コストの分解プロセスをいかに実現するかの観点が重要になる。また、ブロック間結合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、現在の分離・リサイクルプロセスの科学的な理解を通じて、「複合構造の生成・分解の科学」を構築することが必要である。さらに、上述の研究開発を推進するに当たっては、より複雑な現象を扱うことができるデータ科学を併用したシミュレーション技術や、計測技術を高度化する必要がある。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必要になる。また同時に複合構造の生成・分解を実現する新たなプロセス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。

研究開発の推進にあたっては、材料科学、化学、物理学、計算科学、プロセス工学、データ科学、リサイクル工学、分離工学といった異なる学術的背景と研究動機を持つ異分野の研究者が同じ目的達成に向かい連携・融合した研究を進めることが重要になる。さらに、社会的インパクトや技術的可能性・経済合理性などを同時並行的に検討することも求められる。そのためには、各々の研究者の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政策的な仕組みや、目標を共有するための場の形成が必要である。例えば、異分野連携・融合研究の促進から、材料・製品のライフサイクル全体を考慮した産学連携型研究までを段階的に実施できるように、複数の研究プロジェクトを逐次的に設定することが有効である。また資源循環の観点からは、天然資源開発から廃棄・リサイクルまでのライフサイクル全体を見渡した上で、どの資源を循環させるのか、どの機能を循環させるのかを立案できる人材の参画も必要となる。そのため、資源学、鉱物学、地球科学、環境学、環境政策学、経済学など、これまで材料開発とは直接的な関わりがなかった専門家を交え、多様な視点から俯瞰的に意見交換するための場を設定することも求められる。さらに、物質循環を産業界の主體的な活動に根付かせるための標準化や規制等の戦略的活用も進めるべきである。

Executive Summary

"Control of Generation and Decomposition of Modular Structures for Material Circulation - Sustainable Element Strategy-" is to enable flexible control of the stability and decomposition of inter-block bonds through the generation and decomposition of modular structures composed of multiple blocks, with the aim of realizing sustainable material circulation. This is a research and development concept that aims to develop materials with an awareness of the flow of materials after use. Here, "block" refers to the constituent unit of a Modular structure, such as the main phase (Nd-rich phase) and the sub-phase (grain boundary phase) in permanent magnets, the matrix (resin) and the filler (fiber) in composite materials, and the two-dimensional atomic layer thin film that constitutes layered materials. By carrying out research and development based on this concept, we aim to make it possible to make materials highly functional and multifunctional, which cannot be achieved with a single material phase (block), and to contribute to the realization of a circular society by solving waste disposal problems, reducing environmental impact, and reducing resource supply risks through decomposition controllability between blocks.

As we work toward the achievement of the SDGs and the realization of Society 5.0 proposed by Japan, and as digital transformation (DX) accelerates after the global pandemic of the new coronavirus infection (COVID-19) that broke out at the end of 2019, the requirements for various products are becoming increasingly sophisticated not only in terms of performance, but also in terms of environmental and energy impacts. The materials that make up the core components of these products are required not only to improve single performance but also to satisfy various functions simultaneously.

Highly functional or multifunctional materials have become indispensable, for example, for the acquisition of renewable energy sources that contribute to the reduction of CO₂ emissions, one of the causes of global warming, and for the realization of various devices and products that are essential in the DX era. In these materials, many critical minerals are contained. For Japan, almost 100% of its mineral resources are imported, and supply risk is a continuous concern. In this context, the "Elemental Strategy" proposed by Japan to solve this problem is becoming increasingly important. With the recent changes in foreign countries' resource policies and the disruption of supply chains triggered by the expansion of COVID-19 infection, it is necessary to formulate a new materials development strategy in order to secure resources in a sustainable manner and to maintain the international competitive advantage of materials, devices, and manufacturing technologies in which Japan has an advantage.

While we pursue new functions and convenience in materials and products, there is a growing concern about the environmental impact of products made of new materials and general-purpose products manufactured and consumed in large quantities and their waste disposal problems. The growing social interest in these issues has led to the idea that we should break away from the conventional mass-production, mass-consumption, mass-disposal society and build a circulating society, which is about to change manufacturing drastically. Based on the concept of "inverse

manufacturing" proposed in Japan in the 1990s, the construction of recycling systems for various products such as home appliances has progressed, but it can be said that it is just a shift from mass production, mass consumption, and mass disposal to mass production, mass consumption, and mass recycling, and the question remains whether this is the sustainable manufacturing that we should be aiming for. It is said that 5% of the energy consumed in the world is used for metal separation, of which 80% is for crushing and grinding. In order to reduce these energy consumptions and realize a circulating society with low environmental impact, it is necessary to pursue material circulation from the product level to the materials level. At present, however, both academia and industry are lacking in such efforts.

Looking at the scientific and technological trends, as society's demands for materials increase, they are evolving, for example, from single-element materials to multi-element materials in the case of inorganic materials, to control structures with complex combinations of multiple compositions, such as composite materials, and to control structures with higher-order hierarchy, such as polymer materials. In particular, materials science and technology for precise control of complex structures and higher-order hierarchical structures has not yet been established.

In separation and recycling technology, while physical separation technology developed from ore dressing and chemical separation technology developed from smelting (high temperature separation process and wet separation process) have been developed individually, the fusion of these two separation technologies is evolving into the development of localized, selective, and highly precise separation technology that concentrates energy only on the part that needs to be decomposed.

In the background above, this proposal focuses on the control of generation and decomposition of modular structures as a common target for materials creation (arterial side) and materials separation and recycling (venous side), and proposes to promote R&D toward the realization of a sustainable circulating society by targeting the flexible control of the stability and decomposition of inter-block bonds. By realizing this, in addition to satisfying the functions required by society at the time of materials use, we will show that there is a possibility of contributing to the reduction of environmental impact and material circulation after materials use.

The R&D issues to be addressed in implementing the R&D strategy include "designing new materials with new functions by controlling modular structures," and the "establishment of the science of the generation and decomposition of modular structures" and "advancement of common basic technologies" that are necessary to make this possible. In order to implement the "design of new materials with new functions by controlling modular structures," it is important to consider the following points: 1) how to combine multiple blocks to achieve the high functionality and multifunctionality required of materials, and 2) how to achieve a low-cost decomposition process to reduce environmental impact and achieve material circulation. In order to control the stability and decomposition of inter-block bonds, it is necessary to establish the "science of generation and decomposition of modular structures" through the elucidation of deterioration and destruction mechanisms in existing materials and scientific understanding of current separation and recycling processes. In addition, in promoting the above-mentioned R&D, it is necessary to advance simulation and measurement technologies in combination

with data science that can handle more complex phenomena. In particular, it is necessary to develop simulation techniques for non-equilibrium and unsteady states, including decomposition processes, and to build a database of dynamic data that can track the time evolution of reactions and processes. In addition, it is necessary to develop new process technologies for the generation and decomposition of modular structures, as well as high-throughput experimental methods and real-time process measurement methods.

In promoting the research and development of this proposal, it is important that diverse researchers with different academic backgrounds and research motivations, such as materials science, chemistry, physics, computational science, process engineering, data science, recycling engineering, and separation engineering, collaborate and integrate their research to achieve the same goal. In addition, it is also important to consider social impact, technical feasibility, and economic rationality in parallel. In order to achieve this, it is necessary to create a policy framework that intentionally matches the academic curiosity and application orientation of each researcher, and to create a forum for sharing goals. For example, multiple research projects could be set up in a sequential manner to enable step-by-step implementation from the promotion of interdisciplinary and fusion research to industry-university collaborative research that considers the entire life cycle of materials and products. From the perspective of resource circulation, it is also necessary to involve human resources who can consider which resources should be circulated and which functions should be circulated after looking at the entire life cycle from natural resource development to disposal and recycling. In order to achieve this, it is also effective to set up a forum for exchanging opinions from diverse perspectives and from a bird's-eye view, involving specialists who have not been directly involved in materials development in the past, such as resource science, mineralogy, earth science, environmental science, environmental policy, and economics. In addition, the strategic use of standardization and regulations should be promoted in order to make material circulation take root in the proactive activities of industry.

目次

1	研究開発の内容	1
2	研究開発を実施する意義	6
	2.1 現状認識および問題点	6
	2.2 社会・経済的効果	10
	2.3 科学技術上の効果	13
3	具体的な研究開発課題	15
	3.1 複合構造の生成・分解制御による新機能・新材料設計	16
	3.2 複合構造の生成・分解の科学の確立	20
	3.3 共通基盤技術の高度化	22
4	研究開発の推進方法および時間軸	23
	4.1 異分野連携・融合を促進する施策	23
	4.2 自然科学と人文・社会科学の協力体制構築のための方策	25
	4.3 時間軸	26
付録 1	検討の経緯	27
付録 2	国内外の状況	31
付録 3	専門用語説明	39

1 | 研究開発の内容

「物質循環を目指した複合構造の生成・分解制御～サステイナブル元素戦略～」とは、持続可能な物質循環の実現に向けて、複数のブロックを組み合わせて構成される複合構造の生成・分解を通じて、ブロック間結合の安定性と分解性の自在制御を可能にし、材料の使用後の流れも意識した材料開発を行うことを目的とした研究開発コンセプトである。ここで、「ブロック」とは複合構造の構成単位を意味し、例えば、永久磁石における主相（Ndリッチ相）と副相（粒界相）、複合材料におけるマトリックス（樹脂）とフィラー（繊維）、層状物質を構成する2次元原子層薄膜など、複数の組成・構造で構成されるそれぞれの要素を指す（図1参照）。

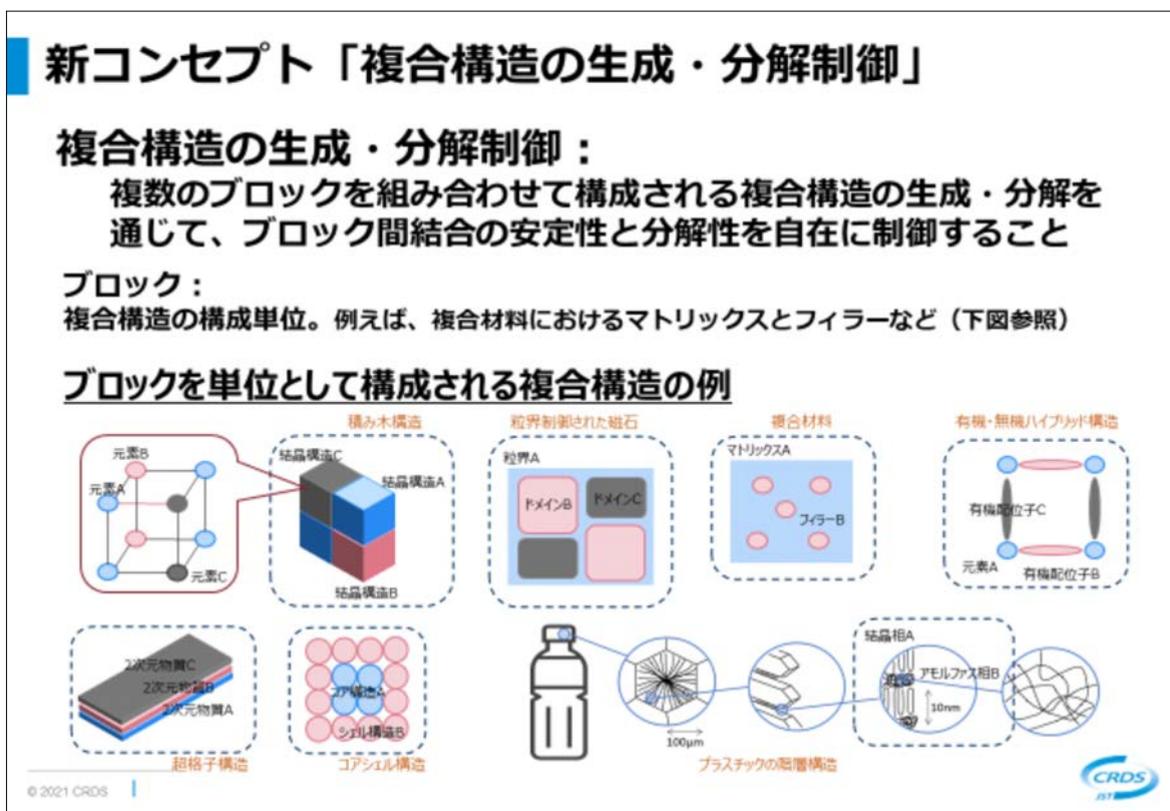


図1 複合構造の生成・分解制御とは

本研究開発コンセプトに基づいた研究開発を実施することで、単一の物質相（ブロック）では実現できない材料の高機能化・多機能化を可能にすると共に、ブロック間の分解制御性を通して廃棄物処理問題の解消や環境負荷の低減、資源供給リスク低減が期待され、循環型社会の実現に貢献することが可能になる。本提言の概略図を図2に示す。

ここでは、材料創製（動脈）と分離・リサイクル（静脈）に共通のターゲットとして、複合構造の生成・分解制御による材料設計に着目し、材料の安定性と分解性の自在制御を究極の目標にすることで、持続可能な循環型社会の実現に向けた研究開発を推進する。それによって、社会が求める材料使用時の機能を満足できるだけでなく、材料使用後の環境負荷低減や物質循環にも貢献できる可能性があることを示す。本提言では、持続可能な循環型社会実現に向けた今後の材料開発において必要となる研究開発課題として「複合構造

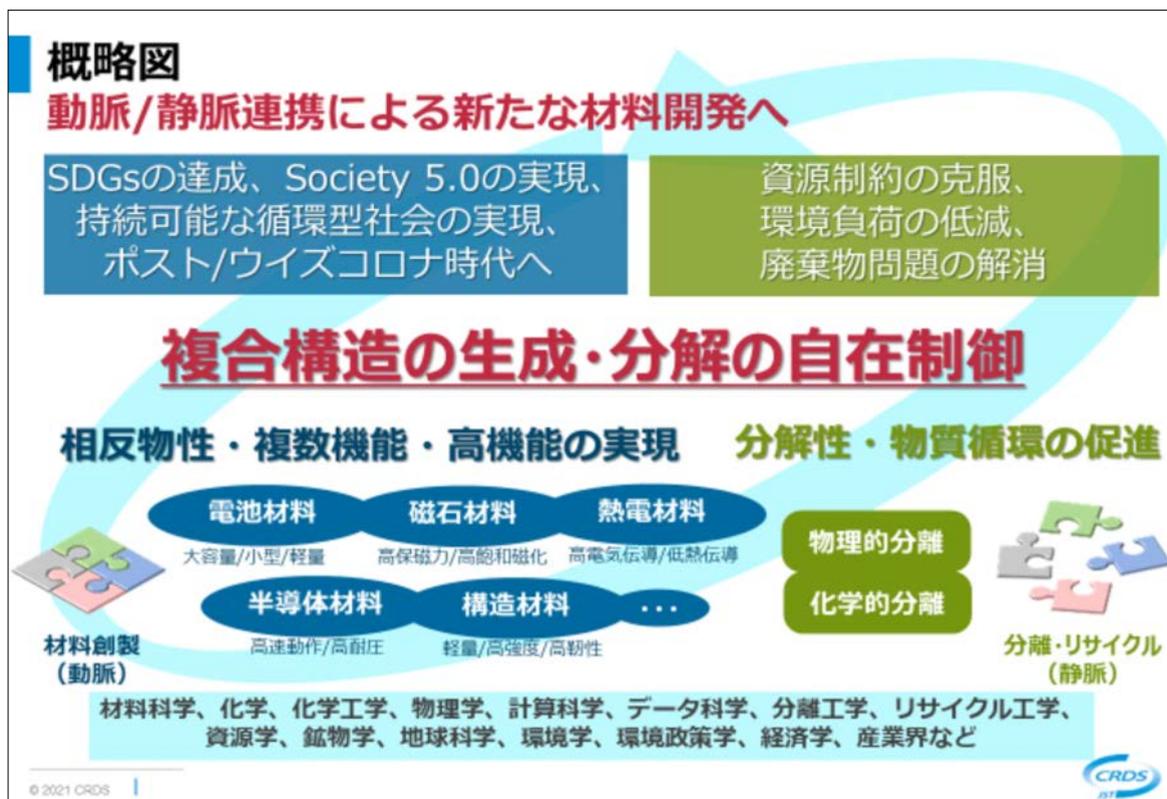


図2 概略図

の制御による新機能・新材料設計」「複合構造の生成・分解の科学の確立」「共通基盤技術の高度化」の3つを掲げる。以下では、それぞれの研究開発課題における具体例について概説する。

