

資源循環の実現に向けた結合・分解の精密制御

日本の強み 合成・触媒の科学

新たな学問 分解の科学

戦略目標に基づく研究領域

H24~R1
「分子技術」
H25~R2
「超空間」
H27~R4
「革新的触媒」
H30~R7
「革新的反応」

新学術領域

H27~R1
「精密制御反応場」
H30~R4
「ミルフィーユ構造材料」

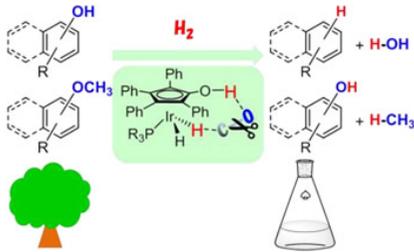
結合・分解制御

- 結合活性化・結合制御・階層構造制御技術を開発し、寿命を制御したサステナブル材料を設計
- 高分子材料・無機材料・複合材料におけるリサイクル技術を確認し資源循環へ
- 分子レベルからマクロな階層構造まで、チーム研究の推進で日本が本分野を牽引

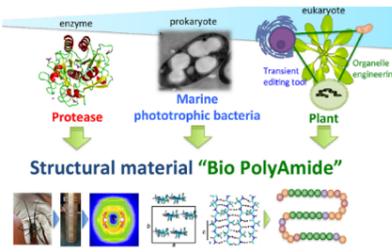
想定される研究

- 安定結合を活性化し、選択的に結合切断できる触媒反応の開発
- 外部刺激等により結合形成・開裂を自在に制御する技術
- 分解性セグメントを導入した材料の設計・合成・分解挙動評価
- 必要なタイミングで必要なレベルまで分解できる材料の開発
- 無機フィラーと樹脂からなる複合材料の分解を可能にする界面設計
- マルチスケールな「分解の科学」の学理構築と機能材料創製

結合制御



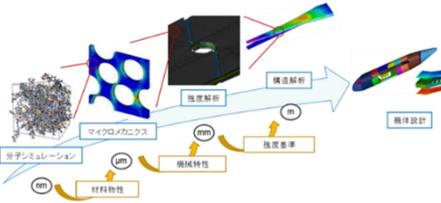
階層構造理解



材料合成



マルチスケール材料設計



なぜ今「結合・分解制御」か？

- 海洋プラスチック問題等が注目されることで、材料の使い捨てから再利用へのシフトに関心が高まっており、資源循環のために原料などへ分解できる材料の開発が望まれている
- プラスチックに限らず安定性と分解性を制御できるサステナブル材料の設計・開発が望まれている
- 「分解の科学」の体系的理解とサステナブル材料の開発に取り組む機運が熟しつつある

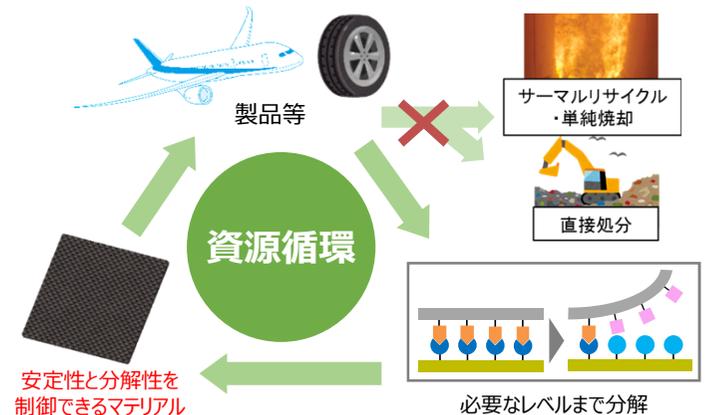


将来の社会像

- 海洋汚染の解決・環境にやさしい材料
- 体内に埋め込んだ生体材料の寿命・劣化の制御
- 結合開裂を自在制御できる接着材料、高強度化材料
- 複合材料分野（電化製品、情報端末、自動車用・建築材料）の分解リサイクル手法の確立

資源を無駄にしない**次世代リサイクル**推進、再生により高機能化する**アップグレードサイクル**実現

結合・分解制御が実現する資源循環



令和3年度戦略目標

1. 目標名

資源循環の実現に向けた結合・分解の精密制御

2. 概要

材料の使い捨てから再利用へのシフトに関心が高まっており、使用後に原料などへ分解できる材料の開発が望まれている。本戦略目標では、材料における結合制御法の開発や、それにより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イナブル材料を開発することを目的とする。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指す。

3. 達成目標

本戦略目標では、結合活性化法・結合制御法の開発や材料の階層構造制御を通して、資源循環を実現するためのサステイナブル材料の開発を目指す。具体的には、以下の3つの達成を目指す。

