

2.8.4 リサイクル

（1）研究開発領域の定義

本領域はリサイクルを中心に資源循環の技術を扱う。リサイクルは昨今注目を浴びるサーキュラー・エコノミー（Circular Economy：CE）において重要な技術の一つである。化学品の最大の用途であるプラスチックにおいては、高収率で原燃料回収が可能で発生したガスや残渣も活用できる手法を含むケミカルリサイクル（フィードストックリサイクル）に焦点を当てながら、プラスチックリサイクルの技術開発動向などを扱う。金属資源については天然資源の採掘から素材製造、利用、リサイクル、最終処分までのライフサイクルにかかる一連の技術の流れを扱う。リサイクルの妥当性を評価する技術については「ライフサイクル管理」領域で別途扱う。

（2）キーワード

CE、動脈・静脈、分離・選別技術、プラスチックリサイクル、ケミカルリサイクル、材料リサイクル、サーマルリサイクル（熱回収）、熱分解法、ハロゲン化物、窒素含有プラスチック、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）、金属回収、鉱山開発、情報プラットフォーム

（3）研究開発領域の概要

【本領域の意義】

我が国がリサイクルに取り組み20年余、その歩みを順調に進めてきたところではあるが、新たに欧州発のCEの概念が広がりつつあり、本領域技術に対する社会的要請は以前にも増して大きい。本領域の意義の一つは廃棄物による環境負荷の低減である。プラスチックは広く普及し生活に欠かせないが、分解や焼却により二酸化炭素（CO₂）を発生させ、分解せずに環境に留まるものは海洋プラスチック問題に象徴される環境汚染の原因となる。もう一つの意義は資源としての廃棄物である。化石資源の使用が制限される状況においては廃プラスチック（以下、「廃プラ」と記載）を貴重な炭素源として循環させることが求められる。現状においても世界のプラスチック生産量は増加の一途であり、1950年の200万トンから2022年には4.0億トンに達し¹⁾、2025年には約6億トンになると予想されている。金属資源については、天然資源の劣化による単位資源採取あたりの環境影響の増大、紛争鉱物・児童労働と言った倫理的な側面、そして有用な希少金属の国際的なサプライチェーンの分断の懸念により再認識された天然資源供給における資源安全保障上の観点からもありリサイクルの重要性は高い。リサイクルという行為自体もエネルギーを消費し、環境との整合性を必要とする。その社会実装においてはライフサイクルアセスメント（LCA）評価等のライフサイクルでの包括的な評価がこれまでも増して必要になる。また社会的要請からそのコストが許容されることで技術開発に取り組む価値が生まれる。

【研究開発の動向】

【プラスチック】

- ・1994年にEUで「容器包装廃棄物指令」、1995年にわが国で「容器包装リサイクル法（容リ法）」が制定されると、廃プラの再資源化に関する社会的要請は高まり、リサイクルに関する研究・技術開発が大きく進展した。1992年発効のバーゼル条約は廃棄物等の輸出入に関する国際条約で、我が国は1993年から「特定有害廃棄物等の輸出入等の規制に関する法律」を担保法として施行しているが、近年の海洋プラスチック問題やアジア各国へ輸出入された廃プラによる環境汚染を受け、2021年に廃プラを追加する改正が施行された。アジア各国も廃プラ輸出入制限を強化している。化石由来プラスチックからバイオマスプラスチックや紙等への転換、海洋生分解性プラスチックの開発・利用などの材料技術開発とともに、資源循環体制の構築に資するリサイクル技術の開発がますます重要になっている。

- ・ 化学的、熱的反応によって全く別の物質に変化するプラスチックの特性はリサイクルの困難性を高める要因である。日本国内で製造・流通しているプラスチックは150種類以上、樹脂の機能性を高めるためやコスト削減のために添加される可塑剤・酸化防止剤・難燃剤等の添加剤は230種類を超える²⁾。これらの組み合わせは多岐に亘るため、廃プラの組成はさらに多様である。2021年に一般家庭から排出された一般廃棄物のうち、プラスチック類は容積比で50.4%を占め³⁾、内訳の上位はポリエチレン（PE）やポリプロピレン（PP）、ポリスチレン（PS）、ポリエチレンテレフタレート（PET）、ポリ塩化ビニル（PVC）である。2021年にわが国で排出された廃プラ総量824万トンで、717万トン（約87%）の廃プラが有効利用されたが、その内サーマルリサイクルが63%、材料リサイクル21%、ケミカルリサイクル4%となっている⁴⁾。なお、材料リサイクル21%の中にプラスチックくずとして海外へ輸出した62万トンが含まれている⁵⁾。2006年以降、材料リサイクル率の伸びに限界が見られ⁴⁾、前述のように廃プラの組成の多様化が抑止できない実態から、ケミカルリサイクルの研究・技術開発への期待が大きい状況になっている。
- ・ 各種廃プラのケミカルリサイクルは欧州が特に先行しており、石油メーカーや化学メーカーにより活発に技術開発や事業化が行われている。主な取組例を図表2.8.4-1に示す⁶⁾。ナフサクラッカー（スチームクラッカー）を用いた化学品原料や誘導品製造に取組む事例が多い。処理量は年間数万から36万トンの規模で、投資額は数千万から2億ユーロである。既存の設備を活用し設備投資を抑える動きであり、このようなプロセス展開は今後の主流になると予想される。合成ガス（CO/H₂）に一旦転換した後、さらに製品展開しやすいメタノールやエタノールを製造する意図でガス化も積極的に取組まれている。

