

「高度循環型システム構築に向けた 廃電気・電子機器処理プロセス基盤技術開発」

研究開発項目①「資源循環性高度化プロセス技術開発」
研究開発項目②「情報連携システム開発」

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 サーキュラーエコノミー部
-----	---

更新履歴

更新日	更新内容
2025 年 5 月 20 日	初版作成

目次

概 要	概要-1
プロジェクト用語集	プロジェクト用語集-1
1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋	1-1
1.1. 事業の位置づけ・意義	1-1
1.2. アウトカム達成までの道筋	1-4
1.3. 知的財産・標準化戦略	1-4
2. 目標及び達成状況.....	2-1
2.1. アウトカム目標及び達成見込み	2-1
2.2. アウトプット目標及び達成状況	2-1
3. マネジメント.....	3-1
3.1. 実施体制	3-1
3.2. 受益者負担の考え方	3-2
3.3. 研究開発計画	3-2
4. 目標及び達成状況の詳細	4-1
4.1. 研究開発項目①：資源循環性高度化プロセス技術開発	4-1
4.2. 研究開発項目②：情報連携システム開発	4-64
添付資料.....	添付資料-1
●プロジェクト基本計画	添付資料-1
●関連する施策や技術戦略.....	添付資料-12
●プロジェクト開始時関連資料	添付資料-13
●各種委員会開催リスト	添付資料-14
●特許論文等リスト	添付資料-15

概 要

プロジェクト名	NEDO プロジェクト名：高度循環型システム構築に向けた廃電気・電子機器処理プロセス基盤技術開発 METI 予算要求名称：資源自律経済システム開発促進事業/高度循環型システム基盤構築	プロジェクト番号	P23002
担当推進部/ プロジェクトマネージャーまたは担当者 及び METI 担当課	【プロジェクトマネージャー (PM)】 今西 大介 2023 年 4 月～現在 【プロジェクト担当者】 石井 聖士 2023 年 4 月～2024 年 6 月 須藤 俊吉 2023 年 4 月～2025 年 3 月 坂本 友樹 2024 年 7 月～現在 石田 弘徳 2025 年 3 月～現在 【METI 担当課】 イノベーション・環境局 GX グループ 資源循環経済課		
0. 事業の概要	世界経済の成長に伴う国際的な資源需要の増加や、地球温暖化をはじめとする環境問題の深刻化を背景として、線形経済から循環経済への転換が求められている。我が国では、環境活動としての 3R の取り組みを最大化するため、経済産業省が 1999 年に「循環経済ビジョン」を策定したが、上述のように資源循環は環境活動としてではなく循環経済という経済活動として捉える必要があることから、新たに「循環経済ビジョン 2020」を 2020 年 5 月に策定し、2023 年 3 月に「成長志向型の資源自律経済戦略」を取り纏めている。これらの中で、動脈産業には産業廃棄物の排出者としての役割（排出者責任）に加え、リサイクルまで含めた循環システム構築の役割を、静脈産業にはあらゆる使用済製品を可能な限り高度な素材として再生し動脈産業に供給する「リソーシング産業」としての役割を担うことが期待されている。また、再生材の利用拡大には動静脈のコミュニケーションの円滑化が重要であるとしている。 本事業では、多様な廃家電製品を対象に、貴金属・銅、レアメタル、ベースメタル、プラスチック等の資源を余すことなく循環利用が可能となる基盤技術確立することで、経済活動と環境負荷低減を両立した循環経済関連産業の創出・成長促進を目指す。さらに、静脈産業は依然として労働集約的な側面が残っているため、将来的な人口減少を踏まえれば自動化プロセスへの転換は不可欠であり、効率的なリサイクルに向けた回収・解体・分別技術の高度化を進めるものである。		
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	■循環経済ビジョン 2020(2020. 5. 22 経済産業省) より引用 V. 我が国としての対応の方向性 3. レジリエントな循環システムの早期構築 (1) 国内循環システムの最適化とそのためのリサイクル先の質的・量的確保 「最大限の国内循環を実現していく上で、資源投入の最適化と循環利用の拡大を進め、これらを最大限バランスさせていくことが必要である。とりわけ、あらゆる製品がいずれは廃棄物等の形で排出されることを踏まえれば、リサイクル技術の高度化・多角化とそのキャパシティ（リサイクル受入可能量）を確保していくことが不可欠である。」 「リサイクル技術の高度化・多角化を検討していくにあたっては、ベースメタル（鉄、アルミ、銅等）、セメント、紙、ガラス、プラスチック等の主要素材について、改めて今後の需給見通しや再生材の利用可能性について評価・分析をしていくことが重要である。」 ■2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(2021. 6. 18 経済産業省) より引用 (13) 資源循環関連産業国 ②リユース、リサイクル・排ガスの活用 ＜今後の取り組み＞ 「リサイクルについては、更なる再生利用拡大に向け、リサイクル性の高い高機能素材やリサイクル技術の開発・高度化、回収ルートの最適化、設備容量の拡大に加え、再生利用の市場拡大を図る。」 本事業では、多様な廃家電製品を対象に、貴金属・銅、レアメタル、ベースメタル、プラスチック等の資源を余すことなく循環利用が可能となる基盤技術確立することで、経済活動と環境負荷低減を両立した循環経済関連産業の創出・成長促進を目指す。さらに、静脈産業は依然として労働集約的な側面が残っているため、将来的な人口減少を踏まえれば		

