

概要

最終更新日

2019年6月19日

プロジェクト名	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	プロジェクト番号	P17001
担当推進部/ PMまたは担当者	環境部 PM 阿部 正道 (2017年4月～現在)		
0. 事業の概要	<p>資源・エネルギーの安定供給及び省資源・エネルギー化を実現するため、我が国の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術・システムを開発する。具体的には、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を行う。さらに、情報技術等を有効活用することによって、動静脈産業が一体となった戦略的な資源循環システムを支える技術基盤を構築する。</p>		
1. 事業の位置 付け・必要性 について	<p>現在、経済的にリサイクルが行われている金属種は鉄、アルミ、銅などの主要な元素群もしくは、金、銀、白金などの高価な元素群である。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、特に希土類元素については、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を成立させることは困難な状況となっている。そのため、これらの資源が、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、選別コストが合わず、必要な選別がなされないまま既存の製錬工程へ投入され、スラグに分配されて路盤材等へ利用するにとどまっている状況である。将来的に、国内金属リサイクルシステム構築のキーとなるのは、金属リサイクルシステム全体のコスト低減化である。</p> <p>他方、我が国の成長戦略である「日本再興戦略 2016」においては、資源価格の低迷下での資源安全保障の強化等を目指して、都市鉱山の利用を促進し、リサイクル業者や非鉄金属製錬業者等の成長を図るため、動脈産業と静脈産業の連携により金属資源を効率的にリサイクルする革新技術・システムを開発することとされている。また、2018年7月から検討を開始している「循環経済ビジョン研究会」において、静脈産業の生産性向上・集約化、画像認識/自動化等によるリサイクル材の高付加価値化等の重要性が触れられている。</p>		
2. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>【中間目標】 (2019年度末)</p> <p>動静脈連携により、金属資源の循環活用が可能な都市鉱山構築に向け、天然資源からの金属生産コストと競合可能な基盤技術を開発する用途をたてる。具体的には、すべての研究開発項目を一貫して開発を実施し、以下を達成する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 研究開発項目①廃製品自動選別技術開発 廃製品（破壊・変形を伴わない）を、処理速度1秒/製品・個以内に、非破壊で個体認識・資源価値判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。 研究開発項目②廃部品自動選別技術開発 廃製品を構成する主なモジュールから分散・複雑系廃部品を単体分離・選別する自動選別システムにおいて、各種選別産物の製錬原料化（製錬受入れ条件を満たす金属原料化）を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。 研究開発項目③高効率製錬技術開発 イオン半径が近接する希土類元素を対象に、相互分離係数3を有する分離試薬を開発するとともに、ラボスケールで、2種以上の希土類元素を（単体または鉄等との合金として）純度80%以上で各々同時に直接回収する技術を確立する。 研究開発項目④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発 2020年からの研究開発開始のため対象外。 <p>【最終目標】 (研究開発項目①、②：2021年度末、研究開発項目③、④：2022年度末)</p> <p>動静脈連携により、金属資源の循環活用が可能な都市鉱山構築に向け、天然資源からの金属生産コストと競合可能な基盤技術を開発する。具体的には、すべての研究開発項目を一貫して開発を実施し、以下を達成する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 研究開発項目①廃製品自動選別技術開発 廃製品（破壊・変形を伴うものを含む）を、処理速度0.5秒/製品・個以内に、非破壊で個体認識・資源価値判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現するベンチスケールシステムを完成させる。 		

	<ul style="list-style-type: none"> 研究開発項目②廃部品自動選別技術開発 廃製品を構成する主なモジュールから分散・複雑系廃部品を単体分離・選別する自動選別システムにおいて、廃部品を分離効率80%以上で選別する性能を有し、各種選別産物の製錬原料化を実現するベンチスケールシステムを完成させる。 研究開発項目①及び②を連動させて一貫制御するベンチスケールシステムを完成させる。 研究開発項目③高効率製錬技術開発 イオン半径が近接する希土類元素を対象に、相互分離係数5を有する分離試薬を開発する。 また、2種以上の希土類元素を(単体または鉄等との合金として)純度80%以上で各々同時に連続的に直接回収する技術を実現するとともに、プロセス適用時のコストを1/2以下(従来比)にする見通しを立てる。 研究開発項目④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発 戦略的鉱物資源20種のマテリアルフロー、製品群30種の製品フローを考慮した都市鉱山ポテンシャル評価・廃製品リサイクルコスト評価システムの構築と、それをういたリサイクル対象鉱種・製品を選定する。 									
事業の計画内容	研究開発項目	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023		
	①廃製品自動選別技術開発								事後評価	
	②廃部品自動選別技術開発									
	③高効率製錬技術開発									
	④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発									
事業費推移 (単位:百万円)	会計・勘定	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023		総額
	一般会計	-	-	-						
	特別会計(需給)	383	488	489						
	総NEDO負担額	383	488	489						
	(委託)	383	488	489						
開発体制	経産省担当原課	産業技術環境局 リサイクル推進課 2018年度途中より資源循環経済課、製造産業局 金属技術室(研究開発項目①、②) 資源エネルギー庁 鉱物資源課(研究開発項目③) 商務情報政策局 情報産業課								
	プロジェクトリーダー	PL: 産業技術総合研究所 環境管理研究部門 総括研究主幹 大木 達也								
	委託先	<u>2017年度</u> ・研究開発項目①廃製品自動選別技術開発 (国研)産業技術総合研究所、佐藤鉄工(株)、大栄環境(株)、リーテム(株) ・研究開発項目②廃部品自動選別技術開発 (国研)産業技術総合研究所、佐藤鉄工(株)、大栄環境(株)、DOWA エコシステム(株) 【再委託先】 北海道大学、東京大学 ・研究開発項目③-1 高効率製錬技術開発(鑄型分離技術) (国研)産業技術総合研究所、(国研)日本原子力研究開発機構、佐賀大学 【再委託先】 神戸大学 ・研究開発項目③-2 高効率製錬技術開発(熔融塩を利用した濃縮系少量材料のリサイクル技術) (国研)産業技術総合研究所、(株)三徳、京都大学、大阪大学 <u>2018年度</u>								

		<ul style="list-style-type: none"> ・研究開発項目①廃製品自動選別技術開発 (国研)産業技術総合研究所、佐藤鉄工(株)、大栄環境(株)、リーテム(株) ・研究開発項目②廃部品自動選別技術開発 (国研)産業技術総合研究所、佐藤鉄工(株)、大栄環境(株)、DOWA エコシステム(株) 【再委託先】北海道大学、東京大学 ・研究開発項目③-1 高効率製錬技術開発(鑄型分離技術) (国研)産業技術総合研究所、(国研)日本原子力研究開発機構、佐賀大学、(株)三徳 【再委託先】神戸大学 ・研究開発項目③-2 高効率製錬技術開発(溶融塩を利用した濃縮系少量材料のリサイクル技術) (国研)産業技術総合研究所、(株)三徳、京都大学、 																		
情勢変化への対応		<p>経済産業省では、2019年1月25日に第5回の「循環経済ビジョン研究会」が開催され、その中で、「中国の輸入規制等による我が国への影響」、「資源循環政策や気候変動政策の活発化」、「静脈産業における、より一層の人手不足の深刻化」が触れられており、本技術開発はこれらの政策動向や社会動向に応え、将来のリサイクル産業に大きく寄与する。</p>																		
中間評価結果への対応		-																		
評価に関する事項	事前評価	2016年度実施																		
	中間評価	2019年度実施																		
	事後評価	2023年度実施																		
3. 研究開発成果について	<table border="1"> <thead> <tr> <th>研究開発項目</th> <th>中間目標</th> <th>成果</th> <th>達成度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①廃製品自動選別技術開発</td> <td>廃製品(破壊・変形を伴わない)を、処理速度1秒/製品・個以内に、非破壊で個体認識・資源価値判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。</td> <td>2019年度下期には、装置群システム・制御の要素技術(製品ソータ、自動解体装置、モジュールソータのベンチスケール機)が完成見込み</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>②廃部品自動選別技術開発</td> <td>廃製品を構成する主なモジュールから分散・複雑系廃部品を単体分離・選別する自動選別システムにおいて、各種選別産物の製錬原料化(製錬受入れ条件を満たす金属原料化)を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。</td> <td>2019年度下期には、部品剥離装置、TF選別システムのベンチスケール機が完成見込み</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>③高効率製錬技術開発</td> <td>イオン半径が近接する希土類元素を対象に、相互分離係数3を有する分離試薬を開発するとともに、ラボスケールで、2種以上の希土類元素(単体または鉄等との合金として)純度80%以上で各々同時に直接回収する技術を確立する。</td> <td>2019年度下期には、隣り合った軽希土に対する分離係数3を達成し、重希土類元素に対する適用可能性も判明する見込み。 また、2019年度下期には、希土類純度80%以上で複数の希土類元素を同時回収できる見込み。</td> <td>○</td> </tr> </tbody> </table>				研究開発項目	中間目標	成果	達成度	①廃製品自動選別技術開発	廃製品(破壊・変形を伴わない)を、処理速度1秒/製品・個以内に、非破壊で個体認識・資源価値判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。	2019年度下期には、装置群システム・制御の要素技術(製品ソータ、自動解体装置、モジュールソータのベンチスケール機)が完成見込み	○	②廃部品自動選別技術開発	廃製品を構成する主なモジュールから分散・複雑系廃部品を単体分離・選別する自動選別システムにおいて、各種選別産物の製錬原料化(製錬受入れ条件を満たす金属原料化)を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。	2019年度下期には、部品剥離装置、TF選別システムのベンチスケール機が完成見込み	○	③高効率製錬技術開発	イオン半径が近接する希土類元素を対象に、相互分離係数3を有する分離試薬を開発するとともに、ラボスケールで、2種以上の希土類元素(単体または鉄等との合金として)純度80%以上で各々同時に直接回収する技術を確立する。	2019年度下期には、隣り合った軽希土に対する分離係数3を達成し、重希土類元素に対する適用可能性も判明する見込み。 また、2019年度下期には、希土類純度80%以上で複数の希土類元素を同時回収できる見込み。	○
	研究開発項目	中間目標	成果	達成度																
	①廃製品自動選別技術開発	廃製品(破壊・変形を伴わない)を、処理速度1秒/製品・個以内に、非破壊で個体認識・資源価値判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。	2019年度下期には、装置群システム・制御の要素技術(製品ソータ、自動解体装置、モジュールソータのベンチスケール機)が完成見込み	○																
	②廃部品自動選別技術開発	廃製品を構成する主なモジュールから分散・複雑系廃部品を単体分離・選別する自動選別システムにおいて、各種選別産物の製錬原料化(製錬受入れ条件を満たす金属原料化)を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。	2019年度下期には、部品剥離装置、TF選別システムのベンチスケール機が完成見込み	○																
	③高効率製錬技術開発	イオン半径が近接する希土類元素を対象に、相互分離係数3を有する分離試薬を開発するとともに、ラボスケールで、2種以上の希土類元素(単体または鉄等との合金として)純度80%以上で各々同時に直接回収する技術を確立する。	2019年度下期には、隣り合った軽希土に対する分離係数3を達成し、重希土類元素に対する適用可能性も判明する見込み。 また、2019年度下期には、希土類純度80%以上で複数の希土類元素を同時回収できる見込み。	○																
	投稿論文	「査読付き」9件																		
	特許	「出願済」4件																		
その他の外部発表 (プレス発表等)	研究発表・講演: 25件、プレス発表: 58件																			

4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見直しについて	産総研を中心に、参画企業（リサイクラ、機械装置メーカー、製錬メーカー）と密に連携することに加え、SURE コンソーシアムでの意見交換等を通じて実用化に向けた課題等を共有し、研究開発を実施。 事業終了後も SURE コンソーシアムでの意見交換を継続させるとともに、本研究開発成果に関する、共同研究、設備導入、コンサルティング等を実施することで実用化を目指す。		
5. 基本計画に関する事項	作成時期		2019年6月 制定と改訂
	変更履歴		-

1 事業の位置付け・必要性について

1.1 事業の背景

世界規模で資源制約が強まる中で、日本国内においても天然資源の消費の更なる抑制が求められている。また、廃棄物から有用資源を再資源化する仕組みが十分に整備されていない。また、アジアを中心とした新興国では、急激な経済成長に伴う廃棄物の増加という深刻な問題に直面しており、経済成長と環境が調和した適切な社会基盤の整備が待ち望まれている。

金属資源は、自動車や IT 製品といった我が国の主要製造業において、その高性能化に必須の素材であり、我が国の産業競争力の要である。近年、新興国の経済成長による需要拡大、天然資源品位の低下、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。我が国では、非鉄金属資源の大半を輸入に依存しており、その安定的な確保が重要な課題となっている。

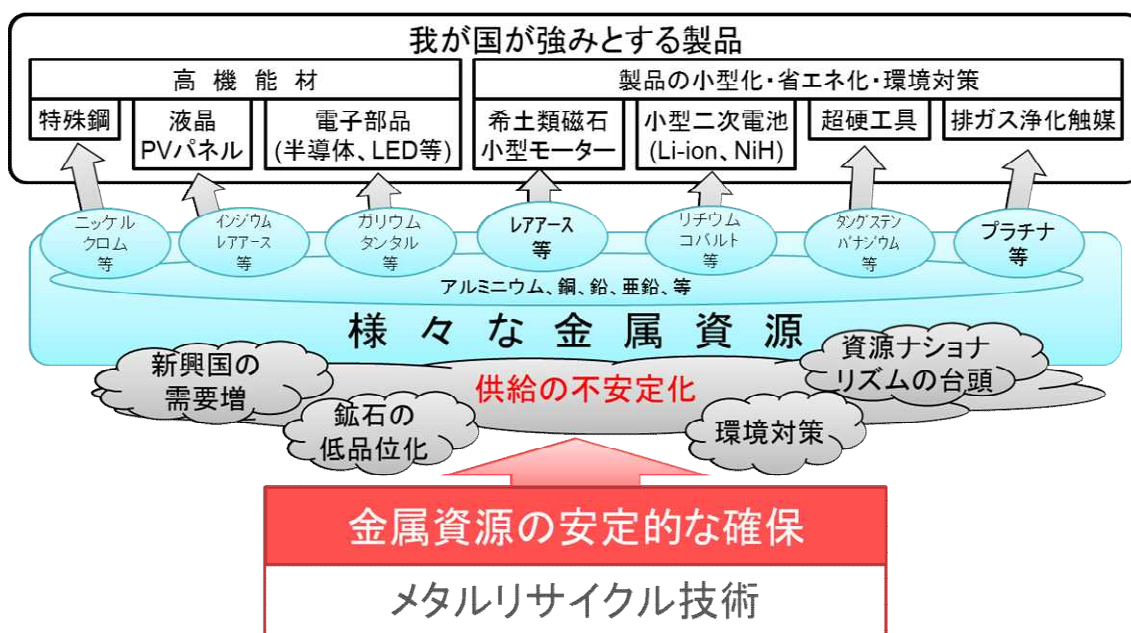


図 1. 1. 1 製品と資源との関係性

(1) 廃棄物中の金属リサイクルの状況

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」という。）技術戦略研究センター（以下「TSC」という。）の日本のリサイクル現状調査によると、

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、いわば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いる。再商品化率（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で再商品化されたものの総重量）は80%を超えている。

しかし、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ミックスメタルとして売買され、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）として路盤材などに利用され、金属資源としてリサイクルされていないものなどが存在する（図1. 1. 2）。

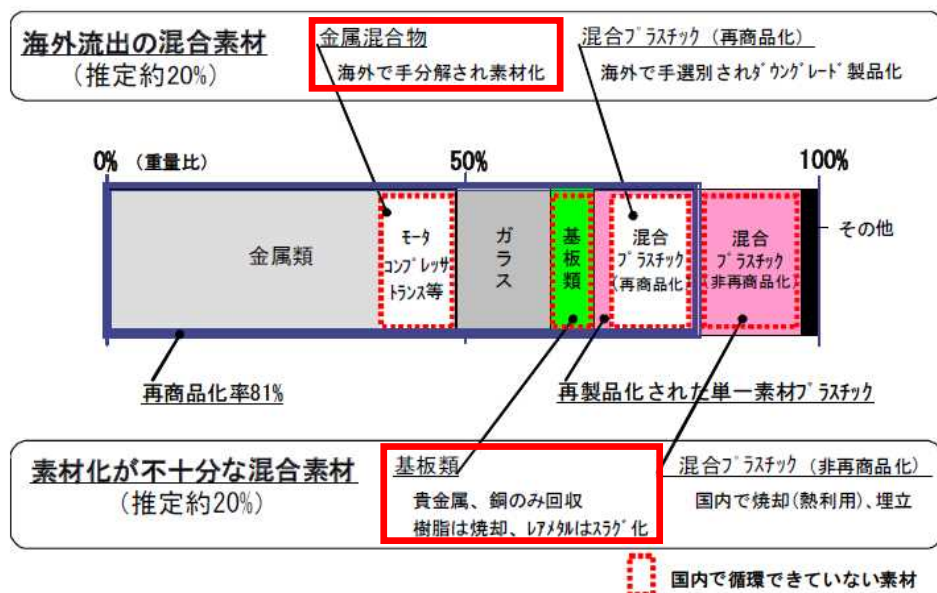


図1. 1. 2 国内でリサイクルされない混合素材内訳（2007年）

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」
（産業競争力懇談会，2009）

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。現在のところ e-waste は、収集後に既存の非鉄金属製錬工程で処理され、主要な非鉄金属が回収されている。しかし、現状では回収可能な金属が銅、金、白金族などに限定されており、その他の希少金属はスラグに分配され回収不可能な状態で路盤材などに利用されている。

(2) 金属種別のリサイクル状況

JOGMEC のマテリアルフローによると、国内におけるメタルリサイクルの状況に関しては、鉛で 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(特にレアメタル等)の国内リサイクルを困難にしている主な要因の一つは経済性であり、現状では、リサイクルにかかる人件費等のコストが有利な海外へ、銅、アルミ、鉛などの戦略的鉱物資源に位置づけられるベースメタルの輸出が増加している。

その結果として、スクラップの供給不足による製錬処理への悪影響(スクラップが集まらないために連続的な稼働ができない等)が生じ、必要な金属材料が調達できないなど、動脈側にも波及する可能性がある。

また、回収にコストのかかるレアメタル、レアアースの回収率は 2% (例えば Dy 等) 程度に留まり、やはり回収コストの安い海外へ流出しているのが実情である。

上述のとおり、使用済みの家電製品に含まれる様々な金や銀、白金系メタル (PGM)、レアメタルなどの有用資源が含まれているが、人間社会に「都市鉱山」として未利用資源が存在する。特に日本の都市鉱山埋蔵量が豊富であることが知られており、これらの都市鉱山の利用を促進することで、日本の資源確保性を向上させるとともに、日本の主要産業である所要製造業の競争力の源泉を支える資源循環システムが求められている。

1.2 目的の妥当性

(1) 事業の目的

当該事業の目的に関連する市場動向や世界全体及び主要各国における政策動向を明らかにし、本事業で行うべき事業目的の妥当性について記載する。

①市場・政策動向

A. 市場

TSC の「環境産業の市場規模・雇用規模等に関する報告書」を基にした、リサイクル素材(非鉄金属・レアメタル)に関する産業の市場規模の推計によると、我が国のリサイクル素材産業の市場規模は 2030 年度時点において、1.43~1.97 兆円に成長する見込み。また、同報告書では、海外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。

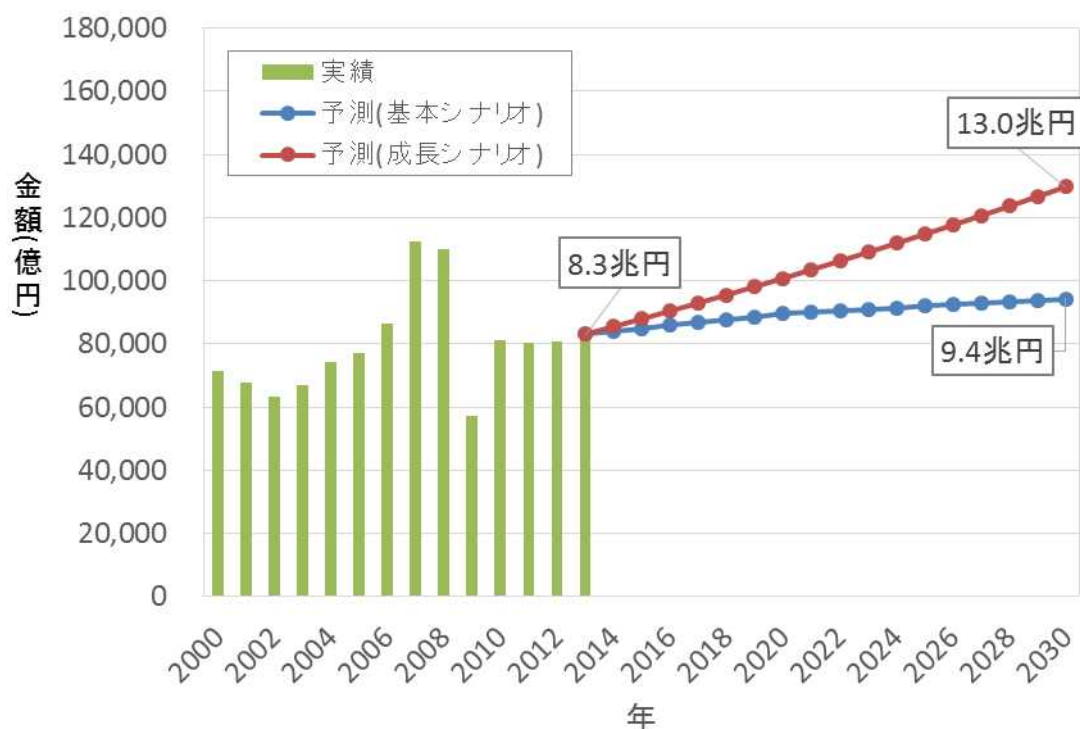


図1. 2. 1 リサイクル素材関連産業の国内市場規模

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）

B. 世界的政策

・国連

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製品由来のリサイクル率の現状は図1. 2. 2のようになっている。

・G7の資源効率性に関するフレームワーク

G7では「天然資源の保護と効率的な利用は、持続可能な開発に不可欠」としており、2016年5月のG7環境大臣会合において、「富山物質循環フレームワーク」を採択した。

このフレームワークの中で、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ることで、ライフサイクル全体にわたり資源が効率的かつ持続的に使われる社会を実現することを共通ビジョンとしている。また、行動計画の中では、「資源効率性・3Rのための主導的な国内政策」、「グローバルな資源効率性・

3Rの促進」、「着実かつ透明性のあるフォローアップ」の3つを目標として掲げており、具体例としてe-wasteの管理では、ベストプラクティスやBAT(適用可能な最良技術)の共有、上流産業の3Rに対する積極的取組の奨励等を挙げている。