図表 2.8.4-1 リサイクル技術に関する海外の主な取組み例⁶⁾

樹脂	技術	機関	国	技術の概要
PE PP	CR	クアンタフューエル スルザー	ノルウェー スイス	アルカンへの分解と分留
		SABIC	米国 サウジアラビア	スチームクラッカーを用いたポリオレフィン製造
PP	MR	ピュア・サイクル・ テクノロジーズ	米国	着色分、臭気、異物除去
PVC	MR	テラプラスト	ルーマニア	軟質塩ビを対象
PET HDPE	MR	タイ石油公社（PTTGC） アルブラ	タイ オーストリア	食品やトイレタリー向け包装用途
PET	CR バイオ法	キャルビオス	フランス	酵素技術を用いた解重合を行い、ボトルや包装材に利用
混合	CR （油化）	シェル	オランダ イギリス	化学品に変換
		BASF クアンタフューエル	ドイツ ノルウェー	熱分解油と精製された炭化水素を化石資源代替として化学品原料に変換
		サビック プラスチックエネルギー	サウジアラビア イギリス	熱分解油と精製された炭化水素を化石資源代替として化学品原料に変換
		ダウ フェニックス	米国 オランダ	熱分解油と精製された炭化水素を化石資源代替として化学品原料に変換
	CR （ガス化）	エネルケム	カナダ	プラスチックを含む都市ごみを合成ガス化（CO、H ₂ ）し、その混合ガスからメタノール、エタノールに変換
		ヌーリオン	オランダ	プラスチックを合成ガス化（CO、H ₂ ）し、その混合ガスからメタノールに変換

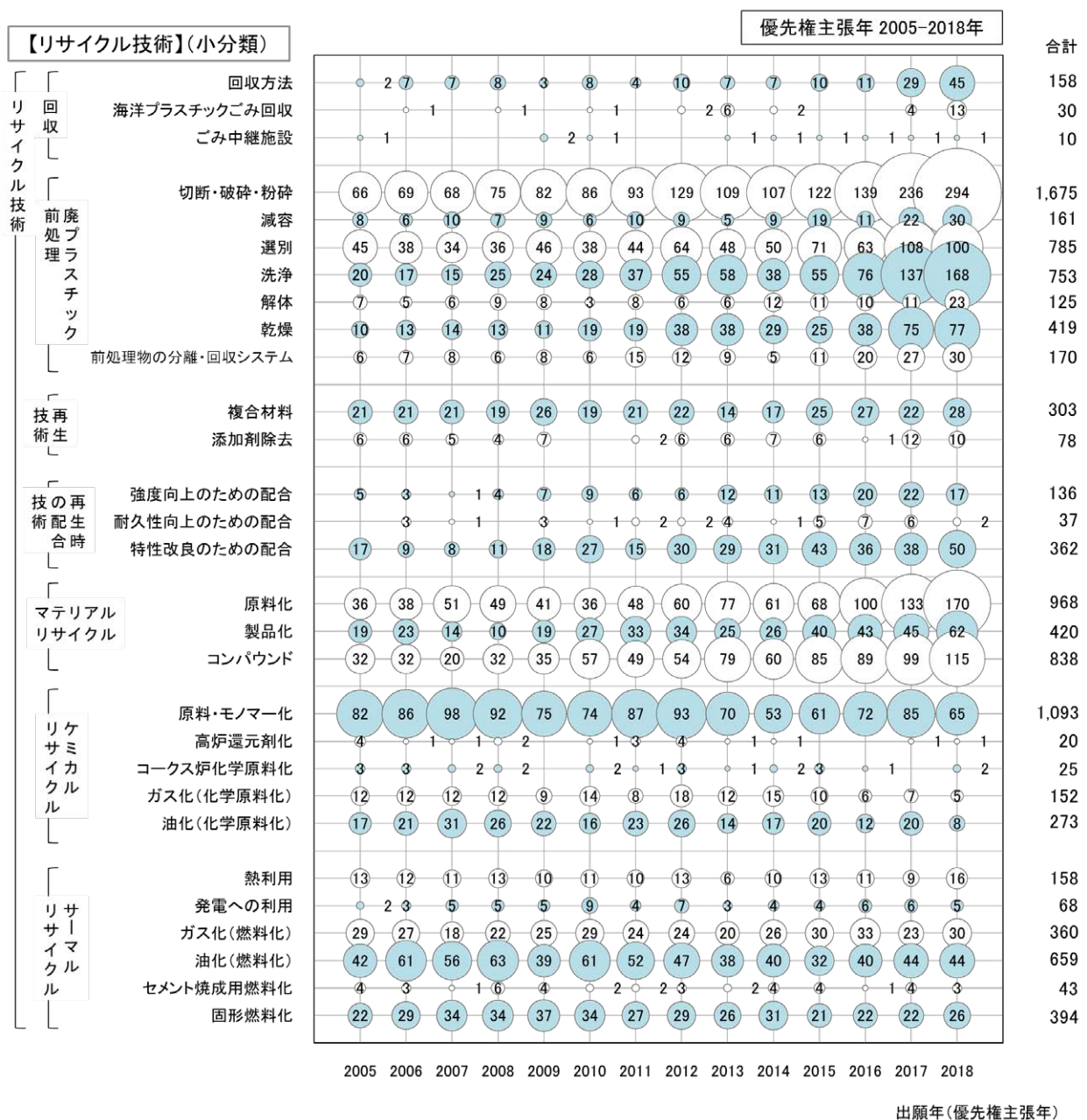
CR：ケミカルリサイクル MR：材料リサイクル

- ・ 日本での最初のケミカルリサイクルはオイルショック時、熱分解油化がプラントメーカーを中心に多く試行された。石油価格が落ち着いた1975年以降ほとんど取組まれてこなかったが、1995年の容り法制定

で再び関心が高まり、コークス炉原料化（コークス炉での熱分解）、高炉還元（還元用コークスを廃プラで代替）、熱分解法による油化、ポリマー解重合によるモノマー化、ガス化による合成ガス製造と技術が多様化した。しかし、合計でも年間数十万トン規模の処理に留まっている。

