



技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

Vol. **13**

メタルリサイクル分野の 技術戦略策定に向けて

2016年12月

1 章	メタルリサイクル技術の概要	2
2 章	メタルリサイクル技術の置かれた状況	3
2-1	世界のリサイクルの動向	3
2-2	国内におけるリサイクルの状況	5
2-3	市場規模とプレイヤー(国内・海外)	8
2-4	論文発表・特許出願等の動向	10
2-5	諸外国の研究開発政策の状況	13
3 章	メタルリサイクル分野の技術課題	15
3-1	メタルリサイクルに関する技術体系	15
3-2	メタルリサイクルに関する技術課題	17
4 章	おわりに	19

TSCとはTechnology Strategy Center(技術戦略研究センター)の略称です。

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

1章 メタルリサイクル技術の概要

自動車やIT製品といった我が国の主要製造業において、金属資源はその高性能化に必須の素材であり、我が国の産業競争力に必要不可欠である。しかし、近年、新興国の経済成長、資源埋蔵量の偏在性、資源ナショナリズムの台頭などにより将来的な金属資源供給のひっ迫が予測されている。さらに、鉱山の奥地化、深部化や粗鉱品位の低下、環境対策、人件費の増大等により、鉱山開発コストは増大しており、長期的な資源価格の上昇は避けられないと考えられている。金属資源の大半を輸入に依

存している我が国では、その安定的な確保が重要な課題であり、メタルリサイクルが解決のカギとなる。

メタルリサイクルにおける基本的なプロセスのフローと各プロセスにおける処理技術を図1に示す。リサイクルのプロセスは物理選別と化学分離に大別することができる。物理選別は、①個別選別（廃製品の選別）、②分解・解体（廃製品を部材に分離・解体）、③破碎（成分分離の事前処理）、④集合選別（後段金属製錬工程の能力に応じた成分の分離・濃縮）という処理に分けられる。化学分離は化学反応や電気分解反応等を利用して、金属の純度を高めるための処理である。



図1 廃製品からのメタルリサイクルプロセスフロー

出所:省資源型・環境調和型資源循環プロジェクト使用済み小型家電からのレアメタルリサイクルシステム構築データ解析・評価事業報告書 (NEDO, 2010) を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

2章 メタルリサイクル技術の置かれた状況

2-1 世界のリサイクルの動向

国連環境計画 (UNEP) の国際資源パネル (IRP: International Resource Panel) がまとめた世界の元素に関する使用済み製品由来のリサイクル率の現状は図2のようになっている。

この状況を踏まえて、IRPは、リサイクルインフラ整備の

加速と、効率的な使用済み製品収集及び収集後の効率的かつ最適な物理選別処理の重視を主張している。

また2016年5月には、G7環境大臣会合にて、天然資源の消費を抑制し、再生材や再生可能資源の利用を進め、競争力の向上や持続可能な成長を実現することを共通ビジョンとする「富山物質循環フレームワーク」が採択された。その取組の目標として、国内だけでなく世界を意識した資源効率性及び3Rの促進が掲げられた。具体的には、電気電子機器廃棄物 (e-waste) の管理が挙げられている。

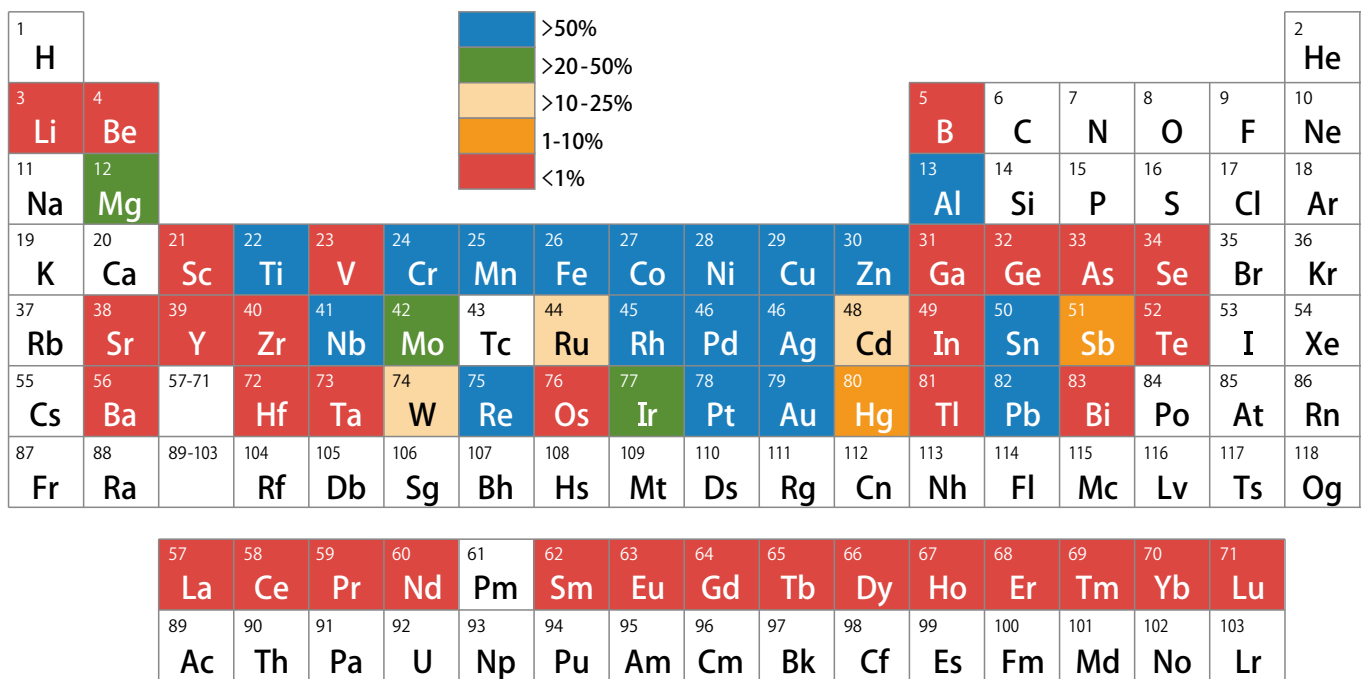


図2 元素別使用済み製品由来リサイクル率 (世界規模)

出所: 金属の社会蓄積量: 科学的総合報告書、金属のリサイクル率: 状況報告書 (UNEP 報告書, 2011) を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

(1) 欧州の動向

欧州連合は、「EUROPE2020」(2010)において資源効率(RE:Resource Efficiency)という概念を掲げ、資源効率を持続可能な成長を実現するためのフラッグイニシアティブの一つとして位置付けている。

欧州連合はこれまでリサイクルに関して、廃棄物、容器包装、e-waste、使用済み自動車(ELV:End of Life Vehicle)等の、製品品目ごとに個別の廃棄物リサイクル政策を実施してきたが、「持続可能な資源管理に関する非公式環境閣僚理事会の議長サマリー」(2010)において、「これまでの廃棄物施策は環境負荷削減と天然資源枯渇を避けるには不十分で包括的な資源政策へと転換しなくてはならない」と主張した。