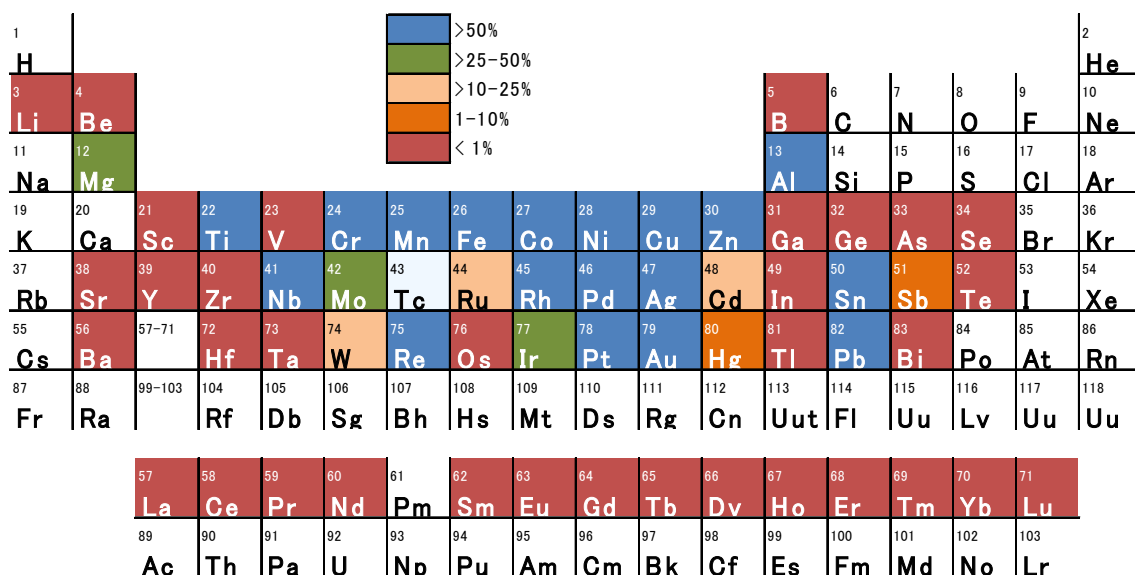


図 1. 2. 1 元素別使用済製品由来リサイクル率(世界規模)

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(国連環境計画)報告書,2011)を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2015)

IRPはリサイクル率の調査結果を落胆すべきものとし、電子機器のような複雑な製品の増加や、そのための適切なリサイクルインフラが整備されていない状況を改善する取組を加速させる必要があるとしている。しかし、注意すべき点としてレアメタルなどの回収・再生について、「ふとした思い付きで1つ2つの特定金属に優先順位を付けて多くの費用とエネルギーを投じるべきでない」と主張している。さらに「使用済み製品の収集が最大限効率的になされるべきであり、収集後の効率的かつ最適な物理選別処理が重要である」と述べ、経済的に実行可能な金属再生のための製錬技術が必要としている。

C. 各国の政策動向

a. 欧州の動向

リサイクルに関して廃棄物、容器包装、e-waste、ELV(使用済み自動車)等の、使用済み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)によって、

この延長線上に真の循環型社会の実現はないこと、“環境問題の主要因”である生産と消費のシステムの根本的な変化が必要であること、2050年のビジョンを達成するための、野心的な取り組みが必要であることを主張した。

その中で、EUは従来の資源消費型の線形経済から、資源生産性効率を最大化する循環経済への転換を図り、循環経済(CE: Circular Economy)パッケージを打ち出している。その目的は、EU域内で完結する循環資源利用の社会を目指し、天然資源に替わって再生品の品質が市場を決定する、リサイクル業者のための市場を作ることである。

欧州のRE（資源効率）/CE（循環経済）政策について

- 世界においては、地球規模の人口増加とそれに伴う資源枯渇リスクの増大、地球温暖化等の問題に対応するため、これまでの資源消費型の線形経済ではなく、循環経済を目指す方向に向かっている。
- 欧州では、約5年前から、「資源効率・循環経済」を産業競争力強化の柱に掲げ議論を展開。2015年12月には、①**域内製造業の競争力強化**、②**新たなビジネスの構築**、③**厳しい環境対策**を念頭においた、今後の方向性をまとめた「ビジョン」(Circular Economy Package)を提示。



線形経済(Linear Economy)から
循環経済(Circular Economy)へ



図：CEN and CENELEC作成

【ビジョンの狙い】

- ①域内製造業の競争力強化のために、原材料調達の安定性を向上し、安価で高品質な再生材利用を拡大すること。
- ②サービス産業が優位の欧州の産業構造において、静脈メジャーの強みを活かしつつ、新たなモデルを構築し、新産業を創造すること。
- ③エネルギー消費の低減、有害物質管理といった反対し難い「環境政策」として構築し、国際標準化と組み合わせることで、海外展開と欧州市場の防衛を図ること。

【ビジョンの内容】

- 動静脈を含めたライフサイクル全体・バリューチェーン全体での統合的な取組やサービス化を推進することで、資源効率を高め、競争力と雇用の創出を目指すもの。
 - 製品設計・製造では、Recyclabilityだけでなく、Reparability, Durability, Upgradability, 含有物質情報の共有をも含めた形で一貫性を高めていく。消費者への提示と税制等のインセンティブも検討。
 - 消費では、循環経済に資するイノベーティブな消費形態（シェアリング、サービスの消費、IT・デジタルプラットフォームの利用等）を政府がHorizon2020等で後押し。

図 1. 2. 3 欧州における資源循環に関する政策

b. 米国の動向

米国は、廃棄物処理に関する法律が州ごとに制定されているため、リサイクルに関して、政府はビジョンや目標設定のみを示しており、具体的な取り組みは州・市レベルに任されている。このため、取り組みは州・市によってまちまちである。たとえば、都市部や工業地域であるカリフォルニア州・ニューヨーク市・ボストン市等はリサイクル規制を策定しており、リサイクル率を高めている。一方、西部や南部の州

は広大な土地が余っており埋設処理費用が格安なため特段の規制は設けていない。

民間レベルでは、食品、小売り、素材産業などの動脈産業がファンドを設立し、リサイクルを担う自治体と事業者を対象に出資することで、単独では事業化できないリサイクル促進を図っている。

なおレアアース等の重要原料については、安全保障の観点から重要視しており、国内供給不足解決策検討をエイムズ研究所内の重要原料研究所で行っている。

c. 中国の動向

中国はリサイクルに関して、近年の経済成長により生産大国から消費大国に転換しつつあるなか、中国環境保護部は2007年に「電子廃棄物汚染環境防治管理弁法」を公布した。しかし、急増しつつある電気電子機器廃棄物(e-waste (electronic waste)あるいはWEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment)とも呼ばれる)に対応しきれず、技術に問題のあるインフォーマルな業者による処理のために、有害物質の未処理による環境汚染が、中国各地で表面化している。

その後、国務院により2013年に「循環型経済発展戦略及び透明の活動計画」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1兆8000億元とし、鉄鋼、非鉄金属業等で金属スクラップ再利用などの取組による産業のモデル転換を進めている。近年では、中国製造2025の中でグリーン発展を掲げ、循環経済に向けて取り組んでいる。

e. 日本

我が国のリサイクルに関する法制度は表に示すように、経済発展に伴う公衆衛生や環境保全に対する課題の表出とともに整備が進んできた。また、法制度整備とともに技術開発が行われ、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。

近年では資源を取り巻く世界的な課題の変化に対応し、都市鉱山の資源化推進という新たなフェーズに移行しつつある。

表1. 2. 1 リサイクルに関わる法制度と主な課題の変遷

法律の制定	主な課題	フェーズ
・清掃法 (1954)	・環境衛生対策	公衆衛生の向上
・廃棄物の処理及び清掃に関する法律(1970)	・公害の顕在化 ・埋め立て地対策の拡大	公害問題と生活環境の保全 埋め立て地対策
・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)	・廃棄物処理施設整備の推進 ・廃棄物処理に伴う環境保全	埋め立て地対策
・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)	・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	リサイクル推進
・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)	・循環型社会の構築	3Rの推進
・レアメタル確保戦略の策定 (2009) ・エネルギー基本計画 (2010) ・小型家電リサイクル法 (2013) ・資源確保戦略 (2012)	・資源供給対策 ・使用済製品の資源化	都市鉱山資源化の推進
・循環型社会形成推進基本法 改正(2013) ・日本再興戦略 (2016)	・資源効率の向上 ・情報活用	動静脈連携の推進

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)

他方、我が国の成長戦略である「日本再興戦略 2016」において、資源価格の低迷下での資源安全保障の強化等を目指して、都市鉱山の利用を促進し、リサイクル業者や非鉄金属製錬業者等の成長を図るため、動脈産業と静脈産業の連携により金属資源を効率的にリサイクルする革新技術・システムを開発することとされている。

また、経済産業省としては、上記の現状認識を踏まえ、平成 27 年 (2015 年) 6 月に「金属素材競争力強化プラン」、平成 30 年 (2018 年) 7 月に「エネルギー基本計画 2018」をとりまとめ、レアメタルリサイクルの積極的な技術開発やリサイクルプロセスにおける動脈産業と静脈産業のバリューチェーンの構築を国が資源確保政策として行うことを位置付けている。

②内外の技術動向及び国際競争力の状況

D. 諸外国の研究開発政策の状況

a. 欧州の研究開発政策の状況

2015年12月、EUはCEパッケージの更新版を発表し、特に注力が必要な5つのマテリアルのうちの1つに希少金属を選定、2016年にe-wasteや電池など廃棄が複雑な製品のリサイクル基準を策定し、2017年に希少資源に関するレポートや再資源化のベスト・プラクティスを取りまとめるというアクションプランを策定。これに基づき、EU加盟各国がそれぞれの国において、希少資源のリサイクルを行うよう推奨している。

表 1.2.2 に HORIZON2020 を含めた EU での金属リサイクル関連プロジェクトを、リサイクルプロセスの関連技術ごとにまとめた。物理選別関連技術では約 48.3 百万€、化学分離関連技術では約 41.1 百万€、情報連携関連技術に約 14.6 百万€の予算をつけており、EU ではここ 10 年程度の間に約 125 億円の資金で研究開発を進めていることになる。

EU の金属リサイクル技術開発の傾向として、対象は e-waste に関するものが多い。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、レアアースが中心だが、銅やアルミ、チタン、プラスチックやガラスなど、対象に応じた金属やそれ以外の構成材を含め、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 のような情報利用に関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 1. 2. 2 HORIZON2020 等 EU における金属資源リサイクル関連プロジェクト

プログラム名	期間	物理選別 関連技術	化学分離 関連技術	情報連携 関連	プロジェクト概要
Eco-innovation initiative	2007-2017	4.8M€	1.3M€	1.2M€	WEEE 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€	3.8M€		WEEE 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€	1.8M€		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€			WEEE 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€	11.7M€	2.1M€	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€	12.8M€		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、WEEE の自動解体・選別技術の開発
WASTE-1-2014	2015-2019	9.3M€	9.7M€		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€	WEEE 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キング、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€	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€	41.1M€	14.6M€	
合計		104.0M€ (124.8 億円)			

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

b. 米国の研究開発政策の状況

米国ではエネルギー省（DOE）が重要原料研究所（CMI）を設立し、2013年より5年間、年30億円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）ではエネルギー消費低減を目的に、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）をターゲットにした廃製品からのソーティング技術を開発している。

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つの焦点領域（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、および設計ツール、③廃棄物の迅速な採取・識別・ソーティング、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EU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窺える。

c. 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・社会発展五カ年計画を策定し、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、有色金属・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」プロジェクトは循環利用、再製造、ゼロ排出、産業リンク技術などの開発や、管理システムの改善などを進めるため、モデル拠点を認定するものであり、2011年までに22拠点が認定されている。

中国では資源循環産業の構築を重点課題としてとらえている。李克強副総理は2011年の「循環経済専門家視察」シンポジウムにおいて「重点課題では先端技術の開発と利用について、地方政府による政策の制定、投資、管理などの支援を行う」と述べており、資源循環産業の構築を重視している姿勢が窺える。現在、経済的にリサイクルが行われている金属種は鉄、アルミ、銅などの主要な元素群もしくは、金、銀、白金などの高価な元素群である。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、特に希土類元素については、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を成立させることは困難な状況。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、選別コストが合わず、必要な選別がなされないまま既存の製錬工程へ投入され、スラグに酸化物として分配され、路盤材等に利用されている状況である。将来的に、国内金属リサイクルシステムの構築のためのキーとなるのは、金属リサイクルシステム全体のコスト低減化である。

(2) 世界全体・日本の上位の施策・制度への寄与に向けた本事業の目的

- ①2016年5月15日～16日の期間に富山市で開催された、G7 富山環境大臣会合では、G7 の取組についての進捗を確認すると共に、引き続き、資源効率性・3R のために継続的に取り組むことで一致。また、UNEP 国際資源パネル及び OECD からの報告を受け、環境のみならず、経済成長、技術革新、資源安全保障及び社会開発に多大な関連する便益をもたらすとの認識で一致すると共に、G7 としての共通ビジョン、野心的な取組、フォローアップ等を含む「富山物質循環フレームワーク」を採択した。
- ②2017年6月11日～12日の期間に行われた、ボローニャの環境大臣会合が開催された。当該会合では、資源効率性、3R、循環経済及び持続可能な物質管理は、経済成長と雇用を実現する主要な推進力となり、長期的な経済競争力や繁栄と併せて環境及び社会上の便益をもたらすことができるとの認識を共有し、7ヶ国が合意したコミュニケを採択した。資源効率性・3R の分野で、富山物質循環フレームワーク等の成果を踏まえた「ボローニャ・5ヶ年ロードマップ」を採択した。
- ③日本では、①と②に並行して次のような環境政策が打ち出されており、廃小型家電等に含まれる有用資源等の有効活用の重要性が謳われている。

日本再興戦略2016 第二部 具体的施策(2016.6.2閣議決定)

I 新たな有望成長市場の創出、ローカルアベノミクスの深化等

10. 環境・エネルギー制約の克服と投資の拡大

(2) 新たに講ずべき具体的施策

v) 資源価格の低迷下での資源安全保障の強化等

①国内外での資源開発・確保の推進（一部抜粋）

「都市鉱山」の利用を促進し、リサイクル業者や非鉄製錬業者等の成長を図るため、情報技術等を活用し、動静脈連携によりレアメタル等の金属資源を効率的にリサイクルする革新技術・システムを開発する。

新しい経済政策パッケージ（2017.12.8閣議決定）

第3章 生産性革命

3. Society5.0の社会実装と破壊的イノベーションによる生産性革命

(4) Society 5.0のインフラ整備

⑤大胆な省エネ・再エネ投資の促進等（一部抜粋）

資源効率性の向上に向け、都市鉱山からの金属回収等資源循環を加速するための循環型社会形成推進基本計画の改定を来年前半に行う。

第五次環境基本計画（2018.4.17閣議決定）

第2章 重点戦略ごとの環境政策の展開

1. 持続可能な生産と消費を実現するグリーンな経済システムの構築

(循環資源の利活用、都市鉱山)

都市鉱山（使用済製品等に含まれる有用資源等）を有効活用する観点から、金属の回収について、小型家電リサイクルの普及による影響と効果を分析し、地域の特性を活かした工夫や、静脈産業や素材産業等の様々な主体間の連携を促すことによって、ベースメタルやレアメタル等の金属の回収量の更なる増大を図る。

第四次循環型社会形成推進基本計画(2018.6.19閣議決定)

5.3. ライフサイクル全体での徹底的な資源循環

- 我が国の都市鉱山を有効に活用するため、廃小型家電の選別システムや製錬システム等の革新につながる研究開発や、これらをシステム化するIT等を有効活用することによって、動静脈産業が一体となった戦略的な資源循環システムの構築を行う。

また、経済産業省では、欧州循環経済パッケージ等の資源循環政策に係る国際動向、人口減少・高齢化等の社会構造の変化、モノからコトへといった消費・ビジネス構造の変化を受け、今後の資源循環政策のあり方について中長期的視野での議論

が求められているとしており、これらの国際動向・社会動向を踏まえ、我が国「資源循環産業（仮称）1」の現状と課題について所要の調査・分析を行い、今後の資源循環政策の方向性に係るビジョンを取りまとめるために、2018年7月から「循環経済ビジョン研究会」を開催している。

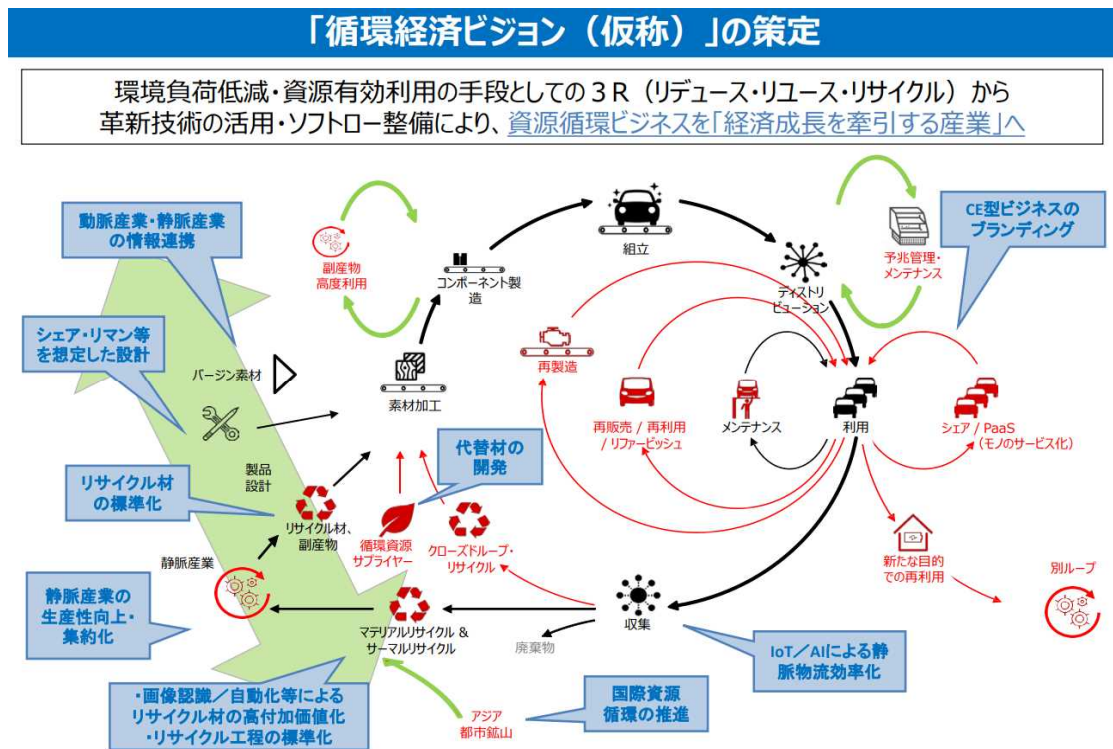


図 1. 2. 4 循環経済ビジョンイメージ

出所：経済産業省 資源循環ビジョン研究会

そこで、我が国の都市鉱山を有効に活用するため、資源価値の高い小型家電等の廃製品を対象に、現状リサイクルが行われている元素群（鉄、アルミ、銅、金、銀など）のみならずレアメタル等も含めた多様な金属について、低コストで高効率な再生金属資源の生産（金属のリサイクル）を可能とする革新的な技術を開発するとともに、バリューチェーンを形成する動静脈連携を強化する情報、制度、社会システムの構築を目指す。

1.3 NEDOの事業としての妥当性

(1) 技術戦略との関係性

2030年頃までに国内の金属資源循環を確立することを目標に、図1.2.5にプロジェクト実施のロードマップを示す。先導研究(2015年度採用)により、製品寿命の短い小型家電（携帯・デジカメ）を対象に要素技術開発に資するデータ収集をスタートさせ、その後、基盤技術開発(6年程度)を行い、さらに、2、3年程度で国内での実用化を図る。

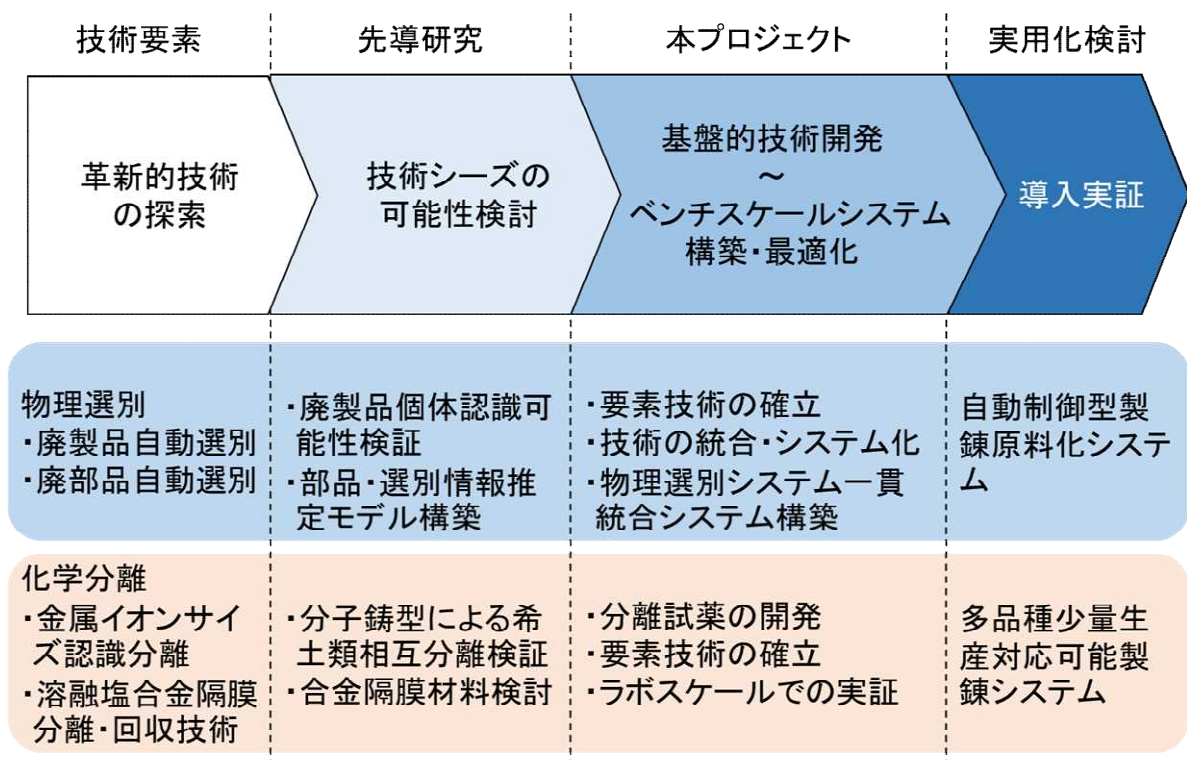


図 1. 2. 5 技術戦略との関係性イメージ

(2) NEDO 関与の必要性

1. 2 の背景に記載した状況を踏まえ、本事業においては、我が国の都市鉱山の有効利用を促進し、資源安全保障への貢献及び省資源・省エネルギー化を実現することを目的とした事業を実施する。本事業で構築を目指すリサイクルシステムは、複数の工程を最適に組み合わせたリサイクルシステム構築や基礎的研究から実用化開発を見据えた研究など、シームレスな開発が重要であり、中間処理業者のみならず、破碎機械メーカーが保有する情報や独自技術を有機的に連携して開発する必要がある。

他機関も複数のリサイクルシステムに関する研究開発は行われているものの、国研、大学、企業を結集させて、共通基盤技術の開発から実用化を目指した長期的に行うための研究開発事業は存在しない。

