

「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」

事業原簿

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境部
-----	--------------------------------------



# —目次—

## 内容

### 概 要

### プロジェクト用語集

<b>1. 意義アウトカム（社会実装）達成までの道筋</b> .....	<b>1-1</b>
<b>1.1. 事業の位置付け・意義</b> .....	<b>1-1</b>
1.1.1. 背景 .....	1-1
1.1.2. 本事業の目的 .....	1-2
1.1.3. 本事業の将来像 .....	1-3
1.1.4. 政策・施策における位置づけ .....	1-4
1.1.5. 技術戦略上の位置付け .....	1-6
1.1.6. 国内外の動向との比較 .....	1-7
<b>1.2. アウトカム達成までの道筋</b> .....	<b>1-12</b>
<b>1.3. 知的財産・標準化戦略</b> .....	<b>1-12</b>
<b>2. 目標及び達成状況</b> .....	<b>2-1</b>
<b>2.1. アウトカム目標及び達成見込み</b> .....	<b>2-1</b>
2.1.1. アウトカム目標の設定及び根拠 .....	2-1
2.1.2. 波及効果 .....	2-2
2.1.3. 本事業における実用化の考え方及び見込み .....	2-2
2.1.4. 費用対効果 .....	2-2
<b>2.2. アウトプット目標及び達成状況</b> .....	<b>2-2</b>
2.2.1. アウトプット目標の設定及び根拠 .....	2-2
2.2.2. アウトプット目標の達成状況 .....	2-4
2.2.3. 研究開発成果の意義 .....	2-5
2.2.4. 副次的成果及び波及効果 .....	2-6
2.2.5. 特許出願状況及び論文発表 .....	2-6
<b>3. マネジメント</b> .....	<b>3-1</b>
<b>3.1. 実施体制</b> .....	<b>3-1</b>
<b>3.2. 受益者負担の考え方</b> .....	<b>3-3</b>
<b>3.3. 研究開発計画</b> .....	<b>3-4</b>

<b>4. 目標及び達成状況の詳細</b> .....	<b>4-1</b>
<b>4.1 研究開発項目①</b> .....	<b>4-1</b>
実施体制 .....	4-1
予算 .....	4-1
実用化への道筋 .....	4-1
アウトプット目標の達成状況 .....	4-2
成果の意義 .....	4-2
特許出願件数、論文発表数 .....	4-2
研究開発成果の詳細 .....	4-2
<b>4.2 研究開発項目②</b> .....	<b>4-26</b>
実施体制 .....	4-26
予算 .....	4-26
実用化への道筋 .....	4-26
アウトプット目標の達成状況 .....	4-27
成果の意義 .....	4-27
特許出願件数、論文発表数 .....	4-28
研究開発成果の詳細 .....	4-28
<b>4.3 研究開発項目③</b> .....	<b>4-49</b>
実施体制 .....	4-49
予算 .....	4-50
実用化への道筋 .....	4-50
アウトプット目標の達成状況 .....	4-51
成果の意義 .....	4-52
特許出願件数、論文発表数 .....	4-53
研究開発成果の詳細 3-1 .....	4-54
研究開発成果の詳細 3-2 .....	4-85
<b>4.4 研究開発項目④</b> .....	<b>4-116</b>
実施体制 .....	4-116
予算 .....	4-116
実用化への道筋 .....	4-116
アウトプット目標の達成状況 .....	4-118
成果の意義 .....	4-119

特許出願件数、論文発表数 .....	4-120
研究開発成果の詳細 .....	4-120

(添付資料)

- ・プロジェクト基本計画
- ・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
- ・事前評価結果（研究開発事業に係る技術評価書）
- ・NEDO POST の結果
- ・特許論文等リスト



## 概要

		最終更新日	2023年3月29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 及びMETI担当課	環境部 PM 阿部 正道 (2017年2月~2020年9月) PM 伊東 賢宏 (2020年10月~2021年11月) PM 今西 大介 (2021年12月~現在)			
0. 事業の概要	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。			
1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋				
1.1 本事業の位置付け・意義	<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の流出や、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>			
1.2 アウトカム達成までの道筋	<p>本研究開発事業では、4つの研究開発項目を実施する。廃製品選別、廃部品選別、高効率な製錬、リサイクルシステムの情報連携の研究開発により、高効率な資源循環を可能とするリサイクルシステム設備を完成する。その成果を基に実操業による動作実証を行い、製品としてのリサイクルシステム装置を完成し上梓する。各種廃電気・電子製品からなる都市鉱山の適切なリサイクルを可能とする装置を日本全土に普及し、2035年に年間約1000億円相当の金属資源を新たに資源化する。</p>			
1.3 知的財産・標準化戦略	<p>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。</p> <p>実施者：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。</p>			
2. 目標及び達成状況				
2.1 アウトカム目標及び達成見込み	<p>【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。</p>			

		【達成状況】スマートフォンやタブレット、デジタルスチルカメラ等の廃小型電子家電の製品選別、これらから得られる電子部品の部品選別、ネオジム等のレアアースの製錬技術等は最終目標を達成し、これらの成果を基に、構築されたリサイクルシステムに関わる製品群はリサイクル実施者のプラントに組み込まれ試験運転を開始する予定。この試験運転を基に、処理能力の拡大を合わせて検討しアウトカムへ繋げていく。	
2.2 アウトプット目標 及び達成状況	研究開発項目	最終目標	計画との差異
	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。	○ 2022 年 3 月 最終目標 達成
	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。	○ 2022 年 3 月 最終目標 達成
	③-1 高効率製錬技術開発（鋳型分離技術）	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。	○ 2023 年 3 月 最終目標 達成
	③-2 高効率製錬技術開発（濃縮金属部品製錬技術）	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。	○ 2023 年 3 月 最終目標 達成
	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、それをを用いたリサイクル対象鉱種・製品を選定する。	○ 2023 年 3 月 最終目標 達成
3. マネジメント			
3.1 実施体制	経産省担当原課	産業技術環境局 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	産業技術総合研究所 環境創生研究部門 副研究部門長 大木 達也	
	プロジェクトマネージャー	NEDO 環境部 3R グループ 主任研究員 今西 大介	
	委託先	・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（鋳型分離技術） （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、大阪大学 ・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）、DOWA エコシステム（株） 【再委託先】東京大学、北海道大学、秋田大学								
3.2 受益者負担の 考え方  事業計画内容 事業費推移 （単位：百万円）	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	→						終了時評価		
	②廃部品自動選別技術開発	→								
	③-1 高効率製錬技術開発（鋳型分離技術）	→								
	③-2 高効率製錬技術開発（濃縮金属部品製錬技術）	→								
	④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発						→			
	会計・勘定	2017	2018	2019	2020	2021	2022	総額		
	一般会計									
	特別会計（需給）	440	490	520	560	440	420	2,870		
	開発成果促進財源									
	総 NEDO 負担額									
	委託	440	490	520	560	440	420	2,870		
	3.3 研究開発計画									
	情勢変化への対応	本事業実施期間中に、小型家電のリサイクルに関して政策動向等大きな情勢の変化はなかったが、2018年に重希土類のリサイクル技術の重要性に関して、技術推進委員会にて委員の意見があり、それに対応すべく、軽希土類のプラセオジウムとネオジウムでの高い分離係数が見込まれる③-1の研究開発項目で、重希土類のテルビウム、ジスプロシウムの分離技術検討を開始した。								
中間評価結果への対応	指摘				対応					
	実用化に向けて、回収・処理できる対象品の規模や回収素材全体の価値の定量的な把握が必要である。				研究開発項目①、②の研究開発成果である装置群を統合システム化し、新たに採択した研究開発項目④でそのシステムを活用して回収対象となる製品、鉍種等の素材の価値の把握を実施した。					

		成果をどのように社会で使えるものにするのか、動静脈産業の連携はもちろん、将来のビジネスモデルや使用例、我が国資源政策への貢献の仕方などを鮮明にすることが望まれる。	委託調査にて動静脈の連携に資する技術開発の方向性を得て、それに基づき研究開発項目④を実施した。研究開発成果である装置群の統合により CEDEST システムを構築する事により、このシステムを用いて社会実装の姿、使用例が検討出来るような成果につなげた。
	評価に関する事項	事前評価	2016 年度 事前評価実施 担当部 環境部
		中間評価	2019 年度 中間評価実施 担当部 環境部
		終了時評価	2023 年度 終了時評価実施 担当部 環境部
別添			
	投稿論文	「査読付き」42 件 「その他」1 件	
	特 許	「出願済」19 件	
	その他の外部発表 (プレス発表等)	「外部講演」79 件 「新聞・雑誌等への掲載」31 件 「シンポジウム等」7 件	
	6. 基本計画に関する事項	作成時期	2017 年 2 月の作成
		変更履歴	2021 年 12 月に改訂 (PM の変更、年号の記載を平成から西暦に変更)

## プロジェクト用語集

### 研究開発項目①「廃製品自動選別技術開発」

用語	説明
ARENNA ソータ	産総研が過去に開発した廃棄物ソータ。ベルトコンベヤ上に設置したレーザー3D スキャナで計測した対象物の 3D 特徴量（体積、投影面積、縦長、横長、最大高、重心点高、周囲長、表面凹凸度等）を全結合型ニューラルネットワーク(3 層)に入力して選別する。
CFS 型解体機	佐藤鉄工(株)製の「クロスフローシュレツダ (CFS)」を改良した自動解体機。
CEDEST システム	本プロジェクトで開発した高品位小型家電向けの自動・自律型リサイクルプラント。2018 年に本開発のために開設した集中研 CEDEST の名を冠して、以下「CEDEST システム」と称す。
ResNet	2015 年に Microsoft Research が開発した深層学習モデルの一種で、2015 年の ILSVRC（世界的な画像認識コンテスト）で優勝したモデル。
VGG16	深層学習モデル（深層畳み込みニューラルネットワーク）の一種。全結合層(3 層)を含む 16 層で形成される。
回収率	原料(選別前の粒子)から成分 A を回収する場合において、原料中の成分 A の量に対する選別産物中の成分 A の量の割合。選別によって成分 A 全体のどれだけが回収されたかを示す。
深層学習	機械学習の一種で、多層ニューラルネットワークを使用して、複雑なパターン認識やデータ分析を行う手法。
セマンティックセグメンテーション	深層学習の一手法で、画像内の各ピクセルに対して、そのピクセルが属するクラスを予測する手法。
品位	対象物全体に占める特定成分の割合。純度と同じ。
フィルタリング	画素が有する各種の情報（RGB、輝度、強度など）に対し、あるしきい値に従って変化させたり、周囲の画素情報も用いた行列計算などを行うことにより、当該画素の情報を置き換える処理。
複合センシング	複数種類のセンサー検知情報を組み合わせた物体識別手法。製品ソータでは 3D 画像、3D 特徴量、2D カラー画像、重量情報を 1 枚の画像データに加工して深層学習モデルに入力する。
分離効率	原料(選別前の粒子)が A/B 成分からなるとき、計算上、完全選別されたと見なされる A/B 成分の割合（残りは元の A/B 成分比のまま分割）。「成分 A 回収率 - 成分 A 以外回収率」で算出できる。選別成績の良否の判断基準の一つ。日本では伝承者の誤認識により Newton 効率とも呼ばれる。
ルールベース画像処理	設計者が予め決めたフローに従い、画像処理操作を順次行ってゆく一連の画像処理プロセス。

研究開発項目②「廃部品自動選別技術開発」

用語	説明
CEDEST システム	本プロジェクトで開発した高品位小型家電向けの自動・自律型リサイクルプラント。2018 年に本開発のために開設した集中研 CEDEST の名を冠して、以下「CEDEST システム」と称す。
LCA	Life Cycle Assessment の略。製品やサービスがそれらのライフサイクル全体を通して環境（地球環境、人健康、生態系など）に与える影響を分析、評価する手法の一つである。
圧力水（圧入水）	ネルソン選別機(高遠心型湿式比重選別機)において、高速回転する選別チャンバーの外側壁に開けられた穴（Φ1 mm 程度）より、チャンバー内部に高圧力で供給される水(水流)。
遺伝アルゴリズム	生物の進化を模倣して、問題の最適解を見つける最適化アルゴリズム。
インベントリデータ	LCA において、環境負荷物質を定量するときに必要なデータ。プロセスの入出力の単位プロセスデータや CO2 排出原単位などの示すことが多い。
渦電流選別機	導電体を磁場内で動かしたり、磁束密度を変化させた際に、電磁誘導により導電体内に渦状の誘導電流(渦電流)が生じ、この渦電流により導電体に磁石の磁場と反発する磁場が生じる。この反発力を利用して粒子を選別する装置。
回収率	原料(選別前の粒子)から成分 A を回収する場合において、原料中の成分 A の量に対する選別産物中の成分 A の量の割合。選別によって成分 A 全体のどれだけが回収されたかを示す。
カントリーリスク	国の経済や政治の不安定性を表したリスク。これらリスクが顕在化するとその国からの資源供給が滞るため、資源リスクの要因の 1 つとみなされている。
個別要素法	粉粒体の数値解析手法。粒子間の接触を考慮して、時間ステップごとにおける各粒子の運動を解析する。
抗力	流体中を運動する粒子に働く、運動方向とは反対方向の力。粒子と流体の相対速度の 2 乗、流体の密度、運動方向への投影断面積に比例する。
実験計画法	実験条件を設定する方法の一つで、限られたリソースを最大限に活用して、できるだけ少ない実験回数で有効な情報を収集するための手法。
周期境界	流体・粒子運動が部分的に繰り返されていると仮定できる場合に、着目した部分空間をシミュレーション領域とした時の境界面。例えば右境界から流出した流れを左境界の流入に設定。
磁化率	物質の磁化の起こりやすさを示す物性値。磁化率が高い物質ほど磁石に付きやすい。
資源リスク	資源供給が不安定となって問題が生じるリスク。資源リスクの大きさは、対象資源の供給リスクとリスクが顕在化した際の影響の大きさを考慮して評価するのが一般的である。
製品ライフサイクル	製品ライフサイクルは主に二つの意味で使われ、一つは製品が市場に登場してから退場するまでの間を指し、マーケティング用語として使われる。もう一つは、製品の設計から始まり、製造、販売、使用、リサイクル、廃棄に至るまでの一連のプロセスを示す概念である。本項では後者の意味で使っている。
パターンマッチング	画像の中からあらかじめ用意されたテンプレート画像に対して、どの程度一致しているかを判定する手法。

バルク選別	粒子を個別に選り分ける選別機を「ソータ」と呼ぶのに対し、粒子の集合体を特殊な場（例：磁選機の場合は磁場）に投入し、その特殊な場における粒子自体の運動の違いを利用する集合選別のうち、粒子のバルク性質を利用する選別方法。代表的なものに比重選別機、磁選機、渦電流選別機がある。
品位	対象物全体に占める特定成分の割合。純度と同じ。
分離効率	原料(選別前の粒子)が A/B 成分からなるとき、計算上、完全選別されたと見なされる A/B 成分の割合（残りは元の A/B 成分比のまま分割）。「成分 A 回収率－成分 A 以外回収率」で算出できる。選別成績の良否の判断基準の一つ。日本では伝承者の誤認識により Newton 効率とも呼ばれる。
部分分離効率	原料(選別前の粒子)を特定の選別法で選別する際、選別指標（サイズ、比重、磁性など）のある 1 区分で回収された成分割合に基づいて算出される、その区分の分離効率。
マテリアルフロー	製品の生産、使用、廃棄というライフサイクルに沿った素材（金属）のフローをマクロに捉えたもの。統計などでその量が把握されているフローはごく一部であり、社会全体のフローを明らかにする分析はマテリアルフロー分析と呼ばれる。
離散事象シミュレーション	離散事象型とは、モデル化対象の状態変化を引き起こす事象が、時間軸上の不連続で離散的な時点で生起することを仮定することを指し、離散事象シミュレーションは、特定時点で生起可能な事象を取り出し、各事象の生起に伴うシステム状態変化を計算し、次の時間時点に進む、というステップを繰り返して実行する。離散事象シミュレーションは、工場生産シミュレーション、計算機ネットワークシミュレーション、交通シミュレーションなど様々な分野で使われている。

### 研究開発項目③-1「高効率製錬技術開発（鋳型分離技術）」

用語	説明
CH カップリング	有機化合物の炭素－水素結合を足がかりに新しい炭素－炭素結合や炭素－ヘテロ原子結合を生成するカップリング反応、遷移金属触媒反応により進行する例が多い
DFT 計算	DFT は Density Functional Theory（密度汎関数理論）の略。原子や分子などの多体電子系の電子密度や電子間の相互作用を計算する。分子の安定構造を予測することができる。
NMR	Nuclear Magnetic Resonance の略称。核磁気共鳴分光法ともいう。強い磁場中に試料を置き、核スピンの向きを揃えた状態でラジオ波を照射することで核スピンの向きを変え、元の安定状態に戻るときに発生する信号を検出する。有機物などの構造や分子間、分子内の相互作用などに関する情報が得られる。
$\pi$ スタッキング	有機化合物の芳香族環の間に働く分散力により、2つの芳香族環が平行に積み重なるような安定構造をとる現象。
STXM	Scanning Transmission X-ray Microscope の略称。走査型透過 X 線顕微鏡ともいう。放射光を光源とする極微小に集光した X 線を試料に照射し、試料を空間的にスキャンしながら X 線の透過率をマッピングする。この操作を X 線のエネルギーを少しずつ変えながら繰り返し行う。これにより、試料の顕微画像を得ると同時に任意の領域から X 線の吸収スペクトルを抽出できる。
WSC	水溶性カルボジイミドの略語。カルボン酸とアミンを反応させてアミドを縮合させる際に用いる添加剤で水に溶けやすいために反応の後処理を簡便にするために用いられる

XAFS	X-ray Absorption Fine Structure の略称。X 線吸収微細構造ともいう。X 線吸収スペクトルにおいて X 線吸収端付近に見られる振動構造のことを指す。吸収端の極近傍は XANES と呼ばれ、測定対象元素の価数や電子状態などが分かる。吸収端から離れた領域は EXAFS と呼ばれ、測定対象元素周辺の局所構造（配位数や原子間距離など）に関する情報が得られる。
還元的アミノ化	アルデヒドとアミンを反応させる際に還元剤を共存させておくことで生成した炭素-窒素二重結合を単結合に還元し二級アミン、三級アミンを合成する方法
逆抽出	溶媒抽出において、有機相に抽出した対象物を水相に取り出す操作。
協同効果	2 つの抽出試薬をそれぞれ単独で用いた時よりも同時に用いた方が抽出能力が向上する効果。金属イオンに残された水和水を脱水和することにより発現するなどが知られている。
シランカップリング剤	1 分子中に有機材料と化学反応する官能基と、無機材料と化学反応する官能基をあわせ持つ有機ケイ素化合物。
動径構造関数	ある原子を原点とし、その周囲に位置する原子の存在確立分布を表したもの。XAFS 法においては、EXAFS 領域の振動構造をフーリエ変換することで得られる。
分配比	溶媒抽出では有機相中の対象物濃度を水溶液中の濃度で除したものの、吸着では吸着剤中の対象物濃度を水溶液に残存した濃度で除したものの。
分離係数	2 成分の分離の選択性を表わす係数。2 成分それぞれの分配比の比から算出する。
ミキサセトラ抽出装置	連続向流多段抽出が可能な槽型抽出装置。最も汎用的な抽出装置。水相と有機相を混合するミキサ部と、重力により 2 相を分相するセトラ部で構成される。

### 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）」

用語	説明
EDX	エネルギー分散型 X 線分析。ここでは、電子線を試料に照射した際に発生する特性 X 線を検出している。これにより、試料に含まれる元素とその比率を測定する。
XRD	X 線回折測定。X 線を試料に照射して反射してきた X 線強度を検出器で測定する。結晶構造や物質の同定などに用いる測定方法。
中温、高温	厳密な定義ではないが、ここでは、400～600℃を中温、700℃以上を高温と呼称する。
白色 X 線	広い波長域に渡って連続的なスペクトルを持つ X 線。
溶融塩	塩を融解させてできた液体。狭義には、無機塩を数百℃に加熱したものを指す。アルミニウムや希土類などの活性な金属の製錬に利用される。

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」

用語	説明
CEDEST システム	本プロジェクトで開発した高品位小型家電向けの自動・自律型リサイクルプラント。2018 年に本開発のために開設した集中研 CEDEST の名を冠して、以下「CEDEST システム」と称す。
IoU	Intersection over Union の略で、物体検出やセグメンテーションなどの評価指標として広く使用される。IoU は、0 から 1 までの値を取り、1 に近いほど予測領域が正解領域に一致していることを示し、0 に近いほど予測領域が正解領域から外れていることを示す。
回収率	原料(選別前の粒子)から成分 A を回収する場合において、原料中の成分 A の量に対する選別産物中の成分 A の量の割合。選別によって成分 A 全体のどれだけが回収されたかを示す。
ハーフィンダール・ハーシュマン指数	元々は市場の寡占状況を各事業者の占有率の二乗和で示した指標であり、資源の供給寡占を評価するのにも利用されている。
品位	対象物全体に占める特定成分の割合。純度と同じ。
分離効率	原料(選別前の粒子)が A/B 成分からなるとき、計算上、完全選別されたと見なされる A/B 成分の割合 (残りは元の A/B 成分比のまま分割)。「成分 A 回収率 - 成分 A 以外回収率」で算出できる。選別成績の良否の判断基準の一つ。日本では伝承者の誤認識により Newton 効率とも呼ばれる。
ロジスティック曲線	生物の増加過程の近似に用いられる曲線で、時間経過により個体数は最終的に飽和状態に達する様子を表す。マテリアルフロー分析では、製品や素材の保有量の増加を模擬する際に用いられる。





# 1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

## 1.1. 事業の位置付け・意義

### 1.1.1. 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。

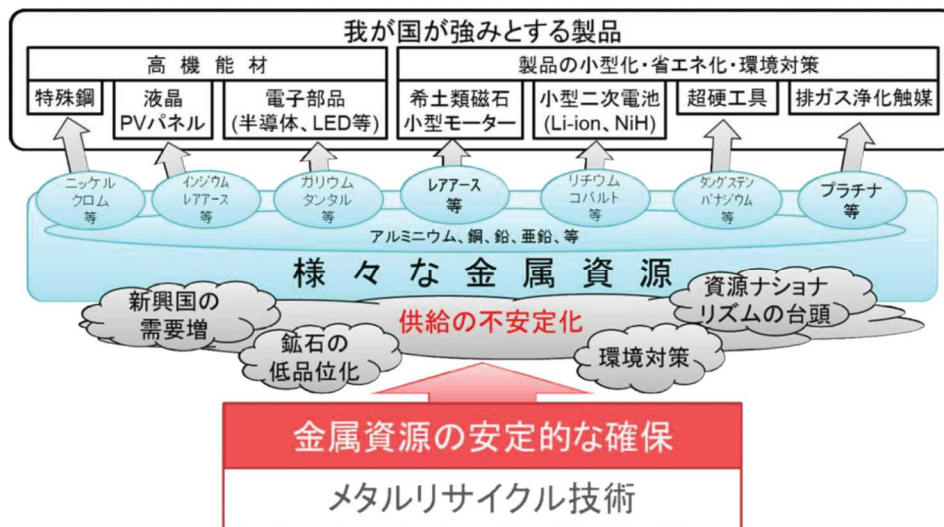


図 1.1 製品と資源との関係性

### ・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（製造事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 1.2）。

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。

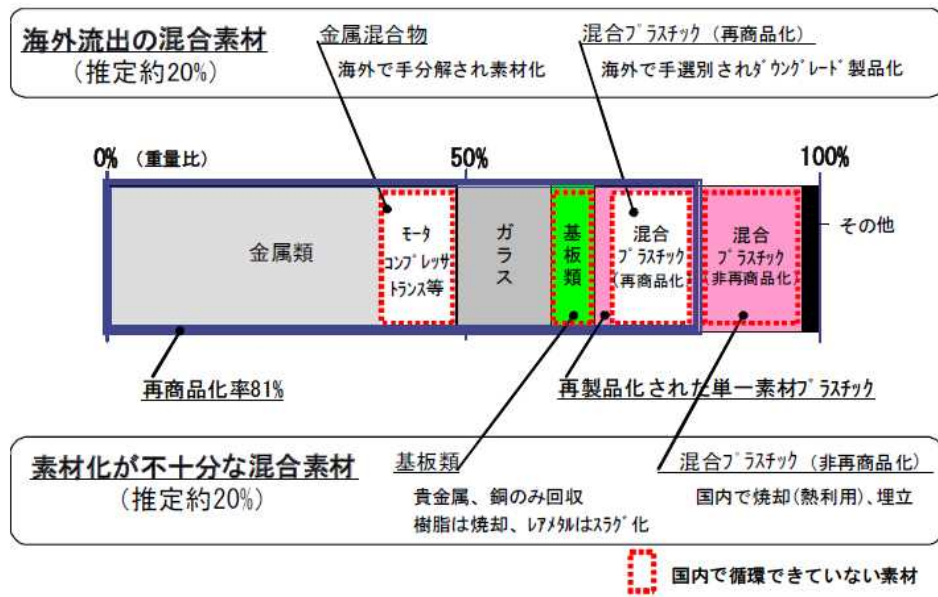


図 1.2 国内でリサイクルされない混合素材内訳 (2007 年)

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)

#### ・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。

#### 1.1.2. 本事業の目的

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。図 1.3 に本事業に関わる経済産業省産業予算の PR 資料を示す。



図 1.3 資源循環システム高度化促進事業 経済産業省予算の PR 資料

[https://www.meti.go.jp/main/yosan/yosan\\_fy2022/pr/en/sangi\\_taka\\_25.pdf](https://www.meti.go.jp/main/yosan/yosan_fy2022/pr/en/sangi_taka_25.pdf)

この資料に記載されている様に、本事業の社会背景と事業の目的は、

● 社会背景

国際的に需要の増大が見込まれる有用金属の安定確保及び省資源・省エネルギー化のため、国内外の地上資源の高度活用システムの構築が課題。

● 事業の目的

安価で高品質なリサイクル材の安定的な生産・供給の実現を目指し、廃小型家電等を製品レベル・部品レベルで自動選別するプロセス及び高効率な製錬プロセスなどを構築するための研究開発を行う。これにより、世界に先駆けた高効率かつ省エネルギー効果の高い資源循環システムを構築する。

である。

1.1.3. 本事業の将来像

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の流出や、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ことができず、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、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

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、リサイクルで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。

#### 1.1.4. 政策・施策における位置づけ

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。

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	・環境衛生対策	・清掃法（1954）
公害問題と生活環境の保全 埋立て地対策	・公害の顕在化 ・埋立て地対策の拡大	・廃棄物の処理及び清掃に関する法律（1970）
	・廃棄物処理施設整備の推進 ・廃棄物処理に伴う環境保全	・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）
リサイクル推進 有害物質対策	・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	・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）
3Rの推進	・循環型社会の構築	・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	・資源供給対策 ・使用済製品の資源化	・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	・資源効率の向上 ・情報活用	・循環型社会形成推進基本法 改正（2013） ・日本再興戦略 2016（2016）

図 1.4 リサイクルに関わる主な課題と法制度の変遷

出典：NEDO TSC Foresight Vol.13 より

2012年6月に行われた第15回パッケージ型インフラ海外展開関係大臣会合での「資源確保戦略」では表1.1に示す30種の戦略的鉱物資源が示され、また同じく2012年1月の中央環境審議会での「小型電気電子機器リサイクル制度の在り方」では表1.2に示すように、使用済小型電気電子機器中の有用金属含有量と国内需要量の比較として、14種類の鉱種が示され、政策的に重要な鉱物資源の定義がなされた。

表 1.1 資源確保戦略での戦略的鉱物資源 30 鉱種

アンチモン	インジウム	ガリウム	グラファイト	クロム
ゲルマニウム	コバルト	シリコン	ジルコニウム	ストロンチウム
タングステン	タンタル	チタン	ニオブ	ニッケル
バナジウム	白金族	フッ素	マグネシウム	マンガン
モリブデン	リチウム	レアアース	レニウム	鉄
アルミニウム	銅	鉛	亜鉛	すず

表 1.2 使用済小型電気電子機器中の有用金属含有量と国内需要量の比較

	国内需要量 (トン)	小型電気電子機器						
		携帯電話		パソコン				
		量(トン)	対内需	量(トン)	対内需	量(トン)	対内需	
ベ ー ス メ タ ル	鉄(Fe)	94,291,000	230,105	0.2%	418	0.0%	16,845	0.0%
	アルミニウム(Al)	4,002,000	24,708	0.6%	50	0.0%	3,914	0.1%
メ タ ル	銅(Cu)	1,763,000	22,789	1.3%	1,001	0.1%	2,730	0.2%
	鉛(Pb)	251,000	740	0.3%	19	0.0%	220	0.1%
貴 金 属	亜鉛(Zn)	489,000	649	0.1%	44	0.0%	70	0.0%
	銀(Ag)	1,870	68.9	3.7%	10.5	0.6%	21.1	1.1%
レ ア メ タ ル	金(Au)	166	10.6	6.4%	1.9	1.2%	4.5	2.7%
	アンチモン(Sb)	7,666	117.5	1.5%	2.3	0.0%	43.5	0.6%
メ タ ル	タンタル(Ta)	360	33.8	9.4%	3.2	0.9%	14.9	4.1%
	タンゲステン(W)	4,000	33.0	0.8%	27.1	0.7%	1.1	0.0%
レ ア メ タ ル	ネオジム(Nd)	7,000	26.4	0.4%	18.9	0.3%	—	—
	コバルト(Co)	16,260	7.5	0.0%	2.2	0.0%	—	—
レ ア メ タ ル	ビスマス(Bi)	682	6.0	0.9%	0.7	0.1%	0.8	0.1%
	パラジウム(Pd)	131	4.0	3.1%	0.5	0.4%	2.1	1.6%

また、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（以下「動静脈連携」という）により金属資源を効率的にリサイクルする革新技术・システムを開発することとされている。

上記の現状認識を踏まえ、経済産業省では 2015 年 6 月に「金属素材競争力強化プラン」を策定。環境省では 2018 年 4 月には「第五次環境基本計画」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、「第四次循環型社会形成推進基本計画(2018 年 6 月)」では、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が重要であること、「循環経済ビジョン 2020(2020 年 5 月)」では、AI 技術の導入により、光学選別、磁力選別、浮沈選別等の基盤技術を更に効果的かつ効率的に開発・利用していくとともに、そのための人材育成が重要であるとしている。

### 1.1.5. 技術戦略上の位置付け

本研究開発を実施する上での技術戦略上の位置付けとして、図 1.5 に NEDO 技術戦略研究センターが作成した、NEDO TSC Foresight Vol.13 に記載されている金属資源のバリューチェーンにおける課題と対応策を示す。これに示されるように、金属資源の循環に関しては廃製品の回収量をぞうかするためのスキームの構築、廃製品の中間処理での処理コストの低減、再生材の付加価値の向上、情報技術を活用した金属利用全体のコスト低減が望まれる。

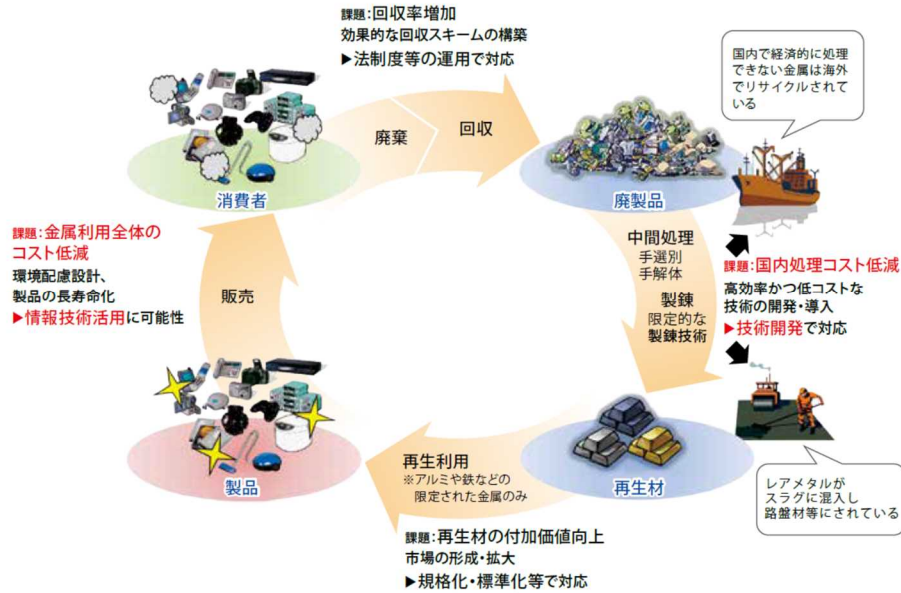


図 1.5 金属資源のバリューチェーンにおける課題と対応策

出典：NEDO TSC Foresight Vol.13 より引用

本研究開発を実施する事は、リサイクルを行う静脈側の技術課題を解決する事と、静脈側だけではなく再生された素材を用いて製品を製造販売する製品事業者も資源循環のループを構成する要素として情報技術の活用が望まれることから、TSC Foresight Vo.13 では金属資源のバリューチェーンを構築するために取り組むべき技術課題の明確化を以下の様に行っている。

#### (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。

## （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。

### 1.1.6. 国内外の動向との比較

#### ・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 1.6 のようになっている。

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。

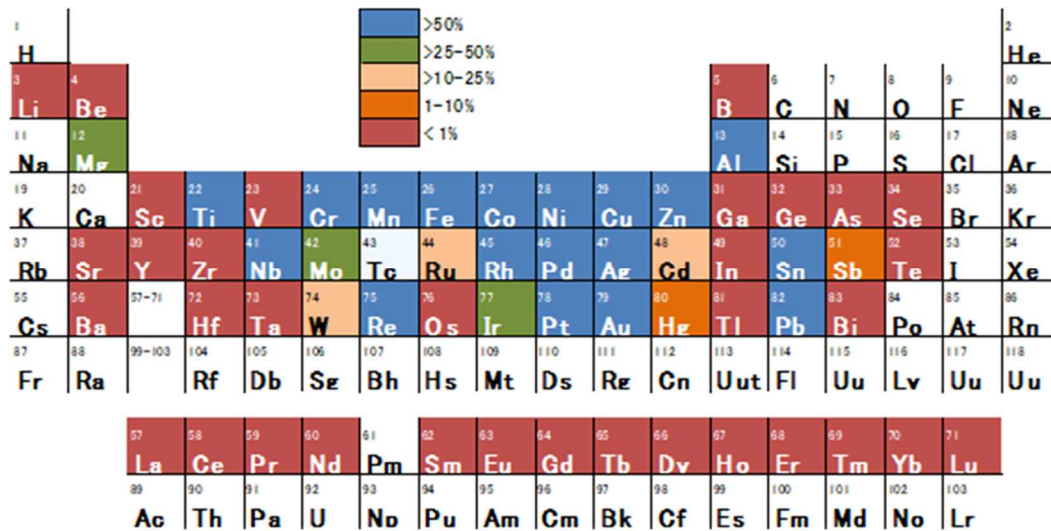


図 1.6 元素別使用済製品由来リサイクル率(世界規模)

・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。

・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。

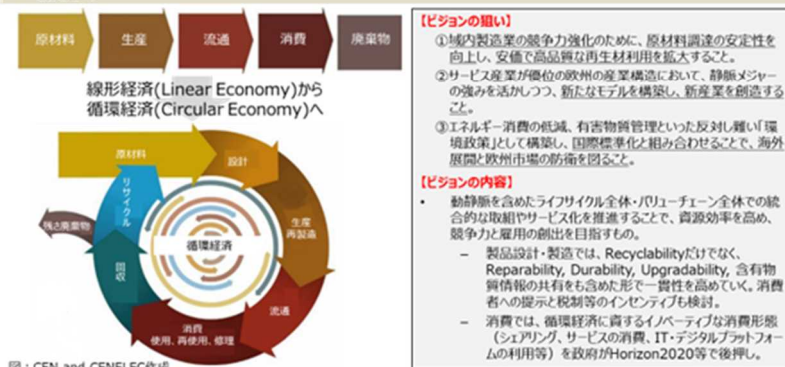


図 1.7 欧州における資源循環に関する政策

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1.3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 1.3 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	化学分離	情報連携	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、IoT <sup>®</sup> ガイン技術の開発、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€	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
<b>小計</b>		48.3M€	41.1M€	14.6M€	
<b>合計</b>		104.0M€ (124.8 億円)			

#### ・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。

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。

#### ・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。

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、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の流出や、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。

#### ・日本の動向

先に示した政策等に対応し、様々な取り組みが行われている。後に示す表 3.1 にあるように、廃電子・電気製品等からの金属リサイクルの技術開発は（国）科学技術振興機構（JST）、（独）エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）等でも進められているとともに、NEDO でも TRL レベルの高いものは助成事業として企業の事業化を支える中、基盤研究を基とした廃小型家電の分別・選別、製錬等を行う国家プロジェクトを進めた。

## 1.2. アウトカム達成までの道筋

本事業は4つの研究開発項目から構成され、それぞれに中間目標、最終目標を設け研究開発を実施した。最終目標はこののち表 2.1 に示すが、本事業の各研究開発成果とアウトカム達成までの道筋を図 1.8 に示す。

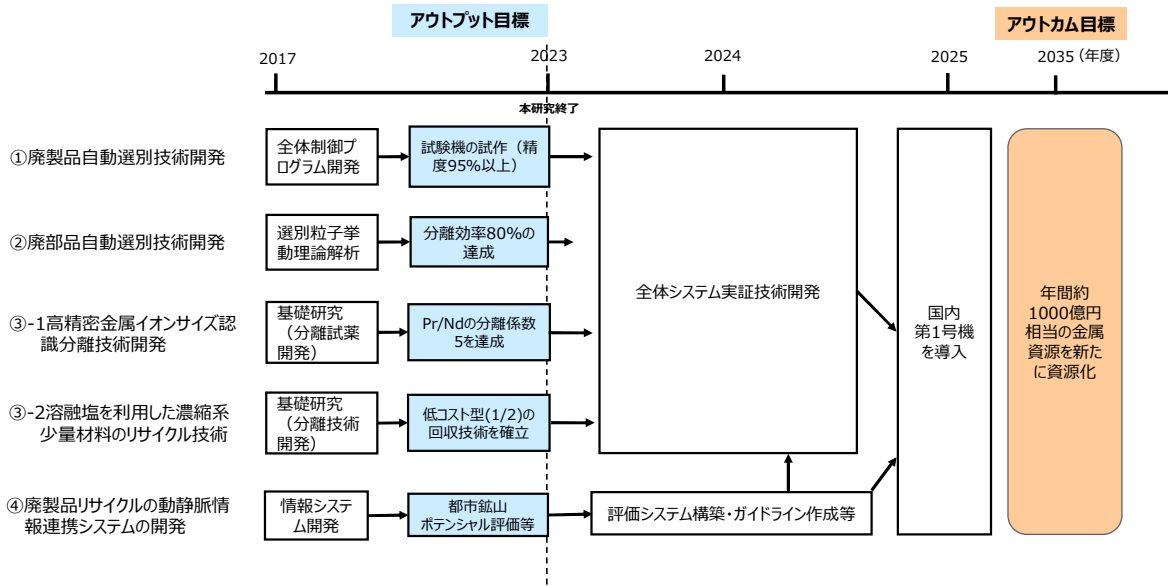


図 1.8 本事業のアウトカム達成までの道筋

この図に示す通り、4つの研究開発項目を実施し、最終目標を2023年度末に達成する事で全体システム実証技術開発のフェーズに移行し、数年このフェーズで実証を行った後、国内のリサイクラーの事業拠点に国内での第一号機を導入する予定である。この第一号機を皮切りに日本全土にこのシステムを展開し、アウトカムである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する技術開発成果として社会実装することを計画した。

## 1.3. 知的財産・標準化戦略

本事業を始めるにあたり、注目する分野、知財創出のキーワード等を実施者が決め、知的財産の取得に取り組んだ。また、

- ・知財として確保することが有利な技術に関しては積極的に特許として出願する
- ・ノウハウとして保有することが有利な技術に関しては出願しない
- ・バックグラウンド特許を中心として権利化の範囲を広げる

に注意しながら知的財産の創出に取り組んだ。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ー派遣事業に採択され、2019年4月より、NEDOプロジェクト専属の知財プロデューサー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た。その結果、本事業では23件の特許の出願を達成した。表 1.4 に示すように、研究開発項目毎での知財委員会を開催し、着実に特許の出願へとつなげた。

表 1.4 特許創出のための知財委員会開催状況

研究 開発 項目	注目する 分野	知財創出 の キーワード	バックグラウンド特許	知財委員会 (開催回数)					
				2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
①	リサイクル	ソーティング、 センシング	小型電気製品の識別方法及び選別装置 (特許 5988242)	0	0	6	7	5	-
②	リサイクル	バルク選別、 自動化	タンタルコンデンサのリサイクル方法(特許第 5267992) 粒子選別機(特許第 5862763) 磁選機(特許第 5892670)	0	6	4	6	6	-
③-1	・精錬技術 ・リサイクル	湿式製錬、 溶媒抽出、 イオン交換、 沈殿分離	・希土類元素の吸着材及びその回収方法 (特許第 6103611 号) ・希土類イオンの高精密相互分離法 (特許第 6829805 号)	1	7	14	5	2	5
③-2	リサイクル	熔融塩、電 解、希土類	希土類金属の回収方法、熔融塩電解装置及びバイポーラー電極型隔膜 特許 6823314 希土類金属の回収方法 特許 5504515	4	15	8	10	13	17
④	リサイクル	項目①②と 同様	項目①②と同様	-	-	-	-	0	7



## 2. 目標及び達成状況

### 2.1. アウトカム目標及び達成見込み

#### 2.1.1. アウトカム目標の設定及び根拠

本事業は基本計画にアウトカム目標を記載している。アウトカム目標はアウトプット目標を達成する事により、事業終了後実証期間を経てアウトカムへとつなげていくものであり、本事業のアウトカム目標は以下となる。

#### 【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。

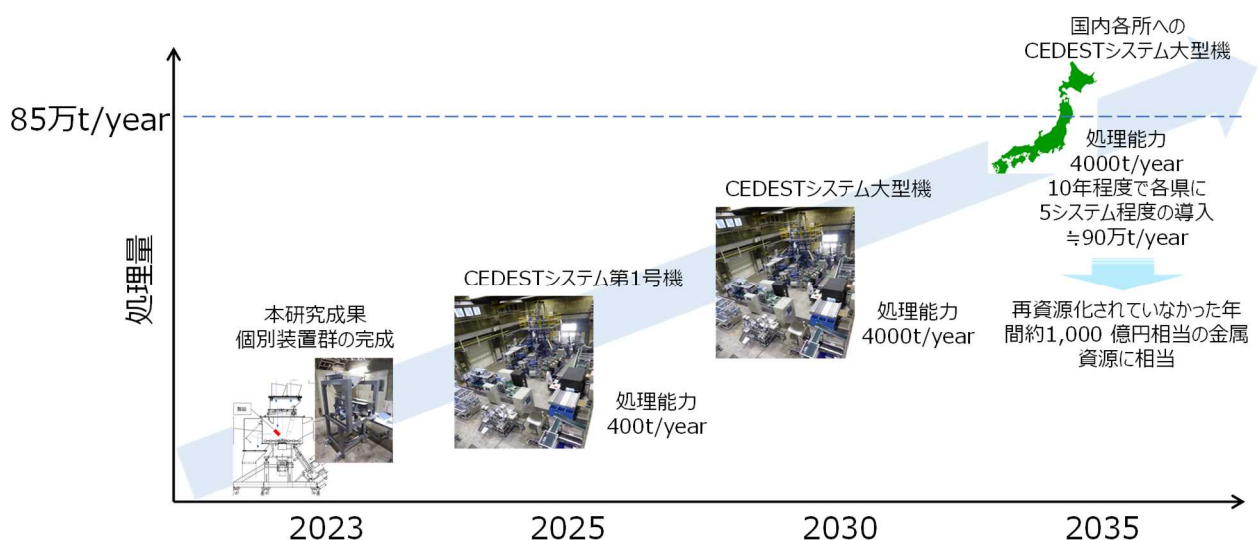
このアウトカム目標を達成するための根拠は以下になる。

「小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会（環境省）」の報告書より、一般廃棄物由来の金属くずの最終処分量とその金額は3.9万トン/年、170億円/年となることがわかる。また、「廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用量実態調査報告書（環境省）」の報告書から、一般廃棄物、産業廃棄物等由来の金属くずの最終処分量は85万トン/年であることがわかる。さらに最終処分となる金属資源のうち、微細な金属粉等となることにより回収できないものがあることから、最終処分される金属資源の回収効率を30%と想定した。

これらより、

$$85 \text{ 万トン/年} \div 3.9 \text{ 万トン/年} \times 170 \text{ 億円/年} \times 30\% \approx 1,000 \text{ 億円/年}$$

とした。本事業でのアウトカム達成の見通しを図2.1に示す。



事業終了の2023年3月の時点での研究開発成果である、個別の分解、解体、選別等に関わる装置群の完成を見て、2025年にはCEDETシステムと称する小型家電製品のリサイクルシステムを国内のリサイクル事業者サイトに導

入する。この時点での CEDEST システムの処理規模は 400 トン/年を見込んでいる。その後 2035 年までの間に処理能力向上を図り、CEDEST システム大型機では 4000 トン/年を見込む。この大型機を日本の 47 都道府県に各 5 台程度を設置することで、約 90 万トン/年の処理能力が得られる。この 90 万トン/年は先に述べた一般廃棄物、産業廃棄物等由来の金属くずの最終処分量は 85 万トン/年を上回る能力となり、アウトカム目標の達成を見込めるものである。

### 2.1.2. 波及効果

この事業では波及効果として直接的な効果として国内のリサイクラーへの設備導入を想定した効果を予想している。先のアウトカム目標の達成見込みから、2035 年には CEDEST システム大型機が国内リサイクラーに設置されることを想定したが、システムの価格は 30 億円程度を想定しており、2035 年までの 10 年間をかけて 200 台程度を全国に設置することを想定している。このことから、1 年で 20 台程度の大型機が設置されることになり、

$$30 \text{ 億円} \times 20 \text{ 台/年} = 600 \text{ 億円/年}$$

を直接的な経済効果と想定した。

また、間接的ではあるが、電子部品等に用いられる金属のリサイクルが行われることにより、年間 7000 億円程度の電子回路産業への波及、また希土類磁石産業でも年間 600 億円程度の市場への波及効果があると想定した。

### 2.1.3. 本事業における実用化の考え方及び見込み

本事業はこれまでにない製品選別、部品選別、高効率製錬、小型電子機器に関するリサイクルを行うもので、各研究開発項目は基盤研究からいしされるものである。そのため本事業は事業終了時に本研究開発成果である様々な装置群がリサイクル事業者や、関連装置開発事業者により利用が開始されることとするため、基盤研究の成果である装置群がリサイクルプラント等で実用出来る状態にするものである。そのため、本事業では実用化が事業の成果となり、その成果を基に数年を掛けて事業化へと進むことを想定したものである。

このような実用化を目指す中、本研究開発成果である装置群を事業終了後にリサイクル実施者のプラントで試験運転の開始を想定しており、実用化は達成される見込みである。

### 2.1.4. 費用対効果

後の表 3.2 本事業の研究開発項目別の研究開発費用（億円）にも掲載するように、2017~2022 年度までの本事業の研究開発の総費用は 28.7 億円である。これに対し、アウトカムで想定している再資源化されていなかった金属資源のリサイクルでの利用により 1000 億円を見込んでいることから、十分な費用対効果があると見込む。

## 2.2. アウトプット目標及び達成状況

### 2.2.1. アウトプット目標の設定及び根拠

#### ・研究開発項目①廃製品自動選別技術開発

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がリサイクル事業者へのヒアリングでわかっている。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。

#### ・研究開発項目②廃部品自動選別技術開発



従来技術では電子素子選別の分離効率は 50%を超えることが困難である。本研究開発項目では多種の電子素子の回収に対し、各電子素子の選別物性シミュレーションにより、既存選別機を最適制御する高性能な選別機開発を目指すものである。これにより、従来よりも高い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。

・研究開発項目③高効率製錬技術開発

鋳型分離については、最終目標として設定した分離係数 5 を達成すると、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目的元素以外の希土類の多少の混入は大きな問題にならない。そのため、使用上問題無いと思われる下限値として 80%を最終目標として設定した。

・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

2つの政策文書、「小型電気電子機器リサイクル制度の在り方(2012年1月)」、「資源確保戦略(2012年6月)」を基に、小型電気電子機器に含有される代表的な 14 鉱種から、資源確保の観点で重要視されている 30 鉱種の範囲も見据え、20 鉱種を選定することを最終目標として設定した。また、「小型電気電子機器リサイクル制度の在り方(2012年1月)」に記載されている「1年間に使用済みとなる小型電気電子機器の台数・重量と有用金属含有量」の有用金属金額データから、廃小型電気電子機器の有用金属総金額の 90%以上の回収を見込むためには上位 22 位までが対象となる。実際には、解体性や、市場での回収性も考慮しなければいけないので、有用金属金額ベースで 90%程度を回収するために上位 22 位までの製品を意識しながら 30 種を選定することを最終目標として設定した。

## 2.2.2. アウトプット目標の達成状況

本事業の研究開発項目4つのアウトプット目標（最終目標）の達成状況、今後の課題等を以下に示す。

表 2.1 最終目標に対する成果と今後の課題

研究開発項目	最終目標	成果	計画との差異	今後の課題と解決方針
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"> <li>・廃製品選別～自動解体～モジュール選別のベンチスケールシステムを完成</li> <li>・廃製品選別における品目認識～個体認識（資源価値判定）までの処理速度 0.48 秒以内/製品・個を達成</li> <li>・自動解体～モジュール選別の処理速度 26 秒以内/台（人手の 10 倍の処理速度）を達成（従来の人手による解体・選別の処理速度 5 分/製品・個と試算）</li> </ul>	○ 2022 年 3 月 最終目標達成	各要素技術について目標とした性能を達成したが、個別装置の処理速度にはばらつきがあることから、ボトルネックとなる部分の高速化や処理ラインの複線化等を検討し、プラントイメージを明確化する。
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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ベンチスケールの部品剥離装置を開発</li> <li>・4 種選別機のシミュレータを開発</li> <li>・金属 22 種のマテリアルフロー分析</li> <li>・静脈プロセスのシミュレーションモデルの構築</li> <li>・7 種選別機で構成する自動選別システムのベンチスケール機を開発</li> <li>・分離効率 80% 以上で廃部品の自動選別を達成</li> <li>・7 種選別機で構成する自動選別システムの電子素子選別シミュレータを開発</li> </ul>	○ 2022 年 3 月 最終目標達成	実操業で自動運転（無人運転）を行うためには、長時間トラブルなくシステムを稼働させることが必要である。長時間運転、大量処理運転を行った場合の課題を実証試験により抽出し、改善を行う。
③-1 高効率製錬技術開発（鋳型分離技術）	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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・プラセオジム（原子番号 59）とネオジム（原子番号 60）間で分離係数 5 以上が得られる分離試薬を開発</li> <li>・重希土類相互分離について、高い分離係数を示す抽出剤構造を特定</li> </ul>	○ 2023 年 3 月 最終目標達成	本プロジェクトにおいて従来型抽出剤を上回る分離係数を有する新規重希土類抽出剤を得た。この抽出剤の商業利用のためには、工業用溶剤への溶解性や疎水性向上といった操作性の改善、低コストで安全な合成法の確立、さらなる分離係数の向上（現状の 2 倍程度）を行う必要がある。
③-2 高効率製錬技術開発（濃縮金属部品製錬技術）	2 種類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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2 種類以上の希土類元素を純度 80% 以上で同時に分離・回収する技術を確立</li> <li>・連続化の課題であった磁石の連続供給、溶解を試作機にて実現</li> <li>・プロセス適用時のコストを従来比 1/2 以下にする見通しを立てた</li> </ul>	○ 2023 年 3 月 最終目標達成	分離性能として、純度 80% 以上という最終目標を達成した。ただ、実用化の検討過程において、現行の販売ルートに乗せるには更なる高純度化が必要と判明した。本 PJ の研究をもとに、正確な電位制御や隔膜保持方法の改善により解決する予定。
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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・小電製品 30 種の製品フロー分析</li> <li>・金属・製品別の都市鉱山ポテンシャル評価とリサイクル対象の提示</li> <li>・リサイクルの環境負荷低減効果の算定</li> <li>・廃製品リサイクルコスト評価システム構築</li> <li>・1,000 台規模の廃小家電を用いた模擬連続運転試験を完了</li> <li>・動脈企業提供情報のレベル（ケース 1,2）に応じて装置稼働性を検証し、選別処理フローを構築</li> <li>・実証試験に向けた装置各部の改造及び機能最適化検証を完了し、実証試験プランを構築</li> </ul>	○ 2023 年 3 月 最終目標達成	リサイクル対象鉱種・製品を選定において、情報連携強化による分析の精緻化と社会変化への即応性の向上を行う。また、自動・自律型リサイクルプラントについては、実連続運転試験による実証試験を通じて、プラントシステム全体の処理性能の確認、経済性の評価、安全性の確認を行う。

本研究での4つの研究開発項目の全てで、最終目標を達成し基盤技術を構築する事が出来た。今後の社会実装に向けて、例えばリサイクル装置群での長時間運転での動作確認を行うなど、見出された課題の解決を進める。

### 2.2.3. 研究開発成果の意義

本事業の研究開発項目4つの研究開発成果とその意義を以下に示す。

表 2.2 研究開発成果と意義

研究開発項目	研究開発による具体的な成果物	成果物の意義
① 廃製品自動選別技術開発	廃製品選別～自動解体～モジュール選別に至る一連の処理プロセスを構成する試作装置群とその制御ソフトウェア。廃製品分類の基礎となる資源価値 DB、製品構造 DB、試作装置を稼働する際に必要な DB（製品画像等）。損傷 LIB の発火・発熱特性に関する実験検証に基づく知見など。	DB を駆使した対象製品の効率的な解体・選別と最大価値の取得を目的とする多品種小ロット的なリサイクル方式の先駆的な研究成果であり、静脈側の将来的なニーズに合致している。各種試作装置の開発と実験検証を通じて、実用化に向けてさらに効率化が求められる箇所や低コスト化が可能な箇所等を把握するとともに、開発プロセスの安全性を担保する上で有効な知見を獲得した。
② 廃部品自動選別技術開発	部品剥離～廃部品自動選別に至る一連のベンチスケール装置群とその制御システム。また、部品剥離に必要な基板構造 DB、部品選別に必要な選別特性 DB、4 種選別機のシミュレータ。7 種選別機で構成する廃電子素子自動選別システムの最適選別条件を計算する電子素子選別シミュレータ。さらに、22 種の金属資源の国内フロー分析、選別技術の環境負荷算定のためのインベントリデータ、離散事象モデルに基づく静脈中間処理プロセスのシミュレーションモデルに基づく技術進展のシナリオ評価など。	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。また、マテリアルフロー分析の対象鉱種と解像度を、電気電子製品由来の都市鉱山ポテンシャルを評価可能なレベルまで発展させた。
③ 高効率製錬技術開発 (鑄型分離技術)	軽希土類元素の高効率な相互分離を可能にする有機配位子、抽出剤、吸着剤及びそれらを中心に用いた希土類元素の分離方法を得た。 重希土類元素（テルビウム／ジスプロシウム）に対して、従来型分離剤より高い分離係数を示す抽出剤を得た。	重希土類元素であるテルビウム／ジスプロシウム分離は、高性能磁石の需要増加が予測される中で喫緊の課題である。本事業で開発された重希土類分離用抽出剤は、従来型抽出剤を上回るテルビウム／ジスプロシウムの分離係数が得られている。
③ 高効率製錬技術開発 (濃縮金属部品製錬技術)	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できる電解装置を作製。合金隔膜の設計指針や、ラボから試験炉レベルの運転ノウハウを得た。	現在の希土類磁石は多段かつ高コストなプロセスでリサイクルされているため、市中に出回った磁石は廃棄または海外流出している。これに対し、単一工程での高効率リサイクルという世界に類を見ないプロセスを開発し、コストを 1/2 以下にする目標を立てた。これは、従来技術に対する大きなアドバンテージであり、国内リサイクル実現の可能性を示したものである。
④ 廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発	小電製品、金属資源の国内フローの将来推移を分析による廃製品の都市鉱山ポテンシャルを算定。それらの資源自給への寄与や輸入資源の供給リスクに基づく、リサイクル対象の検討手法。LCA による選別技術の環境負荷低減効果を算定。廃製品のリサイクルコスト評価システムを構築。また、廃製品情報（型式、外寸、筐体切断位置）を記載した RFID タグ利用による廃製品選別システム。画像データから製品情報を収集する方法。将来の製品・部品変動に伴う選別システムへの影響検証。 さらに、廃製品・部品の自動・自律型リサイクルプラントの実証設備プランを構築。	都市鉱山ポテンシャルと資源リスクを考慮したリサイクル優先鉱種の選定が、マテリアルフロー分析の対象範囲の拡大やエビデンスベースの資源リスク評価手法開発により初めて実現した。廃製品リサイクルコスト評価モデルは、効率的なリサイクルプロセス設計に貢献すると期待できる。LCA は資源安全保障とサステナビリティを両立した資源循環を担保するのに不可欠である。 また、RFID タグを活用したスマートフォンの自動選別、自動解体システムを世界に先駆けて開発した。 さらに、製品変動が著しい小型デジタル家電において、製品変動が選別システムに及ぼす影響を評価することは、将来にわたって選別精度を維持し、システムを長期間使用するためには不可欠である。

### 2.2.4. 副次的成果及び波及効果

本事業の研究開発項目4つの副次的成果と波及効果を以下に示す。

表 2.3 副次的成果と波及効果

研究開発項目	副次的成果
① 廃製品自動選別技術開発	X線撮影による「弱点形成制御システム」の成果に対して、近年社会問題になっている LIB による火災事故を防止する観点から多種多様な廃製品の内部に残留する LIB の確認手段に利用できないかとの問い合わせが、外部のリサイクル事業者から寄せられ、プロジェクト内でも一部検討した。「SURE コンソーシアム」のリサイクル技術セミナー及び SURE アカデミーにて講演を実施、企業技術者等への成果普及、啓発に努めた。プロジェクト参画機関の若手・中堅技術者、研究者のオンザジョブトレーニングとして人材育成にも貢献した。
② 廃部品自動選別技術開発	「SURE コンソーシアム」にて年 3 回のリサイクル技術セミナーを実施。動脈産業事業者、静脈産業事業者、研究者、学生などにリサイクル技術を普及。 また、物理選別技術の将来の日本の指導者育成を目的とした「SURE アカデミー」を開講。 2018 年 11 月 開講記念公開講座として、NEDO プロの開発概念をベースとした未来志向の技術展開を講義。
③ 高効率製錬技術開発	本プロセスにより希土類の国内リサイクルが可能となれば、電気自動車や風力発電等の普及に多大なる波及効果を持つ。また、卒業論文 8 件、修士論文 7 件のテーマとしても実施され、当該分野の人材育成にも貢献した。
④ 廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発	上記、項目①②と同様。

### 2.2.5. 特許出願及び論文発表

本事業の 2023 年 3 月 14 日時点での特許出願数、論文発表数、新聞雑誌等への掲載の結果を表 2.4 に示す。

表 2.4 特許出願及び論文発表等の件数

	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	計
特許出願 (うち外国出願)	0 (0)	0 (0)	5 (0)	7 (0)	6 (0)	1 (0)	19 (0)
論文	2	3	6	9	13	10	43
研究発表・講演	20	32	21	19	22	28	141
受賞実績	1	0	0	0	1	1	3
新聞・雑誌等への掲載	2	20	0	4	0	5	31
展示会への出展	0	0	0	0	0	0	0

本事業では、バックグラウンド特許を基に、知財の創出等を行い、19 件の特許出願、それ以外にも論文、研究発表も精力的に行った。

### 3. マネジメント

#### 3.1. 実施体制

・NEDO が実施する意義

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。

表 3.1 に示す資源循環関連事業の中で 5 は本事業に関する先導研究である。他機関で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て長期的に行うための研究開発事業を 5 の項目の先導研究を基に国家プロジェクト化し事業を進めた。

表 3.1 資源循環関連事業

項目	実施機関	プロジェクト名	期間	事業タイプ	事業内容
1	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 ~2024	基礎 応用研究	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端的な「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
2	JOGMEC	金属資源の生産技術に関する基礎研究	2016~	基盤研究	レアメタル等を対象とした、採鉱技術、選鉱・精錬技術、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
3	NEDO	希少金属代替材料開発プロジェクト	2012 ~2013	補助事業	希少金属の代替技術、使用量低減技術に係る技術開発
4	NEDO	希少金属代替省エネ材料開発プロジェクト	2014 ~2015	補助事業	希少金属の代替技術、使用量低減技術に係る技術開発
5	NEDO	情報技術を活用したレアメタル等金属を高効率にリサイクルする革新プロセスの開発	2015 ~2016	先導研究	動脈産業-静脈産業が連携を深め、天然鉱山と価値競争できる金属資源循環の基盤を構築するため、製品の資源配慮設計指針や、都市鉱山ポテンシャルの推計手法の確立、手作業を一掃する自動自律型都市鉱山や少量多品種製錬を実現するための要素技術の確立を目指す。

本研究開発は以下に示す 3 つの観点からも NEDO がもつこれまでの知識、実績を活かして推進すべき事業であると考えられる。

- ・資源価値の高い小型家電等の廃製品のリサイクルに関わる問題の解決は国の方針に沿った重要課題であり、本事業による各種金属資源の循環並びに CO2 排出量の削減は社会的必要性が高い。
- ・NEDO ではこれまでに培ってきた各種素材のリサイクル技術の開発で得た知見や成果、ネットワークを活用し中長期的な技術開発を行うことが可能
- ・研究開発の難易度が高く、必要な投資規模が大きく、また実用化までのリードタイムが長いことから、民間企業だけではリスクが高い。

## ・実施体制

### (1)実施体制の決定

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。また、2021年度には廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発についての公募を行った。

### (2)実施体制及び役割分担

プロジェクトマネージャーにNEDO環境部主任研究員今西大介を任命して、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した。また、国立研究開発法人産業技術総合研究所環境創生研究部門副研究部門長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た。また各研究チームにはチームリーダーを配置し研究開発の推進を図った。

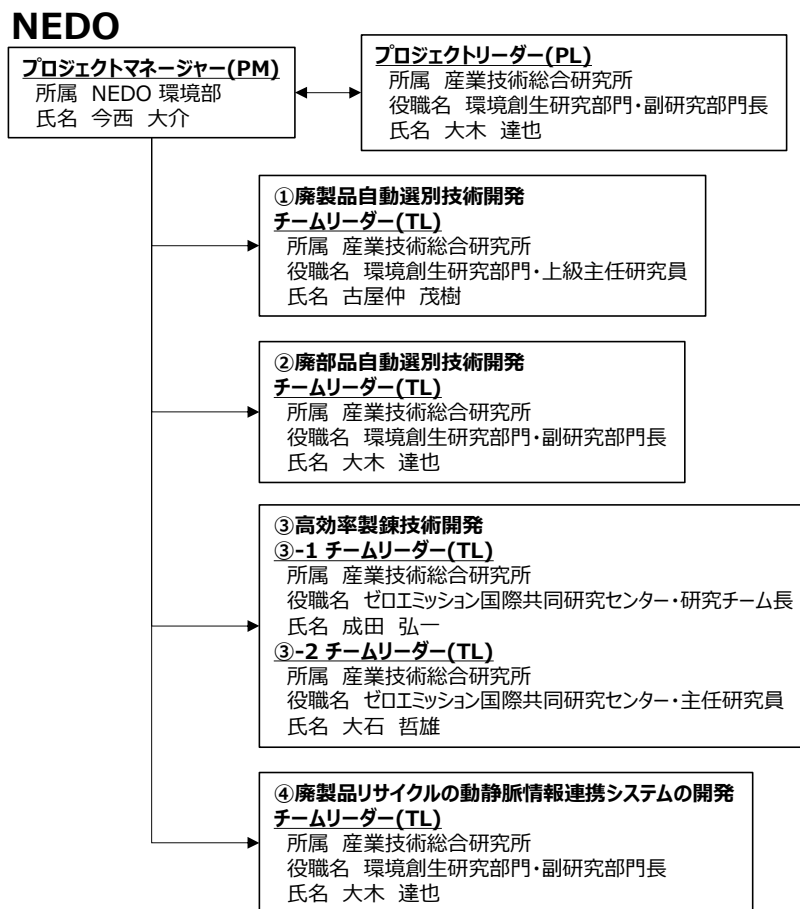


図 3.1 本事業の実施体制

本プロジェクトの開発促進のために2018年6月には、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3.2)。CEDESTでは、主として研究開発項目①②④の参画機関が募り、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、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①②④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の材料フロー、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。

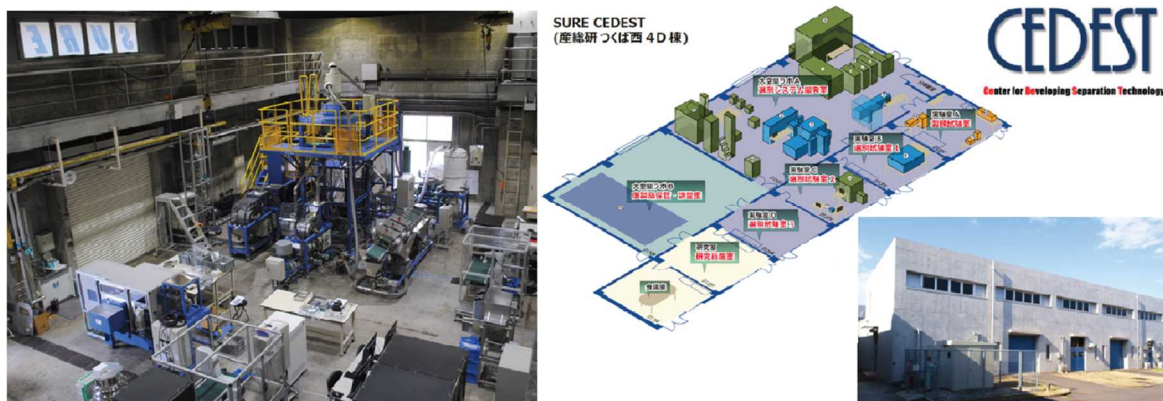


図 3.2 本事業の集中研究施設 CEDEST

### 3.2. 受益者負担の考え方

表 3.2 本事業の研究開発項目別の研究開発費用（億円）

研究開発項目	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	合計
①廃製品自動選別技術開発	1.5	1.8	1.8	2.0	1.1	-	8.2
②廃部品自動選別技術開発	1.6	1.6	2.2	1.8	1.1	-	8.3
③高効率製錬技術開発	1.3	1.5	1.2	1.8	2.0	2.0	9.8
④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発	-	-	-	-	0.2	2.2	2.4
合計	4.4	4.9	5.2	5.6	4.4	4.2	28.7

毎年4～5億円の予算を確保しつつ、事業の状況を実施者とも相談しながら予算の調整を行い、6年間で総額28.7億円の事業を進めた。

### 3.3. 研究開発計画

先に述べた様に、本研究開発は4つの研究開発項目から構成された。①と②の研究開発項目は製品の自動選別と部品の自動選別であり、製錬につながる前処理の工程として一貫したプロセスを構築する事になり、強い連携が望まれるものである。さらに④では一貫したプロセスを応用した資源循環での動静脈の情報連携に関わる検討を行うために、廃製品への様々付加情報を基にした検討を実施した。また製錬の研究開発は回収された部品の中でもレアアースを含有するものを主な対処として、高効率な製錬が出来るものとした。製錬の方式としても、破碎された廃部品を原料とする鑄型分子を用いた製錬と、金属材料である廃磁石を原料とした溶融塩を用いる電解製錬の技術となる。

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
研究開発項目①	製品ソータ研究開発 自動解体装置研究開発 モジュールソータ研究開発	ベンチスケール試作機開発	ベンチスケール試作機開発	試作機改良、DB拡充 条件最適化、DB拡充 条件最適化、DB拡充	統合試作機開発	最終目標	
研究開発項目②	部品剥離装置研究開発 選別装置自動制御技術研究開発 TF選別システム研究開発	ベンチスケール試作機開発	ベンチスケール試作機開発	試作機改良 条件最適化 試作機改良	統合試作機開発		
研究開発項目④				動静脈連携の検討 ・委託調査	リサイクル対象選定 統合試作機の最適化		
研究開発項目③-1	鑄型分離メカニズム解析 新規配位子合成手法検討 従来型分離法での基本検討	新規配位子合成手法確立	新規配位子合成手法確立	分離工程の要素技術最適化 合成手法の最適化 新規分離材の合成、コスト試算			
研究開発項目③-2	合金隔膜の長寿命化研究開発 分離性向上検討	ラボ機試作分離条件最適化	ラボ機試作分離条件最適化	ラボ機改良、条件最適化検討、連続操業実施 他元素への適用検討 複数元素の同時制御技術開発			
評価時期			中間評価				終了時評価

図 3.3 本研究開発の研究計画

#### ・研究開発テーマ①～③の研究開発体制

これらの研究開発項目は2017年の事業開始時に公募採択されたもので、産業総合技術研究所を研究開発の中心に据え、リサイクラーの大栄環境、破碎装置等の開発では佐藤鉄工、リチウムイオン電池の回収ではリーテム、金属の製錬に関しては三徳、DOWA エコシステム、日本原子力研究開発機構、京都大学、大阪大学、佐賀大学が機能的に配置された研究開発体制を構築した。

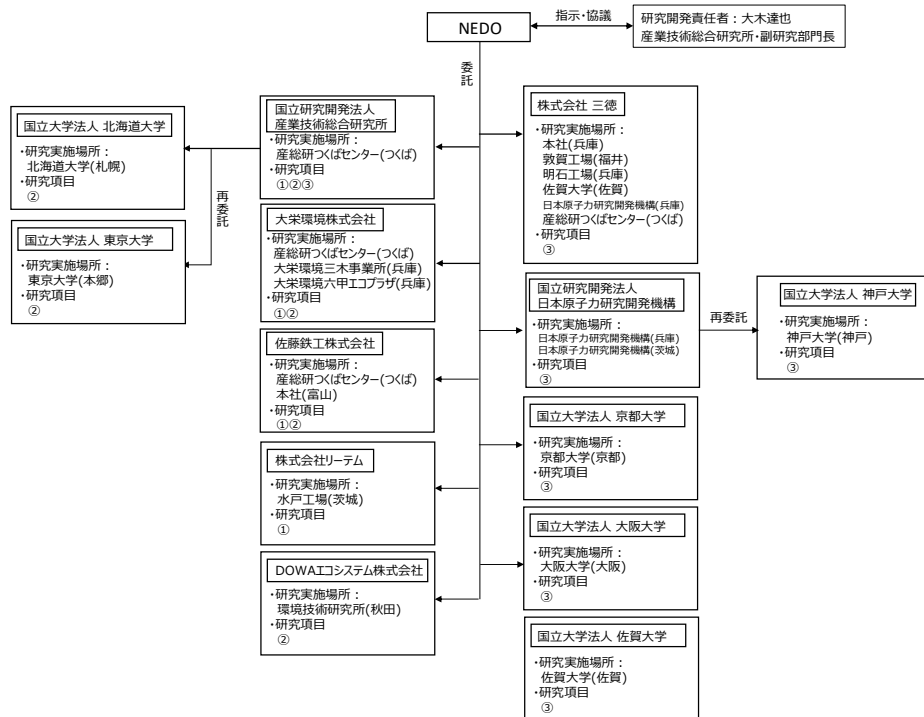


図 3.4 研究開発項目①、②、③の研究開発体制



・研究開発テーマ④の研究開発体制

この研究開発項目は 2021 年度に公募採択されたもので、産業総合技術研究所を中心として実施体制を構築した。特に、研究開発項目①、②の成果を最大限活用し、動静脈連携の検討が可能な体制とした。

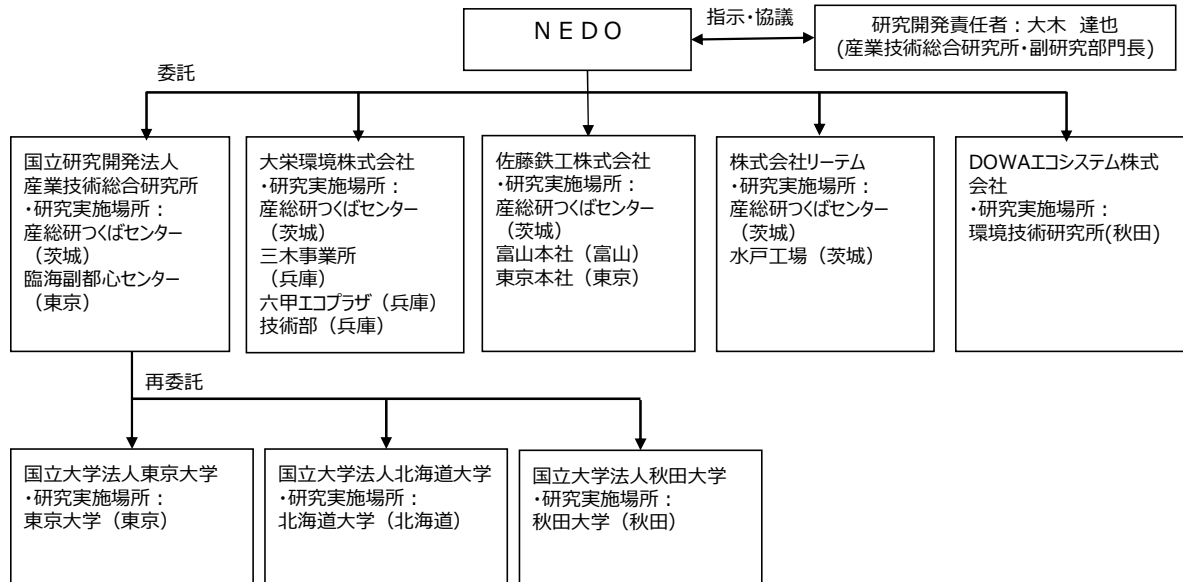


図 3.5 研究開発項目④の研究開発体制

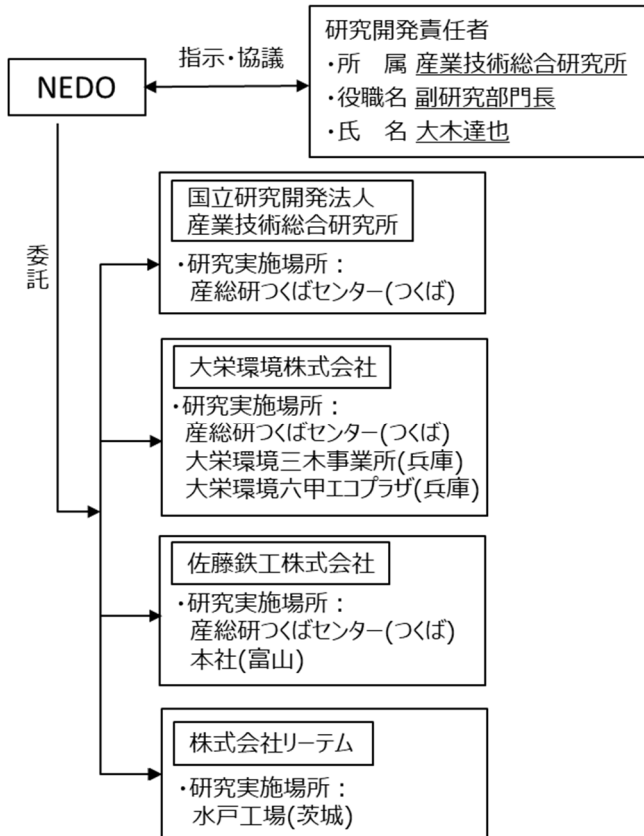
図 3.4、3.5 に示すように、研究計画を実施する体制を構成し、研究開発を進めた。



## 4. 目標及び達成状況の詳細

### 4.1 研究開発項目①「廃製品自動選別技術開発」

#### ✓ 実施者名、実施体制



#### ✓ 期間、予算

期間：2017年7月31日～2022年3月31日

予算（単位：億円）

年度	2017	2018	2019	2020	2021	2022	合計
研究開発項目①	1.5	1.8	1.8	2.0	1.1	－	8.2

#### ✓ 実用化への道筋

研究開発項目①、②、④での道筋を、研究開発項目④においてまとめて記載する。

✓ **アウトプット目標の達成状況**

大分類	中分類	小分類（要素技術）	目標と達成状況（当初計画との差異）
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	自動認識アルゴリズム 開発、システム統合技 術開発	目標：廃製品 3 品目に対して処理速度 0.5 秒/製品・個以内、 品目認識正解率 95%以上（破壊・変形のある製品を含む）、個 体認識成功率 90%以上（破壊・変形のない製品） 達成状況：○ 計画通り達成（当初計画では対象 3 品目（スマ ホ、携帯電話、デジカメ）であったが、期間中にビデオカメラ、携帯ゲー ム機、小型タブレットを加えた 6 品目に拡大）
	①-1-(B) 製品 データベース管理 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	目標：廃製品 3 品目について各 100 機種以上を資源価値 DB に登録 達成状況：○ 計画通り達成（最終的に 6 品目計 648 機種を DB 登録）
	①-1-(C) 供 給・搬送システ ムの開発	単品排出機構、自動 整列機構	目標：3D 画像認識による整列状態判定とロボット動作制御による リジェクト品の循環ラインを構築 達成状況：○ 計画通り達成（6 品目に対応した供給・搬送シス テムを開発）
①-2 自動解体装置の研究 開発	製品構造 DB の構築		目標：廃製品 3 品目について各 100 機種以上を DB 登録 達成状況：○ 計画通り達成（最終的にビデオカメラ、小型タブレ ットを加えた 5 品目計 513 機種を DB 登録）
	筐体解体技術の開発		目標：廃製品の構造上の弱点に変形を集中させる選択的破壊作 用に基づく筐体解体技術を開発 達成状況：○ 計画通り達成（スマホ及び小型タブレット用筐体 解体システム、弱点形成制御システムを開発）
①-3 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		目標：①電池、②プリント基板、③未解体物、④金属材、⑤その 他の 5 クラスの自動認識精度 90%以上 達成状況：○ 計画通り達成

✓ **成果の意義**

DB を駆使した対象製品の効率的な解体・選別と最大価値の取得を目的とする多品種小ロット的なリサイクル方式の先駆的な研究成果であり、静脈側の将来的なニーズに合致している。各種試作装置の開発と実験検証を通じて、実用化に向けてさらに効率化が求められる箇所や低コスト化が可能な箇所等を把握するとともに、開発プロセスの安全性を担保する上で有効な知見を獲得した。

✓ **副次的成果及び波及効果**

研究開発項目①、②、④での副次的成果及び波及効果を、研究開発項目④においてまとめて記載する。

✓ **特許出願数、論文発表数**

年度	2017	2018	2019	2020	2021	2022	合計
特許出願数	0	0	3	2	6	－	11
論文発表数	0	0	1	2	2	－	5
学会発表・講演数 <sup>*1</sup>	0	4	6	4	5	－	19
新聞・雑誌等への掲載数 <sup>*1</sup>	0	0	0	0	0	－	0
シンポジウム・セミナー主催 <sup>*1*2</sup>	4	4	2	4	3	－	17

\*1 学会発表・講演、新聞・雑誌等への掲載、シンポジウム・セミナー主催は成果の普及に資する活動である。

\*2 シンポジウムは研究開発項目①②③合同での主催のため、研究開発項目①②③それぞれで計上。

セミナーは研究開発項目①②合同での主催のため、研究開発項目①②それぞれで計上。

✓ **研究開発成果の詳細**

**(1)研究開発項目①「廃製品自動選別技術開発」**

使用済小型家電製品のリサイクル施設には、国内外のメーカーが長年にわたって生産した、サイズ、形状、材質、構造などが異なる製品が集積している。製品によって含有金属の価値、筐体や電池の固定方法などの解体特性、リチウムイオン電池による発火などの取り扱い上の危険性が異なるため、まとめて同じ処理を行うことは非効率であり、特性の近い製品をあらかじめ選別(グループ化)してそれぞれ異なる処理を施すことが合理的である。本研究開発項目では、現在、人手作業が多用されているこうした廃製品の資源価値や解体特性に応じた選別作業や解体作業を、自動化する技術の開発を目的として、小型デジタル家電製品 6 品目(スマートフォン、携帯電話、デジタルカメラ、ビデオカメラ、携帯ゲーム機、小型タブレット端末)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」)の開発を実施した。

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 4.1-1 に研究開発項目①における研究項目と最終的に構築した処理フローの模式図を示す。

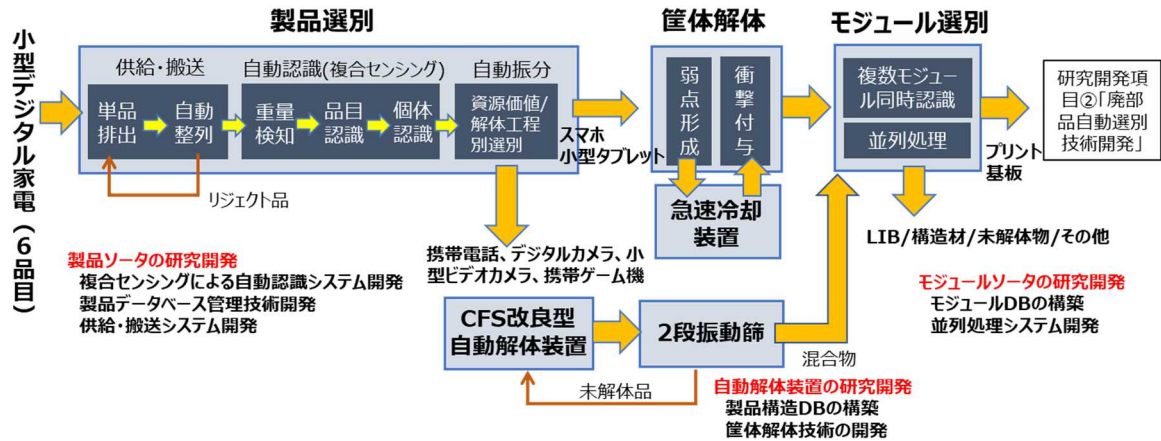


図 4.1-1 研究開発項目①における研究項目と最終的に構築した処理フロー

### (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。後期 2 年間では、ビデオカメラ、小型タブレット端末、携帯ゲーム機及び破壊・変形のある廃製品を対象に追加し、0.5 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 95%以上、個体認識成功率 90%以上(破壊・変形のない製品を対象)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」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、2020 年度からは小型タブレット端末と携帯ゲーム機を追加)とする各種識別アルゴリズムの開発を実施した。図 4.1-2 に 2021 年度末時点の製品ソータ試験用モジュールの構成を示す。廃製品試料がコンベヤ式重量計、3D 計測部、2D 計測部を順に通過した後直ちに 5 台の PC からなるローカルネットワークにより、廃製品の品目と型式(個体)を自動認識して、製品データサーバ(PC4)に登録している資源価値(元素成分データ)や解体性(構造データ)の違いに基づいた選別が可能である。また、製品データ管理システム(PC5)に計測したデータや識別結果の書き込みを行うことで、後述の「装置間データリンクシステム」を経由した CEDEST 内でのデータ共有が可能である。



図 4.1-2 製品ソータ試験モジュールの構成

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

(品目認識)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(CNN)に入力する識別アルゴリズムを新たに開発した。廃製品がベルトコンベヤ上でランダムな配置となった場合でも常に各画像の中心部付近に定方向・定位置に再配置する前処理を行った後、2D カラー画像と 3D 画像(背景部分の画素値に廃製品の密度計算値を組み込み)を融合した 4ch 画像(高さ情報を透過度で表現)を、2 段階の深層畳み込みニューラルネットワーク(VGG16)に入力して画像データを品目ごとに分類する。図 4.1-3 に、新開発のアルゴリズムによる廃製品 6 品目 1723 機種に対する品目認識(画像分類)の結果の例を示す。本図に示すように、1 段階目の 4 クラス分類での正解率(再現率)98.5%、2 段階目の 8 クラス分類で正解率 93.7%、2 段階目にスマホと携帯電話についての 2 分類を行わない品目認識 6 分類では、97.3%の正解率を得た。これにより、「品目認識正解率 95%以上」を達成した。なお、破壊・変形のある未学習のスマホを用いた場合の品目認識正解率は 98%となることを確認した。

(個体認識)品目認識に用いる VGG16 モデルの最終層の一つ手前の層の出力ベクトルを特定の機種が映っている画像に「固有かつ軽量」なデータみなして、過去に蓄積した全機種のベクトルデータと試験サンプルとのベクトルデータのユークリッド距離を総当たりで計算し、この距離が最も短くなった機種を「照合機種」として抽出する。また、これに加えて、製品ソータの PC1 で取得した 8 次元ベクトル(重量および 7 種類の 3D 特徴量を正規化)についても同様の距離計算を行い、2 通りの照合結果の重み付け・組合せ方法を品目毎に最適化し、品目認識の結果に応じて使い分ける個体認識アルゴリズムを開発した。図 4.1-4 に、このような画像照合と寸法・重量照合の組合せによる個体認識結果を示す。3D カメラの高さ方向の計測レンジを超える機種が多くみられたビデオカメラを除くと、いずれも個体認識成功率は 90%を超えており、目標とした「個体認識成功率 90%以上」を達成した。