	自動化プロセスへの転換は不可欠であり、効率的なリサイクルに向けた回収・解体・分別技術の高度化を進めるものである。 これらの政策に基づき、循環経済関連産業の創出・成長促進と、効率的なリサイクルに向けた回収・解体・分別技術の高度化を進めるものである。		
1.2 アウトカム達成までの道筋	小型電気電子機器製品の効率的なリサイクルを行うために、製品解体システム開発と再生材多様化に向けた革新的選別システムの開発を進める事で、既存装置との互換性を念頭に置きながら複雑多様化している処理システム・設備の汎用化を進めることで、多くの処理工場での導入促進を図る。これにより小型電気電子機器の品種・製品ごとの高度解体や選別、素材や部品の回収率向上を目指し、リサイクルが進むことにより静脈側からの再生素材の供給ポテンシャルを拡大し、再生素材を利用する事による CO2 排出量削減を見込む。 また、データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発と再生材流通高度化に向けた基盤技術開発では、製品のリサイクル性の評価を行う事により易解体性やリマニュファクチュアリングに関わる製品設計情報として小型電気電子機器製造メーカーへフィードバックする事でモノづくりを変革する。ここで得られた設計情報等を基に、リサイクル工場では適切な設備設計が可能となり、製品別のリサイクル効率が予測できることからリサイクル素材の安定供給が見込まれ、資源循環での動静脈の連携を構築し産業競争力の強化へとつなげる。これにより小型電気電子機器製品の市場で、リサイクル性能情報を活用した小型電気電子機器製品への展開と、それを処理する施設への設備投資としての経済効果を見込む。		
1.3 知的財産・標準化戦略	本研究開発での成果の知的財産の扱いとして、競争領域では処理設備・装置群のモジュール化に関しての各種情報を業界のデファクトスタンダードとなるように公開領域とする。また、処理施設を構成するモジュールの各種制御アルゴリズムやセンシングに関わる設定条件等は本技術開発の成果の適切な利用を非公開としたオープンクローズ戦略を進める。また、本研究開発を推進する上で、事業者の所有するバックグラウンド特許を足掛かりとして権利範囲の拡大を行う。		
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	■目標 本事業における成果を基にした再生材取得プロセスの高効率化による再生材利用率の向上、これによる新規素材使用の回避等の効果により、2035 年における CO2 削減貢献として 226 万 t/年を目指す。また、本プロジェクトで得られる各種装置もしくはシステム等の成果の実用化により、2035 年における国内外の循環経済関連市場で、10%以上の新規シェア獲得により、0.9 兆円/年以上の規模の貢献を目指す。 ■達成見込み 本事業におけるアウトプット目標は、小型電気電子製品 6 品種の自動解体であり、各素材への選別を行う処理設備の能力は事業終了時で 10t/日（設計仕様）を見込んでおり、2035 年での CO2 削減への貢献として再生処理により 42 万トンが資源循環されることを想定した設備設計に繋げる取り組みは予定通り順調である。 また、製品構造解析、データ蓄積をする事で小型電気電子製品の易解体設計やリマニュファクチュアリングを進め、また設計情報を処理設備でも活用する事で効率的な素材リサイクルが実現できる見通しである。特に処理施設での実運用を見込んだ動作検証や想定される長時間の稼働検証についても取組は予定通りであり、新規に設計される小型電気電子機器の製造や処理設備投資での経済効果を見込む。		
2.2 アウトプット目標及び達成状況	効率的なリサイクルに向けた回収・解体・分別技術の高度化を進めるため、多様な廃家電製品を対象に、貴金属・銅、レアメタル、ベースメタル、プラスチック等の資源を余すことなく循環利用が可能となる基盤技術を構築するための研究開発を推進する。		
	研究開発項目		達成状況
	①資源循環性高度化プロセス技術開発	(1)製品解体システム開発	解体すべき廃製品のうち、廃製品 3 品種に対して、複数想定される解体手法の判断において正答率 7 割を達成する。自律的な解体システムについて、限られた情報から解体動作を再現するための要素技術を確立し、解体手法毎に生産性（処理速度、正確さ・精度等）のベンチマークとなる比較対象を特定する。
(2)再生材多様化に向けた革新的選別システム開発		破碎物を対象にした選別装置の制御技術について、選別条件を提示可能な仮想環境を構築する。これらを実現する選別装置の最適化について、1t/日級の選別装置群を備えた選別システムを導入する。	○ 2026 年 3 月に達成見込み

