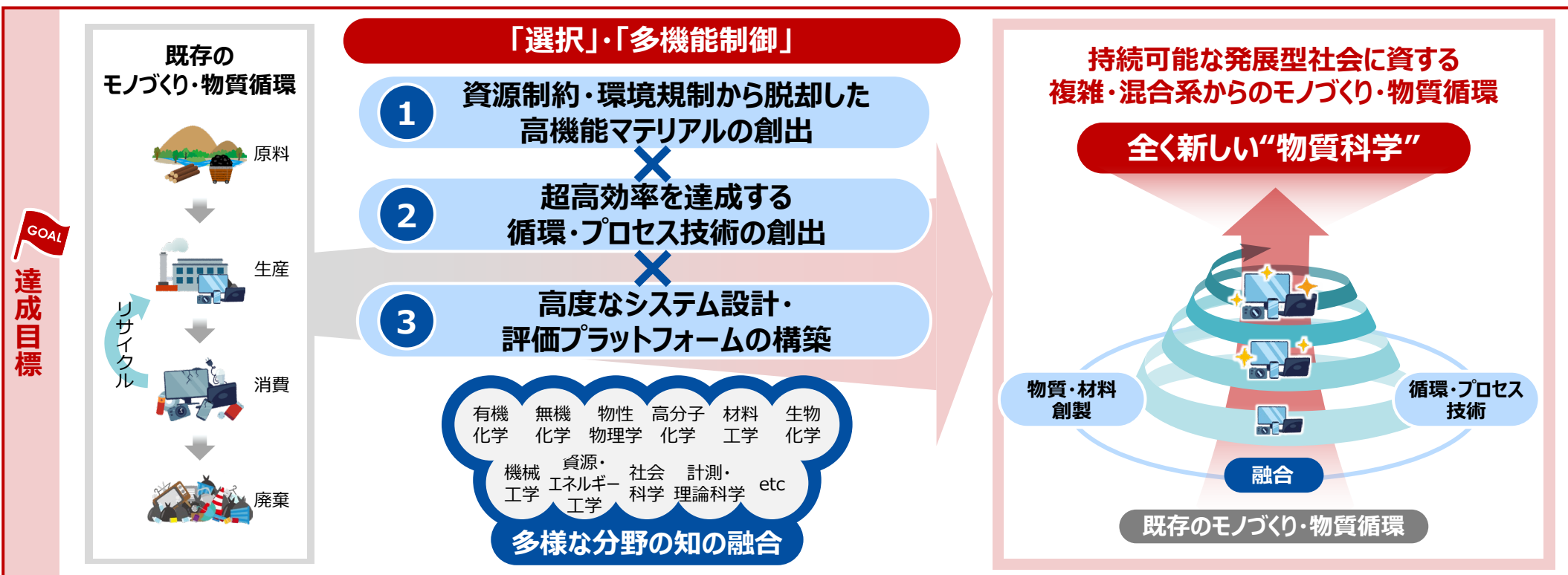


4 選択の物質科学～持続可能な発展型社会に貢献する新学理の構築～

趣旨

- 資源の枯渇・調達リスク増大、環境規制の強化など、多くの社会課題が顕在化している。
- 多様でかつ複雑化する社会課題に対応しつつ発展・成長する社会（持続可能な発展型社会）の実現に向けて、**既存のモノづくり・物質循環の先入観に捉われない、新しい科学的発見によるパラダイムシフト**が必要とされている。
- **物質・材料創製と循環・プロセス技術を融合**する全く新しい物質科学の探求により、**リソーシングやアップグレードを実現する“新しい学理”**を生み出す。

「選択」：物質循環の中での最適な物質・材料の選択。物質・材料を高度に利用し循環させるための選択的な生成・分離・回収・変換などの精緻なメカニズム解明や革新的技術の確立。
 「多機能制御」：多種多様な物質・材料から構成される製品などに対して、一つの要素だけではなく多数の異なる要素を理解し、それらの要素をコントロール。