廃製品のランダムな配置 → 定方向・定位置に自動変換



表 品目認識1段目(4クラス分類)

試料	機種数	識別回数	正解数	再現率(%)
スマートフォン	601	2404	2362	98.3
携帯電話	581	2324	2315	99.6
デジタルカメラ ビデオカメラ	432	1728	1696	97.5
小型タブレット/ 携帯ゲーム機	109	436	418	95.8
計	1723	6892	6791	98.5

1機種につき4回(表面2、裏面2) 識別

表 品目認識1段目+2段目(8クラス分類)

試料	機種数	識別回数	正解数	再現率(%)
スマートフォン 冷却要	213	852	818	96.0
スマートフォン 冷却不要	388	1552	1423	91.7
携帯電話 電池有	439	1756	1721	98.0
携帯電話 電池無	142	568	445	78.3
デジタルカメラ	385	1540	1496	97.1
ビデオカメラ	47	188	135	73.3
小型タブレット	65	260	250	96.1
携帯ゲーム機	44	176	168	95.4
計	1723	6892	6456	93.7

1機種につき4回(表面2、裏面2) 識別

目標 品目認識(6クラス分類)再現率: 97.3%  
「品目認識再現率95%以上」を達成

図 4.1-3 2D/3D/重量データ融合に基づく画像分類による品目認識結果

深層畳み込みニューラルネットワーク(CNN) 画像分類型

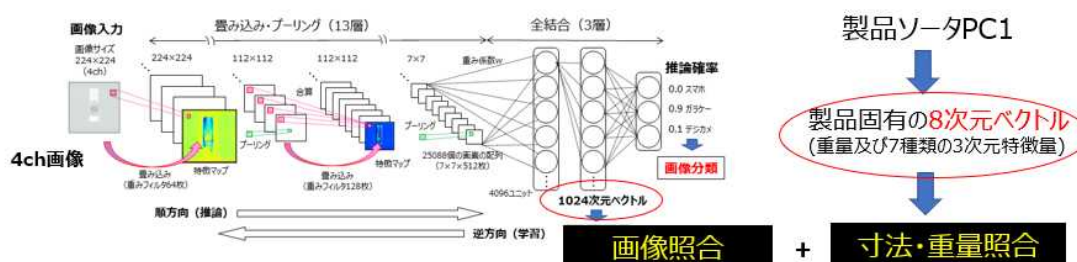


表 個体認識実験結果の例

試料	機種数	識別回数	成功数	成功率(%)
スマートフォン	601	2404	2212	92.0
携帯電話	581	2324	2119	91.2
デジタルカメラ	385	1540	1391	90.3
ビデオカメラ	47	188	120	63.8
小型タブレット	65	260	245	94.2
携帯ゲーム機	44	176	169	96.0
計	1723	6892	6256	90.8

2通りの照合結果の重み付け・組合せ方法を  
品目毎に最適化。品目認識の結果に応じて  
使い分ける個体認識アルゴリズム(新開発)

目標「個体認識成功率90%以上(破壊・変形のない製品を対象)」を達成

ビデオカメラは3Dカメラの撮影可能範囲(高さ50mm以下)を超える  
機種が多数あり、データ再現性が低下するため、正解率が上がらず

1機種につき4回(表面2、裏面2) 識別

図 4.1-4 画像照合と寸法・重量照合の組合せによる個体認識結果

### c. システム統合技術開発

製品ソータ及び後段の自動解体、モジュール選別、部品剥離、部品選別を含む、システム全体の構成機器をリアルタイムで監視し、機器の稼働状況及び故障検知を表示する装置間データリンクシステムを開発した。図 4.1-5



に装置間データリンクシステムのフロー図を示す。これにより、システム全体の異常を即時発見し、異常の原因を容易に特定することで、迅速な復旧が可能となった。

装置間データリンクシステムは三菱電機製の「SA1-Ⅲ」を用いた制御システムで、設定を変更することで、ワークステーションから機器の運転、停止信号を構成機器に出力することができる。CEDEST システムの構成機器の内、自動解体工程の CFS 型解体機と部品剥離工程の部品剥離機について、ワークステーションからの運転、停止が可能であることを確認した。

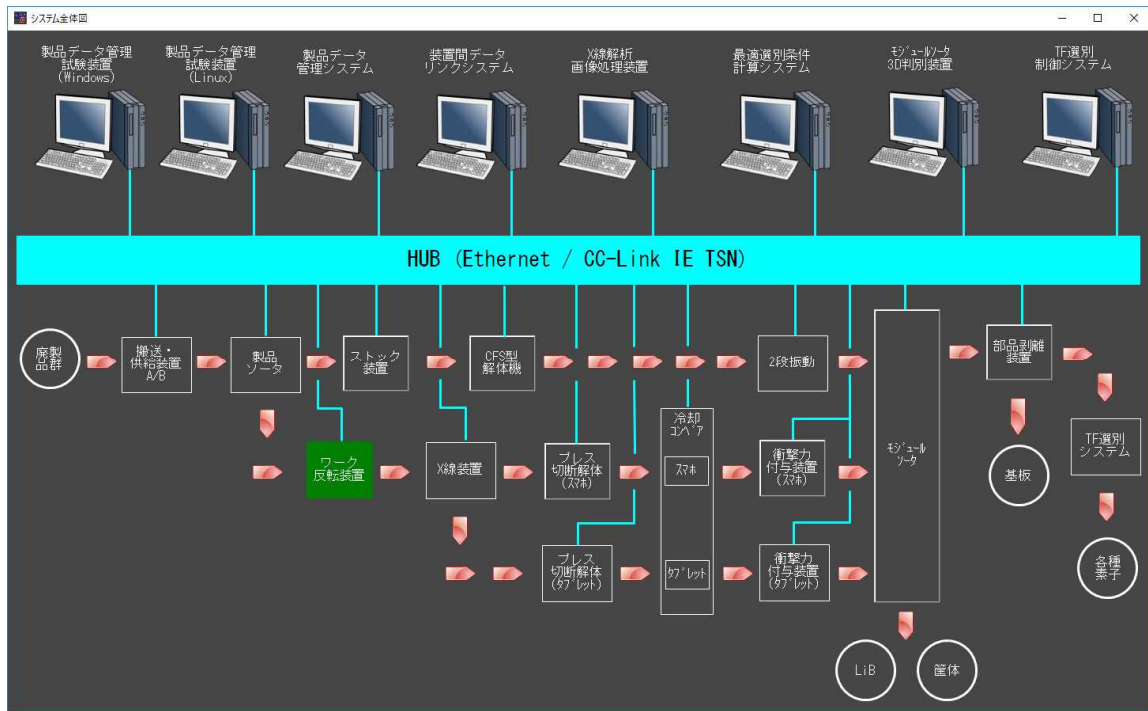


図 4.1-5 装置間データリンクシステムフロー図

製品ソータで識別した携帯電話、デジカメ、小型ビデオカメラ、携帯ゲーム機は後段の自動解体工程でバッチ式解体機に供給する必要がある。そこで本研究では製品の仕分け、貯留、定量供給を行う解体製品ストック・供給装置を開発した。さらに、製品データ管理システムから品目別バッファに製品を振り分ける信号を受信し、製品ソータと連動した自動仕分けシステムを構築した。

解体製品ストック・供給装置に貯留した製品は貯留台数及び重量の管理により、規定貯留量に達するとバッファのゲートが開き、後段の解体プロセスへ自動供給される仕組みとなっている。

製品ソータで識別したスマホ、タブレットについては製品データ管理システムから出力される振分信号を製品ソータに付属のラインチェンジャーで受信し、品目ごとの自動選別及び専用解体プロセスへ自動供給するシステムを開発した。製品ソータと解体製品ストック・供給装置間による自動仕分けシステムのフローを図 4.1-6 に示す。

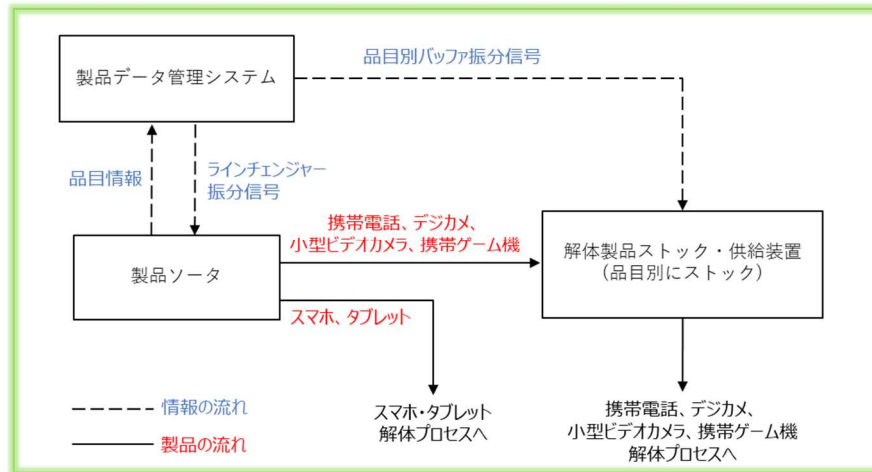


図 4.1-6 自動仕分けシステムフロー図

### (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。廃製品 3 品目(スマートフォン、携帯電話、デジタルカメラ)について各 100 機種以上を資源価値 DB に登録する。

#### ■ 研究開発の成果

##### a.製品 DB の構築

製品の基本情報(品目、メーカー名、型式、発売年、寸法、重量、写真等のデータ)を登録した製品 DB を構築した。登録したデータ数は、最終的(2022年3月時点)に廃製品 6 品目 3236 機種(スマートフォン 821 機種、携帯電話 506 機種、デジタルカメラ 1647 機種、ビデオカメラ 68 機種、タブレット 156 機種、携帯ゲーム機 38 機種。カタログデータのみで現物を収集していない機種を含む)となった。これにより、登録目標とした 3 品目(スマートフォン、携帯電話、デジタルカメラ)各 300 機種を達成した。

##### b.装置稼働 DB の構築

装置稼働 DB は製品ソータで測定した 3D/2D/4ch 画像、3D 特徴量、重量値を DB 化したものであり、実際に現物を収集した機種のうち、寸法、重量が製品ソータの搬送部(ベルト幅 220 mm)適合しており、特に大きな破損がない個体を DB 登録した。型式が重複する機種を除いた装置稼働 DB 登録数は、最終的(2022年3月時点)に廃製品 6 品目 1723 機種(スマートフォン 601 機種、携帯電話 581 機種、デジタルカメラ 385 機種、ビデオカメラ 47 機種、小型タブレット 65 機種、携帯ゲーム機 44 機種)となった。

##### c.資源価値評価 DB の構築

資源価値評価 DB では、プリント基板及び筐体金属・金属カバーに含有する主要 37 元素の重量を ICP 発光

分析と XRT 分析で測定し機種ごとの資源価値を算出して DB 化した。登録したデータ数は、最終的に廃製品 6 品目 498 機種(スマートフォン 168 機種、携帯電話 105 機種、デジタルカメラ 124 機種、ビデオカメラ 30 機種、小型タブレット 25 機種、携帯ゲーム機 16 機種)となった。これにより、登録目標とした 3 品目(スマートフォン、携帯電話、デジタルカメラ)各 100 機種を達成した。機種ごとの元素データは、SQL 形式のデータベースとして製品ソーラの製品データサーバに登録した。

#### d. 部品実装プリント基板の資源価値評価

廃小型家電製品の資源価値は、大部分が内部のプリント基板にあるため、資源価値 DB を構築する際には基板に含まれる元素組成を把握することが重要である。主要元素の分析には、基板粉碎後に蛍光 X 線分析等の比較的簡易な方法で可能であるが、微量元素については、手間のかかる ICP 発光分光分析や ICP 質量分析を、基板の種類ごとに実施する必要がある。そこで、基板の 2D 画像から搭載素子の種類とサイズ、個数を高精度に自動計測できれば、各素子の元素分析データに基づいて、基板全体の元素組成をより簡便に認識することが可能となると着想し、搭載素子の中で資源価値の占める割合が 8 割を超える IC・メモリとコネクタの、上面面積の和を自動計測するアルゴリズムを 2 種類開発した。1 つはルールベース画像処理に基づき、素子毎の外観特徴(色、サイズ、形状)に着目して、比較的単純な画像処理を順次行うものであり、基本構造は次の通りである。

(特徴色の成分分布に基づくカラー二値化)→(平均化フィルタリングと穴埋めによる輪郭の抽出)→(長辺サイズ・アスペクト比・稠密度に基づくフィルタリングによる粒子の抽出)→(抽出粒子の個数・面積・位置の計測)

まずは、廃デジタルカメラ中の基板に搭載されている IC・メモリとコネクタの上面面積の和が、廃デジカメの総資源価値と正相関にあることを示した。上記のアルゴリズムに基づいてプログラムを作成し、廃デジカメ基板 46 種類に対して検出試験を実施した結果、IC・メモリ(長辺サイズ 5 mm 以上)およびコネクタ(全サイズ)を正しく検出した割合(個数ベース)はそれぞれ 84.1%、86.0%であった(表 4.1-1)。外観が類似しているトランジスタやダイオードを、IC・メモリとして誤検出するケースが多く、誤検出率は 28.9%に達した。コネクタについては基板の穴やコネクタ固定具と誤検出され、22.8%であった。ルールベース画像処理に基づくアルゴリズムにおいては、設計者が二値化やフィルタリングの範囲を適切に設定する必要があり、主に非対象の類似素子が存在すること、同種の素子であっても範囲がメーカーや年式、使用年数、汚れ等の影響によって多様であること等に起因し、特定種類の素子のみを確実に検出することが困難であることが分かった。

表 4.1-1 廃デジカメ基板画像中 IC・メモリおよびコネクタに対する検出試験結果(ルールベース画像処理)

素子種類	ルールベース 画像処理	実装 個数	検出率 [個数%]	誤検出率 [個数%]	誤検出の例
IC・メモリ (長辺5 mm以上)		107	84.1	28.9	トランジスタ ダイオード
コネクタ (全サイズ)		115	86.0	22.8	基板穴 コネクタ固定具

開発したもう 1 種類のアルゴリズムは、深層学習ネットワークに基づき、基板の 2D 画像から予め学習した IC・メモリとコネクタと類似した素子を検出するものであり、代表的な深層学習ネットワークである ResNet(2015 年に Microsoft Research が開発、畳込み層数が 50 の ResNet50 使用)を採用した。

廃デジタル基板 46 種類の 2D 画像を用いた検出試験の結果、IC・メモリおよびコネクタの検出率はそれぞれ 90.7%、93.3%であり、ルールベース画像処理の場合と比較して良好であった。誤検出率は大幅に抑えられ、それぞれ 7.6%、11.8%を示し、より有効な検出方法であることが分かった(表 4.1-2)。誤検出はやはり外観の類似した素子に対して起こり、IC・メモリに対してはトランジスタやダイオード、コネクタにはポートやインダクタであった。

表 4.1-2 廃デジタル基板画像中 IC・メモリおよびコネクタに対する検出試験結果(深層学習)

素子種類	深層学習 (ResNet50)	実装 個数	検出率 [個数%]	誤検出率 [個数%]	誤検出の例
IC・メモリ (全サイズ)		107	90.7	7.6	トランジスタ ダイオード
コネクタ (全サイズ)		120	93.3	11.8	ポート インダクタ

この結果に基づき、基板の 2D 画像を入力すると、深層学習ネットワークを用いて IC・メモリ、コネクタを検出し、それらの上面面積の和より資源価値の推定までを自動で行う、資源価値推定プログラムも作成した(図 4.1-7)。

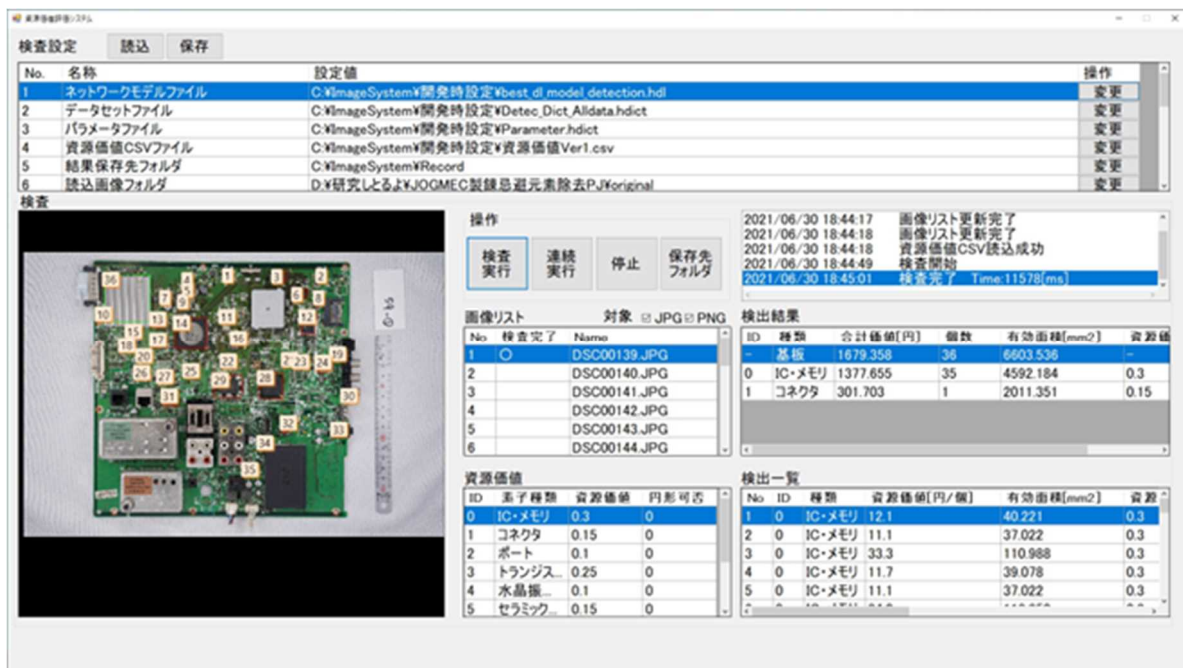


図 4.1-7 資源価値推定プログラム画面

#### e.ラベル情報を利用した廃 LIB 種類の自動選別

LIB に貼付されているリサイクルマークの下には「Li-ion○○」との表示があり、「○○」には LIB 種類を表す 2 桁の識別番号が入る。左の番号は使用されている最大含有金属、右はリサイクル阻害金属を示しており、それぞれ以下の通りである。

最大含有金属：0：Co、1：Mn、2：Ni、3：Fe

リサイクル阻害金属：0：なし、1：Sn 1.0wt%超、2：P 0.5wt%超

ここでは LIB の種類に応じたリサイクルを促進するため、廃 LIB の 2D 画像より当該識別番号を自動で読み

取るためのアルゴリズムを開発した。まず、2D 画像からリサイクルマークまたは「Li-ion」表示を検出し、その後  
に識別番号部分を OCR(光学文字認識)で読み取る 2 段階で構成される。リサイクルマークおよび「Li-ion」  
表示の検出にはテンプレートマッチング法と、深層学習ネットワーク(ResNet50)を用いた方法の 2 つを比較し  
た。結果を表 4.1-3 に示す。前者では廃 LIB サンプルの画像 107 枚から全て検出するのに必要なテンプレ  
ート画像は 15 枚(14%)で済んだが、検出に 1217 ms を要した。検出後、リサイクルマークの下部、または  
「Li-ion」表示の右部に対して OCR を行うことで、識別番号を正しく認識することができた。一方、検出に  
ResNet50 を用いた場合、99 枚のリサイクルマークと「Li-ion」表示を学習した上で 22 枚を用いてテストし、  
検出時間 0.1 s 以下でリサイクルマークを 100%、「Li-ion」表示を 95.5%の精度で正しく検出することが  
できた(誤検出はリサイクルマーク 1 件のみ(4.5%))。したがってモジュールソータ後段への本アルゴリズムの実  
装を考える場合、深層学習ネットワークを用いた検出が有効であることが分かった。

表 4.1-3 リサイクルマークまたは「Li-ion」表示の検出アルゴリズムの検証



検出アルゴリズム	LIBテスト 個数	100%検出に 必要テンプレ数	検出時間 [ms/個]	
テンプレートマッチング (  or <b>Li-ion</b> 検出)	107 (100%)	15 (14%)	1217	
検出アルゴリズム	学習 個数	テスト 個数	検出率 [個数%]	誤検出率 [個数%]
深層学習 (ResNet50利用) (  検出)	99	22	100	4.5
深層学習 (ResNet50利用) ( <b>Li-ion</b> 検出)			95.5	0

### (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、単品排出機構  
と自動整列機構の 2 段階からなる専用機を新たに設計する。自動整列機構では、3D 画像認識による整列状態  
判定とロボット動作制御によるリジェクト品の循環ラインを構築する。

#### ■研究開発の成果

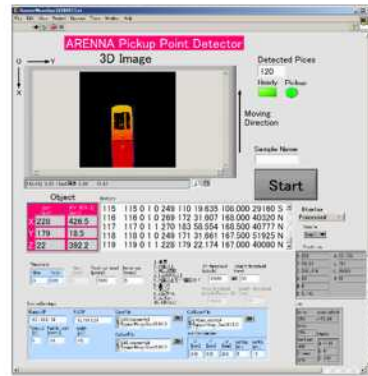
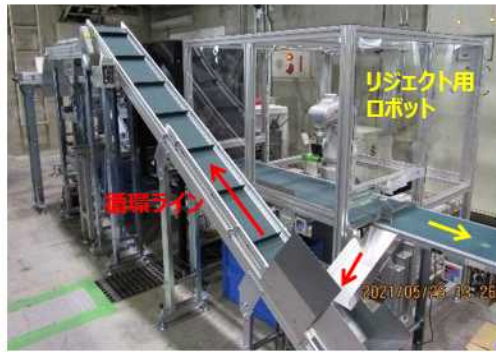
(単品排出機構)本テーマでは、まず 3D スキャナで計測した廃製品 3D 形状のポリゴンデータを用いた DEM 解  
析システムを構築した。短時間で精密な 3D 計測が可能なパターン投影方式の 3D スキャナを導入し、スマートフ  
ォン、携帯電話、デジタルカメラについて 3D 形状を計測した。検討した設計手法は、フィードの初期設計案および  
改善したい部分を入力すると、設計(CAD データ)を自動的に変更しフィード性能を DEM 解析で評価し、その評

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、閉塞しずらくなったと考えている。また、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て、DEM 解析に基づく最適化設計解析手法を構築した。以上により、廃製品の供給停止が生じにくい非対称のトレイ形状を考案・試作して振動フィーダに搭載した。また、これとは別に搬送路形状を改良したボウル型の振動フィーダを試作して、製品ソータ用の廃製品単品供給機構とした(図 4.1-8)。

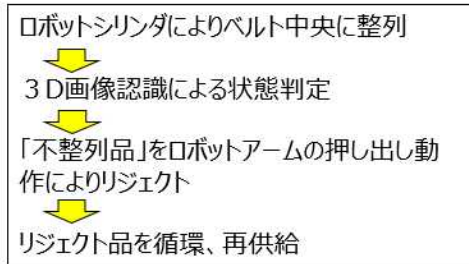


図 4.1-8 単品排出機構試作機

(自動整列機構)前段の単品排出機構だけでは、製品ソータでの「単品識別」選別に完全に適した状態に廃製品を配列することは困難であることから、3D 画像認識により、「不整列品(間隔 250mm 以下で廃製品が連なっている状態、複数台が重なり繋がった状態、折り畳み式携帯電話が開いた状態、デジカメが倒立した状態など)」を検知して、ロボットアームの押出動作でリジェクトする機構を開発した(図 4.1-9)。リジェクト品は循環ラインを経て、単品排出装置に再供給される構造とした。こうした、単品排出機構と自動整列機構によって約 500 台の廃製品を連続的に単品供給可能であることを実験で確認した。



廃製品整列状態  
自動判定プログラム  
(新開発)



自動検知が可能な「不整列品」の例  
(いずれも後段の自動認識工程において障害となる)

- 狭い間隔で廃製品が重なっている状態
- 複数台が重なり/つながった状態
- 折り畳み式の携帯電話が開いた状態
- デジカメ等が倒立した状態

図 4.1-9 自動整列機構試作機

## (1-2)自動解体装置の研究開発

### 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を構築する。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。廃製品3品目(スマートフォン、携帯電話、デジタルカメラ)について各100機種以上をDBに登録する。

#### ■ 研究開発の成果

最終的(2022年3月時点)に、スマートフォン(スマホ)243機種、携帯電話105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105機種、ビデオカメラ30機種、タブレット60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。

また、一部のスマホにおいて、リチウムイオン電池が接着剤で固定されており分離が困難であったため、急速冷却による接着剤の脆弱化及び解体性向上を検証した。筐体にリチウムイオン電池を接着剤により固定している機種を液体窒素を用いて-100℃～-30℃の間で冷却を行い、電池の分離状況及び解体性を確認した。加えて、解体時の衝撃力等による自動解体時の危険性を確認したところ、電池残量がある機種では、半数以上が50℃以上発熱もしくは発火する結果となったが、電池残量がゼロの機種では50℃以上発熱が起こった割合は1%以下であ

った。電池残量が電池の発熱・発火に大きく寄与することが明らかになった。これを受け、電池残量を減らす方法についての検討を行い、4ヶ月間スマホを放置することで約半数のスマホの電池残量がゼロになることが分かった。

## b. 筐体解体技術の開発

### ■ 目標

先導研究で見出した廃製品の構造上の弱点に変形を集中させる選択的破壊作用に基づくスマートフォン、タブレット端末向けの筐体解体機を開発する。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。

### ■ 研究開発の成果

#### (i) 弱点形成－外力付与に適した機械方式の検討

先導研究での数値解析的検討により、スマートフォン(スマホ)の安全な解体のためには、弱点形成－外力付与方式が有効であることが示された。弱点形成方式として、リサイクルプラントで要求される迅速かつ低コストな処理に適した機械方式を検討した。表 4.1-4 に挙げる4通り(プレス切断(E1)、ブレード圧入(E2)、丸刃圧入(E3)、丸刃回転(E4))の弱点形成方式を実験するための複合的外力付与試験装置を開発した。装置の外観を図 4.1-10 に示す。

4通りの弱点形成方式でスマホに弱点形成した結果を表 4.1-4 に示す。E2 及び E3 では、スマホの筐体に小さく局所的な変形が生じるにとどまり、構造上の要点である筐体固定ネジを無効化できなかったことから、弱点形成できないと判断した。E4 では、スマホの端部をグラインダで削り取ることで、筐体固定ネジを無効化して弱点形成することができたが、処理速度が遅く、粉塵が発生するため、リサイクルプラントでの実務利用には適していないと判断した。これらに対して、E1 では、筐体固定ネジを無効化し、弱点形成に成功したのに加えて、高速かつ正確な処理が可能であるため、リサイクルプラントでの実務利用に適していると考えられる。以上の実験結果から、E1 方式を弱点形成に採用した。

表 4.1-4 複合的外力付与試験装置により検討した弱点形成方式

名称	手法の概要	実験結果
プレス切断(E1)	平刃を装着した油圧シリンダにより、スマホ液晶面に垂直に、筐体の外端を切断する。	スマホの筐体固定ネジを無効化し、弱点形成に成功した。高速かつ高精度な処理が可能であるため、リサイクルプラントでの実務利用に適している。
ブレード圧入(E2)	油圧シリンダにより、スマホ液晶面に平行に、平刃をスマホ側面に圧入させる。	スマホ筐体の局所的な変形にとどまり、弱点形成に失敗した。
丸刃圧入(E3)	スマホ液晶面に平行に、丸刃をスマホ側面に圧入させる。	スマホ筐体の局所的な変形にとどまり、弱点形成に失敗した。
丸刃回転(E4)	スマホの外端を縦方向又は横方向に、グラインダにより削る。	スマホの筐体固定ネジを無効化し、弱点形成に成功した。処理速度が遅く、粉塵が発生するため、リサイクルプラントでの実務利用にはあまり適していない。



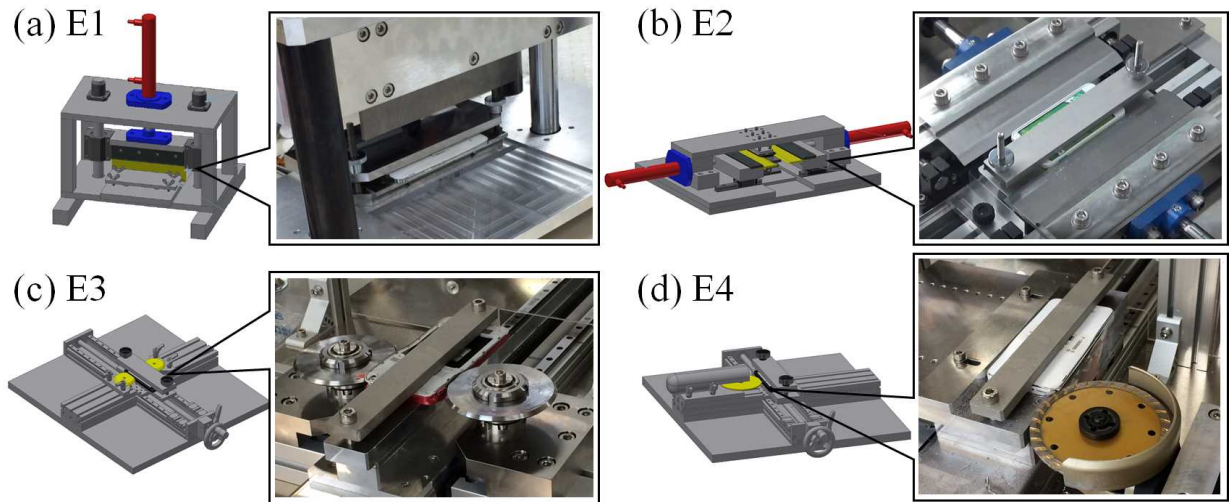


図 4.1-10 複合的外力付与試験装置：(a)プレス切断(E1)、(b)ブレード圧入(E2)、(c)丸刃圧入(E3)、(d)丸刃回転(E4)

複合的外力付与試験装置により決定した E1 による弱点形成に引き続き、外力付与の効果を検討した。様々な外力の状況が発生させて分析するため、専用の解体実験装置(解砕機)を開発した。具体的には、チェーン破碎機であるクロスフローシュレツダ(CFS)を改良して、排出口を大きくするとともに、上面及び側面にアクリル窓を設けた装置である(図 4.1-11)。通常の CFS では、短時間に多数の打撃(外力)が加えられるため、どのような打撃が破碎に効果的であったか分析が困難である。一方で解砕機は、排出口が大きいため 1～2 回の打撃でスマホが排出されるとともに、打撃の状況を高速カメラ(解体状況観測装置)で直接観測(図 4.1-11c)することができるので、打撃状況と解体結果の因果関係を明確化することができる。

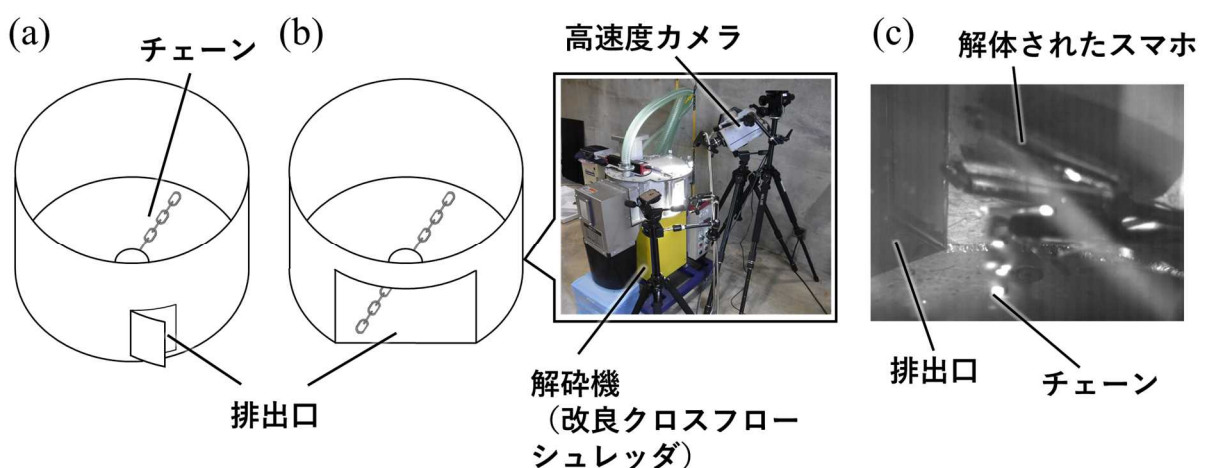


図 4.1-11 (a)一般的なクロスフローシュレツダの概念図、(b)クロスフローシュレツダ改良型である解砕機概念図、及び解砕機内部の高速カメラでの観測状況写真、(c)高速カメラでの観測例

E1 によりスマホ外端 2~3mm の位置を切断したスマホを 44 台準備した。解砕機のチェーン回転速度を表 4.1-5 に示す 4 通りとし、弱点形成済みのスマホを投入して、解体結果とチェーンによる打撃状況を分析した。本実験においては、筐体が解体されて基板が露出した状態になることを解体成功と定義した。高速度カメラにより様々な打撃状況が観測されたが、大きく分けて 3 つのカテゴリーに分類された(スマホの上下端を打撃、スマホの中央部を打撃、その他)。表 4.1-5 に、チェーン回転速度と打撃状況に応じた、解体成功率を示す。スマホの上下端を打撃した際に、解体率が大きくなることが分かった。

これらの複合的外力付与試験装置を利用した実験により、スマホの外端をプレス切断により弱点形成した後に、スマホの上下端に打撃を加える方式が有効であることを見出した。

表 4.1-5 プレス切断(E1)により弱点形成したスマホの解砕機による解体実験結果

チェーン回転速度	スマホの上下端を打撃	スマホの中央部を打撃	その他
1715 rpm	90% (9/10)	22% (2/9)	100% (1/1)
2287 rpm	100% (1/1)	-	0% (0/1)
2858 rpm	100% (2/2)	25% (2/8)	9% (1/11)
3430 rpm	-	100% (1/1)	-

#### (ii) 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。本装置を含むスマホ解体システムを図 4.1-12 に示す。まず、スマホの内部構造はメーカーや機種によって千差万別であるため、スマホを透過 X 線撮影することにより内部構造を可視化し、深層学習のセマンティックセグメンテーション(以降、AI)により、バッテリーとネジを識別する(図 4.1-12①)。バッテリーを傷つけず、なるべくネジを無効化する位置に、プレス切断による弱点形成を行う(図 4.1-12②)。弱点形成済みのスマホを冷却し、一部機種で使用されているバッテリーと筐体間の接着剤を無効化する(図 4.1-12③)。最後に、スマホの上下端に打撃を加えることで、スマホを解体する。

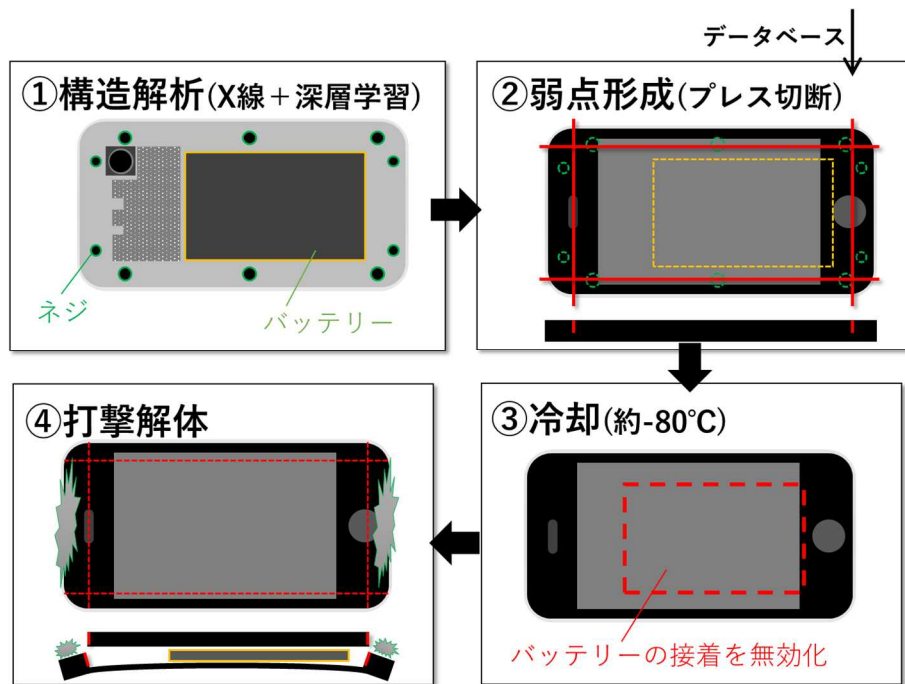


図 4.1-12 スマホ解体システムの概念図

X線撮影には、インライン撮影可能な透過X線撮影装置を使用した。④-2-2節で後述する透過X線撮影とAIを組み合わせた手法により、スマホの内部構造を可視化して、バッテリー及びネジを識別する(図 4.1-13)。バッテリーを傷つせず、なるべく多くのネジを無効化するように、スマホ側面の4辺と平行な弱点形成位置が計算される。

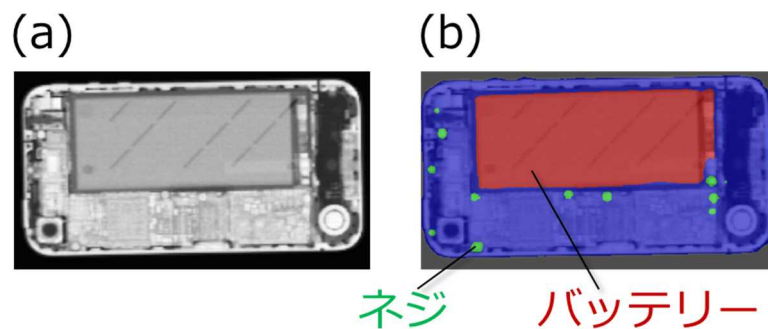


図 4.1-13 (a)スマホの透過X線像、(b)AIによる内部構造分析

弱点形成位置解析結果に基づき、スマホにプレス切断により弱点形成する筐体破壊試験装置を開発した(図 4.1-14)。図 4.1-14 に示す通り、以下の処理が行われる。本装置に投入されたスマホの厚みが自動計測され、まず指定された切断幅及び切り込み深さで長辺方向にプレス切断を行う。続いて、進行方向を90度変更し、指定された切断幅及び切り込み深さで短辺方向にプレス切断を行う。弱点形成済みのスマホの例を図 4.1-14(c)に示す。

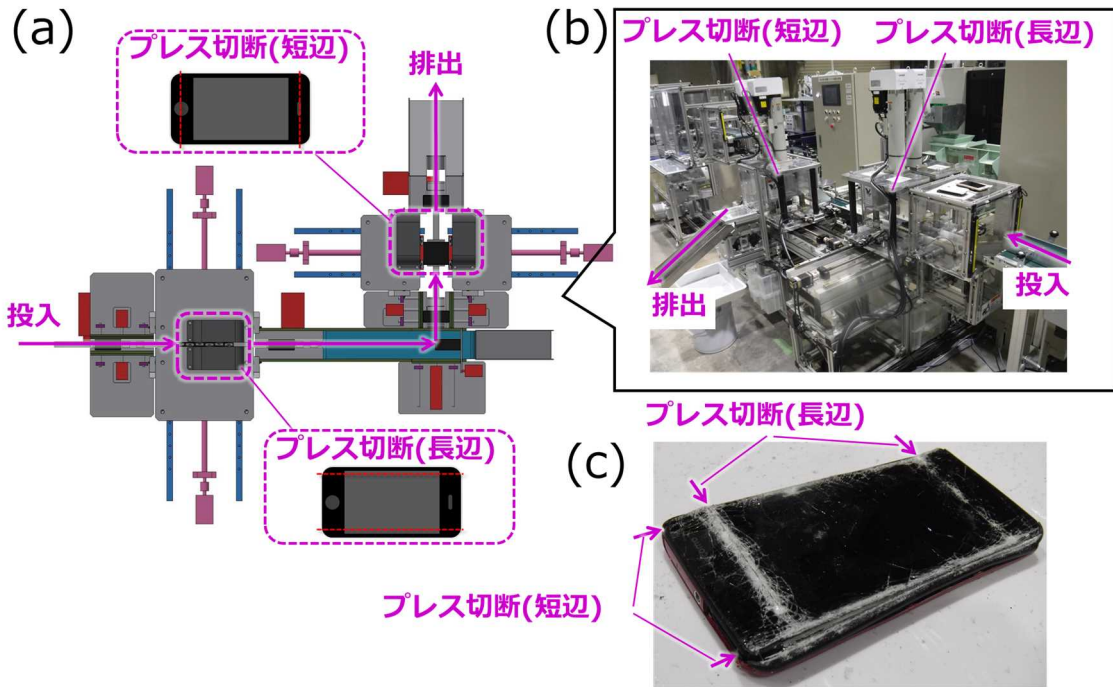


図 4.1-14 筐体破壊試験装置の概要：(a)概念図、(b)装置写真、及び(c)弱点形成済みスマホ

弱点形成されたスマホを冷却し、バッテリーと筐体を接合している接着剤を無効化した後に、打撃を加えるための筐体解体衝撃力付与装置を開発した(図 4.1-15)。図 4.1-15 に示す通り、以下の処理が行われる。投入されたスマホは装置内のベルトコンベアで搬送され、ワーク設置位置に配置され、バネの力を利用した回転ハンマーにより打撃される。ハンマーヘッドは、U 字形状をしており、スマホの上下端に打撃を加える。打撃されたスマホは、前方に弾き飛ばされた後に落下して、排出される。図 4.1-15(c)に解体済みスマホの例を示す。

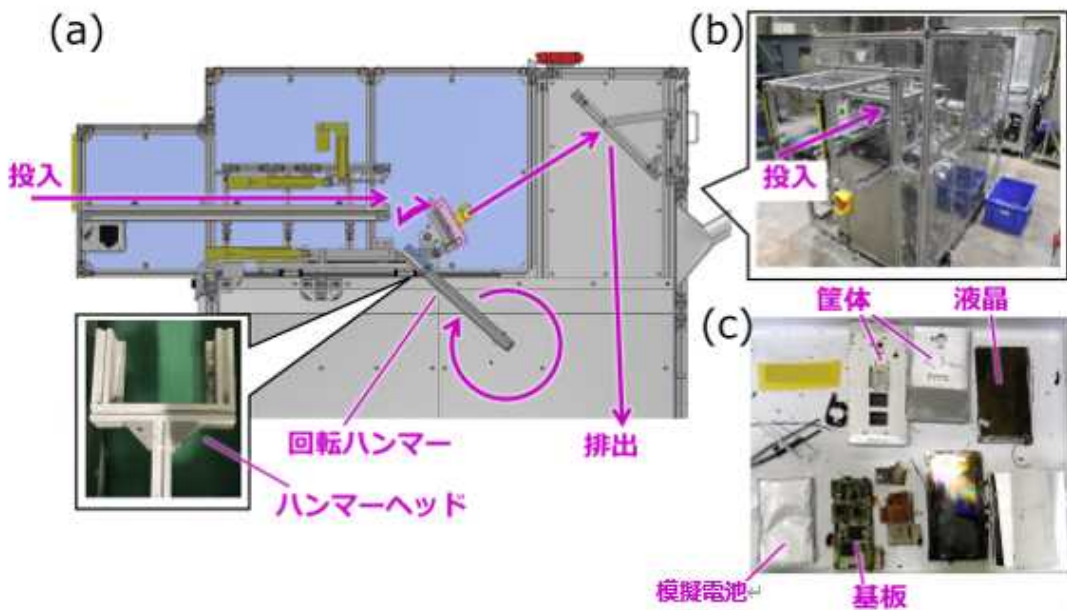


図 4.1-15 筐体解体衝撃力付与装置の概要：(a)概念図、(b)装置写真、及び(c)解体済みスマホ

筐体破壊試験装置プレス切断装置及び筐体解体衝撃力付与装置によるスマホ解体の有効性が確認できたため、小型タブレット端末向けに同装置の改良機を開発した。改良機的设计にあたり、小型タブレット基板の構造調査及び油圧プレス機による切断テストを行ったところ、多くの機種が頑丈なアルミ製の筐体でできており、切断には2t以上の切断荷重が必要であることが分かった。また、効果的な衝撃付与方法を検証するため、ハンマーによる打撃調査と既設筐体解体衝撃力付与装置のワーク設置位置に小型タブレットを簡易的に固定した衝撃付与実験により、ワーク端部への衝撃付与が有効であることが分かった。これらの事前調査の結果を反映し、プレス切断装置については搬送部のサイズアップと切断用のサーボプレスの加圧能力を2tのものから3tのものに変更した。筐体解体衝撃力付与装置についてはワーク上下を打撃する構造からワーク端部を打撃する構造に変更した。

### c. CFS 型解体機の開発

#### ■ 目標

携帯電話やデジタルカメラ等のバッテリーや基板が強固に固定されていない製品向けに既存破砕機を改良したCFS 型解体機を開発する。また、モジュールソータの前段における粗選別の手段として、様々な形状のスクリーンを2段振動篩に取り付けて選別実験を行い最適なスクリーン形状を検証する。

#### ■ 研究開発の成果

スマホ、タブレット向けに開発した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、製品の形状やサイズに制約があり、広範囲の品目を処理することには適さない。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。

リーテムが所有する既存の佐藤鉄工製造のクロスフローシュレッダー(CFS)(以下、既存破砕機)による対象小型家電の破砕実験を実施した。既存破砕機で携帯電話、デジタルカメラのうち金属製直方体筐体のもの、スマートフォン、小型ビデオカメラの内蔵バッテリーを変形させることなく取り出すこと(90%以上)を目標とし、目標達成可能な技術条件(周波数、破砕時間、投入量、チェーン重量)の最適な組合せの特定を目指した。合わせて、既存機本体の改良要件を次の観点から検討した。

- ・破砕結果の再現性を向上させる
- ・処理能力を向上させる

検討の結果、破砕結果のばらつきを低減するための内部構造の見直しやバッテリーの変形を防ぐための排出口への格子の設置等を整理した。

既存破砕機による筐体破壊試験の結果から、スマートフォンやタブレットのようなバッテリーと基板が筐体と強固に固定されていない製品については単純な衝撃力での解体が可能であることが明らかになった。そこで、既存破砕機を改良し、バッテリーと基板を可能な限り傷つけることなく解体可能な装置を開発した。図 4.1-16 に今回開発したCFS 型解体機の構造図を示す。CFS 型解体機はバッチ処理方式で、品目別に約 10 台まとめて処理が可能となっている。衝撃力付与方式は既存試験機同様、チェーン打撃方式を採用した。チェーンは様々なサイズの物を取付けることができる構造とし、バッテリーと基板に過度な破壊が起きない最適なサイズを実験により確認できるようにした。

また、解体室の壁面に製品の筐体よりも小さな開口のスクリーンを設けることで、装置内で解体されたバッテリーと

基板を傷つける前に自動排出することが可能となった。

CFS 型解体機はチェーンサイズ、チェーンの回転力、スクリーンの開口寸法、解体時間(筐体を排出するまでの時間)の調整により、製品の品目別に最適な解体が可能となっている。

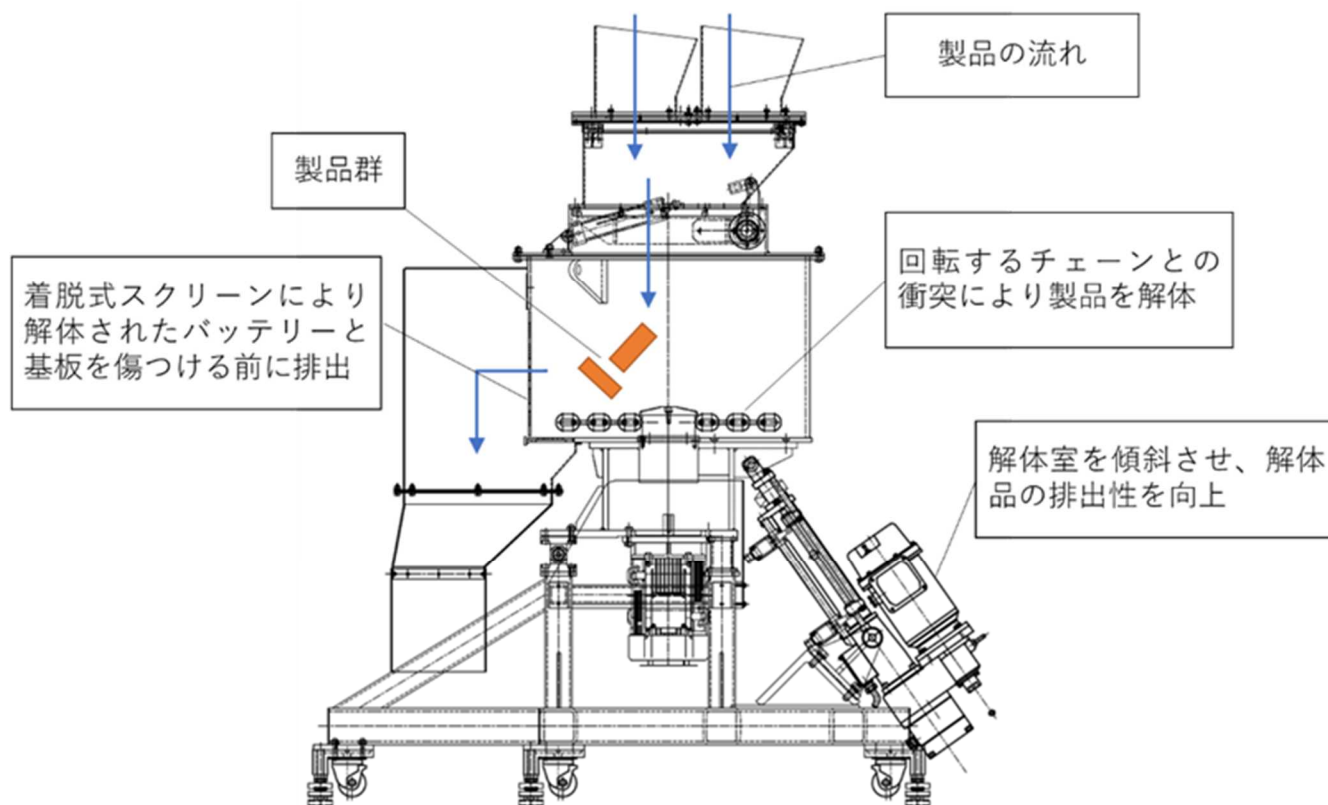


図 4.1-16 CFS 型解体機構造図

CFS 型解体機により携帯電話、金属製直方体筐体のデジタルカメラ、小型ビデオカメラ、携帯ゲーム機の破碎実験を行った。

破碎は 2 段階で行った。廃製品から電池を取り出す筐体破碎(以下、一次解体)と、電池以外の部品から基板を取り出す部品破碎(以下、二次解体)である。破碎実験では、形状の異なる 4 種類のスクリーン、解体機本体の傾きを 0 度と 30 度、チェーン径 13 mm と 8 mm に設定した場合のデータを取得し、上記 2 種類の破碎の最適条件を検証した。

その結果、携帯電話とデジタルカメラは最適条件を特定できた。結果を表 4.1-6 及び図 4.1-17 に示す。ただし、デジタルカメラは、前段階の製品選別工程で、CFS 型解体機に適した構造のデジタルカメラを選別してから投入することを前提としている。その適した構造とは、金属製及び直方体で筐体内に空間が少ないものである(それ以外に、一眼レフカメラなど立体構造や筐体内に空間が大きい構造のものなどがある)。

一方、小型ビデオカメラと携帯ゲーム機は最適条件を特定できなかった。小型ビデオカメラの最適条件を特定できなかった主な理由は、外付け電池パックを採用している機種が多く、その電池筐体(プラスチック製)が柔らかく破碎に向かないこと、そして、機種によって構造が多様でありかつ基板のネジ止めの数が携帯電話等に比べて多く、機種によって解体に必要な衝撃力に幅があるためである。また、携帯ゲーム機の最適条件を特定できなかった主な理

由は、機種によって構造が多様なことである。特に、電池収納用蓋のネジ止めの数や位置にばらつきがあり、電池の回収率を上げると破碎が進んで基板も外れる割合が高くなる。そのため携帯ゲーム機の場合は、CFS 型解体機に投入する前に、携帯ゲーム機を機種(モデル)ごとに選別できれば、機種ごとの最適条件を特定することは可能である。

携帯電話とデジタルカメラの破碎混合物から取り出したバッテリーと基板は、後工程のモジュールソータで識別可能な状態であることを確認した。ただし、二次解体では、基板回収率を優先すると電子部品が外れる傾向にあった。

表 4.1-6 CFS 型解体機による携帯電話とデジタルカメラ解体の最適条件

品目	一次解体(電池取り出し)	二次解体(基板取り出し)
携帯電話	周波数：8Hz 破碎時間：25 秒 投入台数：10 台 チェーン径：13 mm スクリーン：敷居あり・格子幅狭い 本体傾き：0 度	周波数：18Hz 破碎時間：15 秒 投入台数：10 台分 チェーン径：13 mm スクリーン：敷居あり・格子幅狭い 本体傾き：0 度
デジタルカメラ	周波数：12Hz 破碎時間：10 秒 投入台数：10 台 チェーン径：13 mm スクリーン：敷居なし・格子幅狭い 本体傾き：0 度	周波数：20Hz 破碎時間：15 秒 投入台数：10 台分 チェーン径：13 mm スクリーン：敷居なし・格子幅狭い 本体傾き：0 度

最適な格子の形状(左：携帯電話、右：デジタルカメラ)



携帯電話の実験例(左から投入機器、一次解体後の電池、二次解体後の基板)



デジタルカメラの実験例(左から投入機器、一次解体後の電池、二次解体後の基板)



図 4.1-17 CFS 型解体機による携帯電話とデジタルカメラ破碎実験結果の例

CFS 型解体機により解体された品目については、筐体から分離されたバッテリーや基板をモジュールソータで選別するが、解体後の製品を全量供給すると、筐体破片等が多量に含まれるため、モジュールソータの選別精度の低下を招く。そこで、モジュールソータの前段における 2 段振動篩による粗選別を想定し、様々な形状のスクリーンを 2 段振動篩に取り付けて選別実験を行い、最適なスクリーン形状を検証した。

本研究では開口形状、寸法の異なる 9 種類のスクリーンを 2 段振動篩の上段、下段に取り付け、バッテリーが上段スクリーンを通過し、下段スクリーンを通過しないこと(バッテリーの全量回収)を第一目標、2 次解体物が上段スクリーンを通過しないこと(2 次解体物の全量回収)を第二目標、筐体破片が下段スクリーンを通過すること(筐体破片の除去)を第三目標とし選別実験を行った。実験の結果、携帯電話については、上段に 48×48mm の正方形開口のスクリーンを取り付け、下段に 22×22mm の正方形開口のスクリーンを取り付けた場合に最良な結果となり、バッテリーを全量モジュールソータへ供給し、2 次解体物と筐体破片の混入量が減少させることができた。デジカメについては、上段に 45×45mm の正方形開口のスクリーンを取り付け、下段に 22×22mm の正方形開口のスクリーンを取り付けた場合に最良な結果となり、一部の特殊形状(円筒型)の物を除き、バッテリーを全量モジュールソータへ供給し、2 次解体物と筐体破片の混入量を減少させることができた。携帯電話、デジカメ共にモジュールソータで良好なバッテリー選別を行うことが可能となった。2 段振動篩によるデジカメの選別結果の例を図 4.1-18 に示す。なお、二次解体物からの基板選別についても同様の検討により、スクリーン形状を最適化することができた。



図 4.1-18 2 段振動篩によるデジカメ選別結果の例



### (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。電池、基板、未解体物、金属材、その他の 5 クラスの自動認識精度 90%以上を目標値とする。

#### ■ 研究開発の成果

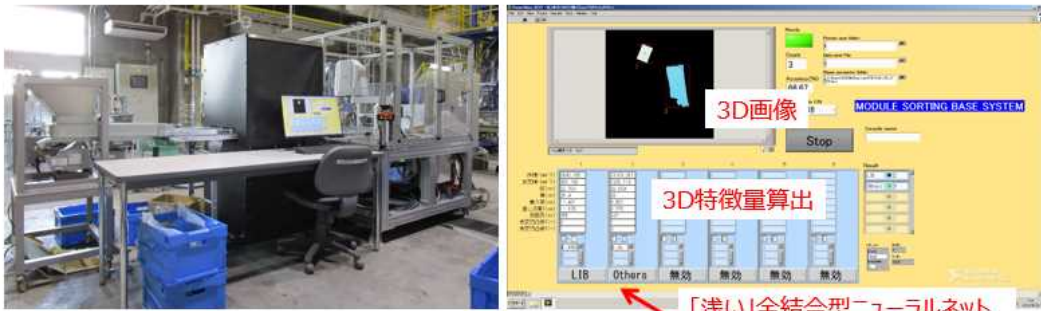
##### a.モジュールソータ基本システムの試作

2018 年 3 月にモジュール選別の試験装置(モジュールソータ基本システム)を設置して検討を開始した。当初開発したのは、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(Windows ベース)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を制御可能なプログラムを開発した。その後、物体検出型 CNN(畳み込みニューラルネットワーク)を搭載した深層学習利用型のモジュールソータシステムを開発した。

図 4.1-19 に ARENNA ソータ改良型のモジュールソータを示す。モジュールソータでは、製品ソータのような画像分類型の単品処理ではなく、物体検出型で複数個の対象物を並列で処理・認識する。3D 画像の高さ情報を用いて物体を検出後、3D 特徴量(体積、投影面積、縦長、横長など)を算出して 3 層の浅い全結合型ニューラルネットワークに入力することで、モジュール部品の種別(電池、基板、構造材など)を高速識別する。識別後のモジュールの仕分け機構は、6ch の電磁式パドルとスカー式ロボットアームを併用する形とした。

図 4.1-20 に深層学習利用型モジュールソータを示す。ARENNA ソータの 3D カメラに代えて 2D カラーカメラと誘導起電力センサーを搭載している。2D カラーカメラは、撮影 1 ラインごとに PC に送信するライン式カメラを採用しており、通常のエリア式カメラに比べて空間的に切れ目のない画像を連続撮影可能かつ撮影トリガー信号の入力を不要とし、これにより従来問題となっていた薄手の試料の未検出回数が大きく減少した。また、CNN に入力する画像データの撮影範囲に抜けや重なりが生じないことから、物体識別の高精度化、振分機構(電磁式パドル)動作設定の容易化が期待できる構成としている。

## ARENNA\_3D改良型 (Windowsベース開発)



- 物体の高さ情報を用いた「物体検出」
- 3D特徴量を入力した全結合型NNによる高速識別
- 重量検知なし
- 複数物体を並列処理
- 電磁式パドルとロボットアームを併用した選別機構

モジュールソータ制御プログラム  
(ARENNA\_3D改良型)

図 4.1-19 ARENNA ソータ改良型モジュールソータ試作機

## 深層学習利用型 (Linuxベース開発)



- 物体検出型CNNによる多種類識別
- 重量検知なし
- 複数物体の並列処理
- 誘導起電力検知を併用

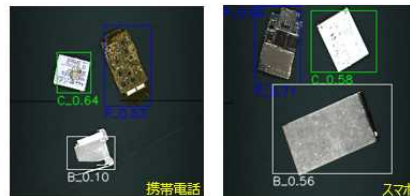
## 2D画像撮影プログラム(新開発)

ライン式2Dカラーカメラの採用により、空間的に切れ目のない連続画像を撮影可能、かつ、トリガー信号入力不要となり、薄手の試料の未検出回数が大きく減少



CNNに入力する画像データの撮影範囲に抜けや重なりが生じない

物体識別の高精度化、振分機構(電磁式パドル)動作設定の容易化



CNNによるLIB、基板、構造材の検出

図 4.1-20 深層学習利用型モジュールソータ試作機

### b.モジュール DB の構築

上述の筐体破壊試験装置によるスマホ解体試料、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、スクリーンで分級を行った後、手作業で「LIB(電池)」、「プリント基板」、「未解体物」、「構造材」、「その他」の5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 4.1-7 は、ARENNA ソータ改良型の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(LIB)」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、形状の偏差が比較的小さなLIB電池を対象にした場合、構造が単純な3層全結合型ニューラルネットワークを使用しても、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 4.1-7 3D 画像認識による携帯電話破碎物の 2 種識別結果の例

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

表 4.1-8 は、深層学習利用型モジュールソータによる携帯電話破碎物の 5 種識別結果の例である。「物体検出型」の CNN を利用した識別アルゴリズムにより、LIB、基板、未解体物、構造材(非金属)、構造材(金属)の 5 クラス識別再現率 90%以上を確認であることを確認した。ここに「構造材(非金属)」は目標における「その他」と同義である。

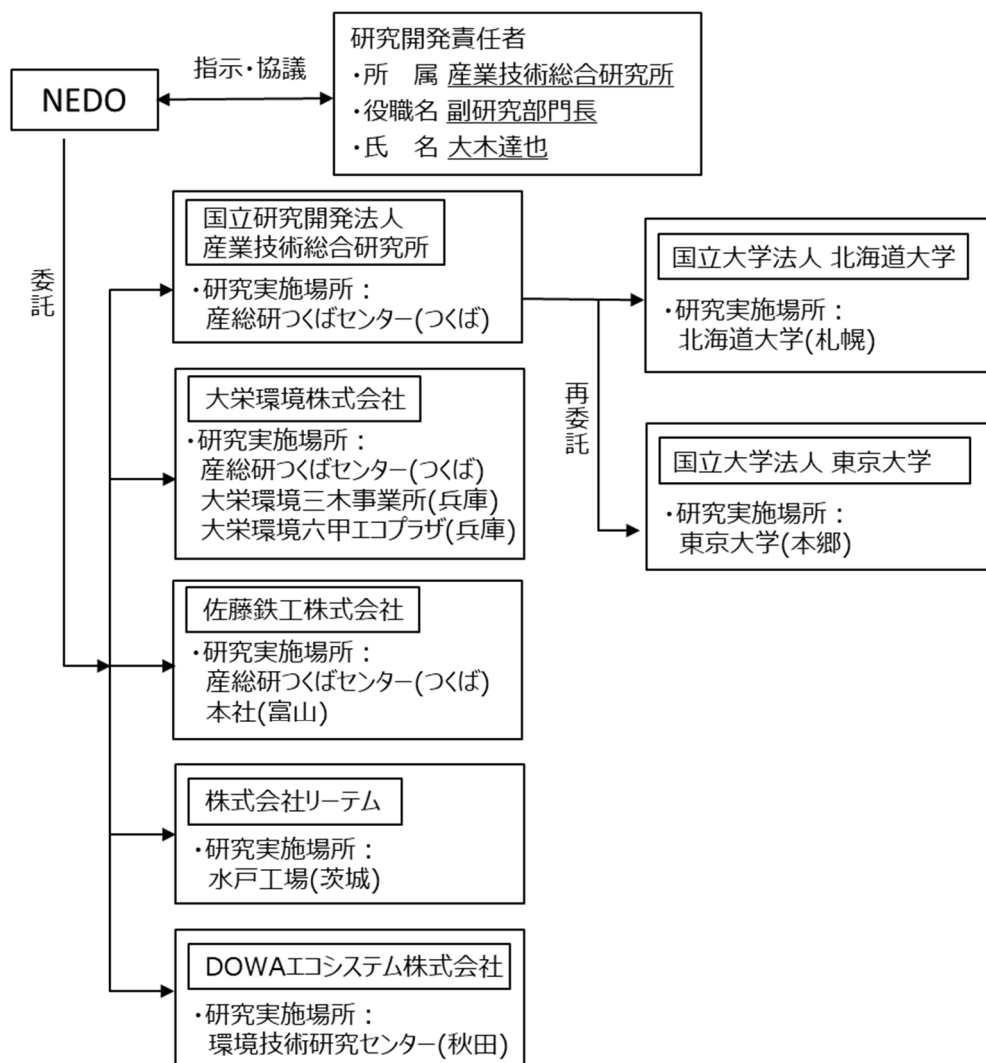
表 4.1-8 深層学習利用型モジュールソータによる携帯電話破碎物の 5 種識別結果の例

モジュール種類	識別回数	識別結果						再現率(%)
		LIB	プリント基板	未解体物	構造材(非金属)	構造材(金属)	未判定	
①LIB	242	237	1	0	4	0	0	97.9
②基板	72	2	67	2	1	0	0	93.1
③未解体物	62	7	5	38	8	0	4	61.3
④構造材(非金属)	268	4	6	3	255	0	0	95.1
⑤構造材(金属)	48	0	0	0	4	44	0	91.7
計	692	正解数 641						92.6

コンパヤ上で完全に分散した状態で試料を供給

## 4.2 研究開発項目②「廃部品自動選別技術開発」

### ✓ 実施者名、実施体制



### ✓ 期間、予算

期間：2017年7月31日～2022年3月31日

予算（単位：億円）

年度	2017	2018	2019	2020	2021	2022	合計
研究開発項目②	1.6	1.6	2.2	1.8	1.1	—	8.3

### ✓ 実用化への道筋

研究開発項目①、②、④での道筋を、研究開発項目④においてまとめて記載する。

✓ **アウトプット目標の達成状況**

大分類・中分類	小分類（要素技術）	目標と達成状況（当初計画との差異）
②-1 部品剥離装置の開発	基板構造 DB の構築	目標：廃製品 4 品目の基板構造 DB の構築 達成状況：○ 計画通り達成
	部品剥離技術の構築	目標：廃製品 4 品目を対象とした部品剥離装置開発 達成状況：○ 計画通り達成
②-2 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	目標：電子素子・部品について、基礎物性データから選別特性情報に変換するシステムを構築 達成状況：○ 計画通り達成
	装置内粒子運動予測システムの開発	目標：4 種選別機（ドラム磁選機、渦電流選別機、振動スクリーン、湿式比重選別機）の運動予測シミュレータを開発 達成状況：○ 計画通り達成
	回収産物の最適化条件	目標：回収産物目標の設定、リサイクル対象鉱種・製品の選定に資するマテリアルフロー分析、環境影響評価、廃製品リサイクルコスト評価 達成状況：○ 計画通り達成
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	トランスフォーマブル選別システムの開発	目標：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のベンチスケールシステムの開発 達成状況：○ 計画通り達成

✓ **成果の意義**

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。また、マテリアルフロー分析の対象鉱種と解像度を、電気電子製品由来の都市鉱山ポテンシャルを評価可能なレベルまで発展させた。

✓ **副次的成果及び波及効果**

研究開発項目①、②、④での副次的成果及び波及効果を、研究開発項目④においてまとめて記載する。

✓ **特許出願数、論文発表数**

年度	2017	2018	2019	2020	2021	2022	合計
特許出願数	0	0	0	1	2	－	3
論文発表数	1	0	1	1	3	－	6
学会発表・講演数 <sup>*1</sup>	9	10	2	5	5	－	31
新聞・雑誌等への掲載数 <sup>*1</sup>	2	20	0	4	0	－	26
シンポジウム・セミナー主催 <sup>*1*2</sup>	4	4	2	4	3	－	17

\*1 学会発表・講演、新聞・雑誌等への掲載、シンポジウム・セミナー主催は成果の普及に資する活動である。

\*2 シンポジウムは研究開発項目①②③合同での主催のため、研究開発項目①②③それぞれで計上。

セミナーは研究開発項目①②合同での主催のため、研究開発項目①②それぞれで計上。

✓ **研究開発成果の詳細**

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 4.2-1)。

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)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、精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

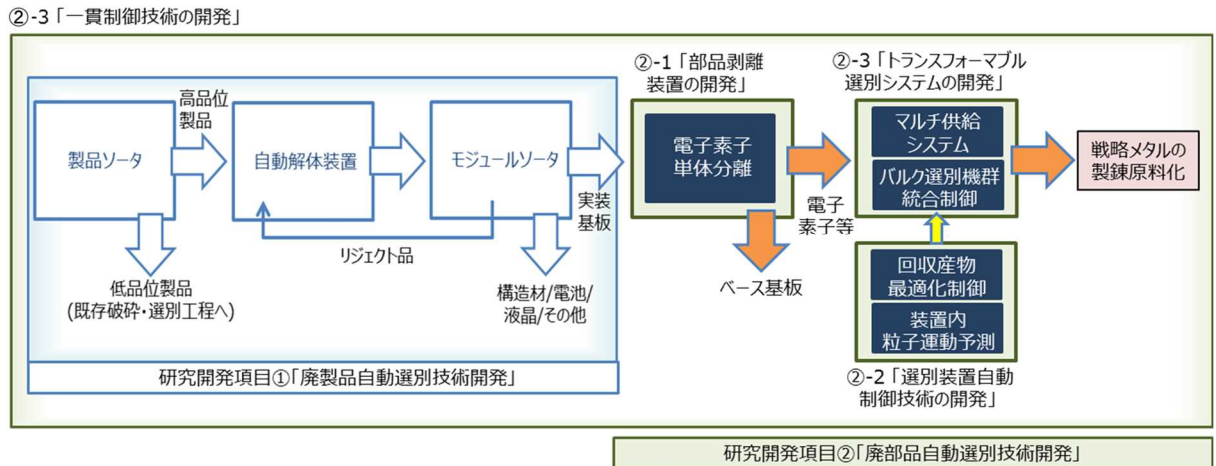


図 4.2-1 研究開発項目②における選別フローと研究項目

### 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、この様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

348 台(スマートフォン 243 台、フィーチャーフォン 105 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。

基板構造 DB の分析結果を、②(2-1)b「基板剥離技術の構築」で後述する部品剥離試験装置(全周スクリーン型のクロスフローシュレツダ(CFS))の設計に活用した。基板のサイズ・形状は、メーカー・機種により千差万別であるが、iPhone 等に用いられる L 字型のものと、より一般的な長方形型のものが存在する(図 4.2-2)。製品 DB から選択した 100 枚の基板について、幅(W)と長さ(D)を  $W < D$  の条件のもとに整理すると、W の平均値は 52mm であった。従って、部品剥離試験装置のスクリーンから、早々に基板がすり抜けてしまわないために、スクリーン径を 52mm 未満にする必要があると判断した。

一方で、100 枚の基板に搭載された IC チップ(1685 個)のサイズを整理したところ、IC チップは正方形又は長方形であり、その対角長さの最大値は 28mm であった。従って、部品剥離試験装置のスクリーンから、剥離された IC チップが無傷で排出されるためには、スクリーン径が 28mm 以上である必要があると判断した。

これらの基板構造 DB の分析を踏まえて、CFS の排出口スクリーン径を 0(スクリーン無し)、20、30、40、50 mm として部品剥離実験を行った。その結果、0~30 mm の間は、部品剥離結果が向上したのに対して、30~50 mm の間では、ほぼ変化が見られなかった。これらの結果を踏まえて、部品剥離試験装置のスクリーン径を 30mm に決定した。

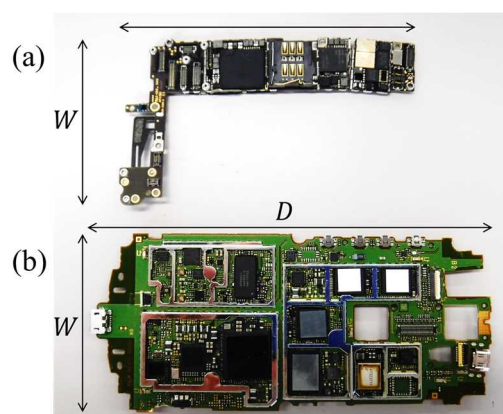


図 4.2-2 (a)L字型の基板(Apple 社製 iPhone 6)及び(b)長方形の基板 (Sharp 社製 AQUOS PHONE 006SH)

また、基板構造 DB より、スマホ及びタブレットの基板の対角サイズを整理すると、図 4.2-3 の結果となった。これらの値を部品剥離試験装置の投入用搬送コンベア及び投入口の仕様に反映し、様々な基板に対応可能な装置設計とした。

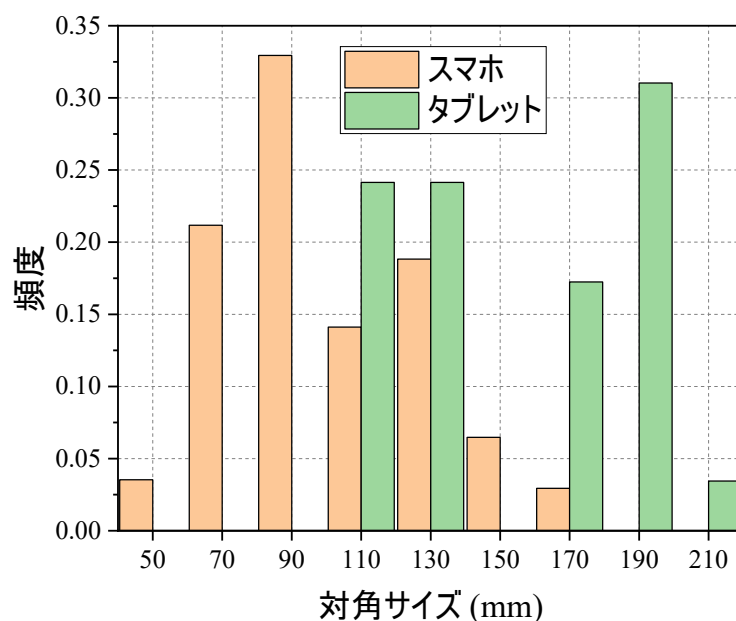


図 4.2-3 スマホ及びタブレットの対角サイズ分布

## 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[2DDEM]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[2DDM]の連成解析)結果から、効果的な部品剥離を発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(図4.2-4)。実験計画法において、9つの因子( $F_1 \sim F_9$ )に対して、それぞれ3水準を設定した(表4.2-1)。

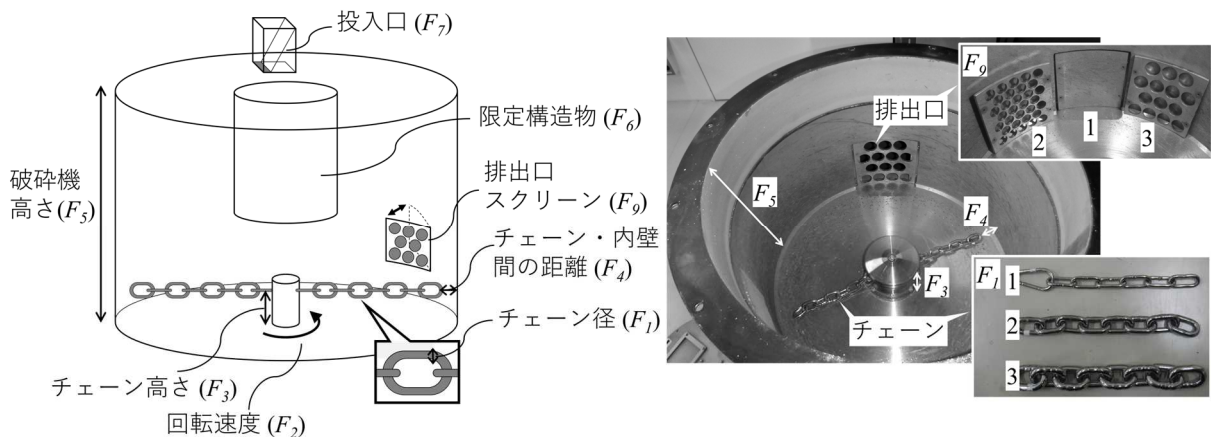


図 4.2-4 基板剥離機構試験装置の概念図(左)及び内部の写真(右)

表 4.2-1 実験計画法の因子と水準

因子	水準 1	水準 2	水準 3
チェーン径( $F_1$ )	4 mm	6 mm	8 mm
回転速度( $F_2$ )	572 rpm	1167 rpm	1750 rpm
チェーン高さ( $F_3$ )	10 mm	20 mm	30 mm
チェーン・内壁間の距離( $F_4$ )	10 mm	15 mm	20 mm
破砕機高さ( $F_5$ )	200 mm	300 mm	400 mm
限定構造物径( $F_6$ )	0 mm (無し)	120 mm	240 mm
投入口( $F_7$ )	90 度	68 度	64 度
破碎時間( $F_8$ )	5 秒	10 秒	20 秒
排出口スクリーン径( $F_9$ )	0 mm (穴無し)	20 mm	30 mm

実験計画法における L27 直交表を用いて、27 通りの実験条件を設定した。それぞれの実験条件について、スマホ又はフィーチャーフォンから取り出した基板各 1 枚の破碎実験を 3 回ずつ繰り返して行った。その際、破碎後の部品剥離状態を評価するため、予め基板上の IC チップを色付けした。

破碎後の部品剥離状態を、部品剥離の程度( $e_1$ )、部品非破壊剥離の程度( $e_2$ )、基板非破壊の程度( $e_3$ )、

及び微粉発生の程度( $e_4$ )を組み合わせた評価指標により評価し、分散分析した。その結果、回転速度( $F_2$ )、チェーン・内壁間の距離( $F_4$ )、破碎時間( $F_8$ )、及び排出口スクリーン径( $F_9$ )が統計的に有意な影響を及ぼすことが確認された(図 4.2-5)。

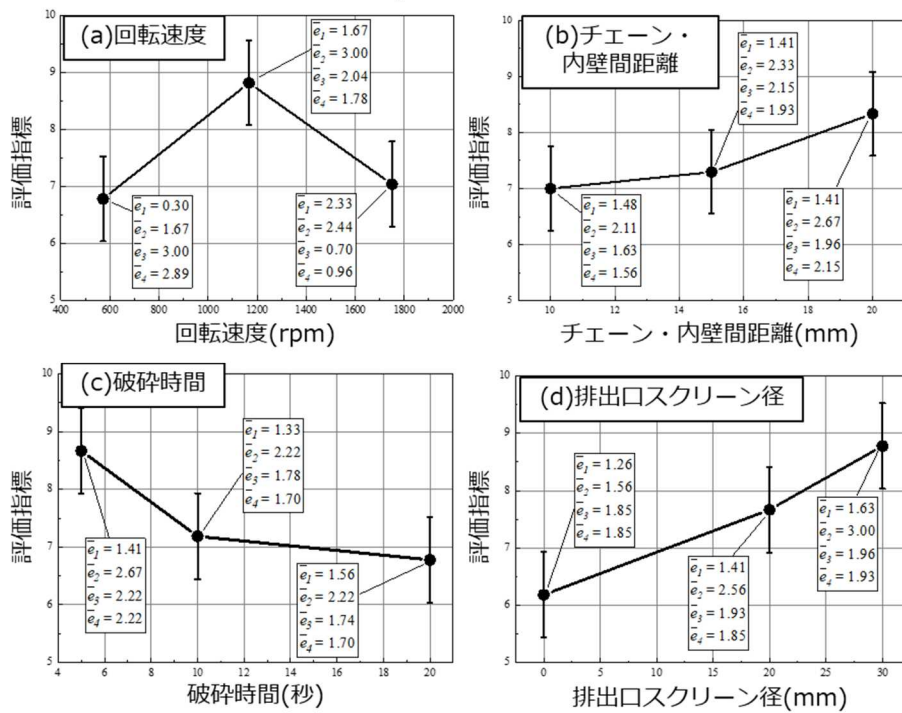


図 4.2-5 分散分析の結果有意となった4つの因子

基板剥離機構試験装置を用いた実験計画法的検討により明らかになった因子の情報に基づき、部品剥離に適した設計の改良型 CFS(部品剥離試験装置)を開発した。図 4.2-6 (a)が従来型 CFS(CFS1)、(b)が排出口にスクリーンを設置した従来型 CFS(CFS2)、図 4.2-6 (c)及び(d)に部品剥離試験装置を示している。

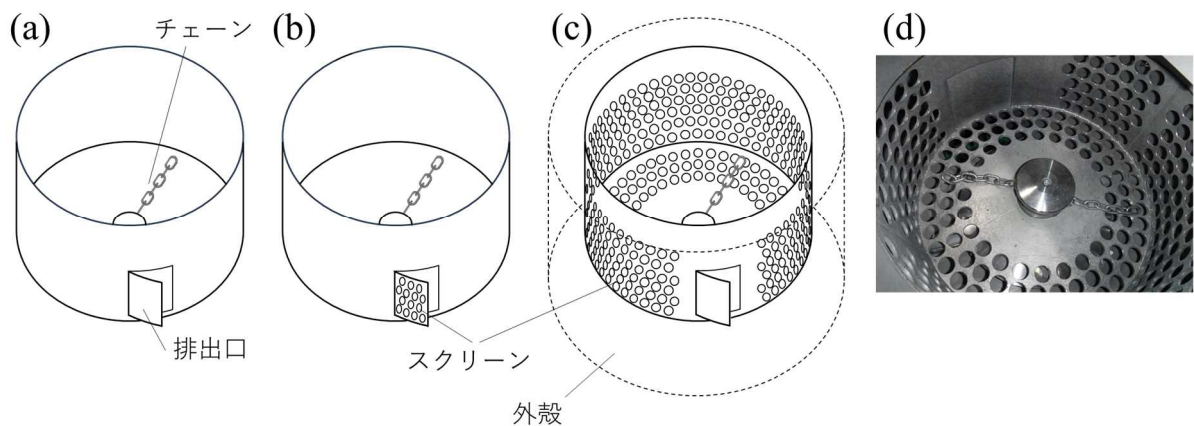


図 4.2-6 (a)従来型クロスフローシュレッダ(CFS)、(b)従来型 CFS(排出口スクリーンタイプ)、(c) 部品剥離試験装置、(d) 部品剥離試験装置の内部写真

スマホ及びフィーチャーフォンから基板を取り出し、IC チップに色付けした後に、1 バッチあたり5 枚ずつを投入して破碎実験を行った。部品剥離状態を以下の3つの指標で評価した：部品剥離率(色付けした IC チップの全面積うち、剥離した面積の比率)、非破壊剥離率(色付けした IC チップのうち、無傷で剥離した部品の個数比率)、微粉率(破碎後のサンプルのうち、1mm 以下の微粉の重量比率)。部品剥離率及び非破壊剥離率は大きい(100に近い)ことが望ましいのに対して、微粉率は小さい(0に近い)ことが望ましい。

実験結果を表 4.2-2 に示す。開発した部品剥離試験装置は、3 指標のいずれも従来型 CFS を上回る成績を上げており、有効性を確認した。特に、非破壊剥離率については、従来型 CFS が 20~34%だったのに対して、部品剥離試験装置は約 72%となっており、大幅な向上が確認された。

表 4.2-2 部品剥離実験結果

評価項目	部品剥離試験装置	従来型 CFS(CFS1)	従来型 CFS(CFS2)
部品剥離率 (%)	93.1	83.9	87.3
非破壊剥離率 (%)	71.7	20.0	34.0
微粉率 (%)	3.7	4.8	4.3

上記の部品剥離試験装置の開発においては、部品剥離状況を予め色付けした基板を目視により評価したが、平行して部品剥離状態を自動評価する部品剥離状態評価法の開発も行った。破碎済みの基板を透過 X 線装置(部品剥離状態分析装置)で撮影して得た透過 X 線像について、パターンマッチングを利用した分析手法と深層学習(セマンティックセグメンテーション)を利用した分析手法を開発した。後者について、具体的には公開されているセマンティックセグメンテーション用ネットワークの DeepLab を使用して、726 個の破片の画像を教師データとして学習させた。

図 4.2-7 に深層学習による方法の概要を示す。図 4.2-7 (a)に、IC チップの目視識別結果と開発手法による自動識別結果を比較している。図 4.2-7 (b)に、各破片内における IC チップが占める面積の比率の頻度分布を示す。開発手法による結果は、目視評価と約 99%の精度で一致しており、有効性を確認した。

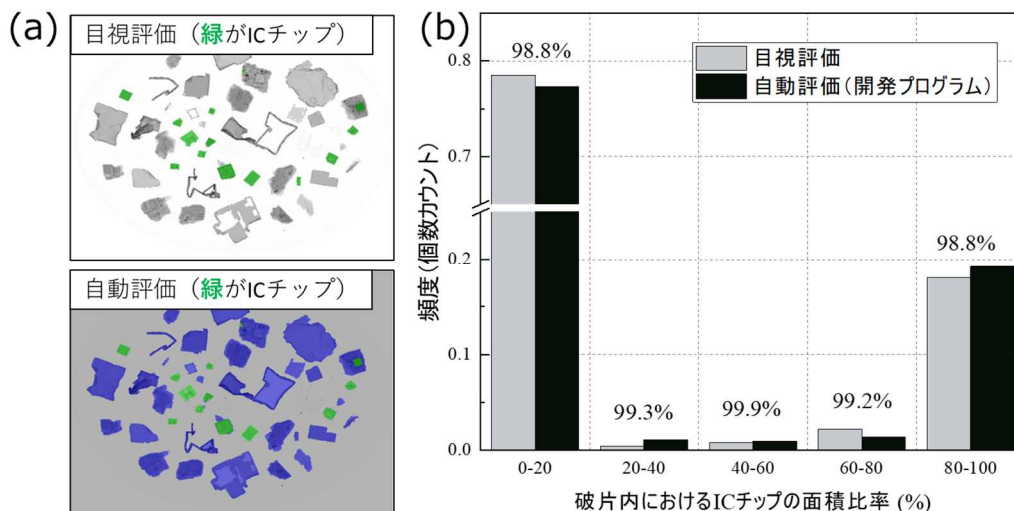


図 4.2-7 部品剥離状態評価法：(a)IC チップの識別状況、(b)単体分離評価

## (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、小型デジタル家電(スマートフォン、携帯電話、デジカメ)に対して電子素子ごとの金属組成、重量分布、サイズ、比重等の基礎情報 DB を構築、さらに、吊り下げ型磁選機による磁選特性、ドラム型磁選機による磁選特性、カラム型気流選別機による比重選別特性等の各種選別機で処理した場合の選別特性データを取得し、選別特性 DB のベースを構築する。以上の DB を元に基礎情報から選別特性情報に変換する計算システムを開発する。