		②情報連携システム開発	(1)データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発	解体・選別等の処理プロセスの要素データと要求水準を設定し、製品3品種に対してデータセットの完成例を示す。要素データの取得について、従来に対して1/10以下の時間でデータ取得が可能な分析・計測システムの手法を示す。また、資源循環性のデータベース上の評価指標候補について、各指標の試算手法を含め整理する。	○ 2026年3月に達成見込み
			(2)再生材流通高度化に向けた基盤技術開発	小型家電の回収実態と再生材需要のニーズを把握し、再生材の安定供給に向け目指すべき供給水準を整理する。資源循環シナリオにおいて、回収、供給、需要の3種類の拠点による最適化が可能な評価手法の基本設計を完了する。この際、リサイクル工場のモデルプラントの連続試験に向け、再生材原料の供給性能モニタリングが可能となる情報連携機能を整備する。	○ 2026年3月に達成見込み
3. マネジメント					
3.1 実施体制		プロジェクトマネージャー	今西 大介		
		プロジェクトリーダー	■プロジェクトリーダー（テーマ代表兼務） 大木 達也 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 首席研究員 同 SURE コンソーシアム 会長 ■テーマ代表 ・小林 宏 学校法人 東京理科大学 工学部機械工学科 教授 ・林 直人 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 研究グループ長 ・松田 源一郎 パナソニック ホールディングス株式会社 マニファクチャリングイノベーション本部 マニファクチャリングイノベーションセンター		
		委託先	研究開発項目①「資源循環性高度化プロセス技術開発」 国立研究開発法人産業技術総合研究所 学校法人東京理科大学 金城産業株式会社 株式会社菊池製作所 佐藤鉄工株式会社 大栄環境株式会社 パナソニックホールディングス株式会社 三井金属鉱業株式会社 株式会社リーテム (再委託先) 国立大学法人秋田大学 国立大学法人大阪大学 国立大学法人東京大学 国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学 国立大学法人北海道大学 学校法人東京理科大学 ARAKE 生産設計株式会社 パナソニック株式会社 三菱マテリアル株式会社 研究開発項目②「情報連携システム開発」 国立研究開発法人産業技術総合研究所 佐藤鉄工株式会社 大栄環境株式会社 株式会社サトー		

		パナソニックホールディングス株式会社 株式会社野村総合研究所 (再委託先) 国立大学法人東京大学 学校法人東京理科大学				
3.2 受益者負担の考え方	主な実施事項	2023fy	2024fy	2025fy		
	研究開発項目① 資源循環性高度化プロセス技術開発	委託	委託	委託		
	研究開発項目② 情報連携システム開発	委託	委託	委託		
3.3 研究開発計画						
事業費推移 [単位:百万円]	主な実施事項	2023fy	2024fy	2025fy		総額
	研究開発項目① 資源循環性高度化プロセス技術開発	254	927	1,330		2,511
	研究開発項目② 情報連携システム開発	151	413	484		1,048
	事業費	2023fy	2024fy	2025fy		総額
	会計(特別)	680	1,100	1,914		3,694
	追加予算	0	152	0		152
	総 NEDO 負担額	405	1,340	1,813		3,558
情勢変化への対応	・リチウム蓄電池等の適正処理(2025年4月15日) 市町村におけるリチウム蓄電池等の適正処理に関する方針と対策(環境省)において、「火災事故等を防ぐためには、破砕機への投入前に X 線検出や、風力、磁力を用いた機械選別等によってリチウム蓄電池を取り除く事が有効である」との通達が発せられた。 ・対応 本事業では製品解体・分解システム開発において、破砕工程前でのリチウム蓄電池内蔵の小型電気電子機器の選別を行う事を想定しており、また再生材流通高度化に向けた基盤技術開発では、小型電気電子機器に内蔵されたリチウム蓄電池の安全な取り外しに関わる技術検討も推進しており、廃棄物処理施設での適用が可能なリチウム蓄電池処理方法を継続検討する。					
中間評価結果への対応	ー					
評価に関する事項	事前評価	2022 年度実施 担当部 サーキュラーエコノミー部(旧環境部)				
	中間評価	2025 年度 中間評価実施				
	終了時評価	2028 年度 終了時評価実施予定				
別添						
投稿論文	0 件、(その他)研究発表・講演 14 件					
特 許	2 件(出願済み)					
その他の外部発表 (プレス発表等)	・国際的に競争領域の開発のため、基礎研究を除き、知財に係る詳細な開発技術の公表は控えている。 ・モデルプラントの稼働に関し、今夏、プレスリリース予定。					
	作成時期	2022 年 12 月 作成				