- 我が国の物質循環システムの強靱化・自律化
- 我が国の強みである最先端材料産業の更なる活性化と中長期的な競争力強化

令和6年度戦略目標

1. 目標名

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～

2. 概要

持続可能な発展型社会の実現には循環経済への移行が重要視されており、従来のモノづくり・物質循環の在り方にも変革が求められている。本戦略目標では、モノづくり・物質循環のパラダイムシフトに大きく寄与する学術分野として「選択」と「多機能制御」を追求する物質科学に注目する。これらの追究により、資源制約・環境規制から脱却した高機能マテリアルや超高エネルギー効率/資源効率を達成する循環・プロセス技術を創出するとともに、これらの技術を、エネルギー、LCA といった社会的な観点などを含む多様な視点で高度に分析・評価するためのプラットフォームを構築することで、実環境にある多様な物質が混在した複雑・混合系からのモノづくり・物質循環の技術基盤の確立を目指す。

3. 趣旨

持続可能な社会の実現へ向け、「大量生産・大量消費・大量廃棄」型の経済社会から脱却し、循環経済（サーキュラーエコノミー）を確立する必要性が大きくクローズアップされている。近年、世界的環境規制強化（欧州 ELV 指令、PFAS 規制等）や資源枯渇・調達リスクが増大しており、経済安全保障の観点からも、種々の制約に対応した国内の物質循環システムの自律化・強靱化が求められている。また、これら複雑化する社会課題に対応しつつ、社会全体としては発展・成長を続け、新たな価値を生み出すこと（「持続可能な“発展型”社会」）が求められている。持続可能な発展型社会を見据えた場合、単なる資源の循環にとどまらず、高機能な素材としての再生（リソーシング・アップグレード）を可能とするような循環システムの構築が重要と考えられる。同時に、機能・性能の価値基準だけでなく、新たに経済合理性と環境適合性を両立するモノづくり・物質循環の発展も重要と考えられる。

これらのことは、我々の生活を取り巻く製品（モノ）が多種多様な物質・材料から構成されている中、その製品や利用する物質・材料として何を「選択」し、資源の循環と社会の成長を両立させるべきかについての問いを投げかけている。つまり、持続可能な発展型社会を実現する上で、物質・材料を高度に利用し循環させるための「選択」的な生成・分離・回収・変換などの精緻なメカニズム解明や革新的技術の確立、実社会での循環可能性等の検証を進めることが必要である。その際、複数のモノが複雑なシステムの中で混在していることから、一つの要素だけではなく多数の異なる要素を理解し、それらの要素にそれぞれ対応しコントロールする、「多機能制御」が重要である。この「選択」・「多機能制御」は、化学、物理学、生物学、各工学分野、人文科学分野等の幅広い分野で共通のキーワードであり、持続可能な発展型社会を実現する上で重要な物質循環を達成するために、重要な基本概念である。

以上より、本戦略目標では、学術分野として「選択」と「多機能制御」を追求する物質科学に注目するとともに、実環境にある物質循環とそこからのモノづくりのボトルネック課題を抽出し、複雑・混合系に関わる対象領域を開拓する。特に、資源制約・環境規制から脱却した高機能マテリアルの創製や超高エネルギー効率/資源効率を達成する多機能性を活用した循環・プロセス技術の創出を目的とする。このため、原子・分子レベルの相互作用やナノ反応場、相界面、外場、生物などを利用/融合し、また、資源制約や環境規制を考慮した、選択と多機能制御を追求する学理を構築し、複雑現象の多元的な理解と制御のもと、複雑な構造・エネルギー状態・非平衡性を選択的に精密制御可能な循環・プロセス技術を創出することを旨とする。また、実環境にある様々な要素から持続可能な発展型社会の実現に必要な最適解を見出すため、物質循環技術の高度な分析・評価を可能とするプラットフォームの構築を目指す。加えて、モノづくり・物質循環の間の融合を進めることで、物質循環は最先端・新規モノづくりのインフラであるという認識を研究者間で共有し、既存のモノづくり・物質循環のアプローチや概念を刷新し得る基礎学術を体系化することを目的とする。

4. 達成目標

本戦略目標では、材料・プロセス性能だけでなく新たな価値基準のもと、持続可能な発展型社会に資する複雑・混合系からのモノづくり・物質循環を実現するため、これらの基盤となる「選択」と「多機能制御」を追求する物質科学の確立を目指す。具体的には、マテリアル創製、循環・プロセス技術、システム設計・評価の各項目について以下の達成を目指す。