- ・産業界におけるリサイクル技術の最近の技術動向として、日本、中国、欧州、米国、韓国から出された特許の内容を図表 2.8.4-2 に示す⁶⁾。2005 年から 2018 年の間の出願においては、切断・破碎・粉碎等の前処理技術が最も多く、次いで原料・モノマー化のケミカルリサイクル技術、二次原料化やコンパウンド化の材料（マテリアル）リサイクル、選別、洗浄の前処理の順番になっている。ケミカルリサイクルやサーマルリサイクルは年を追うごとに横ばいか減少傾向を示しているが、前処理技術は顕著に増加しており、ここに技術開発の力点が置かれている事が分かる。分別して回収するよりも、多くの量を回収した後に、破碎、選別、洗浄、乾燥などの前処理で対応する技術であり、再生されたプラスチックの価値（値段）に影響する。

図表 2.8.4-2 日本、中国、欧州、米国、韓国からのプラスチックリサイクル技術特許件数の推移⁶⁾



【金属】

- ・リサイクルは人工物を原料とするため、天然資源とは構成・組成等が全く異なる原料を利用しなければならない技術課題がある。廃棄物の解体・破壊・分離選別といった静脈産業の段階と、その後の素材産業による動脈産業の段階に分けて考える必要がある。リサイクル専用の一貫処理工程も存在するが、一般に既存の天然資源向けに開発された製錬所等を活用するケースが多く、その前段階である分離・選別技術にかかる期待は極めて大きい。リマニュファクチャリング（リマン、使用済み製品の再生）、リファービッシュ（不良品や中古品の再生）、そして単純なリユースのためには丁寧な解体が重要であり、その代表格がApple Computer社のロボットによる解体などである。
- ・データサイエンスや情報共有・利用が重要である。解体、選別等におけるAI技術の援用は当面の技術進歩の大きな部分を担う。欧州中心で進みつつあるデジタル製品パスポート（Digital Product Passport：DPP）⁷⁾に見られるように、資源調達から製品製造、利用のサプライチェーンの設計においてもデータ活用を前提条件として考える段階にある。
- ・CEの考え方の重要な点は、一度採取した資源はその価値を最大化することで循環の中にとどめる点である。エレンマッカーサー財団のバタフライダイアグラム⁸⁾と呼ばれる循環の姿には、人工物側の環は在庫管理（Stock Management）と書かれている。つまりシェアリング、サブスクなどの所有権を持たせないサービス化、リマン、リファービッシュも援用したリユース、そして最後の砦としての金属回収をうまく組み合わせ、価値を最大化しつつ資源循環の環を回すことを主張している。そのためには全ての製品の関連技術の理解とこれをうまく組み合わせる社会システム、そのための情報共有が欠かせない。資源の流れの俯瞰的な理解が不可欠であり、マテリアルフロー分析（Material Flow Analysis：MFA）やLCAのような俯瞰的な分析技術もまた必要不可欠である。
- ・天然資源開発の現場においては、遠隔操作やロボット利用による自動化・無人化が進んでいるが、これは機器類の電動化と再エネ電源利用による脱炭素の動きでもある。天然資源の劣化の現状を踏まえると、鉱山現場の温室効果ガス排出は増加の一途であり、高い鉱山技術を有する日本企業は資源開発現場全体に技術を活かすべきである。天然資源の探査については、データサイエンスの進展から、主として得られたデータの使いこなしに進化が見られる。

【論文・特許動向（プラスチック、金属共通）】

本研究開発領域の論文および特許動向を調査した結果、以下のポイントが明らかになった。なお、分析結果の詳細は「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）」の「3.1.E8.4 リサイクル」にて報告している。

- ・論文数はいずれの国も増加傾向にあり、各国のシェアは大きくは変化していない。CEの概念を提唱した欧州の論文数が多いが、中国が欧州の合計に近づいている。インドの増加率が高いことも特徴としてあげられる。日本のシェアは低く、増加率も他の国に比べて低い。
- ・論文の企業共著率は日本が最も高い。
- ・より多くの国と共著関係にあるのは中国、米国である。英国、オーストラリアとの共著も比較的多い。日本の共著相手国は中国が多いが、それ以外の国との共著率は低い。オーストラリアは中国との共著率が高い。
- ・論文数上位機関としては、CERN（フランス）や中国の他、香港、インド、ブラジルの研究機関が存在感を見せている。
- ・特許ファミリー件数シェア、Patent Asset Indexシェアは共に中国が突出している。その一方で、日本は年々シェアを低下させている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

【プラスチック】

- ・使用済みプラスチックから改質反応による水素製造を経てアンモニアを合成しケミカルリサイクルする事業を株式会社レゾナック・ホールディングス（旧・昭和電工株式会社）が2003年から行っており、2022年1月に累計リサイクル量が100万トンに達したと発表した⁹⁾。
- ・三菱ケミカル株式会社とENEOS株式会社は、年間2万トンの処理能力を備えたケミカルリサイクル設備を建設し、2023年度からの廃プラ油化開始を目指している。生成油は化学プラントで化学品原料に、石油精製設備で石油製品に転換する¹⁰⁾。
- ・環境エネルギー株式会社は、ゼオライト系の触媒による接触分解プロセスを用い、廃プラの油化の実証検討を行っている¹¹⁾。廃タイヤ、廃食油・バイオマスの転換についても本触媒の適用を検討している。
- ・欧州ブランド協会であるAIMが推進するサプライチェーン間のイニシアチブHolyGrail 2.0は、プラスチック包装表面に米国Digimarc社が開発した電子透かし（目には見えない表面微細加工で情報付与）を施し、それを高解像度カメラによって読み取ることで高度な分別を行う実証実験を行っている¹²⁾。世界の2大分別機器メーカーのノルウェーTORMA社とフランスPellenc社も参加している。
- ・東北大学はポリオレフィン（PEやPP）を200℃と比較的低温で分解できる触媒としてRu/CeO₂を見出し出している。約90%の高収率で長鎖の炭化水素や低分子の化学品原料が得られる¹³⁾。
- ・福岡大学は、ポリオレフィンのマテリアルリサイクルにおいて物理的な性質が劣る理由が樹脂の配向構造にあり、射出成形時の温度の最適化や樹脂だまりを設置し緩和時間を設けることで新規製造品と同等の性能にできると報告している^{14), 15)}。