#### ■ 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 4.2-8)。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。

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。一方、吊り下げ型磁選機における磁選特性データ、気流型比重選別特性データ、ドラム型磁選特性データ、渦電流選別特性データを取得し、トランスフォーマブル選別システムを構成する選別機の選別特性 DB を構築した(図 4.2-9)。さらに、これら基礎物性 DB と選別特性 DB を利用し、各電子素子の種類・サイズから選別特性に変換する計算システムを構築した。



図 4.2-8 スマートフォンの電子素子調査の例

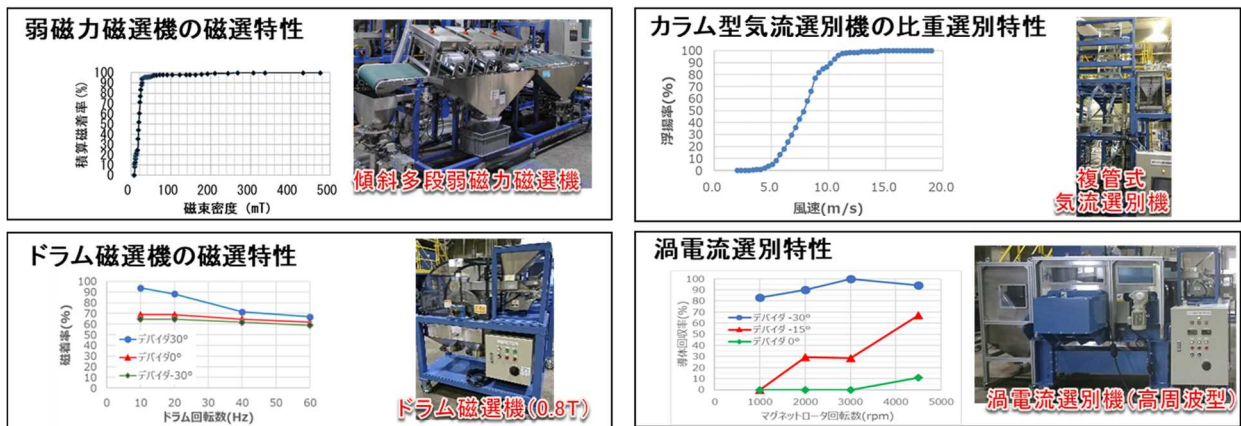


図 4.2-9 トランスフォーマブル選別を構成する選別機の選別特性データの例

b. 装置内運動予測システムの開発

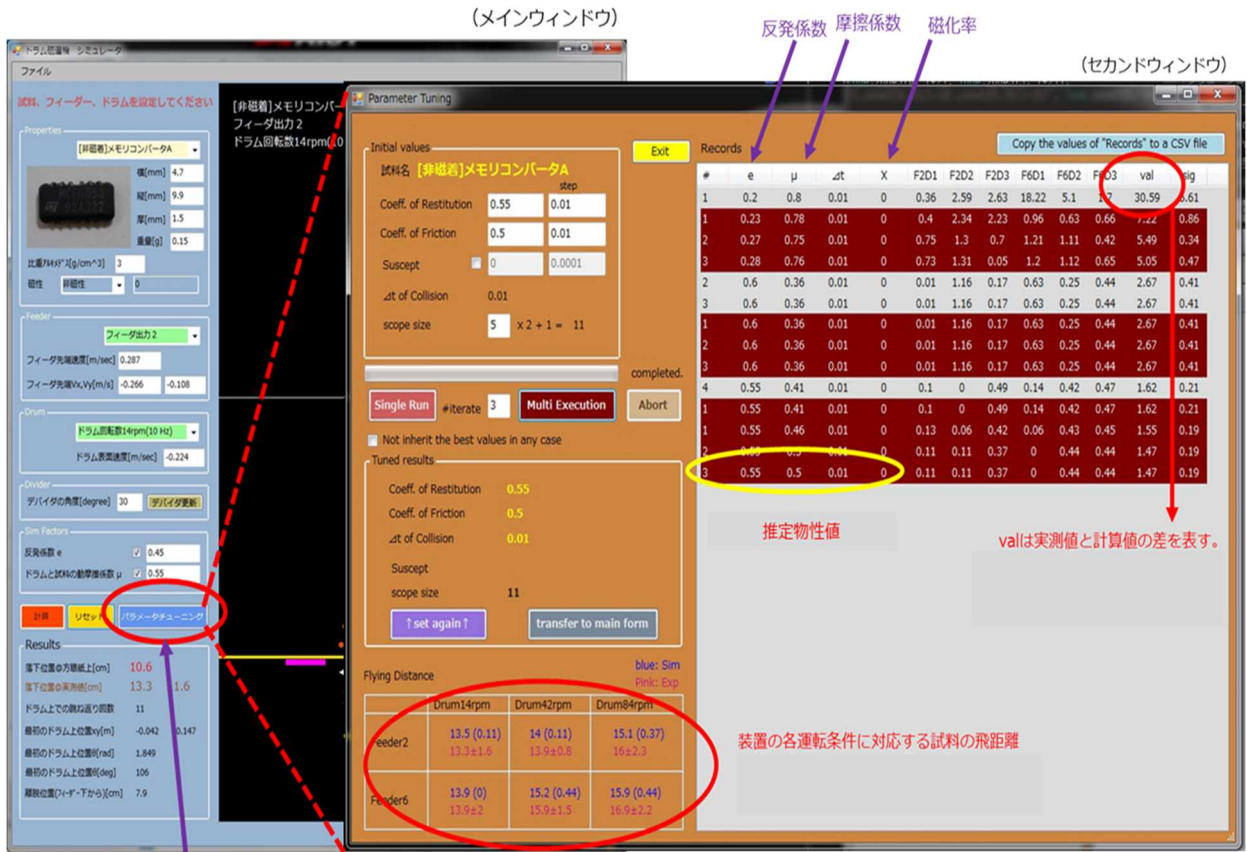
■ 目標

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、差異抽出して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、エアテーブル、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。また、高遠心型比重選別機 (Falcon/Knelson 選別機) についてはその選別メカニズムの解明と運転条件・装置形状の最適化を図り、新たに効率の高い比重選別機構を提案する。

■ 研究開発の成果

ドラム磁選機のシミュレータの構成は、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。前者においては、電磁界シミュレーションソフトウェア FEMM4.2 を用いて、ドラム表面における磁束密度の実測値に合わせて磁石強度・形状等の計算機上での設定を行い、ドラム磁選機周辺の空間磁束密度分布を計算した。後者では、静磁場中を運動する電子部品試料の軌道計算を行うソフトウェアを作成した。

軌道計算ソフトウェアでは、試料とドラム間の反発係数、摩擦係数、試料の磁化率の3つの物性値を使って試料の軌道計算を行うが、電子素子の実効磁化率、ベルト面との反発係数、摩擦係数などは容易に測定することはできない。従来研究では、計算と実態を擦り合わせるため、適当なファクターを挿入するなどが行われているが、これでは答え合わせ用の実験値としか整合しない。そこで、それらの物性値を、ドラム磁選機の複数の実験結果から推定できる機能を備えた、ドラム磁選機シミュレータを開発した(図 4.2-10)。このシミュレータでドラム磁選機内の粒子運動を予測したところ、サイズの異なる非磁性・弱磁性・強磁性の IC・メモリ類について、誤差平均約 6mm で落下位置を予測することができた(図 4.2-11)。従来、ドラム磁選機は磁着/非磁着の選別しかできないが、開発した軌道計算ソフトウェアでは、非磁着物の飛距離(落下位置)を正確に予測することができ、飛距離差による非磁着物の相互選別の可能性も検証することが可能となった。



セカンドウィンドウを開く

図 4.2-10 開発したドラム磁選機シミュレータ

1cmオーダの電子素子が5~15cm飛翔するときの落下位置をミリ単位の誤差で予測可能に

	落下位置: 実験値と計算値 (Simulatoin) の比較				実験値-計算値の誤差平均
	ドラム60	ドラム10	ドラム30	ドラム60	
青字: 計算 茶字: 実測	フィーダ6				
[非磁着]メモリA	15.4(0.28σ)	13.6(0.17σ)	15.2(0.43σ)	16(0.72σ)	5.1mm
[非磁着]メモリB	15.5±0.5	13.7±0.3	14.9±0.7	16.9±1.3	2.7mm
[非磁着]メモリC	15(0.45σ)	14.1(0.09σ)	15.3(0.43σ)	15.9(0.46σ)	5.0mm
[非磁着]メモリD	16±2.3	13.9±2.0	15.9±1.5	16.9±2.2	3.9mm
[非磁着]メモリE	14.8(0.28σ)	14.2(0.56σ)	15.3(0.01σ)	15.8(0.52σ)	8.7mm
[非磁着]メモリF	14.3±1.8	13.8±0.8	15.3±2.1	17.5±3.2	10.6mm
[非磁着]メモリG	14.7(0.35σ)	14.3(0.28σ)	15.3(0.58σ)	15.8(0.58σ)	9.2mm
[非磁着]メモリH	15.6±2.5	13.6±2.6	14.0±2.2	17.4±2.7	8.7mm
[弱磁性]弱磁性試料A	13.7(1.03σ)	10.6(0.32σ)	10.6(0.24σ)	13(0.56σ)	10.6mm
[弱磁性]弱磁性試料B	12.1±1.6	11.5±2.7	10.9±1.3	14.4±2.5	9.2mm
[弱磁性]弱磁性試料C	6.3(0.38σ)	0.2(0.19σ)	8.5(1.03σ)	9.7(0.96σ)	5.9mm
[強磁性]強磁性試料A	-2.1±2	3.6±0.7	5.6±1.9	7.7±2.1	7.4mm
[強磁性]強磁性試料B	-0.5(0.62σ)	-0.1(1.49σ)	6.6(1.01σ)	0(1.36σ)	6.2mm
[強磁性]強磁性試料C	1.1±2.6	3.6±2.5	5±1.6	1.9±1.4	5.9mm
[強磁性]強磁性試料D	-1.2(1.42σ)	-1.6(0.29σ)	6.9(0.89σ)	-0.9(0.28σ)	7.4mm
[強磁性]強磁性試料E	-3.9±1.9	-0.4±4.1	5±2.1	-0.3±2.3	6.2mm
[強磁性]強磁性試料F	-1.2(0.48σ)	-1.7(0.97σ)	7(0.17σ)	-0.8(1.83σ)	7.4mm
[強磁性]強磁性試料G	0.3±3.2	1.2±3	6.6±2.2	3.4±2.3	6.2mm
[強磁性]強磁性試料H	-1.2(0.85σ)	-0.8(0.55σ)	6.3(0.45σ)	-0.1(1.39σ)	6.2mm
[強磁性]強磁性試料I	-1.9±0.8	1±3.3	5.5±1.7	3.2±2.4	6.2mm

図 4.2-11 ドラム磁選機のシミュレーション結果の例

また、シミュレータの性能を評価するために、内挿・外挿予測値について、実測値との比較を行った。非磁性・弱磁性・強磁性の電子素子の飛距離について、それぞれ良好な結果を得た。結果の一例として、図 4.2-12 にメモリ(弱磁性体)のシミュレーション結果を示す。

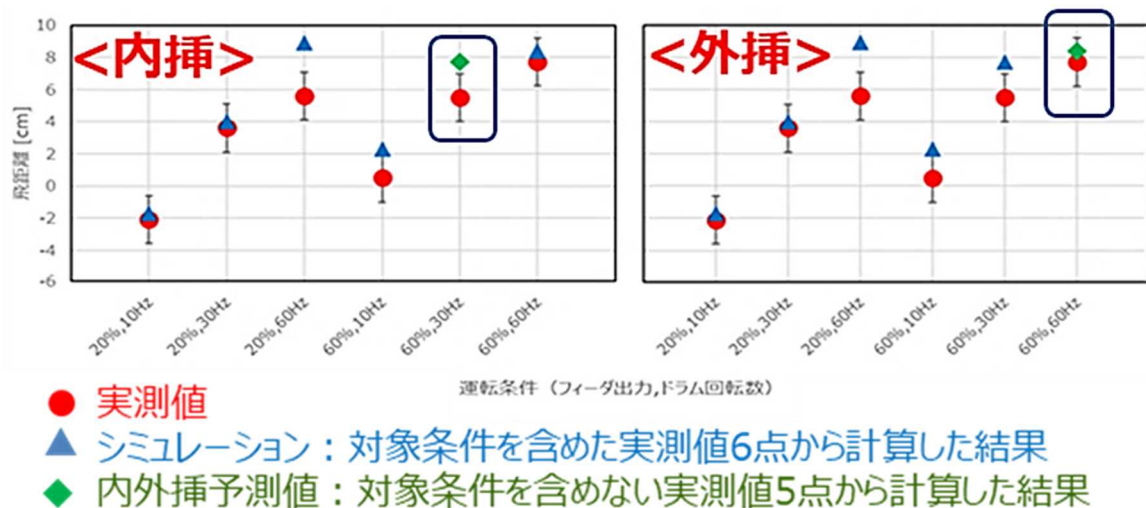


図 4.2-12 メモリ(弱磁性体)のシミュレーション結果

このように、実測値データがない条件の補間でも計算精度を維持している。実測データがある条件の解析用シミュレーションだけでなく、実測データがない条件の予測(データ補間)も可能となった。

ドラム磁選機内に投入された電子部品の挙動を解析した上で、電子部品試料の運動を計算機上で再現し、その飛翔軌道を正確に予測、さらに実測データのない選別条件の結果を補間する粒子運動予測システムを完成させ、ドラム磁選機の高精度シミュレータ開発という目標を達成した。

次に、渦電流選別機シミュレータの開発を実施した。渦電流選別機もドラム磁選機と同様に、選別機周辺の磁界計算と試料の運動計算を行う必要があるが、磁界が静止しているドラム磁選機と違い、渦電流選別機は装置周辺の磁界が時間変化することともに、磁界によって電子素子内に発生する渦電流に基づいた反発力を考慮するため、その計算は一層複雑となる。図 4.2-13 は、渦電流選別機上の円盤状導電性粒子の運動を、PTV により観察したものである。旧来のように渦電流による粒子全体の反発力のみを考慮すると、粒子は図の白矢印の方向に移動するはずであるが、実際にはコンベア上で回転しながら、全く異なる軌道を描いて飛翔する(赤矢印)。このような粒子運動を正確に予測するためには、時々刻々と変化する磁界と、これに伴って粒子内部に発生する渦電流の様子を詳細に把握することが必要となる。

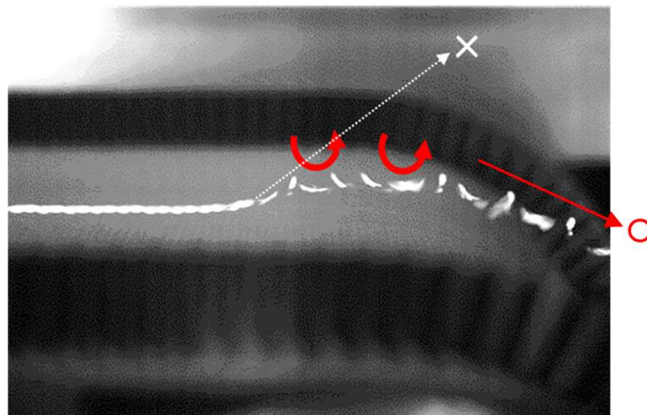


図 4.2-13 渦電流選別機の PTV 結果

予察検討により、単位時間ごとに磁場空間のメッシュを再計算しなおす有限要素法シミュレーションでは、計算が破綻することがわかり、メッシュを利用しない磁界計算法(磁界シミュレータ ELF/MAGIC)を利用し開発を行った。渦電流選別機シミュレータは、市販の ELF/MAGIC を利用した磁界計算部と、粒子運動を記述するユーザースクリプト部、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。ユーザースクリプトと統合制御スクリプトを完成させたのち、高速計算可能なシミュレーションへと改良、計算速度を100倍に短縮させた。これにより、電子素子をモデル化したシミュレーションが可能となり、マグナスカ、空気抵抗をシミュレータに導入して、飛距離の予測精度が大幅に向上した。

図 4.2-14 は、飛距離 20~50cm の電子素子(チップ型アルミ電解コンデンサ)の落下位置を予測したものである。落下位置を誤差平均 8%未満で予測できている。

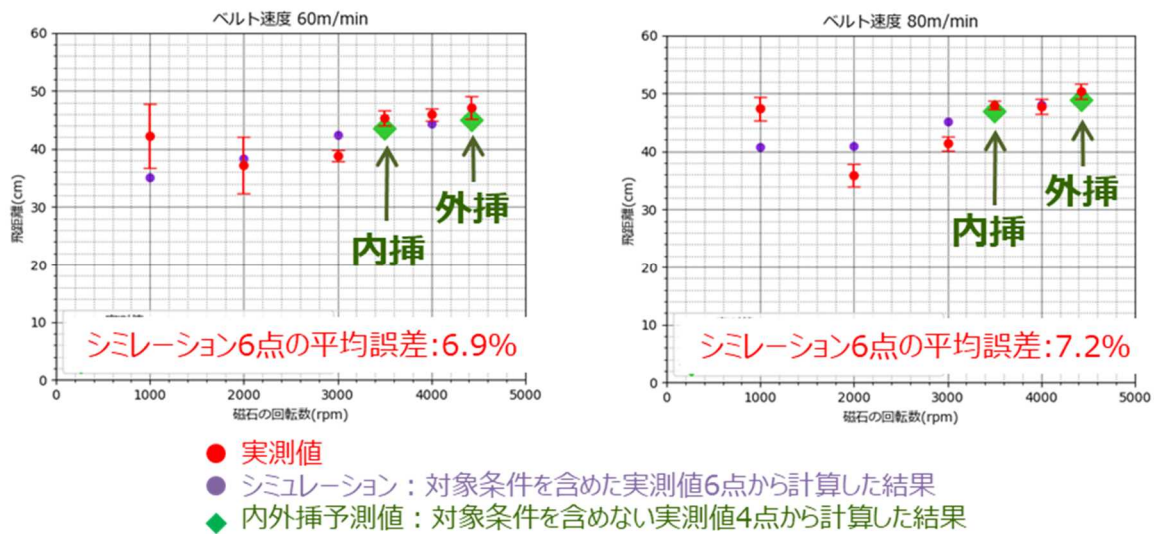


図 4.2-14 渦電流選別機のシミュレーション結果(チップ型アルミ電解コンデンサ)

また、図 4.2-15 は飛距離 20~60cm の電子素子(リード型アルミ電解コンデンサ)の落下位置を予測したものである。

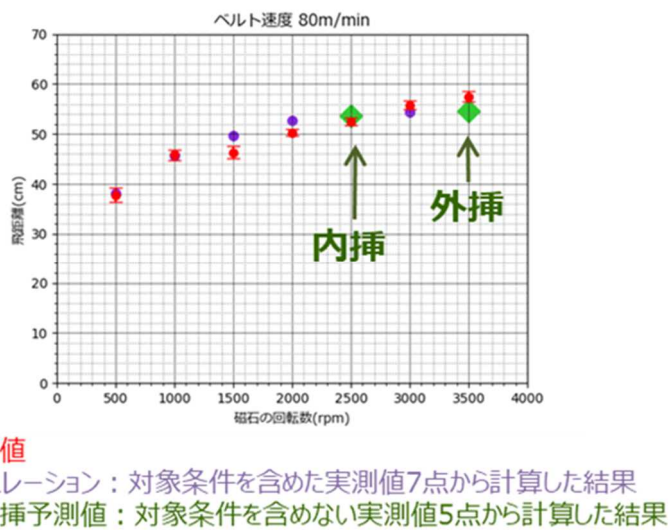


図 4.2-15 渦電流選別機のシミュレーション結果(リード型アルミ電解コンデンサ)



図中に示したように、実測値データがないデータの補間・補外についても、高い計算精度を維持している。ドラム磁選機と同様に渦電流選別機についても、装置に投入された電子部品の運動を計算機上で再現して、軌道を予測、実測データのない選別条件の結果も予測可能な粒子運動予測システムを完成させ、高精度シミュレータ開発という目標を達成した。

さらに、振動スクリーン選別機のうち、ジャイロシフタ(スクリーン面の水平方向に公転運動するタイプ)および円型 3D 振動ふるい(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するタイプ)の 2 種類に対し、非球形粒子対応型離散要素法に基づいて、電子素子形状に対応したシミュレーションモデルを作成した。ジャイロシフタの軌道をハイスピードカメラで撮影したところ、回転の周波数が大きくなると軌道が楕円化してゆくことが判明した。そこで、この軌道を反映したモデルを作成したところ、実際の電子素子落下の速度分布を精度良く推定することが可能となった(図 4.2-16)。また、円型 3D 振動ふるいについても、スクリーン面の複雑な 3D 軌道を解析し、これを反映したモデルを作成した。さらに、乾式比重選別機であるエアテーブル選別機のモデルも作成し、粒子回収ポケットの落下位置を予測することにより、回収位置による部分分離効率の推定も可能とした(図 4.2-17)。

以上のシミュレーションモデルを利用することにより、分離効率最大化等の目的に応じて、遺伝的アルゴリズムベースでの運転パラメータ(振動振幅、偏心距離、回転周波数、スクリーン面傾斜角度等)の最適化計算を可能にした。以上、振動スクリーン選別機、エアテーブルに関する粒子運動シミュレータ開発の目標を計画通り達成した。

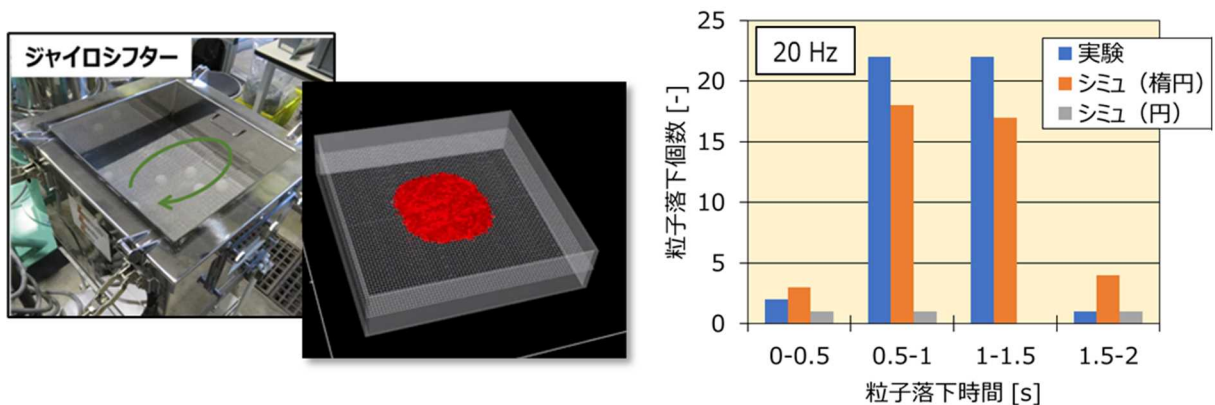


図 4.2-16 ジャイロシフタのシミュレーションモデル作成

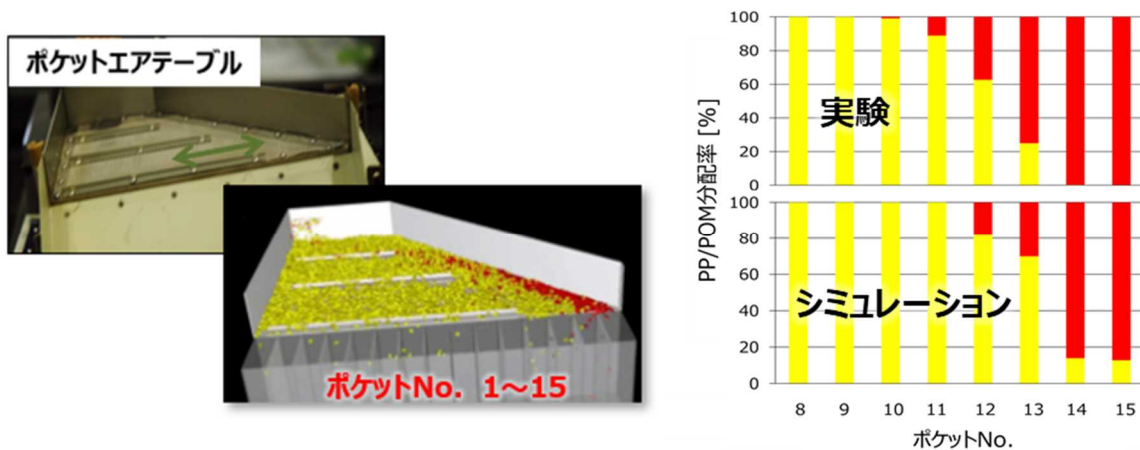


図 4.2-17 ポケットエアテーブルのシミュレーションモデル作成

CEDEST システム内で生じる集塵ダスト中の有価金属を回収するため、高遠心型湿式比重選別機(Falcon-Knelson 選別機)をオフラインで使用することを想定し、シミュレーションモデルを作成した。試験機(Falcon concentrators Inc.製、SB40)用の選別チャンバーを3D スキャンすることで形状モデルを取得し、計算時間の短縮のために周期境界面を導入した 1/4 形状モデルを作成した上で(図 4.2-18)、有限体積法を適用して、高速回転時にチャンバー内に形成される水膜の流れ解析を行った。解析の結果、斜面には数 mm 厚さの水膜が形成され、また、圧入水が入射される窪み部分の内部流れは、チャンバーの回転よりも速く流れている現象が予測された(図 4.2-19)。ダストを模擬したモデル粒子を投入した場合の粒子運動シミュレーションも可能となり、比較的重い粒子は窪み部分にて旋回しながら滞留し、軽粒子はオーバーフローされることを確認した。これらの現象は、後述するチャンバー内観察システムにより定性的に正しいことが示された。

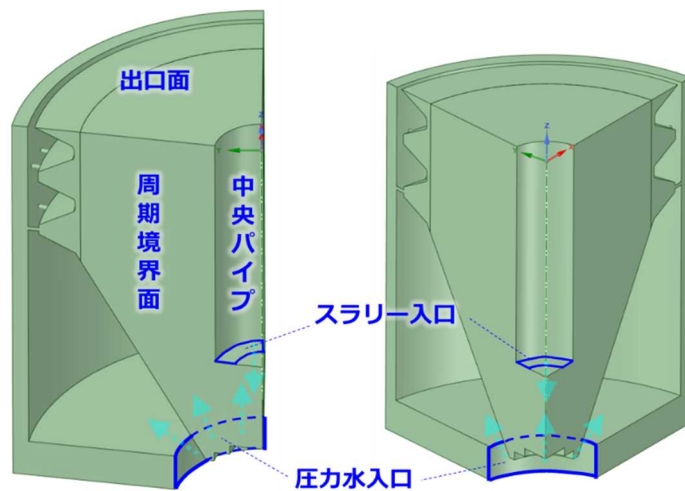


図 2-18 Falcon-Knelson 選別機チャンバー形状モデル

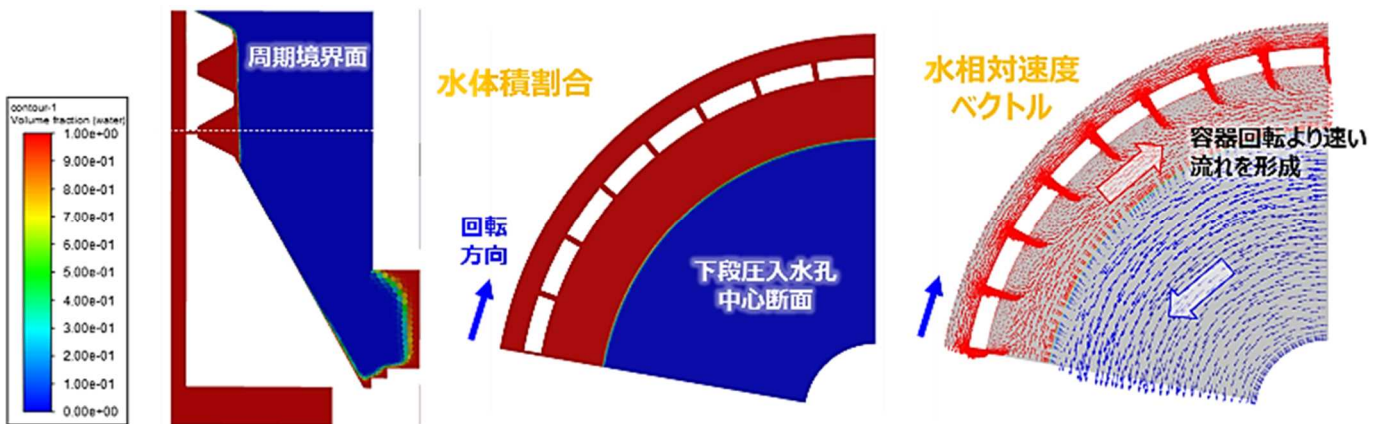


図 4.2-19 選別チャンバー内水膜形成シミュレーション結果

本装置は、チャンバー内で粒子うち、重粒子は窪みに集まり、軽粒子は水とともに上部から溢流することで選別が行われる。つまり、窪み入口(図 4.2-19 の赤/青境界近くの赤い部分)にて、遠心力で外側に向かう粒子に対し、外側から中心へ向かう圧入水孔からの噴流を正しい角度で与える必要がある。そこで 3D プリンタ(KEYENCE

製、AGILISTA-3110)を用い、装置形状最適化の一環として圧入水の入射角度を変化させたチャンバー(中心に向かって入射(90°)、回転方向と逆方向に向かって入射(30°など)を作成し、入射角度およびチャンバーの回転が圧入水の向きに及ぼす影響を解析した。その結果、無回転時には入射角度 90°で中心に向かって噴射されるが、回転を伴うと回転方向に流れが曲がることを確認し、回転速度に応じて入射角度を調整することで、中心に向かう流れを形成できる可能性を示唆した(図 4.2-20)。しかし入射角度を自在に変えることはチャンバー構造上困難である。そこで、装置改良の設計指針として、窪み内に仕切り板を多数導入するなど、中心方向速度を相対的に大きくする機構を検討した。

また、選別が成立する要件を検討するに当たり、実際にチャンバー内の粒子運動を観測するためのシステムを構築した。粒子に働く力は遠心力、浮力、抗力からなり、遠心力が抗力と浮力を上回ると重産物側(窪み内部)に回収される。ここで粒子の密度と粒径が既知であれば変数は遠心力・浮力に関わる粒子角速度( $\omega$ )と、圧入水と遠心力下の水膜から受ける力( $P_w$ )のみになり、粒子の窪み方向への運動が予測できる。すなわち、粒子の粒径と密度が既知であれば、その粒子が重/軽産物として回収される確率が 50%となる条件が計算できる。そこで、硬性鏡とハイスピードカメラからなるチャンバー内の粒子挙動・水膜速度観察システムを構築し(図 4.2-21)、種々の入射角度の場合の水膜表面速度測定を行い、これが $\omega$ と同じとして推定を行う手法を確立した。

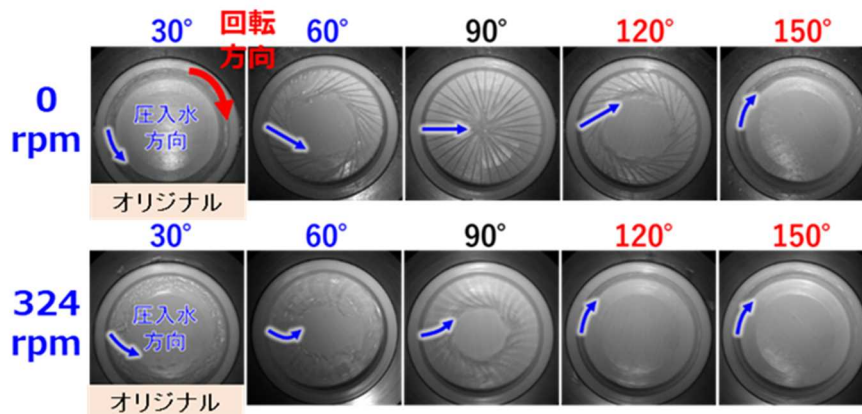


図 4.2-20 圧入水の入射角度および選別チャンバー回転が圧入水の噴射方向に及ぼす影響

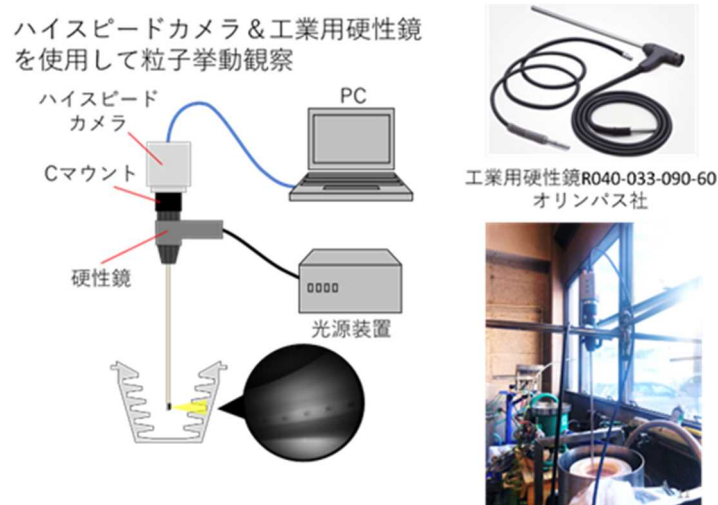


図 4.2-21 選別チャンバー内粒子挙動・水膜速度観察システム

また本装置では、重粒子が充分多い場合、選別の進行に伴い圧入水孔付近に重産物が積層して圧入圧力が減衰され、水膜から受ける力  $P_w$  のみになり、その推定が困難になる。そこで、重産物積層下における選別メカニズムを考察し、既知の粒度・密度をもつモデル粒子の重/軽産物側 50%回収率を測定し、 $P_w$  推定のための計算式の補正法の開発も行った。これらの結果をもとに、重粒子、軽粒子の重/軽産物側 50%回収率推定曲線を作成し、この図を利用し任意の重/軽粒子が選別可能となる運転条件領域を推定する手法も開発した(図 4.2-22)。この手法を用いることで、未知試料を処理する際に、重/軽粒子特性(密度、配分比率)が分かれば、重粒子積層下や、選別性向上のために中間比重粒子を挿入する場合などにおいても、重/軽粒子の粒子運動(中心から窪み方向に向かう粒子運動)を予測でき、選別が成立する運転条件(チャンバー回転速度、圧入水圧)の把握が可能になった。さらに、圧入水入射角度を変化させたチャンバーを用い、入射角度の影響観察も実施した。図 4.2-23 に示すように、 $90^\circ$ ではチャンバー中心方向に勢いよく水が噴出されるため、圧入水孔付近の重粒子の積層状態がクレーター様になり、そこでの水の流れが不均一になることが予測された。この不均一な水流は選別対象粒子の挙動のばらつきに繋がり、選別成績の低下が予想される。一方、角度  $30^\circ$ で入射された場合、重粒子層がほぐされ、水流が層内を均一に透過しながら中心方向に向かう様子が観察された。また、十分な量の重粒子が存在する場合は、水膜表面速度がチャンバー回転速度に近い値を示すことも確認され、 $30^\circ$ の場合の方が、均一な水流が中心方向に向かうことが明らかになった。

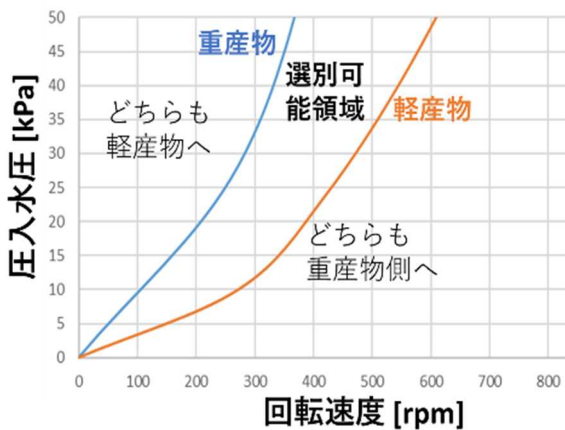


図 4.2-22 任意粒子の選別可能運転条件の推定

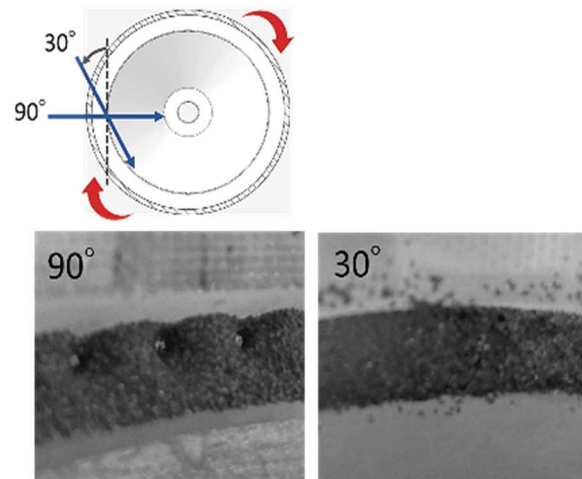


図 4.2-23 圧入水孔付近の重粒子の積層状の例

以上の通り、高遠心型比重選別機の粒子運動シミュレータの開発と、粒子運動観測システムの構築を実施した。また、粒子に働く力の考察により運転条件・装置条件の最適化を試み、重粒子がチャンバー窪みに堆積した時も含め選別が成立する運転条件の推定手法を開発し、計画通り目標を達成した。さらに、効率の高い比重選別機とするための改良設計ポイントを明確化し、これらを反映した機構を提案するという目標も達成した。

### 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。一方、研究開発項目②「廃部品自動選別技術開発」(2-2) aの研究で得られた小型家電から回収可能な電子素子類の組成データから、回収素子がどのような製錬に二次原料として扱われ得るか、非鉄製錬の忌避元素等を考慮し、受け入れる製錬工程ごとに回収素子のグルーピングを実施した。さらに、金濃度の高い素子(IC)や・銅製錬忌避元素含有素子(アルミ電解コンデンサ等)の産物組成データから、製錬評価を実施し、回収産物数と回収産物組成の設定を行った。

また、金属廃棄量をマテリアルフロー分析(MFA)によって推計可能とするために、表 4.2-3 に示す 24 種の金属について用途別の国内消費量を時系列で明らかにした。特に表中に下線で示した金属は、MFA を実施するのに必要なデータの構築が本研究開発において初めて達成されたものである。資源安全保障に向けたリサイクルの優先対象を検討する上で、国内資源循環を通じた自給率の限界を把握することは非常に重要であり、現在またはシナリオに応じた将来において、そのような分類を可能とするマテリアルフローデータの推計が達成された。

表 4.2-3 マテリアルフローの分析対象金属

コバルト	<u>タングステン</u>	<u>タンタル</u>	<u>チタン</u>	<u>インジウム</u>	ニッケル
クロム	マンガン	モリブデン	<u>バナジウム</u>	<u>ニオブ</u>	<u>アンチモン</u>
ネオジム	ディスプロシウム	<u>イットリウム</u>	白金	パラジウム	鉄
アルミニウム	銅	鉛	亜鉛	マグネシウム	<u>すず</u>

資源リスクの要素抽出では、過去 50 年に発生した約 2000 件の供給障害事例を分析することにより、主要なリスク要因としてストライキ、事故、自然災害などであることを示した(図 4.2-24)。さらに、先進国の生産活動は新価格下落の影響を受けやすいといった国別のリスク要因の傾向を明らかにした。このようなエビデンスベースのリスク要因抽出を効率的に実施するため、あらかじめ用意したリスクイベントに関するキーワードとのマッチングからイベントの生起確率、さらにはそれによる供給障害規模を自動でニュースデータから取得する手法を開発した。従来の資源リスク評価では資源の寡占状況やカントリーリスクといった要因がヒューリスティックに考慮されていたが、本研究開発ではエビデンスベースの分析結果を加味することで、我が国の資源リスク評価枠組みとして発展させた。資源リスクと前段のマテリアルフローに関する研究開発成果により、天然資源と再生資源の利用可能性を回収産物の最適化条件として検討可能となった。

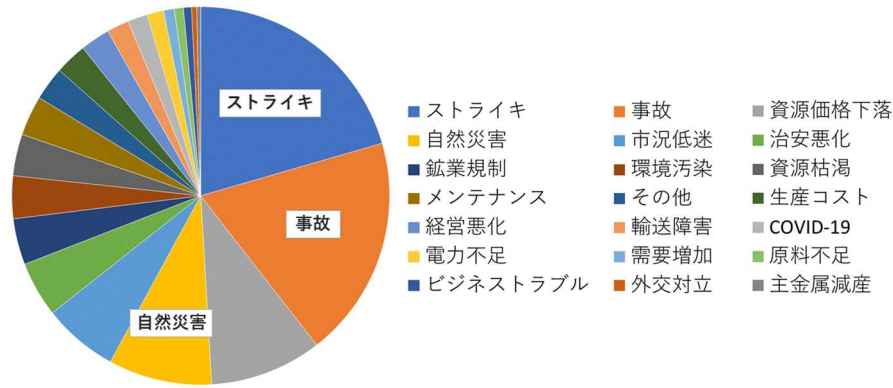


図 4.2-24 金属の供給障害の要因分析

リサイクルによる金属資源の環境負荷削減の効果を定量化して評価するための LCA の基礎データとして、天然資源である金属鉱石の採掘から選鉱にかけてのデータで、既存のインベントリデータベース IDEA で不足しているデータについては、再調査を含めて新たに調査と情報の収集を行ってインベントリデータを作成した(図 4.2-25)。対象とした金属は、リチウム、マグネシウム、アルミニウム、チタン、バナジウム、クロム、マンガン、鉄、コバルト、ニッケル、銅、亜鉛、ニオブ、モリブデン、パラジウム、銀、インジウム、すず、タンタル、タングステン、白金、金、鉛、ネオジム、デイスプロシウム(原子番号順)である。

金属鉱石は、今日では日本国内において鉱石の採掘は一部を除いて行われておらず、海外で採掘して選鉱された精鉱が輸入されているため、鉱石の採掘から選鉱については鉱石産出国の代表的な鉱山を調査したが、鉱石の鉱種(硫化鉱か酸化鉱など)や品位などは産出国や鉱山によって異なっている。そのため、精鉱までのプロセスからモデルケースを設定し、日本のサプライチェーンの平均的な鉱石の鉱種や品位で輸入相手国ごとにプロセスデータを作成して、日本に輸入される精鉱として輸入相手国からの輸送による環境影響を加えたインベントリデータを作成した。このデータを既存の製錬のデータと接続することで、天然資源である金属鉱石の採掘から製錬までの現行プロセスの金属の生産に伴う環境影響の算定を可能とした。

元素記号: 小型家電用重要金属15鉱種 (CEDEST)  
 既存データ: IDEA (採掘-選鉱-製錬), X: 未設定, △: 類似データ通用  
 今回調査: 調査状況 (採掘-選鉱-製錬), X: 未調査 (IDEAと連続可)  
 データあり: 調査済

リサイクル重点5鉱種 (経産省, 2014)

国家備蓄レアメタル7鉱種 (資源エネルギー庁)

非金属元素

1 H																	2 He
3 Li 採-選-製 採-選-X	4 Be											5 B △-選-X	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na 鉱-選	12 Mg 海水-選											13 Al 採-選	14 Si X-X-選	15 P △-X-X	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti 採-選-製 採-選-X	23 V △-X-選 採-選-X	24 Cr △-X-選 採-選-X	25 Mn △-X-選 採-選-X	26 Fe △-X-選 採-選-X	27 Co X-X-選 採-選-X	28 Ni 採-選-製 採-選-X	29 Cu 採-選-製 採-選-X	30 Zn 採-選-製 採-選-X	31 Ga Zn-選	32 Ge	33 As	34 Se Cu-選	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr △-X-選 採-選-X	41 Nb △-X-選 採-選-X	42 Mo △-X-選 採-選-X	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd 採-選-X	47 Ag 採-選-X	48 Cd X-X-選	49 In X-X-選	50 Sn 選-選-製 採-選-X	51 Sb X-X-選	52 Te Cu-選	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	La-Lu	72 Hf △-選-製 採-選-X	73 Ta △-選-製 採-選-X	74 W △-X-選 採-選-X	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt Ag-選 採-選-X	79 Au △-X-選 採-選-X	80 Hg	81 Tl	82 Pb 採-選-製 採-選-X	83 Bi Pb-選	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
ランタノイド系			57 La X-選-製	58 Ce	59 Pr X-選-製	60 Nd X-選-製 採-選-X	61 Pm	62 Sm X-選-製	63 Eu	64 Gd X-選-製	65 Tb 採-選-製	66 Dy 採-選-製	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
アクチノイド系			89 Ac	90 Th	91 Pa X-X-選	92 U X-X-選	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

図 4.2-25 鉱物資源のインベントリデータ作成状況

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シミュレータを構築した。これは、離散事象シミュレーションの原理を用いて、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動的な流れを分析できる機能を持つ。図 4.2-26(左)は、製品ライフサイクルの各段階において、製造業者・販売業者・製品の利用者・保守業者・リサイクル業者などの間でやり取りされる製品(再利用可能部品やリサイクル可能な回収金属なども含む)と情報(製品の使用履歴・保守履歴・リサイクル工程に有益な製造情報なども含む)の流れを示す。従来のシナリオ分析では、このような製品と情報の流れを表現することで、シナリオの差異を明示化できるものの、製品ライフサイクルを通じたシナリオの変化や妥当性を把握するのは困難である。しかし、本シミュレータを用いることで、情報と製品の流れに関わる外的な制約条件(例えば、製品の市場投入計画や製品の故障確率)を考慮して、様々な事業者の活動(製造・使用・修理・リサイクルなど)をシミュレートし、その結果として現れる製品や情報の流れとその変化などを分析することができる(図 4.2-26 右)。この機能を応用し、リサイクル業者が新たに導入すると想定されるリサイクル設備の潜在的な処理性能と、リサイクル業者から製錬業者に流れる製品(回収金属)の量や質とを関係づけることが可能となった。

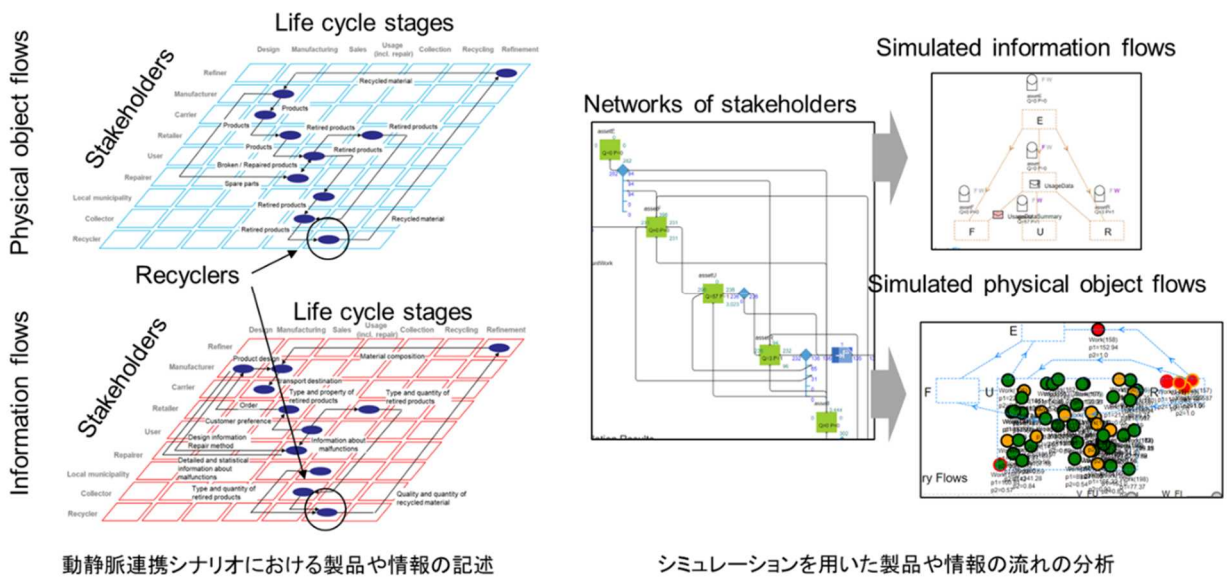


図 4.2-26 資源循環プロセスの動静脈工程に関与する事業者間の製品や情報の流れ

以上、製錬原料化が達成可能な回収産物数と回収産物組成の設定、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について計画通りに目標を達成した。

## (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(TF 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った。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のため、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呼称)を開発する。また、各選別機をシミュレーションによって計算された最適選別条件に制御し、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するTF選別システムを試作する。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開発する。

### ■ 研究開発の成果

TF 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 4.2-27 左に示す。従来技術は工程が固定された選別ラインであったが、開発する TF 選別システムは工程が可変の選別サークルである(図 4.2-27 右)。TF 選別システムには、電子素子群を各選別装置間で自在に供給可能な搬送制御システムであるマルチ供給制御システムの開発が必要不可欠である。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、7連の選別機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TF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。

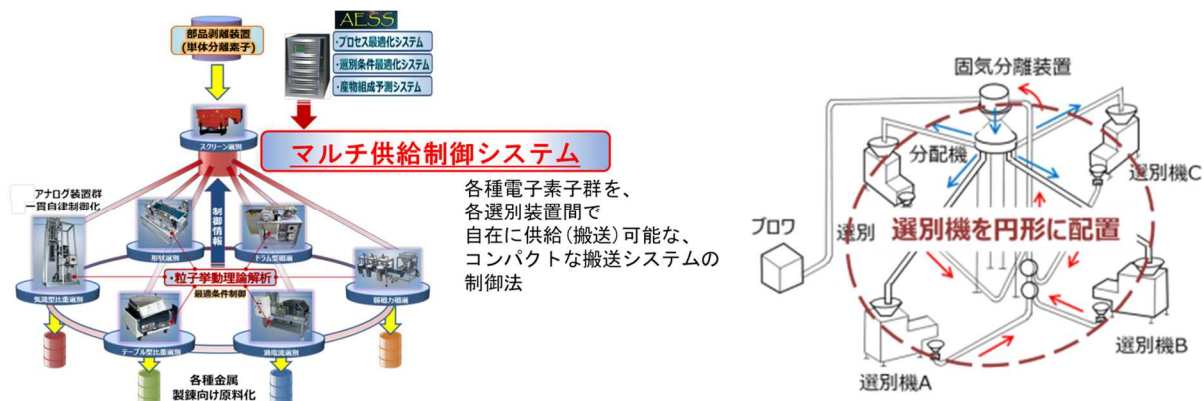


図 4.2-27 トランスフォーマブル選別システムおよびマルチ供給制御システムの概要

また、TF 選別システム試作機は、7つの選別機で構成されている。これまでに産総研で開発してきた電子素子選別シミュレータ(AESS)は、3つの選別機の選別結果計算に対応していたが、7選別機に対応するため、AESS



の大幅な高度化を実施した。1 素子のサイズ別選別の分割上限を 2→4 に拡張し、サイズ別選別の合算評価を可能にした。さらに、選別成績の低い条件同士の組み合わせ除外、並列計算(複数コアに分散させて効率よく計算)によって計算速度を 36 倍に向上させた。従来の 3 種選別機の電子素子選別シミュレータの計算パターン数は約 2000 兆通りであったが、今回高度化した電子素子選別シミュレータでは、制御条件パターン、4 サイズ同時選別条件、素子別出力パターンの組み合わせで 35 恒河沙通りまで計算パターンを拡張した。

以上のマルチ供給搬送システムと選別機の制御システムと開発を通じて、7 連の TF 選別システムのベンチスケール機を完成させた。図 4.2-28 にマルチ供給搬送システムの自動搬送試験として、PC 由来の廃電子素子群からタンタルコンデンサを回収する自動選別試験の結果を示す。廃電子素子をマルチ供給搬送システムで自動搬送し、試料の搬送に従って選別機が自動で運転・停止する自動運転において、タンタルコンデンサの回収率 84.7%、タンタルコンデンサの品位 5.0%から 85.0%に向上、分離効率 84.0%という結果を得、廃部品を分離効率 80%以上で選別するという選別性能目標を達成した。



図 4.2-28 マルチ供給制御システムの自動搬送試験(電子素子群からのタンタルコンデンサ回収例)

さらに、研究開発項目①の製品ソータ～製品解体装置～モジュールソータと、研究開発項目②の部品剥離装置～TF 選別システムの一連の装置の情報連携を構築システム全体の工程管理を開発した。図 4.2-29 に一貫システムの情報連携の概念図を示す。各装置間のデータ通信はスイッチング・ハブを介したイーサネット通信によって

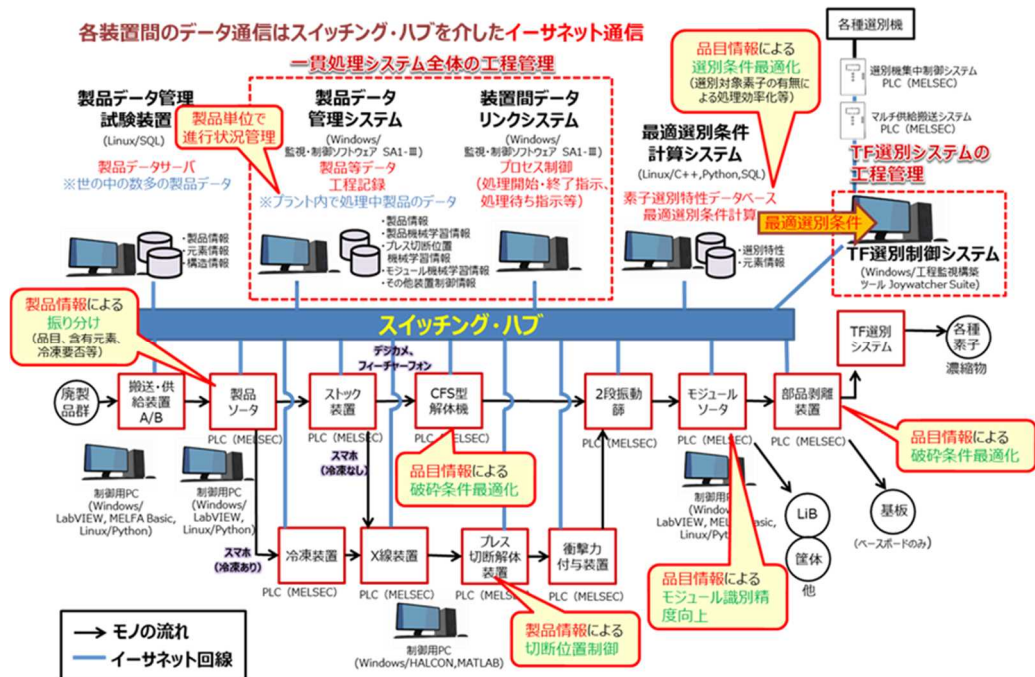


図 4.2-29 一貫システムの情報連携の概念図

行われ、製品データ管理システムと装置間データリンクシステムによって、全体の工程管理が行われる。

以上のように、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(マルチ供給制御システム)、各選別機をシミュレーションによって計算された最適選別条件に制御する TF 選別システム、研究開発項目①及び②を連動させ一貫制御するベンチスケールシステムの開発を計画通りに達成した。

### 4.3 研究開発項目③「高効率製錬技術開発」

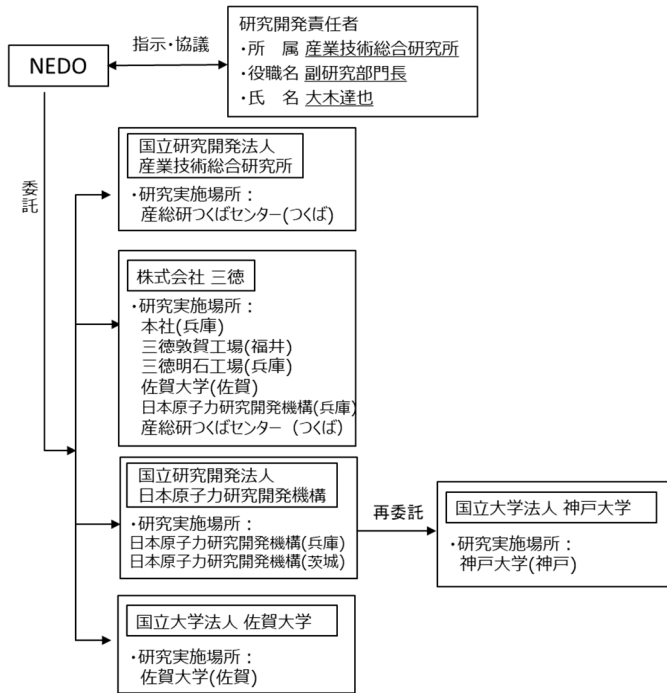
#### ✓ テーマ名

研究開発項目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」

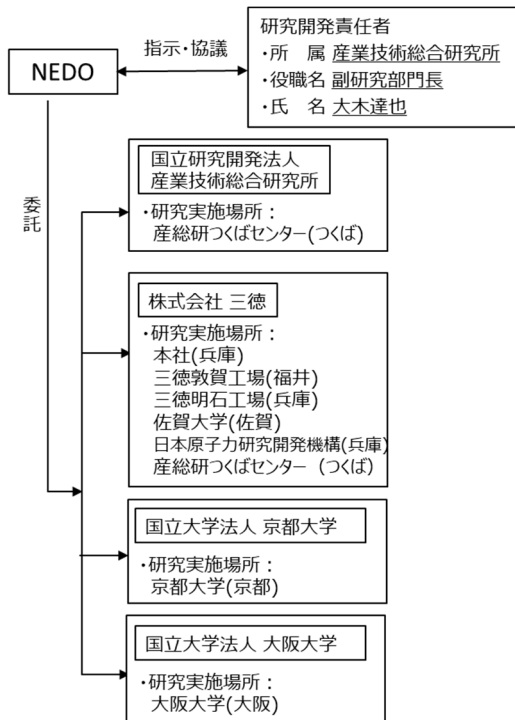
研究開発項目③-2「溶融塩を利用した濃縮系少量材料のリサイクル技術(濃縮金属部品製錬技術)」

#### ✓ 実施者名、実施体制

##### 研究開発項目③-1



##### 研究開発項目③-2



✓ 期間、予算

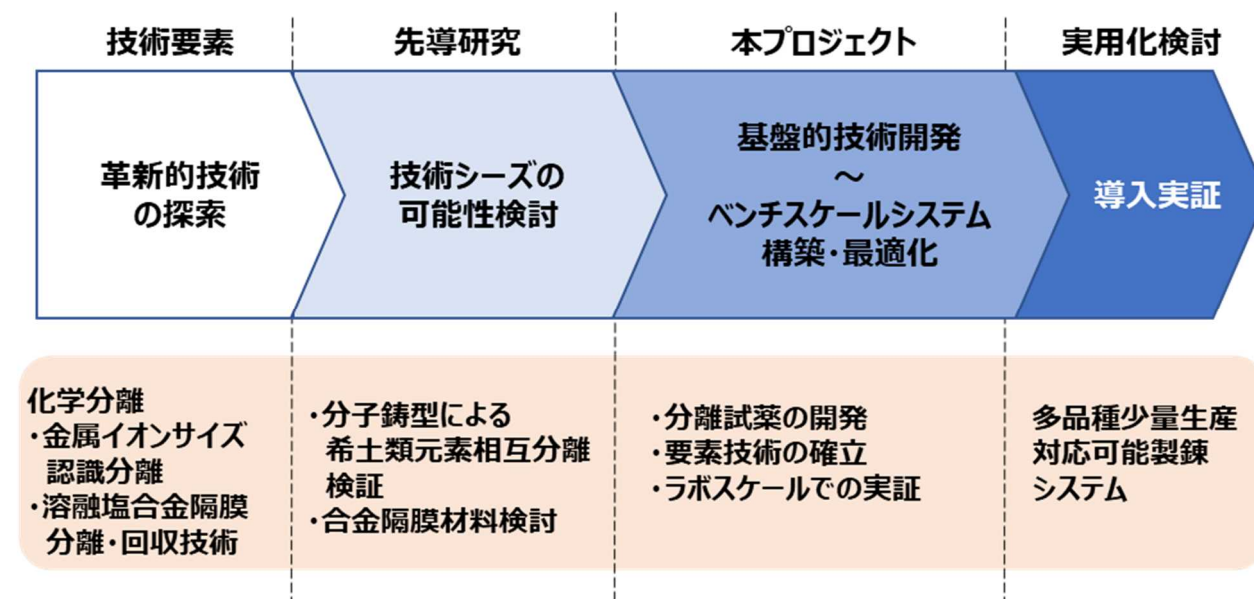
期間：2017年7月31日～2023年3月31日

予算（単位：億円）

年度	2017	2018	2019	2020	2021	2022	合計
研究開発項目③-1	0.9	0.9	0.5	0.7	1.2	1.0	5.3
研究開発項目③-2	0.4	0.6	0.7	1.1	0.8	1.0	4.6

✓ 実用化への道筋

研究開発項目③における実用化とは、「当該研究開発に係る成果(分離剤、装置、システム等の基盤技術)がリサイクル事業者、化学薬品事業者等により利用が開始されること」をいう。

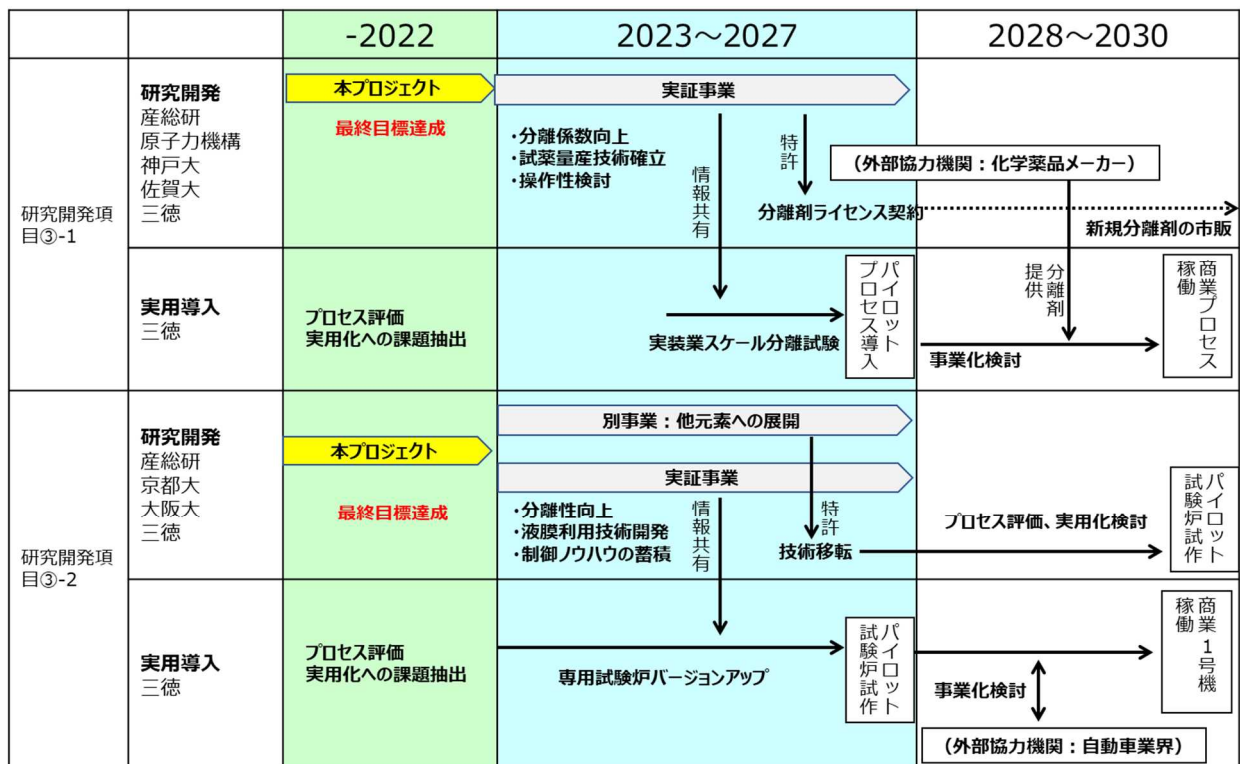


研究開発項目③では、先導研究(H27年度採用)により、分子鑄型による希土類相互分離と合金隔膜による希土類元素の回収に関する研究をスタートし、本事業(6年間)において基盤的技術開発及びラボスケールでの実証を行った。今後5年程度実用化、事業化の検討を行い、新規技術の商業稼働を目指す。また、主要希土類材料メーカーである三徳が研究開発に参画しており、目標値設定や分離回収条件等の決定に関与している。このような実用化計画が、各社独自に実施されるのではなく、研究機関を含めた連携体制の中で、迅速かつ効率的に進められるよう、プロジェクト終了後5年程度の後継実証事業の採択を目指す。

成果の実用化に向けた具体的取組について、研究開発項目③-1では、沈殿分離法である鑄型分離技術の応用として、溶媒抽出法及び吸着分離法へと技術を展開させた。また、2018年度から重希土類元素の分離がテーマとして加わった。三徳においても重希土類元素の相互分離の重要性が高いことから、実用化に向けた分離剤開発に関しては、テルビウムとジスプロシウムの相互分離性能が高い化合物の探索を重点的に進めた。テルビウムとジスプロシウムの相互分離に優れた抽出剤を見出し、最終年度に特許出願を行った。この抽出剤に関しては、今後3年程度、量産のための合成技術及び実プロセスにおける操作性の検討を行い、化学薬品メーカー(外部協力機関)とのライセンス契約を目指す。同時に三徳において実用化検討、それに続いて事業化検討を行い、2030年度までの商業稼働を目指す。

研究開発項目③-2では、科学的な知見を着実に蓄積する一方で実用化への取り組みを推進した。具体的には、

ラボ試験向けの塩化物系溶融塩から商用利用に適したフッ化物系溶融塩へ、450℃程度の中温域から 800℃以上の高温域へ、0.1 kg 規模から 10 kg 規模へと展開を図り、最終的に三徳において試験炉でのフッ化物系溶融塩を用いた隔膜透過試験を実施した。さらに、これらの研究過程で得た知見をもとにコスト計算を行い、プロセス導入時のコストを従来法の 1/2 以下にする見通しを立て、その実現に必要な技術課題を抽出した。今後 3 年程度はこの技術課題解決のためのラボ試験を推進するとともに、導入した試験炉のバージョンアップを順次行い、2027 年度末までのパイロット試験炉導入、2030 年度末までの商業 1 号機導入を目指す。併せて、本プロジェクトで得た知見をもとに他元素への展開、具体的には希土類の新規製錬法の開発を進め、こちらも知財やノウハウを蓄積するとともに、実用化へ向けた検討を行う。



✓ アウトプット目標の達成状況

研究開発項目③-1

分類（要素技術）	目標と達成状況（当初計画との差異）
鋳型分離メカニズムの解明及び分離試薬設計法の構築	プラセオジムとネオジムの分離係数 5 以上をもたらす有機配位子と分離手法を見出し、その相互分離メカニズムを明らかにするとともに、配位子設計の鍵となる分離試薬の配位構造を特定した。 達成状況：○ 計画通り達成
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	鋳型分離技術に用いられた有機配位子を改良し、従来型分離法である溶媒抽出法及び吸着分離法へ適用することで、プラセオジム／ネオジム分離に対し高い分離係数を得るとともに、重希土類の相互分離においても有効な抽出剤を見出した。また、重希土類分離の実用化へ向けたプロセス評価を行う。 達成状況：○ 計画通り達成

### 研究開発項目③-2

分類（要素技術）	目標と達成状況（当初計画との差異）
合金隔膜の長寿命化、液膜の利用	具体的数値目標は設定しなかったが、元の Ni-RE 合金に比較して 6～20 倍の剪断強度を達成した。さらに、破損リスクの極めて少ない液膜利用の検討も行った。 達成状況：○ 計画通り達成
分離性の向上	80%以上での回収を目標に設定し、Dy は 82%、Nd は 86%と、当初計画を上回る値を達成した。 達成状況：○ 計画通り達成
複数の合金隔膜制御および連続電解に向けた技術開発	複数の合金隔膜を用いた同時制御技術の確立、連続電解の実証を目標に掲げ、それぞれラボレベルで達成した。 達成状況：○ 計画通り達成
試験炉導入・操業データ蓄積・コスト計算	ラボレベルより 2 桁ほど大きい試験炉を導入し、操業データを蓄積することを目標として掲げ、塩化物系、フッ化物系溶融塩にてそれぞれ達成した。また、これをもとにコスト 1/2 以下にするための技術課題を明確化した。 達成状況：○ 計画通り達成
機構解明と他元素への展開	具体的目標は掲げなかったものの、合金化時や合金隔膜内の RE 移動機構に関する重要な基礎知見を得て論文発表するとともに、他元素の製錬に関する特許出願を行った。 達成状況：○ 計画通り達成

### ✓ 成果の意義

#### 研究開発項目③-1

重希土類元素であるテルビウム／ジスプロシウム分離は、高性能磁石の需要増加が予測される中で喫緊の課題である。本事業で開発された重希土類分離用抽出剤は、従来型抽出剤を上回るテルビウム／ジスプロシウムの分離係数が得られている。

#### 研究開発項目③-2

現在の希土類磁石は多段かつ高コストなプロセスでリサイクルされているため、市中に出回った磁石は廃棄または海外流出している。これに対し、単一工程での高効率リサイクルという世界に類を見ないプロセスを開発し、コストを 1/2 以下にする目途を立てた。これは、従来技術に対する大きなアドバンテージであり、国内リサイクル実現の可能性を示したものである。

### ✓ 副次的成果及び波及効果

参画機関の大学において、本事業に関する研究開発により、卒業論文 8 件及び修士論文 7 件を作成し、当該分野での人材育成に貢献した。

また、本プロセスにより希土類の国内リサイクルが可能となれば、電気自動車や風力発電等の普及に多大なる波及効果を持つ。

✓ 特許出願数、論文発表数

年度	2017	2018	2019	2020	2021	2022	合計
特許出願数	0	0	2	0	1	2	5
論文発表数	1	3	4	6	8	4	26
学会発表・講演数 <sup>*1</sup>	11	17	13	10	12	16	79
新聞・雑誌等への掲載数 <sup>*1</sup>	0	0	0	0	0	2	2
シンポジウム・セミナー主催 <sup>*1*2</sup>	1	0	0	0	0	1	2

\*1 学会発表・講演、新聞・雑誌等への掲載、シンポジウム・セミナー主催は成果の普及に資する活動である。

\*2 シンポジウムは研究開発項目①②③、または研究開発項目③④合同での主催のため、研究開発項目①②③④それぞれで計上。

✓ 研究開発成果の概要

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た。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、コスト的にも全く不可能である。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、以下の 2 つの革新的な技術開発を目指し、理論構築と応用可能性の検証を実施した。(図 4.3.1-1)

(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

(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

鑄型分離技術では溶液中に希土類元素が低濃度で含まれ、希土類間の高度相互分離が必要になる系を、溶融塩利用技術では二種類の希土類元素が濃縮された磁石材料を主な対象とした。

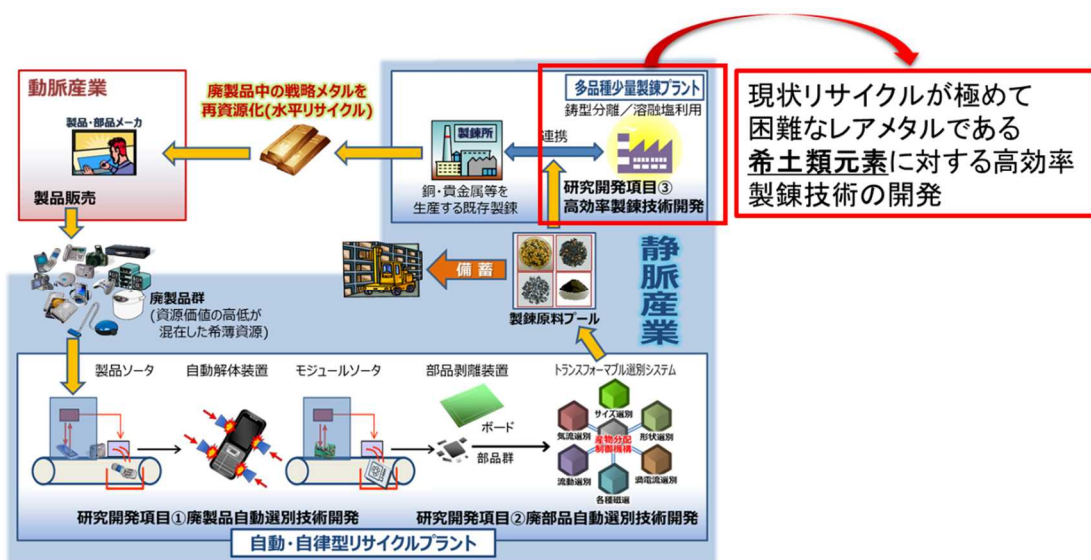


図 4.3.1-1 高効率製錬技術開発の位置づけ

✓ 研究開発成果の詳細

(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

希土類磁石のリサイクルにおいては、元素毎に分離回収することにより、その後の磁石製造工程を大幅に簡略化することが可能になる。しかしながら、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、特に隣り合った希土類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。分離精製工程で使用されている分離剤や基本技術は半世紀以上前に確立されているものが、マイナーチェンジ等はあるものの、現在も用いられている。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。

本項目では、目的物質の「形状」を「鍵と鍵穴」の関係の様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 4.3.1-2)」のメカニズム解明を行った。さらに、そのコンセプトの工業用分離操作法である溶媒抽出及び吸着分離への適用可能性について検討した。一般に溶媒抽出法は金属イオンが比較的高濃度(>g/L)の溶液に、吸着分離法は低濃度(<g/L)の溶液に適していることから、両方の技術を進めることで対象となる実工程液の範囲を広げることが期待できる。また、2018年度からは実用化への期待がより高い、重希土類元素に対する相互分離の検討がテーマに加わり、溶媒抽出法による Tb/Dy の相互分離について検討を行い、プロセス評価を行った。

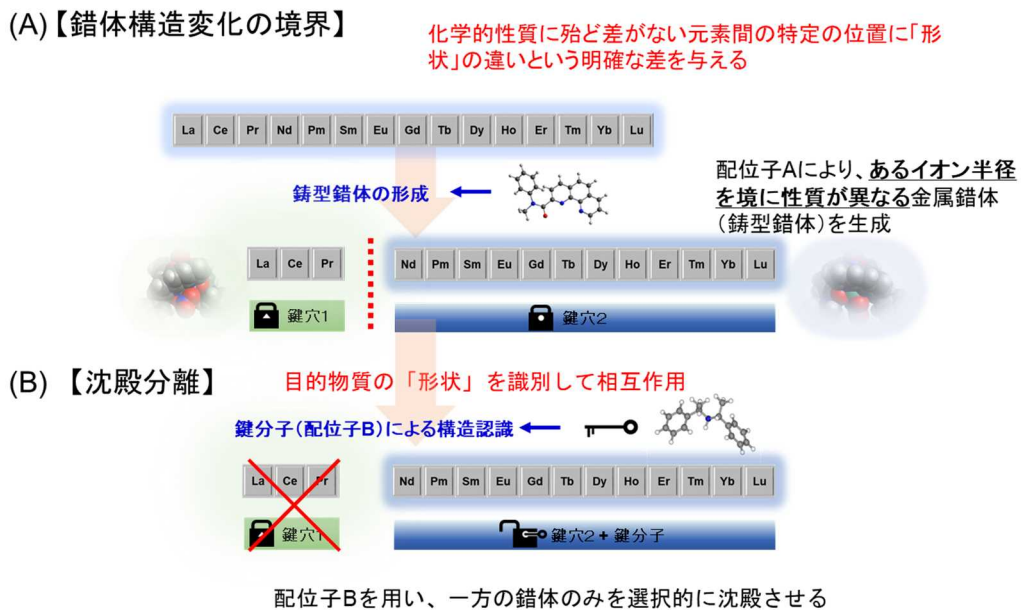


図 4.3.1-2 鑄型分離技術のコンセプト

■ 最終目標

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(Separation Factor, SF : 金属イオンの固-液又は液-液二相間分配比(Distribution ratio, D)の二つのイオンの比)について、5 を有する分離法を開発する。また、重希土類元素の相互分離への適用性について評価を行う。(図 4.3.1-3)



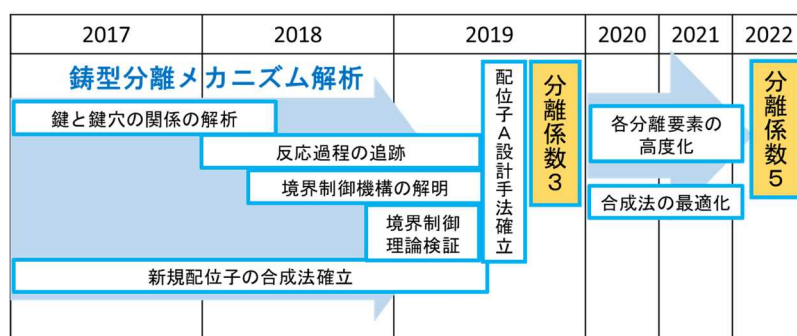


図 4.3.1-3 研究開発項目 3-1-A の研究開発スケジュール

本文中では特に言及しない限り、D、SF、抽出率及び吸着率は以下の様に定義する。

固－液(沈殿分離)系での分配比 D

$$D = \frac{([\text{沈殿前の水溶液中の金属濃度}] - [\text{沈殿後の水溶液中の金属濃度}])}{[\text{沈殿後の水溶液中の金属濃度}]}$$

液－液(溶媒抽出)系での分配比 D

$$D = \frac{[\text{抽出後の有機相中の金属濃度}]}{[\text{抽出後の水溶液中の金属濃度}]}$$

$$SF = D1 / D2$$

(D1 及び D2 は、それぞれ異なる金属イオンの同条件化における分配比)

液－液(溶媒抽出)系での抽出率 E

$$E (\%) = \frac{([\text{抽出後の有機相中の金属濃度}] / [\text{抽出前の水溶液中の金属濃度}]) \times 100}$$

固－液(吸着分離)系での吸着率 E

$$E (\%) = \frac{([\text{吸着前の水溶液中の金属濃度}] - [\text{吸着後の水溶液中の金属濃度}])}{[\text{吸着前の水溶液中の金属濃度}]} \times 100$$

### (3-1-A) 鑄型分離メカニズムの解明

我々は 2016 年度の NEDO 先導研究において、1,10-phenanthroline-2-carboxamide(PTA)型化合物による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、配位子 A となる *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配位子 B として(S)-(+)-2-amino-3-methylbutane 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。

この革新的新規技術を実用化に移行させるためのステップとして、そのメカニズム解明に加え配位子 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。よって、鑄型錯体形成・鍵分子相互作用の解明、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、高度相互分離のための配位子設計指針に関する知見を得ることが重要となる。

#### ■ 目標

鑄型錯体を形成する配位子 A や鑄型錯体の構造を認識して分離する配位子 B として最適な化合物の選定やその相互作用メカニズムの解明、Pr/Nd を高効率に分離する(分離係数 5)ための分離条件の検討と最適化を行う。また、重希土類元素分離に必要な配位子構造情報を提供する。

#### ■ 研究開発の成果

##### a. 希土類 – PTA 錯体(鑄型錯体)の構造特性

希土類イオンは安定なイオンの価数が全て 3 価であり、原子番号が増大するにつれてイオン半径が徐々に小さくなり、相対的に電荷密度は徐々に大きくなるという性質を有している。そのため、1,10-phenanthroline(Phen)のような静電的相互作用に基づき希土類と結合する従来の配位子では、原子番号の増大につれて錯形成能が右肩上がりに大きくなるというのが一般的な挙動である。従って、特定の希土類イオンに対し高い錯形成能を有するという MePhPTA の特徴(図 4.3.1-4)は特異的なものであり、希土類イオンのイオン半径が変化したときの錯体構造の変化を詳細に考察することで、錯体構造

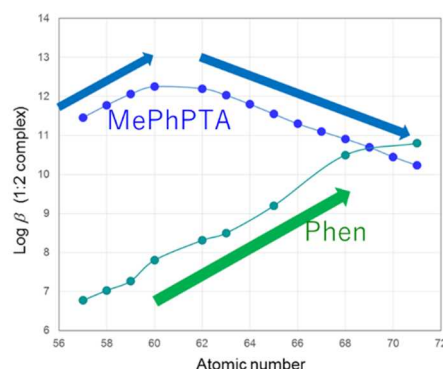


図 4.3.1-4 希土類錯体の錯生成定数 $\beta$ と原子番号の関係

変化の境界元素を制御するための指針を得ることができる。そこで、MePhPTA が各種希土類イオンと形成する錯体の詳細な構造解析を単結晶 X 線構造解析により実施した。希土類イオンのイオン半径と配位結合距離との関係をプロットした結果を Shannon らのイオン半径データより推定した希土類イオンの水和錯体の配位結合距離とともに図 4.3.1-5A に示す。この図に示すように、希土類イオンとアミド酸素原子の結合距離、フェナントロリン窒素原子との結合距離ともに、Nd~Eu 間で最も大きな変化が見られるが、これは内圏に配位した硝酸イオンを含む錯体全体の配位数が変化しているためである。そこで、Ce~Nd、Eu~Er のように配位数が同じ錯体同士でその距離を比較すると、希土類イオンとアミド酸素原子の結合距離では水和錯体と同様の変化が見られるのに対し、フェナントロリン窒素原子との結合距離はその変化が小さかった。水和錯体の場合では、希土類イオンのイオン半径の

縮小に合わせて水和水のジオメトリーが自由に变化できるため、一般にイオン半径の減少分だけ結合距離が短くなる。希土類イオンとアミド酸素原子の結合距離が水和錯体と同様の变化を示すのは、フェントロリン部位とアミド基とを繋ぐ結合が回転可能であるため、イオン半径の変化に合わせてアミド酸素原子のジオメトリーが变化できるためと考えられる。実際に、結晶構造解析の結果においても、フェントロリン部位とアミド基が成す二面角は希土類イオンのイオン半径が小さくなると減少し、O-N間の距離も短くなり、イオン半径に合わせてそのコンフォメーションが变化する様子が確認された。一方で、イオン半径の変化に対する希土類イオンとフェントロリン窒素原子との結合距離の変化が小さいことは、2つの窒素原子が剛直なフェントロリン骨格によりそのジオメトリーの変化を制限されていることに由来すると考えられる。実際に、窒素原子を含む2つの6員環構造が成す二面角は、ランタノイドのイオン半径が変化しても殆ど変化しなかった。一方で、フェントロリン骨格の2つの窒素原子間の距離に着目すると、ごく僅かに変化していることが分かった(図 4.3.1-5B)。