(1) 資源制約・環境規制から脱却した高機能マテリアルの創出

発展的持続可能性の前提条件の下、元素戦略的な観点から資源制約がなく、低環境負荷かつ高機能なマテリアルを創出する。例えば、複雑系材料のリソーシング・アップグレード、不純物を含む再生材の理解・制御による高機能材料の創製、選択的反応・構造制御による未踏多機能性物質の創製、多元素・複雑系材料による圧倒的な機能創出、非平衡性の制御による高機能材料や準安定物質の選択合成、易分解性材料の創出、可逆的接合界面の設計、超長寿命材料の創製、生分解性マテリアルの高機能化などが挙げられる。また、計算科学・情報科学（機械学習、AI、シミュレーション等）、先進実験手法（その場計測、ロボット等による自動化）を積極的に活用し、効率的な研究開発を推進する。

(2) 超高エネルギー効率/資源効率を達成する循環・プロセス技術の創出

実環境にあるような複雑・混合系の学術的理解を深めるとともに、循環プロセスの高度化、高選択性かつ多機能性を持つ新規マテリアル創製・変換・分離・回収法の開発を進め、生成・処理量と選択性のトレードオフに見られるような従来困難であった「相反する特性の両立」を実現する。これにより、省エネルギー・高精度な物質循環を目指す。循環システム全体で超高エネルギー効率/資源効率を達成するための循環・プロセス技術として、例えば、反応選択的な（外場駆動型）多機能プロセス技術、未使用エネルギーの別システムへの積極利用による高効率プロセス技術、未利用資源の効率的活用・再資源化の技術、混合物からの選択的かつ高効率な分離

回収技術、大量利用されている基盤素材のリサイクル技術、環境親和性の高い循環・プロセス技術などが挙げられる。

(3) 物質循環技術を高度に分析・評価するためのシステム設計・評価プラットフォームの構築
循環・プロセス技術の高度な予測・診断・解析技術や複雑系における非平衡熱力学、ダイナミクスに関する理論モデルの構築に加え、コスト、エネルギー、LCA といった社会科学的な観点を含む多様な視点での評価法など、物質循環技術を分析・評価するためのプラットフォームを構築し、全体最適化による新しい材料・プロセス技術の価値基準を確立する。例えば、種々の循環・プロセス技術の優位性を多面的（社会科学的な観点も含む）・定量的にサイクル全体で評価する手法の確立、選択性・多機能性を設計・解析するための原子・分子スケールの精密分析法の開発、複雑・混合系の理論解析モデルの構築などが挙げられる。

5. 見据えるべき将来の社会像

4. 「達成目標」の実現を通じ、高度なモノづくり・物質循環技術として、例えば、ありふれた元素を用いた高機能代替材料の開発、複雑・混合系からの最先端・新機能材料の創製、超省エネルギー分離による高付加価値な元素・有用物質の回収再利用、精緻で選択的な分離による高価値な材料とその機能の再活用、環境負荷低減・再利用を事前に考慮したマテリアル設計による永続的な物質循環、複数プロセスの融合による超効率アップサイクル技術、計算科学やAI を活用した物質・材料創製、循環プロセスの高度な予測・診断・評価による迅速な社会実装などとしての活用が期待できる。これにより、サーキュラーエコノミー実現への貢献や人類の Well-being と経済性との両立への寄与だけでなく、国内の物質循環システムの自律化・強靱化と経済安全保障リスクの低減、我が国の強みである最先端マテリアル産業の更なる活性化、国内産業の中長期的な競争力の強化にも貢献できる。

6. 参考

6-1. 国内外の研究動向

我が国は元来、材料創製関連の研究開発および産業に強みを有している。また、多孔性分離吸着材料や非熱駆動型の分離膜、プラスチック資源循環技術など循環技術でも世界トップの技術がある。一方、近年は関連分野において、日本の論文数、研究者数の減少が見られ、2050 年に中心的活躍が期待される次世代人材の育成、産業界への人材供給の面で課題もある（関連学会での会員数減少、各大学での関連学科の縮小傾向）。一方、国外では、関連分野への大規模な投資や産業政策が実行されており、研究開発が急激に活発化している。