1. 複合構造の制御による新機能・新材料設計

以下では、複数のブロックをいかに組み合わせ、材料に要求される高機能化・多機能化を実現するか、環境負荷低減や物質循環に向けて低コストの分解プロセスをいかに実現するかの観点からの研究開発課題例を示す。

(1) 少数の金属種を用いた新機能材料の設計

近年の新材料開発は、高度化した社会ニーズに応えるため多元素化の方向に向かっており、一つの化合物の中により多くの元素を含むことで求められる機能を実現しようとしている。しかしながら、これらの金属の循環を考えた場合には、金属を分離抽出するコストが経済的に見合わなくなることが多く、結果的に「希少資源をなるべく使わない」という条件を強いることになり、新規材料開発の障壁を上げてしまうことがある。したがって、金属の種類を増やさずに材料機能を向上させることが求められる。具体的な研究開発課題として以下の2つが挙げられる。

(a) 複合アニオン化による新機能材料設計

化合物中のアニオン（陰イオン）の種類を増やした複合アニオン化合物を用いた新機能材料の設計。アニオンの多元素化による新機能創出が期待される一方、未知の材料探索空間にアプローチするための新たな合成手法や計測分析評価技術開発が求められる。

(b) 低次元ナノ構造の高度利用による新機能材料設計

ナノ粒子や超格子構造といった低次元ナノ構造を用いることによる新機能材料の設計。コアシェル型ナノ粒子触媒による希少金属の使用量の削減、2層グラフェンによる新機能発現などの興味深い成果が見られているものの、様々な化合物に対して低次元ナノ構造を適用するための手法開発が課題である。

(2) 高次の階層構造を有する高機能材料の設計

階層構造を持つ究極の材料である生体をはじめ、高次の階層構造を持つ有機材料など様々な機能を発現することはよく知られているが、構造の階層化と同時に物性や機能も階層化し、さらにその階層化は空間だけではなく時間に関しても階層化していると言われており、未解明な部分が多い。階層ごとの構造と機能の相関の解明、原子・分子レベルからマクロレベルまでのマルチスケール階層構造制御などが課題である。

(3) ビルディングブロックの積層による高機能材料の設計

グラフェンの発見を契機として、様々な2次元機能性原子薄膜を対象とした物性研究が精力的に行われ、原子層レベルで薄い材料の作製が可能になっている。一部の異なる種類の2次元機能性原子薄膜を積層することによって新機能発現が実現している一方で、2次元機能性原子薄膜のバリエーションを増やすための製造プロセス開発や、任意の2次元機能性原子薄膜を積層するためのプロセス技術、さらに創製された積層材料を低エネルギー・低コストで剥離する技術開発などが必要である。

(4) 水素活用による新機能設計

近年の計測技術の進化により、水素を材料創製や分解に有効活用する可能性が大きく拓かれつつある。材料中の水素は、共有結合的水素 (H^{cov})、原子状水素 (H)、プロトン (H^+)、ヒドリド (H^-) のような様々な状態を取りうるため、水素の状態が周囲の環境や水素濃度によって変幻自在に移り変わったり、水素が材料中を速く移動したり、その動きにより他のイオンの拡散を加速させたりといった、特異な現象を起こすことが知られるようになってきている。また、水素はほぼ全ての元素と反応しやすい性質を持つために、化合物から目的金属を分離する技術にも活用できる可能性も示唆されている。水素をより有効に活用するためには、水素の量や状態を観察する手段、材料中の水素の状態を制御する手法、新奇な水素化物の探索、水素が関与した物性を予測するためのシミュレーション技術などの開発が必要である。

(5) 分解を制御する持続性高機能材料の創製

上記(2)で記載した階層構造をもつ高機能材料の分解制御を実現するためには、階層構造における比較的弱い相互作用の部分に予め外部刺激によって分解を促進するトリガーを導入しておく必要がある。ただし、ここではトリガーが材料使用時に発現しないようにしておくための工夫が必要である。また、近年のプラスチックごみ問題の顕在化によって、生分解性プラスチックのように分解を前提とした材料開発に注目が集まっているが、意図した分解に必要なエネルギーが新しく作るよりもエネルギー的に不利にならないような材料設計が必要である。さらに、循環型社会の関連からは、材料の寿命や耐久性、自己修復など時間スケールでの材料の変化に対する設計も考慮にいった研究開発も重要である。

(6) 循環型高機能材料開発に資する強固な結合の自在制御

分解制御の観点から、上記(5)よりも強固な結合の切断を要する材料に対しては、材料開発の際に結合生成反応の開発と同時に、結合を切断する反応を開発しておくことが必要となる。そのための新しい触媒開発や酵素を用いた結合切断などの技術開発が望まれる。また、近年のプラスチックごみ問題を解決する一つの方法として、プラスチックのリサイクル技術開発が盛んになってきている。ここでは、価値の低いプラスチック製品として再利用する、いわゆる“カスケードリサイクル(ダウンサイクル)”ではなく、元のプラ

スチックより価値の高い材料を作るのに適した分子（モノマー）に分解するケミカルリサイクル技術、いわゆる“アップサイクル”戦略を確立することが望ましい。そのためには、より低い温度で解重合を達成できる収率・選択性の良い触媒や効率的なリサイクルプロセスの開発、また、逆の発想として解重合を促進するトリガーを持つ機能性ポリマーの開発が望まれる。

2. 複合構造の生成・分解の科学の確立

材料における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、および、現在の分離・リサイクルプロセスを科学的な理解を通じて、「複合構造の生成・分解の科学」を構築することが重要である。

(1) 材料の劣化・破壊機構の解明とサイエンス化

材料の分解を制御するためには、まず材料において外部刺激による分離や破壊がどのように起こり、それがどのように連鎖していくかに関して、材料界面での原子・分子レベルで解明することが重要である。例えば、材料の劣化に関してもそのメカニズムを科学的に解明するためには、材料界面における分離や破壊挙動を正確に理解するための新しい理論的枠組み、計算シミュレーション手法、計測評価技術の開発、さらにそれを可視化するための技術開発が必要である。また最近では、階層構造を持つ有機材料の機能において、従来の空間構造の捉え方すなわち静的・平均的な構造では説明できない現象が報告されている。ここでは、原子・分子の運動や拡散、非平衡などといった時間的に変動する階層性が効いている可能性がある。この時間的な階層性が支配するサイエンスを体系化することで、材料の分解や循環だけでなく、材料の寿命制御や自己修復といったサーキュラーエコノミー全体をカバーする新しい学理が構築される可能性がある。

(2) 分離・リサイクルプロセスの理解とノウハウのサイエンス化

工業材料の多くは他の材料と共に部品の一部に使われている。資源循環が社会にとって、コスト面・エネルギー面で意味を持つためには、リサイクルループ（後述の図3）のなるべく内側の円で資源循環を行うための物理的分離技術を確立すると同時に、最外の円である化学的分離技術に必要なエネルギー、コストを可能な限り下げる必要がある。物理的分離技術を高度化するための方法として、電気、光、超音波といった外力を、材料全体ではなく目的とする界面に集中させることが提案されている。これらの技術をより広い範囲の製品に適用するためには、分離技術だけでなく、材料/デバイス/製品の製造段階を含めた統合的な分離・循環に適した機器設計技術の確立、および異種界面にエネルギーを集中させるための「分解の科学」の構築が望まれる。

他方、化学的分離技術では、元素レベルでの分離が求められるため高温、酸アルカリなどの化学薬品、電解・電析などを使う場合が多く、一般にエネルギー投入量が大きくなる。金属製錬は歴史的に非常に古くから行われているものの、金属種によっては何十年も技術革新がないまま同じ手法が使われている場合が多く、ブラックボックスのままノウハウだけが積み重なっている状況である。化学的分離技術が資源循環の最終段階で必ず通るプロセスであることを考えると、この部分の科学的理解を深化させ、製錬サイエンスとして体系化することで、資源循環における大幅なコストダウンにつながる可能性がある。それを可能にするためには、例えば、電解製錬時の電極反応のミクロスコピックな理解、物質の高温気体の正確な熱力学関数の計算・計測、界面反応の理解、第一原理分子動力学計算やマルチスケール計測を製錬分野に適用することが求められる。

3. 共通基盤技術の高度化

本提言の主題である複合構造の自在制御技術を確立するためには複雑な構造や階層化された構造を精密に制御する必要があり、もはや人の勘や経験だけでは理解が及ばない可能性もあるため計算科学やデータ科学

を駆使する必要がある。一般に無機材料の機能予測に対しては、第一原理計算が用いられる。第一原理計算の適用範囲を広げるためには、AIや機械学習といったデータ科学的な手法の併用、スーパーコンピュータ「富岳」の活用が挙げられる。ただし、それでも平衡論、定常論にとどまってしまう。今回扱おうとしている複合構造の生成・分解制御では必ず非平衡・非定常状態の解析が必要になるため、反応・プロセスなどの動的な実験データも含めたデータベースの構築が必要である。また、有機材料を解析するためには、大きなスケールの階層をシミュレーションするソフトウェア開発が必要である。その際、全ての原子を対象にした計算をすることは不可能であるため、必要なエッセンスのみを抽出した粗視化モデルの構築が重要である。粗視化する際にどのような要素を抽出するかによって結果が変わってしまうため、初期モデルをどう構築するかも重要な課題である。また、階層構造を有する材料を設計する際の大きな課題として、構造と物性の相関が挙げられる。一次構造から階層性の高い高次構造を作っていくとき、通常、一次構造と高次構造の物性相関は1:多となるため、階層間を跨ぐ際のパラメータをどう設定するかが肝となる。そのパラメータを設定する際に実際の構造観察の結果を用いることで精度が高くなることが知られているため、仮想的なモデル計算の結果と実空間における計測結果（X線、CT画像、AFM画像、TEM・SEM画像など）との対応を丁寧に追っていく必要がある。一方で、上述のシミュレーション技術は静脈分野の研究にはほとんど転用されていないため、例えば製錬研究における固相・液相・気相の現象解明に第一原理計算を適用することが必要である。そのためには、これまであまり蓄積されてこなかった気相や液相の熱力学データを収集するためのハイスループット実験手法や反応の実時間計測手法の導入が必要となる。さらに、液相や気相であっても高い空間分解能と時間分解能を持った計測手法の開発も必要である。

研究開発の推進にあたっては、材料科学、化学、物理学、計算科学、プロセス工学、データ科学、リサイクル工学、分離工学といった異なる学術的背景と研究動機を持つ異分野の研究者が同じ目的達成に向かい連携・融合した研究を進めることが重要になる。さらに、社会的インパクトや技術的可能性・経済合理性などを同時並行的に検討することも求められる。そのためには、各々の研究者の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政策的な仕組みや、目標を共有するための場の形成が必要である。例えば、異分野連携・融合研究の促進から、材料・製品のライフサイクル全体を考慮した産学連携型研究までを段階的に実施できるように複数の研究プロジェクトを逐次的に設定することが有効である。また資源循環の観点からは、天然資源開発から廃棄・リサイクルまでのライフサイクル全体を見渡した上で、どの資源を循環させるのか、どの機能を循環させるのかを立案できる人材の参画も必要となる。そのため、資源学、鉱物学、地球科学、環境学、環境政策学、経済学などこれまで材料開発とは直接的な関わりがなかった専門家も交え、多様な視点から俯瞰的に意見交換するための場を設定することも求められる。さらに、物質循環を産業界の主体的な活動に根付かせるための標準化や規制等の戦略的活用も進めるべきである。

2 | 研究開発を実施する意義

2.1 現状認識および問題点

(1-1) 社会的な背景と問題点（動脈側）

SDGsの達成や我が国が提唱する Society 5.0の実現に向けて、また2019年末に発生した新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の世界的パンデミック以降のデジタルトランスフォーメーション（DX）が加速するなか、様々な製品に対する要求が性能面だけではなく、環境やエネルギー負荷の側面でも高度化する一方である。それらの中核部品を構成する材料に対しても、多様な機能を同時に満足することが要求されている。

例えば、パリ協定では「世界の平均気温上昇を産業革命前に比べて2℃より十分低く保つとともに、1.5℃までに抑える努力をする」という目標が設定されている。この目標達成に向け、地球温暖化の原因であるCO₂排出量を抑制するために、再生可能エネルギーが大量に導入されている。そこでは太陽電池材料や蓄電池材料、磁石材料などが欠かせず、各々の材料に対して、大面積/高効率、小型/大容量/軽量、高保磁力/高飽和磁化/高耐熱性などの機能実現が必須である。また、DX時代を支える半導体材料や熱電変換材料に対しても、高速動作/高耐圧、高電気伝導度/低熱伝導度といった機能実現が求められている。

これら機能性材料の多くにはレアメタルと呼ばれる希少な鉱物資源が含まれ、鉱物資源のほぼ100%を輸入に頼っている我が国にとってはその供給リスクが常につきまとう。資源に恵まれないというハンデを克服しながら、我が国の材料技術に関する強みを発揮しつづけることを目的とした「元素戦略」は、過去10数年に及ぶ成果によって、国内だけではなく世界中に影響を与えてきた。しかしながら、近年の諸外国における資源政策の変化やCOVID-19感染拡大を契機とするサプライチェーンの混乱などの脱グローバル化の流れが一部で見え始めている。そのような状況のなか、我が国が国際社会において存在感を発揮し続け、素材・デバイス・製造技術の国際的な競争優位性を保ち続けるためにも新たな材料開発戦略を持って臨むことが必要である。

(1-2) 社会的な背景と問題点（静脈側）

材料や製品の新たな機能や利便性を追求する一方、大量に製造・消費される新素材製品や汎用品の環境負荷への影響、廃棄物問題への懸念が高まっている。従来の大量生産・大量消費・大量廃棄型社会から脱却し、循環型社会へ向けた考え方が、ものづくりの在り方を大きく変えようとしている。特に、昨今のプラスチックごみによる環境汚染問題はその象徴であろう。プラスチックが人類にもたらす多大な便益には疑問の余地はないものの、使用後の分解性能の改善まで見据えたものづくりが要求されている。1990年代に我が国では「インバース・マニュファクチャリング（逆工場）」という、製品のライフサイクル全体として資源・エネルギー消費量、廃棄物および環境負荷を最小化する製造システム概念を提唱した。この概念に基づき、家電リサイクル・システムの構築は進んだものの、大量生産・大量消費・大量廃棄から大量生産・大量消費・大量リサイクルに移行しただけとの見方があり、本来目指すべき持続可能なものづくりなのか、という疑問が残っている。全世界の消費エネルギーの5%が金属分離に使用され、そのうち80%は破碎・粉砕であるとされている。環境低負荷な循環型社会を実現するためには、製品レベルから材料レベルまで資源循環を追求する必要があるが、現状では、アカデミア・産業界ともその取組が不足している。

(2-1) 科学技術的背景と問題点（動脈側）

地球上に人類が誕生して以来、石器時代、青銅器時代、鉄器時代と時代は変遷し、材料が文明を表現し

その時代を特徴づけてきたと言える。18世紀半ばから19世紀にかけての産業革命を契機として重工業時代に入り、20世紀には多種多様な材料が次々と登場した。特に20世紀前半に発明された合金鋼、高分子、半導体、セラミックスなどの多様な材料の出現により、それまでの鉄中心の重工業から、社会に密着した交通・生活機器、ロボット機器、電子・通信機器へと発展し、それに伴って個人の生活は豊かになった。しかしながら、21世紀に入ると、資源の枯渇や地球環境の汚染・破壊など、人類に課せられた課題は重要かつ至難であり、これらの課題を克服するための材料開発が必要となっている。