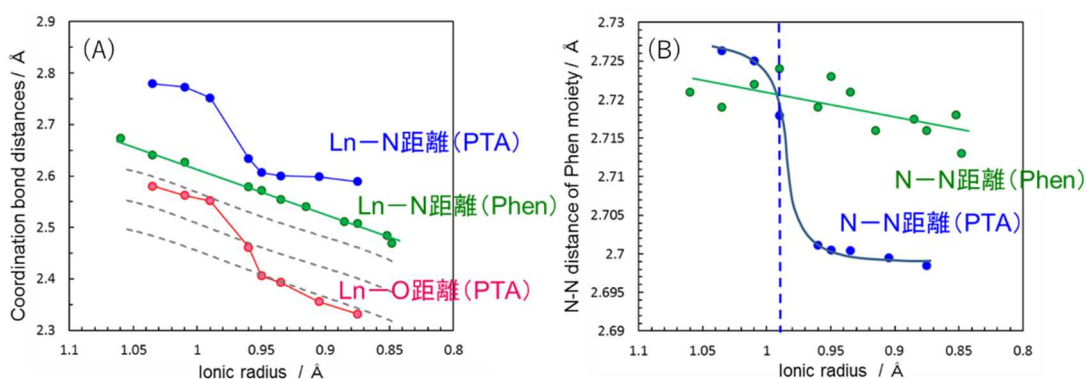


図 4.3.1-5 PTA 及び Phen 希土類錯体における構造パラメーター希土類イオン半径と(A)結合距離及び(B)フェントロリン基の N-N 距離との関係

この結果はイオン半径に合わせてフェントロリン部位が微細に伸縮していることを示している。この時、イオン半径がある一定以上の(Pr より大きい)場合には2つの窒素原子間の距離がそれ以上長くならない、すなわち、フェントロリン部位が伸びきったような状態であり、また、イオン半径がある一定以下の(Sm より小さい)場合には2つの窒素原子間の距離がそれ以上短くならない、すなわち、フェントロリン部位が縮みきったような状態であることが明らかとなった。従って、フェントロリン部位は伸縮できるもののその範囲は限られており、イオン半径が Pr より大きい、または Sm よりも小さい場合にはこれに適合していない状態であるといえる。なお、放射光 X-ray Absorption Fine Structure(XAFS)法による溶液中における錯体構造の検討も併せて実施しており、イオン半径の変化に伴う溶液錯体の結合距離の変化が結晶系における結合距離の変化の特徴や、そこから推察したイオン認識メカニズムと一致するものであり、MePhPTA は溶液系においても結晶中と同様のメカニズムで錯形成することを確認した。一方、アミド基を持たない Phen では、窒素原子との結合距離が水和錯体と同様の变化を示し、2つの窒素原子間の距離は MePhPTA のような明確な変化を見せなかった。Phen では希土類イオンのイオン半径が小さくなると、配位子のコンフォメーションが変化しなくても配位子全体が希土類イオンに近づくという挙動を示した。これに対し MePhPTA では、アミド酸素との結合距離が他の配位元素との結合距離より短い、すなわちアミド酸素原子が非常に強く結合しており、これにより希土類イオンのイオン半径が小さくなった時にフェントロリン部位全体が近づくこと

が妨げられている。そのため、MePhPTA では Phen の場合とは異なり、イオン半径の変化に合わせてフェナントリン部位がわずかに伸縮するという挙動を示すものと考えられる。また、希土類イオンに MePhPTA が配位した錯体の残りの配位座に配位できる硝酸イオンの数は、希土類イオンのイオン半径、すなわち希土類イオン周辺の配位空間の大きさと、この空間を占める MePhPTA の占有率に依存すると考えられる。希土類イオンが十分に大きい場合には MePhPTA が 2 分子配位しても大きな空間が残されており、そこに 3 つの硝酸イオンが配位する。イオン半径が小さくなるとこの空間が狭くなるため配位可能な硝酸イオンの数は減少する傾向を示す。実際に Nd まではフェナントリン部位が収縮することで MePhPTA による空間の占有率も減少し、硝酸イオンが 3 つ配位している。Sm 以降ではフェナントリン部位がそれ以上収縮することができないため、希土類イオンのイオン半径が小さくなると相対的に MePhPTA による空間占有率が大きくなり、硝酸イオンが配位できる空間が狭くなり、Sm 以降では配位可能な硝酸イオンの数が 2 つとなった。新たに合成した PTA 誘導体についても、溶媒抽出法により錯形成特性の検討を行った(図 4.3.1-6)。PTA のアミド窒素原子上のフェニル基に電子供与または吸引性の官能基を導入すると、その電子供与性が高くなるほど抽出能力が増大し、置換基の電子的効果に応じて錯形成能力が変化することが分かった。また、電子吸引性の官能基を導入した誘導体では、抽出分配比  $D$  が MePhPTA のように特定元素に明確な極大を示さないが、電子供与基を導入した誘導体では Nd 付近に明確な極大を示した。特に、アミド窒素原子上のフェニル基にメチル基を導入した誘導体 *N*-methyl-*N*-tolyl-1,10-phenanthroline-2-carboxamide(MeToIPTA)では、UV/vis 分光的滴定実験において、Pr~Nd に錯生成度定数の最大値を示

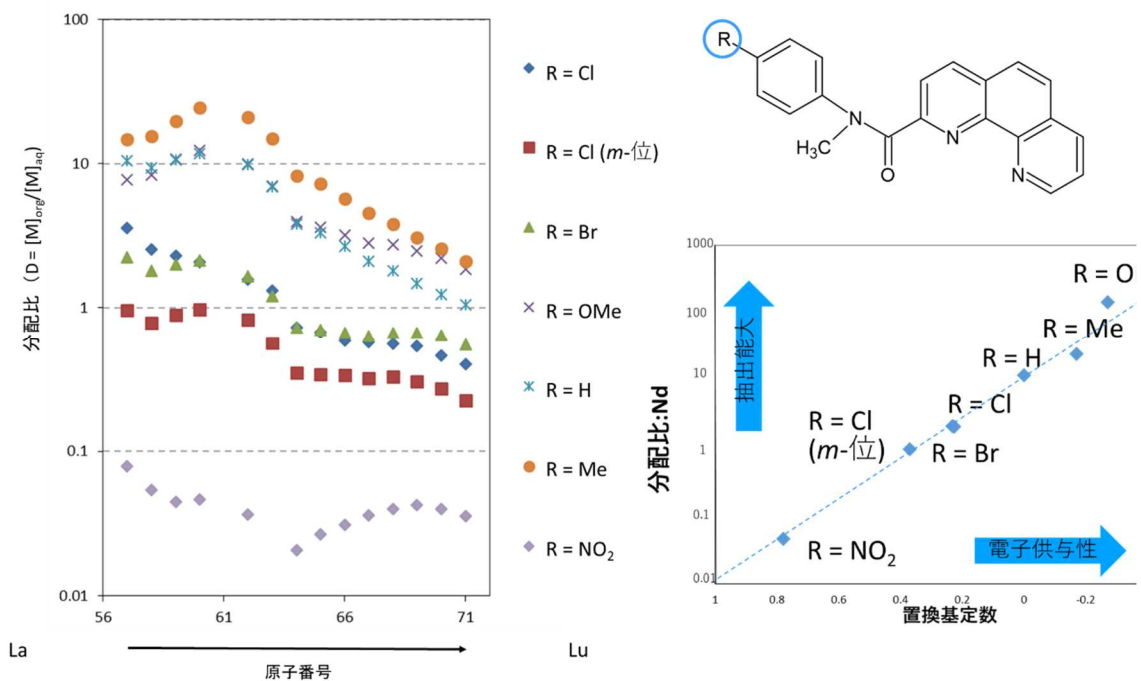


図 4.3.1-6 各種 PTA 誘導体による希土類元素の抽出分配比  $D$  及び電子供与性と抽出性能の関係

すことが明らかとなった。また、アミド窒素原子上にナフチル基やエチル基など、かさ高い官能基を導入した場合に軽希土類における抽出分配比の極大が Nd から Pr 付近にシフトする様子も観察された(図 4.3.1-7)。

続いて、PTA の化学修飾に伴う希土類イオンとの錯体構造変化の境界の変化とその錯形成メカニズムを明らかにするために、MeToIPTA と希土類イオンとの錯体の単結晶 X 線構造解析を実施した。上述したように、MeToIPTA は MePhPTA のフェニル基に電子供与性のメチル基を導入したもので、錯生成定数の極大が Nd~Sm 付近から Pr~Nd 付近へとシフトした。結晶構造解析の結果、MeToIPTA は MePhPTA と類似した錯体構造をとり、MePhPTA と同様に特定の元素を境界に内圏の硝酸イオンの数が増減し、境界前後において 2 分子の PTA が形成する見かけのらせん構造の方向が反対であった(図 4.3.1-8)。

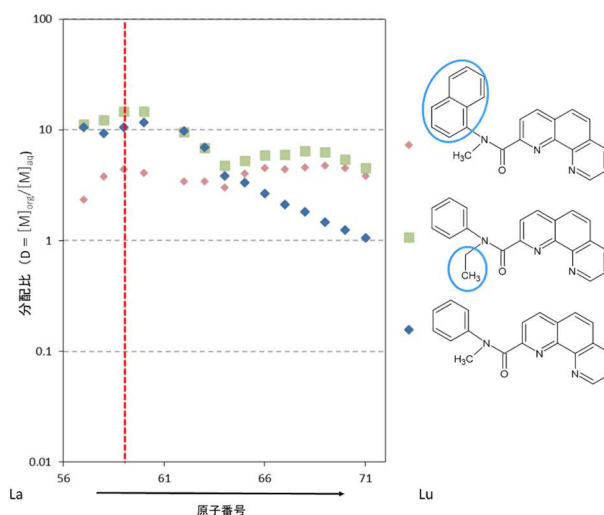


図 4.3.1-7 N-置換基変化による抽出最大希土類元素のシフト

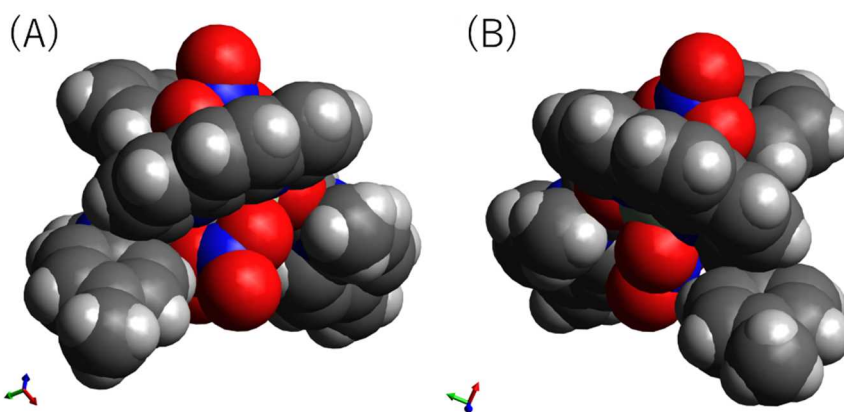


図 4.3.1-8 単結晶錯体の構造 (A)[Pr(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>(MeToIPTA)<sub>2</sub>] (B) [Nd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(MeToIPTA)<sub>2</sub>]<sup>+</sup>

この構造変化の境界は MePhPTA では Nd/Sm 間であったのに対し、MeToIPTA では Pr/Nd 間であった。また、MeToIPTA の場合も同様に希土類イオンのイオン半径に合わせてフェナントロリン部位が微細に伸縮するが、その伸縮範囲は MePhPTA では約 2.700~2.725 Å であったのに対し MeToIPTA ではこれよりも大きい約 2.720~2.745 Å と、フェナントロリン部位のサイズと伸縮範囲がより大きくなっていることが分かった。さらに、フェナントロリン部位がそれ以上収縮できなくなる元素が MePhPTA では Sm 以降であったのに対し、MeToIPTA では Nd 以降となっており、それに合わせて錯体構造変化の境界元素も変化している。これらのことから、官能基の電子的効果によりフェナントロリン部位の電子密度を制御することで、錯体構造変化の境界元素の異なる化合物が設計可能

であることが明らかとなった。また、これらの結果は、錯生成定数のピーク位置が構造変化の境界を示す指標になることも示している。

#### b. 鋳型錯体構造を認識する配位子 B の選定

MeTolPTA による錯体構造変化を識別して分離することができれば、Pr/Nd 間の高効率な分離を実現することが可能である。これら 2 種の錯体を分離するための方策としては、1) 外圏錯体の対イオンを置き換える、2) 内圏の硝酸イオンを同程度のかさを持つ化合物と置き換える、3) 錯体周囲の空間サイズや形状の違いを認識する化合物を作用させる等によりどちらか一方の錯体の溶解度を変化させる方法が有効であると考えられる。今回、Pr/Nd 間で構造変化が見られたことから、錯体の構造変化を識別し得る化合物を添加して沈殿させる方法で、Pr/Nd 間の分離を試みた。得られた希土類元素の固-液分配比のグラフを図 4.3.1-9 に示す。配位子 B を添加せず自然濃縮で沈殿させた場合には、沈殿の固液分配比は Ce から Tb でフラットになり、La や Dy 以降では低下した。すなわち、沈殿挙動に Pr と Nd 間で明確な差はなく、溶媒抽出の場合と同様に Pr/Nd を境界に生成する 2 種の錯体の溶解度には殆ど差がないことが示された。一方、幾つかの化合物を配位子 B として添加したときに、沈殿のプロファイルに明確な変化が観察された。sodium sulfate を添加した場合には、全ての希土類元素で沈殿量が増加するが、特に軽希土類その効果が顕著で、右肩下がりの沈殿プロファイルになった。この挙動は塩析の効果で説明することができ、特に Pr 以前で生成する内圏に硝酸イオンが 3 つ配位した中性型の錯体でその効果が大きかったものと考えられる。また、sodium tetraphenylborate を添加した場合、重希土類で沈殿量が著しく増加し、右肩上がりプロファイルになった。tetraphenylborate は非常に疎水性が大きく配位性には乏しいアニオンであり、カチオン型錯体とイオン対を作ることで極性溶媒への溶解性を大きく低下させる。この場合は、Nd 以降で形成する外圏錯体において、外圏の硝酸イオンと tetraphenylborate の置換が起きたものと考えられる。potassium hexafluorophosphate を加えた場合には、添加量が少ない際に中希土類を中心に沈殿量が増すが、一定量以上を添加すると沈殿量が減少に転じた。すなわち、hexafluorophosphate は過剰に加えた場合に錯体を溶解させる効果がある。この効果は Nd 以降の元素でより顕著であり、Sm~Eu 付近にできたピークが Nd にシフトするように分配比が低下した。このことは、外圏イオンの hexafluorophosphate への置換による沈殿と、置換した錯体の hexafluorophosphate による塩入の効果が同時に働いていることを示唆している。対イオンの置き換えによる沈殿析出の効果と塩添加に伴う液性の変化(塩入)が相殺し合うように働く場合には、中希土付近を中心に極大となるプロファイルを示し、2 つの効果のバランスによりピーク位置がシフトすると推測される。これとは対照的に、sodium tetrafluoroborate を添加した場合には、sodium sulfate の様に Nd 以前の分配比を増加させる効果と、sodium tetraphenylborate のように Nd 以降の分配比を増加させる効果の両方が見られ、結果として Nd を極小とする V 字型のプロファイルを示した。この場合は、対イオンの置き換えと塩析の効果が同時に働いていると考えられる。このように、Pr~Nd 付近でスイッチする 2 種類の錯体の溶解度差を利用することで、沈殿プロファイルに多くのバリエーションをもたらすことが可能であった。しかしながら、これらイオン性の化合物の添加では、Pr/Nd 分離係数の向上には至らなかった。

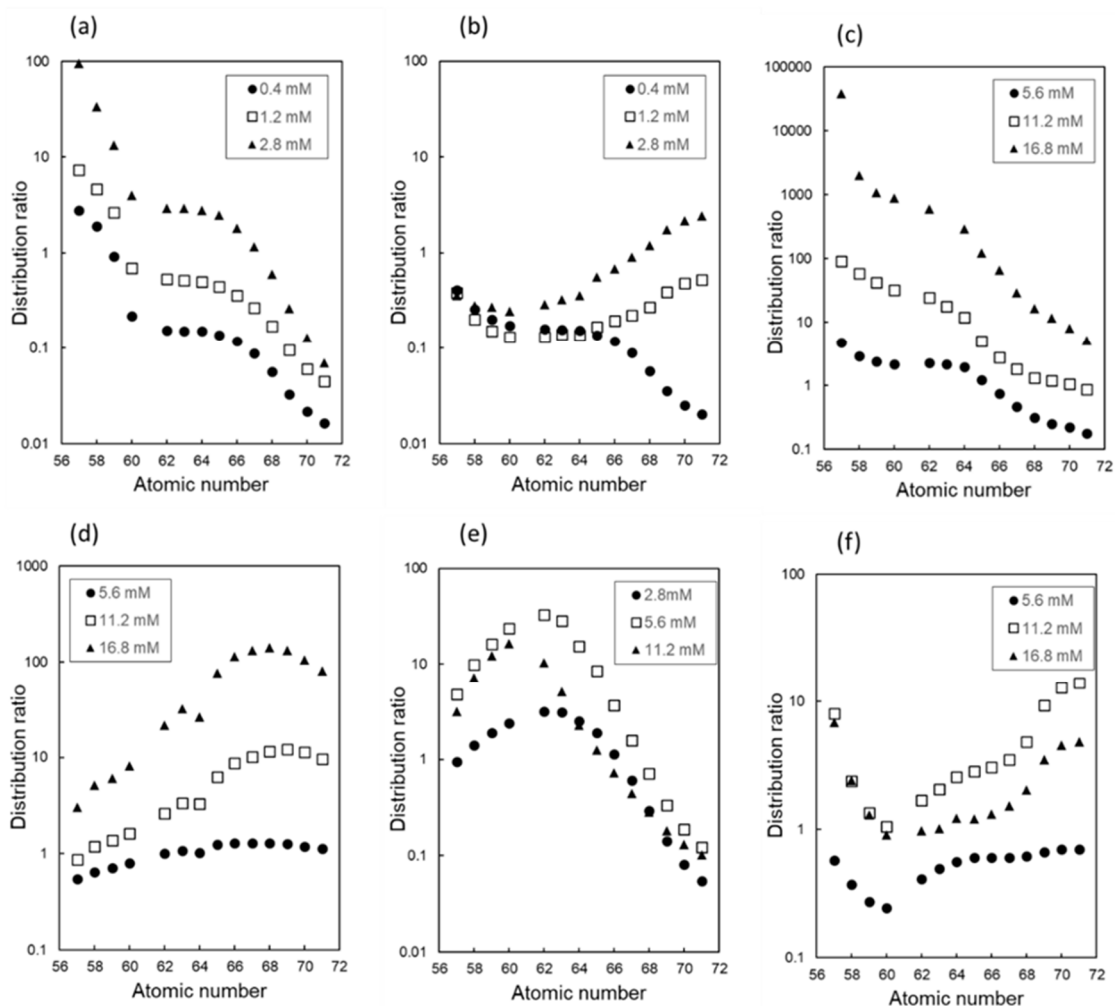


図 4.3.1-9 MeToIPTA および種々の配位子 B を用いた希土類元素沈殿の分配比 D。(a) ; (+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine, (b) ; (-)-bis[(S)-1-phenylethyl]amine, (c) ; sodium sulfate, (d) ; sodium tetraphenylborate, (e) ; potassium hexafluorophosphate, (f) ; sodium tetrafluoroborate。図中の濃度は配位子 B 濃度。

一方、いくつかの光学活性アミン化合物を添加した場合に、Pr/Nd 間の明確な分離が観測された。使用したアミン化合物の構造を図 4.3.1-10 に、これらによる Pr/Nd 分離係数を図 4.3.1-11 に示す。Pr/Nd 間で分離が確認できるケースでは、Nd 以降の元素の沈殿挙動は配位子 B を添加しない場合と同様で、Pr 以前の元素の沈殿量のみが著しく増加するような挙動を示した。この結果は、これらのアミン化合物が Pr 以前で形成する錯体を識別していることを示唆する。この効果は特に (+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine を用いた時に顕著で(図 4.3.1-9a)、Pr/Nd の SF は 4.2 に達した。また、(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine の光学異性体である (-)-bis[(S)-1-phenylethyl]amine を用いた場合では、これとは反対に重希土で沈殿量が増加しており(図 4.3.1-9b)、bis[1-phenylethyl]amine の光学活性により、Pr/Nd 間で反転する希土類 – MeToIPTA 錯体

の鏡像異性体のような構造変化を識別していることが示唆される。

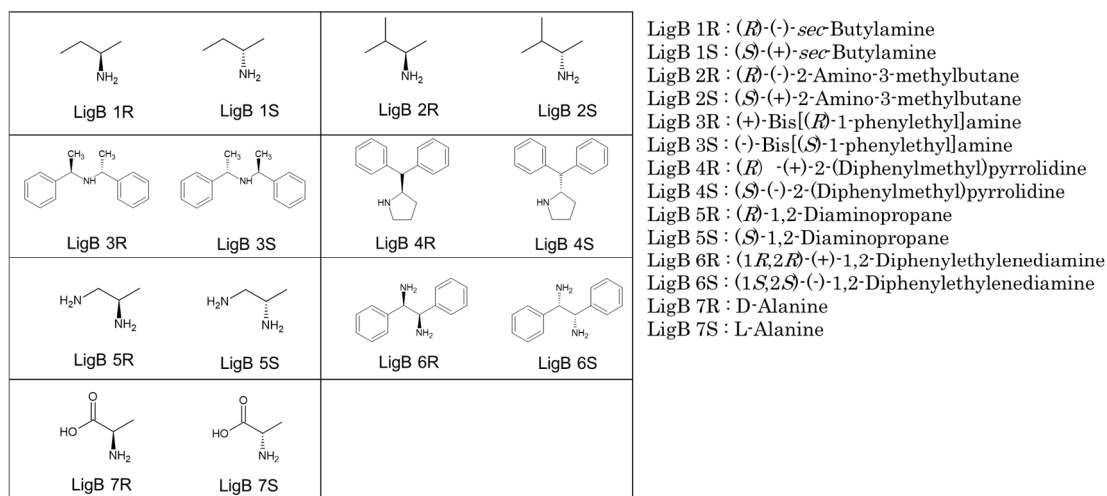


図 4.3.1-10 配位子 B として用いた光学活性アミン化合物

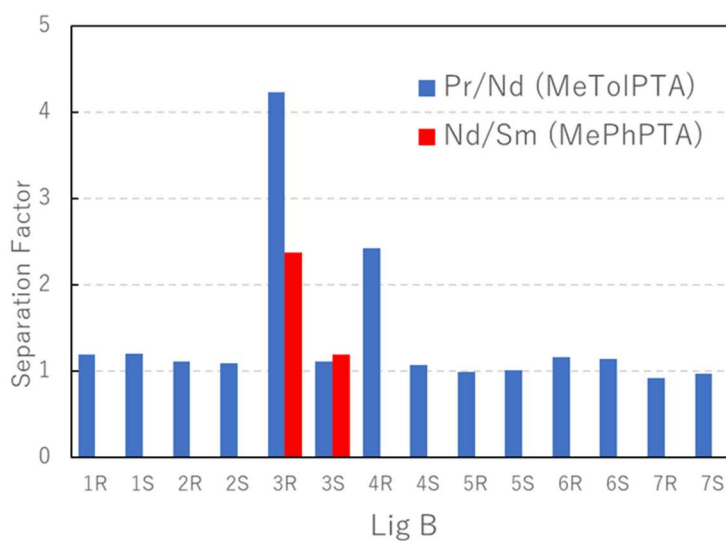


図 4.3.1-11 配位子 B として光学活性アミン化合物を用いた場合の Pr/Nd または Nd/Sm の分離係数 SF。Pr/Nd については配位子 A として MeToIPTA を用いた場合の、Nd/Sm については配位子 A として MePhPTA を用いた場合の結果。

MePhPTA ではこの境界が Nd/Sm へとシフトすることが明らかとなっている。このことは、MePhPTA を配位子 A として用いることで沈殿分離の元素選択性を変化できることを示している。そこで、MeToIPTA の代わりに MePhPTA を用いて沈殿分離実験を行った(図 4.3.1-12)。



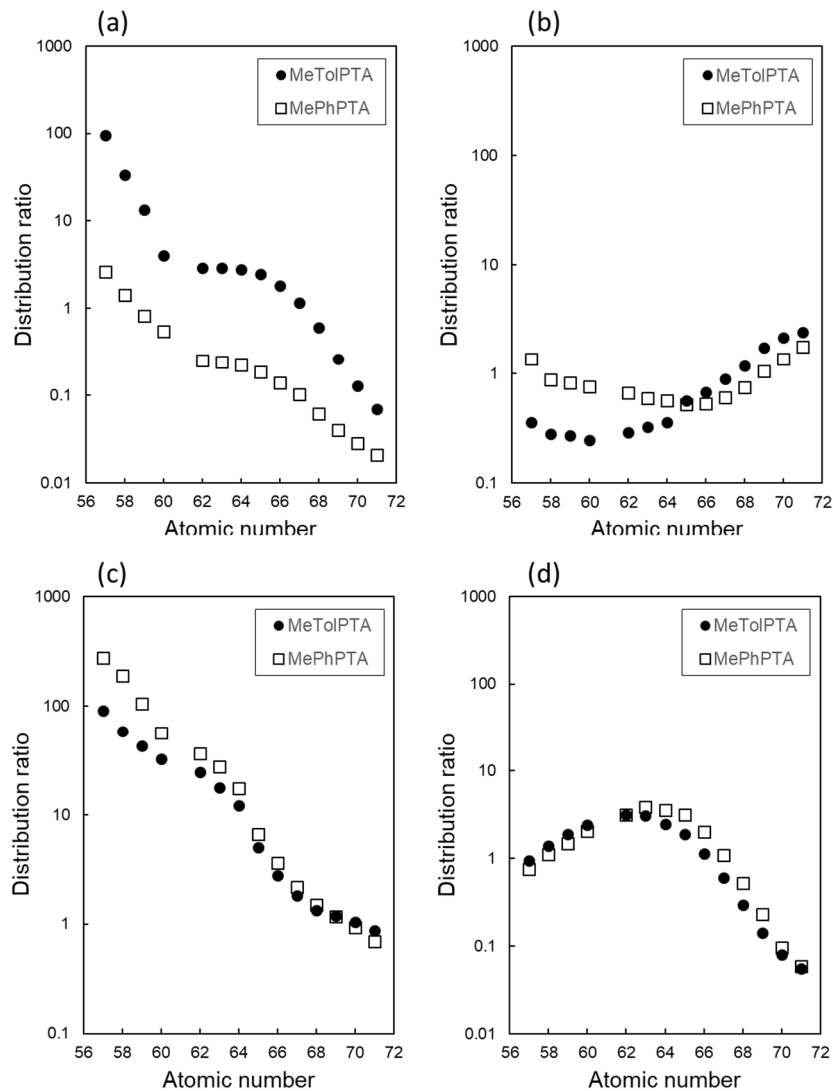


図 4.3.1-12 MePhPTA または MeTolIPTA を配位子 A として用いた希土類元素沈殿の分配比 D。配位子 B の種類は(a) ; (+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine, (b) ; (-)-bis[(S)-1-phenylethyl]amine, (c) ; sodium sulfate, (d) ; potassium hexafluorophosphate

MePhPTA を配位子 A として用いることで、分離挙動に変化が生じ、(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine を用いた場合、MeTolIPTA では La~Pr で分配比が向上するが、MePhPTA を用いると La~Nd で分配比が大きく向上した。すなわち、分配比が向上する境界元素が Pr から Nd へとシフトしており、この結果は結晶構造解析で明らかになった錯体構造変化の境界元素のシフトと一致する。重希土で分配比が向上する傾向を示す(-)-bis[(S)-1-phenylethyl]amine でも選択性を示す元素がより原子番号が大きい方にシフトした。また、溶液の液性変化や対イオンの置換により沈殿プロファイルを変化させる配位子 B でも、いくつかのものは明確な挙動の変化を示した。例えば potassium hexafluorophosphate は山なりのプロファイルを示すが、MePhPTA を用いると極大を示す元素がシフトするような挙動が見られた。これらの結果はいずれも、錯体構造変化の境界元素の変

化に応答するものと考えられ、配位子 A の選択で分離できる元素を制御できることを示している。

### c.配位子 B による銑型錯体の構造認識メカニズム

配位子 B による銑型錯体の構造認識メカニズムを明らかにするために構造解析を実施した。配位子 B の添加で得られた沈殿物の XAFS 測定を実施したところ、(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine または(-)-bis[(S)-1-phenylethyl]amine の添加で得られる沈殿物と配位子 B を添加しない沈殿物で錯体の局所構造に明確な変化は見られなかった。元素分析の結果では、(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine を加えて沈殿させた場合に、Pr-MeTolPTA 錯体と(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine が 1 : 1 の組成比で沈殿していることが示された。これらの結果は、Pr-MeTolPTA 錯体と(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine が外圏型の錯体を形成していることを示唆している。そこで、希土類-MeTolPTA 錯体と(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine または(-)-bis[(S)-1-phenylethyl]amine との相互作用のメカニズムを解明することを目的に、DFT 計算による検討を行った。また、DFT 計算で求めたモデルを実証するために、溶液中の Pr-MeTolPTA 錯体に (+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine または(-)-bis[(S)-1-phenylethyl]amine を添加し  $^1\text{H-NMR}$  測定を行った。Pr-MeTolPTA 錯体 & (+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine 系における結果の一例を図 4.3.1-13 に示す。

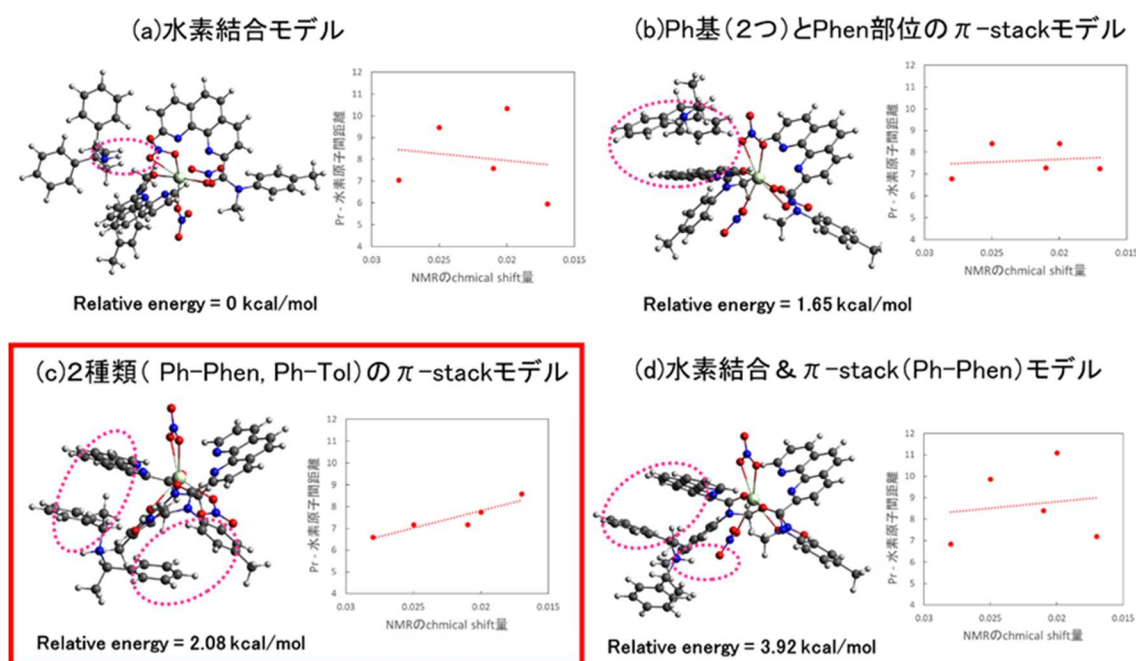


図 4.3.1-13 DFT 計算で得られた代表的な構造モデルと  $^1\text{H-NMR}$  との相関

なお、 $^1\text{H-NMR}$  では、(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine に由来する全てのプロトンが低磁場側にシフトした。このシフトは、主に希土類イオンとの擬コンタクトシフトに起因すると考えられる。すなわち、ケミカルシフト量はランタノイドイオンからそれぞれのプロトンまでの距離に依存する。そこで、DFT 計算で求めた構造モデルにおける Pr から(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine の各プロトンまでの距離と  $^1\text{H-NMR}$  のケミカルシフト量をプロットした。DFT 計算の結果では、(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine または(-)-bis[(S)-1-phenylethyl]amine が

Pr-MeToIPTA 錯体の外圏に相互作用するモデルでいくつかの安定構造が示された。相互作用のモデルは硝酸の酸素とアミン化合物のアミノ基が水素結合する様式や、PTA 分子の Phen 部位や Tol 基とアミン化合物のベンゼン環が  $\pi$ -stacking を形成する様式等があり、これらが複合的に関与するケースが多く存在した。得られた計算結果のうち、硝酸イオンとアミノ基の水素結合のみで作用するモデルや、2 つの PTA 分子の一方とのみ相互作用するモデルは、Pr/Nd 間の錯体構造の違いに関係なく相互作用可能であり、この場合は沈殿分離において Pr/Nd 間で選択性を発現しない。一方で、2 つの PTA 分子の双方と  $\pi$ -stacking を形成するモデルや、水素結合を支点としつつもう一つの PTA 分子と  $\pi$ -stacking を形成するモデルでは、bis[1-phenylethyl]amine 化合物のベンゼン環の配向はその光学活性により異なるため、希土類-MeToIPTA 錯体が Pr/Nd 間で主要な錯体構造がエナンチオマーに似た関係にあると仮定すると、光学活性な (+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine はそのどちらか一方を認識可能になる。DFT 計算と NMR のケミカルシフトの相関を見ると、(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine との相互作用モデルでは、2 分子の PTA の一方の Phen 部位ともう一方の Tol 基が (+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine の 2 つのベンゼン環とそれぞれ  $\pi$ -stacking を形成するモデルが最も良い相関を示した。これらはエネルギー的にも安定なモデルである。このモデルではエナンチオマーに似た関係にある錯体の一方のみを認識可能である。一方、(-)-bis[(S)-1-phenylethyl]amine 系での計算結果によると、アミン化合物の光学活性の違い故に、(-)-bis[(S)-1-phenylethyl]amine の 2 つのベンゼン環は (+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine と同様の配置をとることはできず、(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine 系で安定であった構造で見られた Phen 部位、Tol 基の両方と安定な  $\pi$ -stacking を形成できない。このような違いが、アミン化合物の光学活性の違いによって選択性の有無が異なる理由になっていると考えられる。

また、 $^1\text{H-NMR}$  測定より、Pr-MeToIPTA 錯体と (+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine との錯生成に関する平衡時間が長いことが示された。これは最適な位置で  $\pi$ -stacking を形成する、すなわち (+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine による構造認識は比較的遅い反応であることを示しており、選択性発現には反応速度の制御が重要であることを示唆している。そこで、沈殿析出の過程における構造変化を観察することを目的に、時分割 XAFS 測定を行った(図 4.3.1-14)。Pr(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> を含む溶液に MeToIPTA を添加することで動径構造関数の 1st ピークが大きく減少し、その後 (+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine を加えることで僅かに変化した。PTA を添加すると 1st ピーク位置は遠距離側にシフトし、1st ピーク強度は減少した。これは PTA の錯形成に由来する変化であり、さらに (+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine を添加すると、添加直後に沈殿析出を伴いながら 1st ピーク位置は近距離側にシフトし、その強度はさらに減少した。一方、その後測定を続けると徐々に 1st ピーク位置と強度は変化していき、最終的には、(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine 添加前の状態に近づいた。これらの結果は、反応開始後すぐに析出する沈殿物とゆっくりと析出する沈殿物の構造が異なることを示唆している。

次に沈殿物の性質を把握するために、Pr と Nd の混合物から得られる沈殿物について、STXM による顕微分析を行った。沈殿物粒子の Pr または Nd-M 吸収端前後でのマッピング画像と、吸収スペクトルを図 4.3.1-15 に示す。配位子 B を添加せずに沈殿させた粒子はいずれもほぼ 1 : 1 で Pr と Nd を含んでおり、粒子内の空間分布も Pr と Nd で差が見られなかった。すなわち、Pr 錯体と Nd 錯体が一緒に沈殿していることを示唆している。一方、(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine を添加して沈殿させた試料は、Pr を多く含んでおり、Pr が選択的に沈殿していることが確認できた。この試料中の異なる粒子を測定したところ、粒子により Pr : Nd 比は異なり、沈殿物が一様ではなく、不純物成分を多く含む粒子も存在することが示唆された。また粒子内の Pr と Nd の空間分布にも差が見られ、局所的には高い Pr/Nd 分離が達成された。なお、吸収スペクトルの形状は +3 価の希土類イオンの特徴と一致し、配位子 B の有無でピーク位置や形状に明確な変化は確認できなかった。

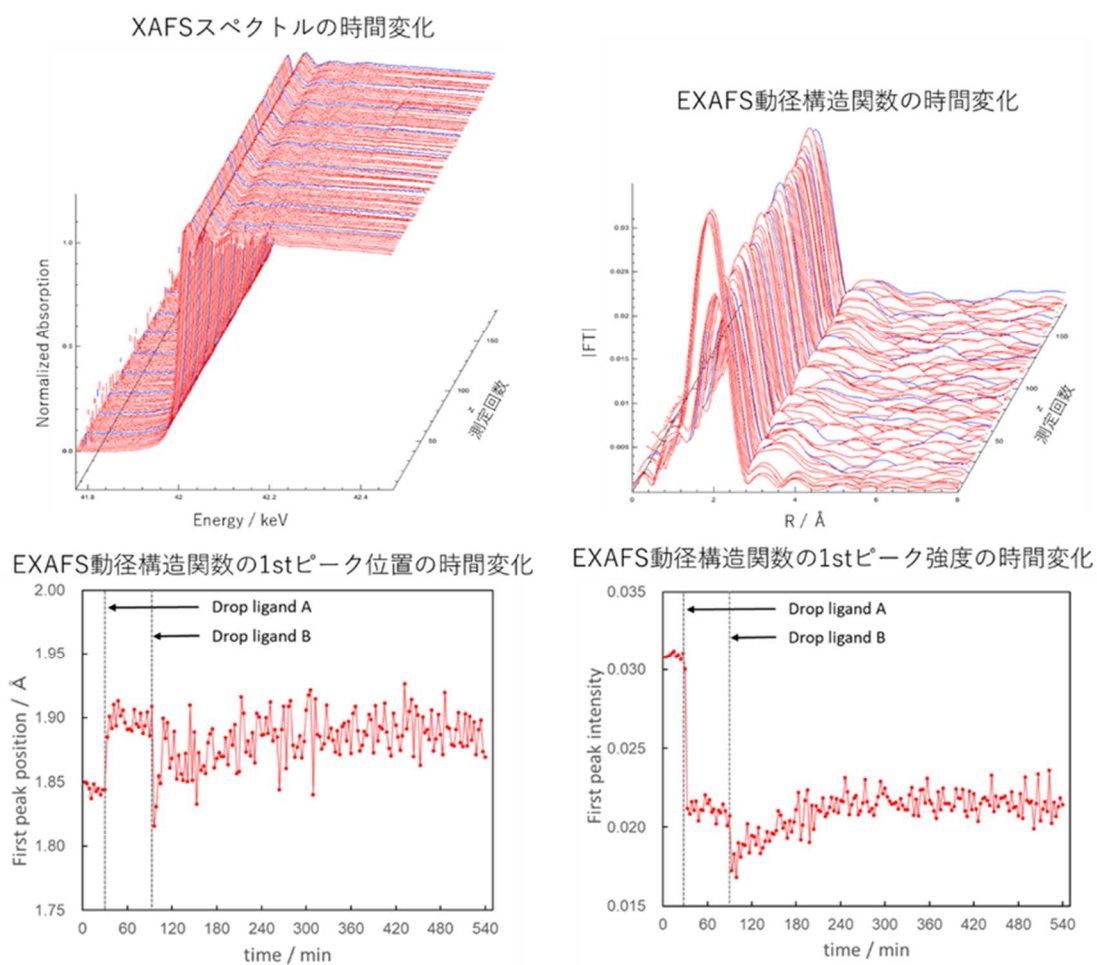


図 4.3.1-14  $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3$ を含む溶液に MeToIPTA および(+)-bis[(*R*)-1-phenylethyl]amine を添加した時の XAFS スペクトル(左上)、EXAFS 動径構造関数(右上)、EXAFS 動径構造関数の 1st ピーク位置(左下)、EXAFS 動径構造関数の 1st ピーク強度(右下)の時間変化

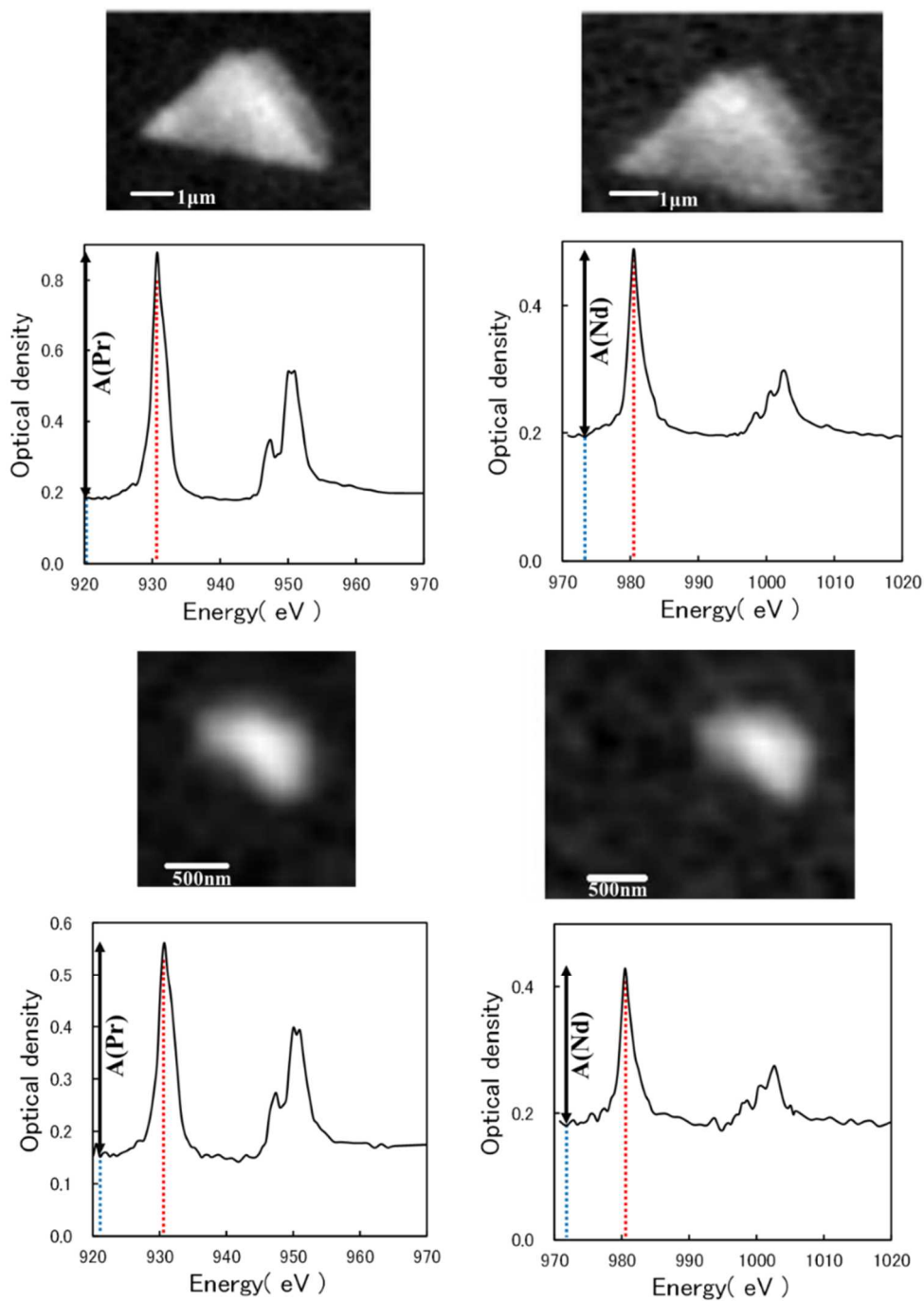


図 4.3.1-15 Pr および Nd-MeToIPTA 錯体を含む溶液に(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine を添加して得られた沈殿物の STXM の観察画像と Pr または Nd-M 吸収端の吸収スペクトル。図の上と下は異なる沈殿物粒子を観察した結果で、図の左は Pr、右は Nd の結果である。

これら NMR、時分割 XAFS および STXM の結果は、(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine による構造認識と選択的な沈殿生成には時間を要すること及び構造認識を伴わずに(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine が希土類-PTA 錯体に相互作用した錯体が反応開始の初期の段階で析出していることを示しており、反応速度を制御することで分離効率が向上することを示唆している。

#### d. 鑄型沈殿分離の条件最適化

鑄型沈殿分離の条件最適化のために、沈殿分離挙動の時間変化の検討を行った。sodium sulfate、sodium tetraphenylborate、potassium hexafluorophosphate を添加した場合には時間依存性が見られず、溶液調整後比較的速やかに沈殿が析出して平衡に達していることが分かった。この結果は、これらの化合物が塩添加による液性の変化や対イオンの置換に伴う溶解度変化により沈殿を析出させるという上記の考察と一致する。一方で、(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine をはじめとする光学活性アミン化合物を添加した場合には、時間の経過に伴い沈殿量が増加した(図 4.3.1-16)。(+)bis[(R)-1-phenylethyl]amine を添加後 12 時間における沈殿物は軽希土で元素選択性を示さず、沈殿挙動は配位子 B を添加しない系と類似していた。24 時間経過後の沈殿物では La~Pr の沈殿量の顕著な増加が見られ、96 時間後では Pr/Nd の SF はさらに増加し、5.1 に達した。これは、アミンによる錯体の構造認識は遅い反応であること、反応初期には構造認識を伴わない沈殿物が不純物として生じていることを示しており、上記の結果と一致する。また、(-)-bis[(S)-1-phenylethyl]amine の場合では時間の経過とともに重希土の沈殿量が増加した。この結果は、(-)-bis[(S)-1-phenylethyl]amine が重希土類-MeToIPTA 錯体の構造を認識していることを示唆している。すなわち、主要な希土類-PTA 錯体のキラリティーが Pr/Nd 間で反転していると推測できる。

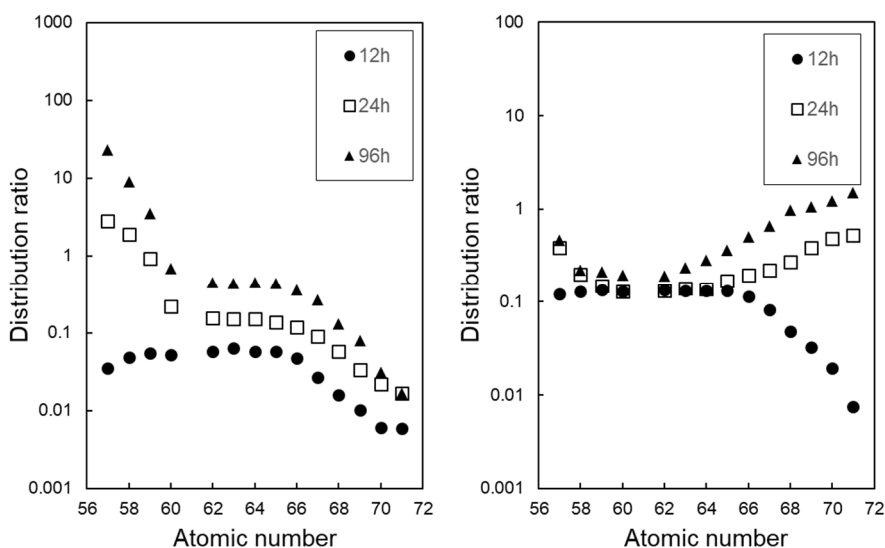


図 4.3.1-16 MeToIPTA と(+)-bis[(R)-1-phenylethyl]amine(左図)または(-)-bis[(S)-1-phenylethyl]amine(右図)を用いた希土類元素沈殿分配比 D の時間変化。

また、構造認識が遅い反応であるということは、反応速度の制御でより高い分離係数が得られることを示唆している。そこで、反応速度制御の可能性を検討するために、沈殿分離の温度変化の検討を行った。その結果、反応温度

を上昇させた場合には軽希土選択性が消失し、温度を下げた場合には Pr/Nd の SF が向上する傾向が見られた。5℃、24 時間の反応での Pr/Nd の分離係数は 5.5 に達し、目標値である 5 をクリアした。しかし、5℃と-15℃の結果を比較すると、-15℃では沈殿量がさらに増加するものの、Pr/Nd の分離係数は若干低下した。沈殿分離においては、温度が下がることによる錯体の溶解度の低下も考慮する必要がある。温度が非常に低い場合には、この溶解度低下が影響して不純物成分の析出が増加している可能性がある。

これらの結果から、反応速度制御により分離係数の向上が可能であることが分かった。試薬の添加速度を制御することで、不純物成分の析出を抑えることができれば、さらなる向上も見込める。実際に、12 時間で析出した沈殿物を除去し上澄み液からゆっくり析出する成分のみを集めることで、Pr/Nd の分離係数を劇的に向上させることが可能であった。

### e.PTA 合成法の最適化

PTA 誘導体の合成のため、合成を目標とする化合物の構造探索、合成ルート探索を実施した。構造に関しては、アミド窒素原子上の官能基構造、フェナントロリン骨格の構造修飾を視野に検討し、その合成方法に関する効率化を行った(図 4.3.1-17)。またフェナントロリンカルボン酸からアミドへの変換方法として既存の酸塩化物とアミンを反応させる方法に加え、水溶性カルボジイミド(WSC)を使用する方法や、種々の縮合剤利用を検討した。文献調査の結果、六種類の縮合剤を検討し、実際のカルボン酸とアミンとの反応によるアミド合成を実施した。その結果、4-(4,6-dimethoxy-1,3,5-triazin-2-yl)-4-methylmorpholinium chloride(DMTMM)が縮合剤として

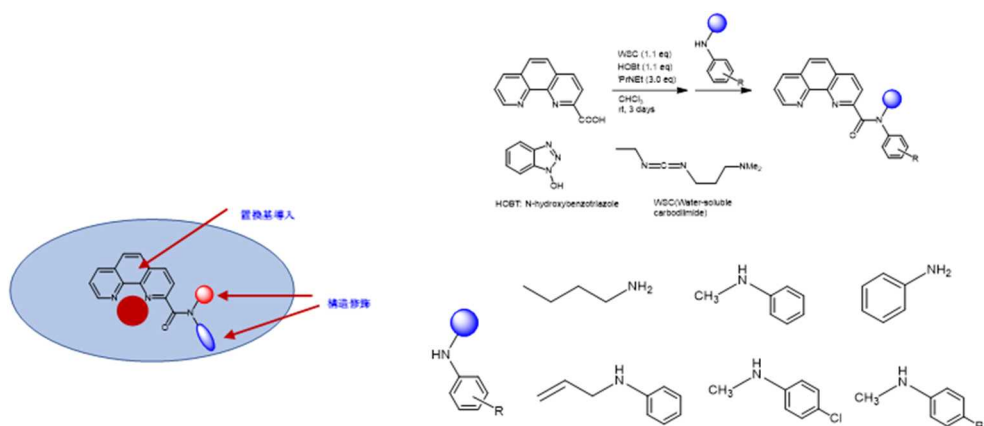


図 4.3.1-17 PTA 誘導体の構造修飾、置換基導入及び合成方法

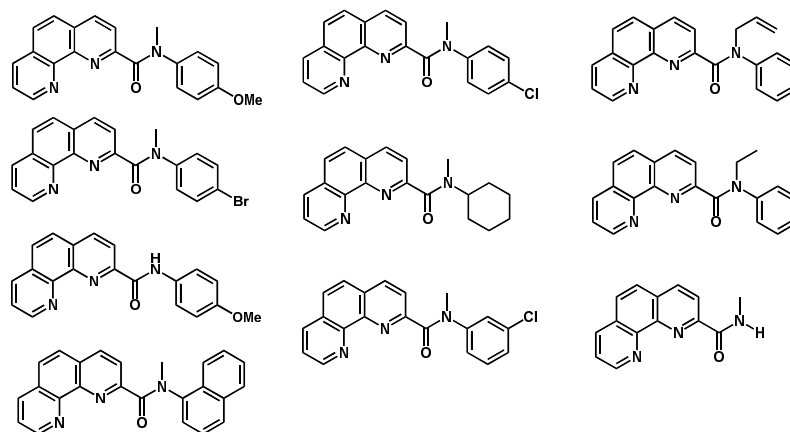


図 4.3.1-18 合成に成功した PTA 誘導体

最適であることを明らかにし、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、分離剤をより効率的に合成することが可能になった。それにより 10 種類の PTA 誘導体を合成した(図 4.3.1-18)。

#### f. 応用研究への配位子設計に関する指針

上記の分離メカニズム解析から得られた知見として重要なことは、配位子 A として用いた PTA 系化合物は、非常に剛直な骨格構造であるフェナントリンと、希土類イオンに高い錯形成能力を示すものの配位ジオメトリーに柔軟性を有するアミド基の組合せにより、希土類元素間で特異的な錯形成特性を発現することである。つまり、フェナントリンの 2 個の窒素原子とアミド基の酸素原子による希土類元素の配位が可能な構造を持った化合物であることが、高効率希土類元素相互分離に有用であると考えられる。そこで、応用研究にはこの三座配位 PTA 化合物へ配位子 B となる化合物の添加の効果(協同効果)と、PTA に新たな配位サイトを付加した化合物の特性を中心に調べた。

### (3-1-B) 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

鋳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、鋳型分離技術の展開について検討した。溶媒抽出法と吸着分離法は供試液の条件によって相補的に用いられることが多く、双方の技術の確立は、対象溶液の拡大のためにも重要である。

鋳型分離技術のメカニズム解析より、PTA 化合物のアミド酸素原子及び 2 個のフェナントリン窒素原子による希土類元素への配位形態が、主要なポイントであることが示された。よって、PTA 系化合物をベースとした抽出剤及び吸着剤を作成し、協同効果等の効果を確認した。また、実用性向上へ抽出率、吸着率の向上が必須であるため、PTA 骨格に新たな配位サイトを加えた化合物に関して、希土類元素の分離性能を検討した。

2018 年度からテーマに加わった重希土類元素分離については、高効率な Tb/Dy 分離に関して企業からの要請は大きくなっている。そこで、PTA 化合物をベースに重希土類元素分離用に合成した抽出剤 A(2022 年 10 月 18 日特許出願)を用いて、分離性能を調べた。この重希土類元素に関する新規抽出剤に関してはプロセス評価を行うことで、実用化のための課題を抽出した。

#### ■ 目標

鋳型分離技術の溶媒抽出及び吸着分離法への適用性の検討。重希土類元素分離への展開及びプロセス評価の実施。(図 4.3.1-19)



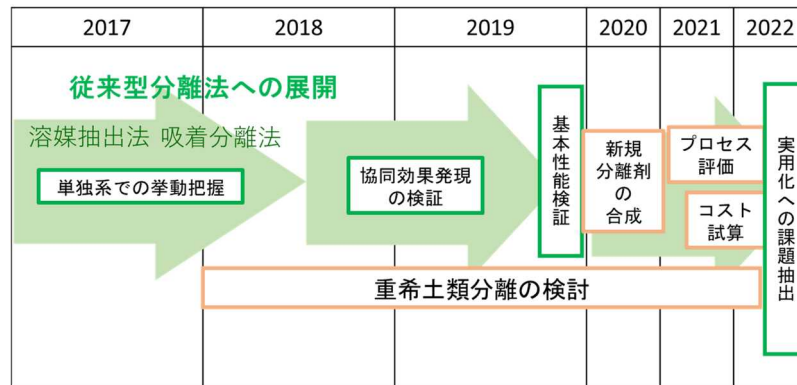


図 4.3.1-19 研究開発項目 3-1-B の研究開発スケジュール

■ 研究開発の成果

a. 溶媒抽出法による Pr/Nd 分離(三座配位 PTA)

PTA 型抽出試薬の分子構造と略号を図 4.3.1-20 に示す。これら 2 つの PTA 型抽出試薬による 0.3 M 硝酸からの希土類イオンの抽出結果を図 4.3.1-21 に示す。赤菱形で示すように、両 PTA 型抽出試薬は単独でも用いても優れた抽出分離性能を示し、最も抽出率が高い金属イオンはいずれも Sm となることが分かった。この単独抽出系に 0.1 M の 1,2-ジメチルプロピルアミンを添加した協同系の結果を青丸で示す。いずれも単独系よりもアミンの効果により高い抽出率が得られた。また、注目すべき点は単独系と比較して最も高い抽出率を示すイオンが OctToIPTA では Sm から軽希土類の Ce~Nd にシフトし、OctPhPTA では Sm 選択性が維持されること

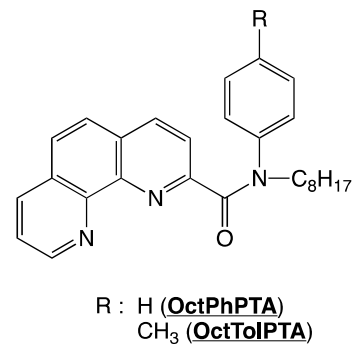


図 4.3.1-20 使用した PTA 化合物の構造と略号

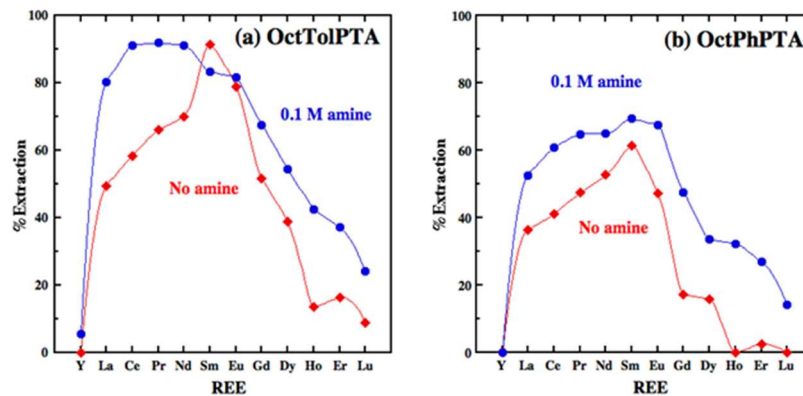


図 4.3.1-21 PTA 化合物による希土類金属イオンの抽出率 E

(a)OctToIPTA, (b)OctPhPTA, 赤 : アミン添加なし, 青 : 1,2-ジメチルプロピルアミン添加

である。分子構造のわずかな違いで、希土類イオンに対する選択性が変化させられることが実証できた。協同効果に使用する配位子 B としてのアミンの種類や濃度などを変化させて最適化することにより、選択性(最も高い抽出率を示す希土類の位置)や分離効率を向上できることが示された。しかしながら、三座配位 PTA 系抽出剤では、協同効果による Pr/Nd 分離係数のさらなる向上は困難であった。

#### b. 四座配位ジアミド PTDA の合成及び溶媒抽出法による Pr/Nd 分離

三座配位系 PTA では、その単独使用及び協同抽出系においても十分な相互分離性能を示さなかった。フェナントリン骨格の剛直さ故に配位ジオメトリーの変化が制限されることが特定の希土類元素に対し選択的に錯形成する要因の 1 つであることが上記のメカニズム解析により示されたことから、より剛直で、且つ特定の希土類イオンサイズに適した配位空間を構築できれば、効率的な希土類分離を実現できる。そこで、ドナー原子であるアミド酸素原子及びフェナントリン窒素原子の骨格を維持しつつ、プラスアルファとして配位サイトを導入することを検討した。希土類イオンをより包摂可能な四座配位子に着目し、フェナントリンの 2 位および 9 位にアミド基を導入したジアミド化合物(PTDA)の合成を試みた。

PTDA 化合物は、1,10-phenanthroline-2,9-dicarboxylic acid を出発原料とし合成した。この時、アミド窒素上フェニル基の *o*-位にブロモ基を導入しておき、パラジウム触媒を用いた C-H アリール化反応を行うことで、フェナントリン環 3-位および 8-位の炭素とアミド窒素上フェニル基が直接結合し、アミド部分を環状構造とすることが可能であった。これにより、フェナントリン間とアミド基を結ぶ結合は PTA のように回転することが出来なくなり、より剛直な骨格構造となった。合成スキームと実際に合成した化合物の構造、合成収率を図 4.3.1-22 に示す。

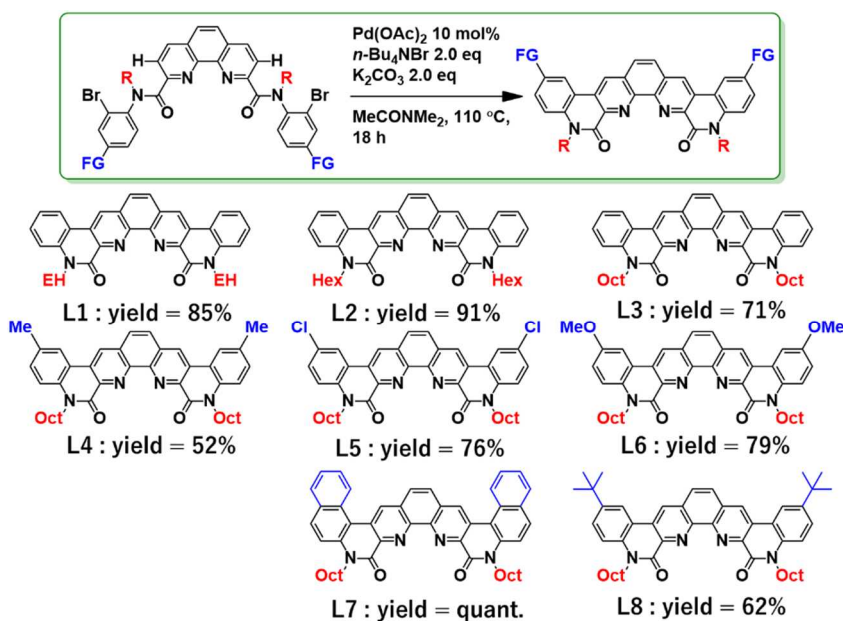


図 4.3.1-22 アミド部分を環化したフェナントリンジアミド化合物の合成スキームと新たに構成した化合物の化学構造

合成した PTDA 化合物について、溶媒抽出法により錯形成特性の検討を行った。アミド部分を環化した化合物と開環物で抽出分配比 D を比較すると、環化することで軽希土類元素に対する分配比が数百倍と著しく向上す

ることが明らかとなった(図 4.3.1-23)。また、軽希土類元素に対する分配比を三座 PTA 化合物と比較すると、抽出時の有機相の配位子濃度が PTA の場合の 50 分の 1、水相に添加する硝酸アンモニウム濃度も 50 分の 1 であるにもかかわらず、分配比が PTA と同等以上であるなど、高い抽出能力を示した。また、抽出分配比は La から Sm にかけて右肩下がり傾向を示すが、その勾配が大きく、これらの元素の相互分離に有効であり、Pr/Nd の分離係数は 4.4 となった。これらの結果は、フェナントロリンジアミド化合物が構築する配位空間サイズが La もしくはこれより大きなイオンに適すること、骨格構造を非常に剛直なものとする事で、イオンサイズ認識能力と錯形成能力が著しく増加することを示唆している。次に、置換基効果について考察するために、各 PTDA 誘導体による La 抽出分配比を図 4.3.1-24 に示す。アミド窒素上のアルキル基については、側鎖を枝分かれ構造とすることで分配比が大きく低下した。この結果は配位空間近傍にかさ高い官能基が存在すると立体障害を引き起こすことに起因している。一方で、アミド窒素原子とフェナントロリン部位に跨るフェニル基上に、メトキシ基や tert-ブチル基のような電子供与基を導入すると分配比が増加し、クロロ基のような電子吸引基を導入すると分配比は低下した。この結果は、PTA の場合と同様に置換基の電子的効果に応じて錯形成能力が変化することを示している。

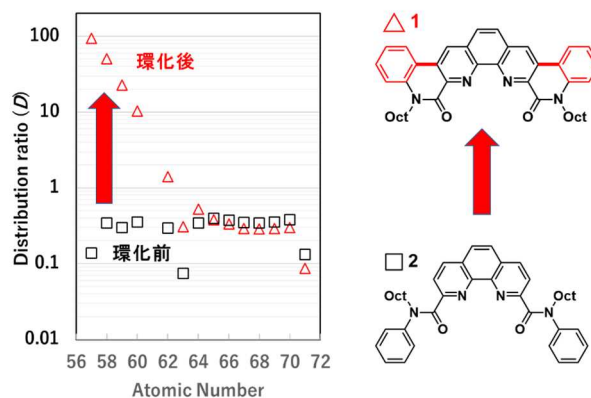


図 4.3.1-23 アミド部分を環化したフェナントロリンジアミド化合物と環化しない化合物による希土類元素抽出の抽出分配比 D

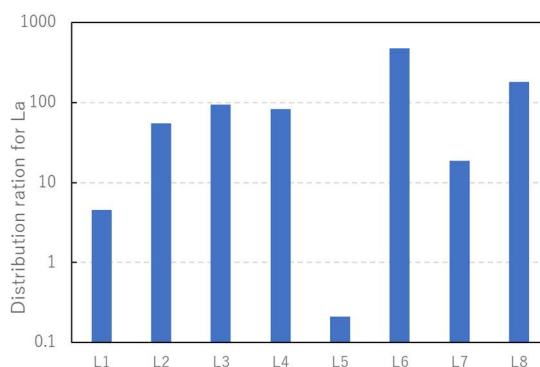


図 4.3.1-24 アミド部分を環化したフェナントロリンジアミド化合物による La 抽出の抽出分配比 D。図中の横軸の記号は図 4.3.1-22 と同一。

### c. 吸着分離法による Pr/Nd 分離

鑄型分離技術のコンセプトを生かした吸着分離法による希土類元素イオンの相互分離特性を検討した。配位子には上記の PTA 系化合物を使用した。

新規に吸着剤を設計する場合、対象物と相互作用する吸着反応部位、吸着反応部位を固定化する担体および担体への固定化方法が検討項目となる。この中で吸着反応部位は分離効率を大きく左右するため重要な検討項目となる。本事業では吸着反応部位として、鑄型分離技術で検討を行った PTA 系配位子に着目した。これらの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広く用いられるシリカゲルを選定した。図 4.3.1-25 に本事業で作製・検討した吸着剤の化学構造を示す。吸着剤の合成方法はそれぞれの配位子を合成した後、シランカップリング剤と反応させ、その後、シリカゲルに導入した。

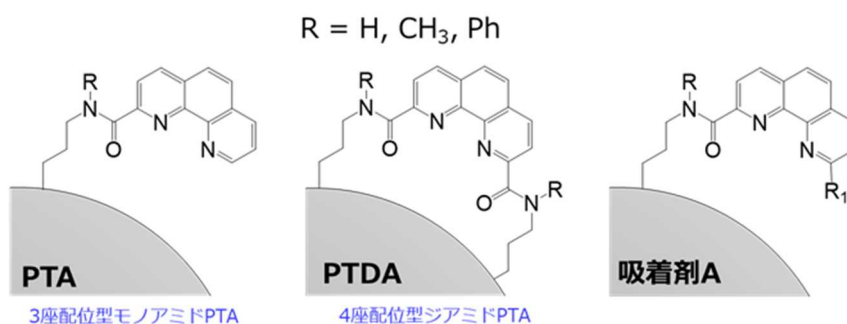


図 4.3.1-25 本事業で作製・検討した吸着剤の化学構造

#### (i) 三座配位型モノアミド PTA(Ph-PTA)

側鎖をフェニル基とした 3 座配位型モノアミド PTA 配位子を導入した吸着剤(Ph-PTA)による希土類元素の吸着率の初期 pH 依存性を図 4.3.1-26 に示す。pH 2 以下では希土類元素の吸着はみられず、pH 3 以上で中・重希土類元素の吸着が確認された。一方で、図 4.3.1-27 に示すように、水溶液中に塩を添加すると希土類元素の吸着率が增加することが明らかとなった。添加する塩の種類により吸着率の増加量が変わり、カチオン(ナトリウムイオン、カリウムイオン、アンモニウムイオン)の種類には依存性がなく、アニオン(チオシアン酸イオン、過塩素酸イオン、硝酸イオン、塩化物イオン、硫酸イオン)の種類には大きく依存性があることが明らかとなった。その効果の序列は、チオシアン酸イオン、過塩素酸イオン、硝酸イオン、塩化物イオン、硫酸イオンで、特にチオシアン酸イオンおよび過塩素酸イオンが高い効果を有していた。この結果の中で特筆すべきところは原子番号 59 の Pr くらいより塩の添加の効果が出はじめる点で、本事業で相互分離を検討している Pr と Nd(原子番号 60)において吸着率の差が大きくなっている。図 4.3.1-28 にチオシアン酸塩もしくは過塩素酸塩を添加した Pr、Nd 混合水溶液からの Ph-PTA による吸着試験結果を示す。チオシアン酸塩および過塩素酸塩の添加により、Pr より Nd の吸着率が大きくなり、その結果分離係数がそれぞれ 2.65(チオシアン酸塩)、2.33(過塩素酸塩)と高い値が得られた。Ph-PTA を充填した小型カラムを用いて過塩素酸塩を添加した Pr、Nd 混合水溶液から相互分離試験を行った結果を図 4.3.1-29 に示す。Pr と Nd の分離係数が高いことから、15 cm の小型カラムで良好な相互分離を達成した。

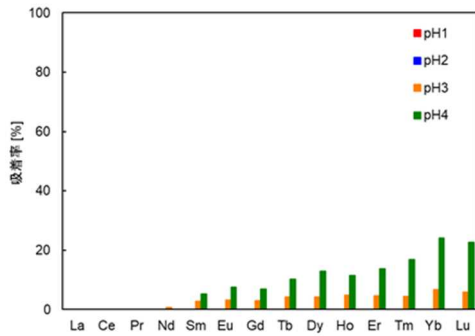


図 4.3.1-26 Ph-PTA による希土類元素の吸着率の初期 pH 依存性

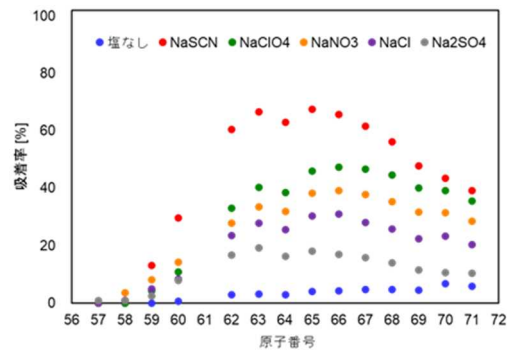


図 4.3.1-27 Ph-PTA による希土類元素の吸着率に与える塩の影響

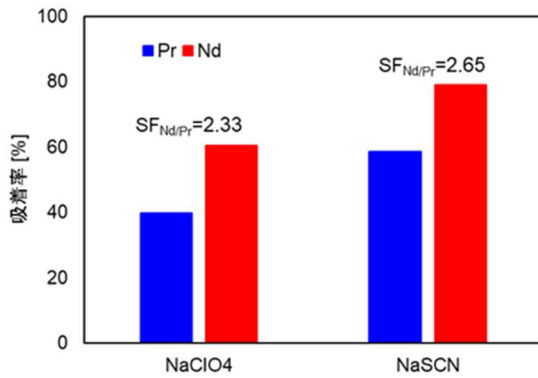


図 4.3.1-28 チオシアン酸塩もしくは過塩素酸塩を添加した Pr、Nd 混合水溶液からの Ph-PTA による吸着試験結果

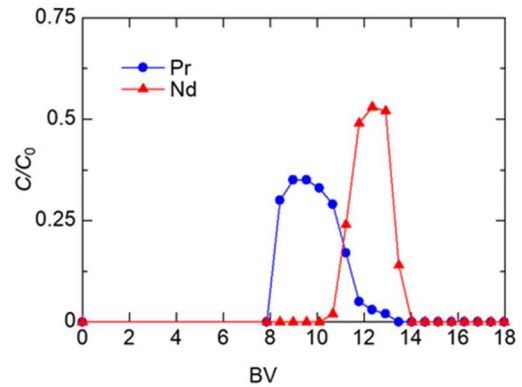


図 4.3.1-29 Ph-PTA を充填した小型カラムによる過塩素酸塩を添加した Pr、Nd 混合水溶液からの相互分離試験結果

(ii)四座配位型ジアミド PTA(H-PTDA, Ph-PTDA)

側鎖を水素もしくはフェニル基とした四座配位型ジアミド PTA 配位子を導入した吸着剤(H-PTDA, Ph-PTDA)による希土類元素の吸着率の初期 pH 依存性を図 4.3.1-30 に示す。側鎖が水素の H-PTDA は試験を行った pH 範囲では希土類元素の吸着が確認されなかった。側鎖がフェニル基の Ph-PTDA では、吸着率は小さいが、軽希土類元素の吸着が確認された。図 4.3.1-31 に H-PTDA および Ph-PTDA による希土類元素の吸着率に与える塩の影響を示す。H-PTDA は塩を添加してもほとんど変化せず、希土類元素の吸着率は低いことが明らかとなった。一方で、Ph-PTDA では Ph-PTA と同様に塩の添加により希土類元素の吸着率の増加が確認された。塩添加による吸着率増加の効果の序列は Ph-PTA と同様にチオシアン酸イオン、過塩素酸イオン、硝酸イオン、塩化物イオン、硫酸イオンの順で効果が大きいことが確認された。一方で、希土類元素の吸着プロファイル

は Ph-PTA と Ph-PTDA で大きく異なり、Ph-PTA が中・重希土類元素を良く吸着するのにに対し、Ph-PTDA は軽希土類元素の吸着率のほうが高いことが明らかとなった。これは四座配位型ジアミド PTA の抽出剤による抽出試験結果の傾向と一致している。Pr と Nd の相互分離の観点から評価すると、Pr と Nd の分離係数が小さいことから四座配位型ジアミド PTA 配位子を導入した吸着剤は Pr と Nd の相互分離に有効ではないと考えられる。

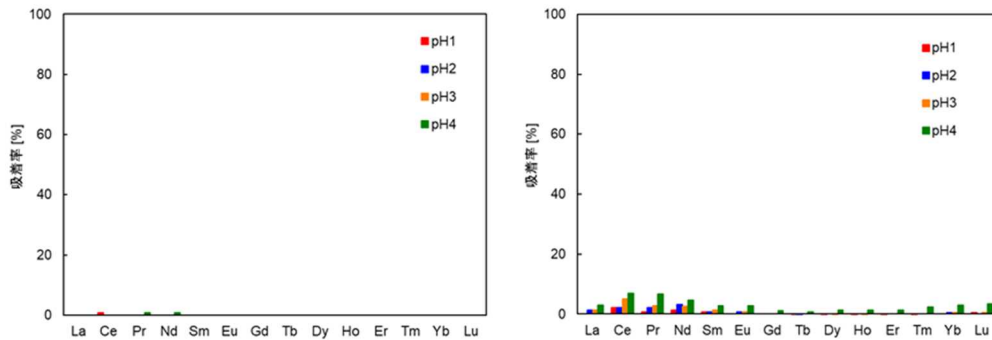


図 4.3.1-30 H-PTDA および Ph-PTDA による希土類元素の吸着率の初期 pH 依存性(左 : H-PTDA、右 : Ph-PTDA)

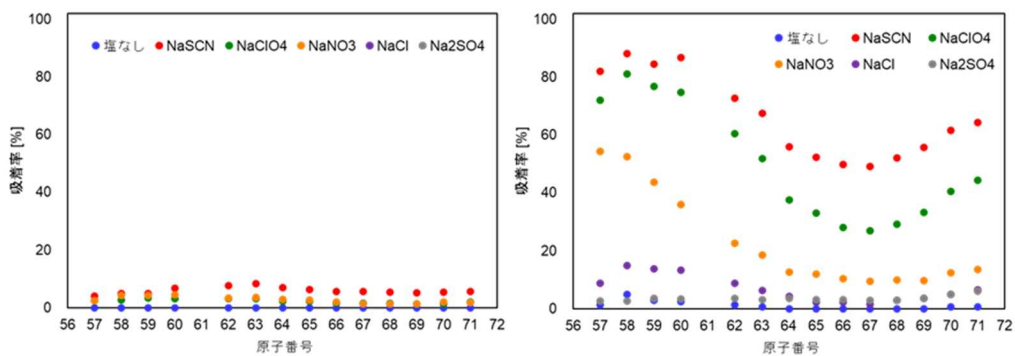


図 4.3.1-31 H-PTDA および Ph-PTDA による希土類元素の吸着率に与える塩の影響(左 : H-PTDA、右 : Ph-PTDA)

### (iii) 新規吸着剤 A (A-1, A-2, A-3)

新規吸着剤 A (特許出願前)による希土類元素の吸着率の初期 pH 依存性を図 4.3.1-32 に示す。三座配位型モノアミド PTA 配位子もしくは四座配位型 PTA 配位子を導入した吸着剤と比較して、低い pH 域から希土類元素の吸着が確認され、その吸着率も高いことが明らかとなった。また、吸着プロファイルに関しても上記の吸着剤とは異なり、中希土類元素をあまり吸着せず、軽希土類元素と重希土類元素を吸着するという特異的なものであることが明らかとなった。図 4.3.1-33 に A-1、A-2 及び A-3 による希土類元素の吸着率に与える塩の影響を示す。上述の吸着剤と同様に、塩の添加により希土類元素の吸着率の増加が確認され、その効果の序列も同様であった。このように希土類元素に対して高い吸着率を有していることが明らかとなったが、一方で、Pr と Nd の相互分離の観点から評価すると、Pr と Nd の分離係数が小さいことが課題となる。

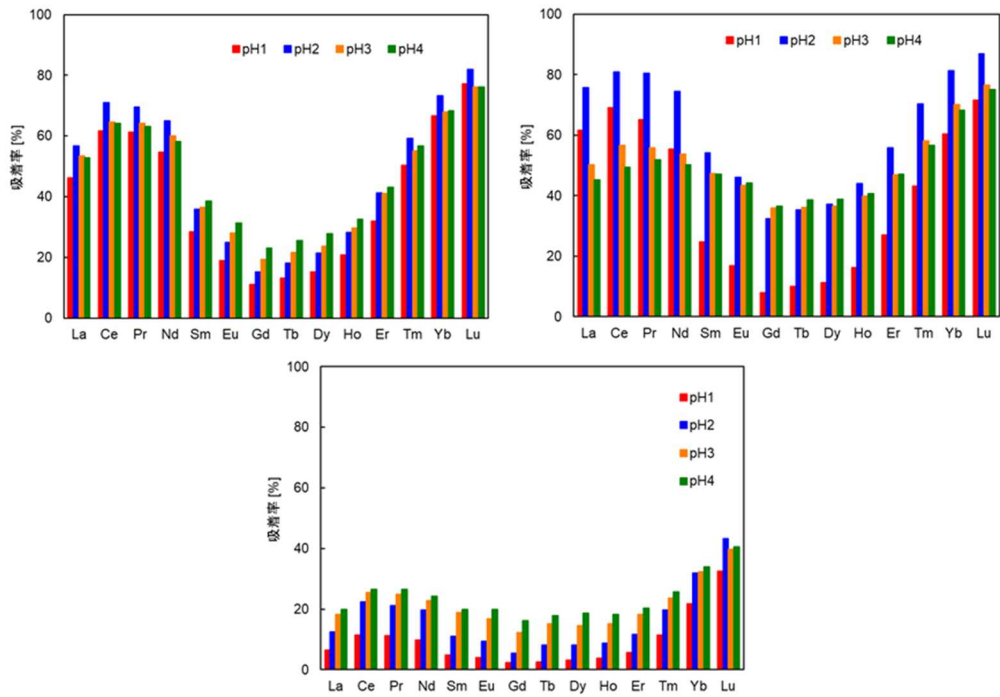


図 4.3.1-32 新規吸着剤 A による希土類元素の吸着率の初期 pH 依存性(上左 : A-1、上右 : A-2、下 : A-3)

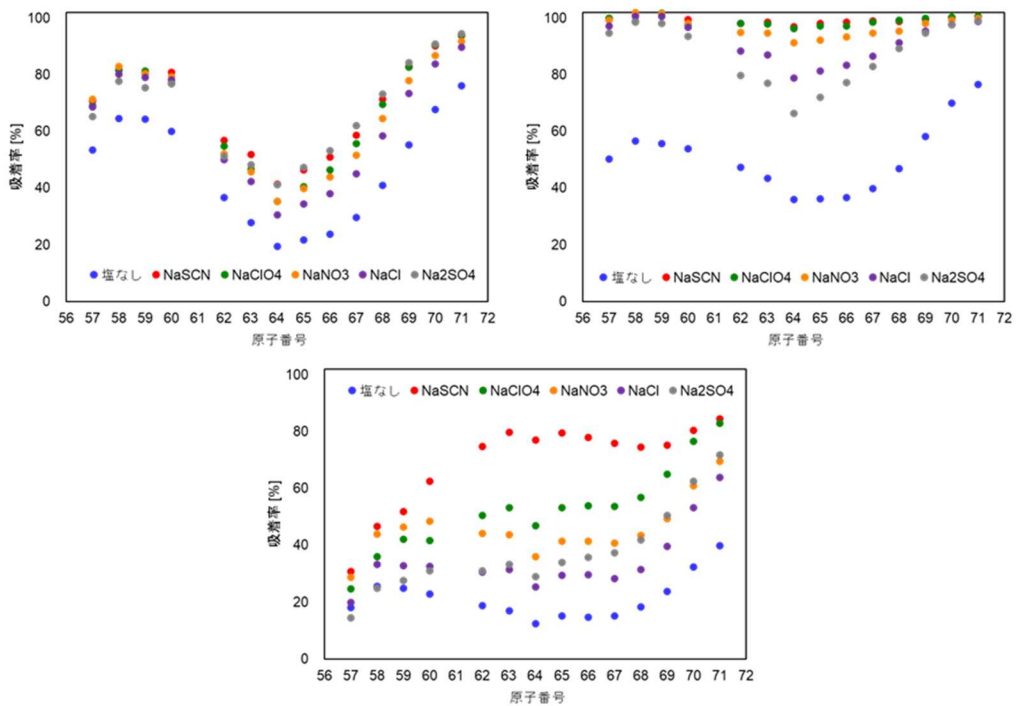


図 4.3.1-33 新規吸着剤 A による希土類元素の吸着率に与える塩の影響(上左 : A-1、上右 : A-2、下 : A-3)

Pr と Nd の分離係数を大きくするために、添加剤について精査した。図 4.3.1-34 にジグリコール酸を添加した A-1、A-2 及び A-3 による希土類元素吸着試験結果を示す。ジグリコール酸を添加すると、希土類元素の吸着が阻害され(特に中・重希土類元素)、その吸着率が低下する。これを利用し、Pr と Nd の分離係数を大きくすることを検討した。チオシアン酸イオンや過塩素酸イオンを添加し、希土類元素全体の吸着率を増加させ、さらにジグリコール酸を加えることで、中・重希土類元素の吸着率を小さくする。その結果、Pr と Nd で原子番号の大きい Nd の吸着率を選択的に低下させ、Pr と Nd の分離係数を大きくすることが可能となる。一例としてチオシアン酸イオン、ジグリコール酸を添加した Pr、Nd 混合水溶液からの A-2 による相互分離試験結果を図 4.3.1-35 に示す。ジグリコール酸の濃度を高くしていくことで Pr と Nd の吸着率は減少するが、原子番号の大きい Nd の方がその減少率は大きい。その結果、Pr と Nd の吸着率の差が大きくなり、Pr と Nd の分離係数において、最大 4.79 と非常に大きい値を得ることができた。

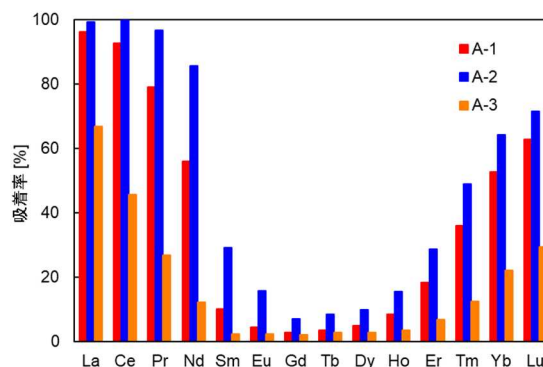


図 4.3.1-34 ジグリコール酸(0.01 M)を添加した A-1、A-2 および A-3 による希土類元素吸着試験結果

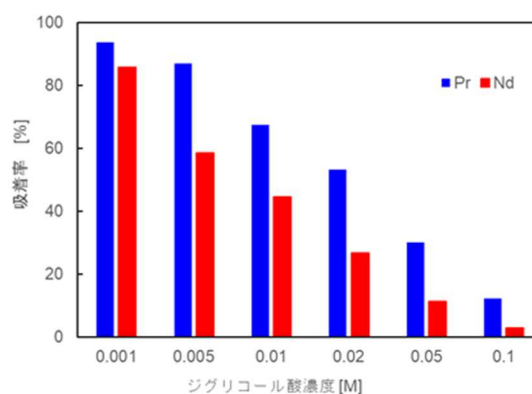


図 4.3.1-35 チオシアン酸イオン、ジグリコール酸を添加した Pr、Nd 混合水溶液からの A-2 による相互分離試験結果

#### d. 重希土類元素分離(Tb/Dy)への溶媒抽出法の適用

上記の様に PTDA 抽出剤は Pr/Nd の分離に対し優れた特性を示したが、重希土類元素はほぼ抽出できなかった。そこで、PTA の骨格構造を考慮しつつ、重希土類元素の抽出率を向上させるための配位子設計を行い新規化合物を合成した(特許公開前のため抽出剤 A とする)。抽出剤 A はジアミド型 PTA とは異なり、重希土において原子番号の増加とともに抽出率が向上した。これは、従来型抽出剤 PC88A と同様の傾向である。さらに、磁石リサイクルでも重要な分離対象元素である Tb/Dy 分離においても、抽出剤 A は高い分離性能を示した。図 4.3.1-36 に PC88A と抽出剤 A を用い、同じ水溶液を用いた際に得られた希土類元素の抽出率を示す。Tb/Dy の分離係数に関して、PC88A では 2.39 であるのに対し抽出剤 A では 3.32 という高い値が得られた。