表 1. 2. 3 資源循環関連事業

実施機関	プロジェクト名	期間	予算	事業内容
1 NEDO	希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業	2010～2011年度	15億円 (リサイクル関連全体)	レアメタルの代替技術、使用量削減およびリサイクル等の技術に係る実用化開発
2 JST	未来社会創造事業／新たな資源循環サイクルを可能とするものづくりプロセスの革新	2017年度～	2500万円以下(探索研究・最大2年間)	製品使用から、再(生)利用・長期利用にわたる様々な場面での先進的な「製造・分離・評価」等の要素技術とそれらに基づく設計体系やそれらの技術を用いたシステムの研究開発
3 JOGMEC	金属資源の生産技術に関する基礎研究	2016年度～	500万円未満/1テーマ・年間(最大2年間)	レアメタル等を対象とした、採鉱技術、選鉱・製錬技術、尾鉱・製錬残渣等に残存する有価金属の回収技術及び使用製品のリサイクル技術をテーマとした基礎研究

また、次の3つの観点からも、国研、大学、企業を結集させて共通基盤技術の開発を行うため、NEDOが持つこれまでの知識、実績を活かして推進できる事業である。

●社会的必要性が大きい

我が国の都市鉱山の有効利用を促進し、資源安全保障への貢献及び省資源・省エネルギー化を実現する。

●資源循環産業の競争力強化に貢献

当該産業分野の研究人材が極めて少ないという状況であり、業界側も本研究分野への積極的な投資が難しい。

●異業種間連携が必要不可欠

複数の工程を最適に組み合わせたリサイクルシステム構築や基礎的研究から実用化開発を見据えた研究であり、シームレスな開発が重要。

(3) 本事業の概要

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を行う。さらに、情報技術等を有効活用することによって、動静脈産業が一体となった戦略的な資源循環システムを支える技術基盤を構築する。

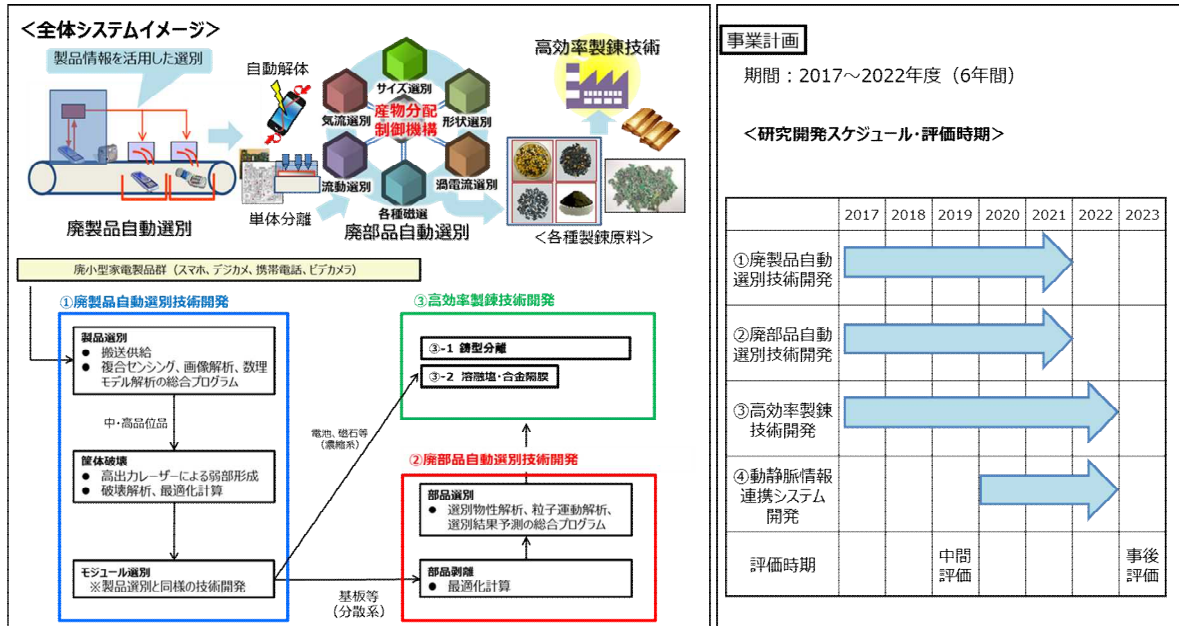


図 1. 2. 6 事業の概要

(4) NEDO の事業の費用対効果

2035 年度（平成 47 年度）までに、これまで国内で再資源化されていなかった年間約 1000 億円相当の金属資源を新たに資源化する。本技術が白物家電や自動車に応用展開できれば、数兆円規模の産業を下支えすることとなり、事業の費用対効果は大きい。

表 1. 2. 3 事業の費用対効果一覧

評価指標	目標値	備考
投入予算	約30億円/6年	プロジェクト費用の総額（見込み）
獲得見込市場	約1,000億円/年	売上予測(2035年)
CO ₂ 削減効果	7.56 × 10 ⁷ kg-CO ₂ /年・システム	
研究開発項目①	6.56 × 10 ⁶	既存ソータで同レベルの選別が実現できたと仮定したときの消費電力の削減分
研究開発項目②	3.42 × 10 ⁶	既存破砕機・選別機・樹脂処理工程で同レベルの選別した場合の消費電力の削減分等
研究開発項目③-1	6.51 × 10 ⁷	鋳型分離技術の確立で、分離精製ラインの小型化による省電力効果、有機溶剤使用量低減効果
研究開発項目③-2	5.50 × 10 ⁵	新技術による電解時の省電力効果

2. 研究開発マネジメントについて

2.1 事業の目標

本事業のアウトプット目標として、3年経過時の目標を中間目標、終了時の目標として設定した。また、事業終了後（2025年度時点）のアウトカム目標も設定した。

(1) アウトプット目標（最終目標、中間目標）

本事業の目標を以下の通り設定する。

中間目標(2019年度)：

動静脈連携により、金属資源の循環活用が可能な都市鉱山構築に向け、天然資源からの金属生産コストと競合可能な基盤技術を開発する用途をたてる。具体的には、すべての研究開発項目を一貫して開発を実施し、以下を達成する。

研究開発項目① 廃製品自動選別技術開発

廃製品（破壊・変形を伴わない）を、処理速度 1 秒/製品・個以内に、非破壊で個体認識・資源価値判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの 10 倍以上の処理速度を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。

研究開発項目② 廃部品自動選別技術開発

廃製品を構成する主なモジュールから分散・複雑系廃部品を単体分離・選別する自動選別システムにおいて、各種選別産物の製錬原料化（製錬受入れ条件を満たす金属原料化）を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。

研究開発項目③ 高効率製錬技術開発

イオン半径が近接する希土類元素を対象に、相互分離係数 3 を有する分離試薬を開発するとともに、ラボスケールで、2 種以上の希土類元素を（単体または鉄等との合金として）純度 80% 以上で各々同時に直接回収する技術を確立する。

研究開発項目④ 廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発

2021 年からの研究開発開始のため対象外。

最終目標(2022年度)：

動静脈連携により、金属資源の循環活用が可能な都市鉱山構築に向け、天然資源からの金属生産コストと競合可能な基盤技術を開発する。具体的には、すべての研究開発項目を一貫して開発を実施し、以下を達成する。

研究開発項目① 廃製品自動選別技術開発

廃製品（破壊・変形を伴うものを含む）を、処理速度 0.5 秒/製品・個以内に、非破壊で個体認識・資源価値を判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの 10 倍以上の処理速度を実現するベンチスケールシステムを完成させる。

研究開発項目②廃部品自動選別技術開発

廃製品を構成する主なモジュールから分散・複雑系廃部品を単体分離・選別する自動選別システムにおいて、廃部品を分離効率 80%以上で選別する性能を有し、各種選別産物の製錬原料化を実現するベンチスケールシステムを完成させる。

研究開発項目①及び②を連動させて一貫制御するベンチスケールシステムを完成させる。

研究開発項目③高効率製錬技術開発

イオン半径が近接する希土類元素を対象に、相互分離係数 5 を有する分離試薬を開発する。

また、2 種以上の希土類元素を（単体または鉄等との合金として）純度 80%以上で各々同時に連続的に直接回収する技術を実現するとともに、プロセス適用時のコストを 1/2 以下（従来比）にする見通しを立てる。

研究開発項目④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発

戦略的鉱物資源 20 種のマテリアルフロー、製品群 30 種の製品フローを考慮した都市鉱山ポテンシャル評価・廃製品リサイクルコスト評価システムの構築と、それを用いたリサイクル対象鉱種・製品を選定する。

(2) アウトカム目標

2025 年度までに、事業により開発された、自動・自律型リサイクルプラント（廃製品・廃部品の自動選別装置）及び少量多品種の金属資源の高効率製錬技術（分離試薬等）の実用化を目指す。これらのリサイクルプラント等の普及により、2035 年度までに、これまで国内で再資源化されていなかった年間約 1,000 億円相当の金属資源を新たに資源化し、我が国の資源安全保障に貢献する。

また、環境配慮設計や再生材品質規格の作成等、資源循環の仕組みの社会への普及に貢献する。

・ 目標設定の根拠

なお、各研究開発項目に対する目標設定の根拠は以下のとおり。

・ 研究開発項目①

現状の人手による廃製品の仕分け及び解体には、それぞれ約 5 秒/製品・個、約 5 分/製品・個を要していることから（リサイクル事業者ヒアリングによる）、人手の 10 倍以上

の処理速度として、0.5 秒/製品・個以内の個体認識・資源価値判定及び選別、30 秒/製品・個以内の解体・モジュール選別を実現するベンチスケールシステムの完成を最終目標として設定した。中間目標はその要素技術としての製品選別、筐体解体、モジュール選別の基盤技術の確立に目途を付ける設定とした。

・ 研究開発項目②

従来、電子素子選別の分離効率は 50%を超えることが困難であったが、実施者は過去の研究で、タンタルコンデンサに限定して、90%を超える分離効率を実現した。これは計算により専用の選別装置を開発・最適化した世界初の例であり、かつ、タンタルコンデンサが他素子の物性(サイズ、比重、磁性、形状)に対して、独立した物性を有していたことに起因する。本件においては、多種の電子素子の回収に対して、独立物性を計算しつつ、既存選別機を最適制御するトランスフォーマブル選別機開発を目指すものであり、回収素子の分離効率 80%を実現するベンチスケールシステムの完成を最終目標として設定した。中間目標はその要素技術としてのマルチ供給搬送システムの開発によるトランスフォーマブル選別機の基盤技術確立に目途を付ける設定とした。

・ 研究開発項目③

鑄型分離については、分離係数 5 になると、分離施設の設置面積が約 10 分の 1 になり、実操業を妨げる、消防法など各種法令をクリアすることができる。また、熔融塩分離については、単一工程での回収のため、純度の面では従来法より低くなることは避けられない。一方、実際の使用にあたっては、不純物のうち希土類、Fe 以外の元素が大量にあるのは問題だが、目的元素以外の希土類が多少混ざっていても大きな問題にならない。そのため、業界関係者からのヒアリングをもとに、使用上問題無いと思われる下限値として 80%を採用した。

2.2 研究開発計画の妥当性

(1) 研究開発手法の非連続性・効果・効率性

以下 4 つの研究開発項目を実施する本事業は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、委託事業として実施する。

研究開発項目①廃製品自動選別技術開発

研究開発項目②廃部品自動選別技術開発

研究開発項目③高効率製錬技術開発

研究開発項目④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発

研究開発項目①廃製品自動選別技術開発

廃製品の種類を自動認識し、平均的金属組成等に基づいて、最適な選別・解体条件の自動選択等を可能とする廃製品の自動選別技術、自動筐体解体技術、モジュール選別技術を開発する。

研究開発項目②廃部品自動選別技術開発

各種金属が混在する、廃製品を構成する主なモジュールに対し、構成する細粒部品の単体分離技術を開発するとともに、単体分離産物の組成に対応して、選別方法・条件を自動的に選択・制御し、製錬原料として最適化を実現する、廃部品自動選別技術を開発する。

研究開発項目③高効率製錬技術開発

選別された廃部品を原料として、多様な金属の資源化を高効率化するため、基幹製錬技術を補完する希土類元素を対象とした高精密な分離試薬の開発、及び特定の希土類元素が濃縮した部品から目的金属を直接回収する基盤技術を開発する。

研究開発項目④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発

国内マテリアルフロー・製品フロー分析、リサイクルすべき製品・マテリアルの動静的な評価を実施し、また製品の含有マテリアル・資源配慮設計情報を管理する情報システムの構築を行う。

(2) 研究開発スケジュール・事業予算規模

2020 年度以降、研究開発項目①及び②を連動させて一貫制御するベンチスケールシステムを完成させる計画となっており、製品選別システムと部品選別システムの機械的統合と物理選別システム全体の自動・自律運転を実現するためのソフトウェア開発を連携して行っている。

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
①廃製品自動選別技術開発	要素技術開発			一貫統合システムの構築・最適化			
②廃部品自動選別技術開発	要素技術開発						
③高効率製錬技術開発	メカニズム解明 基本性能評価			実用化に向けた開発			
④動静脈情報連携システム							
評価時期			中間評価				事後評価

具体的には、本プロジェクトでは、表 2.1.1.1 に示した目標を達成するため、項目ごとに新たな研究アプローチで取り組んでいる。一例を挙げると、ソータの開発(①-1, ①-3)では、2D 画像の機械学習に加え、3D 形状や文字認識などの複合的なセンシングにより、小型家電の種類、メーカーや型式などの認識精度を高めるとともに、個体情報に基づいて、資源価値判定と資源価値別に選別するシナリオを策定する点において、単に機械学習的に単純構造物の識別をする近年開発のソータとは一線を画している。解体・剥離装置の開発(①-2, ②-1)では、従来、既成装置を実験的手法で改良していたのに対し、ゼロベースからシミュレーションによる最適解を検討、その最適解を実験的に検証し、実用性を確認後、さらに小型家電情報に基づくシミュレーションより最適条件を求めるなど、これまでにない開発手法をとっている。また、選別装置開発(②-2, ②-3)では、磁選機、比重選別機など個別の選別装置の理論が確立されておらず、従来、選別シミュレーションは実験結果に合わせ、物理的に意味のない「定数」を補うことで対応していた。このため、選別対象の情報があっても、未知試料に対して計算で最適化することが出来ず、自律運転が実現しなかった。本研究では、多くの実験データに基づいて機械学習的に、摩擦係数、反発係数など、容易に測定困難な物理パラメータを算出する方法を開発している。これにより、未知試料に対しても計算で運転条件の最適化が可能となり、多数装置を連動し、自律的に最適運転するトランスフォーマブル選別システムの開発へと繋げている。

以上のように、高度な計算手法と実験的検証の双方により、資源価値に基づく網羅的条件の最適解と、その自律的運転を可能にする本研究のアプローチは、他に類がない。

表 2.1.1.1 研究開発の目標

研究開発項目	平成29年度	平成30年度	平成31年度
①「廃製品自動選別技術開発」			
①-1 製品ソータの研究開発 産業技術総合研究所, 佐藤鉄工, 大栄環境	・自動認識アルゴリズム, システム統合技術検討 ・装置稼働/資源価値評価DBの要件検討 ・基板資源価値判定技術の要件検討 ・単品排出機構の要件検討	・制御アルゴリズム, 装置稼働/選別区分データに基づくデータリンク基本システム検討 ・基板価値の画像一括判定法検討 ・単品排出試作機的设计	廃製品(破壊・変形を伴わない)を、処理速度1秒/製品・個以内非破壊で個体認識・資源価値を判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。
①-2 自動解体装置の研究開発 産業技術総合研究所, 佐藤鉄工, リーテム	・開発要件に基づく廃製品グループピッキング法検討 ・既存機改良要件, 弱点形成・選択破壊機構要件の検討	・内部構造, 接合情報数値化 ・既存機改良, 弱点形成・選択破壊機的设计	
①-3 モジュールソータの研究開発 産業技術総合研究所, リーテム, 佐藤鉄工	・試験用3種モジュールの調製 ・ラボ試験機基本設計	・3種モジュール画像情報整備 ・3個以上同時並列処理の検討とラボ試験機の試作	
②「廃部品自動選別技術開発」			
②-1 部品剥離装置の開発 産業技術総合研究所, 佐藤鉄工, 大栄環境	・基板剥離条件, DB化要件の検討 ・基板剥離既存技術と新規装置要件の検討	・剥離基準の基板構造グループピッキング構築 ・部品剥離装置ラボ試験機試作	廃製品を構成する主なモジュールから分散・複雑系廃部品を単体分離・選別する自動選別システムにおいて、各種選別産物の製錬原料化(製錬受入れ条件を満たす金属原料化)を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。
②-2 選別装置自動制御技術の開発 産業技術総合研究所, DOWAエシステム(再委託)北海道大学, 東京大学	・素子特性DBの要件検討 ・電磁気系選別機粒子運動解析 ・製錬原料化要件の抽出	・電子情報-選別物性の関係性を構築 ・気流系選別機粒子運動解析 ・各種選別機の粒子運動予測精度検証 ・製錬原料化産物の選別限界を推定	
②-3 TF選別システムと一貫制御技術の開発 佐藤鉄工, 大栄環境, 産業技術総合研究所	・マルチ供給システムの機構検討		
③「高効率製錬技術開発」			
③-1 鋳型分離技術を利用した希土類元素の高精度金属イオンサイズ認識分離 日本原子力研究開発機構, 佐賀大学, 産業技術総合研究所, 三徳, (再委託)神戸大学	・鋳型錯体形成・鍵分子相互作用のメカニズムを解析 ・吸着分離:配位子を固定化した溶着剤の検討 ・溶媒抽出:多座配位系抽出剤の単独利用挙動	・分離可能境界元素の制御, 鍵分子利用の分離限界, 配位子の基本骨格等検討 ・吸着分離:溶着剤の協同効果発現の検証 ・溶媒抽出:協同効果と分離性の評価	イオン半径が近接する軽希土類元素を対象に、相互分離係数3を有する分離試薬を開発するとともに、重希土類元素に対する適用可能性を検証する。また、溶媒塩利用技術について、ラボスケールで、2種以上の希土類元素(単体または鉄等との合金として)純度80%以上で各々同時に直接回収する技術を確認する。
③-2 溶融塩を利用した濃縮系少量材料のリサイクル技術 産業技術総合研究所, 三徳, 京都大学, 大阪大学	・分離速度と耐久性を両立する分離隔膜の検討 ・高温域における塩素系・フッ化物系溶融塩を利用した検討	・分離速度と耐久性を両立する分離隔膜の試作 ・高温域における塩素系・フッ化物系溶融塩利用における最適条件抽出に向けた検討	

表 2.1.1.2 研究開発予算

(百万円)

研究開発項目	2017年度 (実績)	2018年度 (実績)	2019年度 (契約)	合計
研究開発項目① 廃製品自動選別技術開発	118	134	168	420
研究開発項目② 廃部品自動選別技術開発	144	195	219	558
研究開発項目③ 高効率製錬技術開発	121	159	102	382
研究開発項目④ 廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発	-	-	-	-
合計	383	488	489	1,360

2018年度は事業原簿作成段階の契約額

2.3 事業の実施体制

(1) 実施体制の決定方法

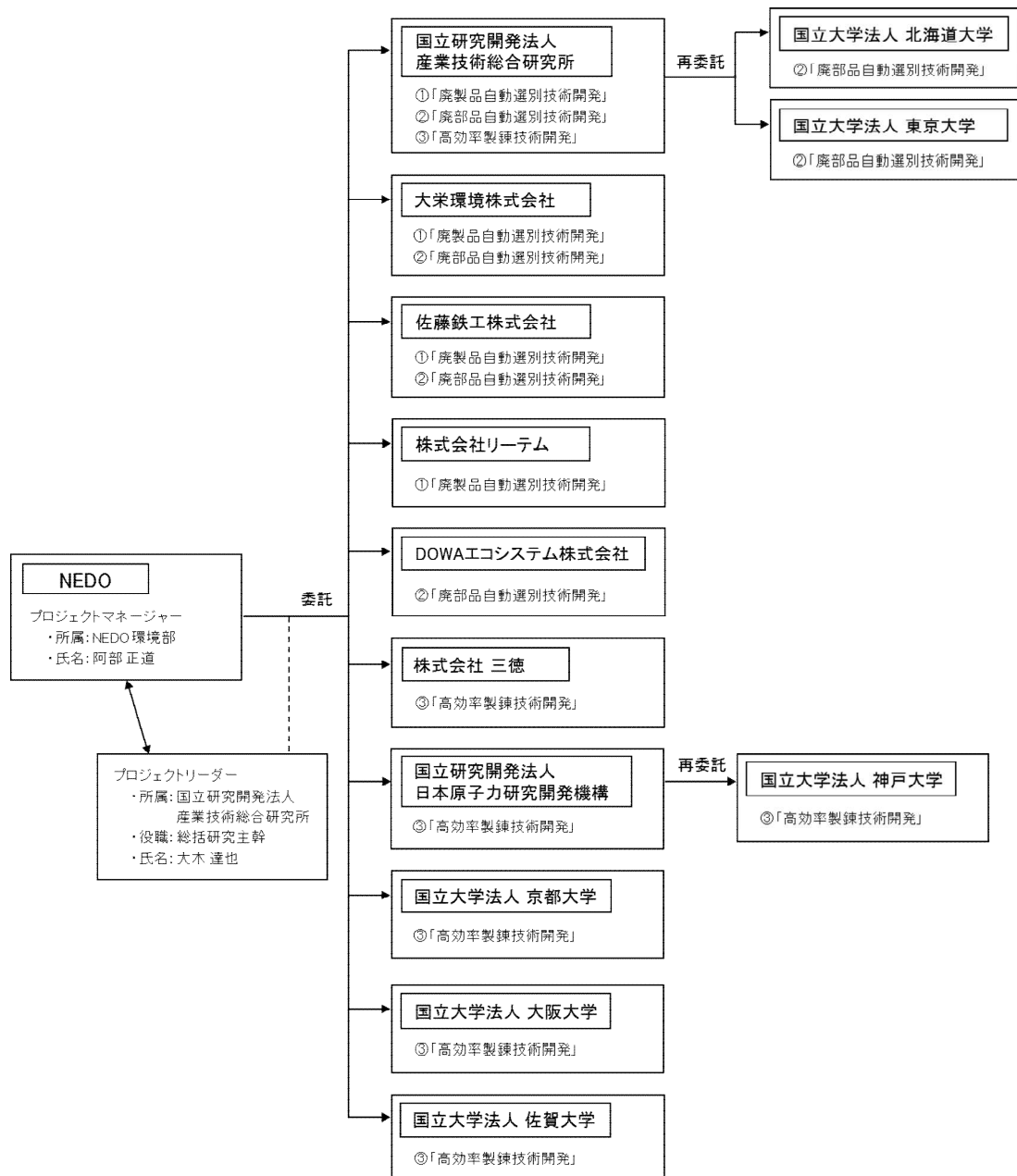
本プロジェクトは産学官の叡智を集結して実施すべく 1 カ所に集中研拠点を形成して実施することを前提に 2017 年度から事業を開始出来るように公募を行った。

(2) 実施体制及び役割分担

① PL、PM について

プロジェクトマネージャーに NEDO 環境部 主任研究員 阿部正道を任命して、事業全体の企画・管理を行うとともに、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 エネルギー環境領域・環境管理研究部門 総括研究主幹 大木 達也氏をプロジェクトリーダーとし研究開発を実施している。