（国内動向）

関連事業として、JST CREST「革新的触媒」、CREST「革新的反応」、CREST「分解と安定化」、さきがけ「調和物質変換」、ERATO「野崎樹脂分解触媒」などがあり、持続可能な発展型社会に貢献する重要な関連要素技術（反応、触媒、分解等）が進展している。特に、CREST「分解と安定

化」は、従来型の高機能・最先端を目指したモノづくりに対して、循環利用や環境配慮の重要性を提言するもので、主に高分子関連の循環技術の開発が進められている。また、CREST「未踏物質探索」では、物質探索域を複合化・多元素化・準安定相等に拡張することで、複雑・混合系に対する物質創製の基盤が確立しつつある。

応用物理学会、化学工学会、日本化学会、高分子学会などの学会でも資源循環やグリーントランスフォーメーションに関するシンポジウムが数多く開催されており、持続可能な発展型社会に貢献する物質・材料創製や循環・プロセス技術に関する研究開発は近年ますます盛んに行われている。

(国外動向)

循環経済の考え方は世界中で主流になりつつあり、諸外国でも関連技術の研究開発が活発に行われている。米国では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が進められている。また、CO₂をはじめとするガス分離技術への投資も盛んで研究開発も活発になっている。欧州でも、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を掲げたプロジェクトや、反応分離プロセスに関する研究など多数推進している。中国では、関連研究分野での学術論文発表件数の世界シェアが高く、新製品、新材料、新技術の研究開発と産業化を目指した取組も活発化している。

6-2. 検討の経緯

「戦略目標の策定の指針」(令和元年7月科学技術・学術審議会基礎研究振興部会決定)に基づき、以下のとおり検討を行った。

1. 科学研究費助成事業データベース等を用いた国内の研究動向に関する分析及び研究論文データベースの分析資料を基に、科学技術・学術政策研究所科学技術予測センターの専門家ネットワークに参画している専門家や科学技術振興機構(JST)研究開発戦略センター(CRDS)の各分野ユニット、日本医療研究開発機構(AMED)のプログラムディレクター等を対象として、注目すべき研究動向に関するアンケートを実施した。
2. 上記アンケートの結果及びJST-CRDS戦略プロポーザル「分離工学イノベーション」、「環境調和型プラスチック戦略」、「物質循環を目指した複合構造の生成・分解制御」、「材料創製技術を革新するプロセス科学基盤」等を参考にして分析を進めた結果、持続可能な発展型社会を実現するためには、実環境である複雑・混合系を理解し制御することや環境規制・資源制約の下で高機能材料を創製することが重要であることが明らかとなった。また、日本の強みであるモノづくり要素技術や先端素材産業分野での国際的プレゼンスを確固たるものにするため、複雑・混合系からのモノづくり・物質循環を目指す研究を加速することが必要

であるとの認識を得て、注目すべき研究動向「(仮) 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～」を特定した。

3. 令和5年12月に、文部科学省は、注目すべき研究動向「(仮) 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～」に関係する産学の有識者が一堂に会するワークショップを開催し、持続可能な発展型社会に必須で未開拓な領域、技術課題注目すべき国内・国外の動向、想定される研究内容・成果のイメージやそれらの学術的・社会的インパクトや波及効果等について議論を行い、ワークショップにおける議論や有識者へのインタビュー、アンケート等を踏まえ、本戦略目標を作成した。

6-3. 閣議決定文書等における関係記載

「第6期科学技術・イノベーション基本計画」(令和3年3月26日閣議決定)(抄)

第2章 Society 5.0の実現に向けた科学技術・イノベーション政策

1. 国民の安全と安心を確保する持続可能で強靱な社会への変革

(1) 地球規模課題の克服に向けた社会変革と非連続なイノベーションの推進

(c) 具体的な取組

① 革新的環境イノベーション技術の研究開発・低コスト化の促進

○循環経済への移行に向けて、環境配慮型の設計推進、使用済製品の選別効率化等の高度リサイクル基盤技術開発、海洋生分解性プラスチック等環境負荷の低い革新素材の研究開発やイノベーション推進のための投資等を推進する。