この間の材料の進化過程を材料の構成要素の観点から見てみると、社会が求める材料機能への要請が高くなるにしたがって、例えば無機材料については、シリコン (Si) や鉄 (Fe)、炭素 (C) といった単一元素材料からネオジム磁石 ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) やリチウムイオン電池正極材 (LiCoO_2)、ハイエントロピー合金 (CoCrFeMnNi) など多元素材料へと進化している。また、炭素繊維強化プラスチックやタイヤなどの複合材料、超格子構造合金やコアシェル構造触媒などの低次元ナノ構造を持つ材料に見られるように複数の組成が複雑に組み合わさった構造を制御する方向や、プラスチックに代表される高分子化合物のように高次の階層性を持つ構造を制御する方向も挙げられる。特に、後者の複雑な構造や高次の階層構造の精密制御を行う材料科学技術が確立されているとは言えない状況である。

(2-2) 科学技術的背景と問題点 (静脈側)

本提言における固体を対象とした分離濃縮技術は、選鉱から発展した物理的分離技術と、製錬から発展した化学的分離技術 (高温分離プロセス、湿式分離プロセス) に大別される。

物理的分離技術としては、単体分離 (異相境界面を選択的に破壊して、単体の状態にする) を促進するための技術開発と、相互分離 (単体分離したものを相互に分離濃縮する) を高度化するための分離開発とに分けられる。単体分離を促進するための技術開発では、機械的な作用力 (圧縮、衝撃、せん断) を制御しながら単体分離を促進する研究開発の他に、電気パルスやレーザー、マイクロウェーブ等を活用した異相境界選択破壊に関する研究開発や、粉碎中の発生エネルギーを利用して選択的な反応を進行させるメカノケミカル反応を利用した研究開発も実施されている。相互分離を高度化するための分離技術としては、磁性ナノ流体を用いた微粒子分離、レーザー誘起ブレイクダウン分光法 (Laser Induced Breakdown Spectroscopy : LIBS) 等を用いた合金組成の分析手法の開発や、分離を高精度に行うための機械的あるいはロボットを活用した装置の開発が進められている。

一方、化学的分離技術のうち、高温分離プロセスでは、原料が天然鉱石から2次資源に変遷したことによって新たに混入しはじめた有機物や製錬忌避元素の分離のための熱力学的データを取得しながら、それらの相互分離精製を目指す研究開発が見受けられる。湿式分離プロセスの開発動向としては、イオン液体、深共晶溶媒、有機王水などの新たな溶媒を用いて抽出選択性を高めた分離技術開発や、亜臨界や超臨界といった新たな反応場によって選択性を高めた分離技術開発が見受けられる。また、多孔質材料や有機材料、あるいはバイオを利用した吸着材あるいは吸着プロセスの開発も盛んに行われている。

上記の通り、物理的分離技術、化学的分離技術とも発展はしてきているものの、対象が複雑であり、物理的、化学的な現象の複雑な組み合わせで達成されるものであるため、その物理現象を科学的に理解するには至っていない。純粋系、単純系で得られている知見を体系化し、実験的な検討とマルチフィジックスシミュレーションとの組み合わせによって知見を集積することが未だ不十分である。物理的分離技術と化学的分離技術のベストミックスによる環境低負荷、低コスト、かつ高精度の分離技術を実現するためには、分離したい部分にだけエネルギーを集中させ局所的・選択的かつ高精度の分離技術への進化が求められている (図3)。また、動脈分野と比較して、静脈分野では機械化・自動化の遅れが見られるため、例えば、センサによる粉碎物の識別、AIを用いることによる分別判断、ロボットでピッキング作業などの分離技術の効率化も望まれる。

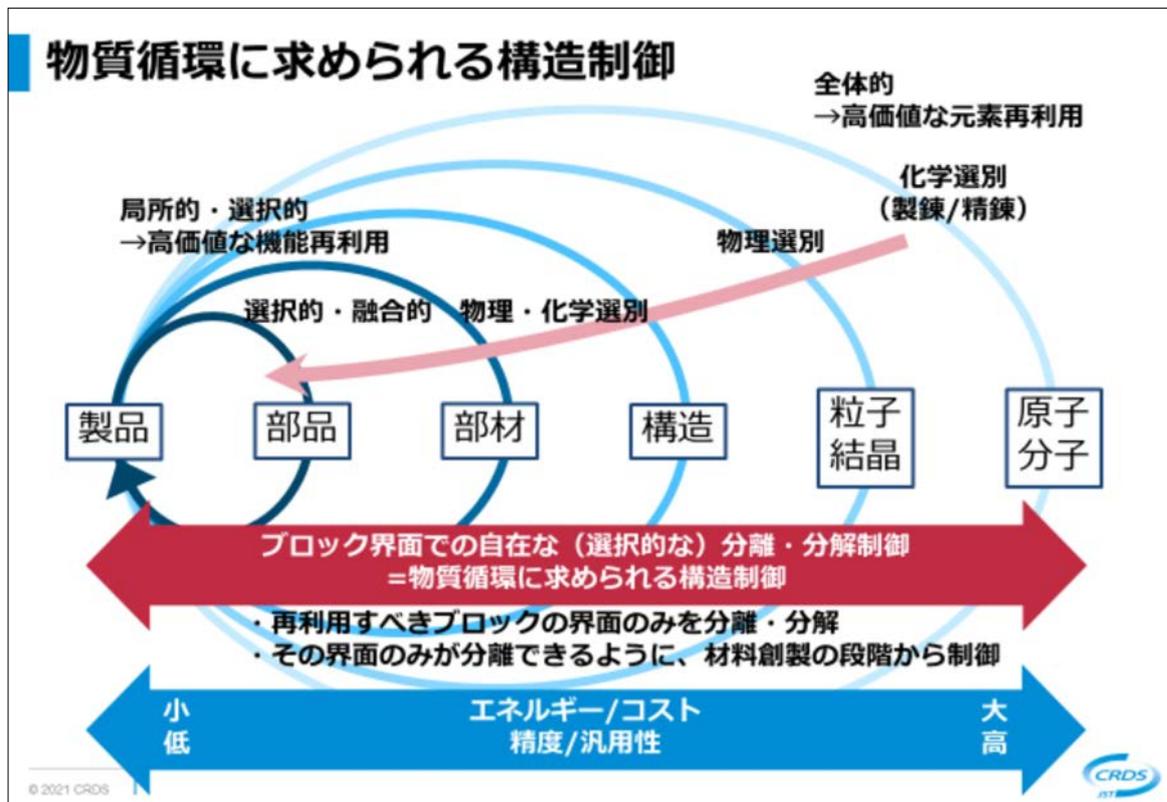


図3 物質循環に求められる構造制御

2 研究開発を実施する意義

コラム

インバース・マニュファクチャリング

インバース・マニュファクチャリング（逆工場）は、循環型社会において製造業が大量生産/大量廃棄から適量生産/再利用へ移行するために、目指すべき「もの作りシステム」として吉川弘之氏（元・東京大学総長）が中心となって1990年代初頭に提唱したものである。このシステムは、通常の製造プロセスに加えて、製品の長寿命化や、使い終わった製品からの部品/原料を得る逆プロセスを含む循環型の製品ライフサイクルを実現するものであり、また、製品ライフサイクル全体を通じて、環境負荷を最少にする製造システムと言い換えることもできる。

この提唱は、資源枯渇問題、廃棄物問題を中心とした環境問題が深刻化する中で、今後の製造業の在り方として注目を集め、実際にレンズ付きフィルム、複写機などの分野で「逆工場」を実践する企業が現れたことで、企業の現実的な検討課題となった。また、このような動きの中で1996年12月には産官学の共同研究の枠組みとして「インバース・マニュファクチャリング フォーラム」が設立された（2011年9月に発展的に解消）。本フォーラムでは、インバース・マニュファクチャリング概念の体系化、循環・再生技術に関する調査研究、サービス志向型製品としての家庭用情報端末の試作、環境配慮

設計の実態調査および環境負荷の最小化に向けたライフサイクル設計の研究、製品環境情報システムの構築などのプロジェクトが進められた。またここでの活動が、自動車、家電、容器包装など各種リサイクル法への取組を後押しする形となり、環境省が2000年6月に公布した「循環型社会形成推進基本法」に繋がった。

他方、リサイクル主体になりすぎたがために、リデュースやリユースが影を薄めてしまい、また環境問題の中で注目を集める課題が温暖化問題に移っていった結果、資源循環に関して社会的にはある種の飽和状態を迎えたような雰囲気になりつつあった。

そのような中、転機となったのは、2015年12月に発表された欧州におけるCircular Economy（循環経済）政策パッケージである。これは、現代社会を資源が循環する社会システムにドラスティックに変革することによって、欧州の雇用と産業競争力を強化しようという政策である。資源循環と産業競争力を関係づける発想は、わが国からは積極的に発信されることはなかったが、使用者指向、消費者行動としてのシェアリング、技術としてIoTやセンサが進展する昨今においては、製造メーカー自らが単純にもの売るだけではなく、顧客への価値の提供者になり、製品のライフサイクル全体をマネジメントして、循環を回す役割を担うということが今後の方向性であることは間違いないであろう。

【参考文献】

- ・吉川弘之+IM研究会（編著）、「逆工場 見えてきた製造業これからの10年」、日刊工業新聞社
- ・インバース・マニュファクチャリングフォーラム、「インバース・マニュファクチャリング 10年のあゆみ」、
<http://www.mstc.or.jp/business/inverse-forum/docs/10aniv.pdf>（2021年2月17日アクセス）
- ・梅田靖、「環境視点からのものづくりの課題と今後の方向性」、Panasonic Technical Journal Vol. 62, No.2, Nov. 2016
- ・梅田靖、高田祥三、松本光崇、「サーキュラーエコノミー時代のライフサイクル・エンジニアリング」、精密工学誌 Vol. 85, No. 10, 2019

2.2 社会・経済的効果

本提言の研究開発を実行することにより、これまで実現できなかった相反関係にある機能の両立や複数機能を持つ材料を創製することが可能になる。結果として、様々な社会ニーズを満足する新材料の開発が可能になり、我が国の産業競争力の強化が期待される。また、新材料だけではなく、それらを用いたデバイスや部品・製品の性能向上や省エネ化が実現されることで、Society 5.0の実現やSDGsの達成に貢献することが期待される。さらに、複合構造の分解制御が可能になることで、使用後の材料のリユースやリサイクルに要するエネルギー・コスト低減が期待される。加えて、静脈資源の有効活用が可能になることで、廃棄物量の減少、環境負荷低減および資源供給リスク低減へとつながることが期待される。

以下では、(1) 新材料創製による市場の拡大、(2) 廃棄物処理問題への貢献、(3) 資源供給リスクの低減の3つの観点为例として、社会・経済的効果を述べる。

(1) 新材料創製による市場の拡大

我が国の輸出は76.9兆円（2019年）であり、その主力品目は自動車およびその部品、半導体をはじめとする電子部品、鉄鋼、原動機である。輸出を担う製造業の付加価値の源泉は、自動車に代表される擦り合わせ技術や、競争力のある製造装置・機械・電子部品、それらを実現する材料である。本提言の研究開発のコンセプトである複合構造の制御技術が確立することによって、例えば、永久磁石、排ガス触媒などの環境触媒、自動車用タイヤなどの高機能化が期待される。

[永久磁石]

株式会社Global Informationの予測によると、永久磁石の世界市場は2019年で207.4億ドル（約2.1兆円）、2027年には396.7億ドル（約14.5兆円）へと増加が予測されている。化石燃料による環境汚染への懸念がますます高まる中、自動車メーカーや政府、顧客からの電気自動車やハイブリッド電気自動車への需要が急速に高まっており、主に電気自動車の需要の増加により、永久磁石の市場が拡大することが期待される。

[環境触媒]

株式会社富士経済がまとめた「環境・エネルギー触媒関連市場の現状と将来展望 2018」によると、環境触媒は2017年の1兆5768億円から2030年には2兆2017億円に拡大すると予測されている。特に、自動車排出ガス規制に対応したガソリン車用触媒やディーゼル車用酸化触媒の構成比が高く、欧州では排出ガス規制（EURO6）の進展により有害物質の排出基準値がさらに強化される。日本や米国、中国、アジアでも規制強化が進んでいるため、従来触媒を高機能化したガソリン車用の三元触媒、ディーゼル車では酸化触媒、また、GPF（ガソリン・パーティキュレート・フィルター）や尿素SCR（セレクトティブ・キャタリティック・リダクション）システムなどで使用される高度な技術を採用した触媒の需要が伸びると考えられる。特に、SCR触媒はディーゼル車用の伸びに加えて建設機械や船舶でもシステム搭載が進んでおり需要増加が期待されている。

[自動車用タイヤ]

Allied Market Research社の調査によると、世界の自動車用タイヤ市場は2019年に1121.6億ドル（約11.6兆円）と評価され、2027年までに1544億ドル（約16兆円）に達すると予測されている。車種別では、乗用車が最大のシェアを占め、2019年に803.3億ドル（約8.3兆円）、2027年に1104.7億ドル（約11.4兆円）に達すると推定されている。様々な車両タイプ（乗用車、商用車、電気自動車）の生産と販売の増加、タイヤメーカー間の競争の激化、さらに製造工程における先端技術の導入により、自動車用タイヤ市場の成長が見込まれている。

本提言の研究開発の実現による効果を定量的に示すことは難しいが、例えば上記3つの材料への寄与率が

5%とすると、2027年には約1.5兆円程度の経済効果に貢献することが期待される。

(2) 廃棄物処理問題への貢献

本提言の研究開発の実現により、様々な材料に循環機能を付与することが可能になり、静脈産業における省エネ化・低コスト化につながることが期待される。また、これまで経済的にメリットがなかったリサイクルが可能になることで廃棄物量の大幅減少と環境負荷の低減が期待される。例えば、炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics：CFRP）は、強化材として炭素繊維（Carbon Fiber：CF）が用いられている。CFは鉄と比較して比重が1/4、強度は10倍という特性を持っているため、これらの水平リサイクル、アップサイクルリサイクルが求められている。CFRPはその優れた特性から、今後自動車などでの需要拡大が見込まれており、その使用増加に伴い、CFRP廃棄量の増加も予想される。CFRPは難燃性という特徴から現状は電気炉以外の燃焼炉では完全に燃焼できず、この燃え残ったCF（=未燃CF）が電気集塵機（Electrostatic Precipitator：EP）やバグフィルタに不具合を生じさせるという問題が発生し、処理受け入れ拒否の動きもある。

一方、CFRPは製造時の重量単位当たりのCO₂排出量が鉄の6～10倍と大きく、15～30kg-CO₂/kgである。乗用車等ではCFRP採用による軽量化で燃費が向上（CO₂排出量が削減）するといわれているが、CFRPのライフサイクル全体を通しての環境負荷の低減を進めるためには、CFRPのマテリアルリサイクルの実現が求められる。マテリアルリサイクルが可能になれば、バージン材と比較して低価格なりサイクルCF材供給も期待できる。

本提言の研究開発によって、CFRP製造時の強化材と母材の接着界面に対して使用後に何らかの刺激でその接着界面の結合力を弱められるトリガーを導入することができれば、未燃CFを集塵し、集塵したCFのマテリアルリサイクルを実現することができる。EPの不具合の防止にもつながると共に、バージンCF製造時のCO₂削減や、低価格リサイクル材活用によるCFRPの低コスト化も期待できる。なお、株式会社矢野経済研究所のレポートによると、CFRPの需要量推移から推計された世界で廃棄されるCFRP量は2025年で42,000トン、2030年で99,700トンであり、CFRP燃焼におけるCF未燃率である約0.4%をCFのマテリアルリサイクル可能比率と仮定すると、2025年で168トン、2030年で399トンのCFが回収可能となる。そのようなリサイクルCFによるバージンCFへの代替が可能となった場合には、2025年で3,360トン、2030年で7,976トンのCO₂が削減されるという算出結果を出している。