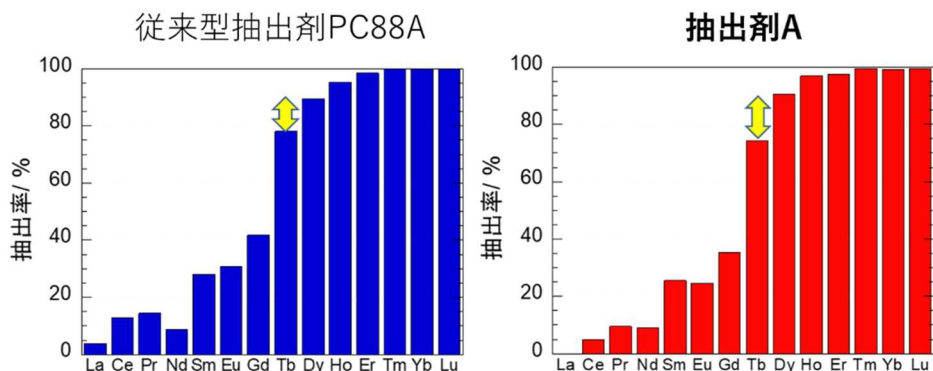


図 4.3.1-36 従来型抽出剤 PC88A と新規抽出剤(抽出剤 A)による希土類元素の抽出

#### e. 重希土類用抽出剤 A の実用化への課題抽出

上記の検討では抽出剤を希釈する溶媒としてクロロホルムを用いた。しかしながら汎用性・操作性を考慮すると他の有機溶剤を希釈剤として用いた際の分離挙動も把握することが必要である。そこで、数種の希釈剤の検討を行った。表 4.3.1-1 に抽出剤 A の溶解性および希土類元素抽出後の第 3 相形成についてまとめる。抽出剤 A は一般的な炭化水素系溶媒(ケロシン、ドデカン)には溶解せず、高級アルコールには溶解することが明らかとなった。また、液状の抽出剤である PC-88A には溶解せず、TBP には易溶し、ネオデカン酸には少し溶解した。第 3 相の形成については高級アルコールを用いたときに形成が確認されなかった。この時、2 M 程度の鉬酸により定量的に逆抽出できることが明らかとなった。図 4.3.1-37 に炭素長 5 から 8 の高級アルコールを希釈剤とした抽出剤 A による希土類元素の抽出試験結果を示す。抽出剤 A による希土類元素の抽出率は溶媒の炭素鎖長に依存性があり、炭素鎖長が小さいほうが高い抽出率が得られた。一方で、炭素鎖長が小さい場合、溶媒の水への溶解、水の溶媒への溶解が問題となるため、本事業では炭素鎖長 6 のヘキサノールを溶媒とした。高級アルコールを希釈剤とした場合、塩の添加がないとき分相性が悪く、有機相と水相の分相に時間がかかった。これはミキサセトラ等の装置で連続抽出試験を行う場合、セトラの滞留時間を大きくする必要があるので、好ましくない。一方で、塩を添加すると希土類元素の抽出率が大きくなるとともに、分相性の改善が確認された。

表 4.3.1-1 抽出剤 A の溶解性および希土類元素抽出後の第 3 相形成

溶媒	溶解性	第 3 相*2
クロロホルム	○	△
ケロシン	×	—
ドデカン	×	—
2-エチルヘキサノール	○	△
ヘキサノール*1	○	○
TBP	○	○
ネオデカン酸	△	×
PC-88A	×	—

\*1：炭素鎖 5～8 のアルコールには同様に易溶

\*2：○は第 3 相が形成せず、△は条件により第 3 相がみられ、×は第 3 相が確認された

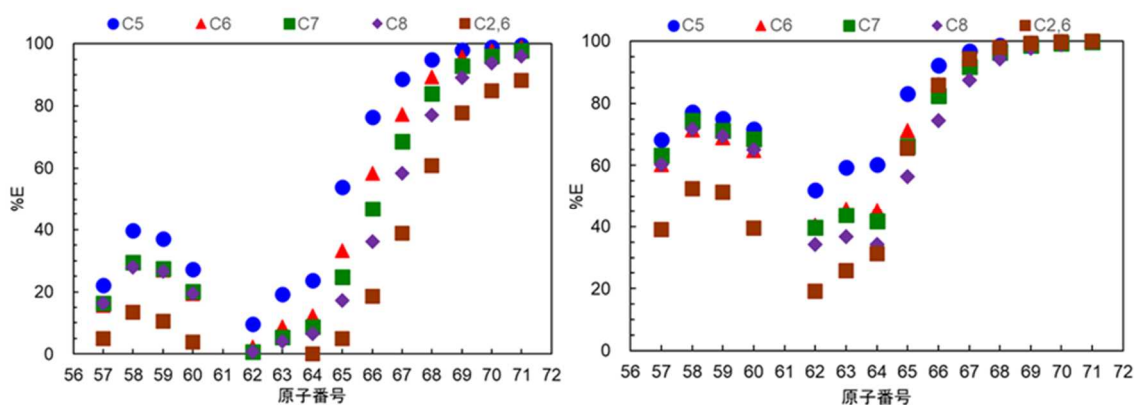


図 4.3.1-37 炭素長 5 から 8 の高級アルコールを希釈剤とした新規抽出剤 A による希土類元素の抽出試験結果(左：塩添加なし、右：NaNO<sub>3</sub> 添加)

#### (i) 抽出装置による分離試験

抽出剤 A による Tb、Dy の連続多段抽出試験を実施した。図 4.3.1-38 に本事業で用いた連続多段抽出装置であるミキサセトラ抽出装置の写真を示す。ミキサセトラ抽出装置は水相と有機相を混合するミキサー部と両相を分相するセトラ部からなり、本装置のミキサー部およびセトラ部の容量はそれぞれ 2.5 mL、7.5 mL である。また、比較のためバッチ式の多段抽出シミュレーション試験も併せて行った(図 4.3.1-39)。有機相をヘキサノールに 5 mM となるように抽出剤 A を溶解させたもの、水相に Tb および Dy をそれぞれ 2 mM、pH を 2.0(HCl を用いて調整)に調製したものをを用いて抽出試験を行った。1 段の抽出では Tb と Dy の分離係数は 2.63 であった。

3 段の抽出試験において、バッチ式の多段抽出試験では分離係数は 3.91、ミキサセトラ抽出装置を用いた結果では 3.21 であった。これらの結果より、多段抽出を行うことで 1 段より高い分離係数が得られた。さらにミキサセトラ抽出装置を用いて 10 段の連続抽出試験を行った。なお、塩化物イオン系において塩の添加なしで連続多段抽出試験を行った場合、セトラ部で十分な分相ができず、有機相に水相が随伴することが確認された。このため、10 段の連続抽出試験では硝酸イオン系で試験を実施した。図 4.3.1-40 は 10 段連続抽出試験時の水相出口の Tb、Dy 濃度の経時変化を示しており、Tb および Dy の濃度が時間変化しなくなったところを定常状態と判断した。このとき装置を止め、各段におけるセトラ部の水相および有機相の Tb、Dy 濃度を測定した結果を図 4.3.1-41 に示す。水相は Stage 1 から 10 に、有機相は Stage 10 から 1 に流れている。水相をみると抽出されやすい Dy は Stage が進むにつれて、その濃度が減少していき、Tb は一度初期濃度より高くなり、その後減少していくことが明らかとなった。これは抽出された Tb がより抽出されやすい Dy と置換しているためであると考えられる。有機相では、Dy は入口である Stage10 から徐々に濃度が上昇していき、Tb は Stage 8 までは抽出され有機相中の濃度が上昇するが、その後は Dy と置換するため、濃度が減少していくことが明らかとなった。その結果有機相出口である Stage 1 では Dy と Tb の濃度差が大きくなることが確認された。この系において 1 段の抽出試験(バッチ試験)では Tb と Dy の分離係数は 2.54 であり、3 段の抽出試験(ミキサセトラ)では 2.78、10 段の抽出試験(ミキサセトラ)では 5.40 であった。これらの結果から、本事業で開発された抽出剤 A は連続溶媒抽出装置として広く用いられているミキサセトラにも適用でき、Tb



図 4.3.1-38 ミキサセトラ抽出装置の外観

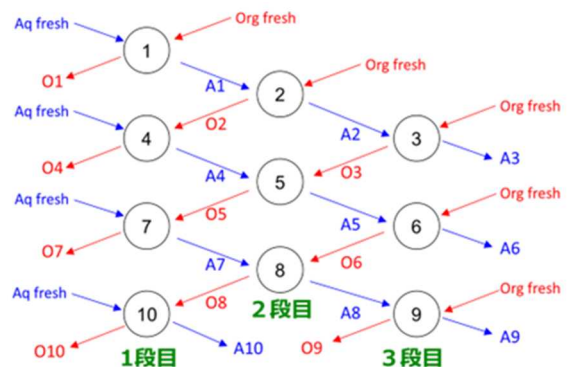


図 4.3.1-39 バッチ式の多段抽出フロー

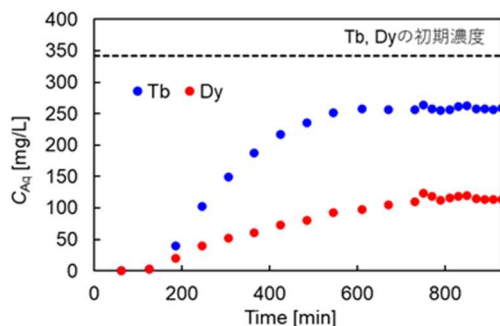


図 4.3.1-40 10 段連続抽出試験時の水相出口の Tb、Dy 濃度の経時変化

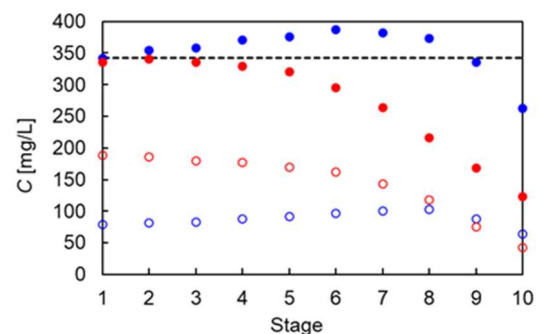


図 4.3.1-41 10 段連続抽出試験時の各段における水相、有機相中の Tb、Dy 濃度

と Dy の連続抽出試験が可能であることが確認された。

さらに、ミキサセトラより小規模な抽出装置である遠心抽出機(タナベウィルテック製 BXP012(図 4.3.1-42))を用いた抽出試験を行った。予備通液として、装置回転数 10000 rpm に設定し、純水と 2-エチルヘキサノール(2EH)をチューブポンプを用いて装置に供給した。供給流量は装置内での接液時間 10~40 秒に相当する 2.0~

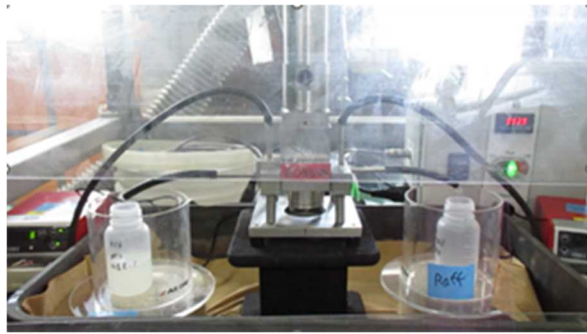


図 4.3.1-42 遠心抽出機による試験

6.6 ml/min とした。予備通液試験の結果、装置の二箇所の排液出口から純水と 2EH が分離されて排出されることを確認した。予備通液で設定した

流量に於いて有機相と水相の接液時間が 20、30、40 秒となる条件で、溶液を装置に供給した。その結果、排出液は軽液出口から二相混合状態で得られ、重液出口からの排出は無く、水相と有機相に分離できなかった。抽出液が Tb または Dy を抽出した状態では分相性が低下し、装置の遠心条件では分離できなかったと考えられる。二相混合状態の液は 20 分程度静置することで水相と有機相に分離したので、分離した水相を回収・分析し、抽出率および分離係数を評価した。

図 4.3.1-43 に接液時間 20~40 秒における Tb と Dy の抽出率と分離係数を示す。各接液時間条件では、排出された混合溶液について初期の 100 mL を除き、以降の 200 mL を 4 回ずつ採集した。グラフではそれらの評価結果をエラーバーとして表示した。その結果、接液時間によらず、Tb-Dy 分離係数 3.5~4 が得られた。この分離係数は PC88A を用いた際に得られた分離係数 2.5 を上回るものの、工業的には静置時間を長く設計できるミキサセトラが適していると考えられる。

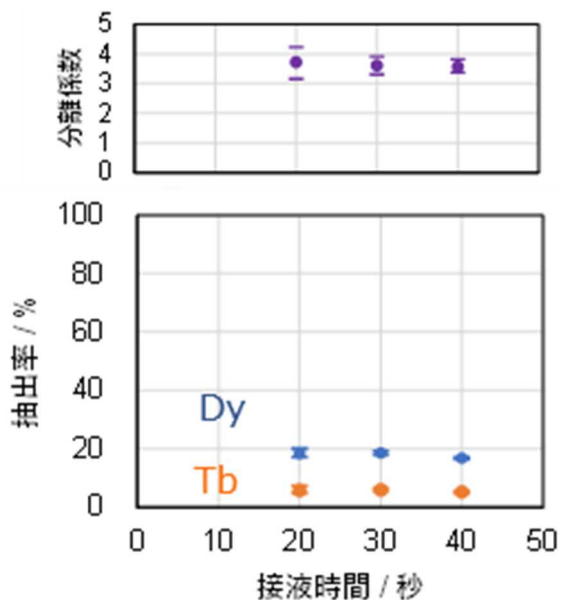


図 4.3.1-43 遠心抽出機を使用した際の抽出剤 A による Tb, Dy 抽出率と分離係数

(ii) 経済性評価及び実用化への課題

経済性を評価するための検証試験として疑似的に小規模な攪拌混合による抽出分離試験を実施した。有機相と水相は 6 mL バイアル瓶に入れ、スターラを用いて、1500 rpm にて 10 秒から 10 分攪拌し、静置して比重

分離した水相を分析した。同じ有機相と水相を用いて、振盪機(DLAB 製デジタルシーカーSK-L330-Pro)を用いて 350 rpm 20 時間で振盪させ、平衡時の抽出挙動を求めた。本試験の攪拌および振盪試験ではクラッドが発生したが、分析に必要な水相は十分に確保できた。図 4.3.1-44 にそれぞれの攪拌時間で得られた Tb と Dy の抽出率と分離係数を示す。1200 分(20 時間)で示されるプロットは振盪試験で求めた結果である。Tb と Dy の抽出率は攪拌時間 20 秒で 80%付近まで立ち上がり、その後、Dy の抽出率は緩やかに増加し、Tb の抽出率は緩やかに低下した。これらの抽出率の変動にしたがって Dy/Tb 分離係数は増加し、最大で 5.3 を示した。この挙動は押出現象によると考えられ、抽出剤 A の分離速度は比較的遅いことが示唆された。

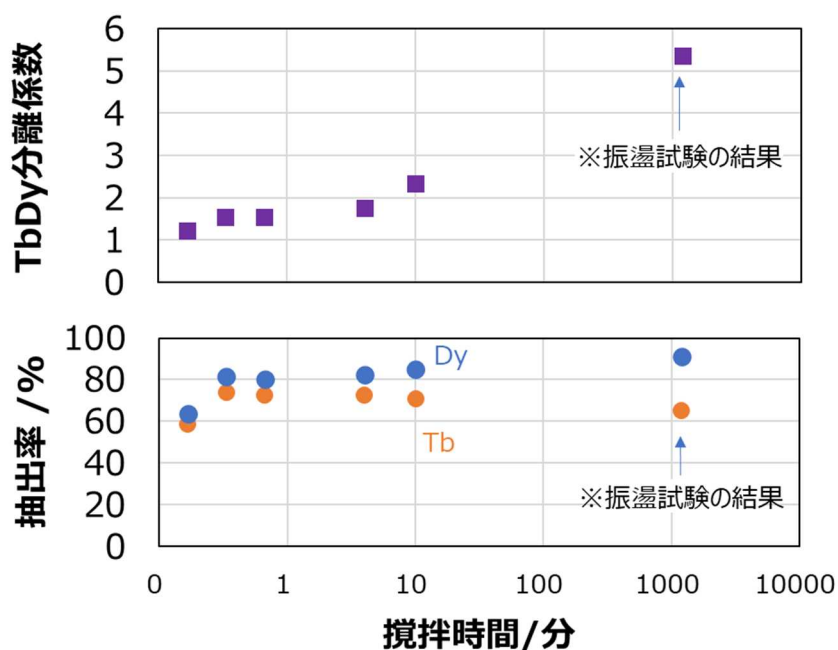


図 4.3.1-44 攪拌・振盪試験で得られた Tb 及び Dy 分離挙動

表 4.3.1-2 に PC88A と抽出剤 A を用いた抽出プロセスのインシャルコストを比較した結果を示す。抽出剤 A では分離係数が大きくなるため、段数が少なくなり、設備・溶媒および抽出剤費用が減少した。抽出剤 A を用いて攪拌・振盪試験を実施したデータに基づく試算では、現状の PC88A の半分以下のインシャルコストが見積もられた。また段数の減少により、溶媒使用量も低減させられるため、敷地面積や消防法による溶媒使用量制限の観点からも大きなメリットがある。

費用の内訳をみると、抽出剤費用が大きな割合を占めている。脚注に記すように、将来的に抽出剤 A が PC88A と同等の市場価格が達成されたと仮定しても、抽出剤のコストが大きいことから、抽出剤 A の大量合成方法を確立させて PC88A 並みの市場価格を達成することが今後の重要な課題と言える。その他に、クラッドが生じないように抽出剤 A の溶解性を改善することが実操業に向けた重要な課題である。

表 4.3.1-2 PC88Aと化合物 A を用いた抽出プロセスのイニシャルコスト比較<sup>i</sup>

抽出剤	PC88A	抽出剤 A
Tb/Dy 分離係数	2.5	5.3
段数	22	9
設備費、溶媒費用、抽出剤費用など	¥97,655,265	¥45,026,185
コスト減少率	-	0.46

<sup>i</sup> (コスト計算の注釈)

- ① 年間に未分離の Dy と Tb 合わせて 10 ton の分離精製を行うと想定した。
- ② 将来的に抽出剤 A の大量合成方法が確立し、PC88A と同等の市場価格が達成されることが必須とする。
- ③ 抽出剤 A の有機溶媒への溶解性が向上し、処理できる TbDy 液の濃度が PC88A と同等になることが必須とする。
- ④ 抽出剤 A を用いた希土類の分離・抽出で平衡に到達する時間は PC88A の 10 倍程度になることが必須とする。
- ⑤ 溶媒として、両者ともケロシンの使用を想定した。

✓ 研究開発成果の詳細(事業期間内の成果レビュー)

(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)

■背景と目標

希土類磁石中には Nd や Dy という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した(図 4.3.2-1)。ここで、廃磁石に含まれる Nd や Dy は廃磁石を陽分極することで溶融塩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 4.3.2-2 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(脱合金化)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、希土類元素の合金内における拡散速度は一般的な熱拡散に比較して 2 桁ほど高いうえ、電解条件で制御可能なことも従来研究で確認されている。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

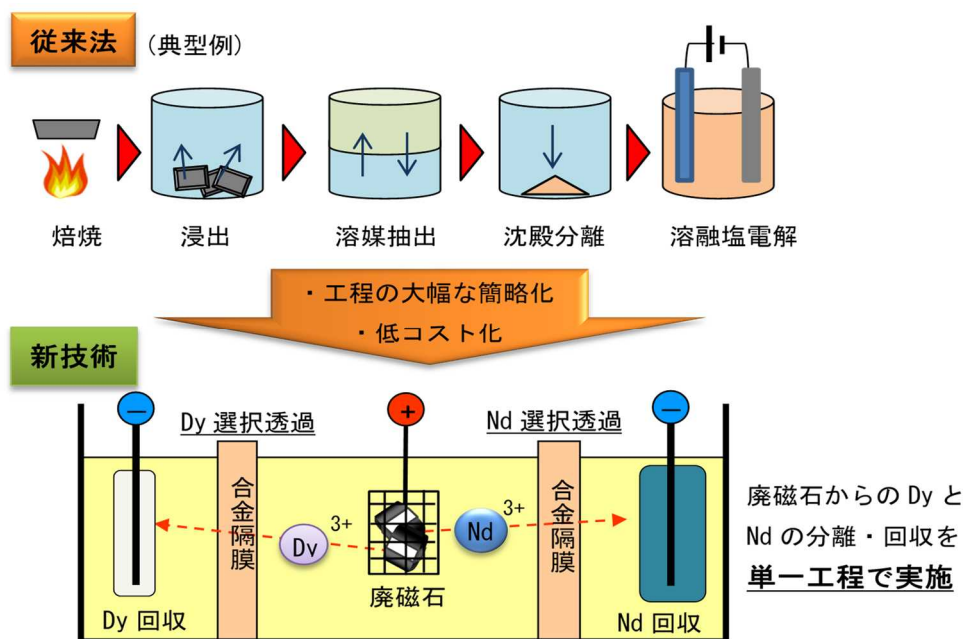


図 4.3.2-1 従来技術と新技術の比較

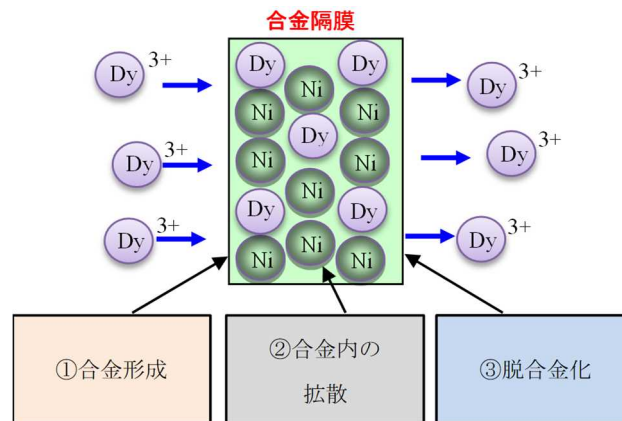


図 4.3.2-2 合金隔膜を用いた希土類イオン選択透過の原理図

とから、本プロジェクトではこの実用化を検討できる段階まで引き上げるための課題と中間/最終目標を設定し、いずれも達成した。

<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。

以下、研究成果の詳細を、設定した課題ごとに示す。



### (3-2-A)合金隔膜の長寿命化および液膜の利用

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や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 4.3.2-1 に示す。なお、多少の差異は有ったものの、合金の種類による影響はあまり明確でなかったことから、ここではハステロイの結果のみを記載する。ハステロイにも数種類存在するが、今回主に用いたものはハステロイ-C276 であり、以降はこれを単にハステロイと称する。

中温塩化物系溶融塩(LiCl-KCl : 450~600℃)で上記市販合金を Dy と合金化させたところ、DyNi<sub>2</sub> 相の形成を確認した。ただし、普段実験を行っている 450℃では合金化速度が不十分であり、数時間電解しても合金はほぼ形成しなかった。そこで浴温度を 600℃に上げたところ合金形成が確認されたので、その結果を示す。得られた試料の断面を SEM 等で観察したところ、特徴的な層状構造が確認された(図 4.3.2-3)。さらに、電解条件によってこの層の間隔が変化することが分かった。EDX で分析したところ、これらの層は、Dy, Ni リッチな層と Mo, Cr, W 等が濃縮した層とで形成されていることが確認された。

表 4.3.2-1 実験に用いた金属・合金の組成

	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	-	-	-

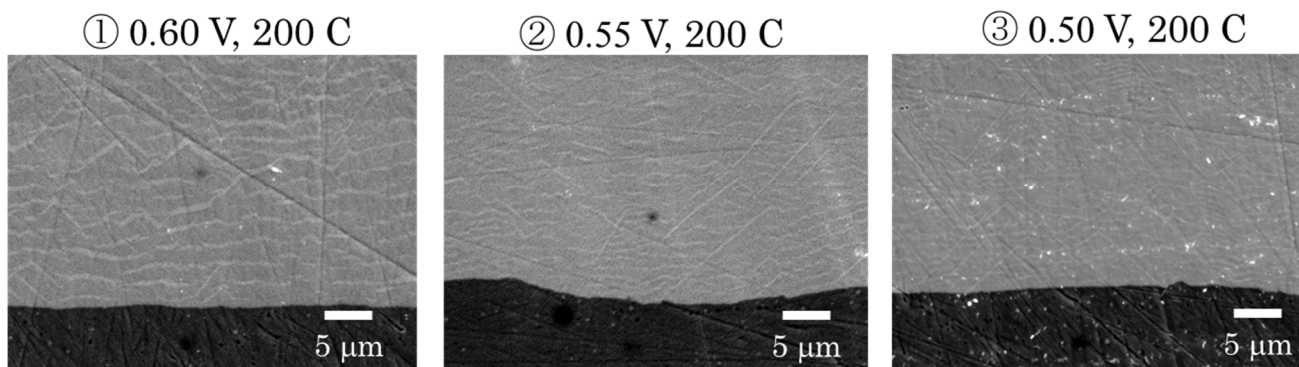


図 4.3.2-3 LiCl-KCl(600℃)中で Dy と合金化させたハステロイ C-276 試料の断面 SEM 像

高温塩化物系溶融塩(CaCl<sub>2</sub> : 850℃)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。そこで、さらに別の高温塩化物系溶融塩(CsCl : 700℃)中で Dy との合金化を試みた。その結果、XRD 等により DyNi<sub>2</sub> 相の形成が確認され、図 4.3.2-4 に示すように全体が合金化し、その厚さは 174 μm であった。これが 1 時間の電解で得られたことから、Cs<sup>+</sup>も Li<sup>+</sup>イオンと同様の効果を持つことが示唆された。また、合金化した部分には、中温塩化物系溶融塩(LiCl-KCl : 600℃)で見られたような縞状の構造が確認された(図 4.3.2-5)。さらに、それらは Dy, Ni の高濃度層と Mo, Cr, W の高濃度層が 1 μm 間隔で交互に積層していることが確認され、これも中温塩化物系溶融塩と同様であった。

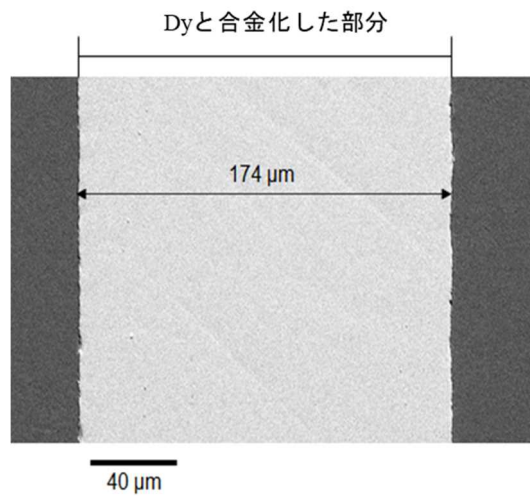


図 4.3.2-4 Dy と合金化させた Hastelloy C-276 の断面 SEM 像 (母材の板厚 100 μm)

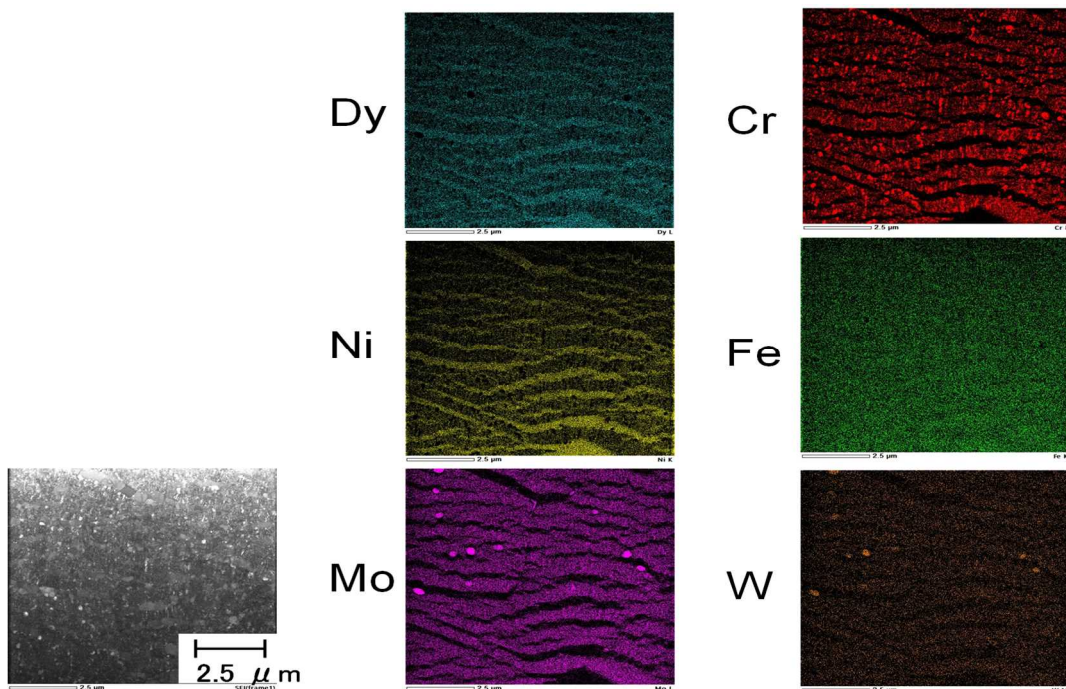


図 4.3.2-5 Dy と合金化させた Hastelloy C-276 の断面 SEM 像と EDS 元素マッピング結果

フッ化物系溶融塩(LiF-CaF<sub>2</sub> : 850°C)で得られた代表的な試料の断面 SEM 像と元素分布測定結果を図 4.3.2-6 に示す。DyNi<sub>2</sub> 相の内部に直径 1 μm 程度の Cr 相が斑点状に形成し、さらに直径 0.2~0.5 μm の Mo 相も広く分布していた。脆い DyNi<sub>2</sub> 相の内部にこれらの相が存在することで局所応力が緩和され、Dy や Nd との合金化時にも、不均一な構造となることが回避されたと示唆され、Cr や Mo の含有が隔膜の耐久性向上に寄与する可能性が示された。また、中温塩化物系と比較して断面構造に大きな違いが見られ、これは Cr や Mo 等の移動速度が温度上昇により向上したためと考えられる。

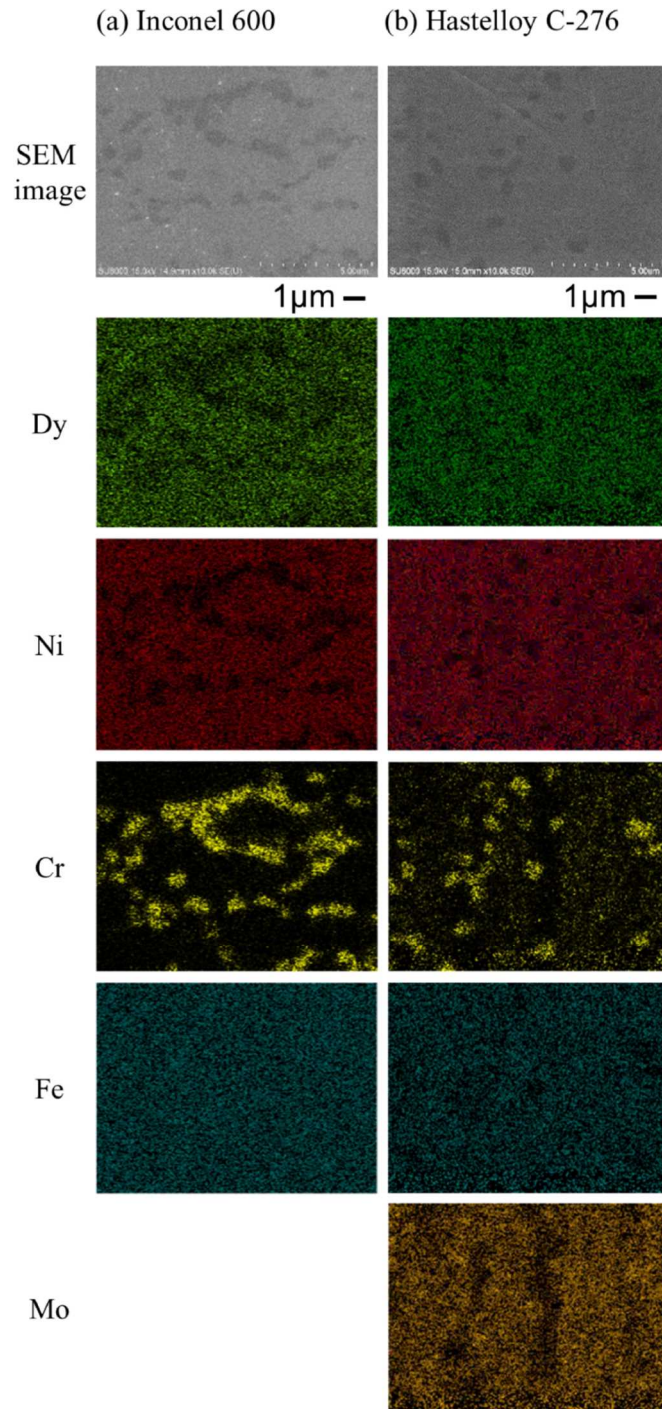


図 4.3.2-6 高温フッ化物系溶融塩中で Dy と合金化したインコネル 600 と Hastelloy C-276 の断面 SEM 像と EDX 元素マッピング結果

続いて、オーダーメイドの隔膜材料として、Niをベース、Moを構造材としたNi-Mo合金およびNi-Moの複合材を選択した。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板とMoメッシュとの複合材を熱間圧延により作製した。これらの外観およびSEM像を図4.3.2-7に示す。ストリップキャスト法の原理上、均一化は困難であるが、0.1mmオーダーの厚さの薄片作製に成功した。Ni板/Moメッシュ複合材は、図4.3.2-8に示すように熱間圧延法を用い、厚み0.10mmのNi板および線径φ0.03mm、150meshのMoメッシュから作製した。加熱温度や条件を適切に設定することにより、Ni板同士の継ぎ目やMoメッシュとNiとの隙間も無く、一体化した試料の作製に成功した(図4.3.2-7)。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て電気化学測定を行った。DyCl<sub>3</sub>を添加した中温塩化物系熔融塩中(LiCl-KCl: 450℃)でサイクリックボルタムメトリーを行った結果を図4.3.2-9に示す。何れの場合も、比較データとして測定したNi板と同様にDyとの合金化、合金からのDy溶出に対応する電流ピークが確認されたことから、作製した隔膜材料は本プロセスに利用可能と考えられる。これらの試料全体を同熔融塩中でDyと合金化させたものの断面SEM像を図4.3.2-10に示す。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%)の試料ではまだら模様になっており、明部はDyNi<sub>2</sub>とDyMoNi<sub>2</sub>の2相共存、暗部はMo濃度が30-40at%のNi-Mo合金であることがわかった。この結果から、Ni/Moメッシュ複合材は比較的脆く、Ni-Mo(25at%)合金は一定の強度を保持していると期待される。

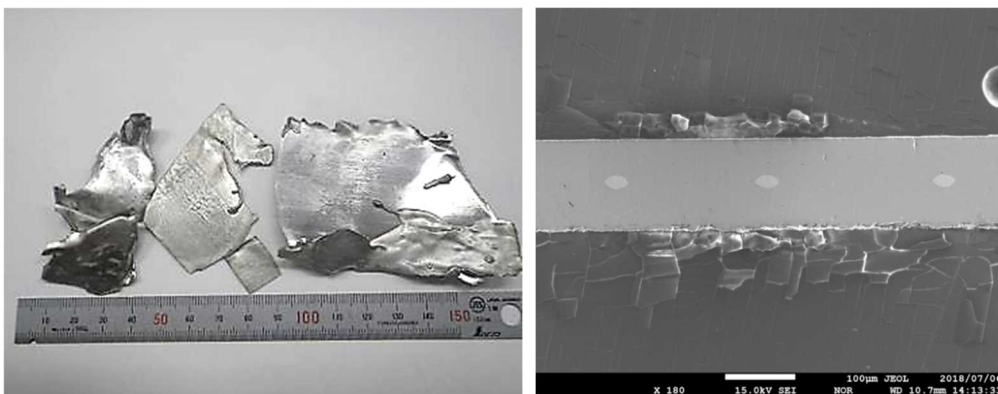


図 4.3.2-7 作製した Ni-Mo 薄片外観と、Ni 板/Mo メッシュ複合材断面 SEM 像

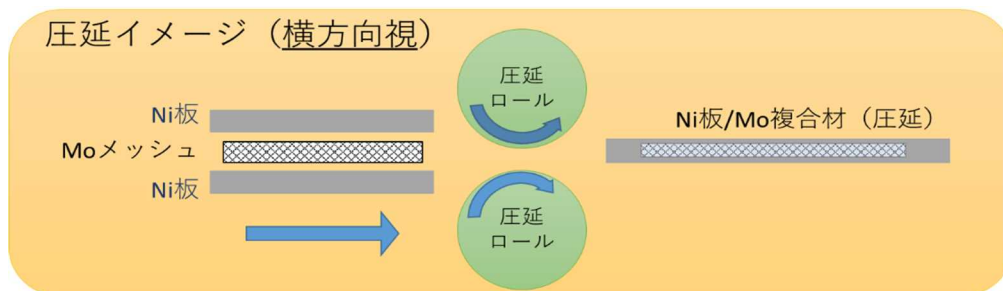


図 4.3.2-8 Ni 板/Mo メッシュ複合材の熱間圧延のイメージ図

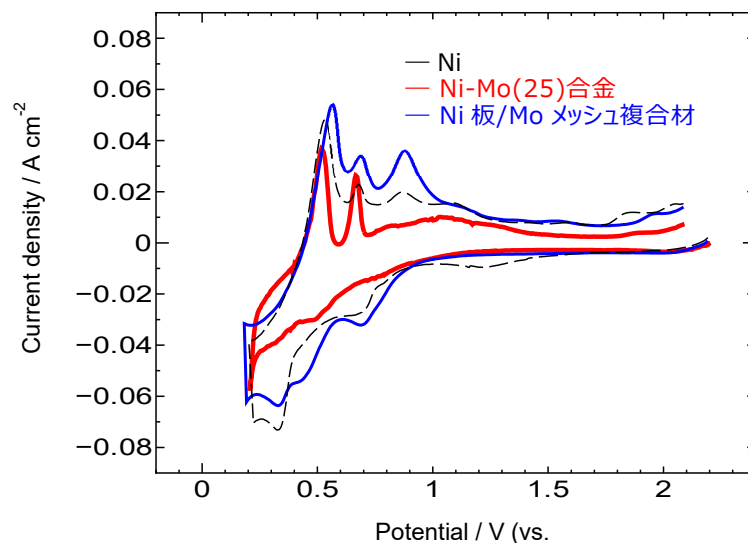


図 4.3.2-9 溶融 LiCl-KCl-DyCl<sub>3</sub> (0.50 mol%)中における Ni, Ni-Mo 合金, Ni 板/Mo メッシュ複合材電極のサイクリックボルタモグラム. 走査速度 : 0.05 V s<sup>-1</sup>

(a) Ni 板/Mo メッシュ複合材

(b) Ni-Mo(25)合金

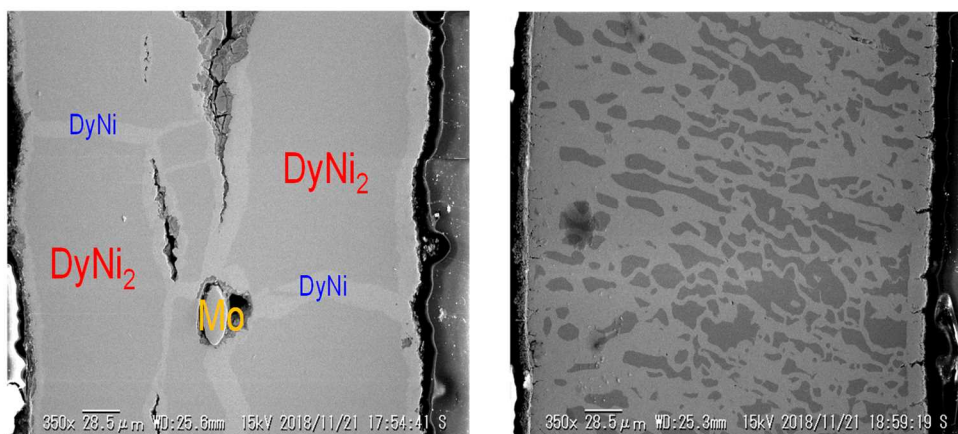


図 4.3.2-10 溶融 LiCl-KCl-DyCl<sub>3</sub>(0.50 mol%)中で 0.55 V の電解により形成した Dy-Ni 合金の断面 SEM 像

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。評価に用いた測定装置外観を図 4.3.2-11 に示す。アクリル製の治具に固定した試験片に対し、φ2 mm の SUS304 製のポンチをゆっくり押し下げ、破損した時点での荷重をロードセルにより計測した。剪断強度は以下の式により算出した。

$$\text{剪断強度} = \text{破断時荷重(N)} / \text{膜厚(mm)} \times \text{ポンチ外周(mm)}$$

膜厚はマイクロメーターによる計測あるいは断面 SEM 像より評価し、ポンチ外周は直径から算出した。このようにして得られた剪断強度を図 4.3.2-12 に示す。ただし、破損は同一試料でも場所による差や偶発的な要因も多く、測定値には大きなばらつきがあった。そのため、平均値を棒グラフで、測定値の分布範囲をエラーバーとして示した。また、全合金化の判断が難しいため、測定した試料のうち信頼性が比較的高いもののみを示している。従来の、Ni 板を Dy と全合金化させた試料(DyNi<sub>2</sub>)の 6.3 N/mm<sup>2</sup> に比較すると、いずれも試料

も高い値を示した。ただ、Ni/Mo メッシュ複合材では  $10.5 \text{ N/mm}^2$  と低い値に留まった。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、これが荷重を受け止める前に Dy-Ni 合金部分が破損したと考えられる。一方、Ni-Mo(25at%)合金あるいはハステロイを用いた場合は元の Ni に比較して 6 倍以上の剪断強度を示した。これにより、合金隔膜耐久性の大幅な改善に成功した。



図 4.3.2-11 破断強度測定部セットアップ

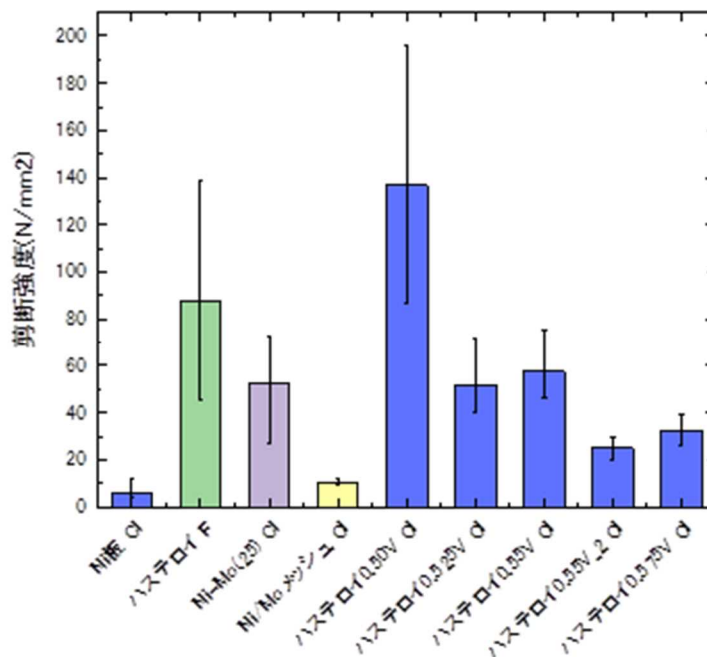


図 4.3.2-12 各試料での破断強度

\*末尾の CI は LiCl-KCl、F は LiF-CaF<sub>2</sub> 系溶融塩中で作製したことを示す

\*「ハステロイ」はいずれもハステロイ C-276 の略

このように、固体の合金隔膜の強度向上に成功したものの、固体を用いる以上は破損リスクを伴う。そこで第三のアプローチとして、液体合金を隔膜材料に用いるための研究を行った。この場合、希土類元素の拡散

が固体中より格段に高まることも期待される(図 4.3.2-13)。高温フッ化物系溶融塩に適した液体合金の候補として、液体 Nd-Fe 合金に着目した。図 4.3.2-13 に示すように、液体合金は多孔質マトリックス中に保持することを想定している。図 4.3.2-14a に Nd-Fe 二元系状態図、図 4.3.2-14b に Dy-Fe 二元系状態図をそれぞれ示す。電解温度を 850°C とすることで、熱力学的に、Nd-Fe 系においては液体の Nd-Fe 合金を形成し、Dy-Fe 系においては固体の Dy-Fe 合金を形成することが予想される。このような Nd-Fe 合金と Dy-Fe 合金の融点の違いを利用して、Nd と Dy の分離性を高めることも期待される。なお、分離・回収後に、Nd は Nd-Fe-B 磁石の原料に、Dy は Dy-Fe 合金として磁石への添加に使用されるため、Fe を隔膜材料として使用すると不純物になり難いという利点もある。

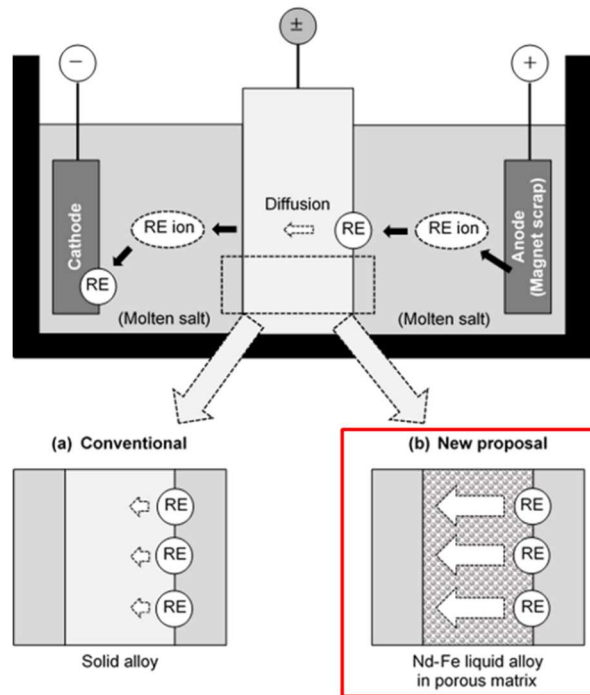


図 4.3.2-13 液体合金隔膜を利用した新技術の概念図

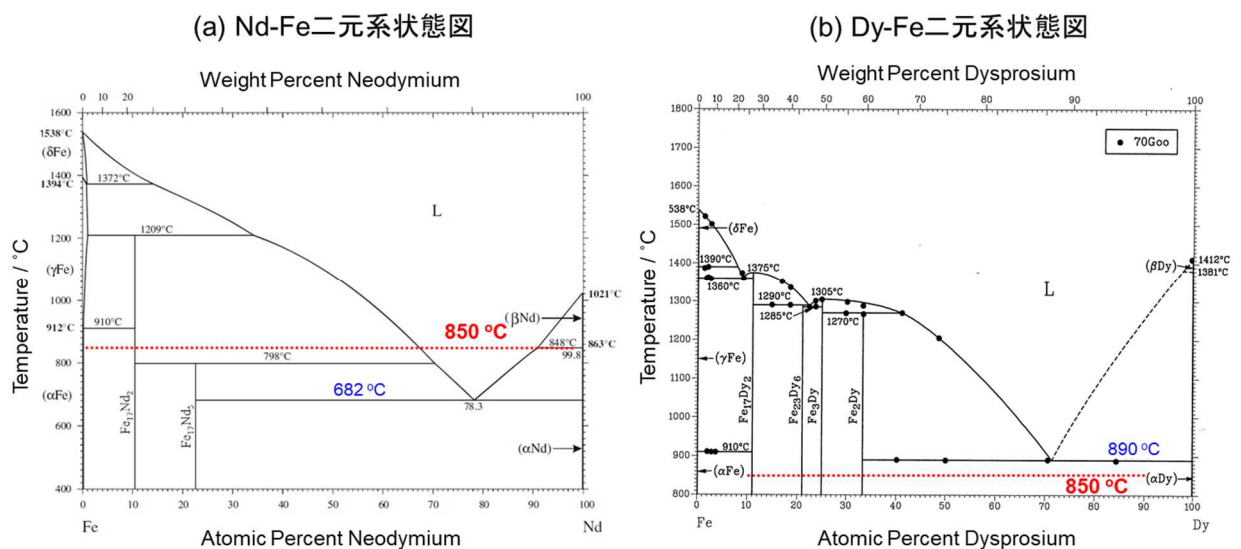


図 4.3.2-14 (a)Nd-Fe, (b)Dy-Fe 二元系状態図

まず、フッ化物系溶融塩(LiF-CaF<sub>2</sub> : 850℃)中における Nd-Fe 合金の電気化学的形成を検討した。フッ化物系溶融塩中に NdF<sub>3</sub> を 0.3 mol% 添加した浴中での Mo 電極を用いた電気化学測定により、Nd<sup>3+</sup>/Nd の平衡電位は 0.18 V (vs. Li<sup>+</sup>/Li) であることが明らかとなった。そこで、NdF<sub>3</sub> を 0.5 mol% 添加した浴中において、Fe プレート電極を用いて Nd<sup>3+</sup>/Nd の平衡電位より卑な 0.10 V で 1 時間定電位電解した。図 4.3.2-15 は、電解後の試料の断面写真および断面 SEM 像である。試料断面は、金属光沢を呈しており液滴状に膨らんでいた(図 4.3.2-15a)。また、断面 SEM 像からは、中央には Fe の芯がわずかに残っているものの、厚さ 100 μm の Fe プレートの大部分が合金化していることが明らかとなった(図 4.3.2-15b)。なお、液滴状部分の EDX による元素分析の結果、平均組成は Nd:Fe = 77.6:22.4 at.% であった。以上の結果から、フッ化物系溶融塩中において、電解温度 850℃ では液体 Nd-Fe 合金が形成することを明らかとした。次に、フッ化物系溶融塩(LiF-CaF<sub>2</sub> : 850℃)中における Dy-Fe 合金の電気化学的形成を検討した。フッ化物系溶融塩中に DyF<sub>3</sub> を 0.3 mol% 添加した浴中での Mo 電極を用いた電気化学測定により、Dy<sup>3+</sup>/Dy の平衡電位は 0.16 V (vs. Li<sup>+</sup>/Li) であることが明らかとなった。そこで、DyF<sub>3</sub> を 0.5 mol% 添加した浴中において、Fe プレート電極を用いて Dy<sup>3+</sup>/Dy の平衡電位より卑な 0.10 V で 30 分間定電位電解した。電解後の試料の断面 SEM 像および EDX による元素分析結果を図 4.3.2-16 に示す。電解後の試料表面は、デンドライト状の電析物が確認され、EDX による元素分析の結果、金属 Dy であることが明らかとなった。また、Fe 基板の上に平滑に形成している箇所(ポイント(1))の組成は Dy:Fe = 33.2:66.8 at.% であり、固体の DyFe<sub>2</sub> が形成していた。以上の結果から、フッ化物系溶融塩中において、電解温度 850℃ では液体 Dy-Fe 合金は形成せずに、固体 Dy-Fe 合金が形成することを明らかとした。

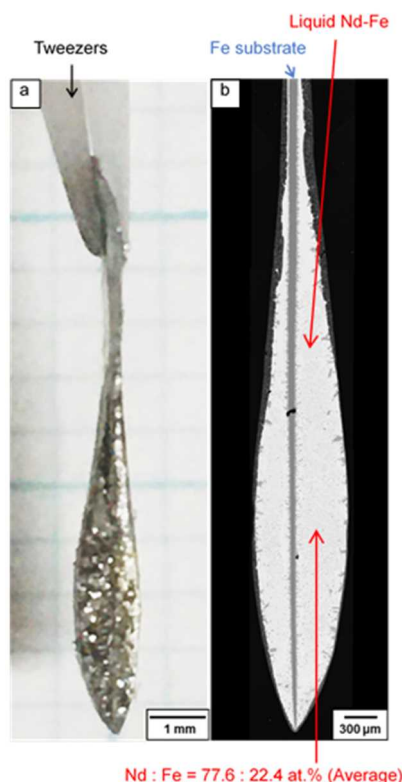


図 4.3.2-15 高温フッ化物系溶融塩中(850℃)で電気化学的に形成した Nd-Fe 合金の  
(a)断面写真および(b)断面 SEM 像



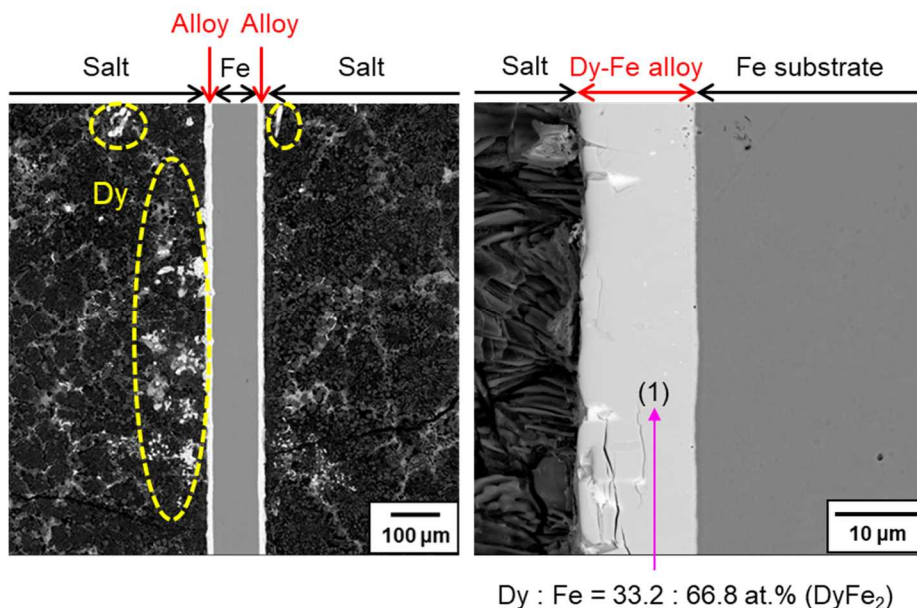


図 4.3.2-16 高温フッ化物系溶融塩中(850℃)で電気化学的に形成した Dy-Fe 合金の断面 SEM 像

続いて、フッ化物系溶融塩(LiF-CaF<sub>2</sub> : 850℃)中における Nd-Dy-Fe 合金の電気化学的形成を検討した。フッ化物系溶融塩中に NdF<sub>3</sub> および DyF<sub>3</sub> をそれぞれ 0.15 mol% 添加した浴中での Mo 電極を用いた開回路電位測定において、RE 金属析出に関連する電位プラトーが 0.17 V (vs. Li<sup>+</sup>/Li) に観測された。そこで、NdF<sub>3</sub> および DyF<sub>3</sub> をそれぞれ 0.5 mol% 添加した浴中において、Fe プレート電極を用いて Nd<sup>3+</sup>/Nd および Dy<sup>3+</sup>/Dy の平衡電位より卑な 0.10 V で 1 時間定電位電解した。図 4.3.2-17 は、電解後の試料の断面写真である。試料断面は、金属光沢を呈しており液滴状に膨らんでいたことから、液体合金の形成を確認した。図 4.3.2-18a に 0.10 V で 5 分間定電位電解した試料の断面 SEM 像を示す。液滴状部分の合金組成は Nd:Dy:Fe = 70.9:27.9:1.2 at.% であり、Nd リッチな組成(Nd/Dy = 2.5)であった。図 4.3.2-18b に 0.10 V で 5 分間定電位電解(第一段階)した後、電位を +0.215 V に変更して 30 分間定電位電解(第二段階)した試料の断面 SEM 像を示す。この二段階による定電位電解は、第一段階において液体合金を形成し、その後、第二段階において液体合金から RE を陽極溶解することを意味する。このように二段階定電位電解した試料の合金組成は、Nd:Dy:Fe = 2.3:27.8:69.9 at.% であり、Dy リッチ(Dy/Nd = 12.1)な固体の REFe<sub>2</sub> が形成していた。以上をまとめると、フッ化物系溶融塩中において、電解温度 850℃ で形成した Nd-Dy-Fe 液体合金の組成は Nd リッチであり、液体合金の陽極溶解後に残存した固体合金の組成は Dy リッチであることから、液体合金隔膜からの RE 溶出電位を制御することにより Nd の選択透過膜としての応用が期待できる。

塩化物系溶融塩でも、液体合金の検討を行った。ここでは、毒性が少なく比較的融点である Zn(融点 : 420℃)、Bi(融点 : 271℃)、Sn(融点 : 232℃)を選択した。これらの液体電極を用いて、Dy<sup>3+</sup> イオンと Nd<sup>3+</sup> イオンを含む高温塩化物系溶融塩(CsCl : 700℃)から Dy<sup>3+</sup> イオンを電気化学的に還元し、Nd<sup>3+</sup> イオンと分離するプロセスを検証するとともに、分離隔膜として最適な金属を、Dy の分離度と拡散速度から決定することを目的とした。実験は、Ar ガス雰囲気グローブボックス内で、溶融塩として CsCl、希土類イオン源として DyCl<sub>3</sub>、

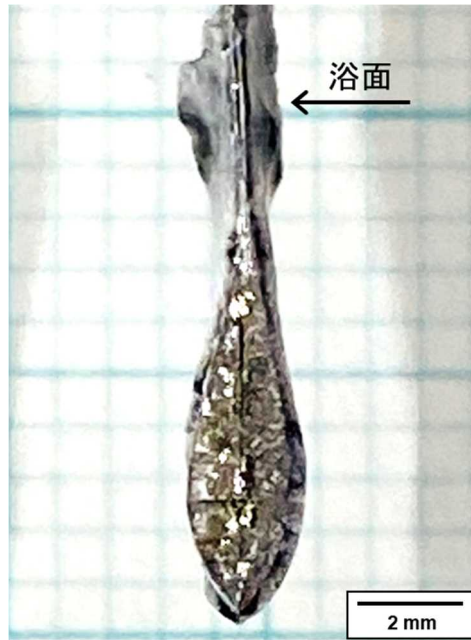


図 4.3.2-17 高温フッ化物系溶融塩中(850℃)で電気化学的に形成した Nd-Dy-Fe 合金の断面写真

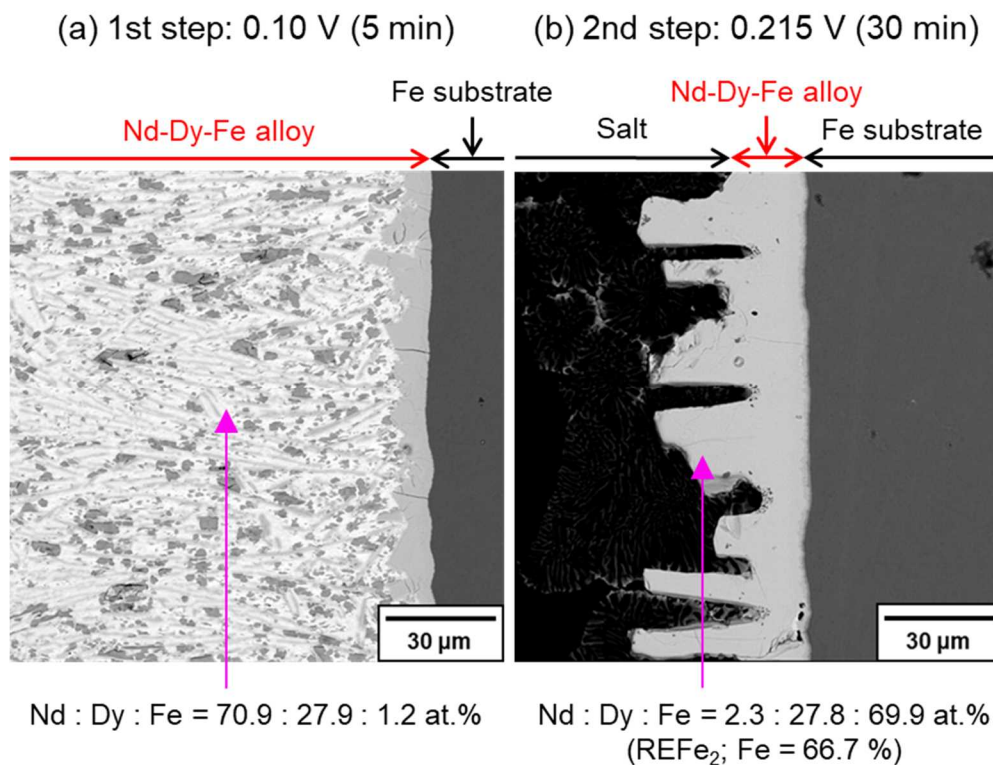


図 4.3.2-18 高温フッ化物系溶融塩中(850℃)で電気化学的に形成した Nd-Dy-Fe 合金の断面 SEM 像

NdCl<sub>3</sub>をそれぞれ 0.50 mol%添加した系で行った。作用極には液体 Zn、Bi、Sn を使用し、Dy と Nd との合金形成電位をサイクリックボルタンメトリーにより測定した。図 4.3.2-19 に Zn 電極を用いて得られたサイクリックボルタモグラム(走査速度 0.05 V・s<sup>-1</sup>)を示す。DyCl<sub>3</sub>を添加した系、NdCl<sub>3</sub>を添加した系において大きなカソード電流

(負の電流)がそれぞれ 1.05 V 付近、0.90 V 付近で観測された。この結果を踏まえて、 $\text{DyCl}_3$  を添加した系において 1.00 V で 1 時間の定電位電解を行った。得られた作用極(冷却凝固後)全体から Dy が検出され、1.00 V で液体 Zn と Dy が合金化することが明らかになった。また図 4.3.2-19 で 1.05 V 付近から立ち上がるカソード電流は、Dy-Zn 合金形成に起因することがわかった。一方で、 $\text{NdCl}_3$  を添加した系において同じく、1.00 V で 1 時間の定電位電解を行った Zn 電極からは Nd は検出されず、1.00 V において液体 Zn と Nd は合金化しないことが明らかとなった。このことから、1.00 V で保持した場合には  $\text{Dy}^{3+}$  イオンを選択的に Zn と合金化できることが示唆された。また、クロノポテンシオメトリーを用いて液体金属中の Dy と Nd の拡散速度を評価したところ、Dy が Nd に比較して 3 倍以上高い拡散速度をしめした。

また、Zn を用いた固液共存隔膜を作製するために、10 mm × 10 mm の Fe 板、Mo 板、W 板、ハステロイ板、SUS304 板、Mo メッシュ、W メッシュ、SUS304 メッシュ、SUS316 メッシュを 550°C の液体 Zn 中に 5 分間浸漬させ、各試料に Zn を付着させた。各試料の Zn 付着量を図 4.3.2-20 に示す。金属板では Fe とハステロイ、メッシュでは SUS304 の Zn 付着量が多く、Fe あるいは Ni を含む材料の濡れ性が良いことがわかった。逆に、Mo と W のような Zn と合金化しにくい材料は濡れ性が悪かった。

この結果をもとに、固液共存隔膜を作製した。図 4.3.2-21 に示すように、内径 18 mm のカーボン管内に Mo メッシュ、Ni 薄膜、Zn 薄膜の順に重ねて隔膜とした。さらに、径の近い SUS304 管を差し込み、隔膜を固定した。なお、Zn と Ni の量は、550°C で固体の  $\text{Zn}_{11}\text{Ni}_2$  と液体の Zn とが共存する量比で調整した。作製した固液共存隔膜を 550°C の LiCl-KCl 共晶塩中で 3 時間保持した後、引き上げて SEM-EDS で分析を行った。ここでは、隔膜の上部に LiCl-KCl-NaCl 熔融塩を満たした。得られた試料断面の観察結果を図 4.3.2-22 に示す。中央付近は、Ni 相の上部に Zn-Ni 相が存在した。SUS 管の周辺には、Ni 相、Zn-Ni 相の上に単体の Zn 相が残存していた。今回、全体に渡って単体の Ni 相が残っていたが、これは Zn の一部が SUS 管と反応したこと、SUS 管周辺に Zn が偏っていたこと、反応時間が不十分であったことなどが理由と考えられる。これらを改善することによって、固体  $\text{Zn}_{11}\text{Ni}_2$  と液体 Zn が共存する隔膜を作製することが可能となる。また、上部の LiCl-KCl-NaCl 熔融塩が隔膜から漏れていないことを確認した。

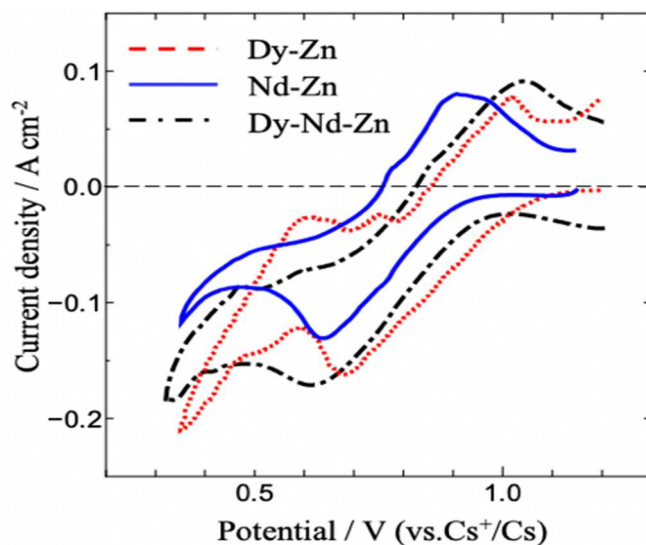


図 4.3.2-19 熔融  $\text{CsCl-DyCl}_3$  (0.50 mol%) or  $\text{NdCl}_3$  (0.50 mol%) 中における液体 Zn 電極のサイクリックボルタモグラム。走査速度 :  $0.05 \text{ V s}^{-1}$

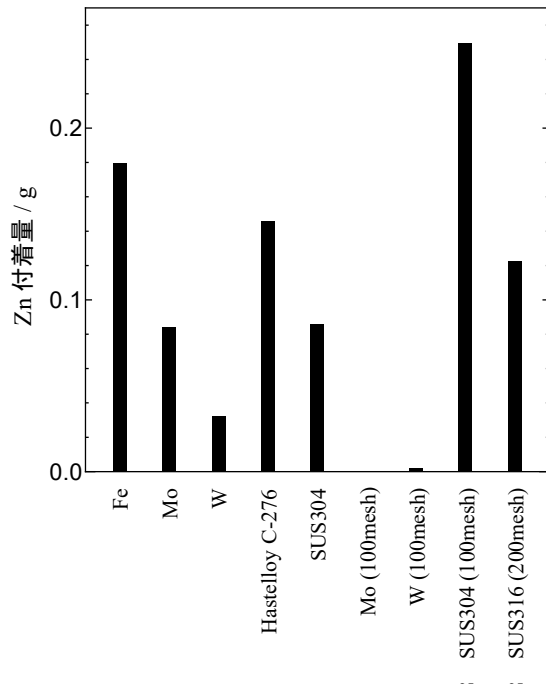


図 4.3.2-20 550°Cの液体 Zn に 5 分間浸漬させた後の各材料への Zn の付着量

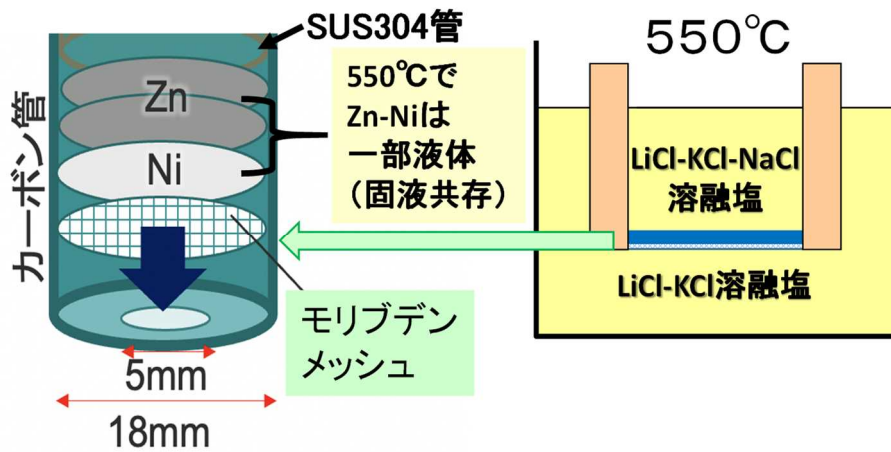


図 4.3.2-21 固液共存隔膜の試作と熔融塩中での保持試験

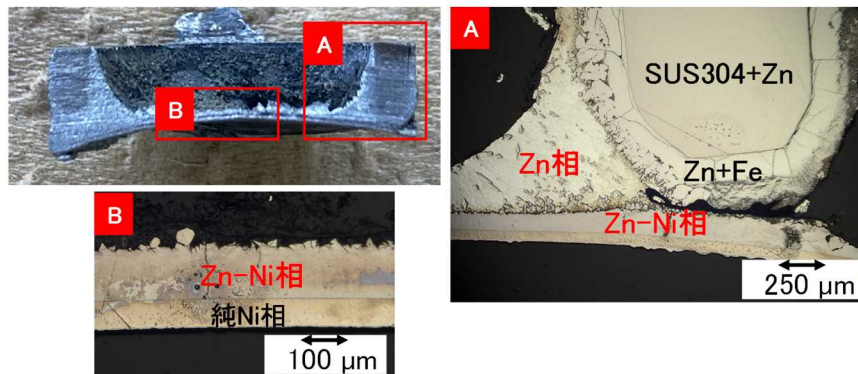


図 4.3.2-22 550°Cの熔融塩中に 3 時間保持後の固液共存隔膜

### (3-2-B)分離性の向上

概念図(図 4.3.2-1)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。結果を、図 4.3.2-23 に示す。これらの中では、エアコンとそれに次いでモーター用の磁石が、高価な Dy を比較的多く含み、有望な対象物と判断された。ただ、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と考えられた。また、不純物のうち本プロセスで分離不可な元素は特に無かったが、電解に悪影響を与える酸素値に注意が必要と判断した。

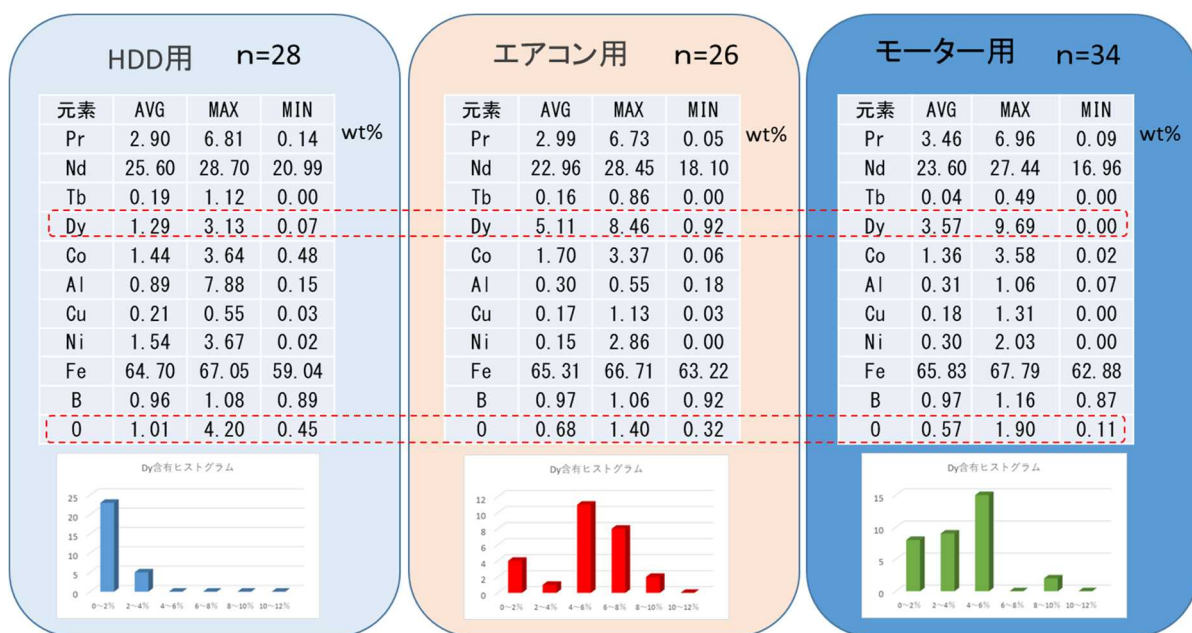


図 4.3.2-23 市中から回収した廃磁石の分析結果

続いて、本プロセスの分離性を各溶融塩中で評価した。フッ化物系溶融塩では、850℃の  $\text{LiF-CaF}_2\text{-NdF}_3(0.50 \text{ mol}\%)\text{-DyF}_3(0.50 \text{ mol}\%)$  中で、Dy/Nd の選択性を検討した。ハステロイを 0.20 V および 0.35 V(vs.  $\text{Li}^+/\text{Li}$ )で 60 分間の定電位電解し、合金試料を作製した。得られた RE-ハステロイ合金相中の Nd, Dy 濃度を EDX 分析により測定した結果を図 4.3.2-24 に示す。Dy/Nd の値は 0.20 V で 5.2、0.35 V では 4.0 であり、Dy の分離率に換算するとそれぞれ 84%、80%であった。ここで、Dy の分離率を合金中の(Dy 物質量)/(Dy 物質量+Nd 物質量)と定義する。これらの値は、比較データとして記載した Ni と同等以上であった。中温塩化物系溶融塩のデータはある程度過去からの蓄積があるため、700℃の溶融  $\text{CsCl-DyCl}_3(1.0 \text{ mol}\%)\text{-NdCl}_3(1.0 \text{ mol}\%)$  中において、Ni 電極を用いて 30 分間の定電位電解を行い、Dy/Nd の選択性を検討した。Ni 電極では合金中の Dy 分離率が 93 %と高い値を示した。また、分離膜として使用される  $\text{RENi}_2(\text{RE}=\text{Dy, Nd})$  相の成長速度は、 $50 \mu\text{m h}^{-1}$  以上を達成した。さらに、LiCl を 50 mol% 添加した溶融  $\text{CsCl-LiCl-DyCl}_3(1.0 \text{ mol}\%)\text{-NdCl}_3(1.0 \text{ mol}\%)$  中で Ni 電極を用いて、種々の電位で 30 分間の定電位電解を行い、試料を作製した。作製した試料を溶解後に ICP-AES により分析し、Dy と Nd の析出量(合金化量)及び Dy 分離率を算出した。DyNi<sub>2</sub> と NdNi<sub>3</sub> の安定電位領域である 0.57 V ~

0.63 Vでは、Dyの分離率は93~97%(Dy/Nd = 14~30)となり、これまでの700℃以上の高温溶融塩の系と比較して非常に高い値を示した。さらに、電解時間を3時間にした場合、最大98%のDy分離率を達成した。一方、卑な電位0.36 V~0.39 VではDyとNdの析出量が多いが、Dy分離率は70%程度と低い値となった。一例として、図4.3.2-25に0.37 Vで30分電解して得られたDy-Nd-Ni合金の断面SEM像を示す。合金が二相に分かれており、基板表面に近い明部では、Dy、Nd、Niの元素比が30:23:47、基板内部の暗部では25:11:64であった。明部の相ではNdの比率が高かった。またXRDから、明部の相はRENi(RE=Dy, Nd)、暗部の相はRENi<sub>2</sub>(RE=Dy, Nd)であることがわかった。以上の結果を踏まえると、0.40 V以下の卑な電位で長時間電解を行えば、明部のRENi(RE=Dy, Nd)相が優勢となり、Ndを選択的に分離できる可能性が示された。

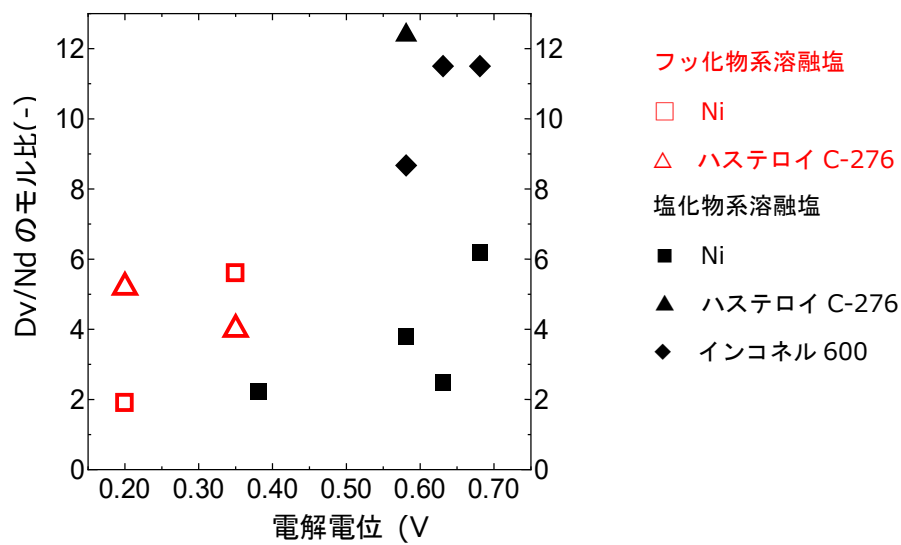


図 4.3.2-24 溶融フッ化物および塩化物系溶融塩中で定電位電解により作製した合金中のDy, Ndの析出量比と電解電位との関係

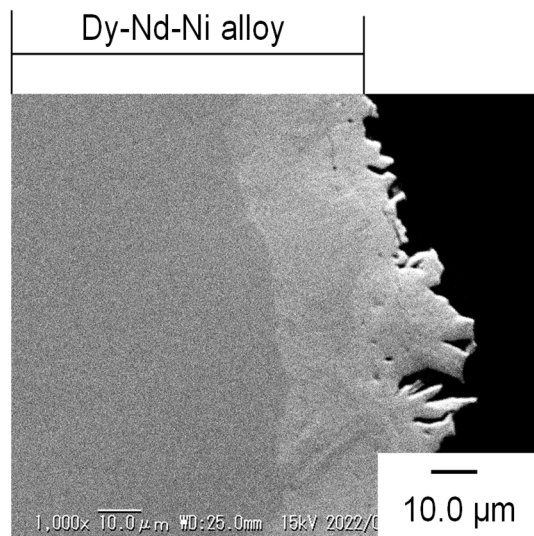


図 4.3.2-25 溶融 CsCl-LiCl-DyCl<sub>3</sub>(1.0 mol%)-NdCl<sub>3</sub>(1.0 mol%)中で Ni 電極を用いて 0.37 V の定電位電解で作製した合金試料の断面 SEM 像

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℃)で行った。実験に用いた電解セルを図 4.3.2-26 に模式的に示す。原理図(図 4.3.2-1)では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、昇温後にその場で希土類元素と合金化させた。左方の浴(メルトA)に NdCl<sub>3</sub>と DyCl<sub>3</sub>を、右方の浴に LaCl<sub>3</sub>をそれぞれ 0.5 mol%ずつ添加した。メルト A 中の GC 電極、Ag<sup>+</sup>/Ag 電極(参照極 A)および隔膜をポテンシヨ/ガルバノスタッドに接続し、隔膜を定電位電解することで Ni-RE 合金隔膜を製作した。合金形成がある程度進行した段階で、メルト B 中の Ni 電極、参照極 B、合金隔膜を別のポテンシヨ/ガルバノスタッドに接続し、隔膜を希土類元素が溶解する電位に制御して透過試験を実施した。この間も、メルト A 側での定電位電解による合金形成は継続した。所定の時間通電したのち電解を一時停止し、陰極の Ni 板を交換するとともにメルト B の一部を回収したのち、同条件で試験を継続した。以後、メルト A 側での合金化と、メルト B 側での脱合金化(RE の溶出)およびサンプリングの操作を繰り返し行った。

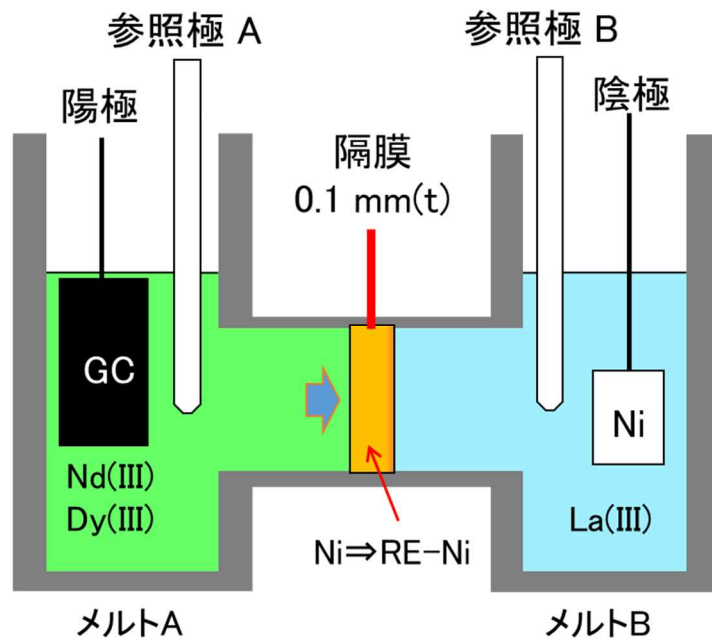


図 4.3.2-26 透過試験用の電解セル模式図

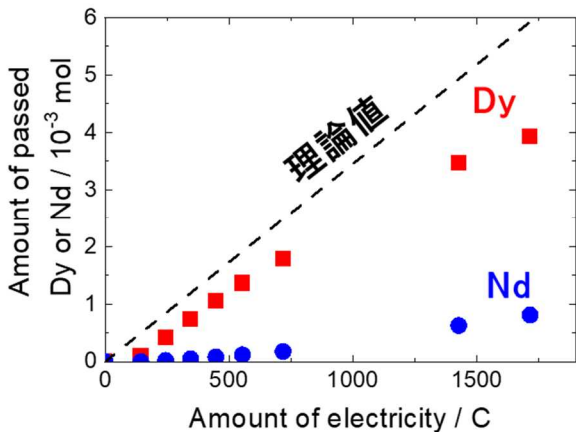


図 4.3.2-27 Dy 選択透過試験の結果

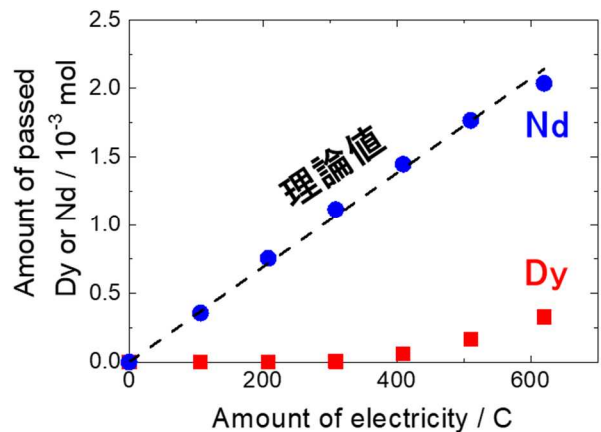


図 4.3.2-28 Nd 選択透過試験の結果

回収した Ni 陰極と浴の一部を酸溶解し、ICP-AES で測定することにより、メルト A からメルト B に移動した Dy および Nd の物質量を評価した。ここで、Dy の選択透過を狙う際には Dy が選択的に  $\text{RENi}_2$  合金を形成する電位に、Nd の選択透過を狙う際には、Nd と Dy の両者が  $\text{RENi}_2$  合金を形成するが、Nd のみが溶出する電位( $\text{DyNi}_2$  が安定に存在できる電位)にそれぞれ制御した。Dy および Nd の選択透過試験の結果を図 4.3.2-27 および 28 にそれぞれ示す。いずれの場合も、通電量の増加に従いメルト B 中の Nd および Dy の物質量が増加した。この値が、希土類元素が 3 電子反応で溶解すると仮定した理論値に近いことから、いずれの電流効率も高いと判断される。また、Dy の選択透過試験では Nd に対して Dy が 4.8 倍、Nd の選択透過試験では、Dy に対して Nd が 6 倍の選択性で透過していた。これを純度換算すると、それぞれ 82% および 86% となり、目標値である純度 80% 以上を達成した。なお、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。