- (1) 結合活性化法・結合制御法の開発
- (2) 寿命を制御できるサステイナブル材料の設計
- (3) 材料分解のための階層構造制御

4. 研究推進の際に見据えるべき将来の社会像

3.「達成目標」の実現を通じ、材料の安定性と分解性を制御するための結合活性化法や階層構造制御法を見出し、分子レベルからマクロレベルまでのマルチスケールでの「分解の科学」の理解と新たな学理の構築を通じて、以下に挙げるような社会の実現に貢献する。

- ・材料の使い捨てから再利用へシフトし、地球環境負荷を低減することにより、豊かな生活と自然の豊かさを両立させる持続可能な社会
- ・材料の寿命を任意に制御する技術を開発することにより、省資源化や資源の回収・分離・再生技術力を備えた循環型社会

5. 具体的な研究例

- (1) 結合活性化法・結合制御法の開発

安定結合を活性化する手法や結合形成・開裂を自在に制御する技術など、サステイナブル材料開発に資する結合制御法を開発する。

- ・炭素-炭素結合などの安定結合を活性化し、選択的に結合切断できる触媒反応の開発

- ・ 外部刺激等により有機・無機化合物における結合形成・開裂を自在に制御する技術の開発

(2) 寿命を制御できるサステイナブル材料の設計

種々の制御可能な結合を導入した材料を設計し、安定性と分解性を兼ね備えたサステイナブル材料を開発する。

- ・ 分解性セグメントを導入した材料の設計・合成及び分解挙動評価
- ・ 自在に制御できる結合を組み込むことにより必要なタイミングで必要なレベルまで分解できる材料の開発

(3) 材料分解のための階層構造制御

ヘテロ界面や接着界面において結合・分解を精密に制御可能な階層構造をデザインしたサステイナブル材料を開発する。

- ・ 無機フィラーと分解性樹脂からなる複合材料の分解を可能にする界面設計
- ・ マルチスケールな「分解の科学」の学理構築と機能材料創製

6. 国内外の研究動向

日本は材料創製、有機合成などの結合形成のための科学は伝統的に強く、関連する戦略目標や科学研究費助成事業の新学術領域研究（研究領域提案型）が展開され、関連分野の知見が蓄積されている。国外では材料の循環に資する研究が注目を集めているが、原子・分子レベルから階層構造まで着目している本戦略目標のような全体での取組はない。我が国の強みを活かして本戦略目標を推進する絶好のタイミングである。

(国内動向)

平成 27 年度新学術領域研究「精密制御反応場」、平成 27 年度戦略目標「多様な天然炭素資源を活用する革新的触媒の創製」、平成 30 年度戦略目標「持続可能な社会の実現に資する新たな生産プロセス構築のための革新的反応技術の創出」など、本戦略目標に関連する結合形成に関する研究が実施され、知見が蓄積されている。

また、平成 24 年度戦略目標「環境・エネルギー材料や電子材料、健康・医療用材料に革新をもたらす分子の自在設計『分子技術』の構築」、平成 25 年度戦略目標「選択的物質貯蔵・輸送・分離・変換等を実現する物質中の微細な空間空隙構造制御技術による新機能材料の創製」、平成 30 年度新学術領域研究「ミルフィーユ構造の材料科学」、令和 2 年度戦略目標「自在配列と機能」において、材料の階層構造制御が可能な材料が生み出されている。これらの知見を「分解」の観点から見直すことで本戦略目標の達成に貢献できると考えられる。

資源循環の社会ニーズからのバックキャスト型研究として、平成 29 年度未来社会創造事業「持続可能な社会の実現」、令和元年度未来社会創造事業「低炭素社会実現のための循環型高分子材料の創製」、令和 2 年度ムーンショット目標「2050 年までに、地球環境再生に向けた持

「持続可能な資源循環を実現」などにおいて研究開発が開始されている。本戦略目標ではシーズに基づく基礎科学の立場で研究を進めるが、将来の社会像としては共通しており、領域・事業間の情報共有によって本戦略目標の達成に近づくと期待される。

(国外動向)

米国では、DOE（エネルギー省）が令和元年11月に「Plastics Innovation Challenge」の開始を発表し、令和2年2月にDOEとACC（米国化学工業協会）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。同年3月より、プラスチックリサイクルの研究開発プログラムBOTTLEを開始した。同年7月には、DOE エネルギーフロンティア研究センター下にアップサイクリング（高付加価値物質への転換）に焦点を当てた科学研究に取り組む研究所を設立した。NSF（国立科学財団）の申請研究領域では、解重合を標的とした領域が設定された。

欧州では、平成26年～令和2年にかけての研究開発枠組みプログラム「Horizon 2020」において、EIT（欧州イノベーション・技術機構）の資金提供の下、産学官コンソーシアム EIT Raw Materials が研究開発、教育、起業育成等を推進してきた（イノベーション領域として探査、採鉱、プロセッシング、代替、リサイクル、循環経済の6つを設定）。