【金属】

・単体分離のための破碎（破壊）技術

旧来型の破碎機による摩擦力による破碎や例えばクロスフローシュレッダーなど剪断力を用いるような破壊、電気パルスを用いるものなど「粉々にする」破碎から、パーツをそのまま分離する方向へと破碎技術は変化を見せている。その背景には、少量が特定部位に含有されるようなレアメタルを回収したいという下流側の動機が存在する。人工物である使用済み品から回収目的の素材を単体分離することが目的であり、特に金属だけを目的とするわけではない。

・AI選別技術に代表される新しい選別技術

破碎等により単体分離された後の分別工程で注目すべきは、各種のセンシングとそこから得られた情報をAI技術を用いて処理、選別する技術である。例えば、AIを用いた画像選別技術が活躍しつつある。画像だけではなく、多様なセンサー選別技術が発展しつつあり、選別技術と破壊技術は組み合わせで進化している。AIを用いた選別技術においては、その選別結果が次の選別に対して教師データとなり競争力につながるため、その情報の所有権が極めて重要で、自前の選別技術の開発が望まれる。

・原料の変化に応える製錬における技術開発

天然資源の劣化（低品位化）や、これに呼応するようなCE、カーボンニュートラルの促進の流れから、循環資源の活用に加え、天然資源についてもこれまで使ってこなかった品質、形態の原料への対応が必要となる。これは分離・選別技術だけで対応できるものではない。そのため、製錬側の技術的対応も不可避である。非鉄製錬における湿式、乾式の使い分けや、鉄鋼製錬における電炉の利用拡大などが既に現実のものになりつつある。それに伴う技術開発は継続して必要である。例として、株式会社エマルシオンフローテクノロジーと大平洋金属株式会社は、日本原子力研究開発機構の開発した溶媒抽出技術「エマルシオンフロー」を活用しリチウムイオン電池（以下LIB）から、Co、Ni、Liを高効率で抽出する技術を開発している¹⁶⁾。従来の湿式製錬においては油層と水層を混ぜて金属を抽出した後、時間をかけて静置して層を分離させる必要があっ

たが、新しい方法によればエマルションのサイズを制御することで送液のみで分離を行なうことができ、生産性は10倍に向上する。

〔注目すべき国内外のプロジェクト〕

■国内

【プラスチック】

- ・環境省「脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業」¹⁷⁾（2019～2023年度）

化石由来プラスチックからバイオプラスチック等の再生可能資源への代替、又はリサイクルの難しいプラスチックの新たなリサイクルプロセス構築を行うことにより、資源循環システムを構築し、併せてエネルギー起源CO₂排出を抑制することを目的としている。複合素材プラスチック等のリサイクル手法開発も含まれる。

- ・NEDO「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」¹⁸⁾（2020～2024年度）

2019年度から開始されたNEDO先導研究（「プラスチックの高度資源循環を実現するマテリアルリサイクルプロセスの研究開発」「プラスチックの化学原料化再生プロセス開発」）を統合¹⁹⁾。廃プラの資源価値を飛躍的に高めるため、（1）複合センシング・AI等を用いた廃プラ高度選別技術、（2）材料再生プロセス（マテリアルリサイクル）、（3）石油化学原料化技術（ケミカルリサイクル）、（4）高効率エネルギー回収・利用技術の開発（サーマルリサイクル）を連携させて行い、廃プラの品質に応じた最適な処理システムを構築することによる高度資源循環と環境負荷低減の両立を目指している。

- ・戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「サーキュラーエコノミーシステムの構築」²⁰⁾（2023年度～）

大量に使用・廃棄されるプラスチック等素材の資源循環を加速するため、原料の調達から設計・製造段階、販売・消費、分別・回収、リサイクルの段階までのデータを統合し、サプライチェーン全体として産業競争力の向上や環境負荷を最小化するサーキュラーエコノミーシステムの構築を目指す。分解に適した素材の開発（脱架橋、脱多層のモノマテリアル化）、回収率・リサイクル率の向上のための統合データプラットフォームやトレーサビリティの構築及び消費者の行動変容を促す環境整備も検討内容に含まれる。

- ・JST CREST「分解・劣化・安定化の精密材料科学」²¹⁾（2021年度～）

資源循環の実現に向けた結合・分解の精密制御技術を開発する。フッ素材料の精密分解、複合材料の界面分解・分離技術、圧力による分解（バロポリエステル）、分解用触媒開発、分解・劣化のメカニズムの理解などが取り組まれている。

- ・JST さきがけ「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」²²⁾（2021年度～）

使用中は優れた機能や性能を安定的に発揮するため確実な結合を有し、使用後は再利用するために温和な条件下で光や熱で選択的に所望の部位が分解する材料の開発。

【金属】

- ・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」²³⁾（2017～2022年度）

都市鉱山の有効利用を促進し、金属資源を効率的にリサイクルする革新技术・システムの開発。使用済み電子機器の個体認識・解体・選別プロセスを無人化する廃製品自動選別システム、廃部品を製錬原料として最適選別する廃部品自動選別システム、従来の金属製錬技術を補完する多品種少量金属種の高効率製錬技術の開発が含まれる。