	基本計画に関する 事項	変更履歴	無し
--	----------------	------	----

プロジェクト用語集

用語	説明
力覚フィードバック	ユーザーやシステムに対して力や触覚情報を伝達する技術。ロボット制御や VR/AR デバイスに応用され、操作者が遠隔操作するロボットの触覚を感じることが可能。力覚フィードバックを実装するためには、力覚センサやアクチュエータを組み合わせる必要がある。
マニピレータ	物体をつかみ、持ち上げ、移動させるためのロボットアーム。固定型や移動型があり、関節数や自由度に応じて異なる動作が可能。
双腕ロボット	双腕（2 本のアーム）を持つロボットで、人間の両手のように協調動作を行うことが可能。従来の単腕ロボットに比べ、より複雑な作業を行うことができる。特に、組み立てや繊細な操作が求められる作業に適している。
力覚センサ	ロボットが受ける力を測定するセンサ。6 軸力覚センサ（3 軸の力+3 軸のトルク）を用いることで、精密な作業や安全な協働作業が可能になる。
距離センサ	物体との距離を測定するセンサ。測定方式として、超音波、レーザー（LiDAR）、ToF、赤外線方式がある。ロボットの障害物回避、環境認識、自動運転に利用される。
模範学習	人間や他のエージェントの動作をデータとして収集し、機械学習を通じてロボットが模倣する手法。
SLAM	ロボットが自己位置を推定しながら、未知の環境の地図を作成する技術。
LiDAR	レーザーを用いて周囲の距離情報を取得し、3D マップを作成する技術。
ピン配列グripper	多数の可動ピンを備え、対象物の形状に応じてピンの高さが変化する適応型グripper。異形物の把持が可能で、食品や医療分野での応用が進んでいる。
真空吸引グripper	吸盤を用いて負圧を発生させ、物体を吸着するグripper。重量物やガラス、紙の搬送に適している。
平行グripper	2 枚の爪が平行に移動し、物体を挟み込むシンプルなグripper。エア駆動式や電動式があり、産業用ロボットで最も広く利用されている。
OH ラジカル	ヒドロキシルラジカル（hydroxyl radical）のことで、活性酸素と呼ばれる分子種の中で最も酸化力が強く、あらゆる有機化合物と反応する。寿命は短く、反応性は温度との相関性を持つと考えられている。
単体分離	ある粒子が単成分で構成されている粒子状態。単体分離している粒子を単体分離粒子と呼ぶのに対し、複数の成分で構成される粒子を片刃粒子（あるいは複合粒子）と呼ぶ。
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。
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。
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。
エアテーブル	傾斜させた網目状のデッキを左右に往復振動させ、そのデッキの底部から送風することにより混合物を選別する乾式比重選別装置。
乾式	水などの液体を使用せず大気中で操作する方法。対して、水などの液体を使用する方法を湿式と呼ぶ。
ネルソン選別機	高速回転する選別容器に選別対象粒子(混合物)を含むスラリー(懸濁液)を投入し、粒子の比重差によって生じる遠心力差によって選別する湿式比重選別装置。
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 ($\Phi 1$ 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)。
CAMP	Comprehensive Analyzer for Mineral Processing の略。産総研と日本電子(株)で共同開発した鉱物分析用 SEM-EDX ベース単体分離分析装置。
CEDEST システム	先行事業(NEDO「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業」(2017/6～2023/2)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「CEDEST システム」と称す。

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

1.1. 事業の位置づけ・意義

＜政策的な重要性＞

世界経済の成長に伴う国際的な資源需要の増加や、地球温暖化をはじめとする環境問題の深刻化を背景として、線形経済から循環経済への転換が求められている。我が国では、環境活動としての3Rの取り組みを最大化するため、経済産業省が1999年に「循環経済ビジョン」を策定したが、上述のように資源循環は環境活動としてではなく循環経済という経済活動として捉える必要があることから、新たに「循環経済ビジョン2020」を2020年5月に策定している。この中で、動脈産業には産業廃棄物の排出者としての役割（排出者責任）に加え、リサイクルまで含めた循環システム構築の役割を、静脈産業にはあらゆる使用済製品を可能な限り高度な素材として再生し動脈産業に供給する「リソーシング産業」としての役割を担うことを期待している。また、再生材の利用拡大には、動静脈のコミュニケーションの円滑化が重要であるとしている。