②実施体制について

本プロジェクトでは、開発課題の早期実現に向け、参画機関の連携と外部機関の協力を図り、その知見を集約するために、図 2.1.2.1 のような体制をとっている。また、2018年6月には、本プロジェクトの開発促進のために、NEDO プロジェクト集中研究施設 (CEDEST) をつくば (産業技術総合研究所) に開設した (図 2.1.2.2)。CEDEST では、主として研究開発項目①②の参画機関を募り、物理選別システムの一貫した開発を行うことを目的としている。また、図 2.1.2.3 に示すように、連携のための連絡・協議を実施するため、実施機関独自に、全体会合として「高効率資源循環システム研究開発協議会」、研究開発項目①②の装置開発関連機関による「物理選別システム開発協議会」と「集中研運用協議会」、研究開発項目②のマテリアルフロー、LCA 等のソフト開発関連機関による「物理選別最適化・評価協議会」、研究開発項目③の関連機関による「多品種少量製錬開発協議会」を、それぞれ開催している。

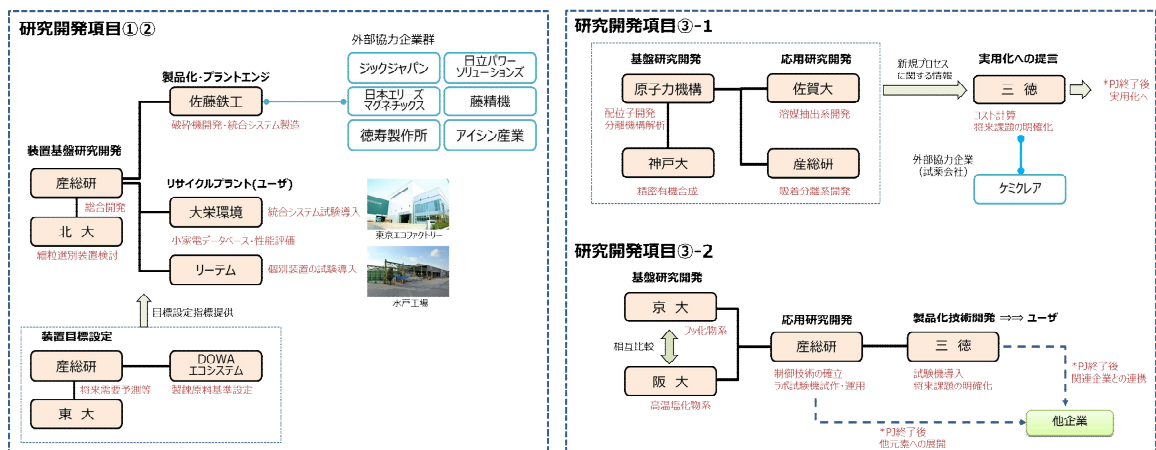


図 2.1.2.1 参画機関の連携体制

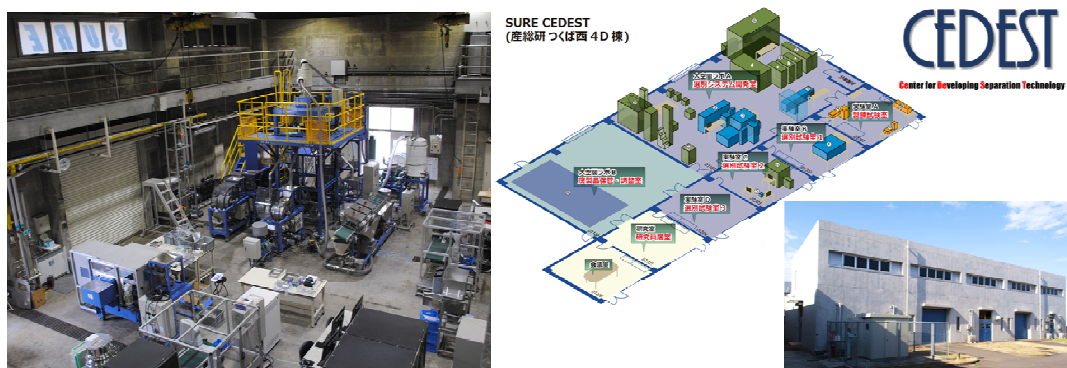


図 2.1.2.2 集中研究施設 CEDEST

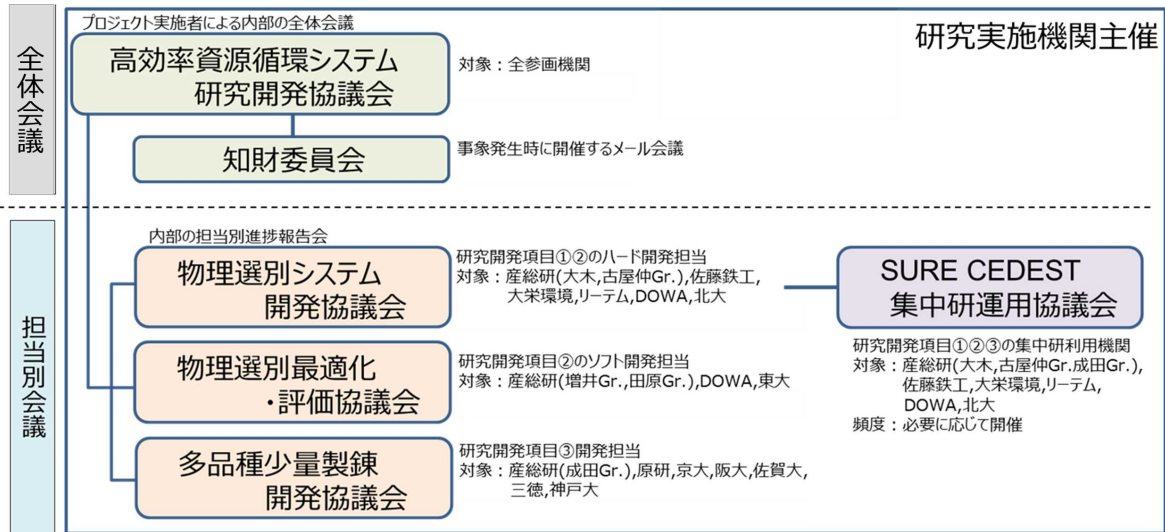


図 2.1.4 連携促進のための各種委員会・協議会

(4) 再委託先間の連携

受託事業者が委託業務のうち、研究開発要素が含まれる業務を第三者に委託することを再委託と言い、本事業においても一部の業務を再委託している。具体的には、下表のとおり。

表 2.1.1.3 研究開発予算

研究開発項目	再委託先 (再委託元)	研究開発内容、委託元に対する関係性・貢献
②廃部品自動選別技術開発	北海道大学 (産総研)	<ul style="list-style-type: none"> 研究開発内容：細粒選別装置開発 湿式比重選別機(ネルソン選別機)の性能評価と高精度化によって、選別システムで発生する細粒子の高度選別を可能にする。 再委託元 (産総研) への貢献 産総研がシミュレーションにて最適な稼働条件を検討し、再委託先である北海道大学がその実験的検証を行うことで、両者を比較し、実態を忠実に把握した開発が可能となる。
②廃部品自動選別技術開発	東京大学 (産総研)	<ul style="list-style-type: none"> 研究開発内容：都市鉱山利用による環境負荷低減効果の評価 従来プロセス(鉱石から金属生産)の環境影響の算定を可能にする。 再委託元 (産総研) への貢献 産総研が構築する選別システム導入等によってリサイクル市場が拡大した社会を想定し、東京大学が社会におけるモノと資金の流れを整理・モデル化によって、リサイクル市場が拡大した際の環境負荷低減効果を検討する。
③高効率製錬技術開発	神戸大学 (原子力機構)	<ul style="list-style-type: none"> 研究開発内容：精密有機合成 分離配位子の精密合成及び最適な合成方法を確立する。 再委託元 (原子力機構) への貢献 原子力機構が特定する高効率な分離試薬の精密な合成に向けて、神戸大学は高精度で高収率な合成方法を開発する。

2.4 研究開発の進捗管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO は経済産業省やプロジェクトリーダー等と密接な関係を維持しつつ、適切な運営管理を実施した。具体的には毎年度開催する外部有識者の視点を活用した NEDO(環境部)主催の技術推進委員会のほか、実施者主催の各種会議体への出席を通じ、プロジェクトマネジメントを行った。

(1) 事業実施・進捗管理のための委員会

NEDO は下表の委員会を開催し、外部有識者からの意見を取り入れつつ、プロジェクトマネジメントを行った。

表 2.1.1.4 NEDO 開催委員会及び委員リスト

会議名	主要出席者	目的	頻度
採択審査委員会	外部有識者、提案者、NEDO	外部の専門家・有識者に評価いただき、事業の実施者・実施体制、採択条件などを決定。	採択審査時
技術推進委員会	外部有識者、事業者、NEDO	外部の専門家・有識者に事業推進のためのコメント及びアドバイスをいただき、事業運営に反映。	年1回

委員会	委員	所属	役職
採択審査委員会 (2017年5月11日)	大和田 秀二	学校法人 早稲田大学 理工学術院	教授
	加藤 秀和	一般財団法人 国際資源開発研修センター 国際資源大学校	研修企画部長
	木通 秀樹	株式会社 日本総合研究所 創発戦略センター	シニアスペシャリスト
	竹ヶ原 啓介	株式会社 日本政策投資銀行	産業調査部長
	井関 康人	三菱電機株式会社 リサイクル推進統括部	部長
技術推進委員会 (第1回:2018年3月6日、 第2回:2019年2月19日)	中村 崇	国立大学法人 東北大学	名誉教授
	藤田 豊久	国立大学法人 東京大学	教授
	小上 泰司	東芝環境ソリューション株式会社 経営企画部	グループ長
	小林 幹男	独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構	上席研究員
	鶴飼 隆広	株式会社 三菱総合研究所 環境・エネルギー事業本部	主席研究員

(2) 研究開発マネジメントの妥当性

①各種検討会の開催

NEDO は経済産業省やプロジェクトリーダー等と密接な関係を維持しつつ、適切な運営管理を実施するために、下表の会議を開催・参加することをつうじてプロジェクトマネジメントを実施した。

表 2.1.1.4 会議リスト

会議名	主要出席者	目的	頻度	主催
DJ 会議	METI、事業者、NEDO	METI 予算要求原課等の関係原課に対して事業進捗状況を共有するとともに、新政策への対応等を検討する。	隔月	NEDO (環境部)
PL、PM 会議	PL、テーマリーダー、PM、NEDO	本事業の PL、PM を中心に、事業の進捗状況、予算の執行状況、研究開発の一部加速、削減などについて協議する。	隔月	PL、PM
研究開発協議会	事業者、NEDO	全研究開発項目の主たる担当者を集め、事業の進捗状況を共有し、課題点などを協議する。	年 2 回程度	PL
知財員会	事業者	本事業で発生する成果として、論文発表や特許等の知的財産権の取り扱いについて協議する。	適時	事業者
テーマ別開発協議会	事業者、NEDO	各研究開発テーマの研究担当が進捗状況を確認するとともに、技術的な課題点を協議する。	年 2 回程度	事業者
SURE CEDEST 集中研運用協議会	事業者	産総研に設置した集中研 (CEDEST) における運用 (研究機関の出入り制限等) について協議する。	適時	事業者

③関連製品・技術との優位性の確認

本事業に関連する製品や技術開発について常に情報収集しており、それぞれの研究開発項目①～③に関連する技術・製品と本事業の優位性について、下表にまとめる。

研究開発項目	関連技術・製品 説明	本事業との比較・優位性
① 廃製品 自動選別技術開発	製品選別～筐体解体に至る一連の装置開発	
	一部の企業は 自社製品(スマートフォン)のみを対象にして、自動選別装置を検討 している。多様な対象物の認識する機械学習ソータとして、いくつかの企業が商用化しているが、いずれも特定の構造物を対象としており、 個別製品の選別には対応していない 。	多種多様な廃小家電に対応可能な機械学習ソータ をはじめ、資源価値や構造特性の違いに基づいて 最適プロセスを判断する自動選別・解体システム は世界的にも未だ開発されていない。
② 廃部品 自動選別技術開発	トランスフォーマブル選別システム	
	現在商用化されている選別システムは、自動化への取組が見られるものの、 選別工程は固定され選別条件も予め決められた条件でしか運転できず、最適化されていない 。	マルチ供給搬送システムの開発により、選別装置間を自在に試料搬送可能となる。これにより、 対象物の情報に基づいて、選別工程を自動選択し、各装置を最適条件で運転可能 となる世界初のシステム。
③ 高効率製錬技術開発	鋳型分離技術による希土類元素の精密相互分離	
	(1) 鋳型分離技術を利用した希土類元素の高精密金属イオンサイズ認識分離	従来の希土類相互分離はPr/Nd分離係数2程度の分離剤を用いた溶媒抽出法で行われているため、 広大な敷地と多量の有機溶剤が必要 。
	鋳型分離技術は、金属イオン分離の分野では国内外を問わず 前例の無い新たな概念の分離方法であり、小規模化・環境負荷低減が可能 。	
	合金隔膜を用いた単一工程による希土類の分離・回収	
(2) 溶融塩を利用した濃縮系少量材料のリサイクル技術(濃縮金属部品製錬技術)	従来の希土類製錬では 多段で高コストなプロセス が用いられており、市中からの回収品を国内で処理することができなかった。	単一工程で金属または合金として分離・回収 を目指す世界初の事例。

④ 特許出願動向

NEDO「知財マネジメント基本方針」に準じて、開発拠点への知財集約及びデータ等の取扱いを明記した知財合意書を全参加者で締結し、知財運営委員会の設置による透明性の高い知財管理を図っている。

また、独立行政法人工業所有権情報・研修館(INPIT)の知的財産プロデューサ派遣事業により、2019年4月から、NEDOプロジェクト専属の知財プロデューサ1名が産業技術総合研究所に半常駐し、参画13機関の特許出願補佐を実施している。

	2017年度	2018年度	2019年度	計
プログラム	0	3	1	4
特許出願	0	0	4	4

⑤事業採算性関連調査事業

本事業の成果として得られる技術の商業的展開を見据え、使用済み製品中の多様な金属のリサイクルコストに着目し、以下の2点について調査を実施した。

A. 製品毎の中間処理コスト調査

製品から回収する戦略レアメタルに関する我が国のリサイクル情報に関する実態調査として、3製品（携帯電話、スマートフォン、デジタルカメラ）のリサイクルを念頭に、a)使用済み製品の排出状況、b)使用済み製品の収集・運搬状況、c)中間処理の実施状況、d)再資源化、最終処分の状況、e)工程内リサイクルの実施状況等に関する情報を収集・整理した。また、コスト分析のベースケースとなるコスト分析フレームワーク構築を視野に、これらのリサイクルにかかる一連のフローの経済性・事業性の評価及び分析を行った。

B. リサイクルの採算性向上に向けた今後の中間処理工程等のコスト分析

リサイクルの採算性向上にむけた今後の中間処理工程等のコスト分析として、「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」で開発中の技術を取りあげ、1.で調査した調査対象品目毎の中間処理プロセスと比較対照しながらコスト分析を行った。また、分析結果に基づく課題整理を行った。

		(百万円)		(百万円)		(円/kg)			
		費用		収益		収益－費用		回収重量kg当たり 収益－費用	
		最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大
既存 プロセス	1) 20品目・特定レアメタル回収なしケース	579	602	1,470	1,516	868	937	94	102
	2) 20品目・特定レアメタル回収ありケース	1,830	2,081	2,230	2,265	149	435	16	47
	3) 3品目・特定レアメタル回収なしケース	82	84	740	745	656	663	814	823
	4) 3品目・特定レアメタル回収ありケース	500	615	1,059	1,063	444	563	551	698
将来 プロセス	1) 20品目ケース	331	352	2,808	2,810	2,456	2,479	267	269
	2) 3品目ケース	93	113	1,104	1,104	991	1,011	1,230	1,255

これらの検討の結果、個別の費目については十分なデータが揃っておらず引き続きの検証が必要ではあるが、本事業で目標としている研究開発成果が達成された場合（将来プロセス）、複数のケースにおいて解体・破碎・選別プロセスの自動化・効率化が既存プロセスの経済性改善に大きく貢献する可能性が確認できた。

⑥加速予算

2017年10月に本事業の最終目標達成に大きく寄与する研究開発部分として、56百万円の追加的な開発促進財源投入を実施した。主な購入装置、目的、成果は以下のとおり。

件名	金額 (百万円)	目的	成果
供給機形状最適化計算用ソフトウェア	7	より高機能な供給機(ホッパ、トレイ)の3D形状を見出すため。	本ソフトウェアを用いた解析により、廃製品の単品搬出機構の最適化が可能になり、より実用的な搬送・供給機開発の確度を向上させることが可能となった。
部品剥離状態分析装置	11	基板上の部品剥離状態を自動的に分析するため。	部品剥離装置による基板の部品剥離効果をリアルタイムに計測して、フィードバックすることにより、部品剥離装置のオペレーション条件を自動で最適化するシステムの構築が可能となった。
高精度金属濃度測定装置 (ICP質量分析装置)	17	原子番号が隣り合った希土類元素の濃度の精確な測定を行うため。	原子番号が隣り合った希土類元素に対する濃度測定の精度が著しく向上し、高分離係数を示す分離系においても精確な濃度測定が可能になった。

2.5 知的財産等に関する戦略の妥当性

(1) NEDO の取組

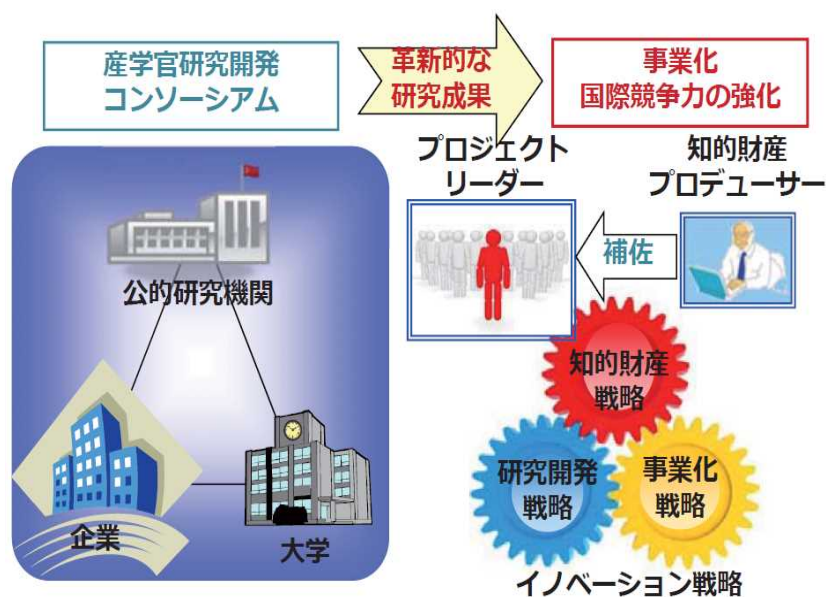
「知財マネジメント基本方針」に準じて、開発拠点への知財集約及びデータ等の取扱いを明記した知財合意書を全参加者で締結し、知財運営委員会の設置による透明性の高い知財管理を図っている。

(2) 実施者の取組

知財委員会運営規則を取り交わし、知財委員会事務局を産業技術総合研究所に設置している。学会、講演、論文、特許の発表・出願ごとに、知財委員会を開催している(2019年6月1日現在、21回開催)。

本事業は独立行政法人工業所有権情報・研修館(INPIT)の知的財産プロデューサ派遣事業に採択され、本年4月より、NEDOプロジェクト専属の知財プロデューサが産業技術総合研究所に半常駐している。

本制度では、NEDOプロジェクトに参画する13機関の知的財産に関する戦略や出願を補佐することを目的としており、既に複数件の特許出願に関して、出願補佐を実施頂いている。



3. 研究開発成果について

3.1 研究開発目標及び研究開発成果と達成度

3.1.1 事業全体の成果

(1) 研究開発目標

本プロジェクトでは、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を行うことを目的として、下記に詳述する研究開発項目①～③を実施した(図 3.1.1.1 参照)。ハイテク製品製造に欠かせない主要なレアメタル及び銅や貴金属等のクリティカルメタルを含めて「戦略メタル」と称し、2025 年を目処に世界に先駆けて、天然鉱山とのコスト競争が可能な都市鉱山技術の確立を目指す。特に本研究では、技術的困難度が高く、さらに近年の需要増加が著しく、製品サイクルも早い小型デジタル家電製品を研究対象とし、国研、企業、大学が密に連携しながら、早期実用化に向けた基盤技術を確立する。中間処理におけるプラント自動・自律化に向けた研究開発項目①②と、現状では銅製錬工程でスラグ化して資源回収されない金属に対する、少量多品種製錬を目指した研究開発項目③を実施する。

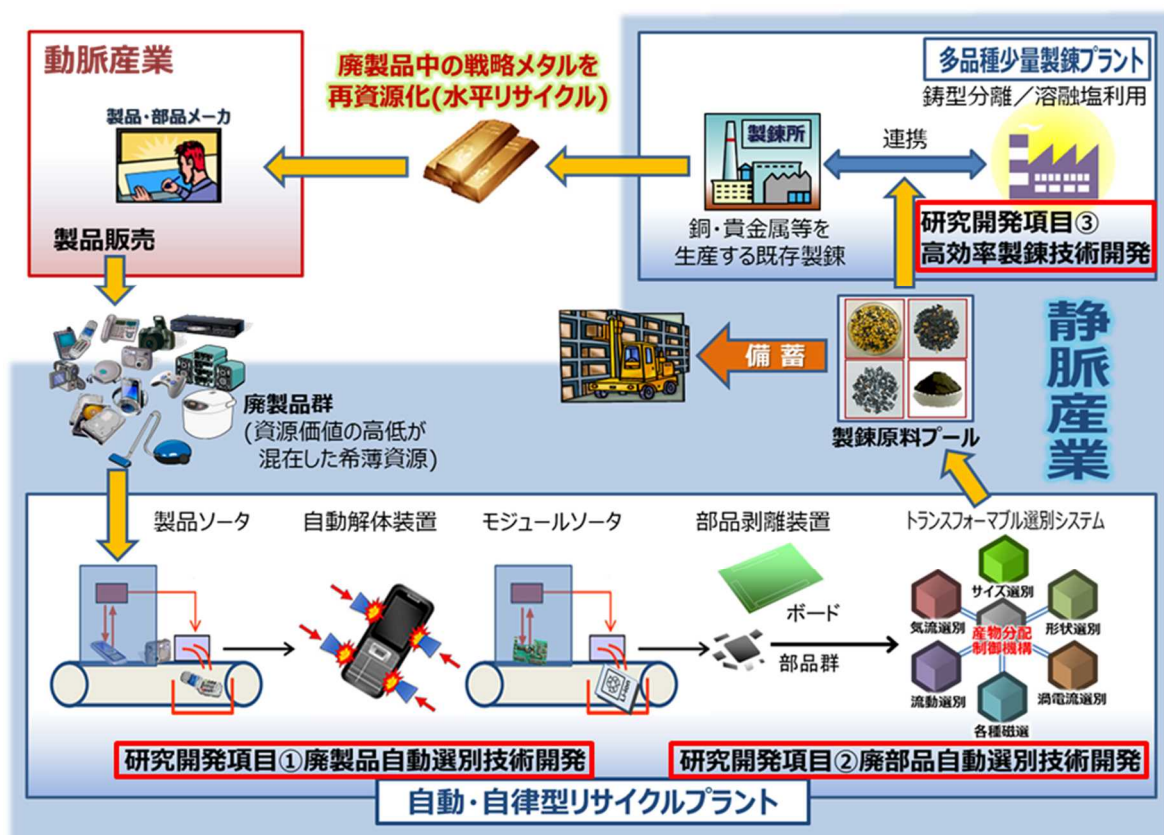


図3.1.1.1 将来における研究開発の実施イメージ

研究開発項目①②では、2019 年度に各ベンチスケール機を試作、2021 年度に全装置を統合した一貫統合システムと完成させる。研究開発項目③-1 では、2019 年度に近接する希土類元素の分離係数 3 を達成させるとともに、2022 年度までに、その分離係