これらを踏まえ、欧州域内で完結する循環資源利用の社会を目指し、リサイクルのための市場を作ることを目的として、従来の資源消費型経済から、資源効率を最大化する循環経済(CE:Circular Economy)への転換を図るため、2015年に共通フレームワークの確立を目的とした提案「CEパッケージ」を採択した。

(2) 米国の動向

米国政府は、レアアース等の重要資源確保については、安全保障の観点から重要視している。一方、廃棄物処理やリサイクルに関しては、ビジョンや目標設定を示すのみに留まっており、具体的な取組は州・市レベルに任せている。e-wasteに関して、カリフォルニア州やミネソタ州のように州法に基づきリサイクルを行っている例もあるが、地域住民がボランティア活動の一環としてリサイクル運動を行っているケースもある。

(3) 中国の動向

中国では、2007年、電子廃棄物による環境汚染を防止し、環境管理を強化するために電子電気製品、電子電気設備の廃棄や解体、処理を規制する法律として、「電子廃棄物汚染環境防治管理弁法」が公布された。その後、2013年には「循環型経済発展戦略及び当面の活動計画」が公布され、2015年末までに資源リサイクル産業の生産額の目標を1兆8,000億元(約34兆9,200億円、1元=19.4円:2015年平均)とし、鉄鋼、非鉄金属業等で金属スクラップ再利用等の取組による産業のモデル転換を進めている。

その流れを受けて、中国のリサイクル企業はe-wasteの処理量を増やしている。しかし、中国国内のe-wasteが300万トン程度あることに加え、輸入量が1,750万トンを超えて年々増加している。この増加したe-wasteの処理のために、技術的に未熟な不法業者による処理が増加し、中国各地で環境汚染を引き起こしている。

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

2 -2 国内におけるリサイクルの状況

(1) 政府方針

表1に示すように、我が国のリサイクルに関する法制度は、経済発展に伴う公衆衛生や環境保全に対する課題の顕在化を背景に整備されてきた。また、法制度の整備と並行して技術開発が行われ、様々な製品や資源に対するリサ

イクルの高度化が進んできた。そして、メタルリサイクルについても、これらの取組の中で高度化が進んできた。

2009年以降は、金属資源供給の逼迫や高コスト化といった、資源をとりまく世界的な変化に対応し、都市鉱山の資源化推進や、動静脈連携^{※1}の推進という新たな課題へ対応するフェーズに移行しつつある。

表1 リサイクルに関わる主な課題と法制度の変遷

フェーズ	主な課題	法律の制定、計画・戦略の策定
公衆衛生の向上	<ul style="list-style-type: none"> 環境衛生対策 	<ul style="list-style-type: none"> 清掃法 (1954)
公害問題と生活環境の保全 埋立て地対策	<ul style="list-style-type: none"> 公害の顕在化 埋立て地対策の拡大 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物の処理及び清掃に関する法律 (1970)
リサイクル推進 有害物質対策	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物処理施設整備の推進 廃棄物処理に伴う環境保全 	<ul style="list-style-type: none"> 広域臨海環境整備センター法 (1981) ごみ処理施設構造指針の改正 (1986)
3Rの推進	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物の排出抑制、リサイクル推進 各種リサイクル制度の構築 有害物質(ダイオキシン等)対策 	<ul style="list-style-type: none"> 再生資源有効利用促進法 (1991) 容器包装リサイクル法 (1995) 家電リサイクル法 (1998) ダイオキシン類対策特別措置法 (1999) 建設リサイクル法 (2000) 食品リサイクル法 (2000)
都市鉱山資源化の推進	<ul style="list-style-type: none"> 循環型社会の構築 	<ul style="list-style-type: none"> 循環型社会形成推進基本法 (2000) 自動車リサイクル法 (2002) 循環型社会形成推進基本計画 (2003)
都市鉱山資源化の推進	<ul style="list-style-type: none"> 資源供給対策 使用済製品の資源化 	<ul style="list-style-type: none"> レアメタル確保戦略の策定 (2009) エネルギー基本計画 (2010) 資源確保戦略 (2012) 小型家電リサイクル法 (2013)
動静脈連携の推進	<ul style="list-style-type: none"> 資源効率の向上 情報活用 	<ul style="list-style-type: none"> 循環型社会形成推進基本法 改正 (2013) 日本再興戦略 2016 (2016)

出所:日本の廃棄物処理の歴史と現状(環境省, 2015) 他資料を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

※1 天然資源を採取・加工して有用な材を生産・流通する諸産業を動脈産業、社会に排出された廃棄物の回収・選別から、素材・製品へのリサイクルを担う産業を静脈産業と呼び、両者が互いに連携して業を行うことを動静脈連携と呼ぶ。

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

(2) リサイクルビジネスの現状

静脈産業には、収集運搬・中間処理・再資源化・再資源化物の利用など機能別に様々な業態が存在し、メタルリサイクルの場合、金属スクラップ業者、中間処理業者、非鉄金属製錬業者、各素材別の金属精製業者、廃棄物処理業者といった様々な事業者が各機能を担っている。

(3) 製品、素材に関するリサイクル状況

① 廃製品中の金属のリサイクル状況

家電4品目（エアコン、テレビ、冷蔵庫・冷凍庫、洗濯機・衣類乾燥機）については、家電リサイクル法によって、動脈産業に直結した廃製品のリサイクルシステムを確立しており、再商品化率^{※2}は80%を超えている。

しかし、図3に示すように、分離された部品の中でも、モーターやトランス等に含まれる国内で分離困難な金属混合物は海外に輸出されている。また、基板類中のレアメタルのように、製錬残渣（スラグ）に混入し路盤材などにされてしまうものもある。再商品化された金属の中には、このように金属資源として国内でリサイクルされていないものが存在する。

近年、世界各国で廃棄量が増加しているe-wasteに関しては、我が国では2013年に小型家電リサイクル法が施行され、リサイクルシステムが構築されている。メタルリサイクルについては、収集後に既存の非鉄金属製錬工程で処理され、銅・金・白金族などが限定的に回収されており、現在、その他のレアメタルは路盤材にされている。