さらに、静脈産業は依然として労働集約的な側面が残っているため、将来的な人口減少を踏まえば自動化プロセスへの転換は不可欠であり、効率的なリサイクルに向けた回収・解体・分別技術の高度化も重要であるとしている。

動脈産業：資源を採取・加工し、製品を製造・流通・販売する産業

静脈産業：生産・消費活動から排出・廃棄される廃棄物を回収・処理する産業

本研究開発を進める上での重要な政策文書とその引用、またその他の関連文書リストを以下に示す。

■循環経済ビジョン2020(2020. 5. 22 経済産業省) より

V. 我が国としての対応の方向性

3. レジリエントな循環システムの早期構築

(1) 国内循環システムの最適化とそのためのリサイクル先の質的・量的確保

「最大限の国内循環を実現していく上で、資源投入の最適化と循環利用の拡大を進め、これらを最大限バランスさせていくことが必要である。とりわけ、あらゆる製品がいずれは廃棄物等の形で排出されることを踏まえば、リサイクル技術の高度化・多角化とそのキャパシティ（リサイクル受入可能量）を確保していくことが不可欠である。」

「リサイクル技術の高度化・多角化を検討していくにあたっては、ベースメタル（鉄、アルミ、銅等）、セメント、紙、ガラス、プラスチック等の主要素材について、改めて今後の需給見通しや再生材の利用可能性について評価・分析をしていくことが重要である。」

■2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(2021. 6. 18 経済産業省) より

(13) 資源循環関連産業

②リユース、リサイクル・排ガスの活用

＜今後の取り組み＞

「リサイクルについては、更なる再生利用拡大に向け、リサイクル性の高い高機能素材やリサイクル技術の開発・高度化、回収ルート最適化、設備容量の拡大に加え、再生利用の市場拡大を図る。」

表1-1 本研究開発に関する関連文書リスト

関連文書	関連個所の抜粋
第四次循環型社会形成推進基本計画 (2018年6月19日閣議決定)	・ 鉱種の利用削減(リデュース)、製品としてのリユース・リサイクルのしやすさ、再生金属の利用拡大等を加味した環境配慮設計の普及のための方策を検討する。 ・ 我が国の都市鉱山を有効に活用するため、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構築する。
2050年CNに伴うグリーン成長戦略 (2021年6月18日関係府省合意)	・ リサイクルについては、更なる再生利用拡大に向け、再生利用の市場拡大を図る。
マテリアル革新力強化戦略 (2021年4月27日CSTI)	・ 2030年に高度な資源循環とものづくりの低炭素化の両立の実現。環境負荷低減を価値の中心に据える市場の開拓。
パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略 (2021年10月22日閣議決定)	・ 地域の物質循環について都市鉱山を最大限活用し、これらの取組を通じ、脱炭素化の取組を推進する。 ・ AI・IoTの導入等を推進しつつ、廃棄物処理システム全体の温室効果ガス排出削減を推進する。
成長志向型の資源自律経済戦略 (2023年3月31日経済産業省)	・ ライフサイクル全体を通じて、動脈産業と静脈産業が有機的に連携する「動静脈連携」を推進しながら、サーキュラーエコノミーとカーボンニュートラルを一体的に進める。

＜我が国の状況＞

■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。

■製品、素材に関するリサイクル状況

・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。

・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。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、h白金族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。

■これまでの取組み

我が国は資源を海外に依存しているため、資源自律経済の確立という点でも、廃製品の確実な再利用を前提とする循環経済への移行が必須となる。NEDO「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業」（2017～2022年度）において、資源価値の高い小型デジタル家電の廃製品（スマートフォン、携帯電話およびデジタルカメラ）から、貴金属、銅およびレアメタルを低コストで高効率に再生する革新的技術の開発に取り組み、個体認識・解体・選別プロセスを無人化する製品自動選別システムにおいて、人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を、また、廃製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において、廃部品の分離効率80%以上を実現し、ベンチスケールシステムを完成させている。