数5の達成と、実用化要件の抽出を行う。研究開発項目③-2では、2019年度に合金隔膜を用いた電解により回収した希土類純度80%以上を達成させ、2022年度までに連続的電解を実現、コストを1/2以下にする見通しを立てる。

(2) 研究機開発成果

表3.1.1.1に示すとおり、事業全体として、中間目標は達成する見込み。

表3.1.1.1 研究開発成果の目標達成度

研究開発項目	目標（中間目標）	成果	達成度
① 廃製品自動選別技術開発	廃製品(破壊・変形を伴わない)を、処理速度1秒/製品・個以内に非破壊で個体認識・資源価値を判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。	2019年度下期には、装置群システム・制御の要素技術(製品ソータ、自動解体装置、モジュールソータのベンチスケール機)が完成見込み	○
② 廃部品自動選別技術開発	廃製品を構成する主なモジュールから分散・複雑系廃部品を単体分離・選別する自動選別システムにおいて、各種選別産物の製錬原料化(製錬受入れ条件を満たす金属原料化)を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。	2019年度下期には、装置群システム・制御の要素技術(部品剥離装置、部品選別システムのベンチスケール機)が完成見込み	○
③ 高効率製錬技術開発	(1) 鑄型分離	2019年度下期には、隣り合った軽希土に対する分離係数3を達成し、重希土類元素に対する適用可能性も判明する見込み	○
	(2) 熔融塩分離	2019年度下期には、希土類純度80%以上で複数の希土類元素を同時回収できる見込み	○
	イオン半径が近接する希土類元素を対象に、相互分離係数3を有する分離試薬を開発する。		
	ラボスケールで、2種以上の希土類元素を(単体または鉄等との合金として)純度80%以上で各々同時に直接回収する技術を開発する。		

※◎ 大きく上回って達成、○達成見込み、△一部未達、×未達

3.1.2 研究開発項目ごとの成果

(1) 研究開発項目①「廃製品自動選別技術開発」

本研究開発項目では、現在、手作業が多用されている廃製品の資源価値別選別や解体を、自動化できる技術の開発を行う。小型デジタル家電製品を対象に、製品個体を非破壊、高速、高精度に自動認識するとともに、資源価値や構造特性などに応じた柔軟な選別を可能とする個別製品のソーティング技術(①-1「製品ソータの研究開発」)、製品構造を踏まえた筐体解体技術(①-2「自動解体装置の研究開発」)、解体混合物に含まれる部品モジュールのソーティング技術(①-3「モジュールソータの研究開発」)の開発を実施する(図3.1.2.1)。

基本計画における達成目標は以下の通りである。

(中間目標)破壊・変形を伴わない廃製品を、処理速度1秒/製品・個以内に非破壊で個体認識・資源価値を判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモ

ジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。

(最終目標) 廃製品(破壊・変形を伴うものを含む)を、処理速度0.5秒/製品・個以内に、非破壊で個体認識・資源価値判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールごとに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現するベンチスケールシステムを完成させる。

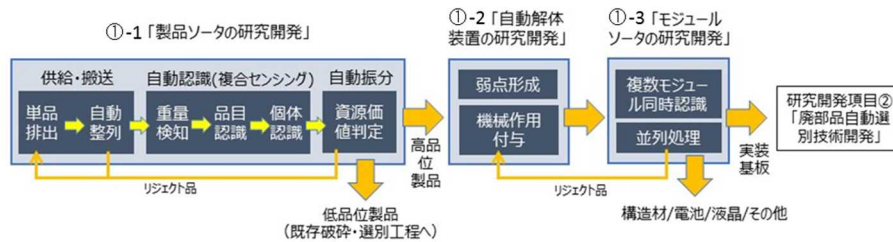


図 3.1.2.1 研究開発項目①における選別フローと研究項目

(1-1) 製品ソータの研究開発

(1-1-A) 複合センシングによる自動認識システム開発

■ 目標

製品ソータの自動認識工程では、製品の品目(種類)と個体(型式)の自動識別を可能とし、様々な製品形態と頻繁なモデル変動に対応可能な機械学習方式によるアルゴリズムを開発する。前期3年間に、破壊・変形のないスマートフォン、携帯電話(フィーチャーフォン)、デジタルカメラ(コンパクトタイプ)の各200機種以上を対象に、1秒/製品・個以内で自動認識が可能なアルゴリズムを開発する。品目認識正解率90%以上、個体認識正解率70%以上を目指す。

■ 研究開発の成果

a. 製品ソータ試験用モジュールの開発

先導研究で開発した試作機に改良を加えた「製品ソータ試験用モジュール」(図3.1.2.2)を製作して、2018年4月から本格運用を開始した。国内リサイクラーから提供を受けたスマートフォン、携帯電話、デジタルカメラの廃製品を対象(2018年度後半からビデオカメラを追加)とする各種識別アルゴリズムの開発を実施している。

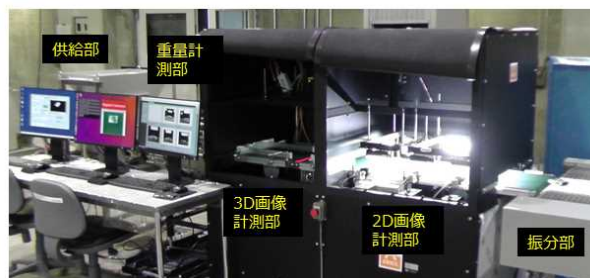


図 3.1.2.2 製品ソータ試験モジュール

b. 深層畳み込みニューラルネットワークによる品目及び個体認識

製品個々の特徴をより際立たせた加工画像データを作成後、深層畳み込みニューラルネットワークに入力する識別アルゴリズムを新たに開発した。表 3.1.2.1 に、新開発のアルゴリズムによる廃製品 3 品目 931 機種に対する品目認識(画像分類)の結果の例を示す。本表に示すように、CNN モデルに同数の画像データを学習させた場合、2D カラー画像を用いた場合でも正解率は 90%以上となるが、加工画像を学習した CNN の正解率は 98%となり、7 ポイント以上高い値を示すことを確認した。

表 3.1.2.1 深層畳み込みニューラルネットワークによる廃製品 3 品目の画像分類結果の例

<2Dカラー画像の場合>				<加工画像の場合>			
	識別回数	正解数	正解率(%)		識別回数	正解数	正解率(%)
スマートフォン	292	260	89.0	スマートフォン	292	282	96.6
携帯電話	882	778	88.2	携帯電話	882	866	98.2
デジタルカメラ	688	645	93.8	デジタルカメラ	688	673	97.8
計	1862	1683	90.4	計	1862	1821	97.8

(1-1-B) 製品データベース管理技術開発

■ 目標

製品ソータは「情報利用」に基づいており、製品データベース(DB)の構築とその運用に係る最適手法の検討は、製品選別の実効性を高める上で極めて重要である。本研究では、装置稼働 DB と資源価値評価 DB に大別した製品 DB を構築し、その効果的な管理方法を開発する。

■ 研究開発の成果

a. 製品 DB(装置稼働 DB)の構築

先導研究において、小型家電リサイクル現場からデジタルカメラ 190 機種(破壊・変形品 16 機種を含む)及びスマートフォン 128 機種(破壊・変形品 54 機種を含む)を収集して、メーカー名、製品名、型式、製造年、寸法、重量、写真(静止画像)等の基本情報を登録した製品 DB を試験的に構築した。本研究では、初年度に廃製品サンプル(スマートフォン 275 台 93 機種、携帯電話 530 台 372 機種、デジタルカメラ 355 台 205 機種)の貸与を受け DB 構築を開始した。型式が重複する機種を除いた DB 登録数は、2019 年 4 月時点で廃製品 4 品目 1016 機種(スマートフォン 200 機種、携帯電話 441 機種、デジタルカメラ 344 機種、ビデオカメラ 31 機種)となっている。

b. 資源価値評価 DB の構築

本項目では、品目別、製造年別、メーカー別に資源価値の大筋のトレンドを把握することで、元素データを取得しない製品個体についても資源価値を推定可能とすることを目指している。製品から手解体で取り出したプリント基板等に含まれる金属元素の種類と重量を分析、製品の資源価値を算出した。資源価値のデータに基づいて、デジタルカメラの特定メーカーの製品を抽出して過去のトレンドを検討した例を図 3.1.2.3 に示

す。デジタルカメラの資源価値は、一般的には 2000 年頃を頂点として漸減傾向を示すが、その程度にはメーカー間で差があり、2000 年頃からほぼ変化していないメーカーも存在することを確認した。

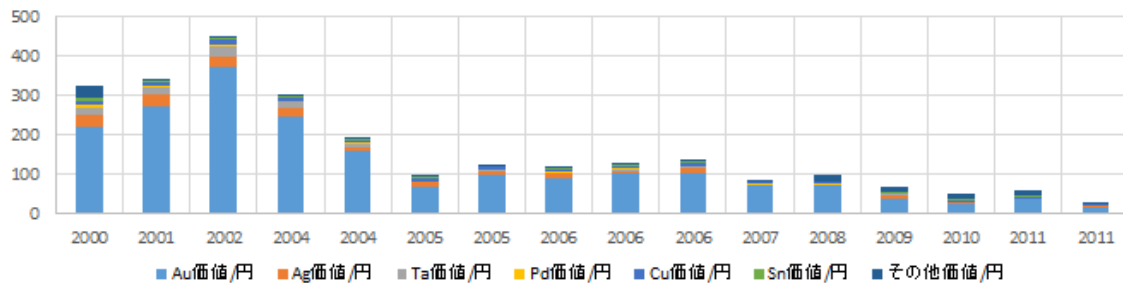


図 3.1.2.3 A 社デジタルカメラ製品の資源価値の変遷

(1-1-C) 供給・搬送システムの開発

■ 目標

製品ソータでは、製品個体ごとに重量及び画像データを計測して識別を行う「単品識別」を想定しており、廃製品をベルトコンベヤ上に一直線状に一定間隔で次々と供給するのが理想である。しかし、様々な寸法と形状を持つ廃製品の混合物に対して、高速かつ精緻な単品供給が可能な供給機は現状存在しないため、専用機を新たに設計する。

■ 研究開発の成果

本テーマでは、まず 3D スキャナで計測した廃製品 3D 形状のポリゴンデータを用いた DEM 解析システムを構築した。短時間で精密な 3D 計測が可能なパターン投影方式の 3D スキャナを導入し、スマートフォン、携帯電話、デジタルカメラについて 3D 形状を計測した。検討した設計手法は、フィーダの初期設計案および改善したい部分を入力すると、設計 (CAD データ) を自動的に変更しフィード性能を DEM 解析で評価し、その評価値を最適化アルゴリズムで判断しながら、寸法や形状を自動的に改善する方法である。振動フィーダを対象とし、振動フィーダにおける廃製品の運動挙動を DEM 解析で評価するとともに、DEM 解析結果は進化的計算と呼ばれる最適化技法のひとつである遺伝的アルゴリズムを用いた。計 296 ケースの DEM 解析を行い、評価結果が最良の 3 種類のトレイ形状を抽出した。いずれのトレイ形状もトレイが左右非対称となる結果となった。対称の場合、左右から均等な駆動力を受けるため、廃製品同士の接触構造がアーチを生じやすい。アーチは強固な構造であることから、一旦形成すると簡単には崩壊しない。一方、左右非対称形状の場合、接触力伝達を上手く逃がすことができ、その結果として、閉塞しづらくなったと考えている。

これまでに 3D スキャンで取得した廃製品の 3D 形状データを効率的にデータ削減し、DEM 解析に用いる方法を確立した。また、DEM 解析に基づく最適化設計解析手法を構築した。最適化設計解析により、廃製品の供給停止が生じにくい振動フィーダのトレイ形状を考案するとともに、そのトレイを試作した。

(1-2) 自動解体装置の研究開発

(1-2-A) 製品構造 DB の構築

■ 目標

スマートフォン及び携帯電話の構造は、強度を保つ筐体の内部に電子基板やバッテリーが包含されているのが一般的である。リサイクルのためには、金属を多く含む電子基板と、衝撃を加えると発火の恐れがあるバッテリーを、なるべく無傷で筐体から分離することが重要である。効率的な自動解体のためには、この様な個別製品の構造に応じた解体操作を行うことが必要である。そのための基礎情報として、廃製品の構造を調査して製品構造 DB を構築した。製品構造 DB の目標は、個々の製品の構造特性を明らかにして、最適な解体方法を決定することである。

■ 研究開発の成果

これまでにスマートフォン 100 機種、携帯電話 100 機種を手解体調査し、製品構造 DB を作成した。また、デジタルカメラ 26 機種及びビデオカメラ 20 機種についても手解体調査し、DB 構築の基礎検討を行った。調査対象は、実際にリサイクルプラントに集められた携帯電話廃製品の中から、メーカー及び発売年がバラつくように選出した。

解体過程を写真撮影・記録し、ネジの位置を明記することで、構造特性の事後検証を容易にした。なお、自動解体において重要となるバッテリーやネジ等の位置を明示して、自動解体に直接的に寄与する製品構造 DB を構築した。

(1-2-B) 筐体解体技術の開発

■ 目標

先導研究で見出した弱点形成—外力付与方式を具現化したベンチスケールの筐体解体機を開発することが目標である。具体的には、まずプロセスの鍵となる「弱点形成」に焦点を絞り、様々な機械的作用による弱点形成効果を検証して方式決定を行い、続いて決定方式を搭載した自動制御型の筐体破壊試験装置を開発することとした。

■ 研究開発の成果

a. 複合的外力付与試験装置

弱点形成のための様々な機械作用を検証するため、複合的外力付与試験装置を開発した 6 通りの弱点形成方式(プレス切断、ロール刃圧入、ブレード圧入、刃圧入、丸刃回転[縦]、丸刃回転[横])が検証できる。製品構造 DB の分析により明らかになった、筐体外縁とバッテリーまでの間隔に機械作用を限定するという制約条件で各方式による弱点形成を行い、ハンマーにより外力付与して解体を行った。解体状況を検証したところ、プレス切断方式が有効であることが明らかになった。

b. 筐体破壊試験装置の開発

複合的外力付与試験装置による実験結果を踏まえて、自動的かつ自律的にプレス切断により弱点形成するための筐体破壊試験装置を開発した。本装置では、速度重視の 2 辺切断モードと解体成功率重視の 4 辺切断モードを選択できる。2 辺切断モードでの

処理速度を1秒以内/製品・個として設計している。廃製品の個体情報を基に、プレス切断位置を自動制御可能である。また、廃製品の個体情報が得られない場合は、廃製品のサイズを計測して、製品構造DBの統計情報に基づいてプレス切断位置を決定することも可能である。筐体破壊試験装置に新規外力付与機構を合わせたものが、ベンチスケール機となる。図3.1.2.4に4辺切断+衝撃力による筐体破壊試験結果(スマートフォン)の例を示す。



図 3.1.2.4 筐体破壊試験結果の例

c. 既存破砕機による筐体破壊試験

現在開発中の「筐体破壊試験装置」は、個々の製品に対してプレス切断位置を判断して処理する逐次解体方式であるので、既存破砕機に比べて大量処理性能の点ではどうしても不利となる。そこで既存破砕機による一括破砕時に電池と基板を大きく破損させることなく、筐体破壊が可能な操作条件と既存改良機の開発に向けた改良要件について検討した。

携帯電話を対象として破砕試験を実施し、衝撃力、破砕時間、廃製品の投入量が電池や基板の破砕状態へ及ぼす影響を検討した。携帯電話を比較的弱い衝撃力でゆっくりと破砕することで、電池を大きく傷つけることなく、筐体から取り外すことが可能なことを確認した。また、このとき基板の多くが筐体と分離しないが、この「未解体物」を取り出して強い衝撃力で短時間破砕することで、殆どの基板を傷つけることなく取り外すことが可能であることを確認した。デジタルカメラについても、同様の考え方で二段破砕をすると、電池と基板の取り外しが可能であることを確認した。一方、スマートフォンについてはこうした現象は見られなかった。

(1-3) モジュールソータの研究開発

■目標

製品筐体解体後の混合物から電池、プリント基板、液晶、構造材などのモジュールを高速かつ高精度に選別する画像認識ソータを開発する。複数個の対象物の同時認識と並列処理が可能なシステムとし、自動認識アルゴリズムは製品ソータと同様に機械学習方式とする。供給機構は既存技術を活用し、振分機構は6ch制御の電磁式パドルと

ロボットアームによるピックアップを併用するシステムを新たに開発する。

■ 研究開発の成果

a. モジュールソータ基本システムの開発

2018年3月に自動整列機構開発のための試験装置(搬送供給モジュールA)を設置して検討を開始した。産総研開発の「ARENNA ソータ_3D(重量不使用タイプ)」に改良を加えた仕様であり、電磁式パドルとロボットアームを併用した振分機構の完成を目指して各種プログラム開発を進めている。

b. モジュール DB の構築

上述の既存破碎機による携帯電話破碎試料、デジカメ破碎試料を入手し、ふるい分けを行った後、手作業で「電池」、「プリント基板」、「未解体物」、「その他」の4種類に分別した試料について、3D特徴量、3D距離画像、2Dカラー画像を収集し、モジュールDBを構築した。

c. 並列処理システム開発

表 3.1.2.2 は、3層全結合型ニューラルネットワークにモジュールDBを学習させた3D画像認識による識別結果の例であり、「電池」と「電池以外」に2分類した際の識別正解率を示している。本表に示すように、90%以上の電池が「電池」として正しく識別され、全体としては約95%の識別正解率となることを確認した。

表 3.1.2.2 3D画像認識による携帯電話破碎物の識別結果の例

試料	試験回数	電池に識別(回)	電池以外に識別(回)	識別正解率(%)
電池	190	172	18	90.5
電池以外全て	463	14	449	97.0
計	653	186	467	95.1

(2) 研究開発項目②「廃部品自動選別技術開発」

製品や大型部品モジュールはソータによる個別選別が有効であるが、概ね 1cm 以下の粒子については選別精度と選別速度が著しく落ちるため、大量の細粒子を一括処理できるバルク選別が必要となる。特に、戦略金属の集積度が高いプリント基板等は、戦略金属含有率の異なる数 mm 以下の多種多様な素子に単体分離できれば、これらをそれぞれ製錬原料化することが可能である。これらに対応可能なバルク選別技術は、多岐に亘り、全ての回収産物を製錬受入条件に適合させるには、膨大な選別パターンを検証する必要がある。小型デジタル家電等は製品の組成変動サイクルが早く、経験制御ではこれを満足する機械選別が事実上不可能となっている。そこで本研究では、小型デジタル機器等のプリント基板を対象に、電子素子の剥離技術とこれに続くバルク選別システム(トランスフォーマブル選別システム：TF 選別システム)を開発する。さらに、本選別システムならびに製品選別を含めたプラント全体を一貫して、自動・自律制御可能な、ベンチスケールの総合選別システムを開発する(図 3.1.2.5)。

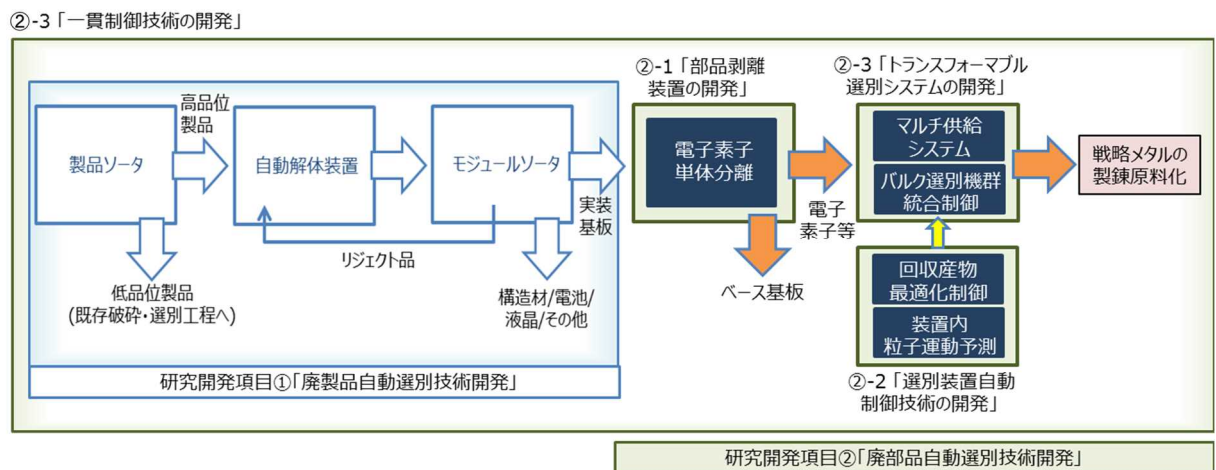


図 3.1.2.5 研究開発項目②における選別フローと研究項目

基本計画における達成目標は以下の通りである。

(中間目標) スマートフォンおよび携帯電話に対し、部品剥離装置のベンチスケール機を試作、また、電子素子に関する選別特性 DB を構築し、既に完成している気流選別機、弱磁力磁選機に加え、ドラム磁選機、渦電流選別機と振動スクリーン選別機のシミュレータを完成させる。さらに、マルチ供給機構を試作、製錬原料に資する選別目標、日本の資源リスクの構成要素や動静脈連携の交換検証した上、一連の自動制御による選別試験が可能な 5 連以上の TF 選別システムのベンチスケール機を開発する。

(最終目標) 廃製品を構成する主なモジュールから分散・複雑系廃部品を単体分離・選別するベンチスケール自動選別システムにおいて、廃部品(メモリ、コンデンサ等の各電子素子)を分離効率 80%以上で選別する基本性能の発現と、製錬原料化要件を満たす各種選別産物の回収を実現する。さらに、研究開発項目①及び②を連動させて一貫制御する、ベンチスケールシステムを完成させる。

(2-1) 部品剥離装置の開発

a. 基板構造 DB の構築

■ 目標

携帯電話等の電子基板は、樹脂製のボードに電子部品がハンダで表面実装されているものが一般的である。しかし、ボードのサイズ・形状・材質や、部品の結合方法・金属製カバーの有無などの構造は製品によって大きく異なる。効率的な部品剥離のためには、このような電子基板の構造特性に応じた剥離作用を付与することが必要である。そのための基礎情報として、電子基板の構造を調査して基板構造 DB を作成する。