高温フッ化物系溶融塩( $\text{LiF-CaF}_2$ :  $950^\circ\text{C}$ )中においても、隔膜透過試験を行った。フッ化物系溶融塩ではセラミック系の材料が使用できないことから、るつぼ状隔膜を用いた透過試験を行った(図 4.3.2-29)。ここでは、隔膜の強度向上で実績のあった Hasteloy をるつぼ状隔膜材料として検討した。るつぼ状隔膜を利用する特徴として、(1)溶融塩リーク問題の解決、(2)小径チューブのため破損しにくい(応力の緩和)、(3)スケールアップは深さおよび本数増加で対応可能、などが挙げられる。図 4.3.2-30 に実験に用いた電解セルを模式的に示し、図 4.3.2-31 に一部の材料の外観写真を示す。透過実験に先立ち、フッ化物系溶融塩中(外側塩)に  $\text{DyF}_3$  および  $\text{NdF}_3$  をそれぞれ 0.5 mol% 添加し、るつぼ状隔膜を陰極として  $-100 \text{ mA cm}^{-2}$  で定電流電解することで合金隔膜を形成した。この  $-100 \text{ mA cm}^{-2}$  での定電流電解は透過実験が終了するまで継続した(図 4.3.2-32a)。合金化が十分に進行した段階で、 $\text{LaF}_3$  を 0.1 mol% 添加したフッ化物系溶融塩(内側塩)中において、るつぼ状隔膜を陽極として  $10\sim 60 \text{ mA cm}^{-2}$  まで段階的に電流密度を上昇させ、その後、 $60 \text{ mA cm}^{-2}$  で定電流電解することで透過試験を実施した(図 4.3.2-32b)。図 4.3.2-33 に透過試験後の Hasteloy るつぼ状隔膜周辺の断面写真(図 4.3.2-33a)、断面 SEM 像および EDX による元素分析結果(図 4.3.2-33b)、内側塩に配置した希土類回収用 Ni 棒電極の断面 SEM 像および EDX による元素分析結果(図 4.3.2-33c)を示す。透過試験後の Hasteloy るつぼ状隔膜は、厚さ方向全体に Dy および Nd が分布し、全合金化していた。また、希土類回収用 Ni 棒電極上では、RE-Ni 合金を形成していた。次に、図 4.3.2-34 に示す透過試験後の Hasteloy るつぼ状隔膜および内側塩の断面において、バルクと見なせる内側塩①、Hasteloy と内側塩の界面に位置する内側塩②の ICP による元素分析を行った。内側塩②では、Dy と Nd の分離比(Dy/Nd)は 8.3、分離率に換算して 89% であった。この内側塩②あるいはそれに含まれる固形物の成因は、今後さらに検証する予定である。このように、フッ化物系溶融塩中でも Hasteloy るつぼ状隔膜を用いることで透過試験に成功し、Dy および Nd の個別回収の可能性を示した。



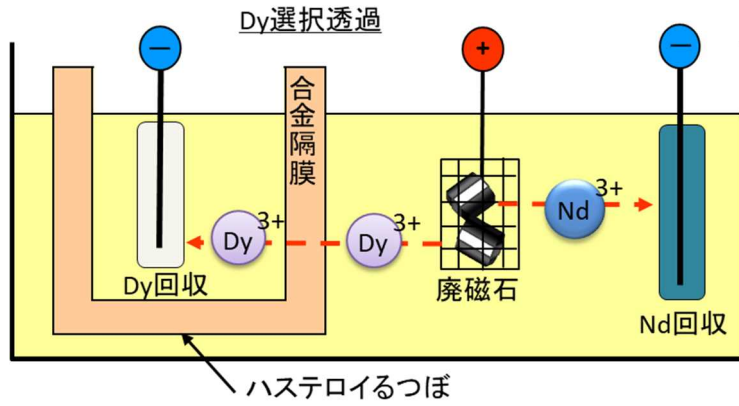


図 4.3.2-29 Hastelloy 管状隔膜を利用した新技術の概念図

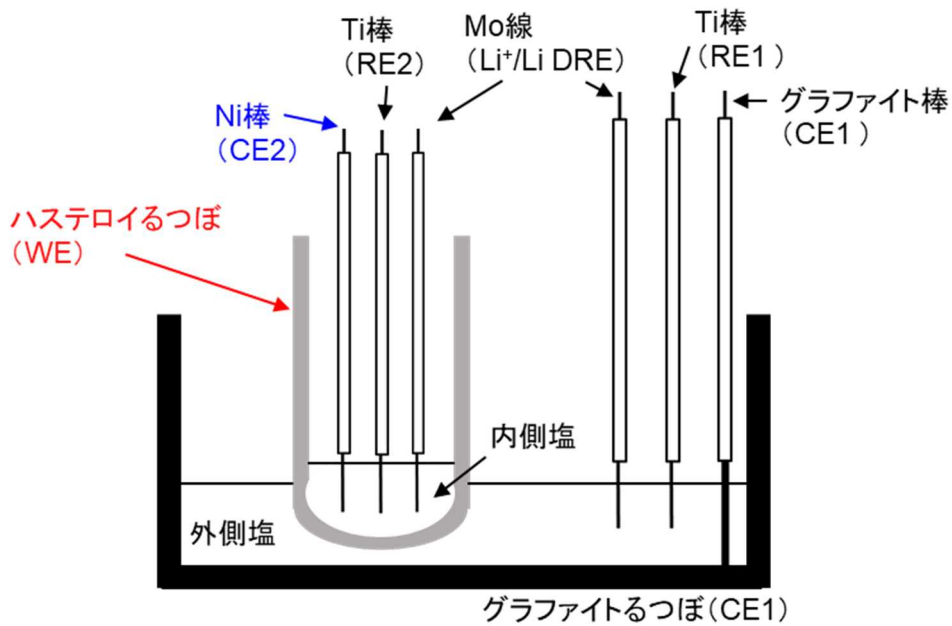


図 4.3.2-30 Hastelloy 管状隔膜を利用した電解セルの模式図



図 4.3.2-31 電解セルの材料外観写真(一部抜粋)

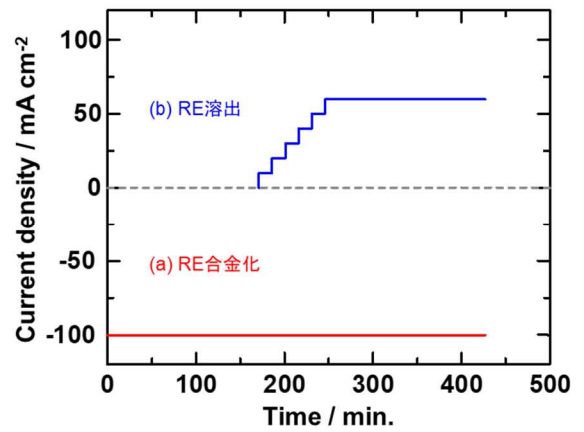


図 4.3.2-32 透過試験時の電流密度

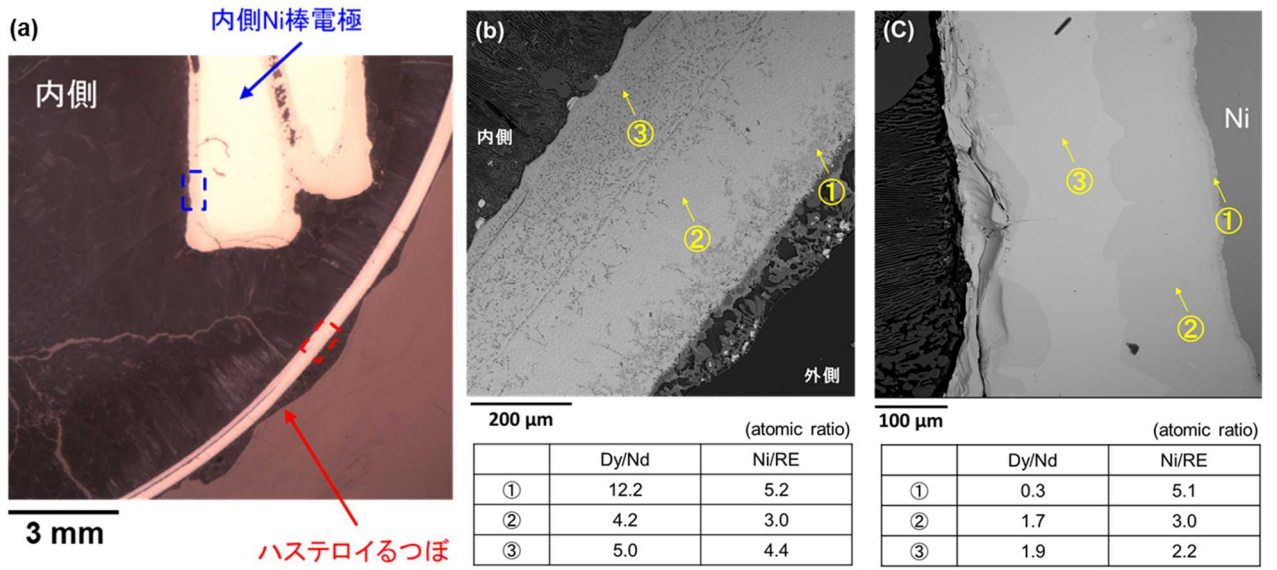


図 4.3.2-33 透過試験後の(a)ハステロイるつぼ隔膜周辺の断面写真および(b)ハステロイるつぼの断面 SEM 像および EDX 結果, (c)内側 Ni 棒電極の断面 SEM 像および EDX 結果

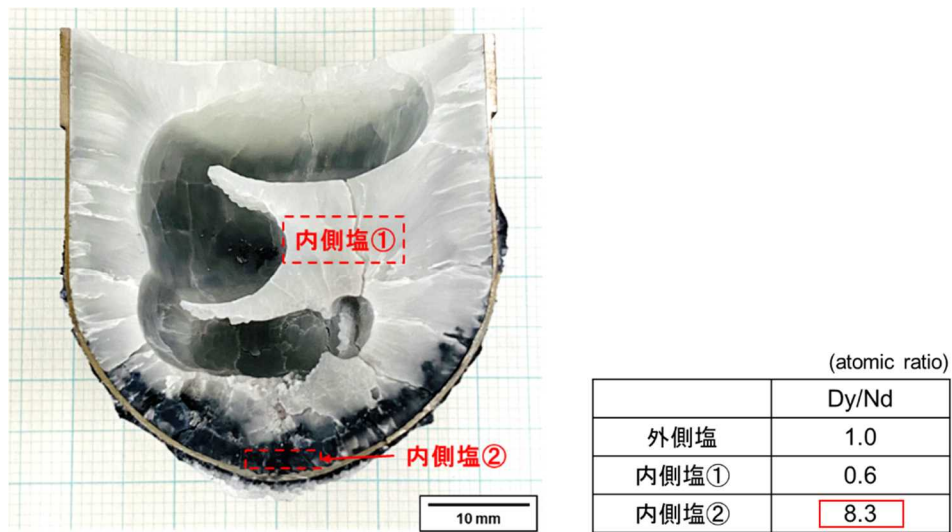


図 4.3.2-34 透過試験後のハステロイるつぼ隔膜および内側塩の断面

### (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(図 4.3.2-1)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。作成した電解セルの外観と Nd, Dy の動きを模式的に図 4.3.2-35 に示す。制御の詳細は割愛するが、基本的には図 4.3.2-26 に示したメルト A を中央の部屋とし、その両側に 2 つの合金隔膜およびメルト B を配置したうえで、その一方を Nd の選択透過・回収、もう一方を Dy の選択透過・回収に用いるものである。電解セルはこれから更に改良を重ね、制御条件も工夫することにより、Nd と Dy の選択透過を同時に実現する技術を確立した。

プロセスの連続化も、商業化を目指すうえで極めて重要である。合金隔膜での選択透過は原理的に連続運転可能であり、陰極での希土類元素回収も、希土類元素の電解採取で既に商用技術が確立しており、電解を中断することなく実施できる。そこで、磁石からの希土類元素の選択溶出に焦点を当て、廃磁石の供給・電解・排出を、電解を維持した状態で行うための要素技術の確立を目指した。種々の構造や材料等を検討した結果、図 4.3.2-36 に示す外観の装置を試作した。廃磁石は、反応装置の上からガラス管を通じて投入され、図 4.3.2-36b 中央にある車輪状の部材にセットされる。車輪状の部材は幾つかの部屋に分かれており、装置上方にあるモーター(図 4.3.2-36a)で回転軸を動かすことで、ギアを通じて動力が伝わり、所定の角度回転するようになっている。車輪状の部材の下方 1/4 程度が熔融塩に漬かり、別途設置した対極との間に電流を流すことで磁石を溶解する。溶解後の磁石は、車輪状の部材をさらに回転することで上方に運搬され、所定の位置より上に至った時点で自重により落下し、磁石導入口の反対側にあるスライドを通じて系外に排出される仕組みになっている。この装置についても、磁石をセットする部材の形状や材質等を種々検討し、廃磁石の投入・陽極溶解・溶解後の磁石の排出といった一連の操作を、電解を継続したまま行えることを確認した。これにより、連続電解に必要な要素技術を確立した。

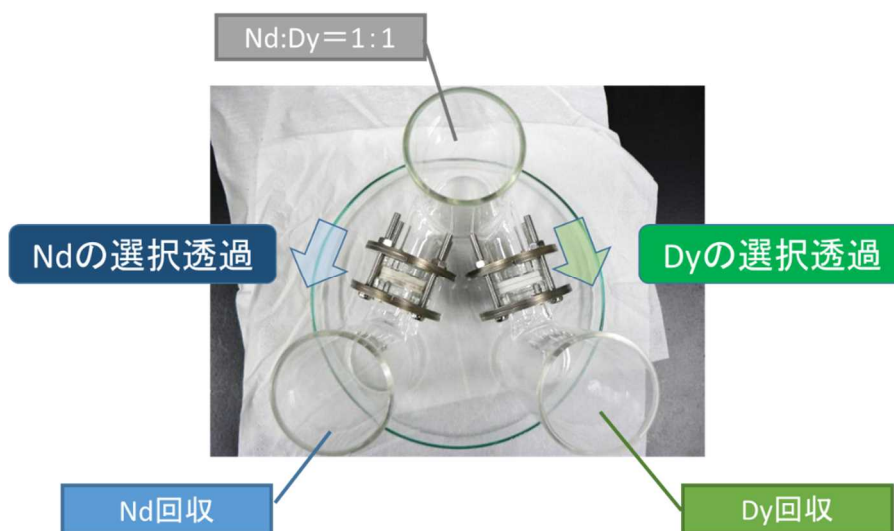


図 4.3.2-35 複数隔膜制御用の電解セル外観と、Nd, Dy の動き

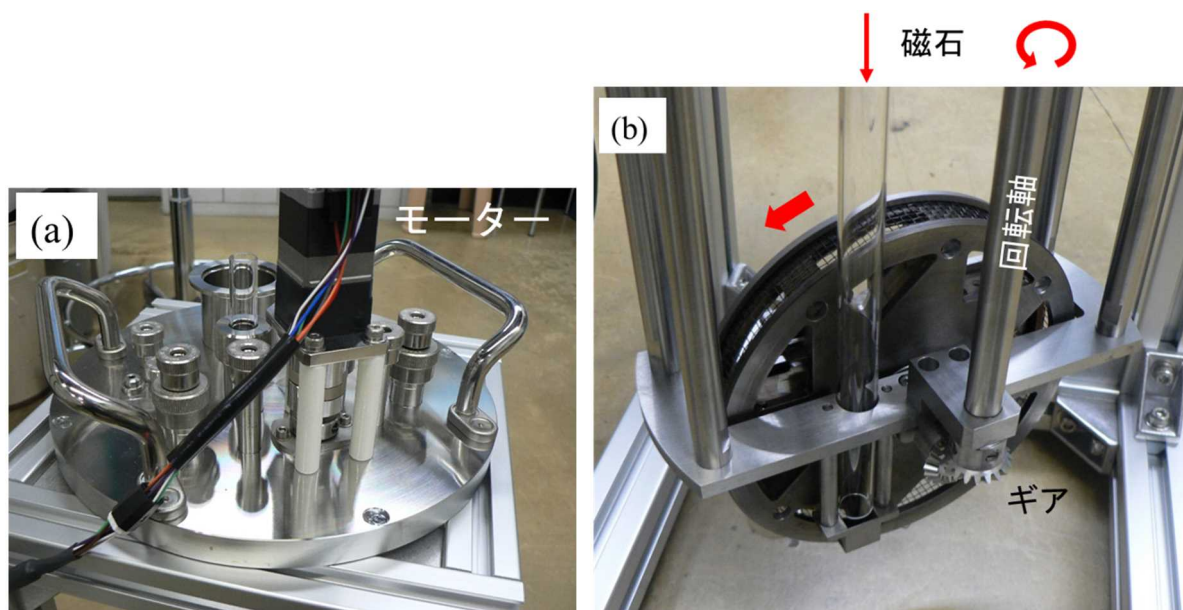


図 4.3.2-36 連続電解用の試作装置外観  
(a)装置上方の写真、(b)装置下方(反応容器内に入る部分)の写真

### (3-2-D)試験炉導入と操業データの蓄積

本プロセスは電気化学反応を用いたものであり、原理的に大型化は問題無いはずであるが、工学的な視点で見ると様々な課題が想起される。さらに、比較的大規模での実験データを蓄積することは、商業化への課題抽出やコスト計算を行う上で極めて需要である。

そこで、図 4.3.2-37 に示したようにラボレベルよりも大型の試験装置を組み立て、内部に浴容量約 20 kg (試験に用いた浴重量は 8 kg) のアルミナ製の電気化学セル(図 4.3.2-38)をセットして隔膜透過試験を実施した。詳細は割愛するが、ラボレベルの小型電解セルで得られたデータとほぼ一致した結果が得られ、原理的な問題が無いことを確認した。さらに、この結果をもとに本プロセスを導入した際のコスト計算を行い、従来法に比較して廃磁石の処理コストを 1/2 にする見通しを立てるとともに、それを実現するための技術課題を明らかにした。

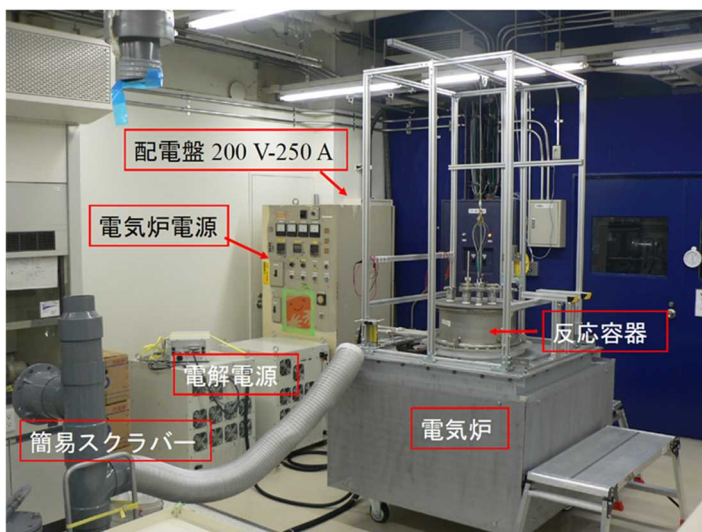


図 4.3.2-37 試験炉での実験状況



図 4.3.2-38 実験に用いた電解セルの外観

### (3-2-E)機構解明と他元素への展開

本項目の背景説明で述べたように、本プロセスは希土類合金の高速形成現象を利用したものである。この合金の高速形成現象は様々な系で確認されており、データも豊富に蓄積されている。しかし、高速形成の機構は未知な部分が多分に残っている。これを解明することができれば、分離率や処理速度の飛躍的向上や、類似プロセスの他元素への展開などが期待される。

そこで、合金形成過程をその場観察する研究を行った。合金の高速形成のメカニズムに関わる既往研究では、分子動力学シミュレーションにより、Ni<sub>2</sub>Y系において粒界や粒界近傍でRE拡散速度が速いこと、PrNi<sub>2</sub>形成時のRE拡散に、粒界に存在する少量のLiが関与している可能性のあることが報告されている。しかし、いずれも直接的な証拠とは言い難い。特に、ex-situ分析では、合金形成後、試料の冷却・水洗による影響を排除することが難しく、室温や大気中で不安定な化合物が反応に関与する場合、証拠を得ることが難しい。そこで、中温塩化物系溶融塩(LiCl-KCl: 450℃)においてDy-Ni合金を形成させると同時に、白色X線回折測定(またはエネルギー分散型X線回折、EDXRD)によるin-situ分析を実施した。白色X線回折測定は、光学系を固定できるため電気炉の設計が容易で、測定間隔が数分と短い。また、in-situでXRD測定を行うため、試料の冷却や洗浄の影響を排除した状態で、溶融塩中の相を直接同定することが可能である。この測定法を適用することにより、合金の高速形成にLi等が関与しているのであれば、Li-Dy-Ni化合物のような中間生成物を検出できる可能性がある。また、DyNi<sub>2</sub>以外の組成のDy-Ni合金相が検出される可能性もある。本研究では、まず初めに合金化時の生成物相を同定した。次に、回折ピークと蛍光X線ピークの時間変化の解析を行った。

実験装置を図4.3.2-39aに模式的に示す。実験は、大型放射光施設SPring-8の白色X線回折測定用ビームライン(BL28B2)で行った。窓付電気炉にパイレックス製の反応容器、その中に共晶組成のLiCl-KCl 45 gをセットしたグラファイトるつぼ(対極としても使用)を設置した。反応容器内をArガスにより不活性雰囲気中に保ち、450℃まで昇温した。参照極は、Ag<sup>+</sup>/Ag電極を使用した。Mo線電極を用いて電位較正を行った後、DyCl<sub>3</sub>をDy<sup>3+</sup>濃度が0.5 mol%になるように添加した。図4.3.2-39bに作用極とビーム経路の模式図を示す。Ni板電極(5 mm×15 mm×0.1 mm)を用いてDyNi<sub>2</sub>相が優先的に形成する電位である0.5 Vで370分間、定電位電解を行った。白色X線回折測定は定電位電解と同時に開始した。入射ビームの照射エリアは50 μm(高さ)×200 μm(幅)、取り出し角は2θ=5°とした。エネルギー分散型X線検出器(Ge半導体検出器)を用い、0-200 keVの範囲のX線を検出した。検出器前の2つのスリットのサイズは、50 μm×3 mm、50 μm×8 mm(高さ×幅)であった。電極の中央部、溶融塩浴面から1.88、1.94、2.00 mm下の3か所の高さ(z)で繰り返し測定を行った。3か所それぞれのz位置で、1スペクトルあたり2分間の積算を約6分間隔で行った。

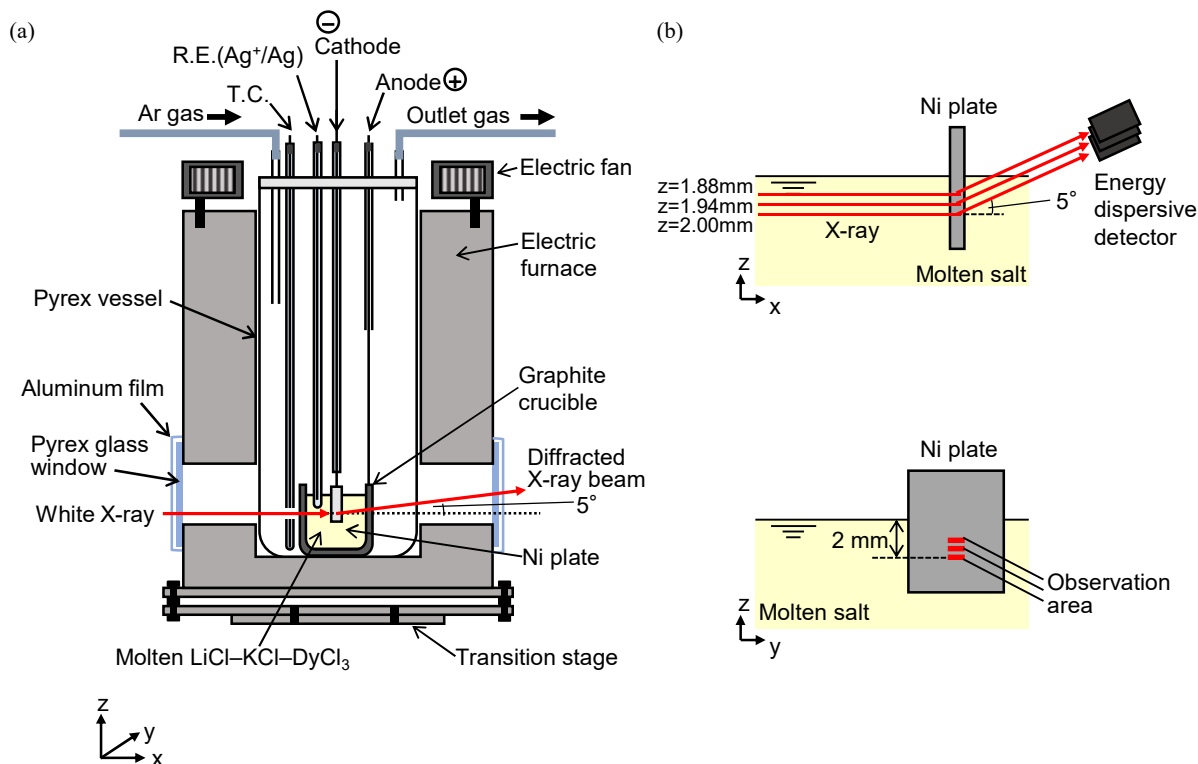


図 4.3.2-39 (a) LiCl-KCl-DyCl<sub>3</sub> 浴 in-situ X 線回折測定に用いた実験装置の模式図  
 (b) Ni 電極とビームパス 上: 側面図 (x-z 平面) 下: 正面図 (y-z 平面)

図 4.3.2-40 に EDXRD スペクトルを示す。回折 X 線ピークの外に、Pb、Ta、Dy の蛍光 X 線ピークが検出された。このうち、Pb の蛍光 X 線ピーク(74.97 ( $K\alpha_1$ ), 72.80( $K\alpha_2$ ), 84.94 ( $K\beta_2$ ), 84.94 ( $K\beta_1$ ), および 87.32( $K\beta_2$ ) keV)と Ta の蛍光 X 線ピーク(57.53 ( $K\alpha_1$ ), 56.28 ( $K\alpha_2$ ), および 65.22 ( $K\beta_1$ ) keV)は、スリットなどのビームライン機器に起因すると考えられる。実際に、これらの蛍光 X 線ピークは、図 4.3.2-40 の一番下に表示している、DyCl<sub>3</sub> 添加後の熔融塩をセットした状態で、Ni 板のない箇所を測定して得られた結果(BG と表示)からも確認された。本測定で得られた全てのスペクトルに対して、想定される化合物のピーク位置と実験データの比較を行い、結晶相の同定を行った。検出されたピークは、Pb と Ta の蛍光ピークを除き、Ni、DyNi<sub>2</sub> の回折ピーク、Dy の蛍光 X 線ピークのいずれかに帰属され、合金化の際に中間生成物として形成される可能性のある DyNi<sub>2</sub> 以外の Dy-Ni 合金や Li-Dy-Ni 合金は確認されなかった。理由として、中間生成物を介さず、DyNi<sub>2</sub> が直接生成した、あるいは、中間生成物は存在したが、結晶性が低かったか存在量が少なかったために検出されなかったことが考えられる。3 か所すべての高さで、電解が終了するまで Ni の回折ピークが残っていた。これは、通電量が十分であったにもかかわらず元の Ni 基板全体が合金化しなかったことを意味している。

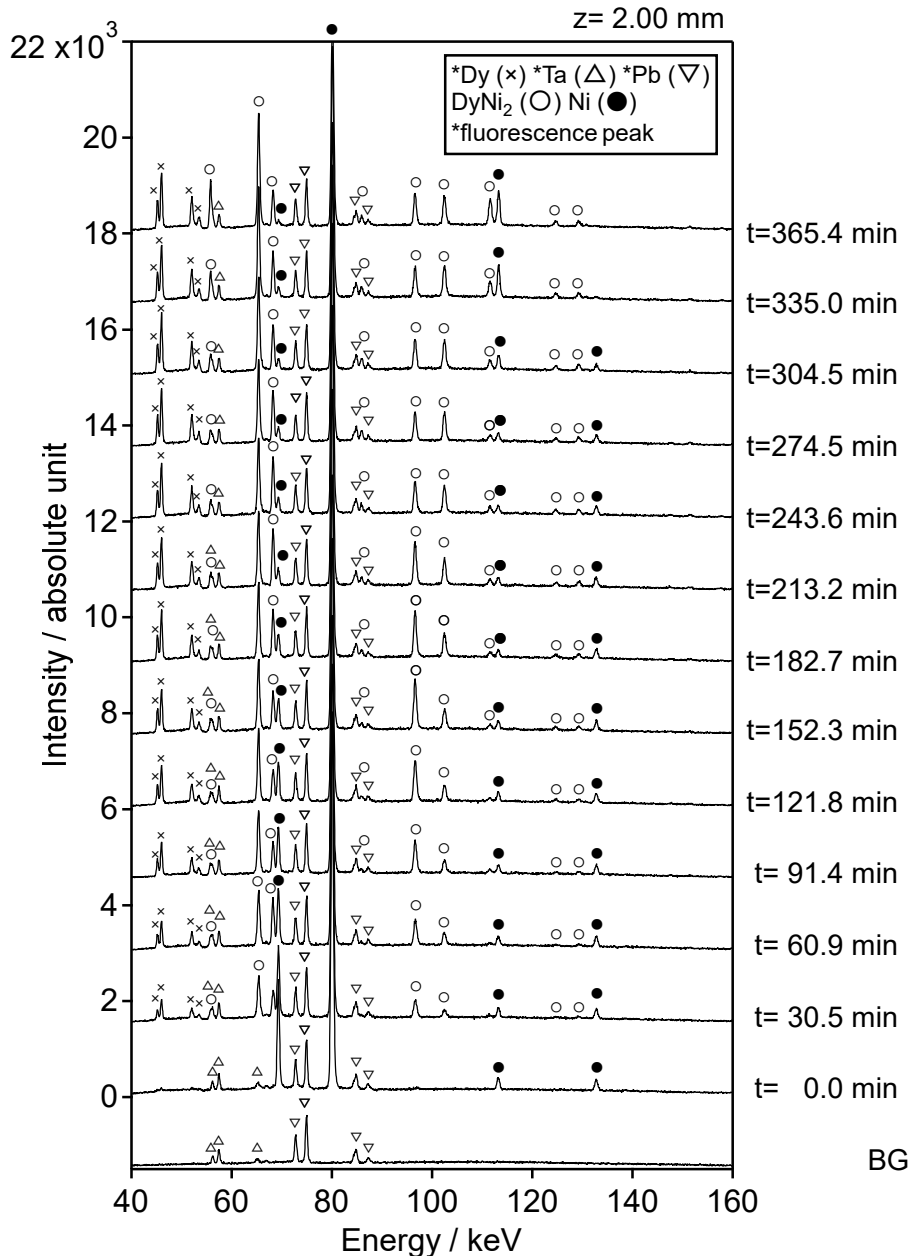


図 4.3.2-40 本測定で得られた in-situ EDXRD スペクトル及びバックグラウンド測定結果

\*は蛍光 X 線ピークを示す

電解中の Ni と DyNi<sub>2</sub> の回折ピーク強度の時間変化を明らかにするため、全スペクトルに対してピークフィッティングを行い、ピーク面積を時間の関数としてプロットした。図 4.3.2-41a-c は、DyNi<sub>2</sub>(113)、DyNi<sub>2</sub>(022)、Ni(111)の回折ピークの面積-時間曲線を、図 4.3.2-41d は、Dy Ka<sub>1</sub> の蛍光 X 線ピークの面積-時間曲線をそれぞれ示す。これらは、他のピークに比べて相対的に強度が高く、代表的な回折線および蛍光 X 線として選択した。図 4.3.2-41a に示すように、DyNi<sub>2</sub>(113)の回折ピークは、z = 2.00 mm と 1.94 mm においては時間とともに概ね増加した。z = 1.88 mm では、ピーク面積は最初に増加し、その後減少した。一方、図 4.3.2-41b に示すように、DyNi<sub>2</sub>(022)の回折ピークのピーク面積は、z = 1.88 mm と 2.00 mm であまり変化しなかったが、z = 1.94 mm では、最初にピーク面積が急激に増加し、その後徐々に減少した。すべての DyNi<sub>2</sub> の回折ピ



ークを解析し、時間変化を調べたところ、 $\text{DyNi}_2$  の回折ピーク面積の合計値はおおむね増加していた。この挙動は、合金化に従い  $\text{DyNi}_2$  の存在量がおおむね増加したこと、測定対象領域に種々の向きの  $\text{DyNi}_2$  の結晶が生成したことを示している。なお、 $\text{DyNi}_2$  の体積は元の Ni の約 2 倍になるため、合金化の進行とともに、測定領域内の結晶の位置が初期状態からずれていった可能性がある。図 4.3.2-41c に示すように、Ni の X 線回折での最強線である Ni(111) のピーク面積は時間と共にほぼ単調に減少していた。一方で、図 4.3.2-41d に示すように、Dy の蛍光 X 線ピークは、時間とともに徐々に増加した。Dy の蛍光 X 線のピーク強度が試料中の Dy 量を表していると仮定すると、蛍光 X 線の挙動から合金層に含まれる Dy の量は 3 か所の測定位置で同様に増加し、同程度であると考えられる。なお、最後の方でピーク面積の増加が緩やかになっていることから、反応の進行に伴い合金形成速度が低下したものと推察され、これは電解中の電流値の時間変化とも一致した。

このように、Dy-Ni 合金化の in-situ 回折測定を実施した結果、合金形成の際に生成すると考えられた Li-Dy-Ni 化合物のような中間生成物や、 $\text{DyNi}_2$  以外の Dy-Ni 合金の回折ピークは得られなかった。これより、Ni から  $\text{DyNi}_2$  が直接生成したことが示唆された。また、Dy の蛍光 X 線強度は単調に増加しており、場所による違いは見られなかった。Dy の蛍光 X 線の結果から、本実験で測定した 3 か所に関しては、場所によらず合金化が均一に進行したこと、反応の進行に伴って合金化速度が低下することが示唆された。

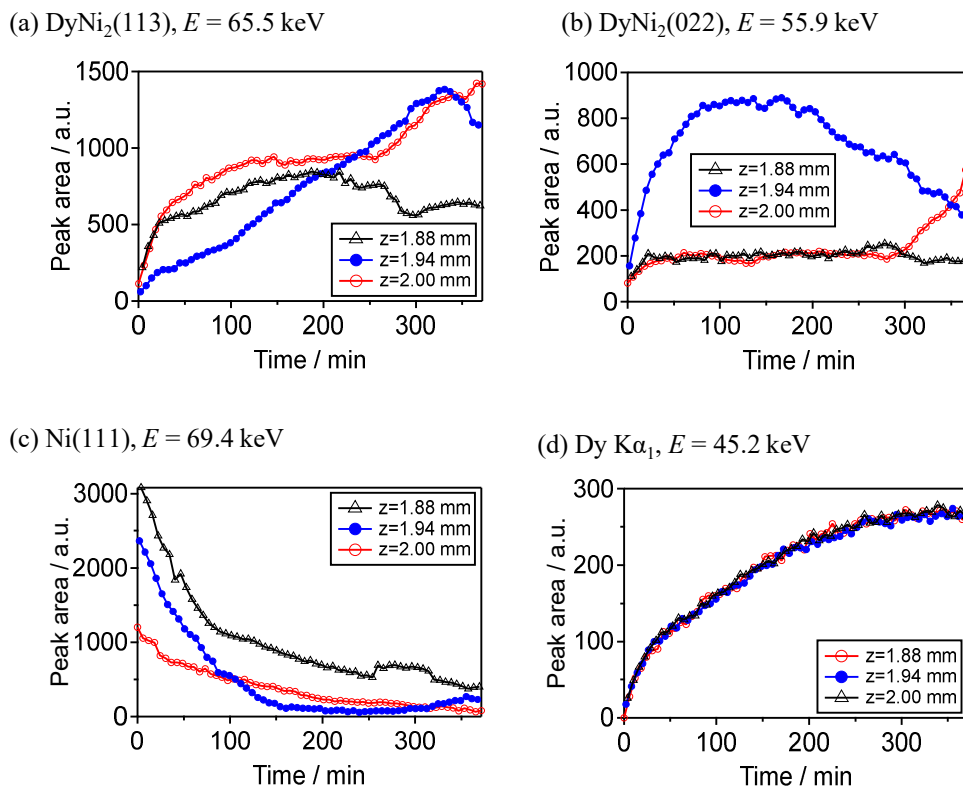


図 4.3.2-41 ピーク面積の経時変化

(a)  $\text{DyNi}_2(113)$ 、(b)  $\text{DyNi}_2(022)$ 、(c) Ni(111)、(d) 蛍光 X 線(Dy  $K\alpha_1$ )

続いて、ネオジム磁石(主相:  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ )の構成成分であるホウ素(B)に関して検討を行った。熔融塩中で、B は  $\text{REB}_6$  や Fe-B 化合物などを形成する可能性があり、浴中に一度混入すると回収物純度や反応効率の低下が危惧される。ここでは、中温塩化物系熔融塩(LiCl-KCl:  $450^\circ\text{C}$ )を用い、この熔融塩中における B の挙動を

調べた。特に、磁石から溶融塩中に B(III)イオンが溶解した場合の Ni 等への影響を検討した。

実験は Ar 雰囲気を保ったグローブボックス付電気炉内で行った。まず、B(III)イオン濃度を 0、0.5、2 mol% になるように  $\text{KBF}_4$  を添加した後、それぞれの濃度でサイクリックボルタンメトリーを行った。Ni 電極を用いて得られたサイクリックボルタモグラム(CV)を図 4.3.2-42 に示す。ここでは、波形の安定した 3 サイクル目の結果を表示している。B(III)イオン無しの場合に 0 V 付近に見られたピーク b と c は、それぞれ Li 金属の析出と溶解に対応していると考えられる。それ以外に目立った電流は確認されなかった。0.5 mol% および 2.0 mol% の B(III)存在下においては、約 1.2 V 付近(ピーク a)でカソードピークが見られた。また、約 1.5 V 付近(ピーク d)に、小さいアノードピークが見られた。ピーク a およびピーク d は、それぞれ B(III)イオンから B(0)への還元、B(0)から B(III)への酸化反応であると考えられる。なお、B(0)から B(III)への酸化電流が小さい理由として、固体ホウ素は一度析出すると安定化し、浴に酸化溶解しにくいことが考えられる。また、ピーク a に加えて 1.8 V 付近に小さいカソードピーク(ピーク e)が確認された。Ni-B の相図において 450°C で安定な Ni-B 化合物が存在するため、このカソード電流は Ni-B 化合物の生成に起因すると考えられる。以上の結果を確認するため、B(III)イオン添加浴で定電位電解を実施し、生成物の同定を行った。

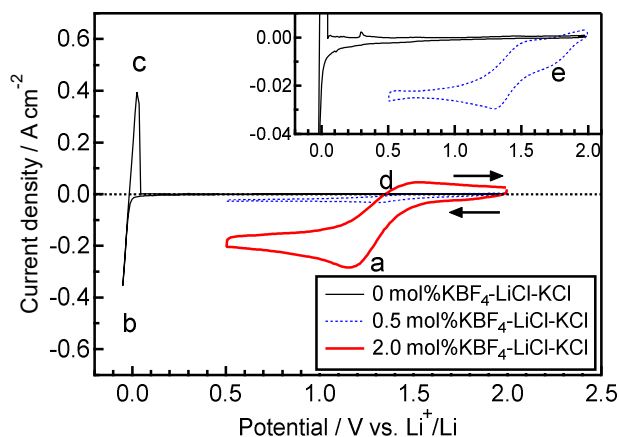

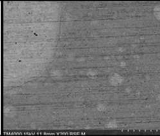
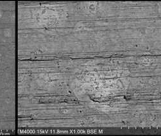

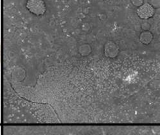
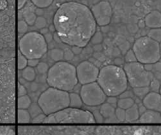

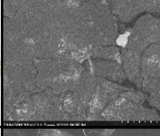
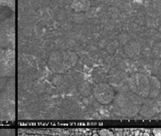

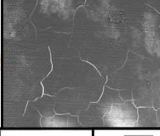
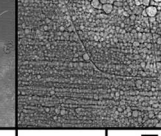




図 4.3.2-42 LiCl-KCl-KBF<sub>4</sub> 浴 Ni 電極を用いて得られたサイクリックボルタモグラム  
走査速度: 100 mV s<sup>-1</sup>。右上挿入図は、0.5 mol% KBF<sub>4</sub> 添加時のグラフの拡大図

B(III)イオン 2 mol% 添加浴で、1.9、1.5、1.3、1.1 V の 4 種類の電位で、Ni 板(5 mm×15 mm×0.1 mm)電極を用いて、1 時間の定電位電解を行った。試料を脱イオン水で洗浄し、乾燥させた後、光学デジタル顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM)での観察を行った。その結果を、定電位電解時の電気量とともに図 4.3.2-43 に示す。1.5 V より卑な電位で得られた試料では、溶融塩に浸漬していた箇所が黒色に変化し、SEM 像から球状の析出物が確認された。一方、1.9 V で得られた試料では、Ni 板の色がわずかに暗い灰色に変化し、SEM 像では目立った析出物は確認されなかった。次に、X 線回折(XRD)による生成物の相の同定を行った。4 試料とも、基板由来の Ni の回折ピークに加え、Ni<sub>2</sub>B に対応する弱い回折ピークが確認された。しかし、1.3 V と 1.1 V の試料では、Ni<sub>2</sub>B に対応する回折ピークの数や強度が少なく、Ni<sub>2</sub>B 形成の根拠とするには不十分であった。また、結晶性の単体ホウ素に該当する XRD ピークも確認されなかった。

電位 (V, Li <sup>+</sup> /Li)	電気量 (C)	Microscope images	SEM(×200)	SEM(×1000)
1.9	-0.8			
1.5	-23			
1.3	-96			
1.1	-103			

  
2 mm

  
100 μm


  
10 μm

図 4.3.2-43 LiCl-KCl-KBF<sub>4</sub> 浴、1.9、1.5、1.3、および 1.1 V (vs. Li<sup>+</sup>/Li)において  
1 時間の定電位電解により得られた試料のマイクロスコープ像および表面 SEM 像

これまでの報告や一般的なホウ化処理を考えると、Ni<sub>2</sub>B は Ni 板表面に存在し、球状の析出物に該当しないことが推測された。そこで、1.1 V の条件でさらに複数の試料を作製し、より詳細な分析を実施した。電析物の化学組成と結晶性を調べるために、STEM/EDX 分析および SAED 分析を行った。走査型透過電子顕微鏡/エネルギー分散型 X 線分光法および制限視野電子回折(STEM/EDX および SAED)による分析を実施した。測定試料は、集束イオンビーム装置(FIB)を使用して電析物を薄片化することで得た。FIB 加工の際には走査型イオン顕微鏡(SIM)により薄片試料の作成位置や厚さなどを確認した。図 4.3.2-44a に電析物の表面 SIM 像を示す。図 4.3.2-44b は、図 4.3.2-44a の黄色線部分から作製した薄片試料の断面 STEM(高角度環状暗視野走査透過型電子顕微鏡、HAADF-STEM)像である。図 4.3.2-44c は、O、F、B、Cl、K、および Ni の EDX マッピング結果である。EDX マッピングの結果、電析物内部において、Ni の濃度が非常に低く、ホウ素が比較的均一に分布していた。また、電析物の表面付近には O 濃度の高い層が見られ、これは電解後の洗浄や空気中での乾燥などの過程で形成されたものと思われる。この結果をもとに、図 4.3.2-45 に示すように電析物の表面付近(図中の Area 1)と、内部(Area 2)の 2 つの領域に分けて EDX の定量分析を行った。表 4.3.2-2 に各領域の EDX 分析結果を示す。Area 1、2 の B 濃度は、それぞれ 74.7 wt%、84.6 wt%であった。O 濃度は Area 1 で 21.7 wt%、Area 2 で 5.9 wt%であった。表面付近の O 濃度は、内部の 4 倍程度に達していた。一方、Ni 濃度は Area 1 で 1.1 wt%、Area 2 で 0.0 wt%と非常に小さかった。このことから、球状の電析物の主成分は単体のホウ素であることが確認された。また、O を除いた場合の純度は、それぞれ 95.4wt%および 89.9wt%であった。続いて電析物の結晶性を調べるため、SAED 分析を行った。同試料、電析物断面の任意の 5 か所を測定した。得られたすべての電子線回折パターンにおいて、非晶質材料に特有のハローリングが観察され、結晶性材料に特徴的な輝点は見られなかった。また、電析物の高分解能 TEM 像からも、原子が無秩序に配列している様子が観察された。以上の結果より、本研究で得られた析出物はアモルファスの単体ホウ素と判断された。

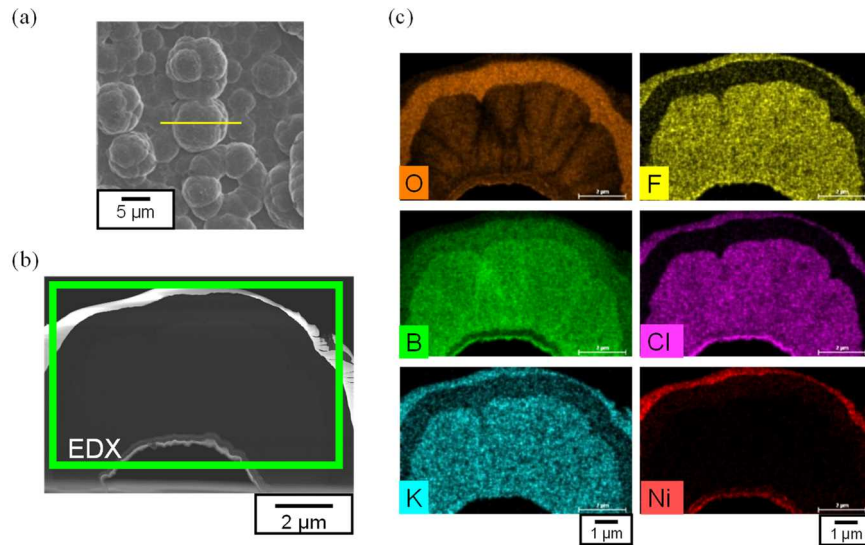


図 4.3.2-44 (a) LiCl-KCl-KBF<sub>4</sub> 浴、1.1 V、1 時間の定電位電解により得られた電析物の表面 SIM 像 (黄色線 : TEM 分析試料作製時の切断箇所)、(b) 断面 HAADF-STEM 像、(c) 同視野における O、F、B、Cl、K、Ni の EDX マッピング結果

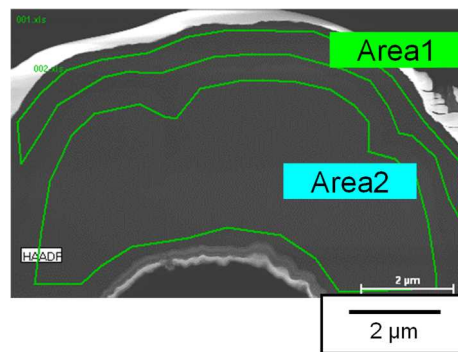


図 4.3.2-45 LiCl-KCl-KBF<sub>4</sub> 浴、1.1 V、1 時間の定電位電解により得られた電析物の断面 HAADF-STEM 像および EDX 分析領域

表 4.3.2-2 電析物の EDX 分析結果(図 4.3.2-45 の Area 1, Area 2)

Element	Area 1 (wt%)	Area 2 (wt%)
Ni	1.1	0.0
B	74.7	84.6
Fe	0.6	0.1
K	1.2	1.9
Cl	0.3	3.2
F	0.4	2.1
O	21.7	5.9
Al	0.2	2.1

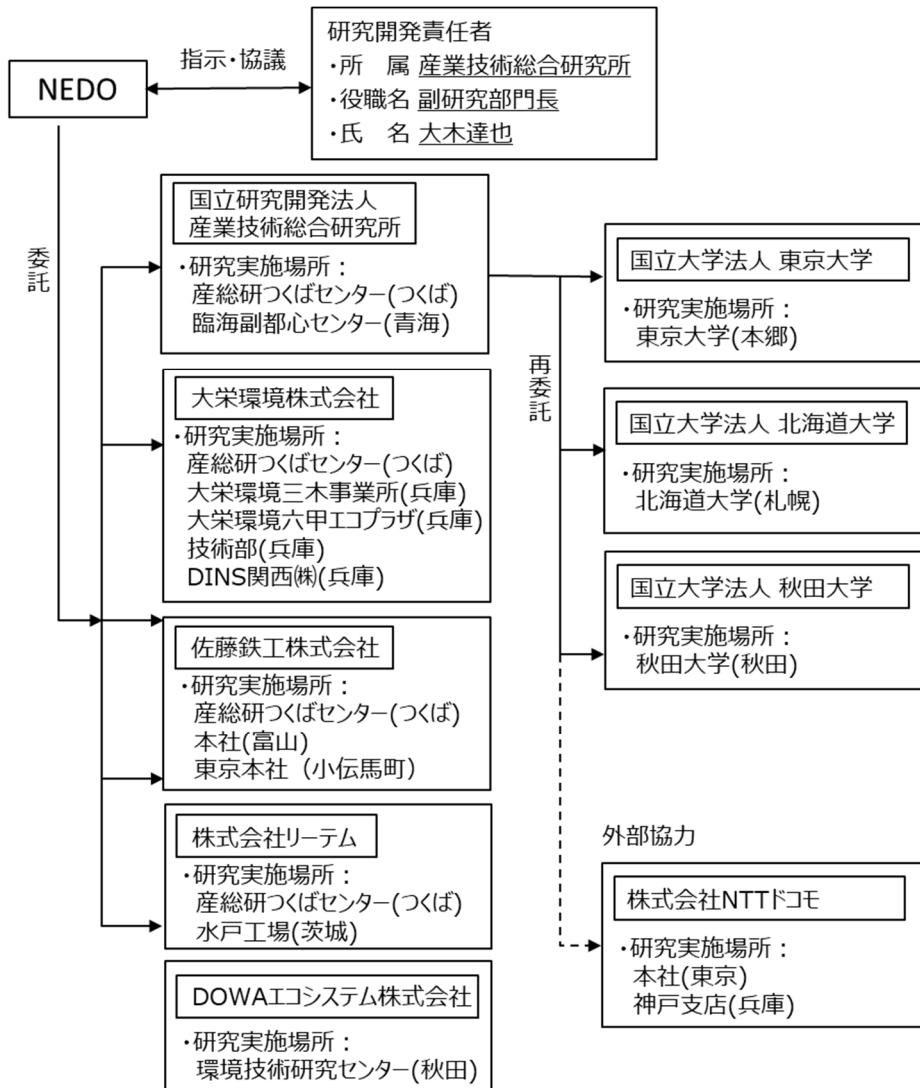
ここまで得られた結果をもとに、本磁石リサイクルプロセスにおけるホウ素の挙動は以下のように想定される。ホウ素は希土類元素に比較して十分貴な元素のため磁石から溶出する可能性は低いが、万一溶け出して溶融塩中に B(III)イオンが存在する場合、B(III)イオンは 1.5 V より卑な電位でアモルファスホウ素として合金隔膜上に析出する。この電位は、Nd または Dy イオンが還元されて Ni と合金化する電位領域である 0.45~0.8 V よりも十分に貴であるため、B(III)イオンが優先的に電析されて隔膜表面が単体ホウ素に覆われ、RE イオンの透過を阻害することが懸念される。あるいは、隔膜材料のホウ化により同様の阻害要因になる危険性もあるといったことが明らかとなった。

これらの検討に加え、塩化物系溶融塩およびフッ化物系溶融塩において Tb の挙動を確認する各種測定を行い、Dy と類似の挙動を確認するとともに、 $DyNi_2$  の形成速度に対する Li イオンの影響を調査した。

以上の他元素への展開を目指して得られた研究成果をもとに、単体ホウ素を溶融塩電解により回収する手法、および重希土類を主な対象とした新規な希土類製錬プロセスを考案し、それぞれ特許出願を行った。

#### 4.4 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」

##### ✓ 実施者名、実施体制



##### ✓ 期間、予算

期間：2021年12月27日～2023年3月31日

予算（単位：億円）

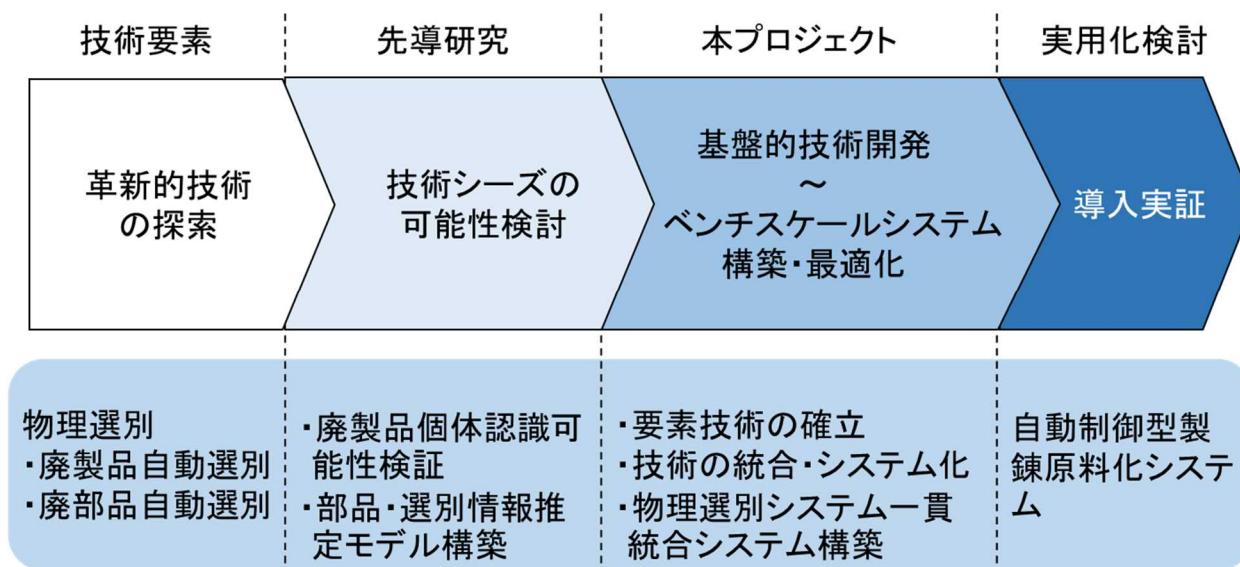
年度	2017	2018	2019	2020	2021	2022	合計
研究開発項目④	—	—	—	—	0.2	2.2	2.4

##### ✓ 実用化への道筋

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。

成果の実用化に向けた戦略として、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(H27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、5

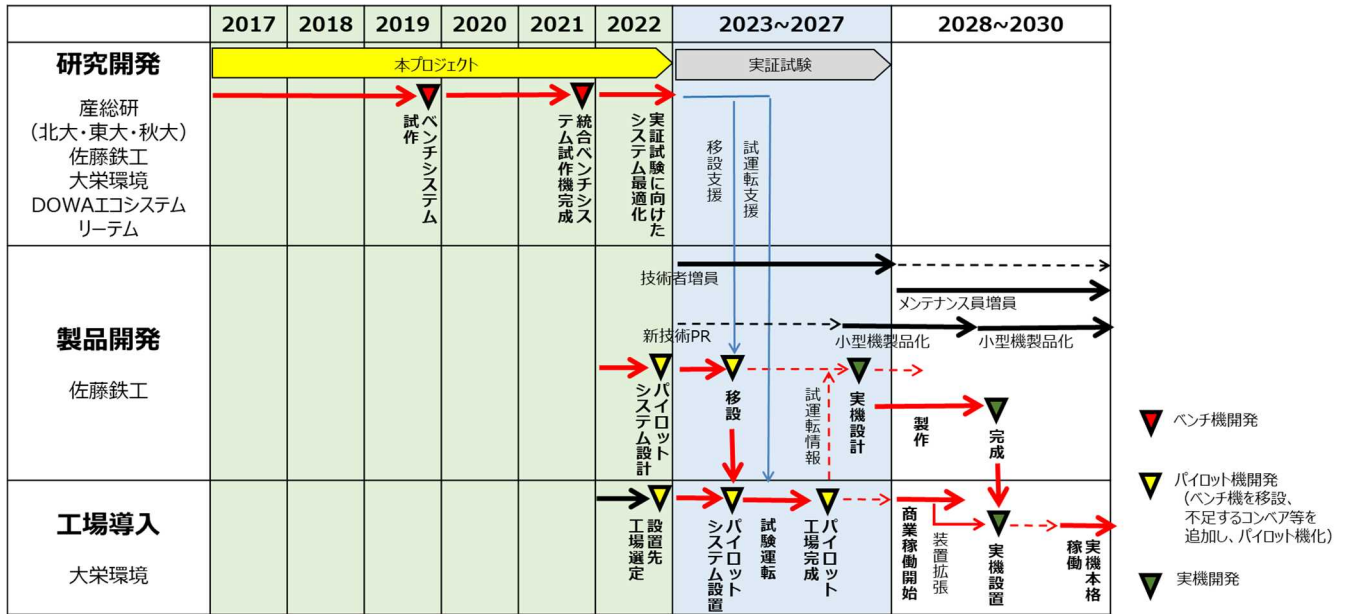
年程度で国内での実用化を図る。その後、白物家電、自動車に技術を水平展開し、アジア等も含む資源循環システム(助成)に拡大する必要がある。



成果の実用化に向けた具体的取組について、一貫統合システムとして開発を進める研究開発項目①②④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が参画し、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①②④終了する2022年末までに、ベンチスケールの試作システムを完成させた。その後1～2年でパイロット機をリサイクル工場内に導入する予定である。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2029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、2026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。現時点では、小型家電の取り扱いがある大栄環境グループのDINS関西株式会社(大阪府堺市)、に候補を絞り、2023年度中にCEDESTシステムを移設し、不足するコンベアなどを増設して、パイロット機化する予定である。このパイロット機を以て2028年には小規模の商業稼働を開始、2029年には佐藤鉄工の実機設計に基づく装置拡張を行い、2030年に実機スケールの商業稼働を開始する予定である。

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5年程度の後継実証事業の採択を目指す。



✓ アウトプット目標の達成状況

研究開発項目④-1

中分類	小分類 (要素技術)	目標と達成状況 (当初計画との差異)
④-1-1. 戦略的鉱物資源 20 種のマテリアルフロー及び製品群 30 種の製品フローの構築	(A) 鉱物資源 (金属)20 種のフロー (都市鉱山ポテンシャル推計)	目標：戦略的鉱物資源 24 種のマテリアルフロー構築し、都市鉱山ポテンシャルを評価 達成状況：○ 計画通り達成
	(B) 製品群 30 種のフロー	目標：製品群 30 種の製品フローを構築 達成状況：○ 計画通り達成
④-1-2. LCA 評価と廃製品リサイクルコスト評価システムの構築	(A) LCA 評価	目標：CEDEST システムの環境負荷低減効果を評価 達成状況：○ 計画通り達成
	(B) 廃製品リサイクルコスト評価システムの構築	目標：廃製品リサイクルコスト評価システムの構築 達成状況：○ 計画通り達成
④-1-3. 将来のリサイクル対象鉱種・製品の選定	-	目標：戦略的鉱物資源に含まれる金属 20 種の都市鉱山ポテンシャルの将来推計を実施し、現在および将来の戦略メタルを提示 達成状況：○ 計画通り達成



## 研究開発項目④-2

中分類	小分類（要素技術）	目標と達成状況（当初計画との差異）
④-2-1. 動脈提供情報に基づく CEDEST システム機能の検証	(A) 模擬連続運転による CEDEST システム機能の検証	目標：1,000 台規模の廃小家電を用いた模擬連続運転試験 達成状況：○ 計画通り達成
	(B) 動脈提供情報レベルに応じた CEDEST システムの稼働性検証（製品ソータ～自動解体）	目標：動脈企業提供情報のレベル(ケース 1,2)に応じて装置稼働性を検証、選別処理フローの構築 達成状況：○ 計画通り達成
	(B) 動脈提供情報レベルに応じた CEDEST システムの稼働性検証（TF 選別システム）	目標：電子素子の情報置き換えによるトランスフォーマブル選別システムへの影響検証 達成状況：○ 計画通り達成
	(C) 製品の情報提供機能搭載の有効性検証（Passive 型 RFID 利用の有効性検証）	目標：スマホ、タブレット 200 機種に対する有効性検証 達成状況：○ 計画通り達成
	(C) 製品の情報提供機能搭載の有効性検証（Passive 型 RFID の製品搭載方法と回収性の検討）	目標：Passive 型 RFID 搭載製品のプロトタイプを試作し、情報読み取り後の RFID タグ回収試験を実施 達成状況：○ 計画通り達成
④-2-2. 動脈提供情報に基づく実証試験・製品化に向けた CEDEST システムの最適化	(A)装置各部の改造と製品データ収集 製品ソータ、自動解体(筐体切断・衝撃力付与型)、自動解体(改良 CFS 型 ～モジュールソータ	目標：装置各部の改造、製品データ収集 達成状況：○ 計画通り達成
	(A) 装置各部の改造と製品データ収集（部品剥離～TF 選別システム）	目標：解体・部品隔離の小型タブレット対応、トランスフォーマブル選別システムの同時並行処理検証、比重選別機の改良 達成状況：○ 計画通り達成
	(B) CEDEST システムの実証試験プランを構築	目標：実証試験に向けた機能最適化検証の完了、実証プラン構築 達成状況：○ 計画通り達成

### ✓ 成果の意義

都市鉱山ポテンシャルと資源リスクを考慮したリサイクル優先鉱種の選定が、マテリアルフロー分析の対象範囲の拡大やエビデンスベースの資源リスク評価手法開発により初めて実現した。廃製品リサイクルコスト評価モデルは、効率的なリサイクルプロセス設計に貢献すると期待できる。LCA は資源安全保障とサステナビリティを両立した資源循環を担保するのに不可欠である。

また、RFID タグを活用したスマートフォンの自動選別、自動解体システムを世界に先駆けて開発した。

さらに、製品変動が著しい小型デジタル家電において、製品変動が選別システムに及ぼす影響を評価することは、将来にわたって選別精度を維持し、システムを長期間使用するためには不可欠である。

## ✓ 副次的成果及び波及効果

スマホやタブレットの筐体固定ネジやリチウムイオン電池位置を検出する「弱点形成制御システム」の成果に対して、近年社会問題になっているリチウムイオン電池による火災事故を防止する観点から、多様な廃製品の内部に残留するリチウムイオン電池の確認手段に利用できないかとの問い合わせがリサイクル事業者から寄せられ、プロジェクト内でも最終年度に研究開発項目④の一部として検討した。

また、人材育成に関して、「SURE コンソーシアム」にて年 3 回のリサイクル技術セミナーを実施。動脈産業事業者、静脈産業事業者、研究者、学生などにリサイクル技術を普及している。さらに、物理選別技術の将来の日本の指導者育成を目的とした「SURE アカデミー」を開講し、2018 年 11 月開講記念公開講座として、NEDO プロの開発概念をベースとした未来志向の技術展開に関する講義を行った。

## ✓ 特許出願数、論文発表数

年度	2017	2018	2019	2020	2021	2022	合計
特許出願数	－	－	－	－	－	0	0
論文発表数	－	－	－	－	－	6	6
学会発表・講演数 <sup>*1</sup>	－	－	－	－	－	12	12
新聞・雑誌等への掲載数 <sup>*1</sup>	－	－	－	－	－	3	3
シンポジウム・セミナー主催 <sup>*1*2</sup>	－	－	－	－	－	3	3

\*1 学会発表・講演、新聞・雑誌等への掲載、シンポジウム・セミナー主催は成果の普及に資する活動である。

\*2 シンポジウムは研究開発項目①②③合同での主催のため、研究開発項目①②③それぞれで計上。

セミナーは研究開発項目①②合同での主催のため、研究開発項目①②それぞれで計上。

## ✓ 研究開発成果の詳細

### (4-1) 高効率な資源循環システム構築に向けたリサイクル技術導入評価

(4-1-1)戦略的鉱物資源 20 種のマテリアルフロー及び製品群 30 種の製品フローの構築

A. 鉱物資源(金属)20 種のフロー(都市鉱山ポテンシャル推計)

#### ■ 目標

高品位小家電を対象とした技術開発を将来的に多種の廃製品に技術拡張することで、より大きな経済効果や資源リスクヘッジ効果が期待できる。同時に、これらの効果を最大化してゆくためには、国内で発生する廃製品にどの金属がどのくらい含まれているかという都市鉱山ポテンシャルを、国レベルで把握することが不可欠である。本項目では、動脈フローにおける製品中の使用状況の解明と静脈フローにおける廃製品中含有量の評価を通じて、20 種の金属それぞれのマテリアルフローを構築し、都市鉱山ポテンシャルの推計を行う。

#### ■ 研究開発の成果

資源循環のフローを定量的に分析する MFA では、対象素材が製品の形で社会に投入される量(投入量)を製品別に把握し、各製品の社会での使用年数を考慮することで廃棄量の時系列推計が可能である。研究開発項

目②「廃部品自動選別技術開発」(2-2)において各金属の用途別消費量データを推計したが、レアメタルを中心とした一部の金属は中間製品までの把握に留まり、社会で使用される最終製品としての使用先への配分が困難な状態にある。また、製品製造に向けた金属出荷量に相当する消費量と投入量は必ずしも一致せず、特に製品の輸出入に伴う金属の流出入(間接輸出入)の影響は大きい。従来の MFA では間接輸出入の分析は自動車のような輸出入台数のデータが整備されている一部の用途に限定されている。このような MFA の障害に対し、本研究開発では以下の手法開発と適用を実施した。

マテリアルフローの把握が中間製品にとどまっているレアメタルとして、例えば鉄鋼の合金元素(マンガン、モリブデン、バナジウム、ニオブ)が挙げられる。これらの金属は消費量のほとんどが鉄鋼生産向けとして把握されているが、自動車や建築物といった最終製品へのフローが明らかでないため、回収対象製品の絞り込みが困難である。そこで、鋼種別・用途別の鉄鋼出荷量情報と鋼種ごとの組成情報を組み合わせた分析により最終製品へのフローの推定を可能とした。このような統計情報等を活用したトップダウン型アプローチと製品組成情報を活用したボトムアップ型アプローチの併用による分析によって、投入量の推計を可能とした。また、経済統計である産業連関表を活用した間接輸出入の推計手法を開発した。日本の産業連関表では経済取引される財が 587 の小項目に分割されており、各項目で表される産業間の取引額が記録されている。加えて、項目ごとに生産額と需要額のデータも入手されており、これはマテリアルフローでの消費量と投入量に対応した構造となっている。そこで、各用途の用途区分各金属の消費用途区分を産業連関表の小項目区分と紐づけ、各小項目の国内生産額および需要額の比率から間接輸出入を推定する手法を開発した。この際、時系列の産業連関表データを適用することで、製品輸出入状況の変化を反映した(表 4.4-1)。これにより、24 種の金属について表 4.4-2 に示す用途区分について国内投入量の時系列データが明らかになった。

表 4.4-1 産業連関表を活用した間接輸出入係数の算定

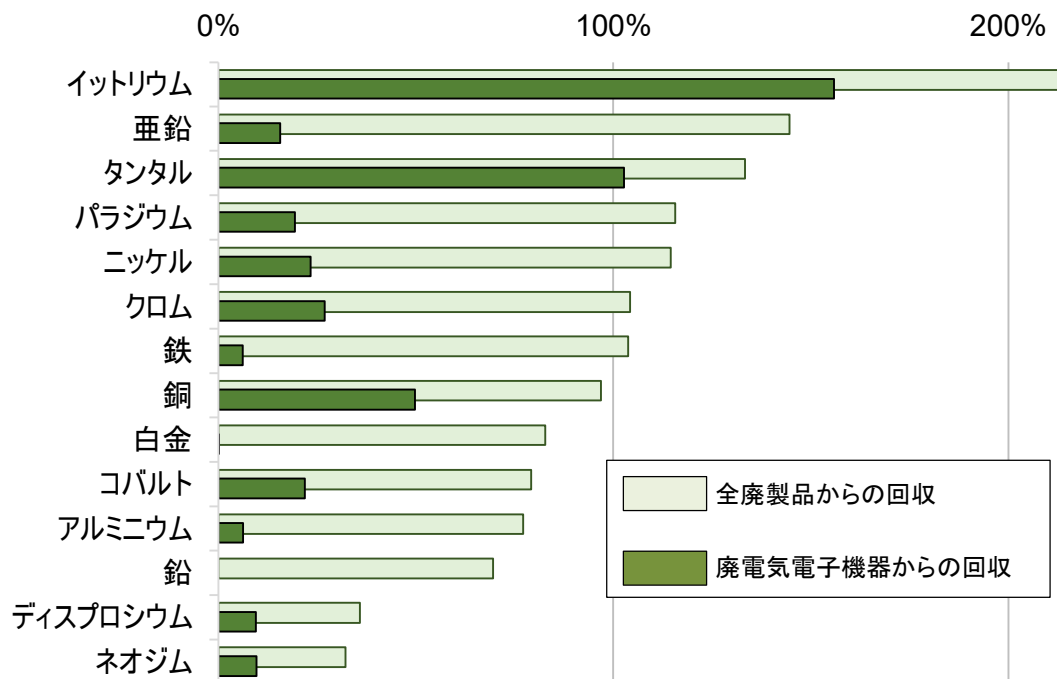
(単位：100万円)

	1995			2005			2015		
	国内需要	国内生産	需要/生産	国内需要	国内生産	需要/生産	国内需要	国内生産	需要/生産
312 原動機	794521	946276	0.840	885197	1105763	0.801	936366	1145269	0.818
322 建設・鉱山機械	1912340	2355741	0.812	1416689	2264821	0.626	1921415	2600180	0.739
355 カメラ	348648	528816	0.659	188708	310396	0.608			
375 民生用エアコンディショナ				891533	889905	1.002	1126972	1086801	1.037
408 航空機	897024	611373	1.467	1613896	958297	1.684	2059469	1566752	1.314

表 4.4-2 マテリアルフロー分析の対象金属と製品用途区分

コバルト	LIB	HEV	インジウム	透明電極	テレビ	ディスプロシウム	HEV	アルミニウム	建築		
		PHEV		ノートPC	自動車		輸送				
		BEV		PCモニタ	エアコン		日用品				
		スマートフォン		その他	洗濯機		産業機械				
		携帯電話スマホ除く		蛍光体	冷蔵庫		電気通信				
		ノートPC		化合物半導体	風力		容器包装				
	タブレット	低融点合金	FA機器	その他							
	ニッケル水素電池	ヘアリング	イットリウム	Zrセラミック	銅	建設					
	特殊鋼	電池材料		安定化材		燃料電池SOFC	インフラ				
	磁性材料	接点材料		その他		電子機器					
超硬工具	歯科用合金	光学ガラス		輸送							
触媒	その他	ニッケル水素電池		蓄電池		自動車					
その他	土木	蛍光灯		その他		その他					
タングステン	超硬工具	ニッケルクロムマンガンモリブデン	建築	鉛	無機薬品						
	線板棒		産業機械		鉛管板						
	接点		電気機械		はんだ・銅合金塊						
	特殊鋼		家庭業務機器		その他						
	触媒		船舶		土木						
	その他		自動車		建築						
タンタル	コンデンサ	アンチモン	酸化Sb	パラジウム	白金	珪鉛	自動車排気ガス浄化用触媒	土	土木		
							ノートPC		難燃剤	建築	
							カメラ		建設	産業機械	
							自動車		その他	電気機械	
							PC周辺機器		ガラス・塗料・触媒	家庭業務機器	
	その他通信機器	金属Sb	蓄電池	船舶							
	その他民生機器	その他	その他	自動車							
	展伸材	ネオジウム	酸化Ti	その他	鉄	すず	マグネシウム	産業機器	はんだ	自動車	
								医療機器		HEV	家電
								その他		自動車	産業機械
塗料・顔料								エアコン		その他	
その他								洗濯機		その他	
プラント	冷蔵庫	その他									
自動車	VCM	その他									
航空宇宙	風力	その他									
建設	FA機器	その他									
医療		その他									
民生品		その他									
その他		その他									

国内投入量の時系列データを用いた MFA により、2020 年までの廃棄量および社会蓄積量を推計した。2020 年時点の廃棄量は約半数の金属に関して国内消費量を超えており、リサイクルの促進による自給率の向上が大きく期待される(図 4.4-1)。特にイットリウム、タンタル、銅は電気電子機器製品が含まれる用途からの廃棄量が大きく、小型家電を主な対象とする本研究開発の貢献が大きいと考えられる。一方で、図 4.4-1 はベースメタル、レアメタルに限らず電気電子機器以外の廃製品に含まれる金属量が大いことを示しており、高効率な資源循環に向けた技術開発を多岐の用途を見据えて拡張する重要性が示されている。本研究開発項目では、幅広い金属を検討対象としたリサイクル対象の選定(開発項目(4-1-3))を可能とするために 20 種もの金属のマテリアルフロー構築が目標とされていたが、目標を上回る 24 種について都市鉱山ポテンシャルの推計を達成した。



※ 一部の金属の推計結果を抜粋

図 4.4-1 各金属の消費量に対する廃棄量の比率(2020 年)

## B. 製品群 30 種のフロー

### ■ 目標

CEDEST システムの将来の技術拡張に向け、製品群の廃棄予測は重要だが、小型家電リサイクル法対象の製品フロー推計はほとんど行われていない。小型家電リサイクル法の対象製品から製品群 30 種を選定し、2010 年から 2030 年まで、各年の年間フロー数量(販売数と使用済み数)とストック数量の推計を実施する。

### ■ 研究開発の成果

小型家電リサイクル法(使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律施行令)ではその第一条で 28 の分類で制度対象品目として定めている。その中で、資源性と分別のしやすさから特にリサイクルすべき品目を、「使用済小型電子機器等の回収に係るガイドライン」(2013 年 3 月)では特定対象品目として指定している。特定対象品目の中で主なもので、また統計情報を取得しやすいものから 30 製品種を取り上げ、2010 年から 2030 年まで各年の販売数、使用済み数、保有数の推計を実施した。以下の 30 製品を推計の対象とした。

固定電話機、ファクシミリ、携帯電話機、BS・CS アンテナ、ビデオカメラ、デジカメ、IC レコーダー、デスクトップ PC、ノート PC、電動工具、電子辞書、電子レンジ、炊飯器、電気ポット、食器洗い乾燥器、トースター、ホットプレート、換気扇、空気清浄器、加湿器、除湿器、扇風機、掃除機、アイロン、電気ストーブ、電気カーペット、電気シェーバー(カミソリ)、電動歯ブラシ、ドライヤー、電子キーボード

推定の方法は、各年の国内出荷数の推移の情報(図 4.4-2-①)と、製品の使用期間の時間分布(図 4.4-2-②)とから、各年の保有数(図 4.4-2-③)および使用済み数(図 4.4-2-④)を推定する。図 4.4-2 に推計の流れを示す。国内出荷数(図 4.4-2-①)は、直近の年までの各種統計情報を参照し、直近から 2030 年までの将来推移については、推定予測があるものは参照して、過去の推移の延長と、各種の市場要因を考慮して推定値とした。製品の使用期間の時間分布(図 4.4-2-②)については、統計情報は存在しないため推定を行った。推定にはいくつかの方法があり、主な方法は、製品ユーザーにアンケート等で調査するものと、もう一つは、使用期間の分布形状を仮定した上で(Weibull 分布等で仮定)、ある時点での保有総数の調査取得を行い、過去の出荷数の推移の情報と合わせて使用期間の時間分布を計算推定するものがある (\*Oguchi M., Daigo I., "Measuring the historical change in the actual lifetimes of consumer durables", Proceedings of Product Lifetimes and the Environment (PLATE), 2017)。両者を実施し、比較検討して使用期間の時間分布推定とした。

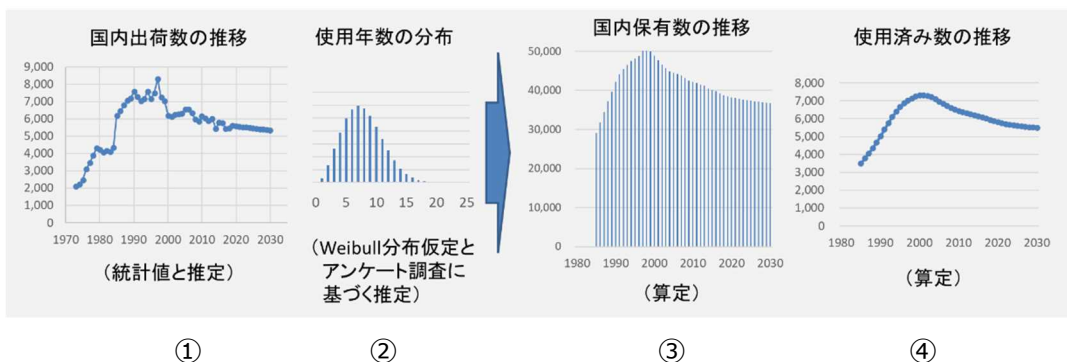


図 4.4-2 ストック数量とフロー数量の推計の流れ

図 4.4-3 に対象 30 製品の 2010 年から 2030 年の使用済み製品の数量の推移の推計結果を示す。増減傾向として、固定電話機やファクシミリ、デジカメ、アイロン、電子キーボード等は減少傾向であり、食器洗い乾燥機や空気清浄機、電動歯ブラシ、ドライヤー等は増加傾向である。数量が多いものとしては、携帯電話機は年間 3 千万台前後が使用済みとなる。PC、電子レンジ、炊飯器、換気扇、扇風機、掃除機、電気シェーバー等が年間それぞれ数百万台使用済みになる。

各製品の平均重量と、有用金属含有量および有用金属の単価が、資料の、中央環境審議会「小型電気電子機器リサイクル制度の在り方について(第一次答申)」(2012.1) と、中央環境審議会・リサイクル部会・小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済み製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会・第 6 回資料(2011.9)における数値と同様であると仮定して、有用金属含有量と金額を算定した。図 4.4-4 に、各製品の 2030 年の使用済み製品数、総重量、有用金属含有重量、金額を示す。30 製品の合計の台数は約 1 億台、重量は 25 万トン、有用金属含有量は 10 万トン、金額は 450 億円である。金額が大きい製品としては、携帯電話機とパソコンが大きく、次いで電子レンジ、炊飯器等が大きい。

当該推計結果は、前項のマテリアルフロー分析にも反映した。

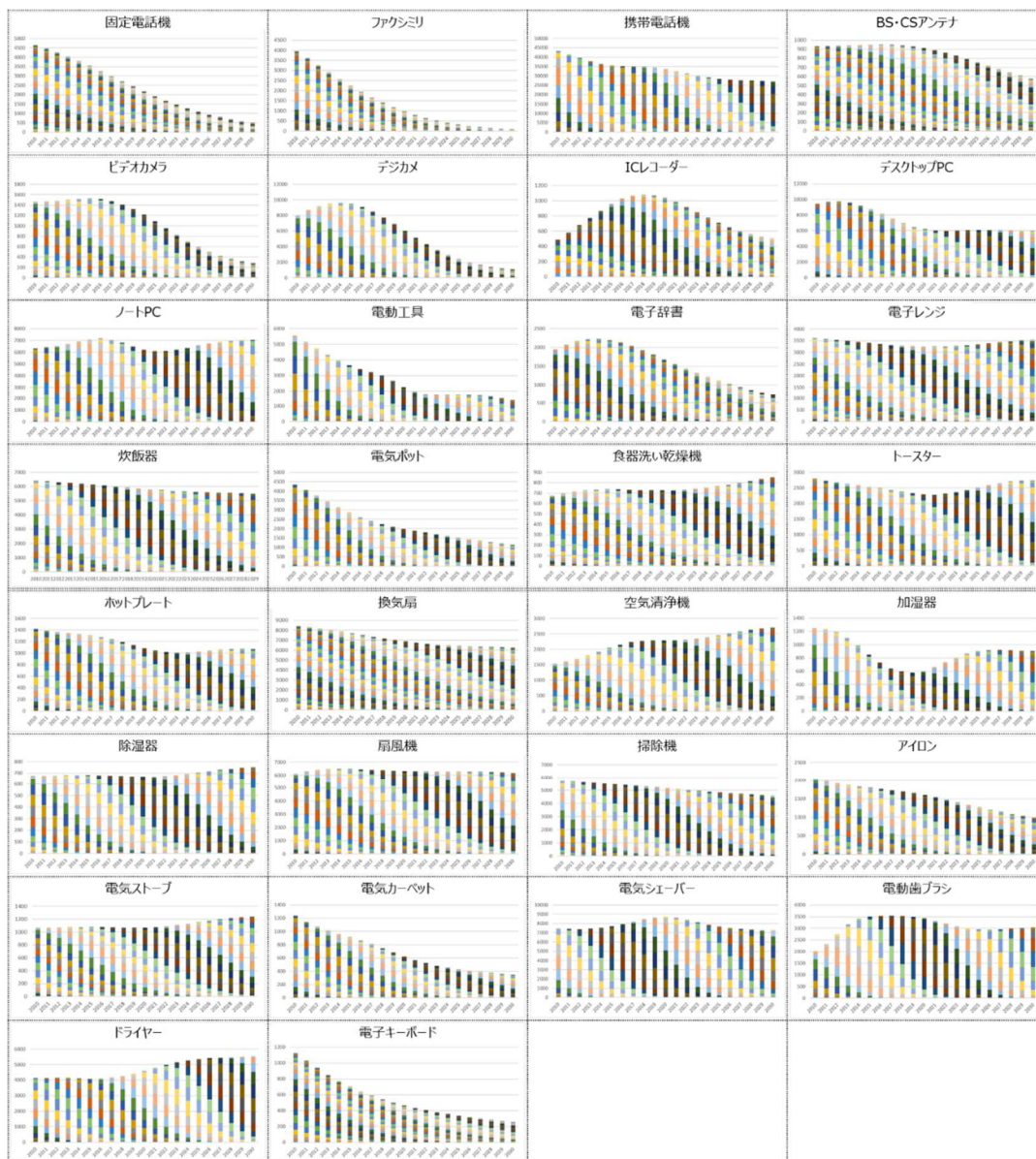


図 4.4-3 30 製品の使用済み数量の推移(2010～2030 年)(縦軸単位:千台)  
(色は出荷の年を表す)

製品	使用済製品 (2030年)			有用金属含有量	
	数 (千台)	重量 (t)	増減重量 (t)	金額	
デスクトップPC	5,960	48,630	24,860	[Bar]	
ノートPC	7,050	14,730	3,110	[Bar]	
携帯電話機	27,230	3,810	1,090	[Bar]	
電子レンジ	3,560	43,490	22,380	[Bar]	
炊飯器	5,490	19,340	6,990	[Bar]	
電気ポット	6,240	16,730	14,050	[Bar]	
食器洗い乾燥器	850	15,660	6,900	[Bar]	
扇風機	6,190	25,560	9,310	[Bar]	
掃除機	4,610	11,610	1,020	[Bar]	
デジカメ	1,090	240	60	[Bar]	
トースター	2,740	5,070	3,960	[Bar]	
電気ストーブ	1,240	2,860	1,340	[Bar]	
電動工具	1,390	2,950	1,560	[Bar]	
空気清浄器	2,710	12,530	830	[Bar]	
除湿器	750	5,650	500	[Bar]	
アイロン	980	1,960	350	[Bar]	
ドライヤー	5,520	2,980	840	[Bar]	
電気シェーバー	7,290	1,380	380	[Bar]	
ビデオカメラ	280	80	20	[Bar]	
固定電話機	480	340	50	[Bar]	
電気ポット	1,140	2,340	1,100	[Bar]	
電子辞書	730	100	4	[Bar]	
BS・CSアンテナ	570	840	740	[Bar]	
電気カーペット	340	1,580	160	[Bar]	
ICレコーダー	500	30	7	[Bar]	
ホットプレート	1,070	4,320	560	[Bar]	
加湿器	910	2,080	250	[Bar]	
ファクシミリ	70	240	60	[Bar]	
電動歯ブラシ	3,040	360	3	[Bar]	
電子キーボード	250	1,150	140	[Bar]	

図 4.4-4 30 製品の 2030 年の使用済み製品数と重量、有用金属含有量

## (4-1-2) LCA 評価と廃製品リサイクルコスト評価システムの構築

### A. LCA 評価

#### ■ 目標

廃製品からの電子素子を回収する CEDEST 一貫処理システムの操業データの収集を行い、スマートフォンやデジカメなどの廃製品の投入から電子素子の分離までの処理に消費される電力エネルギーなどと、リサイクルに係る回収と輸送などの環境影響を接続させたインベントリデータを作成し、天然資源に対する資源循環による環境影響削減効果の LCA 評価を行う。

#### ■ 研究開発の成果

CEDEST 一貫処理システムにおいて、廃製品のスマートフォンの処理に供給される台数と消費される電力などのエネルギー、および選別・回収される素子と廃棄物の排出重量を計測して、プロセスごとの操業データを収集した。図 4.4-5 は、操業データからスマートフォン 1 台あたりの環境影響を、プロセス別に算出したものである。各プロセスの環境影響を積み上げたものが、CEDEST によるスマートフォンの供給から選別までの環境影響である。TF 選別システムは実験設備の最大処理量時に換算している。なお、CEDEST は実験設備であるため、さらに大量の廃製品を一括処理した場合には、処理による環境影響は下がることが予想される。