令和元年の国際化学サミット白書「Science to Enable Sustainable Plastics」によると、今後重要となる挑戦的研究課題として「新しい持続可能なプラスチックの開発」や「循環型プラスチックリサイクル」などが挙げられ、同分野の国際的な注目度が高まっている。

7. 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 で行われた「俯瞰ワークショップ ナノテクノロジー・材料分野 区分別分科会『機能と物質の設計・制御～材料科学の未来戦略～』」等を参考にして分析を進めた結果、材料循環を実現するためのサステナブル材料の開発が重要であるとの認識を得て、注目すべき研究動向「材料循環の実現に向けた結合・分解の精密制御」を特定した。

(3) 令和元年12月に、文部科学省と JST は共催で、当該研究動向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、特に注目すべき国内外の動向、研究や技術開発の進展が社会的・経済的に与え得るインパクトやその結果実現し得る将来の社会像、研究期間中に達成すべき目標等について議論を行った。そこでの議論を踏まえ検討を進めた。

(4) さらに、「イノベーション政策強化推進のための有識者会議『マテリアル戦略』」において、リサイクルとカーボンニュートラルの両立に向けた基盤技術の開発と実装に向けての議論が行われ、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）と主要金属や希少金属の国内での最大限の資源循環に向けたリサイクル技術の開発・実装の重要性に関して、内閣府・経済産業省とも共通の認識が得られたことを踏まえて、本戦略目標の策定に至った。

8. 閣議決定文書等における関係記載

「第5期科学技術基本計画」（平成28年1月22日閣議決定）

第2章（3）〈2〉ii）新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術

・革新的な構造材料や新機能材料など、様々なコンポーネントの高度化によりシステムの差別化につながる「素材・ナノテクノロジー」

第3章（1）①ii）資源の安定的な確保と循環的な利用

・省資源化技術や代替素材技術、環境負荷の低い原料精製技術、資源の回収・分離・再生技術の研究開発を推進

「ナノテクノロジー・材料科学技術研究開発戦略」（平成30年8月ナノテクノロジー・材料科学技術委員会策定）

4（1）ii）戦略的・持続的に取組を進めるべき研究領域

・分子技術：（前略）「分子技術」による物質・材料開発へのブレークスルーを志向して、新たな視点を加味しながら推進し続けることが重要である。

・革新的な分離技術を生み出すマテリアル：（前略）分離の鍵を握るマテリアルの研究開発は、引き続き進めていくべき重要な研究領域である。

「統合イノベーション戦略2020」（令和2年7月17日閣議決定）

第5章 戦略的に取り組むべき基盤技術

（4）マテリアル

○マテリアルの知が高確率でスピード感を持って実装され、AI、バイオ、量子技術、環境といった重要政府戦略の実現の加速や、国内外の重要課題の解決に貢献するとともに、我が国発のマテリアルから新しい価値、研究領域、産業領域が創出されることを実現

○我が国の強みをいかした循環経済の実現に向けて、資源循環に関する情報プラットフォーム構築などデジタル技術等を活用した革新的な資源循環ビジネスの創生・普及、代替

素材、次世代リサイクル等の革新技術の研究開発や実証・社会実装等に取り組む。

「第3回イノベーション政策強化推進のための有識者会議 『マテリアル戦略』 中間論点整理
(令和2年12月18日)

② 本質研究の追及

＜フォアキャスト型で取り組むべき技術領域の例＞

- ✓ これまでの材料開発で探索されていない多元素系、複合系、準安定相といった未踏領域を対象とし、計測、計算、プロセス、データ駆動といった技術革新を用いた新機能材料開発

9. その他

本戦略目標は、将来の循環社会を見据えた基礎研究という位置付けであり、精緻なサイエンスに基づく画期的な反応・材料設計・機能材料創製を視野に入れていることから、産業界からの注目度が極めて高い。結合制御法に関連して、日本化学会や有機合成化学協会などの学協会において大きなコミュニティが形成されており、本戦略目標においても多くの提案が期待される。また、高分子学会や日本 MRS などの学会では持続可能なプラスチックに関連する研究会やシンポジウムが活発に行われており、本戦略目標の実現に向けたコミュニティ間の融合研究が期待される。加えて、無機材料や複合材料分野においても寿命を制御したサステナブル材料の開発とリサイクル手法に関して注目が集まっている。これらの分野の研究者が連携し、基礎研究をベースにした研究を展開することで、本戦略目標におけるブレークスルーが期待される。

本戦略目標ではシーズに基づく基礎科学の立場で研究を進めるが、社会ニーズからのバックキャスト型研究である未来社会創造事業、ムーンショット目標と将来の社会像としては共通しており、本戦略目標の実現には、緊密な連携が求められる。