■ 研究開発の成果

200 台（スマートフォン 100 台、フィーチャーフォン 100 台）の携帯電話を手解体調査し、基板構造 DB を作成した。調査項目は、基板の固定方法（フック・ネジ[種類・本数]・接着剤）、金属製カバーの有無、外寸（縦・横・電子部品含む厚み）、及びボードの厚み・概形として、手作業で調査・記録した。基板構造 DB 構築の目標である基板グループ作成は、次項の部品剥離技術の進展とともに進化していくものであるが、現在のところ iPhone スマホを中心としたグループと Android スマホ及びフィーチャーフォンを合わせたグループに大別される。

b. 基板剥離技術の構築

■ 目標

電子基板から部品を効果的に剥離するための部品剥離技術及び装置の開発が目標である。具体的には、数値解析（遺伝アルゴリズム[GA]と 2 次元個別要素法[2DEM]の連成解析）結果から効果的な部品剥離を実現する剥離手法を選定し、その後、決定方法を具現化した部品剥離試験装置を開発する。また、部品剥離状態を自動的かつ定量的に計測する方法（部品剥離状態評価法）を開発する。

■ 研究開発の成果

数値解析（遺伝アルゴリズム[GA]と 2 次元個別要素法[2DEM]の連成解析）結果から効果的な部品剥離を実現する破碎方法として、基板と部品の変形特性差を利用する方法（基板変形法）と部品にピンポイントのせん断を加える方法（部品せん断法）を候補とし、検証試験の結果から基板変形法を採用した。基板変形法を実現する装置としては、チェーン式破碎機であるクロスフローシュレッダ（CFS）が有効である。CFS は回転するチェーンにより物体に衝撃を加えるため、チェーンの太さや回転速度を最適化することにより過粉碎を防ぐことが可能なためである。しかし、CFS には、チェーン太さ等の様々な装置パラメータ（因子）があり、それぞれの因子の部品剥離に及ぼす影響は未解明であったため、9 つの因子について検証可能な基板剥離機構試験装置を開発した。その装置を用いて、実験計画法に基づき、実基板を用いた 270 ケースの実験を実施し、各因子の部品剥離に対する効果を解明した。

CFS のチェーンが部品剥離に効果的であることが分かったが、更なる改良の可能性を検討するため、3次元個別要素法(3DDEM)とGAの連成解析ソフトを開発した(図3.1.2.6)。

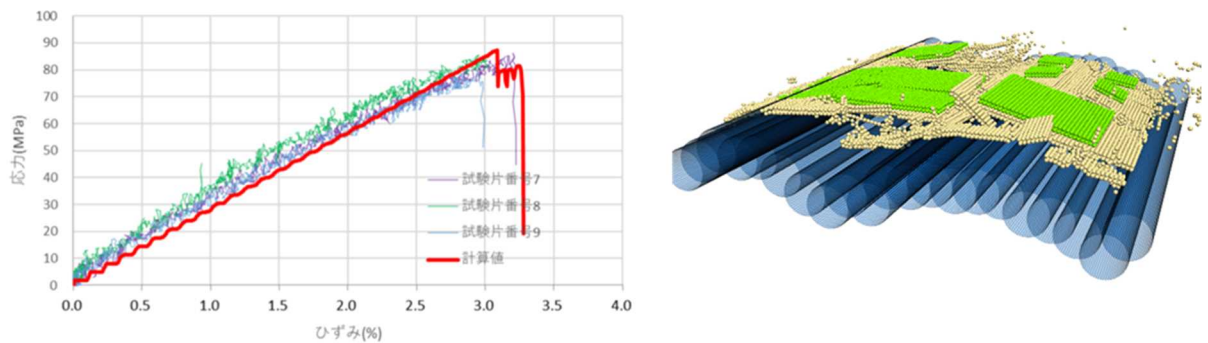


図 3.1.2.6 3DDEM解析(左)及び部品剥離解析(右)の例

また、部品剥離状態評価法の検討のため、X線撮影装置に独自開発アルゴリズムのソフトウェアを付与した部品剥離状態分析装置を開発し、部品剥離状態の定量評価を可能とした。

(2-2) 選別装置自動制御技術の開発

a. 電子素子基礎情報の選別物性への変換

■目標

製品組成の変動サイクルが早い小型デジタル家電等から製錬受入条件に適合する産物を回収するためには、必要となる選別機の種類、組み合わせや各選別機の運転条件など、膨大な選別パターンを速やかに検証する必要がある。これを実現するためには、数値計算により、多種多様な部品の物性情報から選別特性情報に変換する手法の開発が必要である。

■研究開発の成果

小型デジタル家電廃棄物(スマートフォン16台、携帯電話14台、デジカメ18台)を手解体し、取り出したプリント基板から電子素子・部品を剥離した上で、22種類に分類した(図3.1.2.7)。種類分けした部品・素子は全部で3万個に及ぶ。22種類に分類した部品・素子は、ふるい分けサイズごとに重量を測定し、製品中の部品・素子の含有率DBを構築した。

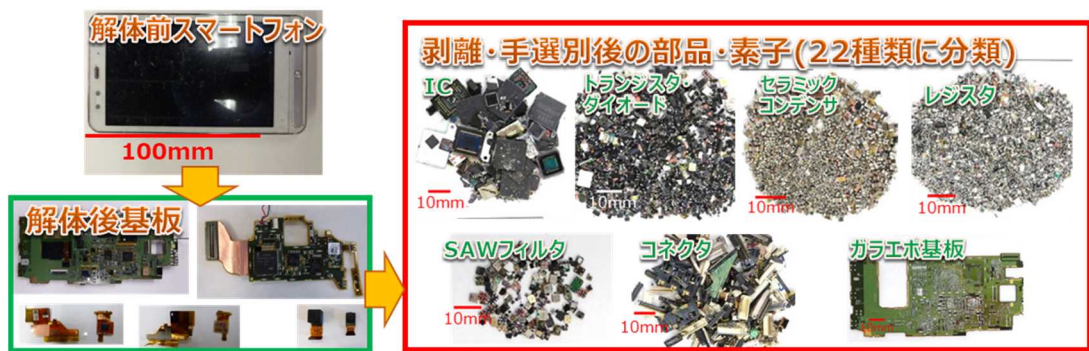


図 3.1.2.7 スマートフォンの電子素子調査の例

次に、回収した部品・素子の金属組成分析、比重分析を行い、サイズ情報を併せて部品・素子の基礎物性 DB を構築した。さらに、吊り下げ型磁選機における磁選特性データを取得し、選別特性 DB を構築した。選別特性 DB は、今後、気流型比重選別特性、ドラム型磁選特性、渦電流選別特性など順次拡充していき、基礎物性と選別特性の関係性を解析した上で、基礎物性データから選別特性データへ変換するシステムの概念を構築する。

b. 装置内運動予測システムの開発

■ 目標

従来の選別機は、ほぼ全て経験制御に基づいており、装置内の粒子運動を精度良く予測する理論が存在しないため、個別装置ですら結果予測や自動制御はできない。本研究では、バルク選別機群を網羅的に自動・自律運転するため、PTV 分析等、電子素子の選別挙動実現象と既存の運動理論、シミュレーション理論を比較、差異抽出し、補正するという作業を繰り返し行い、ドラム磁選機、渦電流選別機、振動スクリーン選別機、湿式比重選別機に関する高精度な粒子運動シミュレータを開発する。

■ 研究開発の成果

ドラム磁選機シミュレータは、ドラム磁選機周辺の磁束密度分布を得る磁界計算部と、静磁場中の試料の運動を予測する軌道計算部より構成される。開発したシミュレータにより、粒子運動を予測したところ、様々な磁性、サイズの IC・メモリ類について、誤差 6mm 程度で落下位置を予測可能となった。

渦電流シミュレータは、磁界計算部（/電磁場解析ソフトウェア：ELF/MAGIC）と試料の運動を記述するユーザスクリプト部、及び時々刻々と移り変わるそれらのデータを連結させて制御する統合制御スクリプト部から構成される。これまでにユーザスクリプトの枠組みと統合制御スクリプトを完成させ、変動磁界中の試料の運動を単事例において計算することを可能とした。

振動スクリーン選別機は、①スクリーン面の向きを保ちながら水平方向に公転運動を行いふるい分けするタイプ、②スクリーンが鉛直方向に細かく振動しながら振り子運動を行うタイプの 2 機種についてシミュレーションを行う。3D-CAD により、各種電

電子素子の形状を模擬した粒子を作成し、非球形粒子対応の離散要素法ソフトウェア（ESSS 社製、Rocky-DEM）を用いてシミュレーションモデルの構築を行った。

湿式比重選別機は、既存の微粒子選別機の中で高性能であり、かつ低コスト処理可能な高遠心型湿式比重選別機（Falcon/Knelson 選別機）に着目し、装置内粒子運動予測のため、高精度な混相流シミュレーションモデルを構築する。また、装置内に形成される複雑な水流とそれに伴う粒子運動を、精度良く観測するシステムを構築する。初めに、構造の簡単な Falcon タイプの容器内部流れのシミュレーションによって、①変形の大きな自由表面解析に適している粒子法と、②容器内部流れの解析に一般的に用いられる有限体積法の 2 つの手法の比較検討を行った。検討の結果、シミュレーション手法として有限体積法を採用した。今後、Knelson 選別機のシミュレーションを進める。

c. 回収産物の最適化条件

■ 目標

多くのレアメタルは製錬原料として受け入れる基準が事実上存在しておらず、各社の個別対応となっているため、全国的な回収の阻害要因となっている。本研究では、電子素子の組成から製錬原料化が達成可能な回収産物数（種類）を確定するとともに、具体的な回収産物組成の設定を行う。また、本研究開発技術を効果的に社会に普及させていくために、製品別の金属含有量に関するマテリアルフローデータの推計、日本の資源リスクの構成要素の抽出、導入が推定される動静脈情報連携の効果検証を実施する。

■ 研究開発の成果

電子素子から最大限回収可能な製錬原料化回収産物数と選別目標となる産物組成を確定するため、製錬原料としての評価（買取価格）に関する調査を実施した。調査結果、白金、パラジウムといった貴金属・銅を対象元素としており、レアメタルなどを含めたその他金属元素は、対象に通常含まれないことが分かった。今後、小型家電などの試験原料から選別された産物の実サンプルあるいはデータから製錬原料の評価を行い、製錬原料化回収産物数と産物組成を決定する。

資源リスク評価では、過去 50 年の約 450 件の供給障害事例を分析することにより、主要なリスク要因が自然災害、事故、ストライキ、資源価格下落、鉱業規制であることを明らかにした。金属回収ポテンシャル評価では、動的分析による MFA（マテリアルフロー分析）をネオジム等を対象に分析した結果、ネオジムが回収されるための要件として、資源価格が上昇し回収するインセンティブが働くとともに回収したのちの二次資源の市場が形成されるか、法整備等により回収が義務付けられるかの要件が抽出された。LCA の基礎データの収集では、既存のインベントリデータベース IDEA で不足している、鉱石の採掘から選鉱にかけてのプロセス情報を収集し、インベントリデータを作成した。特に銅、鉛、亜鉛、チタン、リチウムについて作成したデータを IDEA と接続することで、現行プロセスの金属生産に伴う環境影響の算定を可能とした。

開発システムの導入最適化では、まず、動静脈情報連携シナリオの検討に向けた情

報連携の現状を調査した上で、動静脈情報連携を実現させるための事業者の役割を示唆する「製造メーカーとリサイクラー間の連携」や「製造メーカー、小売業者、修理業者、リサイクラー間の連携」などのシナリオを調査し、そのシナリオの効果や実現に向けた条件を分析した。そして、各シナリオに登場する種類の事業者にインタビューを実施し、シナリオと分析結果の妥当性を検証した。また、多様な構成を持つリサイクルプロセスの導入効果を評価するための静脈プロセスシミュレータを構築した。このモデルは離散事象シミュレーションの原理に基づき、資源循環プロセスの動脈工程および静脈工程に関与する事業者間の製品や情報の流れを分析できる。今後、これまで調査した事業シナリオに合わせてデータを獲得し、モデルを作りこむことで、事業シナリオを実現するための条件分析や事業シナリオの効果検証を実施する。また、静脈プロセスシミュレータの要素として、小型家電製品を対象とした廃製品排出量推定モデルを構築した。

(2-3) トランスフォーマブル選別システムと一貫制御技術の開発

■目標

従来個別運転していた複数のバルク選別機を連動し、選別装置自動制御技術に基づいて製錬受入れ条件に設定した産物を自動回収する「トランスフォーマブル選別システム」を開発する。これまで、複数選別機の組み合わせによる選別システムでは、対象物毎に固定したシステムを組み、固定した運転条件で選別するのが通常であり、対象物の変動に伴い、実験や経験則に基づいて選別条件を変化させることはできるが、新たな対象物に対しては別の選別システムを新規導入する必要がある。開発するシステムは、各種廃製品中の部品選別に利用が想定される選別機(4機～8機)を予め網羅的に配置し、投入物に応じて前述の選別装置自動制御システムが計算する最適プロセスに従って、順次自動的に試料(部品群)を選別機に搬送、最適条件で選別するシステムである。このシステムの実現には、複数の選別機間を自在に試料搬送するコンパクトなシステム(以下、「マルチ供給制御システム」という。)の開発が必要不可欠である。

■研究開発の成果

トランスフォーマブル選別システム、およびマルチ供給制御システムの概要を図3.2.1.8に示す。マルチ供給制御システムについて、4～8機の選別機間を自在に搬送・供給するコンパクトな搬送システムを構築する上で、選別機間の接続がシンプル、かつ設置位置の変更に対しても柔軟な対応がとれる搬送方法として気流搬送方式を採用した。気流搬送による電子素子の搬送基礎試験を実施した後、2選別機間の相互搬送試験機を開発した。試験の結果、半径4mの円周内に配置した選別機間を最大2t/hの処理量で試料搬送可能であり、製品ソータ、製品解体装置、部品剥離装置とトランスフォーマブル選別システムを統合した廃製品～廃部品自動選別技術の一貫統合システムを見据えた場合でも十分な搬送能力を有するとの結果を得た。

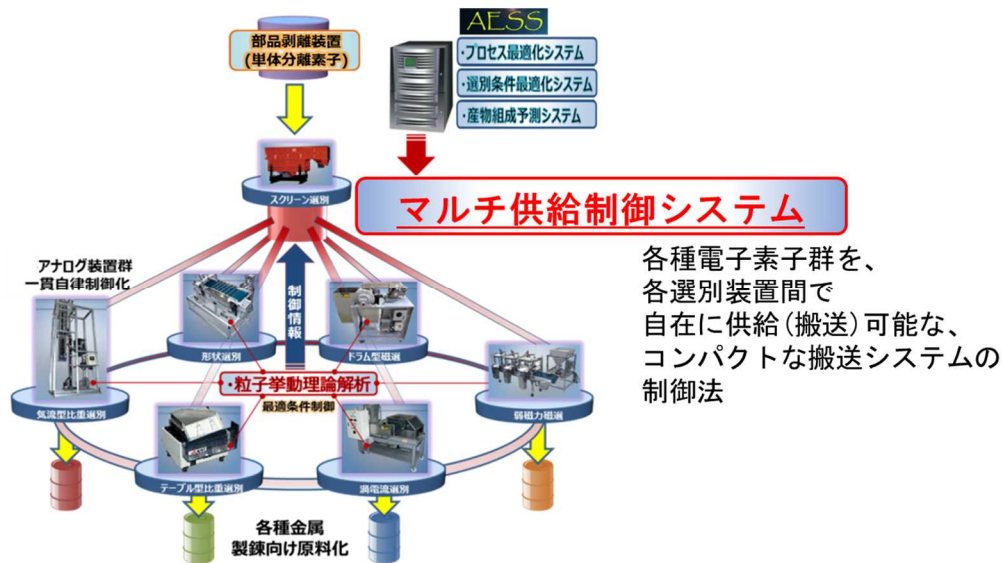


図 3.1.2.8 トランスフォーダブル選別システム及びマルチ供給制御システムの概要

(3) 研究開発項目③「高効率製錬技術開発」

本テーマは高効率製錬に関する技術であり、廃製品からの国内リサイクルが極めて困難な代表的な金属である、希土類元素を対象としている。希土類元素は化学的性質が極めて類似しており、現状の技術では国内にてリサイクルにおける製錬工程を行うことはコスト的にも不可能である。そこで本研究開発項目では、分離性能の大幅な向上によりコスト的な問題をクリアするために、ほぼすべての廃磁石製品をカバーできる2つの革新的な技術（(1) 鑄型分離技術を利用した希土類元素の高精密金属イオンサイズ認識分離及び(2) 熔融塩を利用した濃縮系少量材料のリサイクル技術）の理論構築と応用可能性の検証を行った。鑄型分離技術では多種類の希土類元素が低濃度で含まれ且つ希土類間の高度相互分離が必要になる材料を、熔融塩利用技術では二種類の希土類元素が濃縮された材料を主な対象とする。

(3-1) 鑄型分離技術を利用した希土類元素の高精密金属イオンサイズ認識分離

■ 目標

本研究では、金属イオン分離の分野では前例の無い、目的物質の「形状」を「鍵と鍵穴」の関係のように識別して相互作用する分子鑄型の概念に着目し、化学的性質が極めて類似した希土類イオンに対し高い相互分離係数を発揮する「鑄型分離技術（図 3.1.2.9）」のメカニズム解明と応用特性評価を行う。メカニズム解明に関しては、鑄型錯体形

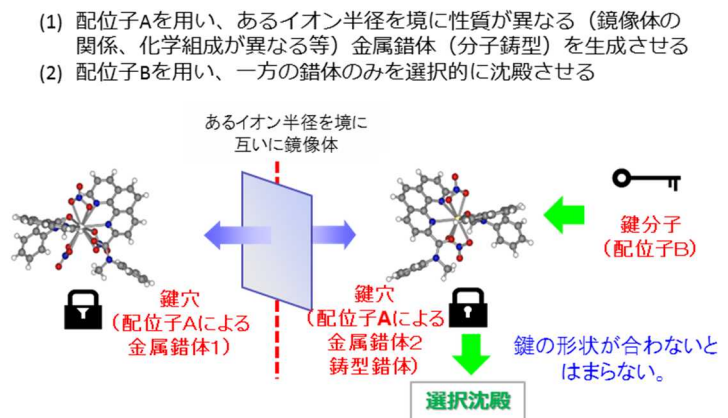


図 3.1.2.9 鑄型分離技術の概要

成・鍵分子相互作用、分離可能境界元素の制御、分離に用いる化合物の合成及び最適な合成ルートの探索等を進めることで、境界制御に向けた分子設計法を確立する。さらに、実用化への指針となる、周期表上で互いに隣り合う軽希土類元素である Pr と Nd の分離係数について、3 を有する分離法の開発を前半 3 年間の目標とする。その応用特性に関しては、工業用分離操作法である溶媒抽出及び吸着分離における、鑄型分離技術の適用可能性についての評価を行う。また、平成 30 年度より、重希土類元素に対する相互分離の検討がテーマに加わった。

■研究開発の成果

(3-1-A) 鑄型分離メカニズムの解明

希土類イオンは、いずれも 3 価が安定であり、イオンサイズの差も極めて小さいことから、化学的性質が非常に良く似ており、イオン間の相互分離は非常に困難である。現在工業的に広く用いられている相互分離法である溶媒抽出法は、希土類イオンの相互分離係数が極めて小さく、複雑な分離工程、分離設備の大規模化、有機溶剤の大量使用等の問題から、国内操業が困難な状況である。よって、大幅なコストダウンが可能な革新的技術が必要である。

我々は 2016 年度の NEDO 先導研究において、希土類相互分離への鑄型分離技術の有効性を明らかにした。具体的には、*N*-methyl-*N*-phenyl-1,10-phenanthroline-2-carboxamide (MePhPTA) が Nd と Sm を境にして異なる 2 種類の錯体を形成し、さらにその錯体構造を鑄型として認識する鍵分子として光学活性を示すアミン系化合物を添加することで、Nd を選択的に回収することに成功した。一回の分離操作で得られるネオジムの純度は 85%程度、回収率は 50%以上であり、従来の溶媒抽出法（一回の分離で得られるネオジムの純度は 55%程度）と比較すると極めて優れている。この革新的新規技術を実用化に移行させるには、さらなる分離効率の向上及び相互分離可能な希土類イオンの多様化が必要となる。前者には、鑄型錯体形成や鍵分子による相互作用のメカニズムを明らかにすることで、配位子 A と配位子 B（鍵分子）の構造や分離条件の最適化が要求される。後者には、配位子 A による鑄型錯体の性質が異なる境界を任意に移動可能なことが必要である。そこで本事業では、①鑄型錯体形成や鍵分子による相互作用のメカニズム解析及び②鑄型錯体形成の境界元素の制御方法の構築を進めることで、鑄型分離における基本的な分子設計法の確立を行う。後半 3 年間のプロジェクトでは、この設計理念を基に、実用の分離剤への改良を進める計画である。

a. 鑄型錯体形成および鍵分子による相互作用のメカニズム解析

先導研究より光学活性アミンを添加した場合は Sm 錯体を選択的に沈殿するが、その光学異性体を用いると、沈殿物は析出するものの、Nd/Sm 間の選択性は示さないことが分かった。よって、単結晶錯体における鍵穴となる鑄型錯体の配位空間の詳細な解析と理論計算により、鍵と鍵穴の相互作用に関するメカニズム解析を行った。

希土類イオンと MePhPTA が形成する錯体の単結晶 X 線構造解析の結果より、その錯体構造は Nd/Sm 間で変化することが明らかとなっている。Nd 以前と Sm 以降の錯体で

は、配位した2分子の MePhPTA が形作るコンフォメーションが鏡像体に似た関係となる。鍵分子が相互作用できる空間の形状も同様の関係となっている。そのため、特定の光学活性を有するアミン化合物が Sm 錯体と選択的に作用し、沈殿物を生成したものと推測される。そこで、Sm-MePhPTA 錯体に上記の光学活性アミンが作用した錯体の構造を、密度汎関数法による理論計算によって検討した。計算により得られた Sm-MePhPTA 錯体と光学活性アミンの複合体の最適構造において特筆すべき点は、光学活性アミンは Sm に直接配位せず、つまり Sm-MePhPTA 錯体の構造にはほとんど変化がなく、Sm-MePhPTA 錯体の近傍に存在していることである。この結果は、光学活性アミンは、Sm-MePhPTA 錯体の硝酸イオン、フェナントロリン骨格及びフェニル基に挟まれた空間を鍵穴として相互作用していることを示している。

分離係数の向上に繋がる条件最適化には、反応過程でのメカニズムを追跡する必要がある。そのために、鑄型錯体形成や鍵分子による沈殿分離の反応過程における錯体構造の微細な変化をその場観察するためのシステムを構築した。このシステムは、放射光 X 線を単色化するための分光結晶を高速で連続的にスキャンすることで時分割 XAFS スペクトルの取得を可能とする新型の分光器と、XAFS 測定中の溶液試料に対し、組成が異なる複数の溶液を実験ハッチ外から遠隔操作で素早く添加することで、溶液内での化学反応開始を制御可能にする、その場観察反応 (*in situ*) セルで構成される。本事業ではこのシステムを SPring-8 の BL22XU に整備した。このシステムを用いて希土類イオンを含む溶液に PTA 及び鍵分子を含む溶液を逐次添加しながら XAFS 測定を実施することで、鑄型錯体形成および鍵分子による沈殿析出の反応過程における希土類イオン近傍の局所構造変化を観測することに成功した。

b. 鑄型錯体形成の境界制御

Nd~Sm に錯生成度定数の最大値を示す MePhPTA の性質は特異的なものであり、境界制御にはこの特徴を明確にする必要がある。そこで原子番号の増大につれて錯形成能が右肩上がりになるという典型的なパターンを示すフェナントロリン (Phen) と MePhPTA の単結晶錯体の構造パラメータを比較した。その結果から、アミド基及びフェナントロリン基の存在及びそのドナー原子の配置が、PTA の特異的な錯生成度定数パターンの要因であることが分かった。