<世界の取組状況>

環境配慮への要請やSDGs策定を背景に、循環経済に転換する政策を打ち出す国が増えている。特に、EUは、EU域外の資源産出国に天然資源の供給を依存する代わりに、EU域内で完結する資源循環社会の構築を目指している。2020年3月には、「新循環経済行動計画」を公表し、循環経済の政策実現に向け、製品をより循環的なものとするため、冷蔵庫、洗濯機、食洗機などエネルギーを使用する「エネルギー関連製品」からエネルギー関連製品以外の幅広い製品に、「エコデザイン」の枠組みを適用できるようにして、循環経済の実現を目指している。中国は、廃棄物輸入規制を含めた環境関連の取組を急速に進めており、2025 年までに電気電子機器廃棄物のリサイクル率を50%に、再生材の使用率を20%とすることを目標として掲げている。また、ISOにおいて、循環経済分野の標準化について、2018年9月にISO/TC323の設置が決定し、検討が進められている。

このような中、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1-2 小型電気電子製品リサイクルに関する国内外企業の動き

	推進者	国	技術内容	課題
リ サ イ ク ル 技 術	ZenRobotics	フィンランド	建築廃材用ロボットソーター	建築用廃材が対象なので、木材やコンクリートブロック等を扱っている。形状・種類が多岐にわたる廃小型家電は対象とされていない https://www.terex.com/zenrobotics/
	TOMRA	ノルウェー	金属スクラップ選別用ソーター	破碎された金属スクラップや単素材製品など対象が限定されており、形状・種類が多岐にわたる廃小型家電の対応は困難 https://languagesites.tomura.com/
	三菱マテリアル	日本	薄型TV分解（ビス外し）	薄型TVのビス外しが対象。多様な製品に対する拡張性が課題 https://www.mmc.co.jp/corporate/ja/business/rd/story/recycle.html
リ マ ン 技 術	APPLE	アメリカ	iPhone分解ロボット	自社製品に限られている。また、穴あけによる分解など、リマニュファクチャリングできる部品に限りがある https://www.apple.com/jp/environment/#reports-product
	MOLG	アメリカ	電子部品の分解	推進企業ではPCなどの電子部品が対象。思想としては、本事業に近いが、ロボット解体までの工程が対象であり、素材化までの筋道がない https://www.molg.ai/
市 場 回 収	ヤマダ電機	日本	家電リユース	洗濯機、冷蔵庫、テレビ、エアコン等の使用済み家電を買い取り、分解・洗浄・部品交換をして、リユース家電としてヤマダ電機店舗で販売 https://www.yamada-denki.jp/service/outletreuse/
	パナソニック	日本	家電リユース	市場での初期不良品を回収、洗浄・修理を行い、パナソニックのECサイトで販売

			https://panasonic.jp/store/limited/refurbished.html
ボッシュ	ドイツ オランダ	家電サブスク	洗濯機、冷蔵庫、掃除機、コーヒーマーカーなどの白物家電のサブスク。返品後は97%の商品をリファビッシュして再度サブスクへ。リファビッシュできないものは100%リサイクル https://www.bluemovement.com/nl-en

＜本事業のねらい＞

本事業では、多様な廃家電製品を対象に、貴金属・銅、レアメタル、ベースメタル、プラスチック等の資源を余すことなく循環利用が可能となる基盤技術確立することで、経済活動と環境負荷低減を両立した循環経済関連産業の創出・成長促進を目指すものである。

1.2. アウトカム達成までの道筋

小型電気電子機器製品の効率的なリサイクルを行うために、製品解体システム開発と再生材多様化に向けた革新的選別システムの開発を進める事で、既存装置との互換性を念頭に置きながら複雑多様化している処理システム・設備の汎用化を進めることで、多くの処理工場での導入促進を図る。これにより小型電気電子機器の品種・製品ごとの高度解体や選別、素材や部品の回収率向上を目指し、リサイクルが進むことにより静脈側からの再生素材の供給ポテンシャルを拡大し、再生素材を利用する事によるCO₂排出量削減を見込む。

また、データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発と再生材流通高度化に向けた基盤技術開発では、製品のリサイクル性の評価を行う事により易解体性やリマニュファクチャリングに関わる製品設計情報として小型電気電子機器製造メーカーへフィードバックする事でモノづくりを変革する。ここで得られた設計情報等を基に、リサイクル工場では適切な設備設計が可能となり、製品別のリサイクル効率が予測できることからリサイクル素材の安定供給が見込まれ、資源循環での動静脈の連携を構築し産業競争力の強化へとつなげる。これにより小型電気電子機器製品の市場で、リサイクル性能情報を活用した小型電気電子機器製品への展開と、それを処理する施設への設備投資としての経済効果を見込む。

1.3. 知的財産・標準化戦略

本事業ではNEDOの知的財産管理方針として事業を推進するものである。

- ・知的財産権の帰属及び取扱い方法について文書化して管理
- ・本事業で得られた知財については、関係各機関の知財部門と連携し、特許管理、知財管理を推進

また、本事業はNEDOの委託事業であり以下の知的財産に関わる規定を基に進めるものである。

- ・知的財産権の帰属

産業技術力強化法第17条第1項に規定する4項目及びNEDOが実施する知的財産権の状況調査（バイ・ドール調査）に対する回答を条件として、知的財産権はすべて発明等をなした機関に帰属。