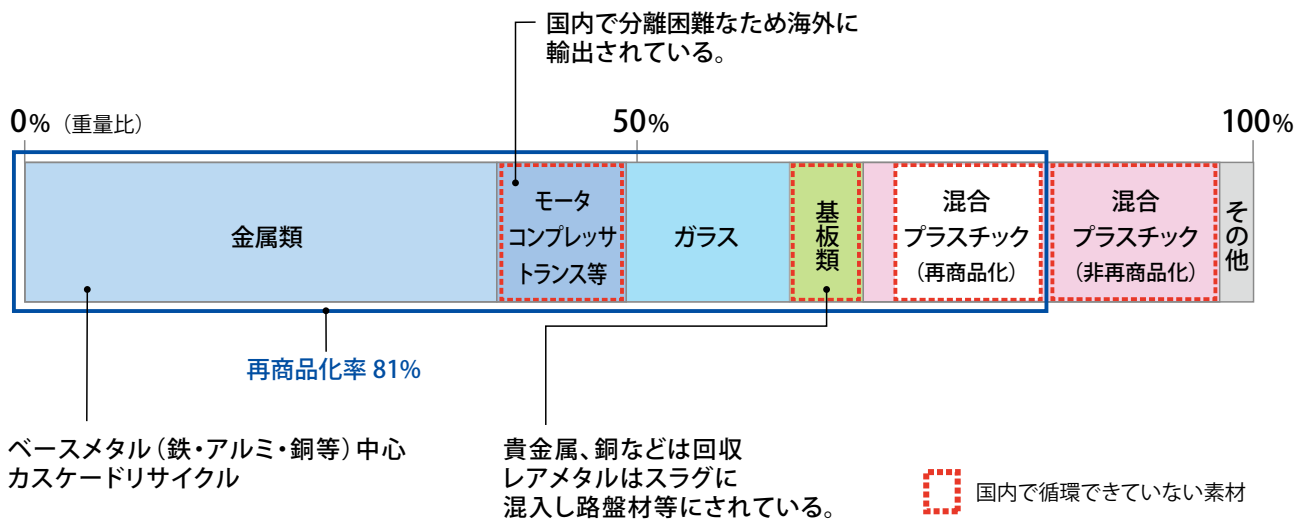


図3 国内での資源循環が不十分な例

出所：産業競争力懇談会2008年度推進テーマ報告「サステナブル生産技術基盤（08年度活動）」
（産業競争力懇談会，2009）を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2015）

※2 製造業者等が引き取った特定家庭用機器廃棄物の総重量のうち、分離された部品及び材料等を自ら利用可能及び有償又は無償で取引可能な重量の比率

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

② 金属種別のリサイクル状況

石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) の鉱物資源マテリアルフロー (2015) によると、国内におけるメタルリサイクルの状況に関しては、鉛は45%、金は30%程度がリサイクルされている。レアメタルのうち白金族は30%、水銀は30～50%、スズは1%、タングステンは10%、コバルトは0.6%と、リサイクル率は様々である。

非鉄金属の国内リサイクルを困難にしている主な要因の1つは経済性であり、金属スクラップの品質によってリサイク

ルコストが左右され、国内リサイクルの可否が決まる。

表2に示すように、日本の主要な非鉄金属スクラップ輸出量は輸入量を上回っている。銅、PGMについては、低品質のスクラップがリサイクルコストの安い海外へ輸出されている。アルミ、鉛については、国内でリサイクル可能な品質のスクラップであっても、海外での買い取り価格が高いため輸出が増加し、その結果、国内リサイクル率の低下が起きている。

表2 主なスクラップの資源循環の現状分析

回収金属	日本のスクラップ取引量	現状分析
銅	輸出 > 輸入	経済的に国内循環が不可能な品質の銅スクラップが海外へ流出。
白金系金属 (PGM)	輸出 > 輸入	経済的に国内循環が不可能な品質の PGM スクラップが海外へ流出。
アルミ	輸出 > 輸入	経済的に国内循環が可能な品質のアルミスクラップが海外へ流出し、国内リサイクル率が低下。
鉛	輸出 > 輸入	経済的に国内循環が可能な品質の鉛スクラップが海外へ流出し、国内リサイクル率が低下。

出所:平成26年度地球温暖化問題等対策調査(資源循環高度化・効率化事業)報告書(経済産業省,2015)を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2015)

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

2-3 市場規模とプレイヤー（国内・海外）

(1) 市場規模

2015年7月に環境省から発表された「環境産業の市場規模・雇用規模等に関する報告書」では、国内の2013年におけるリサイクル素材の製造・商品化等の産業に関する市場規模は約8.3兆円、そのうち非鉄金属・レアメタルに関する市場規模は約1.3兆円と推計している。さらに、人口やGDP成長率に基づき、2030年のリサイクル素材市場規模を基本シナリオ（2021～2030年のGDP成長率0.6%/

年）と成長シナリオ（2021～2030年のGDP成長率1.6%/年）を立て、それぞれ約9.4兆円、約13.0兆円と予測している。

この予測を基にリサイクル素材に占める非鉄金属及びレアメタルの比率（15.2%）が変わらないと仮定すると、非鉄金属・レアメタルに関する市場規模は、約1.43兆円、約1.97兆円と推算される（図4）。

また、同報告書では、世界市場の推算も行っており、それによるとリサイクル素材に関する市場規模は2013年で約70兆円、2030年では約130兆円に拡大するとしている。非鉄金属・レアメタルリサイクルの世界市場も、新興国の経済発展とともに成長していくと見られる。

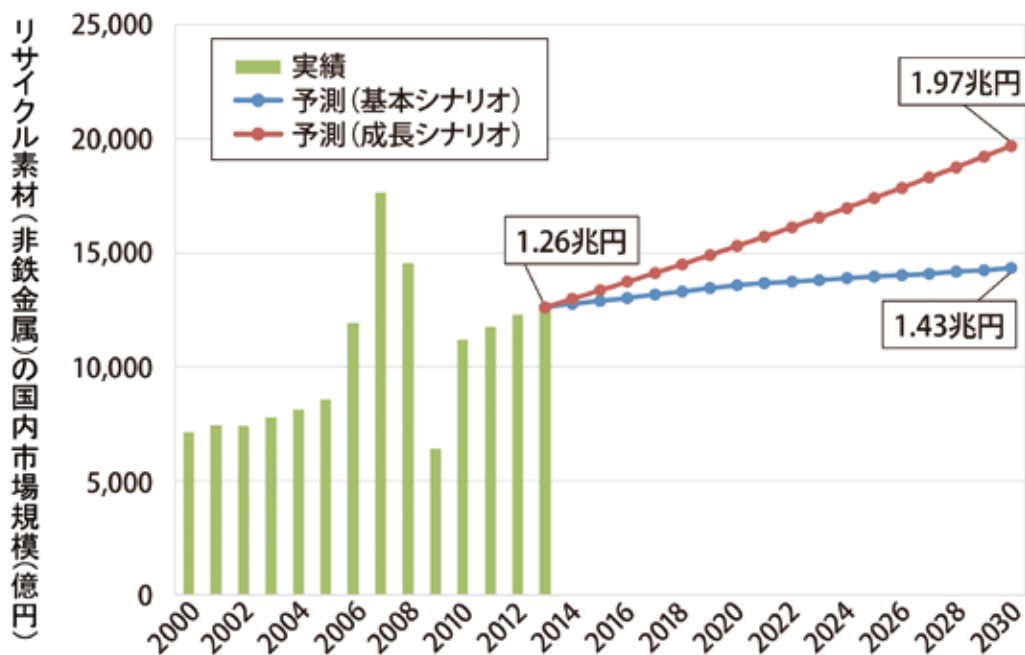


図4 リサイクル素材（非鉄金属・レアメタル）に関する産業の国内市場規模

出所：環境産業の市場規模・雇用規模等に関する報告書（環境省，2015）を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2016）