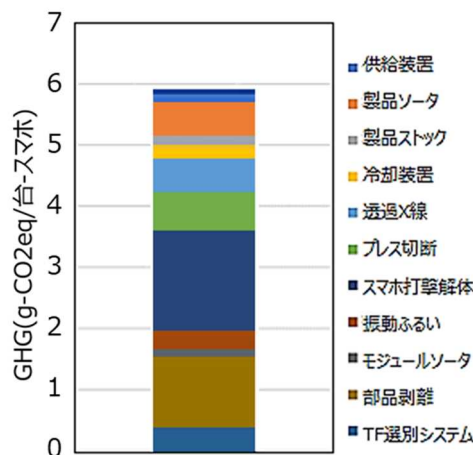


図 4.4-5 スマートフォン処理の環境影響の例

図 4.4-6 は、CEDEST の操業データに、処理前の廃製品のスマートフォン本体および回収された電子素子の輸送による環境影響と、次工程となる製錬プロセスに既存データ(タンタルの製錬を例とした)の環境影響を合算し、廃製品からリサイクルされた金属 1kg と、天然資源からの精鉱を製錬して生産された金属 1kg あたりの環境影響を比較したもので、天然資源からの金属とリサイクルされた金属の環境影響の評価を可能とした。図 4.4-6 では回収された素子に含まれるリサイクル対象金属の品位と組成などを天然資源からの精鉱と同等であると仮定しているが、実際の都市鉱山は天然鉱山に比べて有用金属の含有率が高い一方で、製錬の負担となる忌避元素が含まれる恐れがある。そこで、小型家電等から回収される素子類の金属元素情報を基に製錬工程において優先的に回収される元素や忌避元素を明らかにするとともに、CEDEST 一貫処理が製錬効率に与える改善効果を実際の製錬操業データ等から推定することで、より精細な LCA を可能とした。CEDEST での環境負荷削減のためには、



処理前の廃製品本体の回収と輸送による環境影響が比較的大きいことから、廃製品の輸送距離を短くするために、処理拠点に近い回収拠点の整備などが必要であると考えられる。

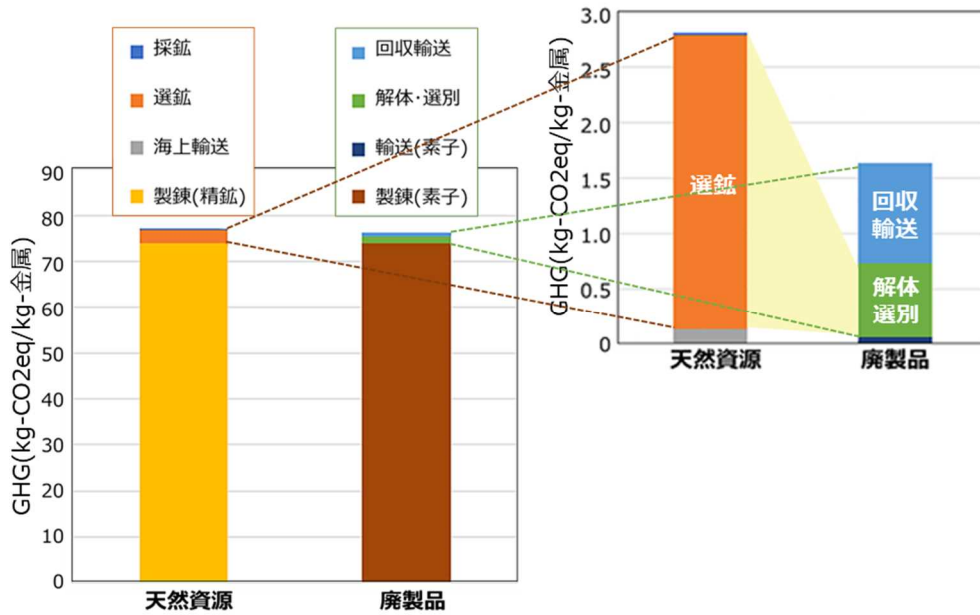


図 4.4-6 天然資源と廃製品リサイクルの環境影響の例

## B. 廃製品リサイクルコスト評価システムの構築

### ■ 目標

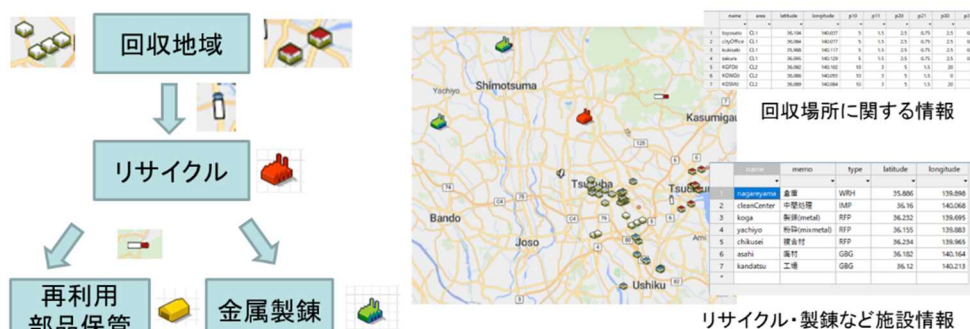
廃小型家電製品のリサイクルの事業性を評価するために、廃小型家電製品のリサイクルに伴う費用とリサイクルの結果として回収された金属などの経済的価値を算出するシステムを構築する。本システムの利用者が、廃製品の回収範囲、施設の立地条件、リサイクル工程に用いられる設備やその運用形態などを設定し、利用者が設計・管理・分析するリサイクル施設を、利用者が柔軟に表現し評価できることを目指す。

### ■ 研究開発の成果

本項目では、廃製品の回収工程から、リサイクル施設での処理工程、リサイクルにより回収された金属の精錬工場などへの搬出工程までを離散事象シミュレーション技術を用いてシミュレートし、これらの工程のコストと経済的価値を算出・評価するシステムを構築した。廃製品リサイクルコスト評価システムの構成を図 4.4-7 に示す。本評価システムの利用者は、工程構成 GUI(Graphic User Interface)を用いて、リサイクル施設を構成する工程を選択できる。また、コスト・価値評価の実施に要する情報は表形式で入力される。コスト・価値評価を行うシミュレータはリサイクル工程シミュレーションとロジスティクスシミュレーションを連携させることで実現させた。コスト・価値評価の結果は、回収された金属量や各工程の稼働率、稼働状況などで視覚化でき、計算後に得られる数値は表形式に整理され出力される。



本評価システムにおける廃小型家電製品のリサイクルコストは、その回収と処理にかかる費用と、リサイクルによって得られる金属類の搬出費用などで構成される。これに対し、廃小型家電製品のリサイクルがもたらす経済的価値は、回収工程で得られた再利用可能な部品や製錬材料などとして利用可能な金属類の価格に基づき算出される。廃小型家電製品の回収に関しては、回収場所および処理設備の位置情報、回収に用いられる車両の台数と積載容量、回収スケジュールなどが設定される。回収地域の人口などに応じて、単位期間あたりに回収される廃小型家電製品の個数が製品種別に定まり、種別に応じてその標準重量、部品構成が定義されている。回収コストは回収用車両の回収頻度、移動距離などに応じてそのコストが算出される。また、回収用車両の減価償却費が考慮される。廃製品リサイクルコスト評価システムは、リサイクル施設の立地や回収エリアを柔軟に考慮できるように、これらの情報を定義したスプレッドシートなどを読み込み、回収量や回収コストの計算に反映する機能を備えている。例えば、図 4.4-8 はつくば近郊に回収場所やリサイクル施設などを試行的に配置した場合を示す。



廃小型家電製品の処理にかかる費用は、処理工程で用いられる設備の減価償却費、土地代などの固定費、そして、人件費や電気代などの処理工程の運用状態に応じて変動する費用が含まれる。処理工程は廃小型家電製品を選別する工程、製品からバッテリーや液晶パネル、基板などの経済的価値の高い再利用可能部品を取り出す解体工程、解体後の部材の破碎工程、破砕片から不要物を除去し電子部品や製錬材料となる金属などを回収する工程で構成される(図 4.4-9)。製品の選別工程や解体工程は人手によるものと、専用機械により自

動化される場合が考えられる。人手の場合には人数と熟練度、自動工程の場合には専用機械の数や仕様などにより工程能力が異なる。処理工程の稼働時間は人の働き方(始業・終業時刻、夜勤や残業の有無、シフト数)などにも依存する。また、電子部品や金属などの回収工程は、回収に用いる機械やその設定方法により、回収物の質や量、回収コストが異なる。廃製品リサイクルコスト評価システムは、このようなリサイクル処理工程の多様性を考慮し、利用者が特定のパラメータの値を柔軟に設定できる機能を備えている。

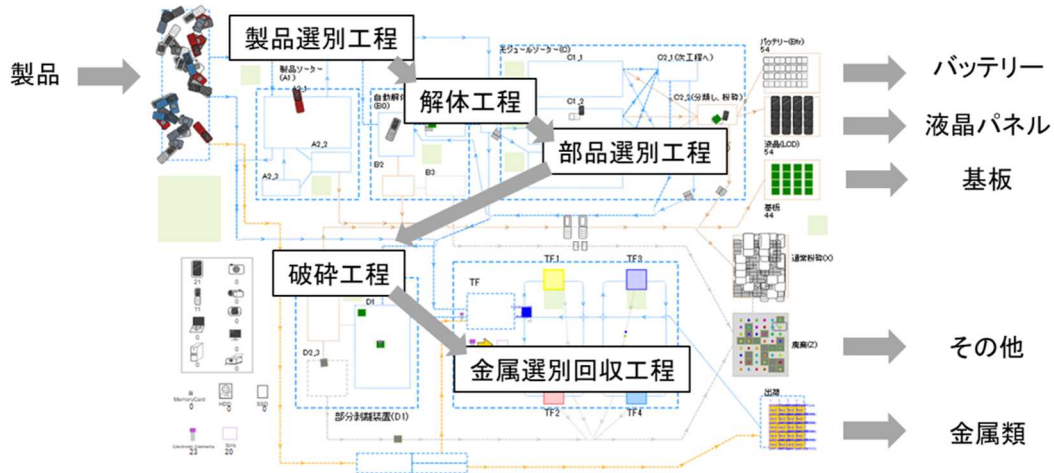


図 4.4-9 リサイクル工程シミュレーション

処理後に得られる再利用可能部品やリ製錬材料となる金属類の搬出費用は、搬出先の位置情報、搬出の頻度や距離、燃料費などにより定まる。また、搬出用車両の減価償却費などが含まれる。

図 4.4-10 に、CEDEST システムによるリサイクル施設が特定の運用形態をとり得ると想定した場合のリサイクルコストと経済的価値を算定した例を示す。年間約 1000 万台の廃小型家電製品を中間処理することを想定し、稼働条件を設定してシミュレーション算定を行った。この運用形態では、自動機械をそれぞれの工程で導入するとともに、金属選別・回収工程ではトランスフォーマブル設備を活用する。この場合、機械の作業(運転)時間が短くなる。回収される金属の質も従来システムより向上(あるいは／また量が増加)するため、回収金属の売却価値は向上する。こうした、評価システム利用者がパラメータ値を設定して算定を実施する評価システムを構築した。

1年間稼働	CEDESTシナリオ
<b>稼働条件</b>	
処理製品数 [台]	10,152,052
のべ人作業時間<工場管理>(h)	11625
装置運転時間(h)	6,908
設備のべ稼働時間(h)	22,229
電力量 (10 <sup>6</sup> kWh)	2.048
<b>コスト評価</b>	
電気代 (百万円)	51.2
人件費 (百万円)	26.9
買取費 (百万円)	2,175.0
輸送費(回収) (百万円)	6.8
輸送費(出荷) (百万円)	8.6
設備費 (百万円)	0.5
減価償却費 (百万円)	6.3
<b>総コスト (百万円)</b>	<b>2,275.2</b>
金属回収量(t)	3,099.1
金属売却価値 (百万円)	5,661.4
<b>収支 (百万円)</b>	<b>3,386.2</b>

図 4.4-10 コスト評価の表示例

### (4-1-3) 将来のリサイクル対象鉱種・製品の選定

#### ■ 目標

資源安全保障の強化を資源循環システムが果たすためには、地質学的、地政学的リスクから社会的リスクまでを幅広く評価して、回収を優先すべき対象鉱種を定めることが重要である。本項目では、日本が輸入する鉱物資源の供給リスク評価手法を開発、リスクを定量化した上、各鉱種の都市鉱山ポテンシャルとの複合的な評価によって、優先して回収すべきリサイクル対象を提示する。

#### ■ 研究開発の成果

リサイクルの優先対象を長期的視野で検討するため、(4-1-1)で対象とした金属の 2050 年までの MFA と資源リスク評価を実施した。MFA の将来分析では、本研究では人口 1 人あたりの蓄積量の将来推移を設定して消費量、廃棄量を推計する手法を主に使用した。これは、金属の社会に対する便益はその生産ではなく蓄積によってもたらされているとの考え方によるものである。(4-1-1)で推計した 2020 年までの人口 1 人当たり蓄積量の推移に対し、その値がロジスティック曲線に従う形で蓄積量の将来推計を用途ごとに実施し、蓄積量の変化から消費量、廃棄量を推計した。ただし、近年の日本では蓄積量が飽和あるいは減少傾向を示す場合も多く、そのような用途は人口 1 人当たり蓄積量が現在の水準から変化しないと設定した。また、技術変化の著しい製品に使用されるレアメタルなどはこの手法が適切とは限らないため、GDP に連動した形での消費量推計を一部用途に適用した。

このような手法は既存の製品を対象とした MFA に有効な一方で、カーボンニュートラル(CN)の実現に向けた低炭素技術の導入が今後大量の金属を需要することが懸念されている。そこで、ベースシナリオとしての将来推計に加えて、カーボンニュートラルシナリオ(CN シナリオ)を想定した MFA を実施した。CN シナリオでは、「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(2021)」で言及されている低炭素技術から、金属消費へ大きな影響を与えると予想される蓄電池、風力発電、太陽光発電、水素燃料電池を対象とした。各技術について、その 2050 年までの導入量を関連する政府戦略等から設定し、単位導入量当たりの金属使用量原単位を乗じることでマテリアルフローを推計した。原単位情報は既存の MFA や LCA の文献から得られるが、値は様々であり分析時期や対象地域も異なっている。従って、本研究開発では既存文献から 450 件以上の原単位情報を整理して平均化した値を採用した。CN シナリオに基づいた MFA の結果、コバルトや銅、ニッケル、白金といった金属について、ベースシナリオに対して 20%以上の金属需要増加が生じると推計された。

鉱物資源の供給リスク評価では、従来のヒューリスティックなリスク要因の選択に加えて、研究開発項目②「廃部品自動選別技術開発」(2-2)で明らかにしたエビデンスベースのリスク要因を考慮した手法の枠組みを開発し、鉱種ごとのリスクを生産量や埋蔵量の集中度や可採年数といった側面から指標化した。集中度は供給国が内包するローカルリスクの大きさを重みづけしたハーフィンダール・ハーシュマン指数(HHI)を用いて評価した。ローカルリスクは、従来手法で用いられてきた既存指標だけでなく、研究開発項目②「廃部品自動選別技術開発」(2-2)で分析した供給障害事例の結果等を活用することで、より高い客観性を具えた算定を実現した(図 4.4-11)。

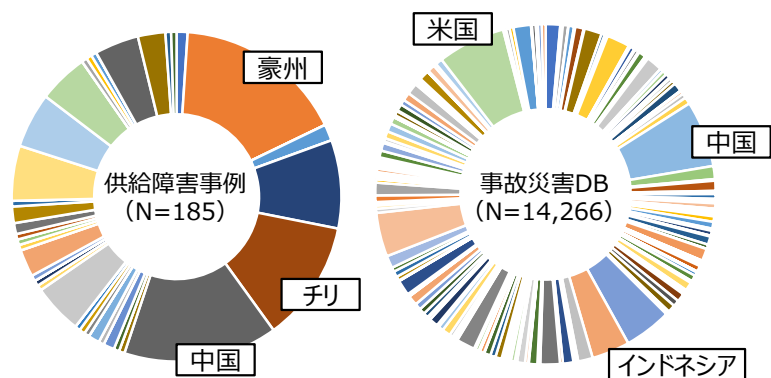


図 4.4-11 新規リスク要因の定量化に向けた事実データの活用(例：自然災害)

MFA を実施した金属を対象とした資源リスク評価の結果、コバルト、インジウム、パラジウム、白金の供給リスクが高く評価された。一方で、リスクの比較的低い金属は鉄、アルミニウム、銅といったベースメタルであった。

これらの MFA および資源リスク評価の結果から、供給リスクと都市鉱山ポテンシャルが高い金属をリサイクルの優先対象金属として提示することが可能となった。2020 年を対象とした評価結果では、パラジウム、プラチナ、コバルト、バナジウム、タンタルなどを優先度の高い金属群とみなすことができる(図 4.4-12)。特にタンタルは電気・電子機器製品からの廃棄が大きな割合を占めるため、本研究の開発技術との親和性が特に高いといえる。

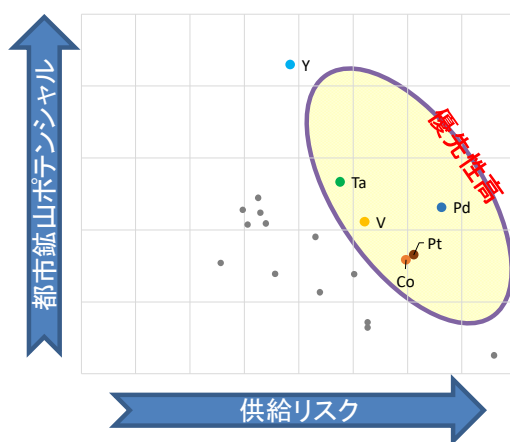


図 4.4-12 都市鉱山ポテンシャルと資源リスクの複合評価によるリサイクル優先対象鉱種の検討

資源リスクが高いものの都市鉱山ポテンシャルが小さい金属については、資源安全保障対策におけるリサイクルの有効性は相対的に低く、海外からの供給の強化によるリスクの低減や材料代替、省資源化が望ましい。一方で、MFA の将来分析では、レアアースの都市鉱山ポテンシャルが増加しており、今後リサイクルにおけるその優先度は上昇する。また、CN シナリオで急速に低炭素技術が導入された場合、コバルトやニッケルといった金属ではリサイクルによって達成可能な自給率が 2030 年前後に一時的に低下するものの、それらが十分に普及した 2050 年には高いポテンシャルを示すような結果が得られた。このように、都市鉱山ポテンシャルと資源リスクの複合評価によりリサイクルの優先度が高い戦略メタルを特定する手法開発を通じて、現在および将来の戦略メタルの選定を達成した。

## (4-2) 動静脈情報連携による CEDEST システム(無人選別システム)導入の検証

### (4-2-1) 動脈提供情報に基づく CEDEST システム機能の検証

#### A. 模擬連続運転による CEDEST システム機能の検証

##### ■ 目標

CEDEST システムを用い、1,000 台規模の廃小家電を用いて模擬連続運転試験を実施する。装置各部におけるワークハンドリングの安定性、処理データの記録、運転制御系の動作検証を行うとともに、要改善箇所の有無を確認する。また、同試験結果を用いて、動脈企業提供可能情報と、提供努力項目の抽出を行うとともに、同システムの機能とその最適運用方法について検証する。

##### ■ 研究開発の成果

(製品ソータ) CEDEST 内で保有する廃製品サンプル(6 品目 1122 台)を用いて、製品ソータ部を構成する単品排出～自動整列～製品識別～自動仕分け・ストックの一連の工程について連続試験を実施した。製品識別では、製品データサーバと製品データ管理システムの動作、RFID タグ記録情報の読取動作についても試験を行った。結果として、ワークハンドリングの安定性、処理データの記録、運転制御系の動作について、特段の問題はないことを確認したが、実用機開発に向けた要改善箇所として以下の点を抽出した。

- 自動整列機構における押出シリンダ部の耐久性改善  
廃製品の長辺が移動方向と平行になるようにベルトコンベヤ幅の中心付近に廃製品を配置するためのロボットシリンダの押出プレートを固定するネジが長時間の連続動作では緩みやすいこと、また、押出荷重を調整するためのばねが外れやすいことが判明した。これらは部品改良により対応可能であると判断した。
- 単品排出機構の高速化  
搬送路改良型ボウルフイーダを連続動作させた際の廃製品の排出速度にはバラツキが生じるが、1000 台規模で平均すると概ね 2 秒/台であった。さらなる高速化が求められる場合は、非対称トレイ搭載型振動フィーダの使用が望ましいが、ボウルフイーダを比較して単品排出の精度が劣るため、自動整列機構や製品識別部の調整が必要となる。
- RFID タグ情報利用の高度化  
現状のシステムでは、RFID タグをスマートフォン等の片面(液晶面)に貼付し、コンベヤのベルト下に内蔵したリーダによりデータ読取を行っている。RFID タグ貼付した面が上を向いた状態では、データ読取ができないため、上下両方向からのデータ読取が可能となるようなシステムが望ましい。RFID タグを用いたスマートフォン等の自動解体における動脈からの提供情報としては、基本的に、個々の廃製品に対する型式情報があればよいが、2D 画像(筐体固定ネジが見えている状態)についてもできれば提供されることが望ましい。また、こうした動脈から提供される情報と静脈が収集する情報(外寸、筐体切込位置など)をマッチングして RFID タグへ書込むとともに、個々の廃製品に自動で貼付する装置・システムが求められる。

(筐体解体) リサイクルプラントで回収されたスマートフォン 1213 台(約 20 種のメーカ)について、弱点形成制御システム(X 線 + AI)、筐体破壊試験装置(プレス切断)、及び筐体解体衝撃力付与試験装置(打撃解体)を接続させたシステムで、解体実験を行った。研究施設のスペース上の制約から、物理的に接続していない装置もあるため、図 4.4-13 に示す通り模擬的な連続運転実験とした。

弱点形成制御システムについては、当初より連続運転上の大きな課題は無く安定して稼働したが、後述する筐

筐体破壊試験装置の稼働が安定するように、弱点形成位置解析アルゴリズムを修正した。具体的には、スマホが大きく変形するような弱点形成を行うと、筐体破壊試験装置における搬送時及びプレス切断時のトラブルが発生しやすいため、解体性と稼働安定性のバランスを考慮した調整を行った。

筐体破壊試験装置については、スマホ搬送時の脱落・詰まり、プレス切断時にシリンダ能力以上の荷重がかかることによる異常停止、スマホ厚み計測時のエラー、弱点形成制御システムからのデータ受信エラー等の課題があった。制御プログラムの改良、厚み計測装置・アルゴリズムの変更を行うとともに、スマホ脱落等の「軽故障」と装置自体の故障に繋がりにかかない「重故障」を区別し、軽故障の際は操作盤のボタン操作により処理を継続できるように改良を行うことで、安定性が向上した。

筐体解体衝撃力付与試験装置については、当初より連続運転上の大きな課題は無かったが、打撃の際にスマホを設置するワーク台に破片が堆積することにより、スマホが打撃されずに脱落する事象が稀に生じた。そのため、打撃のたびに、ワーク台から破片を除去する動きを加えることにより課題は解決された。

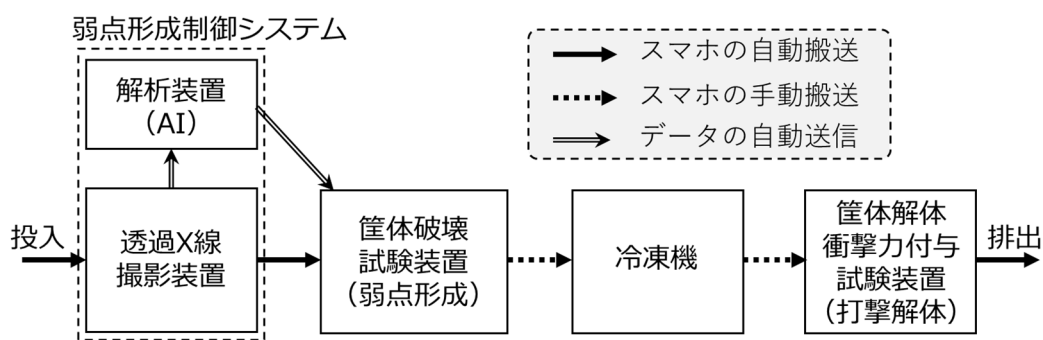


図 4.4-13 スマホ解体の模擬連続運転試験の概要

(改良 CFS) 上記の研究開発項目①「廃製品自動選別技術開発」(1-2) b で特定した、携帯電話とデジタルカメラの電池取り出し筐体破碎(一次解体)と基板取り出し部品破碎(二次解体)の最適条件を用いて、CFS 型解体機で携帯電話 230 台とデジタルカメラ 210 台の破碎を行った。

携帯電話の一次解体では、携帯電話 230 台を 10 台ずつ投入して、23 回の筐体破碎を行った。解体成功率は 100%、電池取り出し成功率は 89.6%、取り出した電池の 100%は変形やへこみが無しまたは軽微であった。二次解体では、一次解体の破碎物を二段振動篩に投入して篩上に選別された未解体物(基板等が含まれる部分)を 10 台ずつ投入して、23 回の部品破碎を行い基板と取り出した。解体成功率は 95.8%、基板単品取り出し成功率は 45.3%、取り出した基板の 77.7%、一次解体で残った電池の取り出し成功率は 100%であった。

デジタルカメラの一次解体では、デジタルカメラ 210 台を 10 台ずつ投入して、21 回の筐体破碎を行った。解体成功率は 94.8%、電池取り出し成功率は 78.6%、取り出した電池の 90.6%は変形やへこみが無しまたは軽微であった。二次解体では、一次解体の破碎物を二段振動篩に投入して篩上に選別された未解体物(基板等が含まれる部分)を 10 台ずつ投入して、23 回の部品破碎を行い基板と取り出した。解体成功率は 70.9%、基板取り出し成功率は 79.6%、一次解体で残った電池の取り出し成功率は 86.7%、であった。



図 4.4-14 CFS 型解体機による一次解体で取り出した電池の例  
 写真左) 携帯電話から取り出した電池の例(投入台数 10 台から電池 10 個)  
 写真右) デジタルカメラから取り出した電池の例(10 台から電池 10 個)

(2 段振動篩) 改良 CFS 型解体機で 1 次解体された携帯電話とデジカメをバッチ毎に 2 段振動篩に連続投入し、連続処理による選別精度への影響を検証した。検証の結果、連続処理した場合でも携帯電話、デジカメ共にバッテリーを 100%選別できることを確認した(デジカメの円筒型バッテリーは対象外)。2 次解体物と筐体破片の混入量についても後段のモジュールソータの選別に支障がない範囲であることを確認した。

(モジュールソータ) 改良 CFS 型解体機による携帯電話とデジカメの破砕物を 2 段振動篩で粗選別して、電池及び基板を濃集させたモジュール部品の混合物(プリント基板、電池、構造材、筐体の破片等)を対象に、電池及びプリント基板の回収を目的とする選別実験を実施した。携帯電話、デジカメ各 20 サンプル(1 サンプルは廃製品 10 台分の CFS 解体物を篩分けしたもの)に対して、1 サンプルあたり 5 回のモジュール選別を繰り返して選別成績を評価した。使用するモジュールソータは深層学習利用型(物体検出型 CNN を搭載)とし、搬送コンベヤ上で個々のモジュールがなるべく重ならないように分散させた状態(振動フィーダと人手作業の併用)で供給した。供給速度は 1 サンプルあたり、30~40 秒程度とした。各選別用途に応じて CNN 学習用データセットと学習条件を最適に設計することにより、電池選別では、個数基準での電池回収率 97%、電池品位 83%、総合分離効率 85%(電池回収率-電池以外の混入率)との結果を得た。プリント基板選別では、重量基準のプリント基板回収率 94%、プリント基板品位 76%、総合分離効率 83%(プリント基板回収率-プリント基板以外の混入率)との結果を得た。課題としては、サンプルの自動供給方法の確立が挙げられるが、今後の実用機開発において、搬送コンベヤ有効幅を現状の 280 mmから 600 mm以上に拡大することで、供給方法の問題は解消に向かうものと考えられる。

(部品剥離) 部品剥離試験装置により、スマホ、フィーチャーフォン、及び小型タブレットから取り出した基板を用いて模擬連続運転試験を実施した。試験では、図 4.4-15 に示す種類・枚数の基板を使用した。B1 は、各種のスマホ・フィーチャーフォンから手解体により取り出した基板である。B2 は、iPhone (4 以降)を自動解体(弱点形成制御システム、筐体破壊試験装置、及び筐体解体衝撃力付与試験装置による解体)した結果、基板と筐体の一部がネジで結合された状態で取り出されたものである。B3 は、小型タブレットから自動解体(筐体解体プレス切断装置[タブレット端末対応型]及び筐体解体衝撃力付与装置[タブレット端末対応型]による解体)、又は手解体により取り出した基板である。

部品剥離試験装置については、当初より安定した連続運転が可能であったが、多数の基板を同時に投入しよう



とすると、投入口付近で詰まる事象が発生した。これについては、基板の投入枚数を一定数以下に制御すれば解決された。具体的に、B1 は 10 枚以下、B2 及び B3 は 5 枚以下になるように、投入枚数を制御することが望ましい。廃製品の処理台数が多い場合は、部品剥離試験装置の前にバッファを配置し、同時投入枚数を制御する必要がある。




名称	概要	基板の例	実験枚数
B1	スマホ・フィーチャーフォン基板		460
B2	iPhone基板		540
B3	小型タブレット基板		180

図 4.4-15 部品剥離の模擬連続運転試験の基板種類と枚数

(TF 選別システム) 部品剥離試験装置により基板から剥離されたスマートフォン由来の電素素子 4.7kg(スマートフォン約 520 台分)を対象に連続運転試験を実施し、良好な選別状況であることを確認した。また、部品剥離試験装置での破碎時に基板が過破碎され、平板状の部品が多くなると、選別産物回収ホッパーで閉塞が生じやすくなる問題を摘出した。この問題に対して、部品剥離試験装置の破碎条件を変更し基板の過破碎を抑制、また、選別産物回収ホッパーに機械的な攪拌機構を設置することで閉塞の解消が可能であることを確認した。

以上、1,000 台規模の廃小家電を用いた模擬連続運転試験による CEDEST システム機能の検証について目標を達成した。

## B. 動脈提供情報レベルに応じた CEDEST システムの稼働性検証(製品ソータ～自動解体)

### ■ 目標

動脈企業提供情報のレベル(ケース 1,2)に応じて、装置の稼働性を検証する(図 4.4-16)。[ケース 1]提供情報/品目情報のみ：スマートフォン・小型タブレットを選別した状態で自動解体装置に投入し、「透過 X 線計測による内部構造判定システム」により計測した電池及び筐体固定ネジの位置情報に基づいて、筐体切断・衝撃力付与を行い解体成功率を評価する。[ケース 2] 提供情報/品目+型式情報(解体情報紐づけ)：スマートフォン・小型タブレットを対象とし、「製品ソータ」～「製品データ管理システム試験ユニット」を経由して、解体情報(電池位置、筐体固定ネジ位置)を受信、筐体切断・衝撃力付与を行い解体成功率を評価する。

また、リチウムイオン電池の破損等による発熱・発火に関して、電池残量経時変化等の影響についても調査する。



図 4.4-16 動脈提供情報レベルに応じた装置稼働性検証(製品ソータ～自動解体)

■ 研究開発の成果

ケース 1：情報提供レベル 品目情報のみ

リサイクルプラントで回収されたスマホ 1213 台について、後述の X 線による内部構造解析により弱点形成位置を計算して、解体実験を行った。実験結果の評価のため、解体状況を以下の 3 つに分類した。すなわち、「解体成功」はバッテリーが筐体などから変形せずに分離した状態、「未解体」はバッテリーが筐体などから分離せず変形もなかった状態、「バッテリー変形」は、解体成功の是非に関わらずバッテリーが変形した状態である。なお、本実験は、実験中の安全性確保のため、予め実電池を模擬電池に置き換えて実施した。実験の結果、合計 1213 台のスマホに対して、解体成功は 1071 台(88.3%)、未解体は 134 台(11.0%)、バッテリー変形は 8 台(0.7%)であった。以上の実験により、レベル 1(品目情報のみ)での装置稼働性を確認した。

ケース 2：情報提供レベル 型式情報(解体情報紐づけ)

動脈側からの情報提供レベルを「型式情報(機種名)」として、これに静脈側が収集した「解体情報」を紐づけるケース想定した検討を実施した。使用する解体情報は、スマホと小型タブレットに貼付した RFID タグに記録した①機種情報、②外寸(縦、横、高さ)、③筐体切込寸法、④冷却必要有無(電池固定情報)、⑤解体面識別とした。製品ソータでの RFID の読取成功率(型番認識精度)100%、解体時のワーク向き(裏表・前後)の区別が可能であることを前提として、ロスのない情報利用がなされた場合の解体性を検討した。

スマートフォン解体の要となるプレス切断解体装置は、これまでの切断試験結果より、液晶面側から弱部を形成することで、解体・搬送成功率が上昇することが確認されている。一方で、スマートフォンなどのワーク向きはランダムであり、筐体向き(液晶面/背面)は変化せず、製品ソータから X 線装置、プレス切断解体装置の順で供給するフローとなっていた。そこで、筐体向きを任意に変更できるワーク反転モジュールを開発するとともに、製品ソータにてスマートフォンの表裏を判定する機能を追加した。これら情報連携について、製品ソータとワーク反転モジュールおよび製品データ管理システムは Ethernet 接続されており、ワーク反転モジュール機内にて、反転指令是非を受信し、

反映できることを確認した。

これまでの CEDEST システムはプレス切断解体装置における切り代の設定は X 線装置と AI を組み合わせた、透過 X 線計測による内部構造判定システムを用いて計測した電池および固定ねじ位置により決められてきたが、ケース 2 では、切り代設定の別のアプローチとして、動脈企業から提供された情報を使用した場合を検討した。情報タグとして、RFID を活用し、製品ソータにて RFID タグを読み、タグの情報を製品データ管理システムへ展開し、同システム内にて情報を変換した後、プレス切断解体装置に書き込めることを確認した。書き込まれた情報は、図 4.4-17 のようにプレス切断解体装置制御盤内でストックされ、対象のワークが供給され次第、登録済みのデータにて処理される。

ケース 1 の X 線手法と RFID による切断情報を比較したところ、切り代に差分が確認された。RFID は筐体解体に必要なねじのみ解体の対象としているのに対し、X 線は筐体固定ねじと基板固定ねじの正確な判別がつかず、電池に近い位置で弱部形成する傾向にあった。X 線手法による弱点形成位置については、RFID により伝送された製品データ管理システムによる弱点形成位置から若干の差異が生じることを確認した。これにより、ケース 1 の X 線手法の解体性・安全性を検証することにより、ケースの 2 の解体性・安全性も評価可能(ケース 1 の結果を下回ることはない)と判断した。

①	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
②	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
③	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
④	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑤	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑥	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑦	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑧	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑨	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑩	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑪	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑫	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑬	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑭	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑮	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑯	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑰	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑱	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑲	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
⑳	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㉑	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㉒	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㉓	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㉔	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㉕	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㉖	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㉗	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㉘	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㉙	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㉚	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㉛	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㉜	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㉝	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㉞	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㉟	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㊱	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㊲	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㊳	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㊴	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㊵	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㊶	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㊷	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㊸	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㊹	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㊺	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㊻	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㊼	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㊽	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㊾	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
㊿	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
1	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
2	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
3	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
4	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
5	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
7	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
8	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
9	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
10	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
11	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
12	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
13	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
14	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
15	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
16	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
17	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
18	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
19	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
20	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
21	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
22	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
23	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
24	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
25	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
26	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
27	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
28	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
29	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
30	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
31	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
32	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
33	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
34	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
35	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
36	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
37	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
38	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6	345.6
39	345.6	345.6	345.6									

### C. 動脈提供情報レベルに応じた CEDEST システムの稼働性検証(TF 選別システム)

#### ■ 目標

製品情報に比べ電子素子情報の変化は遅く、将来的にも、部分的な情報の置き換えで対応可能であると予想される。そこで、先行実施中の研究開発項目②で取得した、独自のデータベースを元に、将来、特定電子素子の含有金属が変更された場合や、電子素子の小型化等により電子素子サイズが小さくなった場合などを想定し、3種類以上の電子素子に対して情報置き換えによる TF 選別システムへの影響を検証する。

#### ■ 研究開発の成果

情報置換の影響検証例として、SAW フィルタのサイズが段階的に小さくなったと想定したシミュレーションを実施した。図 4.4-18 は情報置換前後の SAW フィルタ粒度分布である。青棒が元データ、オレンジ棒が小サイズ化により、分布が1段階細粒にシフトすることを想定した情報書き換え後のデータである。情報書き換え後のデータを使用し、旧情報のままで選別を実施した場合と置換情報も用いて最適選別条件計算システム(AESS)で最適選別条件を再計算した場合の選別結果予測計算を行った(表 4.4-3)。将来、小サイズ化をした SAW フィルタに対して、従来情報に基づいて誤って最適選別条件を計算した結果が表 4.4-3 中央、正しい情報に置き換えて最適選別条件を再計算した結果が表 4.4-3 右である。最適選別条件を再計算した場合の方が、旧情報のまま選別した場合に比べて回収率で 17.8%、分離効率で 12.3%高い。品位については、最適選別条件を再計算した場合の方が 0.5%低くなっている。また、旧来の分離効率 84.8%に対し、再計算しても分離効率 78.7%に留まっている。これらは、試作した TF 選別システムには 1mm 以下の素子を対象とする選別装置を備えておらず、この粒群は便宜上、選別せずに SAW フィルタ回収物として計算したためである。すなわち、再計算によって、選別精度が低下することを示すものではない。従来廃小型家電・選別工程において、1mm 以下の粒子を高度に選別することを想定した工場は見られないが、将来の細粒子化に対応するため、今後はこのような細粒子選別も自動化し、TF 選別システムに組み込むことが必要と考えられる。

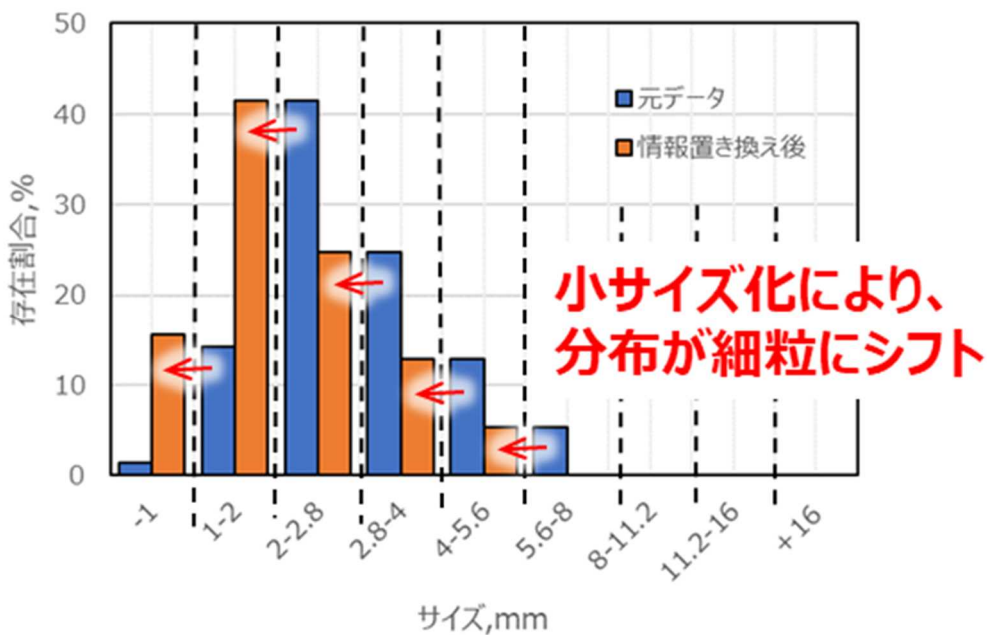


図 4.4-18 情報置換前後の SAW フィルタ粒度分布

表 4.4-3 情報書き換えによる選別結果予値の変化

	旧サイズSAW-F	小サイズSAW-F	
	旧情報	旧情報で最適選別条件を計算	置換情報で最適選別条件を再計算
回収率(%)	<b>95.9</b>	<b>79.5</b>	<b>97.3</b>
品位(%)	<b>0.65→5.19</b>	<b>0.65→3.81</b>	<b>0.65→3.31</b>
分離効率(%)	<b>84.4</b>	<b>66.4</b>	<b>78.7</b>

D. 製品の情報提供機能搭載の有効性検証(Passive 型 RFID 利用の有効性検証)

■ 目標

廃スマートフォン・小型タブレットを対象に、試験的に人手作業で製品名、型式情報(筐体固定情報、電池固定情報)を記録した Passive 型 RFID タグを筐体外面(片面)に貼付した後、CEDEST システムを利用して、記録情報の自動読取精度を検証する。また、解体等に必要な情報提供を動脈企業と検討するとともに、データ書込と RFID タグ貼付作業に要する工数、コストを明らかにするとともに、自動化に適したデータフォーマットを検討し、プラント自動化に及ぼす効果を明らかにする。以上の検証を、廃スマートフォン・小型タブレット 200 機種以上について実施する。

■ 研究開発の成果

人手作業により Passive 型 RFID タグに記録した情報を表 4.4-4 に示す。これらをまとめた 29 桁のデータフォーマット(解体コード)を機種ごとに作成し、RFID タグに書込みを行い、実験用サンプル(スマホ、小型タブレット計 200 台)に、RFID タグを貼付した後(図 4.4-19)、製品ソータの搬送コンベヤに内蔵した RFID リーダの読取機能を利用してデータ読取の精度を検証した。その結果、製品ソータのベルトコンベヤ移動速度 0.25m/s において、98%(196/200)の読取成功率となることを確認した。上述のように、製品データ管理システムを経由して、筐体破壊試験装置に読取データの転送が可能になったことから、製品情報が適切に提供/収集されれば、CEDEST プラントにおいてスマートフォン等の自動解体工程における個体(機種)識別と筐体切込位置を決定する工程を RFID タグ利用で代替することが可能である。

RFID タグへのデータ書込と RFID タグ貼付作業に要する工数について、図 4.4-19 に示すような筐体カバーを取り外して筐体固定ネジの位置が分かる状態の機種ごとの 2D 画像(縮尺一定)が用意されている状態から、人手(1 名)により、外寸、筐体切込位置と寸法を測定、あらかじめリスト化してある他情報と併せて解体コードを作成、RFID タグへコードを書込み、スマホへ貼付するまでの作業に要する時間を計測した結果、200 台分の作業を平均すると 1 台あたり概ね 10~15 分程度となることを確認した。現状の人手作業に要するコストはスマホ 1 台当たりの金属価値を上回っていることから、今後、一連の作業を自動化するシステムの開発が望まれる。

表 4.4-4 Passive 型 RFID タグに記録した製品情報

No.	項目	内容	解体コード桁数
①	機種情報	解体調査で使用するサンプル番号を使用 『製品名』・『メーカー』・『型番』・『発売年』が把握可能	4桁
②	外寸	解体調査で得られた外寸「縦」・「横」・「高さ」を使用	11桁
③	筐体切込寸法	筐体切込寸法調査で得られた4辺寸法を使用	12桁
④	冷却必要有無	冷却工程有無⇒電池接着物固定か否かで判断	1桁
⑤	解体面識別	解体を行う面が、「液晶面」・「液晶反対面」かで判断	1桁



図 4.4-19 Passive 型 RFID タグに記録した解体コードと試験用スマホサンプルの例

以上により、製品の情報提供機能搭載の有効性検証(Passive 型 RFID 利用の有効性検証)について目標を達成した。

#### E. 製品の情報提供機能搭載の有効性検証(Passive 型 RFID の製品搭載方法と回収性の検討)

##### ■ 目標

スマートフォン製造時に予め Passive 型 RFID を搭載、必要情報を書き込むことを想定した検証を行う。書き込み情報としては、CEDEST システム必要情報のほか、VRP(Value-retention processes)への展開を含めた有効性を検証する。一方、このシステムが普及後は、相当数の Passive 型 RFID が利用されることとなり、それ自身の回収・リサイクル性も配慮が必要となる。特に、Passive 型 RFID の回収が CEDEST システムにおける新たな阻害要因とならないよう、熱可塑性接着剤の利用、特定方向の加圧により結合解除可能なスナップフィット等について試験を行い、有望な搭載方法を選定する。

■ 研究開発の成果

Passive 型 RFID の製品搭載による製品回収の概要を図 4.4-22 に示す。本研究は以下 4 つの項目からなる。

- RFID 書込み情報の基本仕様確定  
品目、型番、主要部品の結合方法(製品データベース参照を想定)など RFID への書き込み項目と仕様を検討し、仮決めする。
- 製品への RFID 結合方法  
形状記憶樹脂によるスナップフィットを利用することを想定し、温度特性を調査する。
- RFID 回収プロセス  
RFID 回収の基本プロセスフローを構築する。
- RFID 回収システムの基本設計  
解体方式とシステムの基本設計を完了する。

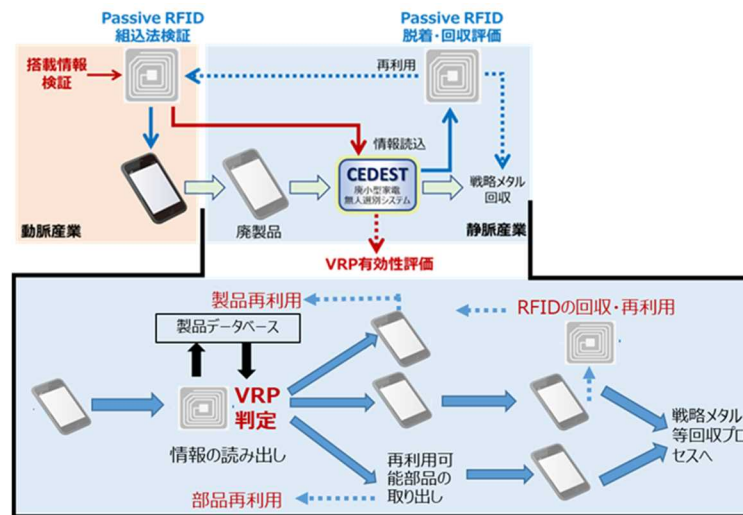


図 4.4-20 Passive 型 RFID の製品搭載方法と回収性

RFID 書込み情報の基本仕様確定について、中間処理フローを図 4.4-21 に示す。

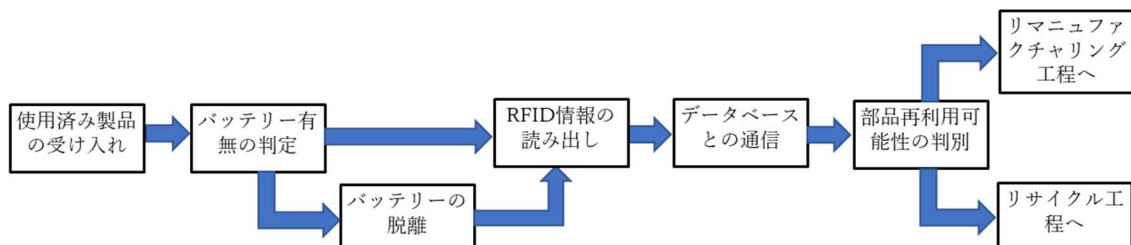


図 4.4-21 想定する中間処理フロー

再利用対象となる部品は市場動向、産業の状況により変化することが想定されるため、部品再利用情報は RFID へは書き込まず、外部データベースを参照する。外部データベース情報は必要に応じて随時更新する。

RFID 側と外部データベースそれぞれの書き込み情報項目を以下表 4.4-5 に示す。また、以下のように、RFID の回収再利用に際して、一部の情報を履歴として残すことにより、製品の使用年数、製品回収率など資源循環の現状把握に資するデータを回収することが可能となる。数年間以上に渡ることが想定される製品使用期間の間、書き込み情報を保持することが必要なため、RFID は図 4.4-22 に示すケーシングタイプを用いた。以上の方法により、パッシブ型 RFID を製品に組み込むことにより動静脈情報連携が可能であり、RFID 書き込み情報を外部データベースと併用することにより部品再利用、材料リサイクルを統合的に進めることが可能である。



図 4.4-22 使用した RFID

表 4.4-5 RFID と外部データベースへの書き込み項目

RFID 側の情報項目	外部データベース側の情報項目
<ul style="list-style-type: none"> <li>機種名・製造年</li> <li>RFID の使用履歴</li> <li>データの読み出しを行う際に使用するコマンド</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>機種名・製造年</li> <li>外見の写真</li> <li>外観模式図</li> <li>再利用可能な部品の有無・部品名・位置・結合方法の種類・数・部品製造会社</li> <li>リサイクル対象金属の有無・位置・量</li> <li>有害物質の有無・位置・結合方法</li> </ul>

次に製品への RFID 結合方法について、本研究項目における RFID の結合には形状記憶ポリマー (Shape Memory Polymer, 以下 SMP) を利用したスナップフィットを用いる。SMP とは成形加工後に力を加え変形しても、ある温度以上に加熱すると元の形状に回復する高分子であり、RFID 締結部に応用することで、熱による自動解体システムを提案する。実用時には押出成形等を用いるが、本研究においては形状の検討、試行錯誤を行う必要があることから、3D プリントを用いて積層した。加熱前のスナップフィット図面を図 4.4-23、加熱後の図面を図 4.4-24、実際の積層品を図 4.4-25 に示す。

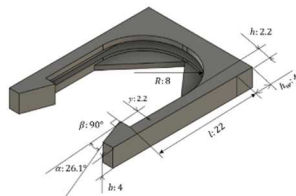


図 4.4-23 加熱前の部材

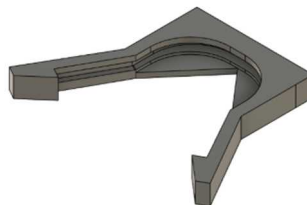


図 4.4-24 加熱後の部材



図 4.4-25 積層造形品

RFID の回収に当たっては、温風加熱後にさらに高圧エアブローを利用して使用済み製品から分離する。温風の吹き出し温度を 75℃程度に設定して加熱することより、スナップフィット部材の爪を当初積層した形状(図 4.4-25)まで開くことができ、分離可能であった。ただし、実用的な短時間で分離するためには、95℃程度の温風で



加熱することが望ましい。図 4.4-26 の例では、RFID の表面温度は 62.5℃程度に達しているが、カタログ値による情報保持温度(120℃)より充分低い。また、加熱回収実験でも書き込み情報が損なわれていないことが確認できた。

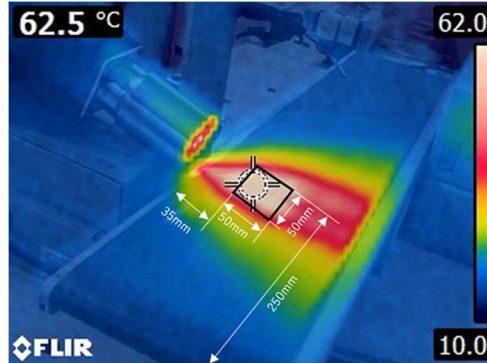


図 4.4-26 SMP 部品の温風加熱状況

また、本研究項目の目的として、情報伝達に使用した RFID を再利用可能な状態で回収することがあげられる。RFID 自体も半導体を含む電子部品であり、リサイクルの対象となること、履歴情報の分析により資源循環の状況を把握できること、の二点があげられる。再利用可能な分離・回収方法として、把持、吸着、エアブローの 3 種類を比較検討した結果、エアブロー方式を採用した。解体性の検討のため、温風の吹き出し温度と SMP スナップフィットが変形し解体が可能になるまでの時間を計測した結果を以下の表 4.4-6 に示す。

表 4.4-6 温風の吹き出し温度と解体時間

温風温度(℃)	55	65	75	85	95
解体までの時間(mm:ss)	04:30	03:28	00:50	00:40	00:29

以上、RFID の製品への組込に形状記憶樹脂によるスナップフィットを適用できること、RFID の再利用可能な回収方法として温風加熱とエアブローによる方式が可能なことを明らかにし、RFID の有望な搭載方法を選定するという目標を達成した。

#### (4-2-2) 動脈提供情報に基づく実証試験・製品化に向けた CEDEST システムの最適化

##### A. 装置各部の改造と製品データ収集(製品ソータ)

###### ■ 目標

情報提供機能を搭載した製品に対する試験に適応させるため、識別プログラムに RFID データの受信機能を追加する。また、スマートフォンの自動解体(筐体切断)において、コンベヤ上での面配置によって(液晶面/背面)で解体性が異なる機種が存在することへ対応するため、識別プログラムにスマートフォンの面判定機能を追加するとともに、筐体反転機能(ワーク反転モジュール)を追加開発する。また、製品種に紐づけされる解体情報を拡充するため、研究開発項目①で取得したスマートフォン・小型タブレットの内部構造情報から筐体固定ネジ位置を抽出する。加えて、冷却要否(接着剤使用の有無)、電池位置等や、製造年の新しい機種を中心に上記以外の製品について元素情報を取得する。また、これに対応して「製品データ管理システム試験ユニット」のデータ管理項目に解体情報を追加し、製品ソータから解体情報を送信可能とする。

## ■ 研究開発の成果

情報提供機能を搭載した製品に対する試験に適應させるため、製品ソータの識別プログラムに RFID データの受信機能を追加し、性能評価実験を実施した。その結果は上述の通りである。スマートフォンの自動解体(筐体切断)において、コンベヤ上での面配置によって(液晶面/背面)で解体性が異なる機種が存在することへ対応するため、識別プログラムにスマートフォンの面及び前後判定機能を追加した(図 4.4-27)。面判定は画像分類、前後判定は画像照合に基づく方式とした。スマートフォン 728 機種(RFID タグの貼付なし)の識別実験により確認した面判定精度は 98%以上、前後判定精度は背面で 95%以上、液晶面で 70~75%となった。液晶面では前後方向の判定が難しいが、RFID タグの貼付位置を前方寄り/後方寄りに統一すれば、前後判定の精度はさらに向上すると思われる。

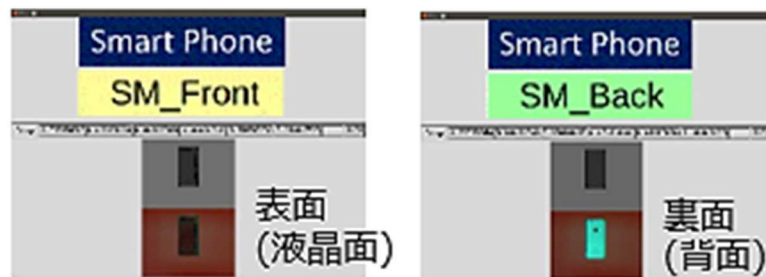


図 4.4-27 製品ソータに追加した画像分類による面判定機能

製品種に紐づけされる解体情報を拡充するため、人手作業により、研究開発項目①で取得したスマートフォン・小型タブレットの内部構造情報から筐体固定ネジ位置を抽出するとともに、冷却要否(接着剤使用の有無)、電池位置等や、製造年の新しい機種を中心に上記以外の製品について元素情報を取得した。

製品データ管理システムは、製品ソータから得られる従来のデータ収集に加え、RFID 情報および表面フラグの取得ができるよう改造した。RFID 情報取得にあたり、RFID タグ付スマートフォンの製品データ収集成功率を上昇させるため、製品ソータ前段の RFID リーダライタ付コンベヤを更新した。RFID リーダライタを大型化することで従来機より検知域が広がり、RFID 情報の検知漏れが少なくなったことを確認した。また、表面フラグについて、コンベヤ上を流れるスマートフォンの表裏を、製品ソータ試験用モジュール内のカメラにて判定する機能を追加した。これらの改造により、製品データ管理システムのデータ監視画面は図 4.4-28 の通りとなり、製品ソータ後段の各種機器へ必要な情報を分解されて送付される。

RFID 情報は、スマートフォン・タブレットに付与され、主にプレス切断解体装置の外寸および筐体切代寸法にあてがわれる。表面フラグは、RFID 情報と同様にプレス切断解体装置にて処理するスマートフォンに付与され、液晶面側から弱部を形成できるようにするために使用する。製品ソータにスマートフォンが供給される液晶面/背面向きはランダムであることから、製品ソータ~プレス切断解体装置間で使用するワーク反転モジュールを開発した。ワーク反転モジュールには製品ソータからすべての表面フラグ付きスマートフォンが供給され、必要なワークのみ液晶面が上になるよう反転される。製品データ管理システムとワーク反転モジュールを Ethernet 接続し、表面フラグを受信し、必要に応じてワーク反転できることを確認した。

No.	項目名	計測値	単位
1	製品番号	375.0	[g]
2	製品体積	226.8	[mm <sup>3</sup> ]
3	製品縦長	326.0	[mm]
4	製品横長	207.0	[mm]
5	製品最大高さ	60.0	[mm]
6	製品種区分	0	
7	製品メーカー名・型番		
8	振分経路	2	
9	タイムスタンプ	2023/01/25 13:00:07.3	
10	処理回数	20	[回]
11	RFID情報	S24114940708081129121...	
12	表面フラグ	1	

図 4.4-28 製品データ管理システム  
(製品ソータ試験用モジュールデータ監視画面 No.11、12 追加)

## B. 装置各部の改造と製品データ収集(自動解体(筐体切断・衝撃力付与型))

### ■ 目標

筐体切断試験機の拡張や制御プログラムの改造等、自動解体装置群の改良を実施し、その稼働性を検証する。一方、製品ソータの固体認証による製品種特定ができないケースを想定し、研究開発項目②で検討した透過 X 線(XRT)の画像認識を進展させ、XRT 像に基づく内部構造判定により、解体制御を可能とするシステムの開発を行い、製品内外の平面寸法、電池格納の有無、筐体切断位置の判定など、既存データベースや、動脈企業提供情報の不足分を補うことを目指す。

### ■ 研究開発の成果

#### a. 筐体破壊試験装置プレス切断解体装置制御改造

プレス切断解体装置は、これまで X 線による解析装置からの情報入力による解体制御を行ってきたが、動脈提供情報に基づく解体制御にも対応することで、より正確な解体を行えることが期待できる。本テーマでは、製品データ管理システムから出力される RFID 情報を受信するための通信ユニットの設置及び PLC ソフト改造により、X 線解析情報を利用した解体モードと、製品ソータからの RFID 情報を利用した解体モードを、任意に切り替える機能を追加した。この改造により、プレス切断解体装置制御盤の操作画面は、図 4.4-29 の通りとなり、自動運転開始前に「X 線」「SA1」のどちらかを押下することで解体モードの選択が可能となった。改造後、試運転を行い、プレス切断解体装置の制御盤が製品ソータで読みとった RFID 情報を受信し、これに基づく解体が可能であることを確認した。

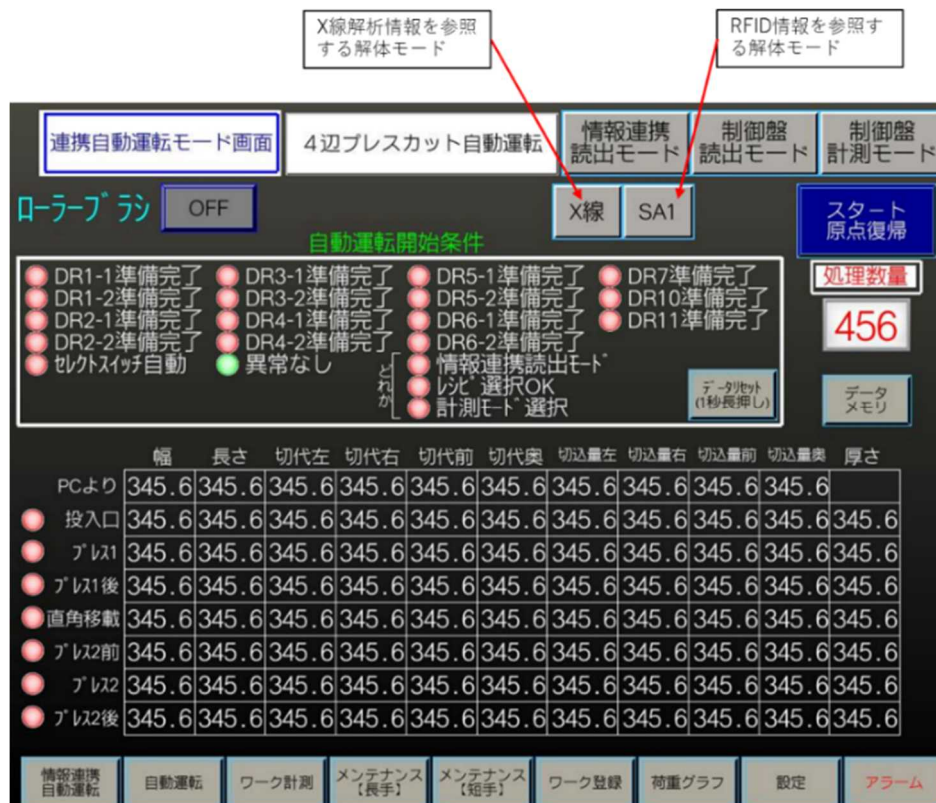


図 4.4-29 プレス切断解体装置制御盤の操作画面

#### b. 装置間データリンクシステムへの情報出力

プレス切断解体装置及び筐体解体衝撃力付と装置について、装置間データリンクシステムへ装置の運転・故障状態の信号を出力する改造を行った。各装置の PLC ソフト改造及び通信ユニット設置により装置間データリンクシステムと Ethernet 接続による情報の伝達が可能となった。

X 線装置としては、2 種類のインライン撮影可能な装置(X1 及び X2)を比較した。両者を比較すると、X1 は X 線出力及び撮影画像の解像度が大きく価格も高いのに対して、X2 は X 線出力及び画像の解像度が小さく価格も低い。X1 及び X2 によるスマホの撮影結果を図 4.4-31 に示すとおり、どちらの装置による撮影でも、バッテリー及びネジを判別可能であることを確認した。リサイクルプラントで回収されたスマホ約 400 機種を、両装置で撮影して、AI 用の教師データに用いる画像を取得した。

AI プログラムは、前処理、深層学習、後処理の 3 プロセスで構成される。前処理では、撮影画像からスマホの部分を取り出し、480×360 画素にスケールを合わせ調整し、白黒反転して、軸長比とコントラストを調整する。深層学習では、公開ネットワークである DeepLab V3+を使用し、準備した教師データのうち 95%で学習させ、残り 5%で制度を検証した。後処理においては、画素単位で物体を識別するセマンティックセグメンテーションモデル (DeepLab V3+)を使用してバッテリーあるいはネジと識別(予測)された領域を次の 2 通りの指標で評価した。表 4.4-7 に、X1 及び X2 で撮影した画像に対する識別精度を Intersection over Union(IoU)と再現率 (Recall)で評価した結果を示す。それぞれ、 $IoU = TP / (TP + FP + FN)$ 、 $Recall = TP / (TP + FN)$ で計算される指標である(TP: true positive、FP: false positive、及び FN: false negative)。ここに、IoUは、0 から 1 までの値を取り、1 に近いほど AI の予測領域が正解領域(実際にバッテリーあるいはネジである領域)に一致している(重なっている)ことを示し、0 に近いほど予測領域が正解領域から外れていることを示す。また、再現率

は、実際にバッテリーあるいはネジである領域(画素数)のうち、AI が正しく予測した領域の割合を示す。バッテリーは誤ってプレス切断しないように、外周まで正確に識別される必要があるため、IoU による評価が適している。一方で、ネジについては、周辺部をプレス切断により破壊してもネジ止めを無効化できるため、Recall の評価が適している。表 4.4-7 から、X1 及び X2 で撮影した画像を比較しても、バッテリー及びネジの識別精度に大きな違いはなく、十分に高精度であることが分かる。従って、将来的な低コストシステム構築のために、X 線出力及び画像の解像度が小さく価格も低い装置を使用できることを確認した。

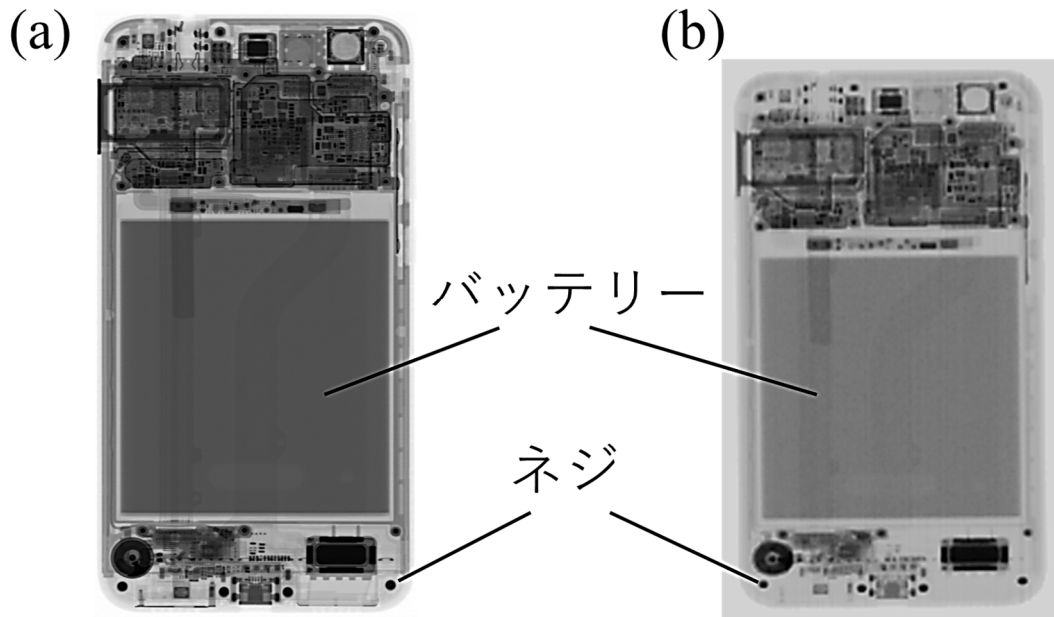


図 4.4-30 スマホの透過 X 線撮影：(a)X 線装置(X1)、(b)X 線装置(X2)

表 4.4-7 スマホのバッテリー及びネジの識別精度

X 線装置	バッテリー		ネジ	
	IoU (-)	Recall (-)	IoU (-)	Recall (-)
X1	0.976	0.996	0.414	0.981
X2	0.970	0.988	0.449	0.996

上記の透過 X 線撮影装置及び AI を搭載した解析装置を接続させた弱点形成制御システムを開発した(図 4.4-31)。図 4.4-31 に示す通り、以下の処理が行われる：スマホを透過 X 線装置に投入すると、自動撮影され、透過 X 線画像が解析装置に送られて、前処理された後に、AI で内部構造分析される。その後弱点形成位置解析アルゴリズムにより、スマホ側面の 4 辺と平行な弱点形成位置が計算される。弱点形成位置解析アルゴリズムは、バッテリーを傷つけないで、かつなるべく多くのネジを無効化するため、バッテリーと筐体外端との間隔( $\Delta$ )、ネジの位置( $\delta$ )、バッテリーとのマージン( $\mu$ )、筐体破壊試験装置の機械機構上の制約( $d_{max}$ )などから、弱点形成位置(D)を計算する(図 4.4-31c)。弱点形成制御システムで決定された弱点形成位置に基づき、筐体破壊試験

装置でスマホに弱点形成がなされる。

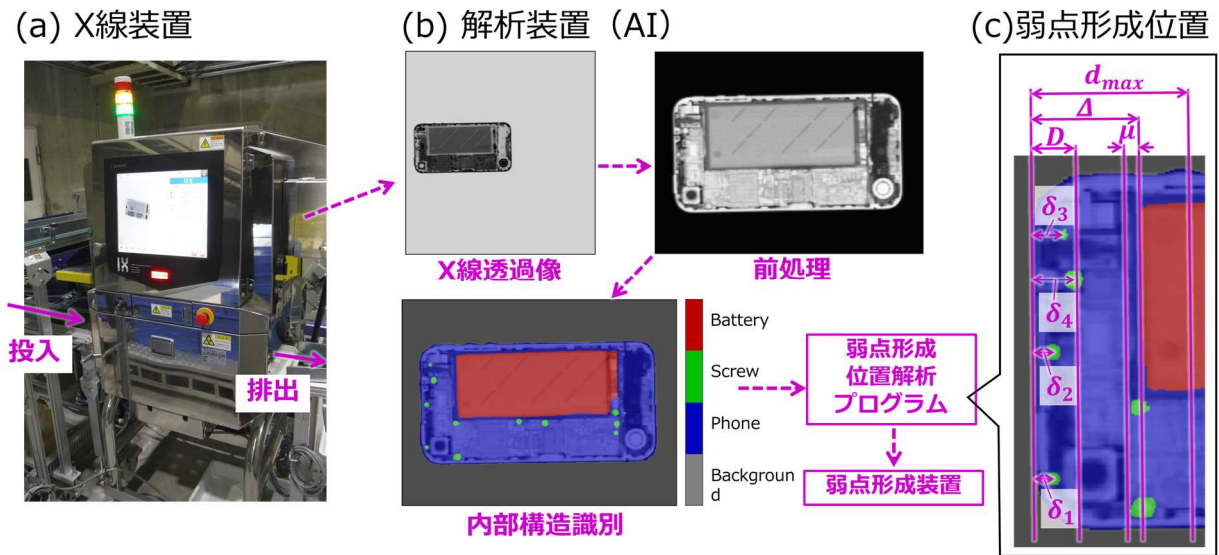


図 4.4-31 弱点形成制御システムの概要：

(a)X 線装置、(b)AI 搭載解析装置、及び(c)弱点形成位置解析アルゴリズム

### C. 装置各部の改造と製品データ収集(自動解体(改良 CFS 型) ～モジュールソータ)

#### ■ 目標

小型タブレットへの品目拡張対応として、2 段スクリーンのスクリーン形状やサイズを最適化する。また、モジュールソータの部品を安定的に分散供給するため、供給機構の改良を実施する。装置間データリンクシステムでモジュールソータの運転・故障状態をリアルタイムで監視するために Ethernet 接続が可能な制御盤を導入する。

#### ■ 研究開発の成果

小型タブレットの解体物に適した 2 段スクリーンのスクリーン形状、サイズを明らかにした。モジュールソータの搬送コンベアのベルト下部に誘導起電力センサーの取付スペースを確保するため、ベルト経路を変更する改造を実施し、コンベヤ搬送と誘導起電力検知が安定して動作することを確認した。AI 画像認識と誘導起電力を併用した識別アルゴリズムにより LIB 選別の精度が向上し、上述の連続模擬運転結果を得た。CEDEST システムの構成機器は装置間データリンクシステムで運転・故障状態をリアルタイムで監視する必要があるが、そのためには各装置との Ethernet 接続による情報の受信が必要となる。既設のモジュールソータ制御盤には Ethernet 接続に必要な通信ユニット設置されておらず、制御盤内の空きスペースの問題から通信ユニットの増設も難しい。そのため、モジュールソータの制御盤を Ethernet ユニット付きの物に更新した。制御盤更新後、装置間データリンクシステムへ運転・故障状態を出力可能であることを確認した。

### D. 装置各部の改造と製品データ収集(部品剥離～TF 選別システム)

#### ■ 目標

部品剥離装置について、これまでに対象としてきたスマートフォン、フィーチャーフォン、デジタルカメラの基板に加えて、小型タブレット基板も対象とするよう装置改良を行う。TF 選別システムについて、各選別機の遊休時間を利

用して、複数の選別工程を同時並行的に稼働させることを想定し、サイズの異なる基板から剥離した電子素子の同時並行処理するためにデータベースを拡充すると共に、複数原料の同時並行処理を高度化する。また、同システムの集塵ダストとして回収される細粒子を対象としたオフラインの補助選別工程として、ダスト中の金属回収性能として銅成分回収率 80%以上を実現する、改良 Knelson 型比重選別機を試作する。

#### ■ 研究開発の成果

研究開発項目②で開発した部品剥離試験装置は、スマートフォン、携帯電話、デジタルカメラなどの基板を対象として設計し、試験にて基板からの部品剥離の有効性を確認できた。しかし、設計段階で対象としていなかった小型タブレットなど、サイズの異なる多様な基板に適応させるには部分的な装置改造が必要となる。本テーマでは小型タブレット基板を試験試料として、基板サイズに応じた改造を行った。まず、基板のサイズアップに伴い、部品剥離機の投入シュートの開口面積を既設の約 3 倍に拡大し、投入コンベヤの機幅も既設の約 1.2 倍にサイズアップした。また、基板 1 枚の重量が増加することから、基板が装置内壁に衝突した際の衝撃力も大きくなることが考えられる。これにより処理中の振動が大きくなることを想定し、耐振動性を向上させるため、部品剥離機本体部の支持構造を変更する改造を行った。改造完了後、負荷試運転を行い、小型タブレット基板の投入が可能であることと、処理時の異常振動がないことを確認した。

小型タブレット基板を対象に、改良した部品剥離試験装置により、部品剥離実験を行った。使用した基板の例を図 4.4-32 に示す。チェーン径及び回転速度を変更させた 9 通りの実験ケースを設定し、1 ケースあたり 5 枚の基板を同時投入する実験を 4 回ずつ繰り返した。部品剥離試験装置の改良により、スマートフォン基板より大きいタブレット基板でも問題なく処理できることを確認し、部品剥離試験装置の小型タブレット基板対応という目標を達成した。

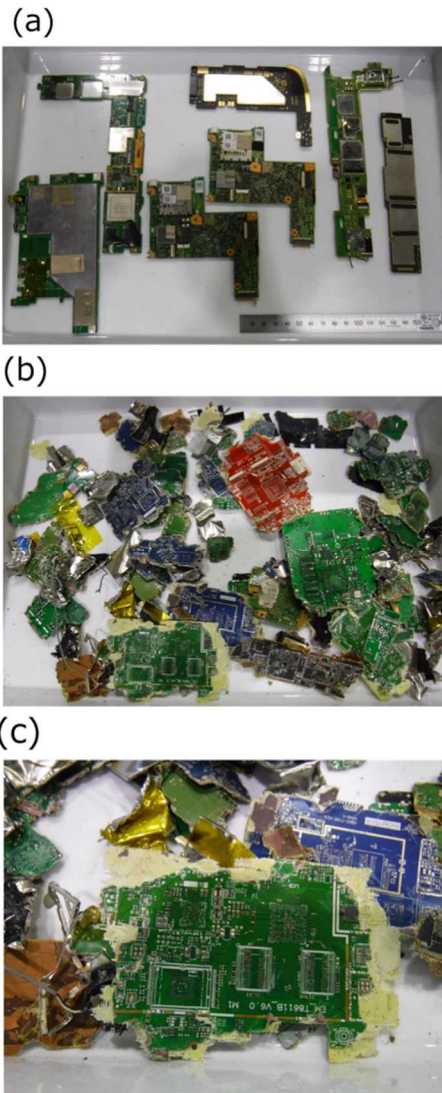


図 4.4-32 小型タブレット基板：(a)破碎前、(b)破碎後、(c)破碎後(近接)

TF 選別システムにおいては、複数原料の同時並行処理を想定して、これまで対象としてきたデジカメ、フィーチャーフォン、スマートフォン由来の電子素子よりサイズが大きい、デスクトップ PC 基板由来の電子素子の選別特性データ拡充を行った。デスクトップ PC 基板由来の電子素子の 0.15T ドラム磁選機、0.30T ドラム磁選機、0.80T ドラム磁選機、渦電流選別機の選別特性データを選別特性 DB に追加し、電子素子選別シミュレータでの選別結果予測計算を可能とした。さらに、同時並行処理に関する工程制御プログラムを高度化し、実際に TF 選別システムを用いた同時並行処理試験を実施した。製品品目、回収対象電子素子、分離効率について、

- ・ スマートフォン由来の電子素子から IC 回収(分離効率:約 90%)
- ・ サーバ由来の電子素子からタンタルコンデンサ回収(分離効率:約 90%)
- ・ デスクトップ PC 基板由来の電子素子からセラミックコンデンサ回収(分離効率:約 90%)

という選別試験結果が得られ、同時並行処理においても選別精度を保った上で工程制御可能であることを確認した。なお、上記の選別工程では各選別原料に対して 1 つの素子を回収対象としたが、開発した制御プログラムでは複数の素子を同時に回収することも可能である。そこで、AESS を活用した複数素子の同時回収シミュレーションを実施した。AESS シミュレーションにて、小型デジタル家電由来の廃電子素子 5 素子を、同時に選別したシミュレ



ーション結果の例を表 4.4-8 に示す。この結果から、複数の素子を TF 選別システムにより分離効率 80%以上で同時回収可能な制御条件を AESS により構築できることを確認した。次に AESS シミュレーションによる制御条件に基づいて、実際に TF 選別システムによって複数素子を同時に回収する試験を実施した(表 4.4-9)。なお、ここでは、信頼性の高い TF 選別結果を得る試料量を確保するため、代用としてデスクトップ PC 基板由来の廃電子素子を用いて試験を行った。回収対象素子はセラミックコンデンサ、タンタルコンデンサ、アルミ電解コンデンサとした。いずれの電子素子も、AESS による計算値に近い分離効率で選別が実現できており、複数素子の同時選別においても、AESS シミュレーションによって高精度に TF 選別システムを自動制御し得ることが確認された。

以上、TF 選別システムにおいて、サイズの異なる基板から剥離した電子素子に関する選別特性データベースの拡充、各選別機の遊休時間を利用した複数の選別工程を同時並行処理するという高度化目標を達成した。

表 4.4-8 AESS シミュレーションで構築した 5 種素子の同時選別シミュレーション結果の例

回収対象	回収率 (%)	品位 (%)	分離効率 (%)
セラコン	86.6	10.9→70.3	<b>82.2</b>
Taコン	96.0	1.1→10.7	<b>87.1</b>
SAWフィルタ	90.3	0.7→ 6.1	<b>81.0</b>
レンズユニット	97.7	5.2→35.4	<b>87.9</b>
振動モータ	99.9	0.9→ 9.1	<b>91.4</b>

表 4.4-9 TF 選別システムによる複数素子同時選別検証

回収対象	分離効率(%)	
	AESS 計算値	TF選別 実験値
セラコン	<b>89.6</b>	<b>88.7</b>
Taコン	<b>88.6</b>	<b>84.7</b>
アルミ電解コンデンサ	<b>96.1</b>	<b>94.2</b>

\* デスクトップ PC 基板素子使用・実験結果

高遠心型湿式比重選別機(Falcon-Knelson 選別機)については、これまでの検討結果から、選別チャンバー内の窪み部分での水流の向きが、選別性能向上の重要なファクターであることが示された。粒子の受ける遠心力に対抗した流れを形成するためには、圧力水の入射角度をチャンバー回転速度に応じて変えることが有効であると判明したが、そのためには回転速度毎に入射角を変えたチャンバーを作製する必要がある。そこで装置改良の設計指針として、窪み内に仕切り板を複数枚導入するなどの改良を検討した。窪み内に仕切り板を導入して水の流れを

観察したところ、圧入水が仕切り板に衝突し、仕切り板間で循環流を形成してしまうことが分かった。そこで、装置自体を改良する機構を発案し、選別チャンバー内の窪み部分の水流をシミュレーションしたところ、従来型では窪みの深さ 1/3 程度の位置で直ちに循環流が発生していたのに対し、気液界面の到達する深さ 2/3 程度まで対抗流が維持できることが推定された(図 4.4-33)。提案構造を有する試作機を作製し、銅とシリカを混合した模擬ダスト粒子の選別試験を実施したところ、現時点で本装置の限界性能を見出すには至っていないが、少なくとも銅成分回収率 80%以上を目標通り達成し得ることを確認した。

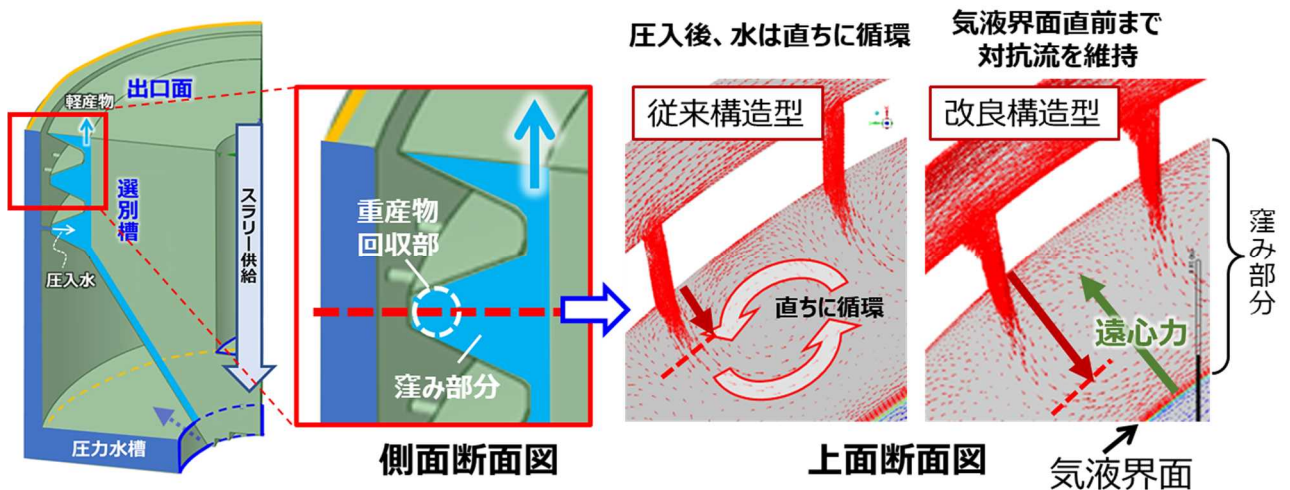


図 4.4-33 選別装置の機構改良による窪み部分の水流速度ベクトル分布の違い

## E. CEDEST システムの実証試験プランを構築

### ■目標

プロジェクト終了後、社会実装に向けた実証試験フェーズへの速やかな展開を可能にするため、実証設備の具体的な「設備配置・処理フロープラン」の構築によるシステム最適化を行う。また、動脈企業と連携を想定した情報提供、試料流通や効果の推定など、研究開発項目④-1「高効率な資源循環システム構築に向けたリサイクル技術導入評価」と連携した基盤技術を構築し、CEDEST システムの実証試験プランを構築する。

### ■研究開発の成果

大栄環境グループの小型デジタル家電を取り扱リサイクルプラントに CEDEST システムを導入することを想定し、各装置の処理量調査、目標処理量に必要な装置設置台数見積もりを行った。さらに、集中研 CEDEST に導入するベンチシステムは、建屋面積の関係から、幾つかの連結部や試料バッファ機能などが省略された形で導入されているが、リサイクルプラントでパイロットプラントして稼働させるために追加で必要となる装置を洗い出し、具体的な実証設備プラン(設備配置・処理フロープラン)を作成した。また、実証試験において、動脈から提供される情報の種類、内容に応じて項目④-1 で開発したシステムによる分析結果を一部プラント運用に活用する可能性を検証できるよう CEDEST システムの実証試験プランを構築し(表 4.4-10)、目標を計画通りに達成した。

表 4.4-10 CEDEST システム試験の試験項目

試験項目	評価者	内容
処理能力	リサイクル事業者 /プラントメーカー	商業稼働を想定した処理能力*に関する検証 *例えば1日の連続運転(プラントの操業時間8時間、メンテナンス調整を考慮し7時間運転)を想定
収益性	リサイクル事業者	CEDESTシステムの選別産別サンプルを分析評価(製錬事業者、または自社での金属組成分析)した上で、現状の選別コストや選別産物売却益と比較して収益性を評価
安定性	リサイクル事業者 /プラントメーカー	連続運転時のトラブル発生頻度、トラブル事象および対処方法を検証
作業性・メンテナンス性	リサイクル事業者 /プラントメーカー	CEDESTシステムのメンテナンス頻度やメンテナンス時間、プラント運用に関する人件費を評価
安全性	リサイクル事業者	LIBによる発火の有無などシステムの安全性を評価
耐久性	プラントメーカー	消耗品(破砕機のチェーンや刃)の摩耗状況、交換頻度を検証
操作性	プラントメーカー	システム全体での装置制御の連携やシステム制御端末の操作性を検証
拡張性・汎用性	リサイクル事業者 /プラントメーカー /産総研	受け入れ品目や処理対象物の拡張、システム構成装置の部分利用などシステムの利用範囲の拡大について検証
製品情報	リサイクル事業者 /プラントメーカー /産総研	製品情報が動脈企業から提供された場合の製品認識精度の向上効果、工程削減によるコスト削減効果について検証
コスト評価システム	リサイクル事業者 /産総研	CEDESTシステムでの選別工程、選別対象物を変更した場合の処理コストをシミュレーションし、変更前後の収益を比較評価



## 「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」基本計画

環境部

## 1. 事業の目的・目標・内容

## (1) 事業の目的

## ①政策的な重要性

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(以下「動静脈連携」という)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。

※動脈産業: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

静脈産業: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諸産業

## ②我が国の状況

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。

## ③世界の取組状況

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(Circular Economy:CE)パッケージを打ち出している。EU は、EU 域外の資源産出国に供給依存する天然資源に替わり、EU 域内で完結する循環資源利用の社会を目指し、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りたいと考えている。これはバージン資源使用製品に対して、リサイクル資源使用製品の競争力を強化するということを意味している。EU は 2015 年 12 月、「CE Package」更新版を発表し、5 つの特に注力が必要なマテリアルのひとつとして希少金属を選定した。翌 2016 年には、e-waste や電池など循環資源利用が望まれる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・プラクティスの取りまとめを計画するなど、積極的な姿勢を示している。