- ・NEDO「アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業」²⁴⁾（2021～2025年度）

アルミニウムの新地金製造時の大きなCO₂排出原単位が課題であり、少ないエネルギー消費で済む再生地金の活用が期待される。（1）溶解工程高度化による不純物元素軽減技術、（2）鑄造・加工・成形技術高度化による微量不純物無害化技術などの組み合わせにより、アルミニウムスクラップから高性能な再生展伸材を得る技術を開発する。

・NEDO (グリーンイノベーション基金)「次世代蓄電池・次世代モーターの開発」²⁵⁾(2022～2030年度)

蓄電池やモーターシステムの性能向上・コスト低減の技術開発に加え、蓄電池やモーターには、希少金属資源が多く使用されており、資源制約の克服の観点から、よりサプライチェーンリスクの低い材料の開発や、リサイクルの実現にも取り組む。

・JST 未来社会創造事業「持続可能な社会実現」²⁶⁾(2019～2023年度)

2017～2019年度の探索研究を引き継いで本格研究「製品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」が取り組まれている。異種材料の分離を容易にする新規電気パルス法と、それを活用した製品ライフサイクル最適化技術の開発を目指している。

■国外

【共通】

・「循環型経済行動計画 (Circular Economy Action Plan)」²⁷⁾

欧州グリーンディール実現に向けた循環型経済行動計画が2020年3月に発表され、環境負荷が高い「包装」「プラスチック」「繊維」「食」「自動車・バッテリー」「建設・建物」「電子・情報通信機器」の7つを重点産業と設定、具体的な施策を打ち出して企業の行動変容を促している。研究開発・イノベーションを支援するHorizon Europeでは循環型経済とバイオ経済に注力するとし、その中でプラスチック循環の研究開発も取り組まれる。

・ISO TC323 (Circular Economy)

CEをISO化し、更に評価手法等の構築 (WG3) や情報共有に関するデータシートの定義 (WG5) まで行う。日本からも参画。2023年時点で規格原案 (Draft International Standard : DIS) 段階であり、2024年に国際規格として発行の予定。

【プラスチック】

・米国エネルギー省 (DOE)「Plastics Innovation Challenge」²⁸⁾(2019年～)

エネルギー効率の高いプラスチックリサイクル技術のための包括的なプログラムであり、先進プラスチックリサイクル技術の開発や、より価値の高い製品にアップサイクルするためのプラスチックの設計開発を支援する。12のプロジェクトに2,700万ドル以上の資金を提供している。

(5) 科学技術的課題

【プラスチック】

- ・材料リサイクルにおける技術的課題は、リサイクルの過程でダウングレードさせず、新規製造品と同等の性能を維持させることである。そのためには、徹底した異物除去・材料選別に加え、使用中の熱履歴や経年劣化等による物性低下への対応も必要となる。
- ・社会に投入されるプラスチック樹脂は強度・難燃性・電気絶縁性・耐摩耗性等高機能化のため材料の複合化が進む傾向があり、その製品形態も複雑化している。それに対応するリサイクルは、複雑さが増し、技術的課題も存在している。例えば容器包装用プラスチックという身近な材料においても、高機能化の要請に伴い異なる性質を有する複数の樹脂を層状に重ね合わせたラミネートフィルム (多層フィルム) が多く使われるようになってきているが、強固に接着した層間を剥離・分別するのは容易ではない。軽量、高強度のCFRPの輸送機器等への適用が進んでいるが、CFRP複合材料に用いられる樹脂は耐熱性の高い熱硬化樹脂からなるためその解体には高度な技術を要する。これらについてもリユース、材料リサイクルの技術開発を目指しつつも、これを補完するケミカルリサイクル技術の開発も併せて必要である。プラスチック材料を供給する側においても、リサイクルを念頭に、易解体性を意識したプラスチック製品設計、環境負荷の小さな原材料の使用などが求められていくと考えられる。

- ・ケミカルリサイクルの熱分解技術においては副生物への対応が課題である。PET樹脂は熱分解でテレフタル酸や安息香酸等の昇華性物質を生成し機器や配管等の腐食と閉塞の原因となる。PVC樹脂は、熱分解の過程で脱離した塩化水素ガスが塩酸となるため、機器・配管の腐食の原因になる。PVC樹脂が他のプラスチックに混合されて処理されると、有機塩素化合物を生成し生成物の品質を低下させる課題もある²⁹⁾。窒素や硫黄を含むプラスチックでは、分解時の窒素酸化物（NOx）や硫黄酸化物（SOx）の生成を抑制する必要がある。ポリウレタン、ポリアミド、ポリイミド等の窒素含有プラスチックでは、分解時に生成するシアン化水素（HCN）の無害化が必要不可欠である³⁰⁾。またハロゲン化物添加剤により耐熱性・難燃性等の機能性を高めたプラスチックは熱分解特性も様々であり、それらに対応した脱ハロゲン化技術の適用、さらには除去したハロゲン化物を動脈産業に再び循環させることが求められる。

【金属】

・低炭素技術由来の使用済み品のリサイクル（PV、LIB、磁石）

低炭素へ向かう社会全体の流れの中、そこで利用される機器類、例えば太陽光パネル、LIB、そして重要パーツとしてのレアアース磁石等のリサイクルの技術は既に注目されているが、これらから回収される金属の採算が高くないという課題がある。リサイクルの採算が良い使用済み製品は、通常は貴金属類を高濃度で含む製品で典型的には高品位基板などか、例えば単純なモーターコアにおける銅などの比較的単純なベースメタル類で構成されるケースである。これに対して太陽光パネルは元素としては価値の低いガラスやシリコンが主で、LIBにおいては価値の高いコバルトやニッケル以外にも価格としてはそこまで高くないリチウムを含む。レアアース磁石は比較的素材価格は高いものの、脱磁をはじめ、それ専用のプロセスを要求する点がある。いずれも望ましくない特徴をもつが、資源の価値が否定されるものではなく、前処理工程を含めて、より安価なリサイクルプロセスの開発が技術課題である。我が国としては太陽光パネルの導入年が比較的極端であったことから2030年代後半から廃棄が一時的に大きな量になる可能性が懸念されており、社会システム的な受け皿が必要と考えられる。