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

(2) プレーヤー

メタルリサイクルのプロセスのうち、物理選別技術に関しては製品メーカー及びリサイクル中間処理業者、リサイクル中間処理装置メーカーがそれぞれ技術開発を行っている。また、化学分離技術に関しては非鉄金属製錬業（住友金属鉱山、DOWA HD、三菱マテリアル等）とレアメタル精製専業（三徳、アサヒプリテック等）が各々の本業を生かして処理及び技術開発を実施している。

我が国においては、リサイクルビジネスを行うための許可等が厳しいため、国内市場への海外系企業の参入はほとんどない。一方、国際市場における廃棄物総合管理分野については、日本企業は参入できていない。他の分野につ

いては、技術的には欧米企業に比べて同等または優位であるが、産業競争力の点では劣位（表3）。

海外では大規模な廃棄物処理・リサイクルメジャーが事業展開している。廃棄物処理・リサイクルメジャーは、Suez Environment-SITA等の都市ごみ・産業系の収集運搬から処理、埋立てまで一括して行う企業、SIMS Metal Management等のグローバルな収集拠点流通網を有する金属商社、Umicore等の金属製錬・加工メーカーの3つに大別される。これらのメジャー企業は、M&Aを繰り返すことで規模の拡大とリサイクルのノウハウ蓄積を進め、動脈産業に原材料を供給するポジションを確立している。

表3 リサイクルビジネスにおける日本企業の国際競争力

ビジネス分野	内容	海外企業動向	日本企業動向	日本企業の競争力
廃棄物総合管理	・廃棄物、水、エネルギー（電気）のインフラを全て対象として事業／運営を実施。	・Suez、Veolia等欧米企業を中心に静脈企業が中国、アジアへ事業展開している。	・日本企業は、本分野への参入ができていない	・劣位
家電リサイクル	・リサイクル対象は、TV・冷蔵庫・洗濯機・エアコンなどの家電及び携帯電話・PCなどの小型家電・電子基板。	<ul style="list-style-type: none"> ・欧米では、大量処理の集中破壊型でリサイクルを行っている。SIMSなどの鉄系スクラップ企業が、家電、自動車処理している。 ・Umicore等欧米の非鉄金属系企業は、スクラップ、電子電気機器廃棄物処理に関して海外展開が著しい。 ・アジアでは、TES-AMM（シンガポール）が、中国、アジアに展開しており、主に解体、一部製錬を行っている。 ・Environment Hub（シンガポール）は収集能力が高く、世界中から収集。油化、貴金属抽出を手がけている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・一部大手企業は、アジアで積極的な事業を展開しており、各国のリサイクル業者を傘下に収めつつ、廃棄物処理（焼却処理、最終処理、廃油処理）も実施。 ・中国で金属混合物、家電リサイクルを行う中小企業や、貴金属リサイクルに特化してシンガポールや東南アジアに進出している企業がある。 	・産業競争力（ビジネス力）は、社会や法制度に依存し、アジアを見る限り劣位。
自動車リサイクル	<ul style="list-style-type: none"> ・リサイクル対象は、廃車及び自動車工場発生スクラップ。 ・廃車スクラップは、解体、選別の後に処理 	<ul style="list-style-type: none"> ・欧米自動車メーカーは、工場内発生スクラップは外部のリサイクルに処理を依頼しており、その規模は大きい。 ・米国では、大手自動車リサイクルLKQが大規模に実施。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃車の解体を行っている自動車メーカーはないが、中国で高度自動車解体リサイクルの実証実験を実施している企業がある。 ・海外進出（マレーシアやナイジェリア等）を検討している中小企業がある。 	・ビジネスでは廃棄物総合管理の強みを活かした欧州が優位、日本は劣位。

出所：3R分野の技術戦略マップ改訂に関する調査（平成24年度）（NEDO, 2012）を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2015）

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

2-4 論文発表・特許出願等の動向

(1) メタルリサイクル関連論文発表の動向

廃棄物からのメタルリサイクルに関する世界の論文発表件数は増加傾向である(図5)。2005年～2015年の国・

地域別の累積論文発表件数では欧州が1位であり、中国、米国、日本と続いている。中国は2009年から論文発表件数が増加しており、累積論文件数でも日本を抜いている。また論文発表件数の多い研究機関の上位は中国が多く、上位10機関中5機関を占めている。日本は東北大学が3位にランクインしているのみである(表4)。

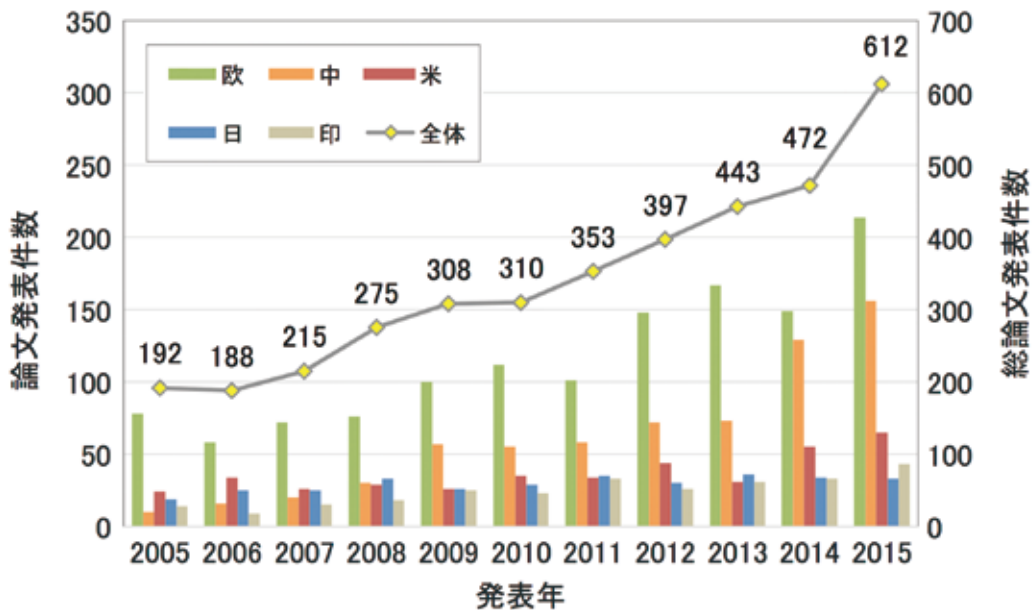


図5 廃棄物からのメタルリサイクル技術に関する国籍別論文発表件数の推移(2005～2015年)
出所: Web of Science™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

表4 発表者所属機関別論文発表件数ランキング(2005～2015年)