#### ④本事業のねらい

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。

### (2) 事業の目標

#### 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目途をたてる。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

2020 年度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。

### ③アウトカム目標達成に向けての取組

本事業にて基盤的技術を確立させた後、実プラントを想定した実証事業を実施する予定。これにより開発したシステムの実用化を促進し、動静脈連携を図りながら、都市鉱山からの金属再資源化を推進する。

## (3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙1の研究開発計画及び別紙

2の研究開発スケジュールに基づき研究開発を実施する。

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. 研究開発の実施方式

### (1) 事業の実施体制

プロジェクトマネージャー(以下「PM」という)にNEDO 環境部 今西 大介を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理や、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。

NEDOは公募により研究開発実施者を選定する。

研究開発実施者は、企業、大学、公的機関等の研究機関等(以下「団体」という。)のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとする。



なお、各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDOは研究開発責任者(プロジェクトリーダー)を選定し、各実施者はプロジェクトリーダーの下で研究開発を実施する。

## (2) 研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理、執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

### ① 研究開発の進捗把握・管理

PMは、プロジェクトリーダーや研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、外部有識者で構成する技術検討委員会を組織し、技術的評価を受け、研究開発内容の前倒し等の検討、アウトカム目標の前倒し達成に向けた取組の検討、目標達成の見通しの把握等を実施する。

### ② 技術分野における動向の把握・分析

PMは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査の効率化の観点から、必要に応じて本プロジェクトにおいて委託事業として実施する。

## (3) その他

本プロジェクトは非連続ナショナルプロジェクトとして取扱う。

## 3. 研究開発の実施期間

2017年度から2022年度までの6年間とする。

## 4. 事業の評価に関する事項

NEDOは技術評価実施規程に基づき、技術的及び政策的観点から研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。

評価の時期は、中間評価を2019年度、事後評価を2023年度とし、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じて研究開発の加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。

## 5. その他重要事項

### (1) 研究開発成果の取扱い

#### ① 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

研究開発実施者は、研究成果を広範に普及するよう努めるものとする。NEDOは、研究

開発実施者による研究成果の広範な普及を促進する。

②標準化施策等との連携

NEDO及び研究開発実施者は、得られた研究開発成果を活用して、評価手法の提案やデータの提供等の標準化を推進する活動を必要に応じて実施する。

③知的財産権の帰属、管理等取扱い

研究開発成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、全て委託先に帰属させることとする。

④知財マネジメントに係る運用

「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

(2)「プロジェクト基本計画」の見直し

PMは、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、プロジェクト基本計画を見直す等の対応を行う。

(3)根拠法

本事業は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第 15 条第 1 号ニ及び第 9 号に基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

(1)2017年2月、制定。

(2)2021年12月、PMの変更、年号の記載を平成から西暦に変更。

## (別紙1) 研究開発計画

### 研究開発項目①廃製品自動選別技術開発

#### 1.研究開発の必要性

複雑組成の廃製品から金属資源を戦略的に回収するには、様々な製品形態と頻繁なモデル変動への対応が不可欠であり、リサイクルの中間処理における廃製品の解体・選別技術には高い汎用性が必要である。しかし現状は手作業に頼らざるを得ず、高コスト要因となっている。そのため、無人化による低コスト廃製品自動選別技術の開発が必要である。

#### 2.具体的研究内容

廃製品の特徴を複数の高解像センサの組み合わせ等により検知して、これと別途取得した製品情報とを照合・解析することにより、廃製品の種類の自動認識を可能とするとともに、廃製品の平均的金属組成等に基づいた資源価値判定と最適な解体・選別条件の自動選択を可能とする廃製品自動選別技術を開発する。

また、検知した廃製品の特徴に応じて、破壊機構解析により、モジュール(プリント基板、電池等)を破壊せずに筐体のみを優先破砕する自動解体技術を最適化し、廃製品の筐体解体機を開発する。

さらに、廃製品選別技術を、モジュール選別に応用する技術開発を実施する。

#### 3.達成目標

中間目標(2019年度):

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。

最終目標(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

#### 1.研究開発の必要性

リサイクル中間処理における分散・複雑系廃部品の選別システムや操業条件は、経験則に基づくために多様な製品の変動に対応できない。このため、高精度な選別ができないことから、

回収金属種が限定されており、多様な金属に対する製錬向け原料化技術は確立できていない。その解決のため、廃部品情報に基づく、選別システムや操業条件の自動制御が可能な、廃部品自動選別技術の開発が必要である。

## 2. 具体的研究内容

廃製品を構成する主なモジュールを構成する細粒部品の単体分離(破碎)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各種の選別方法・条件を自動的に制御し、製錬受入れ条件を満たす金属原料化が可能な、各種の選別機(磁選、比重選別などの集合選別機)を統合制御する選別システムを開発する。

破壊機構解析により、プリント基板から電子素子群を無傷で剥離(単体分離)し、電子素子の持つオリジナルの物性を保存したまま回収することが可能な、部品剥離機(単体分離機)を開発する。

また、選別装置内の選別粒子挙動や産物組成の理論的な解析を行い、この理論を踏まえ、部品物性情報から選別挙動を予測するシステム及び各種選別機への分配や選別条件を最適化する制御システムを開発する。また、新たに廃部品供給機構を構築して、選別装置群を一貫自動制御する選別装置システムを確立する。

## 3. 達成目標

中間目標(2019 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・選別する自動選別システムにおいて、各種選別産物の製錬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。

最終目標(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

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度な分離試薬の開発、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技術を開発する。具体的には、以下の研究開発項目③-1 及び③-2 を実施する。

## 研究開発項目③-1 高精密金属イオンサイズ認識分離技術

### 1.研究開発の必要性

イオンサイズが極めて類似した金属イオンの相互分離は、その低い相互分離係数のため極めて困難である。そのため、これらの金属イオンの相互分離は、既存の技術では、多量の有機溶剤及び多段の装置(それらを設置可能な広大な敷地)を必要とし、実用化するにはコストの高いプロセスである。そのため、小規模・低コストの希土類元素相互分離プロセスの開発が必要である。

### 2.具体的研究内容

本研究開発では、高精密かつ高効率な金属イオン分離技術を確立し、小規模・低コストの希土類元素相互分離湿式プロセスを開発する。具体的には、錯体構造解析等を駆使した金属の分離メカニズム解明を行い、分離試薬設計法を確立することで、希土類元素に対し高い相互分離係数を有する分離試薬を開発する。また、実プロセスに導入した場合のコスト検証も行う。

### 3.達成目標

中間目標(2019 年度):

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。

最終目標(2022 年度):

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。

## 研究開発項目③-2 濃縮系少量材料の高効率製錬リサイクル技術

### 1.研究開発の必要性

近い将来、様々な製錬原料の流通が期待されるが、希土類磁石等の濃縮系製錬原料が回収されたとしても、量が少ないため従来技術で対応すると極めて非効率となる。製錬原料の中でも特定の元素が高濃度で含まれる濃縮系材料は、それに特化した高効率なプロセスが必要である。

### 2.具体的研究内容

濃縮系製錬原料を対象に、熔融塩法を用いた、単一又は少工程数にて、目的とする 2 種以上の希土類元素を、各々同時に連続的に直接回収できる高効率な製錬リサイクルプロセスを開発する。また、反応及び回収過程等の原理の解析を行うとともに、実プロセスに導入した場合のコスト検証も行う。

### 3.達成目標

中間目標(2019 年度):

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。

最終目標(2022 年度):

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

##### 1.研究開発の必要性

現状、廃製品リサイクルは短期的・局所的な経済性判断に基づいて行われており、長期的・大局的な供給リスク脆弱性低減や都市鉱山ポテンシャル活用に対応しているとは言えない。またリサイクルのコスト低減には資源配慮製品設計とその情報流通が必須であるが、動静脈連携基盤は未整備である。

##### 2.具体的研究内容

本研究開発では、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。それにより廃製品リサイクルシステムの社会リスク対応性向上と経済性向上に寄与する。

##### 3.達成目標





中間目標(2019 年度):

2020 年度からの研究開発開始のため対象外。

最終目標(2022 年度):

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。

(別紙2) 研究開発スケジュール

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
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 動静脈情報 連携システム								
評価時期			中間 評価				事後 評価	







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

<b>1</b> 章	メタルリサイクル技術の概要	2
<b>2</b> 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
<b>3</b> 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
<b>4</b> 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。

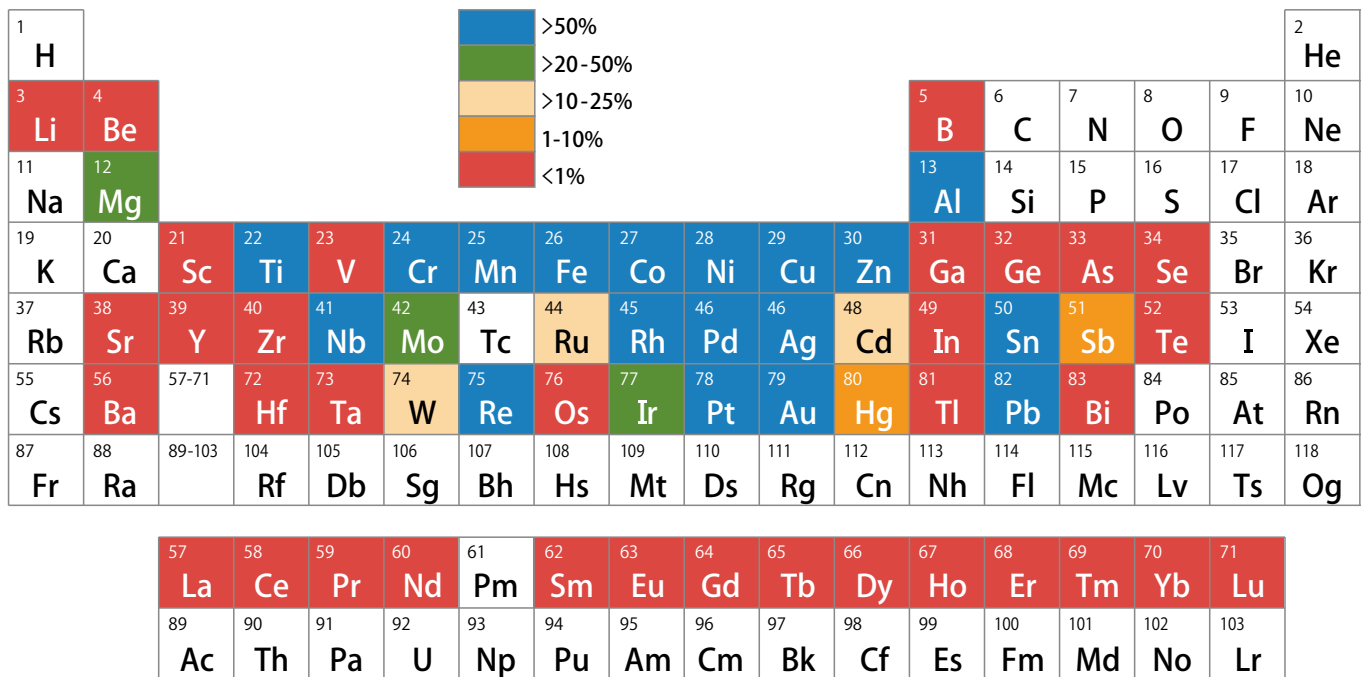


図2 元素別使用済み製品由来リサイクル率 (世界規模)

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<sup>※1</sup>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"> <li>環境衛生対策</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>清掃法（1954）</li> </ul>
公害問題と生活環境の保全 埋立て地対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>公害の顕在化</li> <li>埋立て地対策の拡大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄物の処理及び清掃に関する法律（1970）</li> </ul>
リサイクル推進 有害物質対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄物処理施設整備の推進</li> <li>廃棄物処理に伴う環境保全</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>広域臨海環境整備センター法（1981）</li> <li>ごみ処理施設構造指針の改正（1986）</li> </ul>
3Rの推進	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄物の排出抑制、リサイクル推進</li> <li>各種リサイクル制度の構築</li> <li>有害物質（ダイオキシン等）対策</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>再生資源有効利用促進法（1991）</li> <li>容器包装リサイクル法（1995）</li> <li>家電リサイクル法（1998）</li> <li>ダイオキシン類対策特別措置法（1999）</li> <li>建設リサイクル法（2000）</li> <li>食品リサイクル法（2000）</li> </ul>
都市鉱山資源化の推進	<ul style="list-style-type: none"> <li>循環型社会の構築</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>循環型社会形成推進基本法（2000）</li> <li>自動車リサイクル法（2002）</li> <li>循環型社会形成推進基本計画（2003）</li> </ul>
動静脈連携の推進	<ul style="list-style-type: none"> <li>資源供給対策</li> <li>使用済製品の資源化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>レアメタル確保戦略の策定（2009）</li> <li>エネルギー基本計画（2010）</li> <li>資源確保戦略（2012）</li> <li>小型家電リサイクル法（2013）</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>資源効率の向上</li> <li>情報活用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>循環型社会形成推進基本法 改正（2013）</li> <li>日本再興戦略 2016（2016）</li> </ul>

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<sup>※2</sup>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。

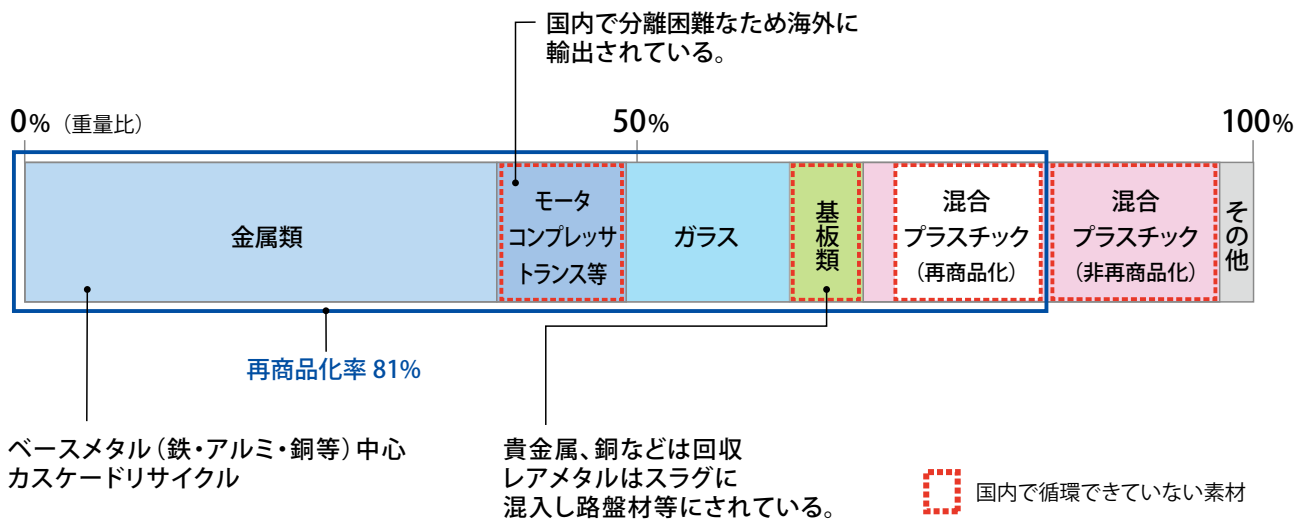


図3 国内での資源循環が不十分な例

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。

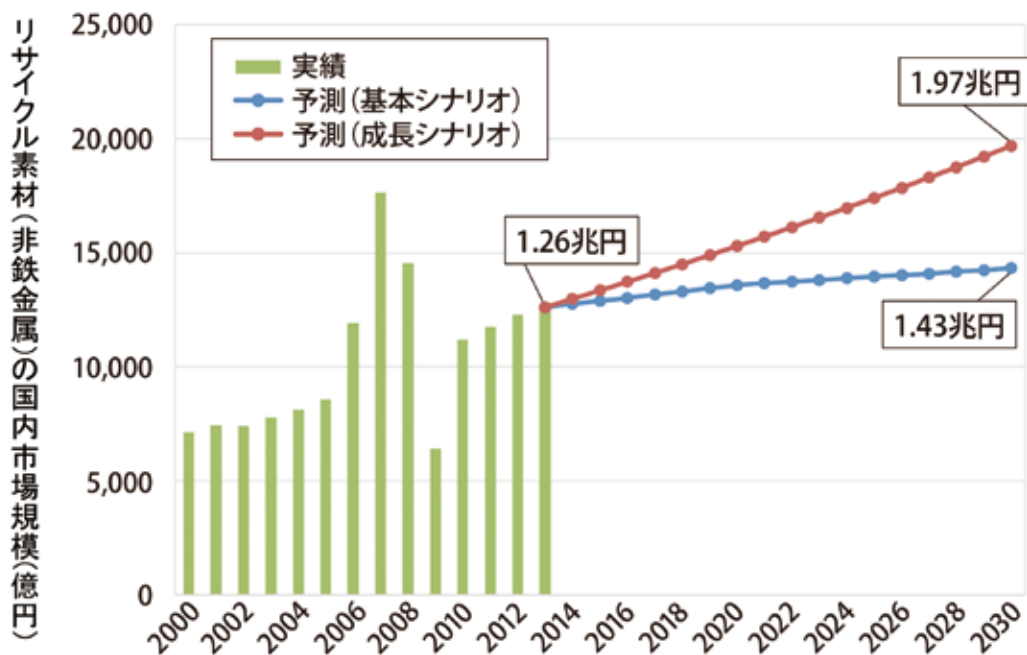


図4 リサイクル素材（非鉄金属・レアメタル）に関する産業の国内市場規模

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"> <li>・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、自動車を処理している。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>	・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"> <li>・リサイクル対象は、廃車及び自動車工場発生スクラップ。</li> <li>・廃車スクラップは、解体、選別の後に処理</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・米国では、大手自動車リサイクルLKQが大規模に実施。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>	・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)。

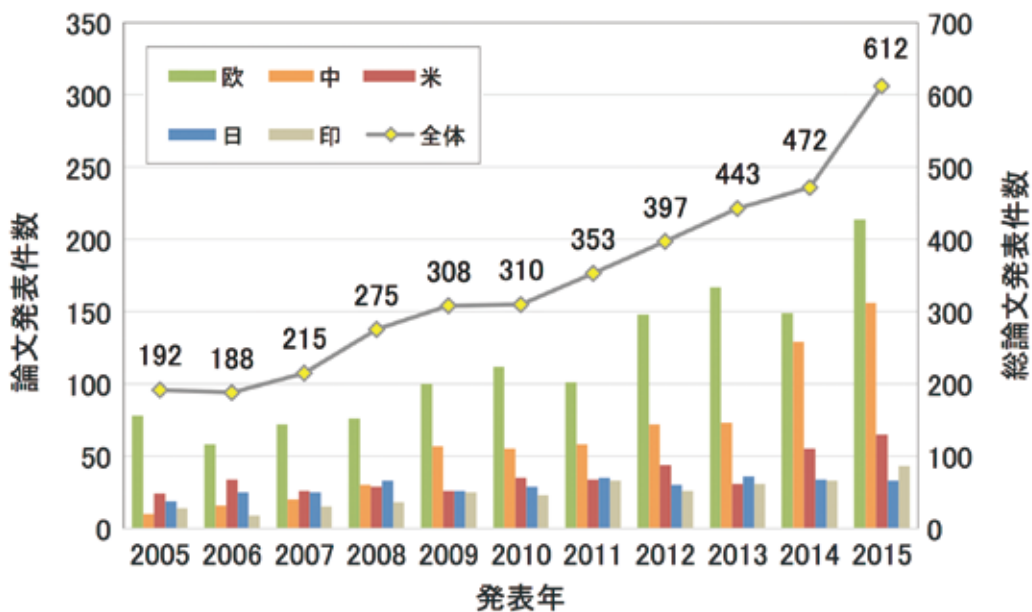


図5 廃棄物からのメタルリサイクル技術に関する国籍別論文発表件数の推移(2005～2015年)  
出所: Web of Science™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

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<sup>※3</sup>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。

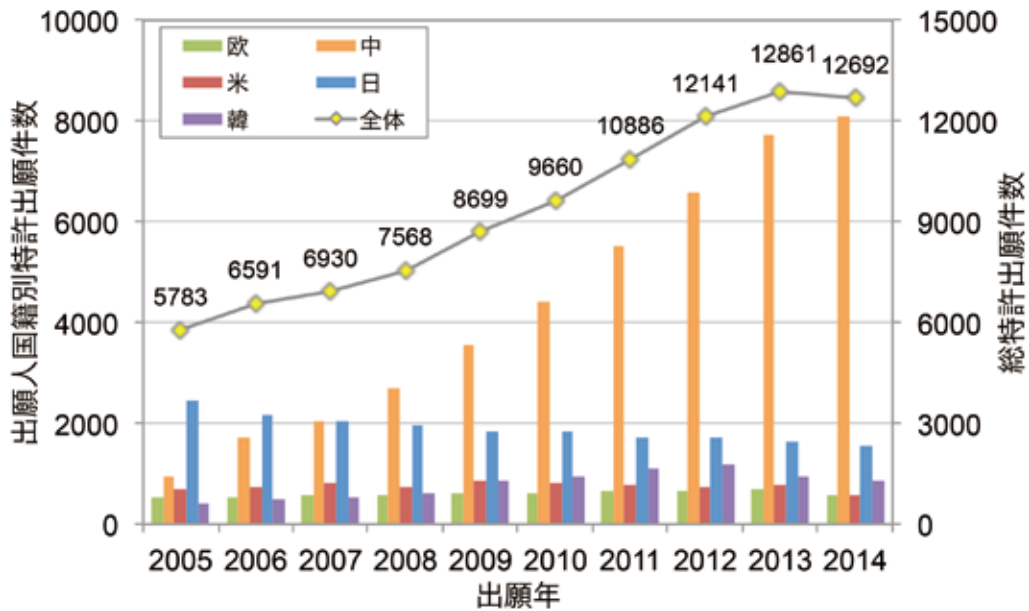


図6 メタルリサイクル技術に関する出願人国籍別特許出願件数の推移 (2005～2014年)

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)

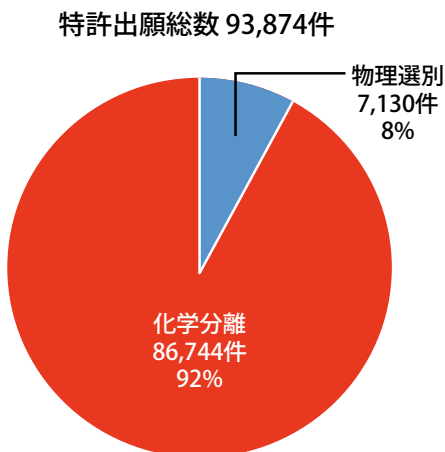


図7 メタルリサイクル技術に関する特許出願件数の内訳 (2005～2014年)

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、主に粉碎刃やローラー、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。

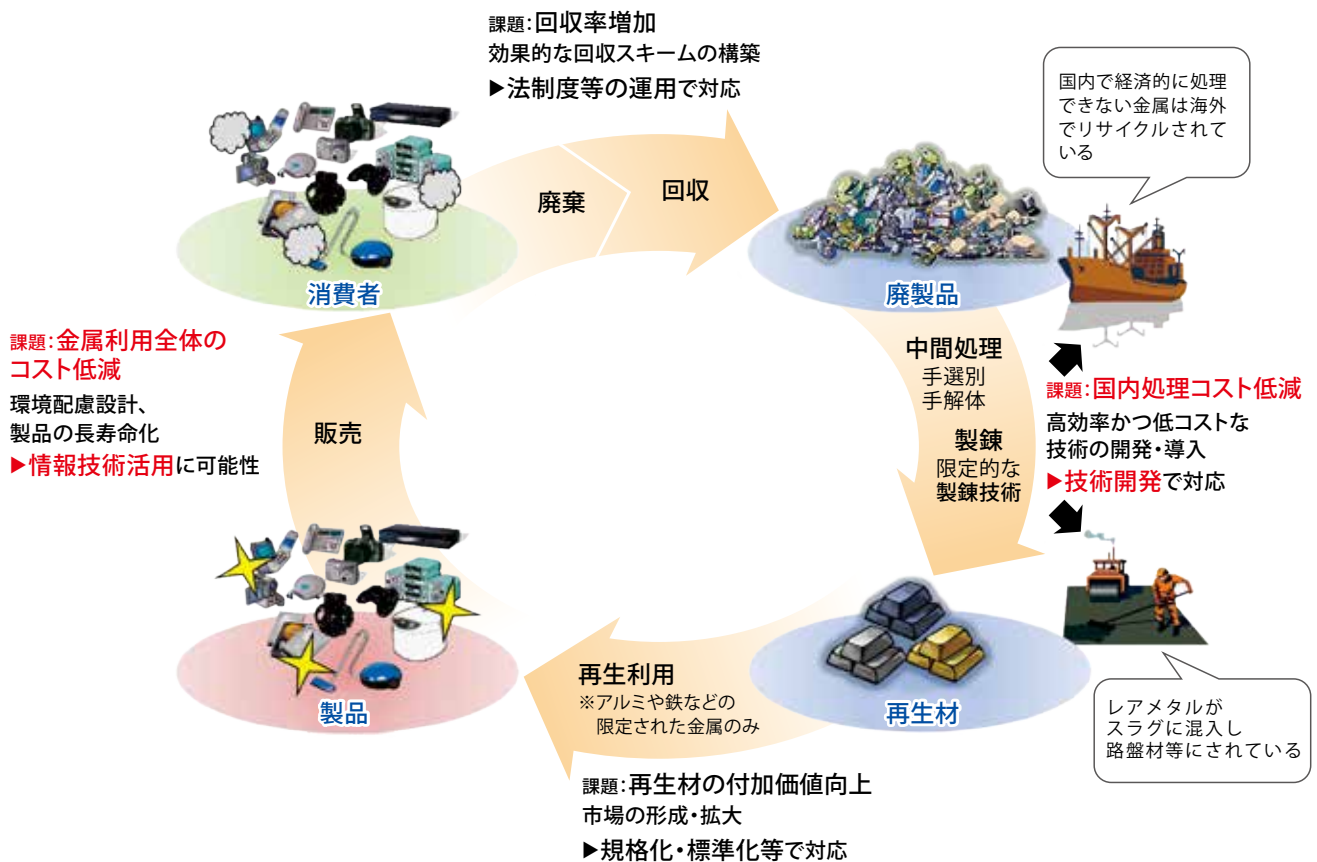


図8 金属資源のバリューチェーンにおける課題と対応策

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。

研究開発事業に係る技術評価書(事前評価)					(経済産業省)	
事業名	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		推進課室名	産業技術環境局 環境ユニット		
事業開始年度	平成29年度	事業終了(予定)年度	平成34年度	主管課室名	リサイクル推進課	
事業の目的	資源・エネルギーの安定供給及び省資源・省エネルギー化に資するため、情報技術等の有効活用や、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ことによって、都市鉱山の利用を促進し、リサイクル業者や非鉄精錬業者等の成長を図ることで、資源安全保障の強化等を実現する。					
事業概要	別紙記載のとおり。					
平成29年度概算要求額	900 (百万円)					
成果目標(アウトカム)	成果指標		単位	中間目標年度	目標最終年度	
	本事業により開発された自動・自律型リサイクル技術及び少量多品種製錬技術の国内プラント導入数	目標値	箇所	- 年度	37 年度	
成果目標(アウトカム)	成果指標		単位	中間目標年度	目標最終年度	
	1製品の選別時間	目標値	秒	- 年度	34 年度	
成果目標(アウトカム)	成果指標		単位	中間目標年度	目標最終年度	
	1製品の選別精度	目標値	%	- 年度	- 年度	
成果目標(アウトカム)	成果指標		単位	中間目標年度	目標最終年度	
	【廃部品自動選別技術開発】 分散・複雑系廃部品全体の分離効率	目標値	%	- 年度	34 年度	
成果目標(アウトカム)	成果指標		単位	中間目標年度	目標最終年度	
	特定の希土類元素の相互分離係数	目標値	数	- 年度	34 年度	
横断的な施策に係る成果目標及び成果実績(アウトカム)	成果指標		単位	中間目標年度	目標最終年度	
	1t当たりのCO2削減コスト	目標値	円/t	- 年度	37 年度	
地球温暖化対策	算出方法	3,088円/t				
成果目標及び成果実績(アウトカム)欄についてさらに記載が必要な場合はチェックの上【別紙1】に記載					<input type="checkbox"/> チェック	
活動指標(アウトプット)	活動指標		単位	29年度活動見込		
	研究開発テーマ数	当初見込み	数			

事業所管部局(推進課、主管課)による自己点検・改善状況

項目		評価	評価に関する説明					
国費投入の必要性	事業の目的は国民や社会のニーズを的確に反映しているか。	○	資源・エネルギーの大宗を海外に依存する我が国にとって、リサイクルの推進は資源・エネルギーの安定供給のために重要であり、また第3次循環基本計画において、廃棄物部門由来の温室効果ガス排出量削減が求められている。					
	地方自治体、民間等に委ねることができない事業なのか。	○	現状の都市鉱山からの金属資源リサイクルは、排出される使用済み製品の不均一性のため、大部分を手作業に依存せざるを得ずコストが増大。また、産業上重要な希土類等の金属を再生する場合でも、これらの金属は1製品に少量しか使用されていないため、現状の技術ではコストに見合わない。加えて、足元では金属資源価格が低迷しているため、短期的な利益を追求する民間企業では、高度な金属資源リサイクルの研究開発を推進するインセンティブが期待できない。したがって、我が国の産業競争力の源泉である金属資源の持続的・安定的な確保に向けて、国が本事業を積極的に推進する必要がある。					
	政策目的の達成手段として必要かつ適切な事業か。政策体系の中で優先度の高い事業か。	○	第3次循環基本計画において、国による高度なりサイクルの推進等が求められており、優先度が高い。					
事業の効率性	競争性が確保されているなど支出先の選定は妥当か。	○	支出先は、関連分野の有識者からなる第三者審査委員会による審査により選定し、公平性を確保する予定。					
	一般競争入札、総合評価入札又は随意契約(企画競争)による支出のうち、一者応札又は一者応募となったものはないか。	無						
	競争性のない随意契約となったものはないか。	無						
	受益者との負担関係は妥当であるか。	○	共通性を持つ基盤技術開発であり、委託事業として妥当。					
	単位当たりコスト等の水準は妥当か。	-	-					
	資金の流れの中間段階での支出は合理的なものとなっているか。	-	-					
	費目・使途が事業目的に即し真に必要なものに限定されているか。	○	採択する予定の研究開発に直接必要な設備費、人件費等のみを計上する予定。					
不用率が大きい場合、その理由は妥当か。(理由を右に記載)	-	-						
その他コスト削減や効率化に向けた工夫は行われているか	○	事業の進捗を踏まえ、第三者委員会において事業内容の精査を行い、適切な事業内容となるよう見直しを行う予定。						
事業の有効性	成果実績は成果目標に見合ったものとなっているか	○	プロジェクトリーダーの監督の下適切な役割分担の下事業を進める予定。					
	事業実施に当たって他の手段・方法等が考えられる場合、それと比較してより効果的あるいは低コストで実施できているか。	-	-					
	活動実績は見込みに見合ったものであるか。	-	-					
	整備された施設や成果物は十分に活用されているか。	-	-					
関連事業	関連する事業がある場合、他部局・他府省等と適切な役割分担を行っているか。(役割分担の具体的な内容を各事業の右に記載)	-	-					
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>所管府省・部局名</th> <th>事業番号</th> <th>事業名</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>	所管府省・部局名	事業番号	事業名	-	-	-	-
所管府省・部局名	事業番号	事業名						
-	-	-						
点検・改善結果	点検結果	-						
	改善の方向性	-						

外部有識者(産業構造審議会評価WG等)の所見【技術評価】

資源・環境エネルギー戦略の上で、国として取り組む必要があり、リサイクルにおける日本の先導性を国際的に波及させる意義も大きい。動脈産業と静脈産業をどう繋げ、どう位置付けで情報連携するかのシステム設計検討を早急に開始すること。また、技術開発のみならず、法規上の課題を含む社会システムの構築が重要である。アウトカムは、資源効率の定量的指標を各段階で設定し、前倒しで推進するべきである。(NEDO研究評価委員会)

外部有識者(産業構造審議会評価WG等)の所見を踏まえた改善点等

情報連携システムについては、技術開発が一定程度進捗し、システムに必要な情報の具体性が明らかになった後に開始する予定であるが、技術開発の進捗を踏まえて開始時期を柔軟に見極めていく。法規上の課題を含む社会システムの構築については、経済産業省とも連携しながら進めていく。資源効率等の定量的指標を各段階で設定し、技術検討委員会等を通じて技術開発の進捗を各項目ごとに見極め、アウトカム目標を前倒しで達成すべく、事業計画を適宜見直すとともに普及啓発に向けた取組を行う。

# 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 (新規)

平成29年度概算要求額 9.0億円

03-3501-4978、1926、6944、9918

産業技術環境局 リサイクル推進課  
製造産業局 金属課  
商務情報政策局 情報通信機器品課  
資源エネルギー庁 鉱物資源課

## 事業の内容

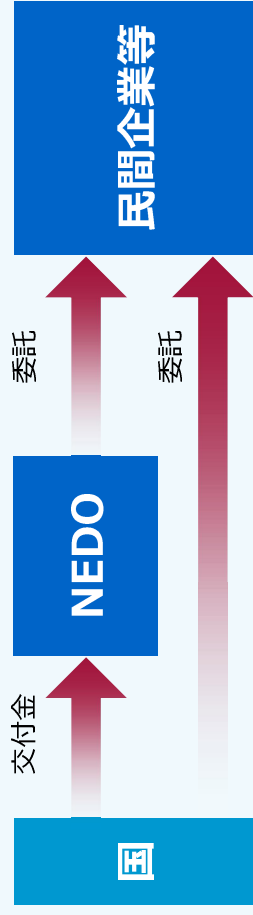
### 事業目的・概要

- 我が国の都市鉱山(注)の有効利用を促進し、資源・エネルギーの安定供給及び省資源・省エネルギー化を実現するため、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・システムを開発します。  
(注) 大量に廃棄される家電類等に存在する有用金属を鉱山に見立てたもの
- 具体的には、安価で良品質なリサイクル材の安定的な生産・供給を実現するため、再資源化プロセスと製品製造プロセスとの連携により、廃小型家電等を製品レベル・部品レベルで自動選別するプロセス及び高効率な製錬プロセスなどを構築するための研究開発を行うことで、世界に先駆けた高効率な資源循環システムの構築を行います。
- 平成29年度は、①廃製品・廃部品の自動選別技術、②高効率製錬技術の開発を実施します。

### 成果目標

- 平成29年度から平成34年度までの6年間の事業であり、事業終了後3年以内に、自動・自律型リサイクルプラント及び有用金属の少量多品種製錬技術を導入します。

### 条件 (対象者、対象行為、補助率等)



## 事業イメージ



### ① 廃製品・廃部品の自動選別技術開発

- 複雑な組成の製品から有用物を取り出すために、最適な解体・選別条件を自動的に選択するための技術開発を行います。
- 現行の人の目・手による選別を凌駕する選別時間・精度による手法を確立し、廃製品の中間処理から手作業を一扫することで、選別コストの大幅削減を実現します。

### ② 高効率製錬技術開発

- 有用金属を効率的に精製する製錬技術開発を行います。
- レアメタル回収工程において、新試薬の開発や新精製法の確立により従来工程からの大幅な効率化・単純化を図ります。
- 銅製錬工程においては、低温焙焼等による不純物除去により、製錬工程の省エネ化を実現します。

↑ 更なる省エネ、資源の有効利用の促進につなげる

「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」の基本計画（案）に対する  
パブリックコメント募集の結果について

平成29年2月16日  
NEDO  
環境部

NEDO POSTにおいて標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。

1. パブリックコメント募集期間  
平成29年1月13日～平成29年1月27日
2. パブリックコメント投稿数<有効のもの>  
計0件

以上



## 特許論文等リスト

### 研究開発項目①

#### 【特許】

出願件数：11 件

#### 【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Naohito Hayashi, Shigeki Koyanaka and Tatsuya Oki	産総研	Constructing an Automatic Object-Recognition Algorithm Using Labeling Information for Efficient Recycling of WEEE	Waste Management, 88, 337-346.	有り	2019/4
2	Jun Katagiri, Shigeki Koyanaka	産総研	New criterion for decision-making in mesh simplification of 3D-scanned objects used in discrete-element modelling	Materials Transactions, Vol.61(6), pp.1158-1163, 2020.6.	有り	2020/6
3	Jun Katagiri, Takao Ueda, Naohito Hayashi, Shigeki Koyanaka	産総研	Genetic Algorithm Based Automatic Input Parameter Calibration Method for the Discrete Element Modeling of Vibration Feeders	Materials Transactions, Vol. 62(4), pp. 551-556	有り	2021/2
4	Takao Ueda, Jun Katagiri, Tatsuya Oki, and Shigeki Koyanaka	産総研	Genetic algorithm optimization in discrete element simulation of electric parts separation from printed circuit board	Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 64, pp. 2763-2771, 2021.10.	有り	2021/10
5	Takao Ueda, Hideaki Fukusawa, Naoki Sunahara, Hiroshi Yamada, Tatsuya Oki, and Shigeki Koyanaka	産総研, 佐藤鉄工	Design-of-experiment analysis of non-destructive detachment of electric parts from printed circuit boards of mobile phones using a cross-flow shredder	Waste Management, Vol. 134, pp. 52-56, 2021.10.	有り	2021/10

#### 【外部発表】

##### (a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	古屋仲茂樹	産総研	小型家電リサイクルプラントの自動化と製品データの市場化	精密工学会ライフサイクル専門委員会リマニファクチャリング WG 講演会	2018/7
2	古屋仲茂樹	産総研	資源リサイクル分野における AI 画像認識の活用事例	鳥取県産業技術センター研究成果発表会×中国地域産総研技術セミナー-in 鳥取	2020/10
3	古屋仲茂樹	産総研	個別選別技術の新たな展開	SURE アカデミー公開講座	2018/11
4	上田高生	産総研	廃製品リサイクルにおける解体・破碎工程の自動化	SURE コンソーシアム, 第 13 回リサイクル技術セミナー	2018/11
5	林直人	産総研	画像認識技術を応用した選別工程の自動化	SURE コンソーシアム, 第 13 回リサイクル技術セミナー	2018/11

6	中川友喜美	大栄環境	N E D O事業 ～小型家電処理技術開発～	早稲田大学	2019/5
7	上田高生、古屋仲茂樹、大木達也	産総研	携帯電話等の高速解体技術	資源・素材 2019	2019/9
8	林直人	産総研	リサイクルのための粉体精製技術への数値シミュレーション, 画像認識の応用	資源・素材 2019	2019/9
9	古屋仲茂樹	産総研	資源リサイクル分野における AI 画像認識の活用事例	AI を島根県の産業、社会に活用するための研究会	2019/11
10	古屋仲茂樹	産総研	NEDO プロジェクトの展開 – 物理選別 –	SURE コンソーシアム 第 16 回技術セミナー	2019/12
11	林直人	産総研	廃小型家電製品からの金属資源循環を目的とした物理選別技術開発	テクノブリッジフェア in 東北	2020/2
12	林直人	産総研	国内金属資源循環を目指した戦略的都市鉱山の開発	2020 年日本電子材料技術協会特別セミナー	2020/10
13	林直人	産総研	画像認識技術を用いた廃プリント基板の資源価値推定	SURE コンソーシアム第 17 回リサイクル技術セミナー	2020/12
14	林直人	産総研	戦略的都市鉱山の思想とその実現に向けた研究開発	産業技術連携推進会議 環境・エネルギー部会・分科会・研究会合同総会	2021/3
15	古屋仲茂樹	産総研	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	令和 3 年第 1 回廃棄物処理・リサイクル IoT ビジネスセミナー (廃棄物処理・リサイクル IoT 導入促進協議会)	2021/7
16	上田高生	産総研	スマートフォンの自動解体技術	SURE コンソーシアム第 19 回リサイクル技術セミナー	2021/8
17	Naohito Hayashi, Shigeki Koyanaka and Tatsuya Oki	産総研	Detection Algorithm by Continuous Image Processing of Electric Devices Mounted on Waste Printed Circuit Boards	8th Asian Particle Technology Symposium (APT2021)	2021/10
18	林直人	産総研	戦略的都市鉱山の思想と早期社会導入のための選別技術開発	産総研東北センターグリーンプロセス インキュベーションコンソーシアム (GIC) 2021 年度第 73 回研修セミナー	2021/12
19	林直人	産総研	画像認識技術を応用した廃製品の自動個体認識	SURE コンソーシアム第 20 回リサイクル技術セミナー	2021/12

## 研究開発項目②

### 【特許】

出願件数：3 件

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Hiroki Hatayama, Kiyotaka Tahara	産総研	Adopting an objective approach to criticality assessment: Learning from the past	Resources Policy, 55 (2018), 96-102.	有り	2017/11
2	Sinichirou Morimoto, Kenzo Sanematsu, Kimihiro Ozaki, Akito Ozawa, Seo Yuna	産総研	Methodological study of evaluating the traceability of neodymium based on the global substance flow analysis and Monte Carlo simulation	Resources Policy, 63 (2019), 101448.	有り	2019/7
3	Takao Ueda, Tatsuya Oki, and Shigeki Koyanaka	産総研	An automated assessment method for integrated circuit chip detachment from printed circuit board by multistep binarization and template matching of X-ray transmission images.	Journal of Material Cycles and Waste Management, Vol. 23, pp. 315-322, 2021.1.	有り	2021/1
4	Hitoshi Komoto, Mitsutaka Matsumoto, Shinsuke Kondoh	産総研	Library of facility models for structural and graphical definition of recycling system simulation considering information flows	Procedia CIRP Vol. 98, pp. 187-192, 2021, doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.028	有り	2021/3
5	Sinichirou Morimoto, Hirokazu Narita (産総研), Hiroshi Kuroki, Aya Ishigaki (東京理科大)	産総研, 東京理科大	Scenario Assessment of Neodymium Recycling in Japan based on Substance Flow Analysis and Future Demand Forecast	Journal of Material Cycles and Waste Management, 23(2021), 2120-2132.	有り	2021/8
6	Shinsuke Murakami, Shunya Muraoka	東京大学	Exploring the Potential of Internet News for Supply Risk Assessment of Metals	Sustainability 2022, 14, 409. <a href="https://doi.org/10.3390/su14010409">https://doi.org/10.3390/su14010409</a>	有り	2021/12

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	大木達也	産総研	SURE コンソーシアムと都市鉱山プロジェクトの展開	産総研シンポジウム, 近未来の資源循環社会の展望	2017/9
2	Tatsuya Oki	産総研	Technological Strategy for the Next Generation Urban Mining in Japan	The 14th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology	2017/9
3	Keijirou Masui, Mitsutaka Matsumoto	産総研	A study on specification of information system for product life cycle management in IoT era	EcoDesign 2017	2017/11

4	Hitoshi Komoto, Shinsuke Kondoh, Keijirou Masui, Mitsutaka Matsumoto	産総研	Simulation-based analysis of impacts of dynamic data acquisition and integration on the realization of an efficient recycling process chain for small electric and electrical equipment	EcoDesign 2017	2017/11
5	大木達也	産総研	戦略的都市鉱山 リサイクルシステムの開発 実用化	つくば国際戦略総合特区成 果発表会	2017/11
6	大木達也	産総研	持続的な金属資源循環の構築を目指して	環境研究機関連絡会シンポ ジウム	2017/11
7	畑山博樹、田原聖隆、増 井慶次郎、松本光崇、近 藤伸亮	産総研	金属資源循環に向けたサプライチェーン戦略	環境研究機関連絡会シンポ ジウム	2017/11
8	大木達也	産総研	NEDO プロジェクト「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」	日本産業議会工業会 3Rリ サイクルセミナー	2018/3
9	大木達也	産総研	物理選別装置の自動制御化	資源素材学会春季大会	2018/3
10	大木達也	産総研	戦略的都市鉱山構築に向けた未来構想	第 16 回レアメタル資源再生 技術研究会	2018/7
11	大木達也	産総研	近未来の都市鉱山構築に向けた技術開発 的アプローチ	北海道大学工学系イノベ ーションフォーラム 2018	2018/9
12	高本仁志、近藤伸亮、松 本光崇	産総研	ライフサイクルステージ間の情報の流れに着 目したユースケース分析に向けて	精密工学会 2018 年度秋 季大会・学術講演会	2018/9
13	大木達也	産総研	戦略メタル資源循環の課題	大阪科学技術センター地球 環境技術推進懇談会	2018/9
14	大木達也	産総研	戦略的都市鉱山リサイクルシステムの開発 動向	石川県次世代産業育成講 座・新技術セミナー	2018/9
15	Mitsutaka Matsumoto, Keijirou Masui,	産総研	Requirements for product information flow to enhance WEEE urban mining	Care Innovation 2018 Conference	2018/11
16	大木達也	産総研	集合選別技術の新たな展開	SURE アカデミー公開講座	2018/11
17	醍醐市朗	東京大学	自動選別における素材間の適性に関する 評価について、新たに開発した手法につい て、紹介したものである。	エコデザイン・プロダクト&サー ビス 2018 シンポジウム	2018/12
18	大木達也	産総研	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 フォーラム特別 講演	2018/12
19	醍醐市朗	東京大学	日本におけるベースメタルの使用済み回収 率の評価について、新たに開発した手法とそ の評価結果について、紹介したものである。	第 14 回日本 LCA 学会研 究発表会	2019/3
20	Hitoshi Komoto, Mitsutaka Matsumoto, Shinsuke Kondoh	産総研	Model-based design of product- related information management system for accelerating resource circulation	EcoDesign 2019	2019/11

21	Sinichirou Morimoto, (産総研), Hiroshi Kuroki, Aya Ishigaki (東京理科大)	産総研	Substance Flow Analysis of Rare Earth and Contribution of International Standard for its Recycle from End-of-life Product - The Case Study of Neodymium	Ecodesign 2019	2019/11
22	Tatsuya Oki	産総研	Role of physical sorting technology as a hub function of resource circulation	2020 Energy and Resources Integrated Technology Roundtable Forum	2020/10
23	森本慎一郎	産総研	リチウムイオン電池のリサイクルにおける課題	SURE コンソーシアム 技術セミナー	2020/12
24	大木達也	産総研	資源循環社会構築に向けた SURE コンソーシアムの活動	エンジニアリング協会 講演会	2021/1
25	Hitoshi Komoto, Mitsutaka Matsumoto, Shinsuke Kondoh,	産総研	Library of facility models for structural and graphical definition of recycling system simulation considering information flows	28th CIRP Conference on Life Cycle Engineering (オンライン開催)	2021/3
26	大木達也	産総研	小型家電リサイクルのための無人選別システムの開発	資源・素材学会春季大会企画講演会	2021/3
27	Ryuhei Matsuoka, Mayumi Ito, S. Jeon, I. Park, Naoki Matayoshi	北海道大学	A study on the water injection method of Falcon-Knelson concentrator	International Symposium on Earth Science and Technology 2021	2021/11
28	大木達也	産総研	廃小型家電無人選別システム(CEDESTシステム)の開発	SURE コンソ 第 20 回リサイクルセミナー	2021/12
29	上田高生	産総研	単体分離測定をアシストする計測技術開発	SURE コンソーシアム第 21 回リサイクル技術セミナー (口頭発表)	2022/3
30	畑山博樹	産総研	金属製造業における SDGs への取り組み方について	R3 年度軽金属学会東海支部軽金属支部セミナー	2022/3
31	大木達也	産総研	次世代の物理選別技術に向けた研究開発	資源・素材学会春季大会基調講演	2022/3

## (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	発表者	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	大木達也	産総研	大木会長 動静脈「融合」へ	環境新聞	2017/9
2	大木達也	産総研	産総研、都市鉱山掘り尽くす	日経産業新聞	2017/11
3	大木達也	産総研	NEDO・産総研 開発拠点を開設 希少金属の回収技術	日経産業新聞	2018/6
4	大木達也	産総研	スマホから希少金属回収 つくばに技術開発拠点 NEDOと産総研が開設	日本経済新聞	2018/6
5	大木達也	産総研	「都市鉱山」自動で選別 産総研、つくばに新施設	化学工業日報	2018/6
6	大木達也	産総研	資源化でリサイクル NEDO など研究施設 小型家電に含まれる金属	日刊工業新聞	2018/6
7	大木達也	産総研	産総研が研究施設開設 都市鉱山からの資源回収促進	鉄鋼新聞	2018/6
8	大木達也	産総研	分離技術開発センター開設 廃家電を自動選別	日刊産業新聞	2018/6
9	大木達也	産総研	NEDO と産総研 都市鉱山活用へ研究拠点 自動選別技術開発目指す	読売新聞	2018/6

10	大木達也	産総研	都市鉱山、有効活用へ 集中研究施設を開 設 廃製品の金属資源自動選別システム導入	電波新聞	2018/6
11	大木達也	産総研	NEDO プロ集中研「CEDEST」の開設について掲 載	日刊産業新聞	2018/6
12	大木達也	産総研	世界初の自動・自立型リサイクルプラント開発へ 産総研が研究施設開所	鉄鋼新聞	2018/6
13	大木達也	産総研	都市鉱山活用に向けた集中研究施設 「CEDEST」開設 産総研が NEDO の支援で	科学新聞	2018/7
14	大木達也	産総研	家電製品の有用金属 自動で回収 産総研と NEDO などシステム開発中	朝日新聞	2018/7
15	大木達也	産総研	「都市鉱山」回収自動化へ つくば産総研に研究 拠点 22 年度までに開発目指す	東京新聞	2018/7
16	大木達也	産総研	CEDEST NEDO と産総研が集中研究施設を 小型の廃家電を自動的に自動選別・解体・破砕	レアメタルニュース (アルム出版社)	2018/7
17	大木達也	産総研	NEDO/産業技術総合研究所 分離技術開発セ ンター開所 小電等を自動選別する装置開発	循環経済新聞	2018/7
18	大木達也	産総研	NEDO プロ集中研「CEDEST」の開設について掲 載	レアアース・ダイジェスト	2018/7
19	大木達也	産総研	「廃棄物内の金属資源を自動選別する装置」の研 究開発拠点がオープン	環境ビジネスオンライン	2018/7
20	大木達也	産総研	産総研、都市鉱山活用に向けた集中研究施設 「分離技術開発センター」を開設	マイナビニュース	2018/7
21	Keijirou Masui, Mitsutaka Matsumoto	産総研	A study on specification of information system for product life cycle management in IoT era	(Proceedings 書籍への掲載) A.Hu 他編著, Technologies and Eco-innovation towards Sustainability II pp 315-326.	2019/1
22	大木達也	産総研	2050 年の静脈産業の姿と目指すべき方向性	日刊産業新聞	2019/9
23	大木達也	産総研	都市鉱山、コロナ後も後押し	日経産業新聞	2020/6
24	大木達也	産総研	廃製品からレアメタルを取り出しリサイクルする研究	高校受験ガイドブック 2020 Success15	2020/8
25	Hiroshi Kuroki, Aya Ishigaki, Ryuta Takashima, Shinichirou Morimoto	産総研, 東京理 科大	An Economic Evaluation of Recycling System in Next-Generation Vehicles Considering the Risk of Spilled EOL to Overseas	EcoDesign and Sustainability I,pp383-393 (2020).DOI: 10.1007/978-981-15-6779- 7_27	2020/11
26	Hitoshi Komoto, Mitsutaka Matsumoto, Shinsuke Kondoh,	産総研	Model-based design of product-related information management system for accelerating resource circulation	(Proceedings 書籍への掲 載)Y.Kishita 他編著, EcoDesign and Sustainability I, pp. 353-364.	2021/1

(c)その他

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	産総研	(主催シンポジウム) 近未来の資源循環社会の展望	産総研シンポジウム (東京・機械振 興会館ホール)	2017/9
2	産総研	(国際会議) Next Generation Technologies for the Urban Mining in Japanとして本プロジェクトの概要を報告	日米欧三極会議 "8th EU-US- Japan Trilateral Conference on Critical Materials"	2018/5
3	産総研	(プレス発表) プロジェクト研究及び集中研究施設 CEDEST の説明	プレス発表: NEDO・産総研共同記 者会見(産総研つくば西)	2018/6

研究開発項目③— 1

【特許】

出願件数：3 件

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ 番号	査 読	発表年 月
1	Tohru Kobayashi, Kazuhiro Akutsu, Masahiko Nakase, Shinichi Suzuki, Hideaki Shiwaku, Tsuyoshi Yaita	日本原子力研 究開発機構	Complexation properties and structural character of lanthanides complexes od O, N- hetero donor ligand BIZA	Separation Science and Technology 54(13), 2077- 2083 (2019)	あ り	2019 年 2 月
2	K. Ohto, M. Yamamoto, S. Morisada, H. Kawakita	Saga University	Extremely high extraction ability of bisphosphonic acid type extraction reagent to a series of rare earth metal ions	J. Incl. Phenom. Macrocycl. Chem., 76(3,4) 241-248	あ り	2019 年 5 月
3	K. Ohto, N. Fuchiwaki, T. Yoshihara, A. B. Chetry, S. Morisada, H. Kawakita	Saga University	Extraction of scandium and other rare earth elements with a tricarboxylic acid derivative of tripodal pseudocalix[3]arene prepared from a new phenolic tripodal framework	Sep. Purif. Technol., 226, 259-266	あ り	2019 年 7 月
4	Marie Simonnet, Shinichi Suzuki, Yuji Miyazaki, Tohru Kobayashi, Keiichi Yokoyama, Tsuyoshi Yaita	日本原子力研 究開発機構	Lanthanide intra-series separation by a 1,10- phenanthroline derivative; Counterion effect	Solvent Extraction and Ion Exchange, 38(4), 430-440 (2020)	あ り	2020 年 3 月
5	Motofumi Matsuda1* and Keisuke Ohto2	SANTOKU Corporation., Saga University	Improved Adsorption Capacity of EDTA-type Chitosan for Separation of Rare Earths	MATEC Web of Conferences 333, 04005 (2021)	あ り	2021 年 1 月
6	K. Ohto, S. Nakashima, Y. Tanaka, S. Morisada, H. Kawakita, T. Oshima	Saga University	Extraction behavior of trivalent rare earth metal ions with diphosphonic acid type extraction reagent	Key Engineering Materials, Scientific Net, 884, 133-139	あ り	2021/5/
7	Marie Simonnet, Tohru Kobayashi, Kojiro Shmojo, Keiichi Yokoyama, Tsuyoshi Yaita	日本原子力研 究開発機構	Study on Phenanthroline Carboxamide for Lanthanide Separation: Influence of Amide Substituents	Inorganic Chemistry 60 (17), 13409- 13418 (2021)	あ り	2021 年 8 月
8	K. Ohto, N. Fuchiwaki, S. Morisada, H. Kawakita, J.J. Weigand, W. Marco	Saga University	Comparative Extraction of Aluminum Group Metals Using Acetic Acid Derivatives with Three Different-Sized Frameworks for Coordination	Separations, 8(11), 211(1- 17)	あ り	2021 年 11 月

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	小林 徹、鈴木 伸一、塩飽 秀啓、矢板 毅	日本原子力研究開発機構	Specific lanthanide separation based on minute ionic size recognition using O, N-hetero donor ligand	The 21st International Solvent Extraction Conference	2017年11月
2	矢板 毅、鈴木 伸一、小林 徹、塩飽 秀啓	日本原子力研究開発機構	Bond distance variations for lanthanide and actinide compounds and its implication	AVS 65th International Symposium & Exhibition	2018年10月
3	小林 徹、鈴木 伸一、矢板 毅	日本原子力研究開発機構	Coordination mechanism of organic multidentate ligands with lanthanides	257th ACS National Meeting & Exposition	2019年4月
4	Motofumi Matsuda <sup>1</sup> * and Keisuke Ohto <sup>2</sup>	SANTOKU Corporation, Saga University	Improved Adsorption Capacity of EDTA-type Chitosan for Separation of Rare Earths	The 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (APCCHE 2019)	2019年9月
5	大渡啓介、山本真士、中島晋平、森貞真太郎、川喜田英孝	佐賀大学	ジホスホン酸型抽出試薬による希土類金属の抽出挙動	第34回日本イオン交換研究発表会	2019年10月
6	吉原努、淵脇菜子、森貞真太郎、川喜田英孝、大渡啓介	佐賀大学	フェノール性三脚状分子による希土類抽出に及ぼす置換基数の影響	第38回溶媒抽出討論会	2019年11月
7	大渡啓介、山本真士、森貞真太郎、川喜田英孝	佐賀大学	希土類金属の抽出のためのジホスホン酸型抽出試薬の開発	第38回溶媒抽出討論会	2019年11月
8	T. Yoshihara, Shintaro Morisada, Hidetaka Kawakita, Keisuke Ohto	Saga University	Extraction behavior of rare earth elements with new phenolic tripodal compound	The 32th International Symposium on Chemical Engineering	2019年12月
9	Keisuke Ohto	Saga University	Rare earth metals extraction with diphosphonic acid reagent (Keynote lecture)	ICST 2020	2020年9月
10	大渡啓介、淵脇菜子、森貞真太郎、川喜田英孝	佐賀大学	3種の異なる基体から成る抽出試薬による金属イオンの抽出挙動	化学工学会第52回秋季大会	2020年9月
11	川喜田英孝、山本真士、森貞真太郎、大渡啓介	佐賀大学	新規ジホスホン酸系抽出試薬の開発と希土類金属イオンの抽出	化学工学会第52回秋季大会	2020年9月
12	大渡啓介、淵脇菜子、森貞真太郎、川喜田英孝	佐賀大学	3種の骨格の異なるカルボン酸誘導体による金属の抽出挙動	第39回溶媒抽出討論会	2020年12月
13	田中雄大、古郷宏明、森貞真太郎、川喜田英孝、大渡啓介	佐賀大学	ジホスホン酸型キレート試薬の合成と希土類元素の抽出分離 (ポスター賞)	第58回化学関連支部合同大会	2021年7月



14	田中雄大、古郷宏明、森貞真太郎、川喜田英孝、大渡啓介	佐賀大学	ジホスホン酸型抽出試薬による希土類金属イオンの抽出分離	連合年会 2021 (第 40 回溶媒抽出討論会・第 37 回日本イオン交換研究発表会)	2021 年 10 月
15	Yudai Tanaka, Hiroaki Furugou, Shintaro Morisada, Hidetaka Kawakita, Keisuke Ohto	Saga University	EXTRACTION BEHAVIOR OF TRIVALENT RARE EARTH METAL IONS WITH DIPHOSPHONIC ACID TYPE EXTRACTANT	The 11th Joint Seminar between Liaoning University and Saga University -New Trends in Chemistry and Material Science	2021 年 11 月
16	渋谷彩美、古郷宏明、森貞真太郎、川喜田英孝、大渡啓介	佐賀大学	ジアミド型フェナントロリンによる希土類金属の抽出分離 (ポスター賞)	12. 第 58 回化学関連支部合同大会	2022 年 7 月
17	シモーネ マリー、小林徹、横山 啓一、矢板毅	日本原子力研究開発機構	Effect of the counterion on the selectivity of lanthanides by 1,10-phenanthroline carboxamide derivatives	International Solvent Extraction Conference (ISEC) 2022	2022 年 9 月
18	浅野永遠, 小林徹, 下条晃司郎, 山岡勢波 1, 鳥居蓮, 岡野健太郎, 矢板毅, 森 敦紀	神戸大学大学院工学研究科	触媒的 C-H アリール化を利用した多重縮環型 4 座フェナントロリンの合成とランタノイド抽出特性	溶媒抽出討論会	2022 年 11 月

## 研究開発項目③—2

### 【特許】

出願件数：2 件

### 【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	H. Konishi, H. Ono, E. Takeuchi, T. Nohira, T. Oishi	Osaka Univ., Kyoto Univ., AIST	Electrochemical Formation of Tb Alloys in Molten LiCl-KCl Eutectic Melts and Separation of Tb	Rare Metal Technology 2018 pp.89-97	有	2018 年 1 月
2	H. Konishi, H. Hua, H. Ono, Y. Koizumi, T. Oishi, T. Nohira	Osaka Univ., Univ. of Toyama, AIST, Kyoto Univ.	Electrochemical Formation of Dy-Fe and Nd-Fe Alloys in Molten CaCl <sub>2</sub> -LiCl Systems	ECS Transactions 86(14) pp. 321-328	有	2018 年 9 月
3	Y. Watanabe, Y. Norikawa, K. Yasuda, T. Nohira	Kyoto Univ.	Electrochemical Dy-Alloying Behaviors of Inconel and Hastelloy in Molten LiF-CaF <sub>2</sub> -DyF <sub>3</sub>	Materials Transactions, Vol. 60, 379-385	有	2019 年 3 月

4	T. Oishi, M. Yaguchi, Y. Katasho, T. Nohira	AIST, Kyoto Univ.	Separation of Neodymium and Dysprosium by Molten Salt Electrolysis Using an Alloy Diaphragm	Rare Metal Technology 2020, -, pp.151-156	有	2020年 2月
5	大石 哲雄	産総研	パイポーラー電極型合金隔膜を用いた希土類分離プロセスの開発	溶融塩および高温化学, 63-2, pp.78-83	有	2020年 5月
6	T. Oishi, M. Yaguchi, Y. Katasho, T. Nohira	AIST, Kyoto Univ.	Selective Permeation of Neodymium Through an Alloy Diaphragm in Molten Chloride Systems	ECS Transactions, 98-10, pp.27-32	有	2020年 10月
7	Y. Katasho, T. Oishi	AIST	Electrochemical Reduction Behavior of Boron in Molten LiCl-KCl-KBF4	ECS Transactions, 98, 53	有	2020年 10月
8	K. Yasuda, T. Enomoto, Y. Watanabe, T. Oishi, T. Nohira	Kyoto Univ., AIST	K. Yasuda, T. Enomoto, Y. Watanabe, T. Oishi, T. Nohira, Electrochemical Dy-Alloying Behaviors of Ni-Based Alloys in Molten LiF-CaF <sub>2</sub> -DyF <sub>3</sub> : Effects of Constituent Elements	Materials Transactions, Vol. 61, 2329-2335	有	2020年 12月
9	T. Oishi, M. Yaguchi, Y. Katasho, H. Konishi, T. Nohira	AIST, Osaka Univ., Kyoto Univ.	Selective Permeation of Dysprosium Through an Alloy Diaphragm in Molten Chloride Systems	JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, 167-, pp.163505-	有	2020年 12月
10	K. Kawaguchi, T. Nohira	Kyoto Univ.	Electrochemical Formation of Nd-Fe Alloys in Molten LiF-CaF <sub>2</sub> -NdF <sub>3</sub>	Journal of The Electrochemical Society, Vol. 168, 082503	有	2021年 8月
11	K. Yasuda, T. Oishi, T. Kagotani, K. Kawaguchi, M. Yaguchi, T. Enomoto, T. Nohira	Kyoto Univ., AIST	Electrochemical Dy-alloying behaviors of Ni-based alloys in molten LiF-CaF <sub>2</sub> -DyF <sub>3</sub> and LiCl-KCl-DyCl <sub>3</sub> : Effects of temperature and electrolysis potential	Journal of Alloys and Compounds, Vol. 889, 161605	有	2021年 8月
12	川口健次, 野平俊之	京大	廃ネオジム磁石からの希土類元素リサイクルを目的とした溶融 LiF-CaF <sub>2</sub> -NdF <sub>3</sub> 中における Nd-Fe 合金の電気化学的形成	溶融塩および高温化学, Vol.64, 118-126	有	2021年 9月
13	T. Oishi, M. Yaguchi, Y. Katasho, T. Nohira	AIST, Kyoto Univ.	Selective Permeation of Neodymium Through an Alloy Diaphragm in Molten Chloride Systems	JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, 168-, pp.103504-	有	2021年 10月
14	Y. Katasho, T. Oishi	AIST	Electrochemical Reduction Behavior of Boron in Molten LiCl-KCl-KBF4	JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, 168, 122503	有	2021年 12月
15	Y. Katasho, T. Oishi	AIST	In situ X-ray diffraction analysis of electrochemical Dy-Ni alloying in molten LiCl-KCl	ELECTROCHEMISTRY COMMUNICATIONS, Volume 138, 107287	有	2022年 5月
16	大石 哲雄	産総研	合金隔膜を用いた溶融塩電解によるレアアースのリサイクル	電気化学, 90-3, pp.251-255	無	2022年 9月
17	H. Konishi, T. Takao, T. Oishi, T. Nohira, Y. Koizumi	Osaka Univ., Kyoto Univ., AIST	Electrochemical Formation of Dy-Ni Alloys in a Molten Cesium Chloride System	ECS Transactions 109(14) pp. 3-9	有	2022年 9月
18	片所 優宇美, 大石 哲雄	産総研	ネオジム磁石のリサイクルプロセス開発を目的とした溶融 LiCl-KCl 浴中のホウ素の挙動解明および Dy-Ni 合金化の in-situ 分析	溶融塩および高温化学, Vol. 65-3, 104-110	有	2022年 09月

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	大石 哲雄	産総研	希土類元素の直接回収を目指した磁石リサイクルプロセスの開発	第9回リサイクル技術セミナー	2017年8月
2	大石 哲雄	産総研	高選択性電解による新しい磁石リサイクル技術の開発	近未来の資源循環社会の展望	2017年9月
3	大石 哲雄、矢口 未季	産総研	溶融塩と合金隔膜を用いた希土類分離・回収プロセスにおける隔膜材料の長寿命化	資源・素材学会	2017年9月
4	Hirokazu Konishi, Hideki Ono, Toshiyuki Nohira and Tetsuo Oishi	Osaka Univ., Kyoto Univ. and AIST	Electrochemical Formation of Dy and Nd Alloys Using Liquid Metal Electrodes in Molten LiCl-KCl Systems	The 232nd ECS Meeting	2017年10月
5	大石 哲雄、矢口 未季、安田 幸司、小西宏和、野平俊之	産総研、京大、阪大	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
6	渡邊祐作, 法川勇太郎, 安田幸司, 野平俊之	京大	LiF-CaF <sub>2</sub> -NdF <sub>3</sub> 中における鉄族合金の電気化学的生成	第49回溶融塩化学討論会	2017年11月
7	大石 哲雄、矢口 未季、安田 幸司、小西宏和、野平俊之	産総研、京大、阪大	溶融 LiCl-KCl 中における各種酸化物と希土類イオンとの反応	溶融塩化学討論会	2017年12月
8	渡邊祐作, 法川勇太郎, 安田幸司, 大石哲雄, 野平俊之	京大, 産総研	LiF-CaF <sub>2</sub> -DyF <sub>3</sub> 中におけるジスプロシウム-鉄族合金の電気化学的生成	電気化学会第85回大会	2018年3月
9	大石 哲雄、矢口 未季、安田 幸司、小西宏和、野平俊之	産総研、京大、阪大	溶融塩と合金隔膜を用いた希土類分離プロセスにおける合金隔膜の長寿命化	電気化学会春季大会	2018年3月
10	Hirokazu Konishi, Hideki Ono, Eiichi Takeuchi, Toshiyuki Nohira and Tetsuo Oishi	Osaka Univ., Kyoto Univ. and AIST	Electrochemical Formation of Tb Alloys in Molten LiCl-KCl Eutectic Melts and Separation of Tb	2018 TMS Annual Meeting & Exhibition	2018年3月
11	Hirokazu Konishi, Hang Hua, Hideki Ono, Tetsuo Oishi, Kouji Yasuda and Toshiyuki Nohira	Osaka Univ., Kyoto Univ. and AIST	Electrochemical Formation of Dy Alloys in a Molten CaCl <sub>2</sub> -LiCl System	The 233rd ECS Meeting	2018年5月
12	Kouji Yasuda, Yusaku Watanabe, Yutaro Norikawa, Tetsuo Oishi and Toshiyuki Nohira	Kyoto Univ., AIST	Electrochemical Formation of RE-Iron Group Metal Alloys in Molten LiF-CaF <sub>2</sub> -REF <sub>3</sub> (RE = Nd, Dy)	The 6th International Round Table on Titanium Production in Molten Salts (Ti-RT2018)	2018年6月
13	渡邊祐作, 法川勇太郎, 安田幸司, 大石哲雄, 野平俊之	京大, 産総研	溶融フッ化物中におけるジスプロシウム-鉄族合金の電気化学的生成	第80回マテリアルズ・テラリング研究会	2018年7月
14	Hang Hua, Hirokazu Konishi, Toshiyuki Nohira, Yuichiro Koizumi, Hideki Ono and Tetsuo Oishi	Osaka Univ., Univ. of Toyama, Kyoto Univ. and AIST	Electrochemical Behaviors of Dy(III) and Nd(III) Using Fe Electrodes in Molten CaCl <sub>2</sub> -LiCl Systems	第80回マテリアルズ・テラリング研究会	2018年7月

15	Hirokazu Konishi, Hang Hua, Hideki Ono, Tetsuo Oishi and Toshiyuki Nohira	Osaka Univ., Univ. of Toyama, AIST and Kyoto Univ.	Dy Permeation through an Alloy Diaphragm Using Molten Salt Electrolysis	Extraction 2018	2018年8月
16	大石 哲雄、矢口 未季、安田幸司、小西宏和、野平俊之	産総研、京大、阪大	溶融塩と合金隔膜を用いた希土類分離・回収プロセスによるNdとDyの分離試験	資源・素材学会	2018年9月
17	大石 哲雄	産総研	廃磁石から希土類元素を直接分離・回収するプロセスを目指して	名古屋駅前イノベーションハブ技術シーズ発表会	2018年9月
18	Hirokazu Konishi, Hang Hua, Hideki Ono, Yuichiro Koizumi, Tetsuo Oishi and Toshiyuki Nohira	Osaka Univ., Univ. of Toyama, AIST and Kyoto Univ.	Electrochemical Formation of Dy-Fe and Nd-Fe Alloys in Molten CaCl <sub>2</sub> -LiCl Systems	AiMES2018(ECS and SMEQ Joint International Meeting)	2018年10月
19	大石 哲雄	産総研	産総研におけるリサイクル研究と溶融塩技術を用いた研究事例紹介	平成30年度第7回溶融塩技術事業化研究会	2018年10月
20	渡邊祐作, 法川勇太郎, 安田幸司, 大石哲雄, 野平俊之	京大, 産総研	溶融 LiF-CaF <sub>2</sub> -REF <sub>3</sub> (RE = Nd, Dy)中におけるハステロイ-RE合金の電気化学的生成	第50回溶融塩化学討論会	2018年11月
21	華航、小西宏和、小泉雄一郎、野平俊之、安田幸司、大石哲雄	大阪大学、京都大学、産業技術総合研究所	溶融 CaCl <sub>2</sub> -LiCl 中における RE(Dy, Nd)-Fe 合金の電解生成	第50回溶融塩化学討論会	2018年11月
22	大石 哲雄、矢口 未季、小西宏和、安田幸司、野平俊之	産総研、京大、阪大	溶融塩と合金隔膜を用いた希土類回収プロセスによる希土類元素の相互分離試験	溶融塩化学討論会	2018年11月
23	安田幸司, 渡邊祐作, 法川勇太郎, 大石哲雄, 野平俊之	京大, 産総研	溶融塩電解と合金隔膜を用いた希土類磁石のリサイクルプロセスの開発	第42回電解技術討論会	2018年11月
24	渡邊祐作, 法川勇太郎, 安田幸司, 大石哲雄, 野平俊之	京大, 産総研	フッ化物溶融塩中における希土類合金の電気化学的生成と新規リサイクル法への応用	平成30年度第3回関西電気化学研究会	2018年12月
25	T. Oishi	AIST	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
26	大石 哲雄、矢口 未季	産総研	溶融塩と合金隔膜を用いた希土類回収プロセスにおける合金隔膜内の元素分布	電気化学会春季大会	2019年3月
27	Hirokazu Konishi, Hang Hua, Tetsuo Oishi, Toshiyuki Nohira and Yuichiro Koizumi	Osaka Univ., AIST and Kyoto Univ.	Electrochemical Formation of Dy-Ni Alloys in a Molten CaCl <sub>2</sub> System	MS11(11th International Symposium on Molten Salts Chemistry and Technology)	2019年5月
28	T. Oishi	AIST	Electrochemical separation of Dy and Nd using an alloy diaphragm and molten salt	NGRC2019	2019年6月
29	片所 優宇美、安田幸司、野平俊之、大石 哲雄	産総研、京大	溶融 NaCl-CaCl <sub>2</sub> -CaO 中のホウ素の電気化学挙動	第16回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会	2019年8月
30	大石 哲雄、矢口 未季、片所 優宇美、野平俊之	産総研、京大	溶融塩と合金隔膜を用いたプロセスによるNdとDyの分離	資源・素材学会	2019年9月

31	大石 哲雄、矢口 未季、片所 優宇美、野平俊之	産総研、京大	溶融塩と合金隔膜を用いた Nd 選択透過の試み	溶融塩化学討論会	2019 年 10 月
32	T. Oishi, M. Yaguchi, Y. Katasho, T. Nohira	AIST, Kyoto Univ.	Separation of Neodymium and Dysprosium by Molten Salt Electrolysis Using an Alloy Diaphragm	TMS2020	2020 年 2 月
33	片所 優宇美、大石 哲雄	産総研	LiCl-KCl ベース浴における B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> の電解還元挙動	資源・素材学会 2020 年度 春季大会	2020 年 3 月
34	安田幸司、野平俊之	京大	シリコン製造ならびに希土類リサイクルへ向けた新規な溶融塩電解法	第 31 回電解プロセス研究会	2020 年 9 月
35	Yumi Katasho, Tetsuo Oishi	AIST	Electrochemical Reduction Behavior of Boron in Molten LiCl-KCl-KBF <sub>4</sub>	PRiME 2020	2020 年 10 月
36	T. Oishi, M. Yaguchi, Y. Katasho, T. Nohira	AIST, Kyoto Univ.	Selective Permeation of Neodymium Through an Alloy Diaphragm in Molten Chloride Systems	PRiME2020	2020 年 10 月
37	大石 哲雄、矢口 未季、片所 優宇美	産総研	合金隔膜を用いた分離プロセスによる Nd および Dy の同時分離	第 52 回溶融塩化学討論会	2020 年 11 月
38	片所 優宇美、大石 哲雄	産総研	溶融 LiCl-KCl 中における Ni-Dy 合金形成過程の in situ 白色 X 線回折測定	資源・素材学会 2021 年度 春季大会	2021 年 3 月
39	片所 優宇美、大石 哲雄	産総研	放射光による 450°C 溶融 LiCl-KCl 中における Ni-Dy 合金形成過程の in situ 測定	電気化学会第 88 回大会	2021 年 3 月
40	高尾竜弥、小西宏和、小泉 雄一郎	大阪大学	溶融 CsCl 中における Dy-Ni 合金の電解形成	日本金属学会 2021 年秋期 (第 169 回) 講演大会	2021 年 9 月
41	片所 優宇美、大石 哲雄	産総研	溶融 LiCl-KCl 中における Ni-Dy 合金化・脱合金化反応の in-situ 白色 X 線回折測定	2021 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会	2021 年 9 月
42	川口健次、野平俊之	京大	廃ネオジム磁石からの希土類元素リサイクルを目的とした溶融 LiF-CaF <sub>2</sub> -NdF <sub>3</sub> 中における Nd-Fe 合金の電気化学的生成	溶融塩委員会第 206 回 定例委員会	2021 年 9 月
43	Toshiyuki Nohira, Kenji Kawaguchi, Tomomi Kagotani, Kouji Yasuda, Hirokazu Konishi, Tetsuo Oishi	Kyoto Univ., Osaka Univ., AIST	A Novel Electrochemical Recycling Method for Rare Earth Metals from Scrap Magnets Using Molten Salt Electrolysis and Alloy Diaphragms	240th ECS Meeting	2021 年 10 月
44	川口健次、野平俊之	京大	溶融 LiF-CaF <sub>2</sub> -DyF <sub>3</sub> 中における Dy-Fe 合金の電気化学的生成	第 53 回溶融塩化学討論会	2021 年 11 月
45	高尾竜弥、小西宏和、小泉 雄一郎	大阪大学	溶融 CsCl 中における Nd-Ni 合金の電解形成	第 53 回溶融塩化学討論会	2021 年 11 月
46	片所 優宇美、大石 哲雄	産総研	溶融 LiCl-KCl 中における Ni-Dy 合金化・脱合金化過程の in-situ 白色 X 線回折測定	第 53 回溶融塩化学討論会・第 7 回アジア溶融塩化学技術合同会議	2021 年 11 月
47	川口健次、野平俊之	京大	溶融 LiF-CaF <sub>2</sub> -REF <sub>3</sub> (RE = Nd or Dy) 中における RE-Fe 合金の電気化学的生成	第 45 回電解技術討論会	2021 年 12 月

48	高尾竜弥, 小西宏和, 小泉雄一郎	大阪大学	熔融 CsCl 中における Dy-Ni, Nd-Ni 合金の電解形成と Dy の分離	日本金属学会 2022 年春季 (第 170 回) 講演大会	2022 年 3 月
49	大石 哲雄	産総研	リチウムイオン電池リサイクルの課題と研究動向	第 62 回電気化学セミナー	2022 年 7 月
50	高尾竜弥, 小西宏和, 小泉雄一郎	大阪大学	700℃の熔融 CsCl 中における Dy-Ni, Nd-Ni 合金の電解形成と Dy の分離	第 92 回マテリアルズ・テラリング研究会	2022 年 8 月
51	藤井大河, 小西宏和, 小泉雄一郎	大阪大学	熔融塩電解と液体金属を用いた Nd 磁石からの Dy と Nd の分離	第 92 回マテリアルズ・テラリング研究会	2022 年 8 月
52	片所 優宇美, 大石 哲雄	産総研	ネオジム磁石のリサイクルプロセス開発を目的とした熔融 LiCl-KCl 浴中のホウ素の挙動解明および Dy-Ni 合金化の in-situ 分析	熔融塩委員会 第 209 回 定例委員会	2022 年 9 月
53	片所 優宇美, 大石 哲雄	産総研	熔融 LiCl-KCl-NdCl <sub>3</sub> 浴中における Cu-Nd 合金化	第 54 回熔融塩化学討論会	2022 年 9 月
54	高尾竜弥, 榑部脩那, 小西宏和, 奥川将行, 小泉雄一郎	大阪大学	熔融 CsCl-LiCl 中における Dy-Ni 合金の電解形成と DyNi <sub>2</sub> の成長速度に対する Li <sup>+</sup> の効果	第 54 回熔融塩化学討論会	2022 年 9 月
55	藤井大河, 小西宏和, 小泉雄一郎	大阪大学	973 K の熔融 CsCl 中における Dy-Zn および Nd-Zn 合金の電解形成	第 54 回熔融塩化学討論会	2022 年 9 月
56	Yumi Katasho, Tetsuo Oishi	AIST	Separation and Recovery of Nd and Dy from Spent Magnets using Molten Salt and Alloy Diaphragms	Raw Materials Week	2022 年 11 月
57	高尾竜弥, 榑部脩那, 小西宏和, 奥川将行, 小泉雄一郎	大阪大学	熔融 CsCl-LiCl 中における Dy-Ni 合金の電解形成	日本鉄鋼協会・日本金属学会 関西支部 令和 4 年度第 2 回鉄鋼プロセス研究会・材料化学研究会 学生発表会	2022 年 12 月
58	大石 哲雄	産総研	熔融塩電解と合金隔膜を用いたレアアースの相互分離	電解科学技術委員会	2023 年 1 月
59	大石 哲雄	産総研	リチウムイオン電池リサイクルの課題と研究動向	JASIS 関西 2023 トピック スセミナー	2023 年 2 月
60	片所 優宇美, 大石 哲雄	産総研	単一工程での希土類磁石リサイクル	GZR 研究報告会	2023 年 2 月
61	川口健次, 野平俊之	京大	熔融 LiF-CaF <sub>2</sub> -NdF <sub>3</sub> -DyF <sub>3</sub> 中における Nd-Dy-Fe 合金の電気化学的形 成	電気化学会第 90 回大会	2023 年 3 月

(b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	産総研	都市鉱山を掘りおこす③	毎日小学生新聞	2022 年 5 月
2	産総研	Electrochemical Reduction Behavior of Boron in Molten LiCl-KCl-KBF <sub>4</sub>	Advances in Engineering 社の Key Scientific Article に掲載	2022 年 8 月

研究開発項目④

【特許】

特記事項無

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Ryosuke Yokoi (産総研), Jun Nakatani (東大), Hiroki Hatayama (産総研), Yuichi Moriguchi (環境研)	産総研、東京大学、環境研	Spatial and in-product density characterization of in-use copper stocks in Japan for stock recyclability assessment	Resour. Conserv. Recycl. 190, 106764.	有り	2022/11
2	Shigeki Koyanaka and Kenichiro Kobayashi	産総研	Sensor-Based Sorting of Waste Digital Devices by CNN-Based Image Recognition using Composite Images Created from Mass and 2D/3D Appearances	Journal of Materials Cycles and Waste Management, 25(2), pp.851-862, 2023, 2022.12.15, <a href="https://doi.org/10.1007/s10163-022-01565-9">https://doi.org/10.1007/s10163-022-01565-9</a>	有り	2022/12
3	Naohito Hayashi, Shigeki Koyanaka and Tatsuya Oki	産総研	Verification of Algorithm for Automatic Detection of Electronic Devices Mounted on Waste Printed Circuit Boards	Journal of the Air & Waste Management Association, 72 (5), 420-433.	有り	2022/4
4	Ryosuke Yokoi (産総研), Jun Nakatani (東大), Hiroki Hatayama (産総研), Yuichi Moriguchi (環境研)	産総研、東京大学、環境研	Dynamic analysis of in-use copper stocks by the final product and end-use sector in Japan with implication for future demand forecasts	Resour. Conserv. Recycl. 180, 106153. <a href="https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106153">https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106153</a> .	有り	2022/7
5	林直人	産総研	主要な金属のリサイクル状況と水平リサイクル促進の取り組み	環境技術会誌, 188 (7), 191-193.	有り	2022/7
6	Jun Katagiri (物質材料研究機構), Shigeki Koyanaka, Naohito Hayashi, Takao Ueda (産総研)	物質材料研究機構、産総研	Optimum design using genetic algorithm and discrete-element method: Application to vibration feeder design for E-waste recycling automation	環境資源工学 69 (3), pp.133-141	有り	2023/2

【外部発表】

## (a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	大木達也	産総研	資源循環促進に向けた物理選別技術開発の将来	日本学術会議 第 34 回環境工学連合講演会	2022/5
2	上田高生, 古屋仲茂樹, 大木達也	産総研	透過 X 線撮影及び深層学習による廃製品内のバッテリー検出	資源・素材 2022 (福岡)	2022/9
3	林直人	産総研	廃製品無人選別システムのための廃プリント基板の価値推定	資源・素材学会 2022 年度秋季大会 (福岡)	2022/9
4	上田高生	産総研	透過 X 線及びビデュープリンングによる廃棄物・廃製品内の LIB 検出	SURE コンソーシアム第 23 回リサイクル技術セミナー	2022/12
5	古屋仲茂樹	産総研	CEDEST システム 製品ソータ/モジュールソータ開発	産総研エネルギー・環境シンポジウム「情報連携と無人選別システムが創る次世代資源循環」	2022/12
6	大木達也	産総研	情報連携と無人選別システムが創る次世代資源循環	産総研シンポジウム 情報連携と無人選別システムが創る次世代資源循環	2022/12
7	永野和也	佐藤鉄工	CEDEST システム 自動解体装置/基板剥離装置開発	産総研シンポジウム 情報連携と無人選別システムが創る次世代資源循環	2022/12
8	中川友喜美	大栄環境	CEDEST システム データベース構築/スマホ急速冷却	産総研シンポジウム 情報連携と無人選別システムが創る次世代資源循環	2022/12
9	松本光崇	産総研	製品フロー・マテリアルフロー・環境負荷の分析および静脈プロセスモデルの構築	産総研シンポジウム 情報連携と無人選別システムが創る次世代資源循環	2022/12
10	大木達也	産総研	CEDEST システム システムの概要とトランスフォーマブル選別システムの機構	SURE コンソーシアム第 24 回リサイクル技術セミナー	2023/3
11	古屋仲茂樹	産総研	製品ソータおよびモジュールソータ	SURE コンソーシアム第 24 回リサイクル技術セミナー	2023/3
12	上田高生	産総研	スマートフォン解体システムおよび電子部品剥離装置	SURE コンソーシアム第 24 回リサイクル技術セミナー	2023/3

## (b) 新聞・雑誌等への掲載

番号	発表者	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	大木達也	産総研	産総研シンポジウム「情報連携と無人選別が創る次世代資源循環」	鉄鋼新聞	2022/12
2	大木達也	産総研	スマホの希少金属、効率回収 産総研、自動化ライン磨く	日経産業新聞	2023/1
3	大木達也	産総研	スマホの希少金属、効率回収 産総研、自動化ライン磨く	日経サイエンス	2023/1

## (c) その他

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	産総研	(主催シンポジウム) 産総研シンポジウム 情報連携と無人選別システムが創る次世代資源循環(オンライン)	産総研シンポジウム 情報連携と無人選別システムが創る次世代資源循環	2022/12