「マテリアル革新力強化戦略」(令和3年4月27日統合イノベーション戦略推進会議決定)(抄)

第5章. アクションプラン

1. 革新的マテリアルの開発と迅速な社会実装

【目標】重要なマテリアル技術・実装領域での戦略的研究開発の推進

(2) 具体的取組

- ✓ マテリアルが社会課題解決や産業競争力強化に資する重要な技術領域において、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)や科学技術振興機構(JST)等を通じた、国内外・産学官の英知を結集したプロジェクトを推進
- ✓ 中長期的な観点から、基礎基盤研究・実装領域での戦略的研究を支援。競争的研究費改革や資金配分機関間の連携を適切に進め、戦略型研究と創発型研究の双方を充実
- ✓ サイエンスに基づく ボトルネック課題のブレークスルーをもたらす新たな手法や技術シーズの創出、革新的マテリアルと既存技術の組み合わせによる飛躍的な性能向上、次世代スピントロニクス技術等の新たな原理・発想に基づく革新的技術の創出等、脱炭素化に向けた革新的技術シーズ創出のための研究開発を加速

【目標】サーキュラーエコノミーの実現

(2) 具体的取組

① 「プラスチック資源循環戦略」におけるマイルストーン達成に必要なルール及び社会インフラ環境の整備

✓ リサイクル可能な材料・製品設計

リユース・リサイクルを前提とした材料・製品設計技術（モノマテリアル）の確立及び製品設計指針の策定

✓ 環境負荷低減材料の導入

代替材料（再生材・バイオマス材・生分解性材等）の技術及び評価方法の確立並びに利用を促すための政府率先調達等での需要喚起を実施

② サーキュラーエコノミー実現のための技術開発・社会実装の促進

✓ プラスチックリサイクル技術の開発・実装

カーボンニュートラルとの両立を図るためのマテリアルリサイクル・ケミカルリサイクル技術の効率化・高度化を実施

✓ リユース・リサイクルを前提とした材料・製品設計技術（マルチマテリアル、接着、内容物の分離、印刷、劣化抑制等）及びそのトレース技術（識別・承認、追跡等）

✓ 製造過程での環境負荷を低減した材料、未使用資源（建設副産物等）を有効利用した材料の技術開発と実装推進（品質評価、設計施工マニュアル等）

✓ 雑電線を始めとする低品位スクラップの有効利用に向けた技術開発・設備導入支援

【目標】資源制約の克服

(2) 具体的取組

② 代替・省資源化・リサイクル等の技術開発

✓ 希少元素の特異な機能を、豊富に存在する元素で置き換える元素代替を目指した研究開発の実施

「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（令和3年6月 内閣官房他）

4. 重要分野における「実行計画」

(13) 資源循環関連産業

リデュース、リユース、リサイクル、リニューアブルについては、法律や計画整備により技術開発・社会実装を後押ししている。廃棄物発電・熱利用、バイオガス利用については、既に商用フェーズに入っており普及や高度化が進んでいる。今後、これらの取組について、「国・地方脱炭素実現会議」等における議論を踏まえつつ、技術の高度化、設備の整備、低コスト化等により更なる推進を図る。循環経済への移行も進めつつ、2050

年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする。

7. その他

本戦略目標は、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ており、応用研究事業として国内で進められている JST ALCA-Next「資源循環」、ムーンショット目標 4「2050 年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」、開発研究として 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」などの関連施策や各関連学会との緊密な連携が期待される。また、領域設定の留意点として、材料・化学、環境・エネルギー、バイオ、機械、エレクトロニクス、原子力、地質・海洋、社会システム、経済など多分野の研究人材が知識やアイデアを共有し合うことによる連携・融合を進め、新しい科学技術が生まれる構造を醸成することが期待される。本戦略目標は困難かつ最重要社会課題を対象としているため、研究者の持つ学術的好奇心と応用への方向性を合致させる仕組み、目標を共有するための場の形成など事業運営側からの様々なアプローチも期待される。