（6）その他の課題

【共通】

- ・CE社会における情報共有（資源循環DX）：我が国においても、経産省が資源自律型経済を標榜するなど、より能動的な資源確保としての資源循環が進められる中、天然資源の探査にかかる費用に比して極めて不足しているのが循環資源の情報である。例えばMFAを用いた将来推計などはこれに類するものではあるが、欧州の進めるDPPのような情報共有の形、また製品サービスシステム（Product Service Systems：PSS）といった所有形態の変化を伴う製品のサービス化などはこれに付随する情報をシステム側に共有させることにつながる。これらの情報は循環資源の賦存量のデータと考えれば、自ら資源情報を集約するプラットフォームへの投資はもっと大きくて良い。例えば紛争鉱物の問題など、ESGにおける環境以外の側面もカバーするために、資源循環に関する情報とそれ以外の情報とを組み合わせることとトレーサビリティの高い情報とすることを目指すべきであろう。
- ・わが国はリサイクルメジャーの存在に欠き、静脈産業においてスケールメリットを生かしづらい環境にある。静脈産業のインフラの強化とともに、動脈・静脈の連携による効率的な物質フロー、コスト（回収・輸送・処理）を達成するための社会システムのあり方について考えていく必要がある。
- ・リサイクル技術について、我が国のLCA等の評価研究の論文が少ない。表に出ない理由を考えるべきであろう。

【プラスチック】

- ・早急に対応が必要な政策的課題としては、個別リサイクル法毎の縦割り制度と容器包装リサイクルの材料

リサイクル入札優先制度に関連した課題が挙げられる。「容り法」、「自動車リサイクル法」、「家電リサイクル法」等それぞれの個別リサイクル法の枠組みの中で対応してきた経緯があるが、プラスチック資源循環戦略が2019年に策定され、「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律」が2022年より施行されている。関係するステークホルダーの幅が広がり、「リサイクルの質・用途の高度化」「環境負荷の低減効果等」「再商品化事業の適正かつ確実な実施」等の評価項目を設けた総合的評価の実施等の措置も講じられるようになっている。しかし高コスト、非効率性が引き続き課題であり、より効率的なシステム実現のための政策スキーム、それに適した技術の開発、実装が望まれる。

【金属】

- ・カーボンニュートラルな社会においてはクリーンなエネルギーの生産、利用のための多くの機器が必要になり、それに伴い特定の金属の使用量の増大が予想される。そのためリサイクルと並行して鉱山開発も不可欠であり、環境影響に対しては引き続き対策技術の向上が望まれる。採掘が進むにつれ資源そのものが劣化する。ここでいう劣化は、単純に濃度という意味での品位の低下だけではなく、より深くなる、生物多様性のホットスポットでの採掘が必要になるなどである。そうなるにつれて、単位量の資源獲得あたりの環境負荷も大きくなる。また金属回収時に生じるスラリー状の副生物（尾鉱）については、さらなる金属回収は技術課題であり、最終処分も問題である。ブラジル・ブルマジーニョ尾鉱ダムが決壊による環境被害の事例も見られている。
- ・非在来型の資源についても目を向けていく必要がある。海洋国家である我が国にとって海底鉱物資源への期待は古くから大きい。レアアース危機とタイミングを同じくして海底レアアース泥に関する研究が進捗してきた。これらの探査についてはデータの取得そのものが難しい技術であるが、我が国の進めてきた海底鉱物資源関係の調査事業は一定の成果を上げており、継続的な調査が望まれる。

（7）国際比較

【プラスチック】

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	○	↗	●プラスチックリサイクルは1990年代より先進的技術開発に向けた基礎研究が継続的に行われている。特に、ケミカルリサイクルに関しては既存の技術では再資源化が不可能であった混合廃プラの分解に関するメカニズム解明のための嚆矢となる基礎研究が活発化してきている。しかし製品として社会に投入されるプラスチックの多様化・高機能化の速度があまりにも速く、成果が表面化しにくい側面もある。
	応用研究・開発	○	→	●高機能選別機・破砕機の導入が進んでいるものの、多くの装置は海外製品であり、国内製品の開発は低調である。日本のリサイクル産業は欧米に比べて中小規模の企業が多くスケールメリットが得られにくい構造にある。また、石油および石油化学産業の取組が始まりつつあるが、静脈側との連携が弱く、効果的な成果が出にくい状況である。
米国	基礎研究	○	→	●日本の一般廃棄物にあたるMSW（Municipal Solid Waste）においてプラスチックのリサイクル率は30%程度と見積もられ ³¹⁾ 、決して高い割合ではないが、プラスチックリサイクルに関する基礎研究は1980年代後半から行われており、研究の蓄積がある。
	応用研究・開発	○	↗	●オレフィン系プラスチックをスチームクラッカーを用いてプラスチック原料化する技術や混合廃プラを原料とした熱分解油と精製された炭化水素を化学品原料にする施設導入を進めている。また、製品プラスチックの添加剤や異物除去により材料リサイクルする実証試験を進めている。