- ・知財マネジメント基本方針（「NEDO知財方針」）に関する事項

NEDO知財方針に記載された「全実施機関で構成する知財委員会（又は同機能）」を整備し、「知財の取扱いに関する合意書」を作成。

・データマネジメントに係る基本方針（NEDO データ方針）に関する事項

NEDO データ方針に記載された「全実施機関で構成する知財委員会（又は同機能）を整備し、
「データの取扱いに関する合意書」を作成。

この様な方針の元、研究開発成果の知的財産の扱いとして、競争領域では処理設備・装置群のモジュール化に関しての各種情報を業界のデファクトスタンダードとなるように公開領域とする。また、処理施設を構成するモジュールの各種制御アルゴリズムやセンシングに関わる設定条件等は本技術開発の成果の適切な利用を非公開としたオープンクローズ戦略を進める。また、本研究開発を推進する上で、事業者の所有するバックグラウンド特許を足掛かりとして権利範囲の拡大を行う。

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

本事業で設定しているアウトカム目標は以下の通り。

<アウトカム目標>

本プロジェクトにおける成果を基にした再生材取得プロセスの高効率化による再生材利用率の向上、これによる新規素材使用の回避等の効果により、2035年におけるCO₂削減貢献として226万t/年を目指す。また、本プロジェクトで得られる各種装置もしくはシステム等の成果の実用化により、2035年における国内外の循環経済関連市場で、10%以上のシェア獲得により、0.9兆円/年以上の規模の貢献を目指すものである。これにより、アウトカム目標（の達成に向け、システム開発とデータ取得から得られる成果の連携を図ることで、廃小型家電製品の対象を拡大し、再生材の供給ポテンシャル増大へ貢献する。また、得られた成果を早期社会実装と普及に結び付けるため、事業期間内からも成果の担い手に対するセミナー等の情報発信を実施する。

<アウトカム目標の達成見込み>

本事業におけるアウトプット目標は、小型電気電子製品6品種の自動解体であり、各素材への選別を行う処理設備の能力は事業終了時で10t/日（設計仕様）を見込んでおり、2035年でのCO₂削減への貢献として再生処理により42万トンが資源循環されることを想定した設備設計に繋げる取り組みは予定通り順調である。

また、製品構造解析、データ蓄積をする事で小型電気電子製品の易解体設計やリマニュファクチャリングを進め、また設計情報を処理設備でも活用する事で効率的な素材リサイクルが実現できる見通しである。特に処理施設での実運用を見込んだ動作検証や想定される長時間の稼働検証についても取組は予定通りであり、新規に設計される小型電気電子機器の製造や処理設備投資での経済効果を見込む。

2.2. アウトプット目標及び達成状況

本事業で設定しているアウトプット目標は以下の通り。

<アウトプット目標>

【中間目標】2025年度

研究開発項目①「資源循環性高度化プロセス技術開発」

(1) 製品解体システム開発

解体すべき廃製品のうち、廃製品3品種に対して、複数想定される解体手法の判断において正答率7割を達成する。自律的な解体システムについて、限られた情報から解体動作を再現するための要素技術を確立し、解体手法毎に生産性（処理速度、正確さ・精度等）のベンチマークとなる比較対象を特定する。

(2) 再生材多様化に向けた革新的選別システムの開発

破碎物を対象にした選別装置の制御技術について、選別条件を提示可能な仮想環境を構築する。これらを実現する選別装置の最適化について、1t/日級の選別装置群を備えた選別システムを導入する。

研究開発項目②「情報連携システム開発」

(1) データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発

解体・選別等の処理プロセスの要素データと要求水準を設定し、製品 3 品種に対してデータセットの完成例を示す。要素データの取得について、従来に対して 1/10 以下の時間でデータ取得が可能な分析・計測システムの手法を示す。また、資源循環性のデータベース上の評価指標候補について、各指標の試算手法を含め整理する。

(2) 再生材流通高度化に向けた基盤技術開発

小型家電の回収実態と再生材需要のニーズを把握し、再生材の安定供給に向け目指すべき供給水準を整理する。資源循環シナリオにおいて、回収、供給、需要の 3 種類の拠点による最適化が可能な評価手法の基本設計を完了する。この際、リサイクル工場のモデルプラントの連続試験に向け、再生材原料の供給性能モニタリングが可能となる情報連携機能を整備する。