以上より、PTA の基本骨格は変更せずに、フェナントロリン部位の伸縮範囲の制御により、錯体構造変化の境界を移動できることが示唆された。実際に MePhPTA のフェニル基の代わりに電子供与性が大きいトリル基を導入した MeToIPTA が Pr/Nd 間で錯生成度定数の変化を示すことが分かっている。そこで MeToIPTA の他に、種々の官能基を導入した PTA 誘導体の合成法について検討を行った。1, 10-phenanthroline-2-carboxylic acid と第2級アミンとの反応によりアミド化合物を得る反応過程において、適切な脱水縮合剤を選択することで、アミド窒素上の官能基を変化させた様々な PTA 誘導体を合成できることを明らかにし、図 3.1.2.10 にある種々の PTA 誘導体の合成に成功した。また、最適な縮合剤を選択することで、この反応過程におけるの合成収率を従来法の約 40% から 100% 近くへと大きく向上させることに成功した。今後はこれらの配位子を用い、上記の境界制御に関する理論の検証を行う計画である。

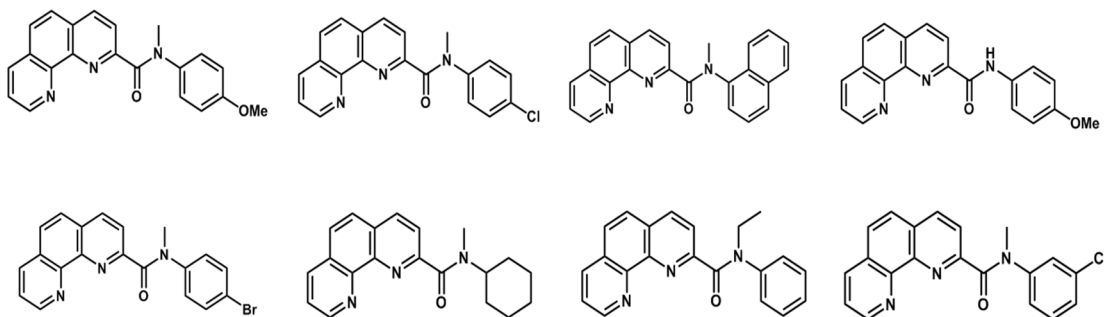


図 3.1.2.10 合成に成功している PTA 誘導体

また、MeToIPTA に鍵分子として別の光学活性アミンを添加した場合に Pr 錯体を高選択的に沈殿させることに成功した。分離操作時の物質の濃度条件等の検討で Pr/Nd 間の相互分離係数 2.75 を得ている。分離条件の最適化により分離係数をさらに向上させることが可能であることから、今年度中に目標である相互分離係数 3 を有する分離法の開発を達成できる見込みである。

c. 重希土類元素間の相互分離

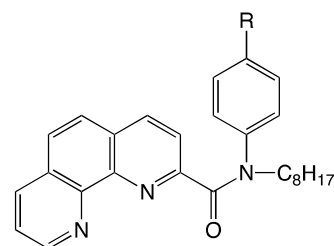
ヘテロドナー配位子を中心にその錯形成特性を調査した結果、(1*H*-benzimidazol-2-yl)pyridine-6-carboxamide (BIZA) が Tb や Dy などの重希土類元素の分離に有望であることが明らかとなった。今後、BIZA の鑄型分離特性を調べる計画である。

(3-1-B) 鑄型分離技術の従来型分離法への展開

鑄型分離技術のコンセプトを実用化するには、従来型分離操作法への適用の検討がその近道になり得る。そこで代表的な希土類元素の分離操作法である溶媒抽出法と吸着分離法における、鑄型分離技術による希土類イオンの挙動を調べた。金属イオン濃度が 1 g/L 以上では前者が、それ未満では後者が一般的に用いられることから、両者の技術を確立することで、ほぼすべての希土類イオン濃度の溶液をカバーできるようになる。また、配位子には上記の PTA 系化合物に加え、比較として多座配位系化合物を使用した。

a. 溶媒抽出法による基本性能評価

溶媒抽出試験に用いた PTA 型抽出試薬の分子構造を図 3.1.2.11 に示す。これら 2 つの PTA 型抽出試薬にアミン系化合物を添加した協同系では、希土類イオンに対する選択性が大きく変化することが実証できた。この結果は鑄型分離のコンセプトが溶媒抽出法においても効果的であることを示しており、後半 3 年間のプロジェクトにおいては、条件最適化等をさらに進める計画である。



R : H (OctPhPTA)
CH₃ (OctTolPTA)

図 3.1.2.11 溶媒抽出試験に用いた PTA 化合物の構造

b. 吸着分離法による基本性能評価

本事業では PTA 系配位子に加え、多座配位子としてジグリコールアミド酸 (DGAA) にも着目した。配位子の固定化に関しては実用を想定し、繰り返しの利用が期待できる化学的な固定化方法を検討した。配位子を固定化する担体には汎用性を考慮し、クロマト分離用担体として多く用いられるシリカゲルを選定した。DGAA 型吸着剤ではジグリコール酸無水物を側鎖の異なる 5 種のアミノシリカゲルとそれぞれ反応させることで、PTA 型吸着剤ではフェナントロリン誘導体を同じく側鎖の異なる 5 種のアミノシリカゲルとそれぞれ反応させることで、それぞれ目的の吸着剤を得た。

DGAA 型吸着剤による Pr, Nd, Sm 混合水溶液からの希土類元素吸着試験を行ったところ、隣接する希土類元素である Nd と Pr に対し非常に分離性能が高いことが明らかとなった。PTA 型吸着剤では、特異的な吸着プロファイルが確認され、さらに、別の化合物 (配位子 B) の添加で希土類元素の吸着率が変化することが明らかとなった。この結果より、吸着分離法への鋳型分離技術展開の可能性が高いことが示された。

(3-2) 溶融塩を利用した濃縮系少量材料のリサイクル技術 (濃縮金属部品製錬技術)

■目標

希土類磁石中には Nd や Dy といった希土類元素が一定程度濃縮しているが、これらの希土類元素を既存プロセスにより金属として回収する場合、現状では酸溶解、湿式処理による希土類元素と他の元素群との分離、溶媒抽出による希土類元素の相互分離、溶融塩電解による金属回収といった多段工程が必要であり、市中から回収した廃棄物を対象とした場合、経済合理性の獲得は困難である。ここでは、希土類磁石からの希土類元素の分離・回収を単一工程で行うとともに大幅な低コスト化が期待できるプロセスとして、溶融塩と合金隔膜を利用した希土類元素の直接回収技術を開発する (図 3.1.2.12)。ここで、廃磁石中に含まれる Nd や Dy は廃磁石を陽分極することで浴中に選択的に溶出し、Nd, Dy それぞれに対して選択透過性を有する合金隔膜を透過し、陰極で金属単体または鉄等との合金として回収される。この技術の核は希土類イオンの選択透過性を発現する合金隔膜であり、その動作原理を、Dy を例に図 3.1.2.13 に模式的に示す。まず、①合金隔膜の陽極室 (磁石から希土類イオンを溶出させる部屋) 側表面において、Dy イオンを還元して合金として隔膜内に取り込む。②合金化した Dy 原子は合金隔膜内を拡散し、③陰極室 (希土類単体や合金を回収する部屋) 側表面にて酸化・溶出させる。この際、①合金形成過程、③合金からの溶出過程、の何れも電気化学反応であり、反応する希土類元素の種類や反応速度を比較的容易に制御できる。また、合金内の拡散速度は一般的な熱拡散に比較して 2 桁ほど高いことが従来研究で確認されているうえ、電解条件で制御可能な事も判明している。すなわち、①合金形成、②合金内拡散、③合金からの溶出、のそれぞれの過程で選択性を持たせることが可能であり、これらの制御により高精度な分離が期待される。

もう一点重要なことは、上記の合金隔膜を用いた分離技術の元となる、金属または

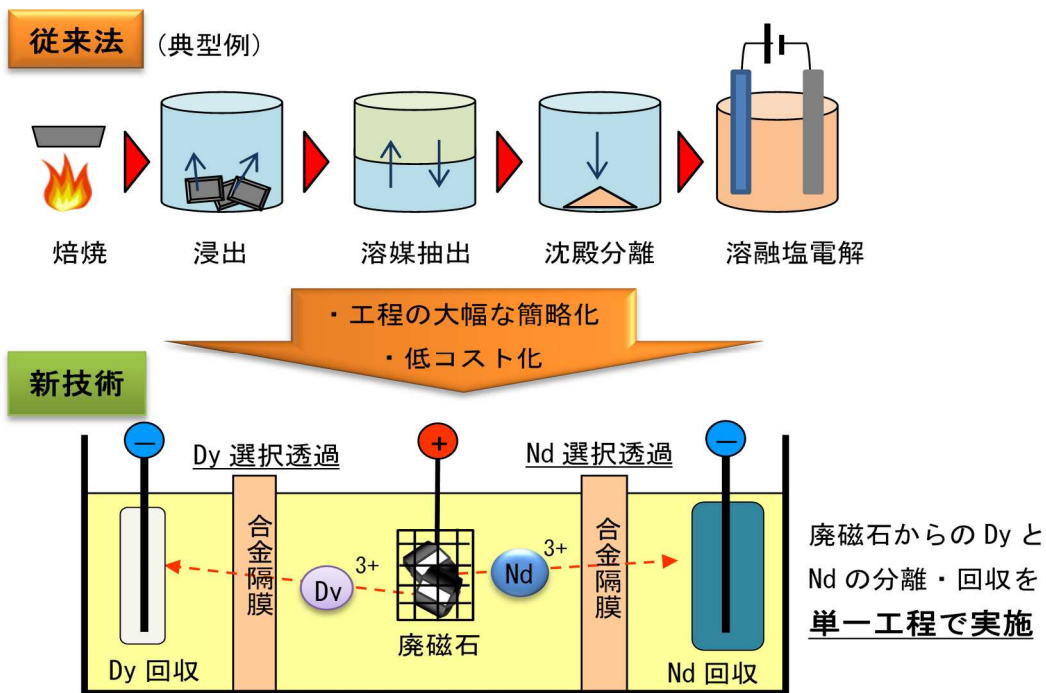


図 3.1.2.12 従来技術と新技術の比較

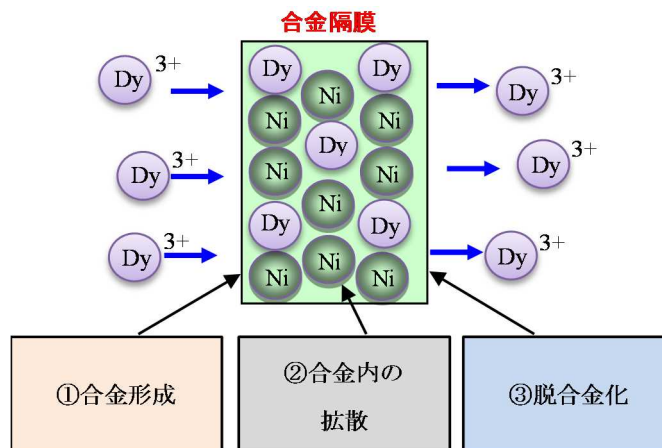


図 3.1.2.13 合金隔膜を用いた希土類イオン選択透過の原理図

合金上での高速な合金形成/拡散/脱合金化といった現象が、白金をはじめとした種々の元素でも報告されている点である。すなわち、この技術が確立されれば、他の金属が濃縮した製錬材料にも適用できる可能性があり、リサイクル可能な金属種の将来的な拡張にも期待できる。このように、本プロセスは濃縮系製錬材料のリサイクル技術として有望であり、これを実用化できれば大きな技術革新に繋がる。これまでに原理実証および基礎的知見の集積もある程度進んでいることから、本プロジェクトではこれを実用化段階まで引き上げるための主要な課題として＜合金隔膜の長寿命化技術開発＞、＜分離性の向上＞、＜複数の合金隔膜制御および連続運転に向けた技術開発＞を挙げ、以下の目標を設定した。

(中間目標)

ラボスケールで、2種以上の希土類元素を(単体または鉄等との合金として)純度80%以上で各々同時に直接回収する技術を開発する。

(最終目標)

2種以上の希土類元素を(単体または鉄等との合金として)純度80%以上で各々同時に連続的に直接回収する技術を開発するとともに、プロセス適用時のコストを1/2以下(従来比)にする見通しを立てる。

■研究開発の成果

(3-2-A)合金隔膜の長寿命化

過去の研究から、Niを母材とした希土類合金が選択透過性や拡散速度に優れていることが分かっており、本プロセス用の合金隔膜材料としても最有力である。しかし、このNi-希土類合金は非常に脆い物質であるため、これを改善しなければ工業的な利用は困難である。この課題克服のために、市販合金の利用、およびオーダーメイドの隔膜作製という2つのアプローチを試みた。

市販合金には、上述のように高い選択透過性が確認されているNiをベースとし、希土類元素と合金を形成しないCr、Mo等を含むもの、具体的にはハステロイ、インコネル等を用い、各溶融塩系において希土類元素との合金形成を行った。用いた素材の組成を表3.1.2.3に示す。

表 3.1.2.3 各素材の組成 (mass%)

	Ni	Cr	Mo	Fe	W
ニッケル	100	-	-	-	-
ハステロイ C-276	57	16	17	4-7	3-4.5
ハステロイ B-22	Bal.	0.7	28.2	1.7	-
インコネル 600	72	14-17	-	6-10	-
ニクロム	>77	19-21	-	-	-

中温塩化物系溶融塩 (LiCl-KCl : 450~600°C)、フッ化物系溶融塩 (LiF-CaF₂ : 850°C) で上記市販合金を Dy と合金化させたところ、DyNi₂ 相の形成を確認した。また、得られた試料の断面を SEM 等で観察したところ、各溶融塩系で特徴的な構造が確認された。さらに、電解条件によって得られる構造も変化することが分かった。高温塩化物系溶融塩 (CaCl₂ : 850°C) でも同様に Dy との合金化を試みたが、合金形成速度は他の系と比べて著しく低かった。過去の研究で、Ni-希土類合金の形成に Li イオンが深く関与することが示唆されており、今回得られた結果もそれを支持している。

オーダーメイドの隔膜材料は、Ni をベース、Mo を構造材として選択した。具体

的には、均一系の Ni-Mo (25at%) 合金薄片をストリップキャスト法にて作製するとともに、Ni 薄と Mo メッシュとの複合材を熱間圧延により試作した。また、将来的にはあらかじめ希土類と合金化させた隔膜の作製が必要になることから、バルク状あるいは薄片状の DyNi₂ も作製した。ストリップキャスト法では、0.1 mm オーダーの厚さの薄片作製に成功した。また、圧延加工により、Ni 板/Mo メッシュからなる複合材を作製した。これらを Dy などの希土類元素と合金化させると、希土類のパスとなる Ni-RE 合金と、構造材として有用な Mo 部分とが混在した理想的な合金隔膜ができると期待される。続いて、得られた Ni-Mo (25at%) 合金薄片、Ni 板/Mo メッシュ複合材を用い、DyCl₃ を添加した中温塩化物系溶融塩中 (LiCl-KCl : 450°C) で試料全体を Dy と合金化させた。Ni 板/Mo メッシュ複合材の場合、板全体が Dy と合金化していたが、部分的に DyNi 相が形成し、クラックが生じていた。合金化に伴う体積膨張が原因と考えられる。一方、Ni-Mo (25at%) の試料はただら模様になっており、Dy リッチな相と Ni-Mo が主体の相とに分離していた。

最後に、ここまでで得られた各試料の耐久性を剪断強度測定により評価した。従来の Ni 板を Dy と全合金化させた試料に比較すると、いずれの試料も高い値を示した。ただ、Ni/Mo メッシュ複合材では相対的に低い値に留まった。先述のように DyNi 相形成やクラックの影響も考えられるが、Mo メッシュが内部にありピッチも大きいことから、これに負荷がかかる前に Dy-Ni 合金部分が破損したと推測される。一方、Ni-Mo (25at%) 合金、ハステロイ C-276 を用いた場合は元の Ni に比較して 5 倍以上の剪断強度を示した。これにより、合金隔膜の耐久性を大幅に改善することに成功した。

(3-2-B) 分離性の向上

概念図 (図 3.1.2.12) に示したように、本プロセスでは Nd および Dy の分離・回収を単一工程で行うことを目指しているため、Nd/Dy の分離性 (希土類元素の相互分離性) が重要である。そこで、より実践的な分離性の目標値を設定するとともに、経済合理性を判断する基礎データとして、市中の廃希土類磁石を収集してその成分を詳細に分析した。収集した試料は、HDD 用、エアコン用、モーター用に区分けして成分分析を行った。これらの中では、高価な Dy を多く含むエアコンやモーターが有望な対象物と考えられる。ただ、表には示していないが個体差も大きいことから組成変化に柔軟に対応できるプロセスが必須である。また、不純物のうち電解で分離不可な元素は特に無いが、電解で悪影響を与える酸素値に注意が必要と判断した。

本プロセスの分離性の向上、および現状での分離性評価も並行して検討した。高温塩化物系溶融塩 (CaCl₂ : 850°C) およびフッ化物系溶融塩 (CaF₂-LiF : 850°C) で Dy/Nd の分離性を検討したところ、適切な電位に保つことで Dy の選択的な合金化が可能であることを確認した。さらに、実際に希土類元素を透過させて分離性を直接評価する実験を中温塩化物系溶融塩 (LiCl-KCl : 450°C) で行った。実験に用い

た電解セルを図 3.1.2.14 に模式的に示す。合金隔膜により部屋を分画しているが、合金化した隔膜を挟むと容易に破損するため、ここでは Ni 箔を出発材料としてセットし、電解により希土類元素と合金化させた。一方の浴(メルト A)に NdCl_3 、 DyCl_3 を 0.5 mol% ずつ添加し、隔膜を陰分極することで合金を形成した。合金形成がある程度進行した段階で合金隔膜と希土類塩を添加していない浴(メルト B)中の陰極との間に電流を流し、合金隔膜から希土類イオンを溶出させた。所定の時間通電したのち、陰極上の析出物とメルト B の一部を回収し、メルト A から B に移動した希土類元素量を ICP-AES により評価した。メルト B 中に移動してきた希土類元素の物質量を、合金隔膜とメルト B 中の陰極との間の通電量に対してプロットしたものを図 3.1.2.15 に示す。

通電量の増加に従い、メルト B 中の Nd および Dy の物質量も増加した。この際、Dy の透過量は Nd の約 7 倍であり、Dy の選択透過が可能であることを実証した。これは、合金隔膜を用いた電解により希土類元素を相互分離した世界初の成果である。この値を、回収される Dy 純度に単純換算すると 88at% となる。また、実際の陰極上の析出物の分析値でも 83~93at% (基板の Ni を除く) であり、中間目標を既に達成している。同様に、Nd を選択的に透過させる条件での実験も実施しており、Nd/Dy 比で約 3、純度に換算して 75at% である。今後、電解条件を最適化していくことで中間目標は容易に達成できる見通しである。

(3-2-C) 複数の合金隔膜制御および連続電解に向けた技術開発

これまでは単一の合金隔膜を用いてきたが、Nd と Dy を同時回収するためには、原理図に示すように複数の隔膜を同時制御する必要がある。そこで、合金隔膜 2 枚をセ

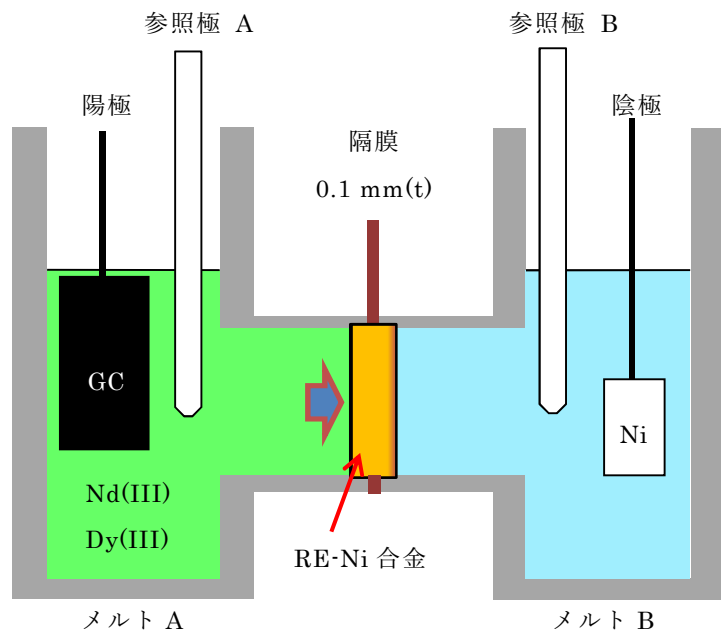


図 3.1.2.14 電解セル模式図

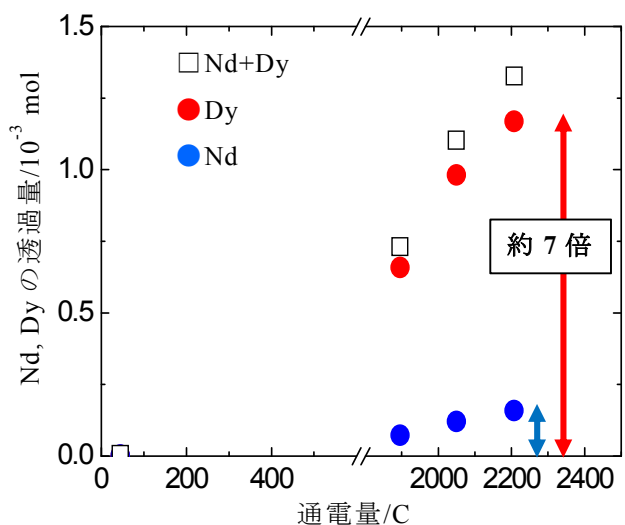


図 3.1.2.15 通電量と透過した Nd, Dy の物質量の関係

ットして透過試験を行うための三連の電解セルを試作した。現時点で公開できるデータは得られていないが、液漏れも無く、合金形成や各種電気化学測定もこれまでの電解セルと同様に実施できることを確認した。

3.1.3 中間目標達成状況

(1) 目標及び達成度(未達成事項とその対策)