欧州	基礎研究	◎	↗	●プラスチックリサイクルに関してはドイツ、イギリス、イタリア、スペインにおいて基礎研究が盛んに行われ、特にドイツ、イタリアでは2010年以降研究文献数の増加傾向が顕著に見られる。
	応用研究・開発	◎	↗	●リサイクルメジャーの進出や買収により企業の集約化が進む。高度で大規模な選別技術により高い品質の材料リサイクルが実現している。 ●近年では、ケミカルリサイクルに関する投資が活発化しており、石油産業および石油化学産業界において技術開発と施設導入が積極的に行われている。
中国	基礎研究	◎	↗	●2000年代後半からプラスチックリサイクルに関する基礎研究が増えてきており、2008年頃から研究文献数が急増している。近年 WEEE や自動車リサイクルに関連したプラスチックリサイクルの基礎研究も見られる。
	応用研究・開発	◎	↗	●「循環経済政策」に伴い産業区などで大規模なリサイクルインフラ整備が行われている一方で、国内からの循環資源としての廃プラ確保が課題である。また近年では選別機器の開発が活発になってきており、特許件数が極めて多い。
韓国	基礎研究	△	→	●プラスチックリサイクルに関する基礎研究は低調である。
	応用研究・開発	○	↗	●回収拠点が年々増加傾向にあり、マテリアルリサイクルが活発化してきている。また、最近ではケミカルリサイクルの取組が試行されている。

【金属】

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	○	→	●本領域が対象とする分野が広いため整理が難しいが、金属素材関連の基礎学術レベル自体は依然として高い。ただし、盛んな分野は下流側にシフトしており、資源循環を支えるような対象に取り組む研究者の数が余り多くない。 ●天然資源開発に関してはフィールドも少ないことから研究者は少なく、減少の一途で明らかに問題である。ただし、唯一海底鉱物資源、特に地球科学関係には強みを持つ。
	応用研究・開発	◎	→	●鉄鋼・非鉄金属製錬業界が共に健在であることから社会実装の担い手は多く、レベルも高い。ただし、分離・選別技術については欧州に対して劣っているとする見方が多い。それは大手のリサイクル産業があまりない業界の歴史的な姿にも影響を受けている。 ●天然資源開発はフィールドの少なさが弱みになっていると考えるべきである。ただし、鉱山機械については株式会社小松製作所に代表されるような日本企業が強みを持っている。
米国	基礎研究	△	↗	●米国はそもそもリサイクルを中心とした資源循環について高度な基礎研究を行ってきた国ではない。ただし、昨今の脱炭素化、更に資源ナショナリズム等の高まりから、例えば DOE が Critical Material Institute (CMI) を設立、技術開発、学際研究の双方を支援するなどした効果が出始めており、トレンドは上向きだと思われるが、やや応用研究よりではないかと思われる。 ●天然資源開発については元々力を入れている。
	応用研究・開発	○	↗	●上述の CMI は当然社会実装までを視野に入れており、応用研究なども進んでいる。 ●天然資源開発についてはフィールドも多くトレンドとしては上向きである。

欧州	基礎研究	○	→	●欧州全体としてCEに関する研究には予算が付きやすく、それは基礎研究であっても例外ではない。研究対象としては喫緊の課題である二次電池関連などは新規製品開発とともに、その循環利用に関わる固体分離、選別、精錬各分野における基礎研究も、電池のライフサイクル全体にかかる基礎学理として進んでいる。
	応用研究・開発	◎	→	【EU】 ●言うまでもなくCEの旗振り役であり、技術から社会システムまで先進的に取り組んでいる。また情報共有等の側面でも確実に世界をリードしている。天然資源についてもCEとの統合的な戦略展開が比較的良好に進捗しているように思われ、またCritical Raw Material Listの公表などはそれに貢献しているように思われる。 【英国】 ●英国もCEの社会実装に前向きな姿が目立ちつつある。例えばCEの社会実装にかかる規格であるBS8001は2017年には発表されており、極めて先進的である。そしてこれに付随する技術開発等も進んでいる。 【ドイツ】 ●ドイツではCEレバーと呼ぶコンセプトを中心にしたロードマップが発表されたが、いわゆる売り切り型からサービス（機能）提供型へとビジネスモデルの転換を進めた上で、順調であればCE的な概念を上から載せるような流れを想定しているようである。積極的な取り組みが多方面で見られるが、IoT利用が進んでいる印象がある。 【フランス】 ●フランスには水道・廃棄物処理大手であるヴェオリアが存在することもあり、CEに積極的に取り組んでいる国の一つである。ISOのTC323の提案国であり、また全体の議長を務めている。
中国	基礎研究	○	↗	●全ての学分野に共通すると思われるが、本分野の研究でも基礎、応用を問わずレベル上昇の一途であると言える。論文本数を見ても強い上昇トレンドにある。
	応用研究・開発	◎	↗	●現場、例えば非鉄製錬やその前段階にあたる鉱山現場等も急速にレベルを上げている。そもそも資源保有国であり、天然資源側のフィールドには事欠かなかっただけではなく、東アジアのスクラップを一手に引き受けていた時期もあり、対象の入手にも事欠かない。
韓国	基礎研究	△	→	●我が国と変わらず、天然資源は多くなく、他方で強い素材産業が存在する。それを支える学も存在しているが、十分に強いというほどではない。
	応用研究・開発	△	→	●トレンドとして下降というわけではないが、鉛の二次製錬の不正は国際社会での信用を失うような大きなマイナスであったと言える。本分野において、こうした信頼を失う行為の意味は小さくない。

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国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。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・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」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考・引用文献

- 1) Plastics Europe, “Plastics - the fast Facts 2023,” <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>, (2024年2月26日アクセス) .
- 2) 化学工業日報社 編『17221 の化学商品』(東京: 化学工業日報社, 2021).