順位	研究機関	論文件数
1	Chinese Academy Of Sciences (中)	95
2	Council Of Scientific Industrial Research (印)	68
3	東北大学	66
4	Centre National De La Recherche Scientifique (仏)	65
5	Central South University (中)	58
6	Shanghai Jiao Tong University (中)	54
7	Consejo Superior De Investigaciones Cientificas(スペイン)	47
	Tsinghua University (中)	
	United States Department Of Energy(米)	
10	University Of Science Technology Beijing (中)	38

出所: Web of Science™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

(2) メタルリサイクル関連特許の出願状況

図6に示すように、メタルリサイクル技術に関する特許^{※3}は、2006年まで日本がトップであったが、2000年代後半から中国の特許出願数が急速に増えており、2008年から中国がトップとなっている。図7に示すように、2005年から2014年までの特許出願総数93,874件のうち、物理選別技術に関する出願件数は8%、化学分離技術に関する出願件数は92%であり、化学分離技術の開発に力点が置かれている傾向がある。

① 物理選別技術に関する特許出願の状況

メタルリサイクル技術における、物理選別技術に関する出願人ランキング(表5)では、上位10企業中6企業は日本企業であり、その業種は家電企業、非鉄金属製錬業、プラント装置メーカー等。また出願している物理選別技術の適用物も、重金属、家電、基板、触媒等と様々である。

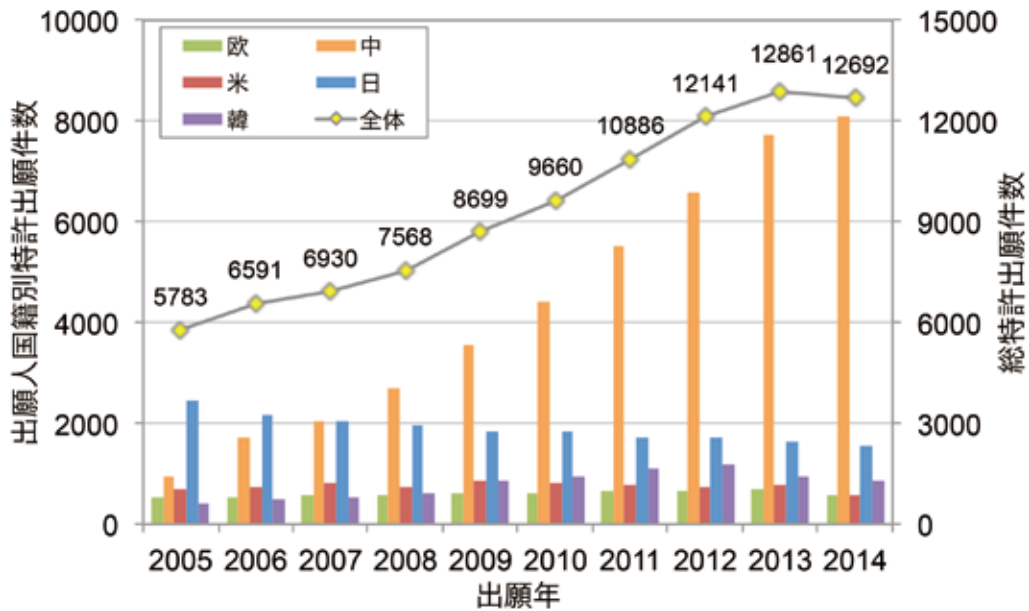


図6 メタルリサイクル技術に関する出願人国籍別特許出願件数の推移 (2005～2014年)

出所: Thomson Innovation™での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2016)

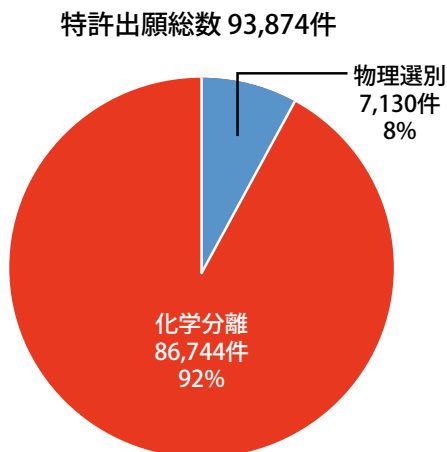


図7 メタルリサイクル技術に関する特許出願件数の内訳 (2005～2014年)

出所: Thomson Innovation™での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2016)

※3 IPC分類に基づいた、廃棄物処理における物理選別技術・化学分離技術及び非鉄金属製錬技術等に関する特許情報より抽出

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

表5 メタルリサイクルにおける物理選別技術に関する特許出願人ランキング (2005～2014年)

順位	出願人	特許件数
1	パナソニック	88
2	シャープ	66
3	TWR(中)	47
4	神鋼環境ソリューション	34
5	Suzhou MEISHENG Electric(中)	28
6	Hunan Vary Tech(中)	25
7	DOWAホールディングス	23
8	日立造船	22
9	三菱マテリアル	20
10	清華大学(中)	20

出所：Thomson Innovation™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2016）

② 化学分離技術に関する特許出願の状況

メタルリサイクル技術における、化学分離技術に関する出願人ランキング（表6）では、上位集団に日本企業が位置しており、その主な業種は金属製錬業である。特許出願傾向として、貴金属、銅、ニッケル、鉛などを回収する技術に関する出願が多い。

表6 メタルリサイクルにおける化学分離技術に関する特許出願人ランキング (2005～2014年)

順位	出願人	特許件数
1	住友金属鉱山	563
2	JFEスチール	562
3	中南大学(中)	513
4	POSCO(韓)	505
5	新日鉄住金	461
6	金川集団(中)	385
7	Guiyang Aluminum & Magnesium Design Institute(中)	337
8	JX金属	283
9	ノースイースタン大学(米)	272
10	三菱マテリアル	240

出所：Thomson Innovation™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2016）

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

2-5 諸外国の研究開発政策の状況

(1) 欧州の研究開発政策の状況

表7に欧州における主なメタルリサイクル関連技術の開発状況を示す。物理選別関連技術では約4,830万ユーロ、化学分離関連技術では約4,110万ユーロ、情報連携関連技術に約1,460万ユーロの予算をつけており、欧州ではここ10年程度の間約10,400万ユーロ(約139.4億円)の資金で研究開発を進めていることになる。

欧州のメタルリサイクル技術開発の傾向として、e-wasteを対象とするものが多い。また、回収対象金属としてはCRM(Critical Raw Materials)に指定されているレアメタル、レアアースに加えて、銅、アルミ、チタン、プラスチックやガラス等の回収可能な構成材を経済的に回収するための技術開発が多くなってきている。また、最近ではProSUMやSMART GROUNDのようなリサイクルに情報を利用するプロジェクトが増えており、廃棄物の流れをデータ化し可視化することで、処理の最適化や、より多くの事業者の参加、政策立案への活用などを狙っている。