世界のCO₂排出量が約328億トン（2017年、全国地球温暖化防止活動推進センター）であることを考慮すると、上記のCFリサイクルにおけるCO₂排出削減量は微々たるものではあるが、本提言における研究開発がCFRP以外の多種多様な材料・デバイスに適用されることで、CO₂排出量削減に加えて廃棄処理における環境負荷低減への貢献など、相応の効果が期待できる。

(3) 資源供給リスクの低減

再生可能エネルギーや省エネ・高効率機器の普及拡大によって、化石燃料への依存を減らす一方で、再生可能エネルギー設備や機器の製造に必要な鉱物資源の需要増大をもたらし、鉱物資源への依存を高めることが懸念されている。例えば、電気自動車（EV）に搭載されるリチウムイオン電池に欠かせないリチウムは、現状の技術レベルでEV1台あたり約6.4kg程度必要とされている。IEA世界エネルギー展望（World Energy Outlook）2016の450シナリオによると、EVは2040年に7億1500万台に達することが見込まれているが、そのために必要なリチウムは単純計算で450万トン以上になる。これは2018年の世界生産量8.5万トンの50倍以上である。同じく、EVリチウムイオン電池の正極材として欠かせないコバルトは、EV1台あたり約7kg程度必要とされ、2040年には2018年のコバルト鉱石生産量（13.6万トン）を圧倒的に上回る約490万トンもの量が必要になる。また、再生可能エネルギーの観点では、主にCIS系太陽光発電パネルの製造に必要なインジウムは発電設備容量（MW）当たり約44kg必要とされる。2040年の太陽光発電設備

導入量が2,108,000MWに拡大する見込み（WEO2016）であることを考慮すると、2040年にはCIS系太陽光発電パネルだけで約9万トンのインジウムが必要になる。これは2017年のインジウム地金の世界生産量約720トンの125倍もの量になる。上記の鉱物資源は埋蔵や生産が特定の国に偏在しているものが多く、鉱物資源の大幅な需給拡大は需給バランスを崩し、供給不安定化のリスクを生み出す可能性がある。本提言による研究開発によって、具体的にどの程度の鉱物資源の需給量を削減できるか定量的に示すことは難しいが、例えば、供給リスクの少ない鉱物資源による代替や使用後の材料の中に含まれる鉱物資源を循環ループ内で再利用することが可能になれば、相応の資源供給リスク低減による経済的効果を生み出すことが期待される。

2

研究開発を実施する意義

2.3 科学技術上の効果

(1) 学術的・技術的な発展

本提言の研究開発を推進することにより、相反関係にある機能を含む複数機能の同時実現を可能にするだけでなく、物質循環も考慮した高機能材料を創製するための新たな材料設計指針が確立する。さらに、様々な材料における原子・分子レベルの結合制御やヘテロ界面制御、ナノ・メソ・マクロといった空間的スケールの階層ごとおよび階層を超えた構造と機能の相関関係、材料の時間的な変化に応じた分解・劣化などを高精度に予測・解析できる新しい理論体系とそれを実現する技術体系が構築される。動脈分野においては無機化学、有機化学、物理、材料科学、プロセス工学などの研究分野間の融合・連携、静脈分野においては物理的分離技術と化学的分離技術を専門とする研究者間の融合・連携がそれぞれ進展するとともに、物質循環を共通目標として、動脈分野と静脈分野間の融合・連携も促進される。それぞれの専門分野が持つ知見が糾合することで新しく生まれる学術的成果が期待される。

物質循環を可能にする新たな高機能材料の探索やその特性・特徴の解明だけではなく、電池や磁石、熱電変換材料、半導体といった応用領域との協働により持続可能な循環型社会実現に貢献する新たな材料・デバイス設計技術開発が加速される。さらに、動脈分野における結合・分解制御や界面制御を可能にするために計算シミュレーション技術や計測分析評価技術が高度化される。その高度化された技術が静脈分野にも適用されることで、これまでノウハウでしかなかった様々な分離プロセスの原理が科学的に解明され、より低エネルギー・低コスト・高精度な分離技術へと発展することが期待される。それと同時に、分解・分離に関する新しい学理が構築されることも見込まれる。

静脈側で進化した学理とそれに基づく新しい技術が動脈分野にもフィードバックされることで、動脈分野においても物質循環に向けた新しい学理や技術が生まれ、その新学理・新技術が再び静脈分野の発展につながる、といった好循環が生まれることも期待できる。加えて、新しい学理や技術の発展によって、これまでブラックボックスであった様々なノウハウが科学的に解明されることで、産業界の関心も高まり、産学連携を通してアカデミアの技術の社会実装化が加速されることが期待される。さらに、新たな計測技術や計測機器の開発、新たな作製プロセスやプロセス装置の開発が行われることも考えられる。

上記の進展を加速しサポートするものとして、データ科学の役割もますます重要になると予想される。所望の機能を持つ材料を設計することを目的としたマテリアルズ・インフォマティクスのみならず、意図したプロセス設計を予測するプロセス・インフォマティクス、狙ったプロセスが実現しているのかを確認するための計測インフォマティクスの3者が密に連携し合いながらデータ駆動型の材料開発のスピードアップとコストダウンを可能にする。これまでの材料データベースで不足していた、液相や気相における動的な材料特性に関する熱力学データを整備することで、データ駆動型の材料開発の進化の速度が加速するものと期待される。

また本提言のように鉱物資源供給リスク低減や環境負荷低減を志向した材料開発を行う上では、人文社会科学者との連携によって、技術的可能性だけではなく、社会的必要性、経済的実現可能性などを設計段階から検討する「責任ある研究・イノベーション（Responsible Research and Innovation：RRI）」の考え方を自然科学者も意識するようになることが期待される。

(2) 人材育成

本提言の研究開発を実施することで、電池や磁石、熱電変換材料といった応用領域を超えた複合構造の生成・分解制御による材料設計指針を確立するための新たな異分野融合・連携領域が生まれ、既存の学問分野の枠組みにとらわれない学際的な研究コミュニティが形成されることが期待される。無機材料や有機材料、材料科学などの動脈分野の研究者と、物理的分離技術や化学的分離技術といった分離工学、リサイクル工学を専門とする静脈分野の研究者との分野連携・融合によって、動脈分野と静脈分野の両方の知識・技術を獲

得した学際的な人材育成へとつながる。また、動脈分野においては無機材料や有機材料といった材料の垣根を超えた人材、静脈分野においては物理的な分離プロセスと化学的な分離プロセスを意図的・効果的に使い分けることができる人材がそれぞれ育成される。さらに、物質循環の観点からは、上記の学問分野の連携・融合に加え、天然資源開発から廃棄・リサイクルまでの材料のライフサイクル全体を多様な視点から俯瞰できる社会的・経済的・環境的・倫理的・法的な視点を持つ人材との連携が促進されることが期待できる。具体的には、資源学、鉱物学、地球科学、環境学、環境政策学、経済学、法学、倫理学といった、これまで材料開発とは直接的な関わりがなかった分野との人的ネットワークが構築される。

その結果、社会ニーズを明確に理解し、文理問わず様々な学術領域、理論と実験、基礎研究から応用研究といった広い範囲に興味を持てる人材の育成へとつながることが期待される。

2

研究開発を実施する意義

3 | 具体的な研究開発課題

2章で記載した社会・経済的効果および科学技術上の効果を十分に発揮するためには、材料設計時から静脈の流れも考慮することが必要である。本研究開発戦略を実行する上で取り組むべき主な研究開発課題は「複合構造の生成・分解制御による新機能・新材料設計」である。それを可能にするためには、動脈における既存材料の劣化・破壊機構の解明や静脈における分離・リサイクルプロセスの科学的理解を通じて「複合構造の生成・分解の科学の確立」を行うとともに、「共通基盤技術の高度化」が必要となる。以下では上記3つの研究開発課題における具体的な事例について説明する（図4）。

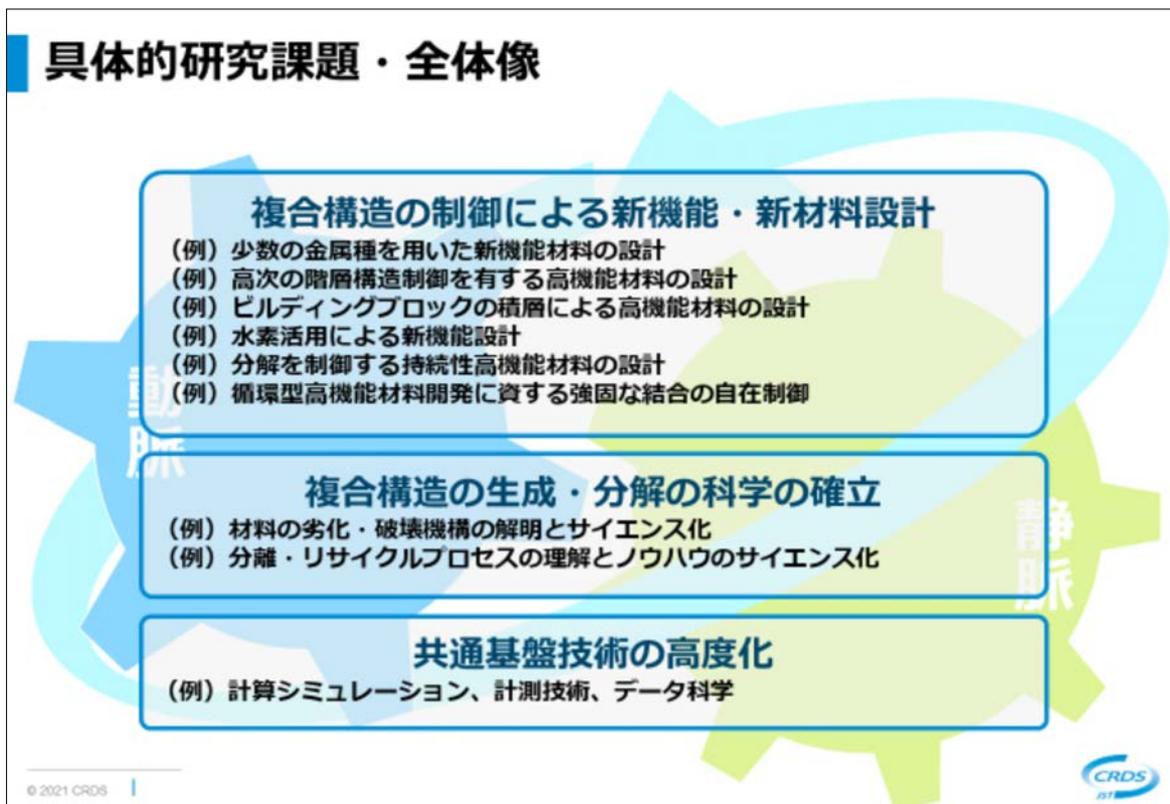


図4 具体的な研究開発課題

様々な工業製品廃棄物に含まれている金属元素の含有率は、それらの金属の元の鉱石中のそれよりもはるかに多いことは珍しくない。それでも、鉱山での採鉱の代わりに工業製品廃棄物からの金属分離抽出が行われないのは、まとまった量の原料が得られないためだけでなく、多数の金属元素が混ざっている原料から、低コストで特定の種類の金属を分離することが困難であるためである。このため、製品廃棄物、いわゆる都市鉱山から回収される金属は貴金属などの価格の高い金属元素に限られている。

また、材料においては複数の異なる組成・構造の混在や空間的な階層構造を制御することで機能を発現する場合が多く、複合構造を精密に制御することが非常に重要である。さらに、逆のプロセスを辿って複合構造内の結合や界面をうまく制御することで使用後の材料の分解や循環が可能になると考えられる。

こうした背景の下、以下では環境負荷低減・物質循環を目指した材料設計指針を確立するために必要となる具体的な研究課題をいくつか例示する。言うまでもなく、下記3-1、3-2、3-3で記述する研究開発課題例は各々が独立して推進されるものではなく、互いに連携・融合しながら推進されることが求められる。

3.1 複合構造の生成・分解制御による新機能・新材料設計

ここでは、複合構造の生成・分解制御技術による新機能・新材料設計に関する研究開発を推進する上で、複数のブロックをいかに組み合わせ、材料に要求される高機能化・多機能化を実現するか、環境負荷低減や物質循環に向けて低コストの分解プロセスをいかに実現するかの観点からの研究開発課題例を示す。

(1) 少数の金属種を用いた新機能材料の設計

近年の新材料開発は、高度化した社会ニーズに応えるため多元素化の方向に向かっており、一つの化合物の中により多くの元素を含むことで求められる機能を実現しようとしている。しかしながら、これらの金属の循環を考えた場合には、金属を分離抽出するコストが経済的に見合わなくなることが多く、結果的に「希少資源をなるべく使わない」という条件を強いることになり、新規材料開発の障壁を上げてしまうことがある。したがって、金属の種類を増やさずに材料機能を向上させることが求められる。

(a) 複合アニオン化による新機能材料設計

一つの方向性として、金属イオンなどのカチオン（陽イオン）ではなく、アニオン（陰イオン）の種類を増やした複合アニオン化合物を用いた新規機能性材料の開発が注目される。酸化物、窒化物、ハロゲン化物、カルコゲン化物などのこれまでの材料は、単一のアニオンと複数の金属イオンから構成されているが、「金属イオンに対するアニオンの配位の仕方」の数は限られているため、通常、このような材料系は探索しつくされ、高度な機能を持った材料を新たに発見することは難しくなっている。しかしながら、酸窒化物、酸水素化物、酸フッ化物のように、複数のアニオンを含む化合物は、金属イオンに配位するアニオンの配列に多彩なバリエーションが生まれるため、準安定相を含めた安定相の数が飛躍的に増大する。このように、従来のカチオン中心だった材料開発の視点をアニオン中心に変えるだけで、未知の材料探索空間が広がってくる。またアニオンとなる元素にはクラーク数上位のものが多く、元素戦略の駆動の一輪を担う材料系になる可能性もある。アニオン中心の物質材料開発に適用できる新たな理論的枠組みの構築、未知の材料探索空間にアプローチするための新たな物質合成手法や計測分析評価技術、シミュレーション技術の開発が必要である。

(b) 低次元ナノ構造の高度利用による新機能材料設計

少数金属による高機能材料の創製に向けたもう一つの方向性は、ナノ粒子や超格子などの低次元ナノ構造を進展させた材料設計である。イプシロン型酸化鉄 (ϵ -Fe₂O₃) ナノ粒子や、量子ドットなどのように、ナノ粒子化によってバルクとしては得られない新機能材料が創成できた例は多く知られている。この方向をさらに進めた例としては、ナノ粒子の表面だけを別の元素に変えたコアシェル粒子がある。燃料電池などに用いられているコアシェル触媒は、コストの低い遷移金属粒子からなるコアの表面に1-2原子層の白金を堆積させた構造を持つが、コアの金属の種類・サイズの選び方によって、水素酸化（アノード）、酸素還元（カソード）能の向上、CO被毒の防止、白金使用量の劇的な削減、などが実現されている。コアの形状としては、ナノ粒子のものも2次元ナノシート状のものも報告されているが、白金と遷移金属を均一に固溶させた合金系とは明らかに質的に異なる機能が得られている。

低次元ナノ構造の高度利用のもう一つの方向としては、2次元物質の人工的積層がある。2次元物質の代表であるグラフェン2層を、互いに1°程度の角度（マジックアングル）回転させて積層することで超伝導が発現したことなどが、その例に当たる。ありふれた物質のナノ構造に、人為的な変調を加えることで、予想外の機能が発現する可能性が秘められていることから、様々な化合物に対してナノ粒子化などの低次元ナノ構造を適用できる手法開発が必要である。