研究項目①②③の中間目標に対する達成見込みを表3.1.3.1に示す。

表3.1.3.1 研究開発項目①②③の目標と達成度

研究項目	中間目標	中間目標達成見込		
①「廃製品自動選別技術開発」				
(1)製品ソータの研究開発				
自動認識アルゴリズム開発	<p>廃製品(破壊・変形を伴わない)を、処理速度1秒/製品・個以内に非破壊で個体認識・資源価値を判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現するため、装置群システム・制御の要素技術(製品ソータ、自動解体装置、モジュールソータのベンチスケール機)を完成させる。</p>	○		
システム統合技術開発				
装置稼働DB				
資源価値評価DB				
部品実装プリント基板の資源価値判定技術				
単品排出機構				
自動整列機構				
(2)自動解体装置の研究開発				
製品構造DBの構築				
筐体解体技術の開発				
(3)モジュールソータの研究開発				
モジュールDBの構築				
並列処理システム開発				
②「廃部品自動選別技術開発」				
(1)部品剥離装置の開発				
基板構造DBの構築	<p>スマートフォン及び携帯電話に対し、部品剥離装置のベンチスケール機を試作、また、電子素子に関する選別特性DBを構築し、既に完成している気流選別機、弱磁力磁選機に加え、ドラム磁選機、渦電流選別機と振動スクリーン選別機のシミュレータを完成させる。さらに、マル子供給機構を試作、製錬原料に資する選別目標、日本の資源リスクの構成要素や動静脈連携の効果検証した上、一連の自動制御による選別試験が可能な5連以上のTF選別システムのベンチスケール機を開発する。</p>	○		
部品剥離技術の構築				
(2)選別装置自動制御技術の開発				
電子素子基礎情報の選別物性への変換				
装置内粒子運動予測システムの開発				
回収産物の最適化条件				
(3)トランスフォーマブル選別システムと一貫制御技術の開発				
トランスフォーマブル選別システムの開発				
③「高効率製錬技術開発」				
③-1 鋳型分離技術を利用した希土類元素の高精密金属イオンサイズ認識分離				
鋳型分離メカニズムの解明及び分離試薬設計法の構築	<p>イオン半径が近接する軽希土類元素を対象に、相互分離係数3を有する分離試薬を開発するとともに、重希土類元素に対する適用可能性を検証する。</p>	○		
鋳型分離技術の従来型分離法への展開及びプロセス評価				
③-2 溶融塩を利用した濃縮系少量材料のリサイクル技術(濃縮金属部品製錬技術)				
合金隔膜の長寿命化技術開発	<p>合金隔膜の長寿命化技術開発における試験装置導入に向けた試験および装置設計を実施、回収する希土類の純度80%以上を達成するとともに、複数元素の同時回収を実現する。</p>	○		
分離性の向上				
複数の合金隔膜制御および連続電解に向けた技術展開				

順調に研究開発が進められており、2019年度末には、全研究項目とも中間目標を滞

りなく達成できる見込みである。

3.2 成果の最終目標の達成可能性

研究開発項目①②③の最終目標を表 3.2.0.1 に示す。研究開発項目①と②については、2020 年度より、全開発装置を統合したシステムの構築に移る。2019 年度末には、中間目標をクリアした単品排出・自動整列機構を備えた製品ソータ、製品解体装置、モジュールソータ（以上、研究開発項目①）、部品剥離装置、マルチ供給搬送システムを備えたトランスフォーマブル選別システムのベンチスケール機（以上、研究開発項目②）の開発・製造の見通しが立っている。2020 度末には、これらを一貫統合したベンチスケールシステムを試作する。一貫統合システムでは、個別装置における装置機能と獲得情報を最適化するとともに、獲得した情報の次装置への転送、転送された情報に基づく次装置の最適制御、これら全体の情報管理を行うシステムなど開発を行う。2021 年度（最終年度）に各装置の小改良と制御最適化の最終調整を実施することで、各々の最終目標を計画通りに実現できる見込みである。

表 3.2.0.1 研究開発項目①②③研究期間および最終目標

研究開発項目	研究期間	最終目標
研究開発項目① 「廃部品自動選別技術開発」	2017年度～2021年度	廃製品（破壊・変形を伴うものを含む）を、処理速度0.5秒/製品・個以内に、非破壊で個体認識・資源価値判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現するベンチスケールシステムを完成させる。
研究開発項目② 「廃部品自動選別技術開発」	2017年度～2021年度	廃製品を構成する主なモジュールから分散・複雑系廃部品を単体分離・選別するベンチスケール自動選別システムにおいて、廃部品（メモリ、コンデンサ等の各電子素子）を分離効率80%以上での選別する基本性能の発現と、製錬原料化要件を満たす各種選別産物の回収を実現する。さらに、研究開発項目①及び②を連動させて一貫制御する、ベンチスケールシステムを完成させる。
研究開発項目③ 「高効率製錬技術開発」	2017年度～2022年度	③-1：希土類元素の相互分離に関しては、プラセオジウムとネオジウムを対象に、相互分離係数5を有する分離試薬を開発する。 ③-2：熔融塩を用いた回収では、2種以上の希土類元素を（単体または鉄等との合金として）純度80%以上で各々同時に連続的に直接回収する技術を実現するとともに、プロセス適用時のコストを1/2以下（従来比）にする見通しを立てる。

研究開発項目③-1については、2019 年度末には、隣り合った軽希土に対する分離係数3を達成する見通しが立っている。2020 年度より、実分離フローにおける模擬液による分離試験を溶媒抽出法、吸着分離法について検討開始するとともに、分離係数向上のための配位子の微調整を行う。2021 度末には、実操業のために必要な鑄型分離の要件を明確化し、2022 年度（最終年度）には、模擬液を用いた際の最適分離条件を提示、新たに得られた分離機構の知見を基に分離係数5を達成することで、最終目標を計画通りに実現できる見込みである。研究開発項目③-2では、2019 年度末には希土類純度80%以上で複数の希土類元素を同時回収する見通しが立っている。2020 年度より、これを実用に近い条件に拡張するための研究を開始する。2021 年度より、導入した試験装置での操業データを蓄積するとともに、そこで得られたデータを共有し、装置の更なる改善や顕在化した課題解決のための基礎試験を並行して進める。2022 年度（最終年度）には、これらの知見を統合して連続的な操業をラボレベルで実現するととも

に、プロセス適用時のコストを 1/2 以下にする見通しを立て、最終目標を計画通りに実現できる見込みである。

3.3 成果の普及

(1) 論文等研究成果の学術的な对外発表

【論文】

- ・ T. Kobayashi, K. Akutsu, M. Nakase, S. Suzuki, H. Shiwaku, T. Yaita: Complexation properties and structural character of lanthanides complexes of O, N-hetero donor ligand BIZA, Sep. Sci. Technol., Published online; <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1575880>
- ・ Y. Watanabe, Y. Norikawa, K. Yasuda, T. Nohira: Electrochemical Dy-Alloying Behaviors of Inconel and Hastelloy in Molten LiF-CaF₂-DyF₃, Materials Transactions, Vol. 60, 379-385, 2019. など、合計 9 件。

【学会発表（国際）】

- ・ K. Ohto, N. Fuchiwaki, S. Morisada, H. Kawakita: IL 11C Selective extraction of scandium over other rare earth elements with acetic acid derivative of new tripodal compound, The 10th ISNSC (International Symposium on Nano & Supramolecular Chemistry, Dresden (2018 年 7 月) (招待講演)
- ・ T. Yaita, S. Suzuki, T. Kobayashi, H. Shiwaku: Bond distance variations for lanthanide and actinide compounds and its implication, ACS 65th International Symposium & Exhibition (2018 年 10 月) (招待講演) など、合計 13 件。

【学会発表（国内）】

- ・ 大石 哲雄、矢口 未季、安田幸司、小西宏和、野平俊之、廃磁石から希土類元素を直接分離・回収するプロセスの開発、第 15 回環境研究シンポジウム (2017 年 11 月)
- ・ H. Hua, H. Konishi, T. Nohira, Y. Koizumi, H. Ono and T. Oishi: Electrochemical Behaviors of Dy(III) and Nd(III) Using Fe Electrodes in Molten CaCl₂-LiCl Systems, 第 80 回マテリアルズ・テーラリング研究会 (2018 年 7 月) など、7 月末までに合計 21 件。

(2) 実用化の戦略に沿った成果普及の取組

① 専門家、関係企業、成果ユーザー等へ情報発信

【政府間会合】

- ・ T. OKI: Next Generation Technologies for the Urban Mining in Japan, 8th EU-US-Japan Trilateral Conference on Critical Materials (2018 年 12 月)
- ・ T. Oishi: Direct recovery of rare earth elements from magnets using molten salt and alloy diaphragm, 6th Japan-U.S. Bilateral Meeting on Rare Metals (2019 年 1 月)

以上、2 件。

【総説・解説】

- ・大木達也：「戦略的都市鉱山」を支える物理選別技術の新たな自動化思想ーリサイクル工場の省人化を目指してー，環境管理，Vol.54，No.7，P.28-35(2018)
- ・古屋仲茂樹：資源リサイクルにおける AI 画像認識の活用，エネルギー・資源，Vol.39，No.6，P.33-37(2018) など、合計 5 件。

【招待講演等】

- ・T.OKI：Technological Strategy for the Next Generation Urban Mining in Japan, The 14th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology (EARTH2017, 2017 年 9 月) (基調講演)
- ・大木達也：都市鉱山開発における個人研究から国家戦略創出への展開，産総研 E&E フォーラム(2018 年 12 月) (基調講演) など、合計 17 件。

【セミナー・講座】

- ・大木達也：21 世紀型物理選別学の構築に向けて，SURE アカデミー開講記念公開講座講演、(2018 年 11 月)
- ・古屋仲茂樹：個別選別技術の新たな展開、SURE アカデミー開講記念公開講座講演、(2018 年 11 月) など、合計 8 件。

② 一般向け情報発信

【プレスリリース・記者会見】

- ・NEDO プロ集中研「CEDEST」の開設について(2018 年 6 月 20 日)
読売新聞、朝日新聞、日本経済新聞など 18 誌に掲載

【報道・テレビ】

- ・朝日新聞、日経産業新聞、日刊工業新聞、NHK E テレなど、合計 8 件。

【機関誌・書籍】

- ・産総研レポート 2018：「大木達也，レアメタルの高度リサイクル技術を開発 戦略的な都市鉱山システムを構築し資源循環型社会の実現へ」(2018 年 9 月)
- ・JAEA 技術シーズ集 第 4 版：「鋳型分離技術を利用した希土類イオンの高精度分離法」(2018 年 10 月) など、合計 3 件。

3.4 知的財産権等の確保に向けた取組

(1) 知財戦略・特許等の実績

独立行政法人工業所有権情報・研修館(INPIT)の知的財産プロデューサ派遣事業により、2019 年 4 月から、NEDO プロジェクト専属の知財プロデューサ 1 名が産業技術総合研究所に半常駐。参画 13 機関の特許出願補佐を実施頂いている。

【特許】

出願 4 件， 出願準備中 5 件

【プログラム知財登録】

登録 4 件， 登録準備中 3 件

(2) 競合技術と比較した優位性

表 3.4.0.1 に、本研究における世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓等、代表的な取り組み及び成果についてまとめた。

表 3.4.0.1 世界水準の代表的な取り組み及び成果

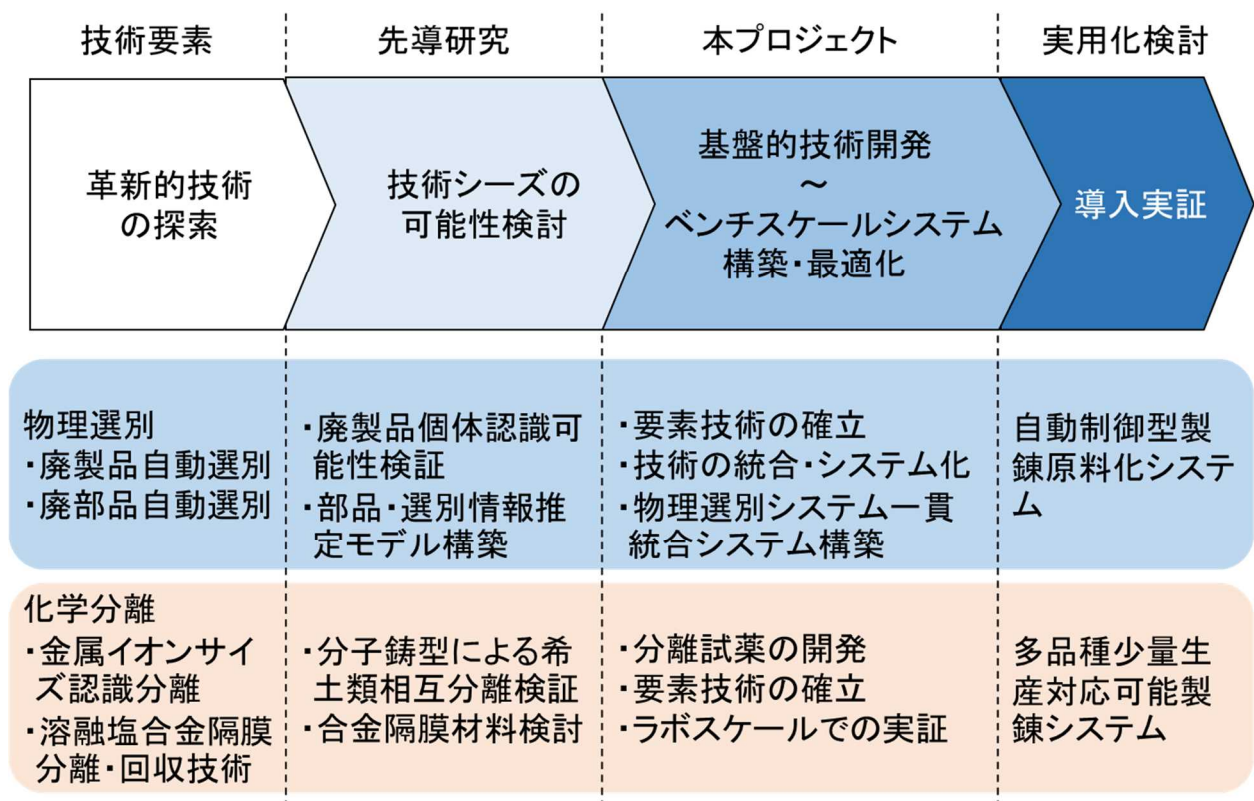
<p>項目①-1 項目①-2</p>	<p>製品選別～筐体解体に至る一連の装置開発</p>	<p>同一メーカー製のスマートフォンなど対象製品を限定した自動選別・解体システムは既に関済されているが、多種多様な廃製品に対して資源価値や構造特性の違いに基づいて最適プロセスを判断する自動選別・解体システムは世界的にも未だ開発されていない。本研究の対象製品は現段階で 4 品目約 1000 機種に達しており、この種のリサイクルシステムの汎用性としては世界最高水準の取り組みと言える。</p>
<p>項目②-3</p>	<p>トランスフォーマブル選別システム</p>	<p>従来、選別システムはコンベアで固定された「選別ライン」であったが、マルチ供給搬送システムの開発により、選別機を円形に囲んだ「選別サークル」とし、選別装置間を自在に試料搬送可能なシステムの開発は世界初のアイデア。また、対象物の情報に基づいて、選別工程を自動選択し、かつ、各装置を最適条件で運転するシステムは世界に類がない。</p>
<p>項目③-1</p>	<p>鑄型分離技術による希土類元素の精密相互分離</p>	<p>金属イオン分離の分野では国内外を問わず前例の無い、目的物質の形状を鍵と鍵穴の関係のように識別して相互作用する分子鑄型の概念（鑄型分離技術）により、沈殿法では他に類を見ない Pr/Nd 分離係数 2.75 を得た。</p>
<p>項目③-2</p>	<p>合金隔膜を用いた単一工程による希土類の分離・回収</p>	<p>従来の熔融塩電解では希土類を相互分離できなかったが、合金隔膜を用いた電解により、Dy/Nd 比で 7 倍以上の選択性で Dy を回収することに成功した。単一工程で分離・回収（金属または合金として）に成功した世界初の事例。</p>

4. 成果の実用化に向けた取り組み及び見通し

本プロジェクトにおける実用化とは、当該研究開発に係る成果（装置、システム等の基盤技術）がリサイクル事業者、関連装置開発事業者等により利用が開始されることをいう。

4.1 成果の実用化に向けた戦略

2030年頃までに国内の金属資源循環を確立することを目標に、下図にプロジェクト実施のロードマップを示す。先導研究(2010年度採用)により、製品寿命の短い小型家電(携帯・デジカメ)を対象に要素技術開発に資するデータ収集をスタートさせ、その後、基盤技術開発(6年程度)を行い、さらに、2、3年程度で国内での実用化を図る。その後、白物家電、自動車に技術を水平展開し、アジア等も含む資源循環システム(助成)に拡大する必要がある。



4.2 成果の実用化に向けた具体的取組

(1) 研究開発項目①②

後年度より、一貫統合システムとして開発を進める研究開発項目①②では、廃製品・廃部品選別システムを統合した廃小型家電の自律選別システムの実用化を目指す。本プロジェクトでは、佐藤鉄工が装置システム製品化を担当し、その第1号機を大栄環境のリサイクル工場に設置する計画である。

佐藤鉄工(株)においては、自社が製作する破碎関連装置以外にも、外部協力機関である各種選別装置メーカー参画し、集中研においてそのノウハウを集約、研究開発段階から製品化を想定した設計・製作を行うことで、速やかな全体システム化を実現する。

研究開発項目①②が終了する 2021 年度末までに、ベンチスケールの試作システムを完成させ、その後 2 年でパイロット機をリサイクル工場内に導入する。さらに、パイロット機製作の知見に基づいて、実機スケール機を設計・製作し 2025 年度の製品化を目指す。実機スケール機はパイロット機の拡張・改造により構築する予定で、パイロット機をそのまま使用できる装置は転用し、処理量が不足する部分をスケールアップあるいは装置増設により対応する予定である。また、パイロット機の実績に基づく小規模工場向けの小型システムについては、2024 年を目途に先行して製品化するなど、様々な工場規模のユーザに対応するため、各種スケールの自動・自律型選別システムのラインナップを順次開発・製品化する計画である。これと並行して、小型家電以外の製品へと拡張すべく、ソフト対応可能な技術者・メンテナンス員の増員・養成といった人的投資も強化する予定である。

一方、第 1 号機導入予定の大栄環境(株)においては、パイロット機～実機導入に向け、設置工場の検討を実施している。佐藤鉄工(株)におけるシステム完成を待ち、2023 年度には、パイロット機を導入する予定である。このパイロット機を持って 2024 年には小規模の商業稼働を開始、2025 年には佐藤鉄工(株)の実機設計に基づく装置拡張を行い、2026 年に実機スケールの商業稼働を開始する予定である。現

また、このような実用化計画が、各社独自に実施されるのではなく、研究機関を含めた連携体制の中で、迅速かつ効率的に進められるよう、プロジェクト終了後 2 年程度の後継実証事業の採択を目指す。

(2) 研究開発項目③

本プロジェクトでは、主要希土類材料メーカーである(株)三徳が研究開発に参画しており、目標値設定や分離回収条件等の決定に関与している。

開発項目③-1 では、前半 3 年で希土類相互分離を行い分離剤の基本構造を決定し、後半 3 年では分離性能の高度化に加えて、スケールアップを想定した分離試験を遂行する。その際に外部協力機関である化学薬品メーカーから分離剤の合成コスト低減等に関する助言を得る予定である。プロジェクト終了後は、分離係数のさらなる向上に加え、化学薬品メーカーによる試薬の大量合成及びそれによる実操業と同様の装置を用いて(株)三徳における分離試験を行う。プロジェクト終了後 5 年を目処に、新規分離剤の市販及び実操業への投入を目指す。

開発項目③-2 では前半 3 年でラボレベルでの基幹部分の検証を終え、後半 3 年では専用電気炉を導入した運用試験を、(株)三徳にて行う予定である。これらの試験を基に、プロセス適用時のコストなどを 1/2 以下にする見通しを立てる。その後は、(株)三徳において専用電気炉を順次大型化し、プロジェクト終了後 3 年を目処にパイロット試験機を作製、運用データを蓄積して商用 1 号機の導入準備を進める。並行して自動車用・エレベーター用モータなど、ターゲットの多様化、ビジネスモデルの提案などを(株)三徳が主体となって実施する。プロジェクト終了後 5 年を目処に商用 1 号機の導入を目指す。

4.3 成果の実用化の見通し

(1) 研究開発項目①②

「廃小型家電の自律選別システム」の実用化に向けて、基盤研究終了後の主なエンジニアリング的課題は以下の通り。

【課題 1】各装置間の産物ハンドリング方法の確立

各装置間を繋ぐシステム構築において、構造の異なる装置間で、多様な産物を連続かつ安定的に供給方法することが必要となる。【解決法】各選別工程後に、産物の種類ごとに一次貯留するバッファを設け、負荷変動を調整できるラインを構築する。

【課題 2】システム統合に向けた制御信号の仕様統一化

システム統合には、制御信号の入出力が多岐に亘るが、PLC およびインターフェースユニットの仕様が各機器で異なると変換等が煩雑になり、設定が複雑になるため、仕様の統一を行う必要がある。【解決法】外部協力機関の製造装置を含め、各種装置の制御盤内に搭載している PLC の仕様・形式を統一し、PLC に適合したインターフェースユニットを使用する。

【課題 3】パイロット機および実機スケール機を想定した安全対策

本事業で試作するベンチ機は、登録研究者のみが使用する試験装置であり、安全対策は必要最低限に留めている。実用化においては、想定されるリスクが増えるため安全対策を強化する必要がある。【解決法】開発した試験機を用いてリスクアセスメントを行い、危険要因を洗い出し、パイロット機に反映させる。

【課題 4】システム技術者の育成

本事業で開発する装置は、高度な制御システムも含まれる。そのため、装置開発側だけでなく、装置を運用する使用者側も、システムを周知した技術者が対応することが望ましい。【解決法】パイロット第 1 号機を大栄環境のリサイクル工場に設置する際、運用法を大栄環境側の技術者と共に構築してマニュアル化するとともに、メンテナンスも含めた効率的な運用のため、システム技術者のスキル向上を果たす。

【課題 5】処理対象の廃小型家電の物量確保とビジネスモデルの構築

実用化に向け、処理対象となる廃小型家電を安定的に確保し、長期に亘りビジネスとして成立できるかの試算が重要となる。【解決法】開発システムの導入により、処理コストの約半分を占める人件費(手作業費)の削減と、回収金属最大化の両立が期待できる。設備導入時の優位性については既に予測してきたが、製品組成や金属価格の変動などに対応し、将来に亘り廃小家電の有償取引を可能とすることで、物量確保に繋がるか等について、パイロット試験を通じてビジネスモデルを構築する。

(2) 研究開発項目③

ネオジム磁石の需要は今後十数年でほぼ倍増することが見込まれると同時に、ネオジム価格も 50%以上の増加が予測されている。国内の金属メーカーの競争力向上のためには、革新的技術による国内での完全リサイクルフローの構築が、そ

の安定供給のためには必須である。本事業での③-1, ③-2における技術開発では、後半3年で実用化までの一定の見通しが立つ予定であり、プロジェクト終了後は大型化への対応、具体的には、①より安価な分離剤構造の探索や製造コストの低減、②合金隔膜材料の低コスト化や、③処理速度向上などが課題になると想定される。

これらの課題解決には、本プロジェクトの参画機関が最も適任と考えられるが、状況に応じて特殊金属メーカー、電気炉メーカーなどとの連携を図る。競合技術との比較では、性能面での優位性の確保およびコスト評価は本プロジェクト期間中にほぼ完了する見通しであり、経済合理性の確保も上記の取り組みで十分な見通しが立つと判断している。また、本プロジェクトでは希土類元素を中心に扱っているが、これは相互分離が困難な元素の典型例であり、他の元素群への展開の可能性は十分高い。実際に、分離対象元素に応じて分離試薬を設計する方法論の確立、合金隔膜を用いたプロセスの他の濃縮系材料への展開もプロジェクト期間内の主要な課題の一つと位置付けており、他の用途への展開の可能性は後半3年でより明確になると期待される。