表7 欧州におけるメタルリサイクル関連技術の開発状況

プログラム	期間	物理選別 関連技術	化学分離 関連技術	情報連携 関連	技術開発概要
Eco-innovation initiative	2007-2017	4.8Mユーロ	1.3Mユーロ	1.2Mユーロ	e-wasteからNd磁石を回収するプラントや、エコデザイン技術の開発、PGM等の湿式製錬技術開発
FP7	2012-2016	19.4Mユーロ	3.8Mユーロ	—	e-wasteや廃ディスプレイからレアメタル・レアアースを回収する破碎技術や湿式製錬技術の開発
LIFE-13	2014-2018	1.4Mユーロ	1.8Mユーロ	—	HDDから磁石を回収するプラントの開発、AlやTiの切削チップをリサイクルするための技術開発
WASTE-3-2014	2014-2018	5.9Mユーロ	—	—	e-wasteからレアメタルや高品質プラスチックを回収するための前処理技術開発
LIFE-14	2015-2019	0.9Mユーロ	11.7Mユーロ	2.1Mユーロ	廃ディスプレイからInやYを回収するための分解技術の開発、焼却灰からのCuの溶液抽出技術、情報利用によるリサイクルフローの検証・最適化
SPIRE-7-2015	2015-2019	6.6Mユーロ	12.8Mユーロ	—	レアアース回収のための省エネ低コスト製錬技術(イオン液体、高温電解)技術開発、e-wasteの自動解体・選別技術の開発
WASTE-1-2014	2015-2019	9.3Mユーロ	9.7Mユーロ	—	鉄鋼スラグやPVパネルからのレアメタル、貴金属回収技術の開発
WASTE-4a-2014 WASTE-4b-2014 WASTE-4c-2014 WASTE-4d-2015	2015-2018	—	—	10.8Mユーロ	e-wasteのリサイクルに関するデータベース構築、システム導入支援ツール開発、ステークホルダーのネットワーク、リサイクル資源に関する情報統合プラットフォームの構築
SPIRE-4-2014	2015-2016	—	—	0.5Mユーロ	製品のライフサイクルに関する持続性を計算するツールの開発
小計		48.3Mユーロ	41.1Mユーロ	14.6Mユーロ	
合計		104.0Mユーロ(139.4億円、1ユーロ=134円:2015年平均)			

出所: Horizon 2020 Work Programme 2016-2017他webサイト等各種公開資料を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

(2) 米国の研究開発政策の状況

米国ではエネルギー省(DOE:Department of Energy)が重要原料研究所(CMI:Critical Material Institute)を設立し、2013年より5年間、年約3,000万ドルの予算で磁石や蛍光体等からのレアアース類の回収に関する技術開発プロジェクトを行っている。

一方、エネルギー高等研究計画局(ARPA-E:Advanced Research Projects Agency-Energy)では、次世代の自動車や構造材として需要が高まるであろう軽金属(Al、Mg、Ti)の生産に係るエネルギー消費低減を目的に、廃製品からのソーティング技術や軽金属製錬技術の開発プロジェクトを行っている。

また、エネルギー効率・再生可能エネルギー局(EERE:Office of Energy Efficiency and Renewable Energy)は、2016年6月にREMADE(Reducing Embodied-energy And Decreasing Emissions)として、リサイクルやリユース全般に関する総額7,000万ドルの資金提供プログラムを開始した。REMADEでは、4つの対象(金属、ポリマー、繊維、e-waste)について、5つの重点領域(①二次原料や再生材料利用における材料追跡、廃棄物削減、予測を行うための情報収集、②標準化、及び設計ツール、③廃棄物の迅速な採取・識別・分離技術、混合材料の分離、④指定有害物質の除去、⑤強靱でコスト効率の高い処理・処分法)に関するプロジェクトの募集を行っている。

米国も欧州と同様にコスト効率が高いソーティング技術、分離技術の開発のみならず、情報を利用したリサイクルの管理をも狙っていることがうかがえる。

(3) 中国の研究開発政策の状況

中国では国家発展改革委員会が2011年に第十二次国民経済・社会発展五年計画を策定し、その中で循環型経済発展強化が取り上げられ、工業固体廃棄物の総合利用率を72%まで引き上げることや、産業の循環連携により資源生産率を15%向上させることなどの目標が設定されている。

その中で、非鉄金属・レアメタル資源の循環利用に対する対策として、レアメタル製錬業の技術向上や「城市鉱産」プロジェクトによるリサイクルの推進などが挙げられている。「城市鉱産」プロジェクトでは循環利用、再製造、廃棄物ゼロ等に向けたリサイクル技術開発が進められている。

3章 メタルリサイクル分野の技術課題

3-1 メタルリサイクルに関する技術体系

(1) 物理選別技術

物理選別工程の目的は、廃棄物から後工程である化学分離工程に投入可能な品質の金属を取り出すことである。廃棄物のような種々雑多な混合物から回収目的金属を、固体の構造、重量、外見などの各種物性を利用して仕分け、分離し、選別することが必要になる。

廃棄物から金属を選別する方法は1章で示したように、大きく①個別選別、②分解・解体、③破碎、④集合選別に区別される。実際の物理選別工程では、回収対象となる金属に応じて、これらの選別技術を組み合わせて1つの選別プロセスを構築する。

① 個別選別

個別選別工程の目的は、環境対策コストも含めた収益性で効果が高くなる廃製品を選定・分別することである。そのため、廃製品に含まれる資源価値や回収のしやすさ、後段処理工程の能力等を踏まえて選り分けることが必要となる。現状は目視による資源価値判断、手による選り分けが主流となっており、コストの増大とともに処理速度のボトルネックとなっているケースも多い。

② 分解・解体

分解・解体工程の目的は、廃製品を部材に分解・解体し、後段処理工程をスムーズにすることである。現状は、前段の個別選別工程と同様に人手による分解・解体作業が行われ、コストが高いことが問題である。

ただし、後段集合選別工程の能力に任せ、分解・解体工程を行わず破碎工程に進む場合もある。

③ 破碎

破碎工程の目的は成分分離の事前処理であり、主に粉砕刃やローラー、ピーター、ボールなどによる破碎が行われ

ている。

後段処理工程での回収対象成分の回収を容易にするため、単体分離性の向上が求められ、化学反応性、流動性、均一性、減容性の付与等が同時に行われる。

④ 集合選別

集合選別工程の目的は、後段金属製錬工程の能力に応じた金属成分の分離・濃縮であり、金属製錬工程での忌避元素の除去も同時に行われる。

破碎工程で生成される大量の粒子を経済的に選別するため、回収対象成分のバルク物性(形状、密度、電磁波反射性、磁化特性、バルク導電性、放射性等)や表面物性(色・光沢・質感、電磁波透過性、表面導電性、水に対するぬれ性等)を利用して様々な手法で集合選別が行われる。

選別媒体によって、気相中(通常は空気)で行われる乾式選別と、液相中(通常は水)で行われる湿式選別に分類される。乾式選別法は一般的に省エネルギー、省コスト、低環境負荷である。一方、湿式選別法は、乾式法に比べて分離精度の向上が期待できるが、エネルギーやコストの面でやや不利である。