(2) 高次の階層構造を有する高機能材料の設計

階層構造を持つ究極の材料は生体である。最小単位であるアミノ酸をもとにして、一次構造から三次元の立体構造を作り、それらが互いに作用することで機能発現をする。炭素原子を主として共有結合のような比較的強い結合により構造のもととなるモノマーやポリマー骨格を作り、それらが比較的弱い相互作用により2次元、3次元構造体を作り出す。さらに、それらが複雑に絡み合い、より高次の階層構造が組み立てられる。このように有機材料の階層構造を作るときに重要なのが、マルチスケールにおける構造制御である。構造が階層化していると同時に物性や機能も階層化しており、それらがマルチスケールに対応している。いかにして階層構造を作るか、結晶化、反応空間制御、外場制御、欠陥制御などのような合成手法を駆使し、または、これらを組み合わせることで、原子レベルからマルチスケールで階層構造を制御することが非常に重要である。

階層構造制御を軸とした材料創製に関して代表的なものとして、タイヤに用いられる高分子ゴム材料が挙げられる。スケールオーダーに対応した階層構造を持ち、グリップ機能、摩耗機能、疲労破壊といった機能が階層構造に対応している。さらに有機材料では、材料を構成する分子が自由に動く特徴があり、動的な環境において材料の構造が変化することがある。すなわち時間に応じた階層構造と機能の相関を考える必要がある。最近の非常に興味深い研究成果として、金属有機構造体（MOF：Metal-Organic-Frame）と機能の相関関係が挙げられる。MOFが作る空間を利用したモノマーサイズ程度の小さな反応場において高分子重合反応が効率良く進行するという、静的で平均的な構造だけでは説明できない現象（機能）が観測されている。このように分子運動や拡散、非平衡等の分子（分子集合体）の動的挙動からなる新たな機能発現が見出されている。MOFでは、周期表の様々な元素を有効活用することができ、原子レベルでナノ空間構造を制御するだけでなく、マルチスケールに応じた階層構造を制御できる可能性がある。

このように、分子間に働く弱い相互作用を用いた機能性有機材料の創製において、スケールの階層のみならず、分子の動的視点からの時間的な階層を巧みに制御した材料創製の例は増加傾向にあるが、その材料の機能発現については偶然の発見に頼るものが多く、構造と機能の相関関係を科学的に明らかにされているとは言えない。各階層における構造と機能の相関を緻密に解明し、多機能・高機能材料の設計指針とすることが必要となる。そのためには計算科学によるシミュレーションの精度向上やオペランド計測を駆使した材料製造過程の精緻な観測などによる階層構造解析手法の確立も必要である。

(3) ビルディングブロックの積層による高機能材料の設計

グラフェンの発見を契機として、様々な2次元機能性原子薄膜を対象とした物性研究が精力的に行われ、原子層レベルで薄い材料の作製や物性測定ノウハウが蓄積されている。特に、層状物質のバルク材料に対して化学的剥離法を用いることで、厚み方向には原子層スケール（数nm）、かつ、二次元面内にはマクロスケール（数 μm ～数十 μm ）の2次元機能性原子薄膜を得ることができるようになっている。

2次元機能性原子薄膜は、その母体となったバルク材料とは全く異なる新奇な物性を示す例が多く、それ自体が基礎の観点からも応用の観点からも非常に興味深い研究対象である。また近年では、異なる種類の2次元機能性原子薄膜を積層したり、同種の2次元機能性原子薄膜をバルクと異なる角度で積層したりすることで、元の物質では現れなかった物性（磁性、超伝導など）を発現させる研究がなされ始めている。

このように、2次元機能性原子薄膜をビルディングブロックとした、新しいナノ構造、特異な性質を持った新材料の開発は、現在強く求められている材料性能向上のための有力な手段であるだけでなく、積層の逆のプロセスによって、元のビルディングブロックに分解することや、さらに、それらを分離してリユースできる可能性も秘めている。実際に、これを実現するためには、まずは、ブロックとなる2次元機能性原子薄膜のバリエーションを増やすための製造プロセス開発や、優れた物性を発現する積層構造を設計する理論的・計算的手法の確立、設計通りに任意の2次元機能性原子薄膜を順次積層するためのプロセス開発などが必要となる。さらに物質循環に向けて、創製された材料に対して、低エネルギー・低コストで再び元のビルディングブロックへ分解し、分離・回収するための技術を開発することが必要である。

(4) 水素活用による新機能設計

これまではあまり使われてこなかった元素の積極活用が突破口を開く可能性がある。その典型的な例として水素の有効活用が挙げられる。

材料中の水素は、共有結合的水素 ($H^{cov.}$)、原子状水素 (H)、プロトン (H^+)、ヒドリド (H^-) のような様々な状態を取りうるため、水素の状態が周囲の環境や水素濃度によって変幻自在に移り変わったり、水素が材料中を速く移動したり、その動きにより他のイオンの拡散を加速させたりといった、特異な現象を起こすことが知られるようになってきている。このような水素の特性が、固体電解質、高濃度水素吸蔵材料などの機能材料として活用できる可能性があるため、各材料・デバイス中における水素の役割を深く理解することが求められる。また、水素はほぼ全ての元素と反応しやすい性質を用いることで、化合物から目的金属を分離する技術にも活用できる可能性がある。さらに、かつては鉄鋼材料の劣化原因として忌避すべき対象だった水素脆化を、例えば静脈プロセスの分離・分解手段として活用できる可能性も秘めており、水素が持つ特性をうまく制御することで、材料の安定性と分解性を制御することも可能になると考えられる。そのためには、水素の量や状態を観察する手段、材料中の水素の状態を制御する手法、新奇な水素化物の探索、水素が関与した物性を予測するためのシミュレーション技術の開発が必要である。

このような特異な性質は水素以外の軽元素でも現れる可能性があるため、これまであまり注目されてこなかった他の元素についても隠された機能を探索することも必要である。

(5) 分解を制御する持続性高機能材料の創製

「持続可能な循環型社会」の実現に向けて、上記(2)のように階層構造を制御した高機能材料に対する分離・循環という観点からの材料創製の研究開発が必要となる。階層構造制御された材料においては、その階層化された構造をブロックとして再利用できるように循環設計することが考えられる。そのためには階層構造の中に、ある外部刺激に対して分離を促進するトリガーを原子間もしくは分子内、あるいは分子間に導入しておく必要がある。例えば、光で剥がせる液晶接着材料のように、外部刺激応答性分子そのものの性質を分離に利用する例が出始めており、非共有結合を利用して組み上げられる機能性有機材料は、材料の使用後に比較的温和な条件の下、階層化された構造単位で回収することが可能になる。例えば、ゴムの主成分であるポリマー鎖を架橋部分に導入することによってゴムの強度を上げている例があるが、架橋部分にある外部刺激により切れやすくする工夫をしておけば、そのポリマー鎖のみを回収して再利用することが可能となる。このように、材料の一部に不安定構造を導入することが鍵となるが、材料全体の強度や機能を犠牲にすることは本末転倒であるため、通常使用されるときには不安定構造を発現させないようにすることが重要である。

一方、生分解性プラスチック開発に見られるように、分離を考慮した材料開発においては経済合理性の問題が必ず取り上げられる。意図した分離には必ずエネルギーが必要となり、それが新しく作るよりもエネルギー的に不利にならないような循環設計をあらかじめ考慮する必要がある。

また、サーキュラーエコノミーの観点から考えると、材料のリサイクルだけではなく、材料の寿命や耐久性、自己修復性など、長い時間スケールでの材料の変化に対応した設計も考慮に入れた研究開発も並行して行う必要がある。

(6) 循環型高機能材料開発に資する強固な結合の自在制御

上記(5)では、ある程度温和な条件で分離・分解が可能な材料に着目したが、それよりも強固な結合の切断を介した分解が必要な循環型高機能材料においては、その材料開発においても有用な結合生成反応が必要であると同時に、結合を切断する反応の開発も必要となる。例えば、我々の身の回りにある化学品の製造では、ナフサクラッカーなど、化石原料を触媒により分解しプロピレンのような化学種の最小単位から再構築して作られている。循環型有機材料に対しては同じルートが考えられるが、多大なエネルギーをかけて分解するスキームは環境負荷的に不利であり経済合理性も担保できないため、共有結合の切断を伴う有機材料のリ

サイクルにおいては、いかに最小のエネルギーで結合切断できるかが鍵となる。そのための新しい触媒の開発や酵素による結合切断などの新技術開発が必要である。

さらに、有機材料において喫緊の課題としてプラスチック（ポリマー）のリサイクルが挙げられる。プラスチックはこれまで我々の生活を便利に豊かにしてきた有機材料の一つであり、現在の生活水準を維持するためにかけがえのないものとなっている。しかしながらプラスチックのライフサイクルの長さから、全世界的な環境汚染問題となっており、その生産量・消費量の削減や各国でリユース・リサイクルの施策がなされている。一方で、コロナ禍という社会変化の影響で、プラスチックの需要が高くなってきていることも事実である。そういった社会背景の下、プラスチックのリサイクルの技術開発が盛んになってきている。プラスチックのリユースや一部のリサイクルは別の価値の低いプラスチック製品として活用される、いわゆる“カスケードリサイクル（ダウンサイクル）”されているが、エネルギーをかけてリサイクルすることを考慮すると元のプラスチックより価値の高い材料を作るのに適した分子（モノマー）に分解するケミカルリサイクル技術、いわゆる“アップサイクル”戦略を確立することが望ましい。効率的なリサイクルを可能にするためには、より低い温度で解重合を達成できる収率・選択性の良い触媒や効率的なリサイクルプロセスの開発、また、逆の発想として解重合を促進するトリガーを持つ機能性ポリマーの開発も重要である。

3.2 複合構造の生成・分解の科学の確立

ブロック間結合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、現在の分離・リサイクルプロセスの科学的な理解を通じて「複合構造の生成・分解の科学」を構築することが必要である。

(1) 材料の劣化・破壊機構の解明とサイエンス化

材料において、外部刺激による分離や破壊がどのように起こり、それが連鎖していくか、材料界面での原子・分子レベルの挙動を時間スケールで追う必要がある。そういった研究の一つとして、材料の劣化機構の研究が挙げられる。材料の劣化機構の解明は実用面からも重要視されているが、劣化機構を明らかにし、サイエンスとして体系化することができれば、使用後の材料の分離・循環を自在に制御できる可能性がある。そのためには、材料界面における分離や破壊挙動を正確に理解する必要があり、新しい理論的枠組み、計算シミュレーション手法、計測評価技術が必要である。例えば、有機材料においては、構造が比較的弱いゆえに観測する技術自体が少なく、分光学的な手法により活性種の捕捉や同定を行うことで界面の現象を捉えるにとどまっている。今後は計算科学やシミュレーションと組み合わせ、分離や破壊の現象を可視化していくことが重要である。また最近では、階層構造を持つ有機材料の機能において、従来の空間構造の捉え方すなわち静的・平均的な構造では説明できない現象が報告されている。ここでは、原子・分子の運動や拡散、非平衡などといった時間的に変動する階層性が効いている可能性がある。この時間的な階層性が支配するサイエンスを体系化することで、材料の分解や循環だけでなく、材料の寿命制御や自己修復といったサーキュラーエコノミー全体をカバーする新しい学理が構築される可能性がある。

(2) 分離・リサイクルプロセスの理解とノウハウのサイエンス化

工業材料の多くは他の材料と共に部品の一部として使われている。資源循環が社会にとって、コスト面・エネルギー面で意味を持つためには、図3のなるべく内側の円で資源循環を行うための物理的分離技術を確立すると同時に、最外の円である化学的分離技術に必要なエネルギー、コストを可能な限り下げる必要がある。上述の3-1においても、最終的に循環を実現するためには、これらの物理的・化学的分離技術を用いる必要がある。

物理的分離技術は、原子/分子→粒子/結晶→バルク材料→部品→モジュール/製品といった、材料の階層的集合体があるときに、何らかの手段で、再利用したい部分と隣接する異種材質の界面を剥離させ、目的の部分を分別収集するものである。現状の物理的分離技術では、最初に分離を機械的な破碎・粉砕に拠っており、投入されるエネルギーのうち、回収する単体分離に用いられている割合は数%と言われている。もし、機械的力以外の、電気、光、超音波といった外力を、材料全体ではなく目的とする界面に集中させることができれば、物理的分離技術に掛かるコスト、エネルギーは飛躍的に削減されることになる。衝撃波を用いた電子部品の基板からの電子部品の剥離や、電気パルスを用いたリチウムイオン電池の集電用アルミニウム箔からの正極活物質の剥離などで、機械的粉砕よりも再利用に適した分離ができることが示され始めているが、これをもっと広い範囲の製品に適用するためには、分離技術だけでなく、材料/デバイス/製品の製造段階を含めた統合的な分離・循環に適した機器設計技術の確立と、異種界面にエネルギーを集中させるための「分解の科学」の構築が望まれる。また、界面のミクロスコピックな構造を理解し、刺激と分解に関する基礎学理を構築する必要がある。

一方、化学的分離技術は、物理的分離技術後の材料から、回収したい元素を抽出するものであり、一般には製錬や精錬と呼ばれる。基本的には、目的の元素と、それ以外の元素が異なる相（「液相と気相」、「固相と気相」、「液相1と液相2」など）に分ける作業を行う。相分離を起こすために、高温、酸アルカリなどの化

学薬品、電解・電析などを使う場合が多く、一般にエネルギー投入量が大きくなる。金属製錬は歴史的に非常に古くから行われているものの、金属種によっては何十年も技術革新がないまま同じ手法が使われている場合が多い。それらは、ブラックボックスのままノウハウだけが積み重なっている状況である。つまり、ある程度の経済性が確保されることで、産業的にはそれ以上の手法改良のモチベーションがなくなること、高温・高腐食性などの条件により、製錬反応の詳細な観察が困難であることが原因と考えられる。しかしながら、化学的分離技術が資源循環の最終段階で必ず通るプロセスであり、ここが科学的に理解され効率を上げることができれば、資源循環における大幅なコストダウンにつながり、これまで都市鉱山から回収することができなかった金属元素まで回収が可能になると考えられる。そのため、精錬・製錬の中でブラックボックスとして扱われていた部分に科学的なメスを入れることで、例えば、電解製錬時の電極反応のミクロスコピックな理解、物質の高温気体の正確な熱力学関数の計算・計測、界面反応の理解などを深め、第一原理分子動力学計算やマルチスケール計測を製錬分野に適用していくことが必要である。

3.3 共通基盤技術の高度化

上記3-1、3-2の研究課題例から明らかなように、物質循環を目指した複合構造の生成・分解制御を行うためには、平衡・定常状態だけではなく、非平衡・非定常状態も高い精度で扱えるシミュレーション技術の開発が求められる。また、実際に起こっている現象を観測するための計測評価技術の高度化も必要となる。以下では、本提言における研究開発課題を推進するに当たって、動脈側・静脈側の共通基盤技術となるシミュレーション技術や計測評価技術に関して取り組むべき課題を記述する。

無機材料に対してよく用いられる第一原理計算は精度が高い一方、計算コストが高い、大規模計算が困難という弱点がある。近年、これらの弱点を克服するために、AIや機械学習といったデータ科学的手法の併用（例えば、データ同化）やスーパーコンピュータ「富岳」が活用されている。それによって第一原理計算の適用範囲が拡大しつつあるが、それでも平衡論、定常論にとどまってしまう。非平衡・非定常状態を扱うための一つの方法として、静的な実験データに加えて、反応・プロセスなどの時間発展を追える動的な実験データも含めたデータ同化（モデルに実際の観測値を入力し、より現実に近い結果が得られるようにする手法）が挙げられる。しかしながら、例えば無機材料系のデータベースとして非常に充実している米国Materials Projectにおいても静的な性質に関するデータがほとんどで、本来の材料で重要な役割を果たす欠陥やドーピング量をパラメータとして構造変化といった動的なデータを含めたデータベースは現状では存在しないと言っても過言ではない。そこで、今後は静的のみならず動的な性質のデータの収集・蓄積・活用するためのデータベースの構築、第一原理計算の拡張が必要である。