- 3) 環境省「容器包装廃棄物の使用・排出実態調査の概要 (令和3年度)」https://www.env.go.jp/recycle/yoki/c_2_research/research_R03.html, (2024年2月26日アクセス)。
- 4) 一般社団法人プラスチック循環利用協会「プラスチックリサイクルの基礎知識2023」<https://www.pwmi.or.jp/pdf/panf1.pdf>, (2024年2月26日アクセス)。
- 5) 一般社団法人産業環境管理協会 資源・リサイクル促進センター「リサイクルデータブック2023」<https://www.cjc.or.jp/data/pdf/book2023.pdf>, (2024年2月26日アクセス)。
- 6) 特許庁「令和2年度特許出願技術動向 調査結果概要: プラスチック資源循環 (令和3年2月)」https://www.jpo.go.jp/resources/report/gidou-houkoku/tokkyo/document/index/2020_04.pdf, (2024年2月26日アクセス)。
- 7) 吉沼啓介「EU、エコデザイン規則案で政治合意、未使用繊維製品の廃棄禁止へ」独立行政法人日本貿易振興機構 (JETRO), <https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/12/ed09003e4ac32460.html>, (2024年2月26日アクセス)。
- 8) Ellen MacArthur Foundation, “The butterfly diagram: visualising the circular economy,” <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>, (2024年2月26日アクセス)。
- 9) 株式会社レゾナック・ホールディングス「プラスチックケミカルリサイクル事業において使用済みプラスチックのリサイクル量累計100万トンを達成」<https://www.sdk.co.jp/news/2022/12476.html>, (2024年2月26日アクセス)。
- 10) ENEOS 株式会社, 三菱ケミカル株式会社「ENEOSと三菱ケミカル共同のプラスチック油化事業実施について: 国内最大規模のプラスチックケミカルリサイクル設備を建設」三菱ケミカル株式会社, https://www.m-chemical.co.jp/news/2021/_icsFiles/afieldfile/2021/07/20/plasticoleochemicalrecycling.pdf, (2024年2月26日アクセス)。
- 11) 環境エネルギー株式会社, <https://www.kankyo-energy.jp/>, (2024年2月26日アクセス)。
- 12) Digital Watermarks Initiative HolyGrail 2.0, <https://www.digitalwatermarks.eu/>, (2024年2月26日アクセス)。
- 13) Yosuke Nakaji, et al., “Low-temperature catalytic upgrading of waste polyolefinic plastics into liquid fuels and waxes,” *Applied Catalysis B: Environmental* 285 (2021) : 119805., <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119805>.
- 14) Patchiya Phanthong, Yusuke Miyoshi and Shigeru Yao, “Development of Tensile Properties and Crystalline Conformation of Recycled Polypropylene by Re-Extrusion Using a Twin-Screw Extruder with an Additional Molten Resin Reservoir Unit,” *Applied Sciences* 11, no. 4 (2021) : 1707., <https://doi.org/10.3390/app11041707>.
- 15) Hikaru Okubo, et al., “Effects of a Twin-Screw Extruder Equipped with a Molten Resin Reservoir on the Mechanical Properties and Microstructure of Recycled Waste Plastic Polyethylene Pellet Moldings,” *Polymers* 13, no. 7 (2021) : 1058., <https://doi.org/10.3390/polym13071058>.
- 16) 株式会社エマルションフローテクノロジーズ「TECHNOLOGY: 水平リサイクルを実現する革新的な溶媒抽出技術エマルションフロー」<https://emulsion-flow.tech/technology/>, (2024年2月26日アクセス)。
- 17) 環境省「脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業」<https://www.env.go.jp/recycle/plastic/bio/itaku.html>, (2024年2月26日アクセス)。
- 18) 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)「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100179.html, (2024年2月26日アクセス)。
- 19) 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)「NEDO 先導研究プログラム:

- 2019～2020」<https://www.nedo.go.jp/content/100904010.pdf>, (2024年2月26日アクセス)。
- 20) 内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)サーキュラーエコノミーシステムの構築 社会実装に向けた戦略及び研究開発計画」, https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sip_3/keikaku/07_economysystem.html, (2024年10月31日アクセス)。
- 21) 国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)「分解・劣化・安定化の精密材料科学」CREST, https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunya2021-1.html, (2024年2月26日アクセス)。
- 22) 国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)「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」さきがけ, https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/bunya2021-1.html, (2024年2月26日アクセス)。
- 23) 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)「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」https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100129.html, (2024年2月26日アクセス)。
- 24) 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)「アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業」https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100195.html, (2024年2月26日アクセス)。
- 25) 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)「次世代蓄電池・次世代モーターの開発」Green Japan, Green Innovation, <https://green-innovation.nedo.go.jp/project/next-generation-storage-batteries-motors/>, (2024年2月26日アクセス)。
- 26) 国立研究開発法人科学技術振興機構(JST) 未来社会創造事業「「持続可能な社会の実現」領域 本格研究」JST, <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/sustainable/JPMJMI19C7.html>, (2024年2月26日アクセス)。
- 27) European Commission, “Circular economy action plan,” https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en, (2024年2月26日アクセス)。
- 28) U.S. Department of Energy (DOE), “Strategy for Plastics Innovation,” <https://www.energy.gov/plastics-innovation-challenge/plastics-innovation-challenge>, (2024年2月26日アクセス)。
- 29) 熊谷将吾, 齋藤優子, 吉岡敏明「使用済みプラスチックの熱分解による化学原料化」『化学工学』85 巻 3 号 (2021) : 160-163.
- 30) 齋藤優子, 熊谷将吾, 吉岡敏明「プラスチックリサイクルの現状と将来展望」『油空圧技術』61 巻 6 号 (2022) : 32-38.
- 31) U.S. Environmental Protection Agency, “Facts and Figures about Materials, Waste and Recycling,” <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling>, (2024年2月26日アクセス)。