また、近年では、粒子をひとつずつ識別するセンサーソーティング技術が急速に進化を遂げている。例えば、CCDカメラによるサイズ検知・色彩検知、電磁誘導を利用する渦電流(導電率)検知はもとより、素材による赤外線・X線等の透過・吸収率の違いによる識別、さらにはラマン分光や蛍光X線検知による有機・無機物質構成成分の分析など、多くの技術が自動選別に応用されており、これら複数の物理選別機器を組み合わせた集合選別プロセスが構築されてきている。

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

(2) 化学分離技術

化学分離工程の目的は、前工程までに濃縮された回収目的の金属を、動脈産業が要求する高い純度で取り出すことである。純粋な金属元素を取り出すためには、化学反応や、電気分解反応等を利用して、原子、分子のレベルで分離することが必要になる。

鉱石から金属を化学的に分離する方法は製錬(smelting)と呼ばれ、さらに高温を利用する乾式製錬(pyrometallurgy)と、溶液を利用する湿式製錬(hydrometallurgy)に区別される。

金属資源の抽出分離、精製は、これらの各種製錬プロセス(化学反応と物理化学的プロセス)と、それに続く相分離を組み合わせたものを何段か組み合わせ、更に必要な場合は還元プロセスを加えて完結する。

① 乾式製錬

乾式製錬は、一般的に高温の炉で原料(鉱石、廃製品などの二次原料)を溶かし、溶けた状態で金属を分離する方法である。高温での操作であるため反応速度が大きく、大量処理に適する。

技術開発の動向としては、廃棄物を既存の製錬施設で金属製錬できるよう、随伴不純物を除去するための焙焼や塩化揮発などの分離技術の開発や、他プロセスとリンクし製錬副産物から有価物を分離する技術の開発などが行われている。また、製錬に必要な多量の熱エネルギーを抑制するための技術開発も行われている。

② 湿式製錬

湿式製錬は、酸・アルカリ・溶媒などの水溶液中で金属の分離を行う方法である。比較的小規模の設備でも操業可能であり、特定金属の精密な分離が期待できる。湿式製錬に用いる溶液の選定は、回収物中の金属の種類、組成、形態及び後の精製工程の適合度により決定される。溶液からの金属回収には、その金属濃度に応じてイオン交換や吸着、電解採取、沈殿などの方法が用いられる。

精鉱や廃棄物から目的とする元素を精製する化学精製技術については、様々な研究が行われており、既存の溶融塩電解や化学熱還元プロセスに代わる新しい精製技術として、イオン液体を利用した電解技術の研究、高効率な抽出を目的とした新しい抽出剤の研究、新規の溶融塩利用プロセスの研究などが行われている。

3 -2 メタルリサイクルに関する技術課題

(1) 物理選別技術

物理選別では、回収対象成分に応じて、工程ごとに複数の物理選別機器を組み合わせて一つの選別プロセスを構築する。これらの組み合わせ、制御については現場の経験・ノウハウによる部分が大きく、その最適化手法の確立や自動制御技術が求められている。また、個別選別、分解・解体、破碎、集合選別等の工程が複雑で、未だに手作業に頼らざるを得ない状況であり、リサイクルが高コストになる大きな要因となっている。

個別選別では、機械による高速化、低コスト化が求められており、例えばセンサーソーティング技術では、資源価値判断を行うためのX線や色、形状等のセンサーの汎用性向上・低コスト化やデータ解析の高速化・高精度化が課題となっている。また、RFID (Radio Frequency Identification) やバーコード等の情報付与を利用した個別選別技術では、高速化、低コスト化が課題となっている。

分解・解体では、製品構成部材をその種類や構成成分ごとに分離する方法が求められており、個体認識を伴う局所破壊法や内部部材を破壊しないように製品外装のみを破壊する部分破壊法の高度化、低コスト化が課題となっている。

破碎では、破碎生成物が単成分から成るように単体分離されていることが後段の集合選別の分離精度を決定することになり、非常に重要である。そのため、機械による一様な破碎(ランダム破碎)が主流であり、生成物の成分が不均一となっている現状から、異種成分の物性の差や境界面の性質を利用した選択破碎法等による単体分離性の向上、低コスト化、簡便化が期待されている。

集合選別では、工業的に確立された選別手法が多数存在するものの、その制御は現場の勘やノウハウによる部分が大きく、回収対象成分の回収効率は低い。回収効率向上のために、制御の自動化や新たな選別手法の開発が

求められており、選別の科学的原理に立ち返った検討や最先端の計測技術、シミュレーション、モデリングを駆使した制御法の確立が課題となっている。一方、センサーソーティング技術の応用による回収効率の向上も期待されているが、量的処理能力向上、低コスト化が課題となっている。

(2) 化学分離技術

現状では、廃製品から主要なベースメタルを取り出した後の部品、部材に含まれているレアメタルや貴金属の抽出が不十分であるとともに、製錬に多量のエネルギーが必要であり、環境負荷(処理が必要な廃酸塩基、混合金属塩、プラスチック類等)も増大している。

現行の鉱石の処理を行う非鉄金属製錬で用いられる技術では、レアメタルのような希薄系金属の再資源化は高コストになってしまい、対応することが難しい。

また、廃製品から得られる組成は多種多様であり、少量処理に対応可能な製錬技術の開発が必要である。

したがって、レアメタルや貴金属を高精度に精製・抽出できる技術、製錬に係る環境負荷やエネルギーを抑制可能な技術、少量でも製錬処理が可能となる低コスト化技術の開発が求められている。

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

(3) 情報技術の活用

静脈産業は処理過程が細分化され、異なる事業者が担っているため、動脈産業ほどに一連のビジネスシステムとして効率化が図られていない。近年、Industry4.0やIndustrial Network、IoTといった情報技術により製造業の変容を加速する大規模な取組が世界的に進んでおり、静脈産業においてもこれらの技術の活用により効率化・高度化できる可能性は大きいと考えられる。

表8に、メタルリサイクル処理における各プロセスでの高度化ニーズと適用可能な情報技術要素をまとめた。

また、メタルリサイクルが動脈産業への資源安定供給の一翼を担うためには、動脈産業が必要とする金属の需要量と

もに廃棄物からの回収ポテンシャルの把握が必要である。

このような金属のライフサイクル全体にわたる分析はベースメタルを中心に実施されてきたが、レアメタルをはじめ、近年資源循環への期待が高まっている金属については、動・静脈双方においてマテリアルフローが不透明な状態にある。

これらの調査は産業連関表の生産金額や、個別ヒアリングデータの積上げに基づいた推計が公的研究機関や大学などの研究者により実施されているが、個別調査に大きな労力が必要で、かつ製品情報の時系列的な変化をトレースできないことが課題となっており、IoT技術適用の重要性が高まっている。