他方、高分子などの有機材料に対しては、シミュレーションソフトウェアの充実が必要である。通常、有機材料には階層構造が存在し、大きなスケールの階層をシミュレーションするには、全ての原子を対象にした計算は不可能であるため、必要なエッセンスのみを抽出した粗視化モデルを構築する必要がある。粗視化することによって、空間・時間ともスケールを大きくすることが可能になる。しかしながら、粗視化の際にどのような要素を抽出するかによって結果が変わってしまうため、初期モデルをどう構築するかが最も重要な課題である。また、階層構造を有する材料を設計し、機能を予測する際には、各階層における構造と物性の相関関係が必要となる。例えば、階層性の高い高次構造を作っていくとき、一次構造では構造と機能の相関が1:1であったとしても、製造過程によって作られる高次構造が変化するため、一次構造と高次構造における機能の相関は1:多となる。一方で、高次構造における構造と機能の相関は1:1であるものの、その機能が下位の階層の構造とどのような相関があるのかは自明ではない。そのため階層構造制御された材料が持つ機能や物性を精度よく予測するためには、階層を跨ぐパラメータ設定が重要な役割を担うことになる。その際、実際の構造観察の結果を用いることで高次の階層構造における機能を精度よく予測できることが知られている。つまり、仮想的なモデル計算の結果と実空間における計測結果（X線、CT画像、AFM画像、TEM・SEM画像など）との対応を丁寧に追っていくための手法開発が必要である。

一方、これまでシミュレーション技術は動脈側で活用され進化してきており、分解・分離・リサイクルの研究にはほとんど転用されていない。例えば、製錬研究では固相だけではなく、液相や気相の現象解明が必要になるものの、液体や気体、両相共存の界面といった複雑なものを対象にした第一原理計算は非常に少なく、既存の熱力学データベースも必ずしもそのすべてが正確なわけではない状況である。そのため、第一原理計算を溶液、固体表面、気液界面、固液界面などの非平衡・非定常状態の解析にも適用できるよう高度化することが必要である。また、それらの計算の精度を上げるためにも、気相や液相の熱力学データを収集する仕組み作りも必要であり、ハイスループットの実験手法や反応の実時間計測手法などを導入することも重要である。さらに、それら動的な熱力学データを収集するためには、気相や液相における高い空間分解能と時間分解能を持った計測手法の開発も必要である。

4 | 研究開発の推進方法および時間軸

4.1 異分野連携・融合を促進する施策

本提言の研究開発を効率的に実行するためには、複合構造の生成・分解制御による材料設計指針の確立を共通目標とした場を形成することが必要である。つまり、動脈分野（材料科学、化学、物理学、計算科学など）と静脈分野（リサイクル工学、分離工学など）に関連する様々な分野の研究者が参入し、影響を与え合う機会を作ることである。通常、動脈分野と静脈分野はそれぞれのコミュニティで研究が行われ、また個々の学問分野の中でも特定の材料やプロセス、あるいは特定のアプリケーションでより密接な情報交換や研究が行われていることが多い。本提言のような分野横断的なテーマは、そうした個々の枠を超えて多様な専門性や科学的知見、ノウハウを持った人材が一堂に会することで新たな展開を促すきっかけになると考えられる。そのため、異なる学術的背景や研究動機を持つ異分野の研究者が、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になる。

例えば、動脈分野と静脈分野、さらに人文・社会科学との連携を促進するために、以下のような二段階を考える。

第一段階では、(ア) 関連する学協会が共同で開催する研究会やシンポジウム開催による連携促進、(イ) 目的志向型の公募領域を設定することによる動脈分野と静脈分野の連携促進、(ウ) 社会インパクト評価やリアルタイム・テクノロジーアセスメントの実施を通じた文理連携促進等を同時並行で行うことが求められる。

(ア) については、既存の学協会の枠を超えた共同研究会のような体制を構築し、様々な社会課題に対して各分野において解決すべき課題の洗い出し、複数分野にまたがる共通課題の認識等について定期的に議論・意見交換する場を設定することが重要である。初めは言葉が通じなかったとしても継続して議論し続けることで分野特有の考え方の違いを相互理解し、協働すべき課題が見えてくるものと考えられる。関連する学協会としては、日本材料科学会、日本化学会、日本物理学会、応用物理学会、日本 MRS、日本金属学会、高分子学会、電気化学会、化学工学会、日本分析化学会、マテリアルライフ学会、資源・素材学会、日本エネルギー学会、環境資源工学会、日本 LCA 学会、廃棄物資源循環学会、エネルギー・資源学会、日本鉱物科学会などが挙げられる。

(イ) については、公募領域内で採択される個々の研究プロジェクトでは必ずしも動脈分野と静脈分野の共同研究を含むことを条件とはしないものの、領域全体としては必ず動脈分野と静脈分野からの提案を一定割合ずつ採択する方針とする。同じ公募領域内に少人数のチーム型研究もしくは個人型研究を混ぜ合わせることで、チーム間、個人間、チーム-個人間に連携が生まれやすくなることが想定される。これらの公募領域の責任者である運営総括（Program Officer：PO）には、動脈分野と静脈分野のコミュニケーション促進を図るための会合（研究会など）の設定や、動脈分野と静脈分野の連携・融合を深める共同研究の実施を積極的に推進する役割が期待される。また PO を含む個々の研究プロジェクトを評価するアドバイザー陣には、アカデミアや産業界から、理工学系のみならず経済学なども含めた多様なバックグラウンドを持つ人材を揃え、個々の研究プロジェクトに対して、短期的な成果だけを求めすぎず、長期的な視点からも助言・評価を行うことのできる体制を構築することが望ましい。これによって、サイエンスとしての更なる進展を後押しするのみならず、動脈分野と静脈分野の連携・融合の観点からもサポートを行い、研究者らと一体となってその空気を醸成していくことが求められる。当然、これらは学際的な人材育成にもつながることが期待される。

(ウ) については、今回の主要テーマである「物質循環を目指した複合構造の生成・分解制御」を対象に、

社会に及ぼすインパクトの評価や、社会的・倫理的課題や社会実装に向けた課題などを早期から探索・検証し、社会的議論を深め制度設計につなげるためのリアルタイム・テクノロジーアセスメントを行う。当該技術が将来へ及ぼす影響に関する認識をベースに、(ア)や(イ)の動脈・静脈分野の研究者と定期的に意見交換や共催シンポジウムを行うことで、人文・社会科学と自然科学の連携・融合が加速し、本提言を実現するために必要な研究環境が整うことが考えられる。

第二段階では、第一段階で構築された異分野間の連携・融合体制を存分に活かして、材料・製品のライフサイクル全体を考慮した産学連携型の公募領域を設定し、社会実装に向けた研究開発を実施する。その際、例えば動脈分野と静脈分野が1つのチームとなって研究を実施することを条件することもありうる。個々の研究プロジェクトでは、社会ニーズを満たす目標を設定し、動脈から静脈までのライフサイクル全体を見渡した材料開発を推進し、循環型社会実現に直接的に貢献する研究成果創出に向けた研究成果の創出を狙う。

また上記の段階的な連携促進とは別に、社会・経済的インパクトの大きいターゲット（電池、磁石、複合材料、プラスチックなど）に対しては、中規模拠点を日本に複数形成するような拠点形成型の施策も考えられる。科研費やこれまでの施策によって技術蓄積がなされてきた大学や研究機関には既に連携・融合の基盤が一定程度築かれていると期待されるため、それらを活用することも効果的な方法と考えられる。なお拠点形成型の施策においても、設定された目標あるいはその下での進捗については、2～3年ごとに評価もしくはステージゲートを設け、適切な評価・助言を行うことが肝要である。

今後、こうした分野を牽引していく人材は、動脈側と静脈側の双方の視点や知見をもつ人材であろう。特に、静脈分野の研究では、動脈側である材料創製分野で取り入れられているような最先端の手法や方法論、例えばデータ駆動型科学（例：マテリアルズ・インフォマティクス）、計算科学的アプローチ（モデリング・シミュレーション）、高度な計測・観測技術の活用など、の導入は必ずしも十分に進んでいるとは言えない状況である。動脈分野の研究者と共に研究開発に取り組むことにより、そうした近隣分野における最先端のツールや方法論を取り込む好機にもなり得る。前述のような枠組みが設定されることで、物質循環を目指した高機能材料の創製を可能にする新たな研究コミュニティ構築への道が拓かれ、その中から将来を担う人材が切磋琢磨し育成されていくと期待される。

4

4.2 自然科学と人文・社会科学の協力体制構築のための方策

本提言の実施にあたっては、自然科学と人文・社会科学の協力体制を構築することが必要不可欠である。なぜならば持続可能な循環型社会の実現のためには、天然資源開発から廃棄・リサイクルまでの材料・製品のライフサイクル全体を見渡した上で「次の一手」を特定することが必要である。そのためには、ライフサイクル全体を多様な視点から俯瞰し、社会的・経済的・環境的視点を総合的に勘案できる、言わば総合知が必要となる。これの実現のためには当然ながら自然科学分野の専門家だけでは不十分である。

例えば、既に廃棄問題が顕在化しつつある、電池や複合材料といった応用領域においては、今後はリユース・リサイクルを前提とした材料や製品の設計が求められることが想定される。その際、技術的可能性だけではなく、社会的必要性、経済的実現可能性などを設計段階から検討することが求められる。一方、重要インフラや装備品等、耐久性や信頼性を最重要視すべきような領域においては、むしろリサイクル等をどこまで適用すべきかなど、新たに生じるリスクや、それらへの技術的・社会的な対処法（用途毎に基準を決めるなど）の検討も考えておくことが必要になる。

このように科学技術に求められる様々な期待を多面的に捉え、考慮して研究に取組もうとする姿勢は一般的に「責任ある研究・イノベーション（Responsible Research and Innovation：RRI）」という考え方として認識されている。本提言が提案する研究開発コンセプトに基づく研究開発を社会が望む方向に推進するためには、RRIの理念が必要である。

自然科学と人文・社会科学の協力体制の構築には、資源学、鉱物学、地球科学、環境学、環境政策学、経済学、法学、倫理学など、これまで材料開発とは直接的な関わりがなかった専門家も交えた議論の場を作ることが必要である。しかしながらこのような多種多様な分野の専門家を集めた場を作ることは容易ではないため、4-1で提案した段階的な連携促進方法が適切と考えられる。

またこうした場を利用して、開発すべき技術が国の産業競争力の強化につながるのかを早期に見極めるための議論を、産業界の参画も促しつつ行うことも必要である。本提言における研究開発によって創製された安定性と分解性の制御を可能とする機能性材料が実際にどの製品や部品に使われているか、それらがどのように寿命を迎えるかをモニタリングすることが重要である。さらに、回収・分解・分離・再利用といった物質循環を産業界の主体的な活動として根付かせるためには、標準化や規制などの国際的ルール形成戦略をアカデミア・動脈産業・静脈産業・関連行政の協働で検討し、戦略的に活用することも進めるべきである。

4.3 時間軸

本提言では今後10～15年程度の間には動脈分野と静脈分野および人文・社会科学の連携・融合を促進しつつ、いくつかの研究テーマについては、産学官連携によって社会実装を目的とした研究開発を実施できるレベルにまで引き上げることを目指す。以下に示す(1)～(3)の研究推進を図りながら、たとえ研究開発期間の途中であっても社会実装に向けた研究成果が創出された際には速やかに経済産業省やNEDOによる支援、もしくは産業界への橋渡しを実行し、5～10年程度の研究開発期間を経て、社会実装されることを目指す。

また、ここで生まれた材料が社会に浸透した後、海外に流出することも含め、どのようにモニタリングするか、回収するののかについて、国際標準化を含め、検討していく必要もある。

(1) 第一段階

下記(ア)(イ)(ウ)を同時並行で実施し、個々の研究成果を達成しつつ、動脈分野・静脈分野・人文・社会科学の連携の意識醸成を行う。

(ア) 関連学協会による共同研究会

定期的(例えば、半年に1回)に複数学会共催の研究会・シンポジウムを実施

(イ) 目的志向型の公募領域

実施期間：5～7年

実施機関：文部科学省/JST

留意事項：小規模なチーム型研究と個人型研究を同じ公募領域内で推進。運営サイドは動脈/静脈連携促進に配慮しつつ、長期的視点での運営・助言を行う

(ウ) 社会インパクト評価およびリアルタイム・テクノロジーアセスメント

実施期間：5～7年程度

実施機関：文部科学省/JST

留意事項：上記(ア)(イ)の研究者とも定期的に意見交換を行い、第二段階へ向けた異分野連携・融合の環境整備につなげる

(2) 第二段階：産学連携型の公募領域

実施機関：5年程度

実施機関：(研究目標に応じて)文部科学省/JST、もしくは、経済産業省/NEDO

留意事項：各プロジェクト内ではライフサイクルアセスメントを強く意識した共同研究が必須。運営側は各プロジェクトで設定された社会ニーズを踏まえた目標に対して、ステージゲートを含め適切に評価・助言を行う

(3) 社会インパクトの高いターゲット設定(POC達成)型の研究拠点

実施機関：おおむね10年

実施機関：文部科学省、経済産業省

留意事項：RRIも考慮した目標設定。2～3年ごとに評価もしくはステージゲートを設け、運営側は適切な評価・助言を行う。

付録1 検討の経緯

- ・ JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、2019 年度に戦略プロポーザルを作成すべきテーマの候補を CRDS 戦略スコープ 2019 策定委員会において指定し、2019 年 4 月に CRDS 内にプロポーザル作成のための検討チームを発足させた。その後、チームにおいて提言作成へ向けた調査・分析・検討を重ねた。
- ・ チームでは、調査によって国内外の研究開発動向・技術水準を明らかにしながらスコープの焦点を絞り、その過程において提言の方向性を検討するため、以下の有識者との意見交換・インタビューを実施した。
- ・ その上で、CRDS が構築した仮説を検証する目的で、科学技術未来戦略ワークショップを開催した（次々頁参照）。
- ・ CRDS では以上の調査・分析の結果と、ワークショップにおける議論等を踏まえてさらに提言内容について検討を重ね、2021 年 3 月に本戦略プロポーザルを発行するに至った。

■意見交換・インタビューを実施した識者

（所属・役職は実施時点）

氏名	所属・役職
稲邑 朋也	東京工業大学 科学技術創成研究院 教授
射場 英紀	トヨタ自動車株式会社 先端材料技術部 チーフプロフェッショナルエンジニア
植村 卓史	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授
宇治原 徹	名古屋大学 未来材料・システム研究所 教授
宇田 哲也	京都大学 大学院工学研究科 教授
大木 達也	産業技術総合研究所 環境創生研究部門 総括研究主幹
大越 慎一	東京大学 大学院理学系研究科 教授
折茂 慎一	東北大学 材料科学高等研究所 所長/金属材料研究所 教授
陰山 洋	京都大学 大学院工学研究科 教授
加藤 隆史	東京大学 大学院工学系研究科 教授
岸本 康夫	JFE スチール株式会社 スチール研究所 研究技監
北川 宏	京都大学 大学院理学研究科 教授
君塚 信夫	九州大学 大学院工学府 教授
久保 百司	東北大学 金属材料研究所 教授
家守 伸正	住友金属鉱山株式会社 相談役
小山 正史	電力中央研究所 原子力技術研究所 首席研究員
佐藤 一彦	産業技術総合研究所 触媒化学融合研究センター センター長
佐々木 高義	物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 拠点長
塩谷 光彦	東京大学 大学院理学系研究科 教授
清水 史彦	三菱ケミカル株式会社 Science & Innovation Center Polymer Laboratory 所長
庄司 哲也	トヨタ自動車株式会社 先端材料技術部 チーフプロフェッショナルエンジニア
杉本 諭	東北大学 大学院工学研究科 教授