表8 情報技術適用によるメタルリサイクル処理高度化の可能性

		製造・廃棄	輸送	個別選別	分解・解体	破碎	集合選別	製錬
各工程中の高度化ニーズ	金属含有量把握	●			●	●	●	
	個体識別		●	●				
	製品種選別			●				
	省人化・自動化				●		●	
	素材・品位選別						●	
	単体分離					●	●	
	歩留まり率向上			●	●	●	●	●
情報技術が適用可能な要素技術	画像解析技術	●			●	●	●	
	DB管理技術	●	●	●	●		●	●
	個体識別技術		●	●				
	IoT技術	●	●	●	●		●	
	ロボット技術			●	●		●	
	センシング技術			●			●	
	AI技術			●	●	●	●	
ソーティング技術						●		
革新的技術開発の方向性	製品別金属含有量DB構築	製品トレーサビリティ管理	品位別製品ロットの特定	製品構造を踏まえた解体	単体分離向け粒度最適化	回収対象金属の濃集	金属元素の抽出制御	

出所：資源循環ネットワーク資料（林孝昌氏，2016）を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2016）

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

4章 おわりに

現在、我が国において経済的にリサイクルが行われている金属種は、鉄、アルミなどの主要な構造材料、もしくは銅、金、銀、白金などの高い付加価値を持つ金属である。

一方、一時期価格が高騰し、リサイクル促進のための様々なプロジェクトが行われたレアメタル、レアースは、個別の製品、金属に関するリサイクル技術は進展したものの、価格が下落した現在、国内で経済的なリサイクルビジネスが成立しにくい。そのため、リサイクルコストの安い中国などのアジアへ流出したり、分離・選別コストが合わず付加価値の高い金属と分離されないまま既存の製錬工程へ投入され、スラグに混入し、路盤材等にされている状況にある。

政策的にレアメタルの回収量を増加させる取組が行われているが、分離・選別に関する技術不足から回収コストを下げる事ができず、レアメタルのリサイクルは進んでいない。このまま市場原理に基づき回収量と売却価格を優先したりリサイクル（量のリサイクル）が続けば、廃製品中金属の海外流出やレアメタル等のスラグへの混入は止まらない。

したがって、図8に示すように、国内のメタルリサイクルに関わる事業者それぞれの処理コストを低減する技術の開発とともに、法制度の運用・整備による回収量の増大や、規格化・標準化による市場の形成等の取組と連携して進める必要がある。国内メタルリサイクルシステム全体のコストを、金属資源の海外流出やスラグへの混入を低減することにより、リサイクルを金属資源を安定的に供給する手段の一つとして成立させ、回収した金属を高機能製品の原料として使用可能とするリサイクル（質のリサイクル）を目指すべきである。

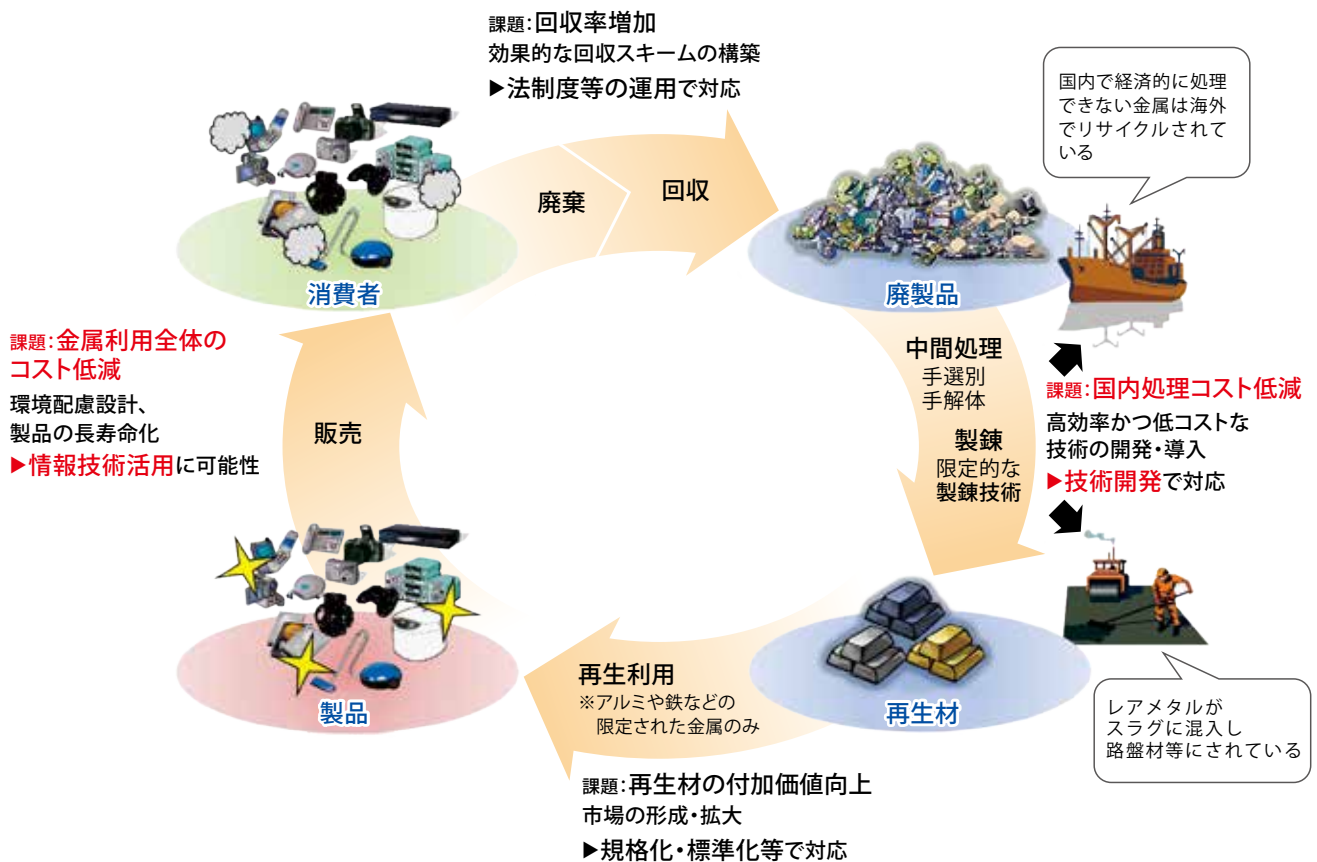


図8 金属資源のバリューチェーンにおける課題と対応策

出所：産業技術総合研究所 SURE コンソーシアム 資料（大木達也氏，2016）を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2016）

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight Vol.13

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

2016年12月5日発行

TSC Foresight Vol.13 メタルリサイクル分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター (TSC)

■センター長 川合 知二

■ 環境・化学ユニット

・ユニット長 石田 勝昭

・研究員 山下 勝

高島 正

定兼 修

森 智和

加藤 知彦

・フェロー 指宿 堯嗣 産業環境管理協会 技術顧問

島田 広道 産業技術総合研究所 理事

室井 高城 アイシーラボ 代表

安井 至 製品評価技術基盤機構 名誉顧問

● 本書に関する問い合わせ先
電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

● 本書は以下URL よりダウンロードできます。
<http://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。