館山 佳尚	物質・材料研究機構 エネルギー・環境材料研究拠点 グループリーダー
田中 功	京都大学 大学院工学研究科 教授
玉尾 皓平	豊田理化学研究所 所長
塚崎 敦	東北大学 金属材料研究所 教授
常行 真司	東京大学 大学院理学系研究院 教授
所 千晴	早稲田大学 理工学術院 教授
中井 浩巳	早稲田大学 理工学術院 教授
永島 英夫	九州大学 先導物質化学研究所 教授
中村 正治	京都大学 化学研究所 教授
福岡 正人	広島大学 名誉教授
福島 孝典	東京工業大学 科学技術創成研究院 教授
松八重 一代	東北大学 大学院環境科学研究科 教授
村井 眞二	大阪大学 名誉教授/奈良先端科学技術大学院大学 特任教授/岩谷産業株式会社 取締役(社外)
村上 進亮	東京大学 大学院工学系研究科 准教授
森田 裕史	産業技術総合研究所 機能材料コンピューショナルデザイン研究センター 研究チーム長
森本 浩一	海洋研究開発機構 特任参事
柳田 剛	九州大学 先導物質化学研究所 教授
依田 智	産業技術総合研究所 化学プロセス部門 研究チーム長

■科学技術未来戦略ワークショップ「未来材料開拓イニシアチブII～高機能材料の創製・分離・循環を実現する階層構造の自在制御～」

開催日時：(第一回) 2020年6月17日(水) 9:00～12:10
 (第二回) 2020年6月20日(土) 9:00～12:00
 (第三回) 2020年6月20日(土) 14:00～16:00

開催会場：オンライン会議 (Teams)
 TKP市ヶ谷カンファレンスセンター バンケットホール8B

プログラム：

オーガナイザー	曾根 純一 (JST-CRDS)
ファシリテーター	甲村 長利 (JST)
司会	宮下 哲 (JST-CRDS)

第一回

9:00～9:15	開会挨拶、趣旨説明	曾根 純一 (JST-CRDS)
		宮下 哲 (JST-CRDS)

先行施策の状況と将来展望

9:15～9:40	「“水素科学”によるマテリアル革新力強化 -新学術ハイドロジェノミクスからの示唆-」	折茂 慎一 (東北大)
9:40～10:05	「複合アニオン化合物の創製と機能開拓：現状と将来展望」	陰山 洋 (京都大)
10:05～10:30	「[分子技術]・[融合マテリアル]における階層構造と機能発現」	加藤 隆史 (東京大)

計算科学・シミュレーションのトレンド・課題・将来展望

10:35～11:00	「シミュレーション研究から考える高分子材料における階層構造の問題」	森田 裕史 (産総研)
11:00～11:25	「電池・触媒の高機能化と階層構造制御に向けた計算科学」	館山 佳尚 (NIMS)
11:35～12:10	ミニ討論 (ファシリテーター 甲村 長利)	
12:10	閉会挨拶	曾根 純一 (JST-CRDS)

第二回

9:00～9:15	開会挨拶、趣旨説明	曾根 純一 (JST-CRDS)
		宮下 哲 (JST-CRDS)
9:15～9:25	第一回振り返り	眞子 隆志 (JST-CRDS)

階層構造制御のトレンド・課題・将来展望

9:25～9:50 「2次元ナノシートを用いた階層構造の構築、設計と機能開拓」
佐々木高義 (NIMS)

9:50～10:15 「有機材料における階層構造制御」
植村 卓史 (東京大)

分離・リサイクル技術のトレンド・課題・将来展望

10:20～10:45 「資源循環に求められる構造制御と物理的分離技術の開発動向」
所 千晴 (早稲田大)

10:45～11:10 「材料科学に基づいた製錬反応の根本的理解」
宇田 哲也 (京都大)

11:10～12:00 ミニ討論 (ファシリテーター 甲村 長利)

12:00 閉会挨拶 曾根 純一 (JST-CRDS)

第三回

14:00～14:25 開会挨拶、論点整理 曾根 純一 (JST-CRDS)
宮下 哲 (JST-CRDS)

14:25～16:00 総合討論 (ファシリテーター 甲村 長利)

論点1. 提言の骨子の仮説検証

2. 戦略的に取り組むべき研究開発課題と時間軸

3. 異分野連携・融合の方策、産学連携の課題

4. 目標とするゴール、研究開発のアウトピットとアウトカム、ビジョン

16:00 閉会挨拶 曾根 純一 (JST-CRDS)

ワークショップ参加識者

(発表者)

- ・ 植村 卓史 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授
- ・ 宇田 哲也 京都大学 大学院工学研究科 教授
- ・ 折茂 慎一 東北大学 材料科学高等研究所 所長/金属材料研究所 教授
- ・ 陰山 洋 京都大学 大学院工学研究科 教授
- ・ 加藤 隆史 東京大学 大学院工学系研究科 教授
- ・ 佐々木高義 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 拠点長
- ・ 館山 佳尚 物質・材料研究機構 エネルギー・環境材料研究拠点 グループリーダー
- ・ 所 千晴 早稲田大学 理工学術院 教授
- ・ 森田 裕史 産業技術総合研究所 機能材料コンピューショナルデザイン研究センター 研究チーム長

(コメンテーター)

- ・ 北川 宏 京都大学 大学院理学研究科 教授
- ・ 君塚 信夫 九州大学 大学院工学府 教授
- ・ 清水 史彦 三菱ケミカル株式会社 Science & Innovation Center Polymer Laboratory 所長
- ・ 庄司 哲也 トヨタ自動車株式会社 先端材料技術部 チーフプロフェッショナルエンジニア

付録2 国内外の状況

1. 政策・施策動向

米中の技術摩擦に見られるように、ハイテク分野における国際競争が拡大する中、先端技術の基盤となる電池、触媒、半導体等の高機能化に不可欠な鉱物等の戦略資源の確保（依存低減を含む）は、依然各国の優先課題となっている。一方で、環境や人権に配慮した開発への社会的要請や持続可能な開発目標（SDGs）の策定等を背景に、循環型の経済モデルを志向する潮流も欧州を中心に広がりつつある。以下では、関連する近年の国内外の政策・施策を挙げる。

(1) 戦略資源の確保

米国ではエネルギー省（Department of Energy：DOE）が2012年に「希少材料戦略（Critical Materials Strategy）」を策定し、中核的な研究開発拠点としてDOEエイムズ研究所にCritical Materials Institute（CMI）を設立した。近年は希少鉱物（critical minerals）の確保に関する戦略的取り組みが進んでいる。2017年12月に発出された大統領令「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踏まえ、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。また、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。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。

欧州連合（EU）は2008年に打ち出した「原材料イニシアチブ（Raw Materials Initiative）」のもと、3年ごとに希少物質リストを作成・更新している（2011年：14種、2014年：20種、2017年：27種、2020年：30種）。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。2014年から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ている。次期FPのHorizon Europe（2021年～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）の一つ「デジタル・産業・宇宙」（155億ユーロ）の一部にRaw Materials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活発化していくと思われる。

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。企業は輸出管理の法律法規を順守しなければならないとの記載もあり、戦略物資や先端技術の輸出管理強化のために2020年12月に施行された輸出管理法とも連動するものとみられている。同草案は2021年2月15日まで意見を公募し、同年内にも施行される見通しである。

鉱物資源国においてはオーストラリアが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。両国は米国との協力も深めている。オーストラリアと米国は、2019年11月に希少鉱物に関する共同調査・研究の実施に関する協定を締結したほか、エネルギー鉱物資源のサプライチェーン確立の支援や技術開発に向けた金融支援に関する協力覚書を締結した。また2020年3月には、米豪間の希少鉱物サプライチェーンの強化・拡大に関する共同行動計画を進展させることで合意した。カナダと米国も、2020年1月に希少鉱物協力に関する共同行動計画を策定し、産業との連携、戦略的産業と防衛産業のための希少鉱物サプライチェーン確保、鉱物資源に関する情報共有、国際間連携といった枠組みにおいて研究開発を含む協力を進めるとしている。

我が国では2004年に「元素戦略」のコンセプトが提唱され、2007年の文部科学省・経済産業省の府省連携プロジェクトを皮切りに、科学技術振興機構（JST）や新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）で多くの研究開発プロジェクトが推進されてきた。国際協力に関しても2011年から毎年、日米欧の3極会合が開催され、希少資源に関する世界情勢や、安定供給のための戦略的な研究開発について議論がなされている。包括的な政策としては、2020年3月に経済産業省が「新国際資源戦略」を策定している。同戦略は金属資源について先端産業に不可欠なレアメタルなどの安定供給確保の観点から、（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、を対応の方向性として示している。

（2）循環経済への転換

EUにおける循環経済は域内の国際競争力の向上、持続可能な成長、新規雇用の創出を実現する産業政策の一環として位置付けられている。2010年に策定された成長戦略「欧州2020」では旗艦イニシアチブの一つに「資源効率的な欧州（Resource efficient Europe）」を掲げ、2011年9月に資源効率性の向上のためのロードマップを発表した。その後、2014年9月に行われたロードマップの進捗評価で、資源効率性の実現のために循環経済への転換が必要とされた。

2015年12月に公表された「循環経済のためのEU行動計画」では、循環経済の具体化に向けた優先分野と行動計画が示された。優先分野の1つであるプラスチックでは、2018年1月に「プラスチック戦略」が策定され、再使用（Reuse）、修理（Repair）、再生（Recycle）に対するニーズを考慮したプラスチック製品の設計と製造等の必要性が示された。同戦略に基づき、2019年5月に、「特定プラスチック製品の環境影響減少に関わる指令」がEU理事会で採択された（同6月に発効）。同指令により、使い捨てプラスチック製品の使用禁止や、再生プラスチックの飲料ボトルへの使用目標などが定められた。

2019年12月に新体制を発足させた欧州委員会は、同月に「欧州グリーン・ディール（European Green Deal）」を公表し、2050年に温室効果ガス排出を実質ゼロにする「気候中立（Climate-neutral）」を目標に掲げた。2020年3月には欧州グリーン・ディールを支える柱の一つとして「循環経済行動計画」が発表された。同行動計画は、2015年の行動計画を更新する形で新たな重点7分野（電子機器・情報通信技術（ICT）、バッテリー・車両、包装、プラスチック、繊維、建設・建物、食料・水・栄養）を設定し、分野ごとに循環経済のための設計と生産に焦点を当てた「持続可能な製品」に関する政策を導入するとしている。

中国は2005年に「循環型経済の発展加速に関する国務院の若干の意見」において資源効率性向上を目標に掲げ、循環経済に向けた政策推進を開始した。2009年に「循環経済促進法」により法的基盤を整備した上で、2013年に「循環経済発展戦略及び短期行動計画」を発表した。同行動計画では、各産業セクターで循環型システムを構築して、サプライチェーン全体で廃棄物の減量化、再使用、再資源化活動を推進することや、インターネット技術も活用して統合的な回収・処理・再資源化を実現する新ビジネスモデルを構築することなどが打ち出されている。

我が国では、1999年に通商産業省（当時）が廃棄物処理や資源制約等を巡る問題への対応として「循環経済ビジョン」を策定し、大量生産・大量消費・大量廃棄型の経済システムから、環境と経済が統合した循環型の経済システムへの転換を掲げ、いわゆる3R（Reduce, Reuse, Recycle）の本格的な導入を提言した。さらに2020年5月に経済産業省は、循環経済を目指す世界的な潮流や、デジタル技術の発展、環境配慮に対する社会的要請の高まりなどを踏まえ、「循環経済ビジョン2020」を策定した。同ビジョンは、従来の3Rに留まらない中長期的な産業競争力強化につなげるべく、循環性の高いビジネスモデルへの転換、市場・社会からの適正な評価の獲得、レジリエントな循環システムの早期構築の3つの観点から、目指すべき方向性を提示している。

2. 研究開発動向

上述のような政策や施策に関連して、各国においてさまざまな課題解決型の研究開発プログラムが実施されている。例えば希少元素をありふれた元素で代替した機能材料の開発や、プラスチック材料を別の高付加価値材に転換する手法の開発などがある。一方で、新しい材料の創製を主眼とした先端的・分野横断的な基礎研究の支援も行われている。以下ではこれらの観点から、国内外における最近の動向や研究開発プログラムなどの例を示す。

米国

（DOE/希少鉱物関係）

- ・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「希少鉱物イニシアチブ（Critical Minerals Initiative）」を発表した。イニシアチブ全体で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、希土類物性の基礎の理解、使用の削減と代替材料の発見、希土類の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4月、DOEは希土類元素の安定供給確保や効果的な代替品開発に資する基礎研究に3年間で1,800万ドルを提供する計画を発表した。希土類元素の可用性向上や使用低減、効率的な分離・再利用、代替物質の探索発見などを対象とする。
- ・2020年5月、DOEは、フィールドの検証・実証および希少材料の次世代抽出、分離、処理技術に焦点を当てた研究開発に最大3,000万ドルを提供する公募を発表した。レアアース等の希少材料のサプライチェーン構築のために、コスト削減および生産による環境への影響の低減に取り組むとしている。
- ・2020年6月、DOEは約1億2,200万ドルを投資して、石炭製品イノベーションセンターを設立するための公募を行うと発表した。センターは、石炭由来炭素ベースの高付加価値製品の製造や、石炭からレアアース等の希少鉱物を抽出・処理する新たな方法の開発に焦点を当てるほか、人材育成のプラットフォームも提供する。アパラチアやイリノイ等の複数の石炭生産盆地にセンターの設立を予定している。
- ・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発見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9月、DOEは米国盆地を対象とした炭素鉱石・レアアース・希少鉱物（CORE-CM）イニシアチブの一環として、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に1億2,200万ドルを提供する公募を発表した。プロジェクトは産学官のチームによって3フェーズの複数年計画で実施される。
- ・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む。

(DOE/プラスチック関係)

- ・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目指す包括的取組「プラスチック・イノベーション・チャレンジ」の開始を発表。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。「プラスチック・イノベーション・チャレンジ」では、(1)プラスチック廃棄物を有用な化学物質に分解するための生物学的・化学的方法の開発、(2)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）技術の開発、(3)リサイクルの容易な新規プラスチック材料の設計、(4)既存のリサイクル技術の改善と産業界による新技術の拡大・展開、を戦略的目標として掲げている。
- ・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。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。プログラム全体の採択予定は13-16件、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。
- ・2020年7月、DOEエネルギーフロンティア研究センター（Energy Frontier Research Centers：EFRC）の一つとしてエイムズ研究所にInstitute for Cooperative Upcycling of Plastics（iCOUP）を設立。アップサイクリングに焦点を当てた科学研究に取り組む。予算は4年間で1,280万ドル。
- ・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。
- ・2021年1月、DOEは「プラスチック・イノベーション・チャレンジ」のロードマップ案および同案への意見を求める情報提供依頼書（RFI）を発表した。同案では、「プラスチック・イノベーション・チャレンジ」の戦略的目標の達成に向けた研究の方向性として、熱処理、化学的処理、生物学的処理、物理的リサイクルおよびリカバリー、循環性設計の5つが挙げられている。
 - ・2021年2月、DOEはプラスチック廃棄物再利用技術の基礎研究に関する公募を発表した。支援規模は3年間で2,500万ドルを投資すると発表した。特にアップサイクリング技術に焦点を当て、ポリマーの高効率な分解と再構築やポリマー特性の改善に取り組むとしている。

(DOE/その他)

- ・2017年、DOEは省庁横断型プログラム「米国製造業イニシアチブ（Manufacturing USA）」の下、内包エネルギー・排出削減研究所（Reducing Embodied-energy And Decreasing Emissions : REMADE）を設置した。REMADEは金属、繊維、ポリマー、電子廃棄物などの材料の再利用、再生利用、再製造に必要な技術コストを削減することに重点を置き、2027年までに全体のエネルギー効率を50%向上させることを目標とし、製品のライフサイクルにわたるエネルギー消費量の削減と製造業全体の効率向上を図るとともに、情報収集の新技术、使用済および廃棄物の収集・識別・分類、混合材料の分離、微量汚染物質の除去、堅牢で費用対効果の高い再処理および廃棄方法の開発等に取り組む。予算として最大7,000万ドルの連邦資金を計上するほか、パートナー企業等からも7,000万ドルの資金導入を図る。

(NSF)

- ・2020年7月、国立科学財団（National Science Foundation : NSF）は拠点型の研究開発プログラムである材料研究科学工学センター（Materials Research Science and Engineering Center : MRSEC）の新規3拠点の採択を発表。このうちデラウェア大学ハイブリッド・アクティブ・レスポンス材料センター（University of Delaware Center for Hybrid, Active, and Responsive Materials : UD CHARM）は、生物にヒントを得た新しい有機材料と、新しいハイブリッド無機量子材料の2つの学際領域に焦点を当てる。同拠点の予算は6年間で1,800万ドル。
- ・2020年7月、NSFは革新的な化学研究課題に長期的に取り組む化学イノベーションセンター（Center for Chemical Innovation : CCI）のフェーズ2として3拠点の選出を発表。このうちカリフォルニア大学バークレー校が主導するCenter for Genetically Encoded Materials（C-GEM）は、化学、生物学、材料科学などの融合研究により、リボソームを応用して多様な機能を持つポリマー材料を設計・合成する。同拠点の予算は5年間で2,000万ドル。
- ・2020年7月、NSFはユーザ施設を含む研究インフラ拠点整備プログラムである材料イノベーションプラットフォーム（Materials Innovation Platforms : MIP）の新規2拠点の採択を発表。バージニア工科大学を中心とするGlycoMIPは、AIや計算モデリングツールを活用して糖質材料の合成と特性評価を行う。カリフォルニア大学サンタバーバラ校および同口サンゼルス校が主導するBioPACIFIC MIPでは、バイオ由来のモノマーをビルディングブロックとして、データ科学を活用して有用なポリマーの設計と大量合成を目指す。GlycoMIPの予算は5年間で2,300万ドル、BioPACIFIC MIPの予算は5年間で2,370万ドル。なお、これらはバイオマテリアルに焦点を当てたものであるが2015年のMIPプログラムでは結晶性材料に焦点を当てた2拠点が採択されている。

(DARPA)

- ・2014年8月、国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency : DARPA）は原

子サイズ・ナノサイズのコンポーネントからミリメートルサイズ of 材料を組み上げる技術開発プログラム「Atoms to Product (A2P)」を開始し、2015年12月には研究開発を実施する10機関を選定した。これらの機関は(1)単一システムでのナノメートルからミリメートルへの移行(Nanometer to Millimeter in a Single System)、(2)光学メタマテリアル組立(Optical Metamaterial Assembly)、(3)フレキシブル汎用組立(Flexible, General Purpose Assembly)の3つのワーキンググループに分かれてそれぞれの課題に取り組む。

欧州 (EU、英、独、仏)

- ・ Horizon 2020では欧州イノベーション・技術機構(European Institute of Innovation & Technology: EIT)の資金提供の下で産学官コンソーシアムEIT Raw Materialsが研究開発、教育、起業育成等を推進。EIT Raw Materialsのイノベーション領域は探査、採鉱、プロセッシング、代替、リサイクル、循環経済の6つで、2020年の予算は8,170万ユーロ。2016年～2018年におけるプロジェクト数は339件、プロジェクト予算(合計値)は1億3,000万ユーロ以上。
- ・ Horizon 2020の2020年度予算では、プラスチックに関する新規10件のテーマに対し総額1億3,500万ユーロが割り当てられている。
- ・ 2018年3月、英国研究・イノベーション機構(UKRI)は、プラスチックの製造と消費のパターンに変化をもたらす新しいアイデアとイノベーションを探求することを目的として、2,000万ポンドのプラスチック研究イノベーション基金(PRIF)を設立した。3つの柱として、リーダーシップと知識交流(～200万ポンド)、研究:プラスチック「創造性」ファンディング(～800万ポンド)、産業界主導の研究開発:プラスチック「イノベーション」ファンディング(～1,000万ポンド)が設定されている。同基金は、UKRIによる管理のもと、工学・物理科学研究会議(EP SRC)、Innovate UK、自然環境研究会議(NERC)を介して配分される。
- ・ 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6,000万ドルの政府資金配分に加え、民間部門から1億4,900万ドルの投資を見込んでいる。2021年2月には、SSPPチャレンジの新たな公募として「実証プロジェクト・ラウンド2」(1,600万ポンド)の開始が発表された。同公募は、「材料」、「製品設計」、「製造技術とプロセス」などの持続可能なプラスチック包装テーマの下での大規模な商業実証プロジェクトを対象としている。
- ・ 2020年11月、UKRIは戦略優先基金(SPF)の一環として、サーキュラーエコノミーのための学際的な研究開発を行う5つのセンターに合計2,250万ポンドを配分すると発表した。さらに参画パートナーから1,120万ポンドの支援(資金および現物出資)を見込んでいる。各センターのテーマは、繊維、建設資材、化学製品、テクノロジーメタル(コバルト、レアアース、リチウムなど)、主要金属となっている。
- ・ 2020年7月、ドイツ連邦教育研究省(BMBF)は、フレームワークプログラム「持続可能な開発のための研究-FONA3」の下で、「資源効率の高い循環経済:プラスチックリサイクル技術(KURT)」をテーマとした研究開発公募を発表した。同公募は、インテリジェントなプラスチック利用コンセプトの活用や物流・回収の改善、再生プラスチックの高度利用に取り組むプロジェクトを対象として、コンセプトフェーズ(1課題あたり最大9か月、15万ユーロ)および実装フェーズ(3～5年、支援額の明示無し)の2段階で支援を行う。2019年11月、フランス経済・財務省企業総局(DGE)は化学的または生物学的技術によるプラスチックのリサイクルプロジェクトに係る関心表明公募(AMI)を発表した。同公募は、機械的リサイクルでは処理できないプラスチック廃棄物の有効活用を実現する技術開発に焦点を当て、実施可能なプロジェクトと留意すべき課題を特定することを目的としている。審査を通過したプロジェクトは、必要に応じて、「将来への投資プログラム」等の既存のファンディングによる支援対象となる。

日本 (JSPS)

- ・科学研究費助成事業 (新学術領域研究 (研究領域提案型)) 「融合マテリアル：分子制御による材料創成と機能開拓」(2010～2014年度、直接経費110,900千円) では、生体における有機分子の無機結晶化制御プロセス模倣や、超分子・高分子材料と機能性無機物質との組み合わせなど、有機化学、無機化学をはじめ多様な学問分野の融合による省エネルギー、省資源、低環境負荷型の新しい材料構築のための学問の創成が推進された。
- ・科学研究費助成事業 (新学術領域研究 (研究領域提案型)) 「配位アシンメトリー：非対称配位圏設計と異方集積化が拓く新物質科学」(2016～2020年度、直接経費1,168,000千円) は、新しい物質・材料の創成の観点から金属錯体に焦点を当て、その配位圏の分子レベル制御やナノ～マイクロレベルの集積化制御を実現するための学理構築に取り組んでいる。
- ・科学研究費助成事業 (新学術領域研究 (研究領域提案型)) 「複合アニオン化合物の創製と新機能」(2016～2020年度、直接経費1,022,800千円) は、特異な配位構造や結晶構造を持つ「複合アニオン化合物」が有する機能材料としてのポテンシャルに着目し、新物質創製のための基礎研究とともに新たな化学・物理機能の探求に取り組んでいる。
- ・科学研究費助成事業 (新学術領域研究 (研究領域提案型)) 「ハイドロジェノミクス：高次水素機能による革新的材料・デバイス・反応プロセスの創成」(2018～2022年度、直接経費1,135,000千円) は、高い移動性や多様な反応性など水素が持つ独特の性質に焦点を当て、これらを自在に使いこなすための学問的な基盤を構築するとともに、個別機能を融合させた相乗的な効果を実現させ、新しい材料やデバイス等の創出につなげることを目指している。

(JST)

- ・JSTでは2010年度の戦略的創造研究推進事業における新規研究領域として、CREST「元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出」(2010～2017年度)、さきがけ「新物質科学と元素戦略」(2010～2016年度)を設定。元素が持つ特性の科学的理解に立脚し、計算科学や計測技術も活用しつつ、あらゆる元素を自在に制御して目的の機能を持つ材料創出に取り組んだ。
- ・JSTでは2012年度の戦略的創造研究推進事業における新規研究領域として、CREST「新機能創出を目指した分子技術の構築」(2012～2019年度)、さきがけ「分子技術と新機能創出」(2012～2017年度)を設定。分子を自在に設計・合成して高度な物性制御や新しい機能発現を可能にする「分子技術」の材料創製への活用に取り組んだ。
- ・JSTでは2013年度の戦略的創造研究推進事業における新規研究領域として、CREST「超空間制御に基づく高度な特性を有する革新的機能素材等の創製」(2013～2020年度)、さきがけ「超空間制御と革新的機能創成」(2013～2018年度)を設定。物質中の原子・分子の配置が生む空間空隙構造に焦点を当て、これを高度に設計・制御することによる革新的な機能材料の創製に取り組んだ。
- ・JSTでは2020年度の戦略的創造研究推進事業における新規研究領域として、CREST「原子・分子の自在配列・配向技術と分子システム機能」、さきがけ「原子・分子の自在配列と特性・機能」を設定。原子や分子の組織構造を自在に制御して新しい機能を生み出す研究を推進している。

(NEDO)

- ・国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発」(2012年度～2021年度、2020年度までの予算累計：142.9億円) は、今後の電動化自動車向けモーターの需要増大を見据え、高効率なモーターを実現させる磁性材料に焦点を当て、供給リスクの高い重希土類元素 (主にジスプロシウム) を使用しない革新的高性能磁石の開発と、エネルギー損失を少なくする高性能軟磁性材料の開発を推進している。

- ・ NEDO「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト」(2016年度～2021年度、2020年度までの予算累計：119.5億円)は、マテリアルズ・インフォマティクスを軸とし、計算科学を活用した有機系機能性材料の構造と機能に関するデータの整備に加え、材料試作のためのプロセス技術や未踏の観測を可能にする計測技術の開発も実施し、革新的な機能性材料の創成・開発の加速化を目指している。
- ・ NEDO「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業」(2017年度～2022年度、2020年度までの予算累計：20.7億円)は、いわゆる「都市鉱山」の有効活用による資源循環システム構築を目的として、使用済み電子機器の自動認識・解体・選別システム、廃部品の製錬原料別自動選別システム、多品種少量金属種の高効率製錬技術の開発のほか、リサイクルコスト評価に基づく鉱種・製品選定のための情報連携システムの開発に取り組んでいる。
- ・ NEDO「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」(2020年度～2024年度、2020年度予算：7億円)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。
- ・ 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)「希少金属等高効率回収システム開発」(2007年度～2010年度、予算累計：9.8億円)は、使用済み電子・電気機器からレアメタルを回収するための高効率な物理的・化学的選別手法の開発や、使用済み超硬工具からタングステンを回収するための高効率な化学的フローの確立に取り組んだ。

付録3 専門用語説明

デジタルトランスフォーメーション（Digital Transformation : DX）

企業がビジネス環境の激しい変化に対応し、データとデジタル技術を活用して、顧客や社会のニーズを基に、製品やサービス、ビジネスモデルを変革するとともに、業務そのものや、組織、プロセス、企業文化・風土を変革し、競争上の優位性を確立すること。2004年にスウェーデンのウメオ大学に所属するエリック・ストルターマン教授が提唱したとされている。

元素戦略

元素に焦点を当てサイエンスに基づいた物質・材料科学の基盤を構築するための戦略であり、「代替（希少元素を豊富な元素で置き換える）」「減量（使用量を減らす）」「循環（回収・再活用する）」「規制（有害元素を使わない）」「新機能（新たな活用で新機能を引き出す）」の5つの柱で構成される。

インバース・マニュファクチャリング

従来のものづくりの「設計・生産・使用・廃棄」という工程の「廃棄」に替えて、「回収・分解・選別・再利用」という使用後の流れを予め考慮して製品を設計・製造する仕組みのこと。「逆工場」とも言われる。

ライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment : LCA）

ある製品・サービスのライフサイクル全体（資源採取—原料生産—製品生産—流通—消費—廃棄—リサイクル）又はその特定段階における環境負荷を定量的に評価する手法のこと

複合アニオン

従来の金属イオン（カチオン）中心の材料設計に対して、アニオン中心に設計していく概念のこと。これまでにない新たな配位構造により、機能開発に新しい次元をもたらすことが期待されている。

カスケードリサイクル/アップサイクル

リサイクルをすることによって元の製品の品質には戻らず、品質の低下を伴うリサイクルをカスケードリサイクルという。一方、単なる素材の原料化やその再利用ではなく、元の製品よりも価値の高いものを生み出すことを最終的な目的とするリサイクルをアップサイクルという。

サーキュラーエコノミー

従来の「大量生産・大量消費・大量廃棄」のリニアな経済（線形経済）に代わる、製品と資源の価値を可能な限り長く保全・維持し、廃棄されていた製品や原材料を新たな資源と捉え、廃棄物の発生を最小化しながら資源を循環させる経済の仕組みこと。

レアメタル/希少金属/希少鉱物

地球上の存在量が稀であるか、技術的・経済的な理由で抽出困難な金属もしくは鉱物のうち、安定供給の確保が政策的に重要なものの総称。ハイテク製品に欠かせないものが多く、「産業のビタミン」とも呼ばれる。

責任ある研究・イノベーション（Responsible Research and Innovation : RRI）

研究やイノベーションについて、社会的な価値、持続可能性などの面で好ましい結果が得られるように、研究

者だけでなくステークホルダー(利害関係者)がそのあらゆる段階において相互に協働すること。今世紀に入ってから概念として徐々に形を取り始め、2010年前後から明示的に語られるようになっていく。

都市鉱山

都市でゴミとして大量に廃棄される家電製品などの中に存在する有用な資源（レアメタルなど）を鉱山に見立てたもの。そこから資源を再生し、有効活用しようというリサイクルの一環となる。地上資源の一つでもある。

リアルタイム・テクノロジーアセスメント

まだ市場や社会に出ていない科学技術に関して、早期の段階から繰り返し、倫理的・法的・社会的課題や、当該技術の社会的必要性、経済的実現可能性などを検討し、可視化や議題化によって、幅広い関係者との議論と認識の共有を促すことで、実現のイメージや技術の発展の方向性を見極めること。

作成メンバー

曾根 純一	上席フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
宮下 哲	フェロー・リーダー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
内山 浩幹	副調査役	(戦略研究推進部)
甲村 長利	研修生	(PM 育成・活躍推進プログラム)
中村 亮二	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
長谷川 貴之	フェロー	(海外動向ユニット)
日江井 純一郎	フェロー	(科学技術イノベーション政策ユニット)
眞子 隆志	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
水本 邦彦	主任調査員	(研究プロジェクト推進部)

戦略プロポーザル

CRDS-FY2020-SP-05

物質循環を目指した複合構造の生成・分解制御

～サステイナブル元素戦略～

STRATEGIC PROPOSAL

Control of Generation and Decomposition of Modular Structure for Materials Circulation

- Sustainable Element Strategy -

令和 3 年 3 月 March 2021

ISBN 978-4-88890-727-9

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

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



<https://www.jst.go.jp/crds/>