【最終目標】2027 年度

研究開発項目①「資源循環性高度化プロセス技術開発」

(1) 製品解体システム開発

解体すべき廃製品のうち、廃製品 6 品種に対して、複数想定される解体手法の判断において正答率 9 割を達成する。自律的な解体システムについて、限られた情報から解体動作を再現する一連の解体システムを導入し、廃製品 3 品種以上に対する生産性の評価により、ベンチマークに対して同等以上の性能を達成する。

(2) 再生材多様化に向けた革新的選別システム開発

多種の素材（貴金属、銅、レアメタル、アルミ、鉄、プラスチック等）が混合した破砕物を対象に、仮想的環境から試算される理論的な選別限界に対して 8 割の性能値を 1t/日級の自動制御選別システムで達成する。また、現状の処理工場で導入可能となる実用化スケール（10t/日級）の設計仕様を提示する。

研究開発項目②「情報連携システム開発」

(1) データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発

要素データの取得について、従来に対して 1/10 以下の時間でデータ取得が可能となる一連の分析装置システムを確立し、製品 3 品種を例にデータセットを作成する。資源循環性のデータベースについて、評価観点となる項目を 3 つ以上設定し、各指標に対する解析手法を確立する。

(2) 再生材流通高度化に向けた基盤技術開発

国内の小型家電の回収実態と再生材需要と連動したマテリアルフローの可視化に向け、代表的な素材 2 つ以上のケースを対象に資源循環シナリオの評価手法を構築する。この際、提供するリサイクル工場の標準データについて、小型家電の回収実態に応じた連続試験（1 日当たりの作業時間を目安）が可能なモデルプラントを整備し、再生材原料の出荷能力の検証を実施する。また、リサイクル工場における最適運転・運用等が流通に及ぼす影響や経済性評価によるモデルプラントの社会実装モデルを提示する。

＜アウトプット目標の達成状況＞

研究開発項目①資源循環性高度化プロセス技術開発

(1)製品解体システム開発

可燃品等を1次選別するヤード自律選別では、11品種に対し75%の識別率を確認。電池等を含む製品解体の破砕前処理では、3品種の廃製品に対し、X線像AI解析プログラムの開発により、70%以上の品目識別率を確認。リマン対応分解・設計では、目標達成のための分解手順・動作の自動生成、難認識部品の認識等の要素技術を確立。ヤード自律選別では、基本試験・基本的な方法論は確立実装済み。破砕前処理では、製品構造グルーピング化により、現状より精度向上が見込まれる。リマン対応分解・設計では、基本構造については、既に正答率70%以上を達成済みであり、目標は十分達成可能。

・小型家電ヤード自律選別システム

ピックアップ機能、識別・分類機能、移動・運搬機構、ケーブルカット機構の試作検討を行い、統合化に向けて順調に進捗。画像解析による小型家電識別において、現状家電11品種に対して75%の識別率であり、識別のみを10秒以下で実現している。

・破砕前処理システム

3品種以上の廃製品に対し、コア技術となる縦線画像のAI解析により、正答率70%以上で品目識別できることを確認。開発装置システムの基盤となる実験装置を試作した。

・リマン対応分解システム・リマン設計

CAD情報の簡易化・秘匿化による分解データベース構築、分解手順・動作の自動生成および、配線などの難認識部品の認識等の要素技術を確立。それらを統合し物理シミュレーションが可能となる分解サイバーフィジカルシステム環境の構築完了。分解データベースから自律的に分解動作を実行する自律分解システムを製作。

(2)再生材多様化に向けた革新的選別システムの開発

全粒群対応装置では、破砕・選別の要素技術、複数装置間を相互搬送する1t/日級のリコンビナブル選別システムを試作。自律制御化では、選別精度向上に資するサイズ・形状統一指標化を進め、選別装置群一貫制御システムを1t/日級の試作システムに組み込み試験を実施中。全粒群対応装置では、1t/日級のリコンビナブル選別システムの試作が完了し、基本的な装置間の試料搬送は検証済み。自律制御化も拡張版AIST Electric-device Separation Simulator(AESS)を試作済みであり、目標は十分達成可能。

・選別物性別・全粒群対応装置システム開発

対象物構造、破砕料幾をグルー方と、5割以上の試料に対し、単体分離特性のベンチマーク試験を実施済み。マルチセンシングソータ(MSS)開発に向け、スクラップ外観情報をデータベース化。MSSの基本システム、供給分散機構を試作。バルク性質利用選別機では、気流選別機の自律制御を阻害する形状の影響をキャンセルさせるスクリーンを試作。エアテーブル・ネルソン・浮選についても、半自律制御に必要な要素技術を開発し装置を試作。リコンビナブル選別機構の仕様を決定し、装置間試料搬送が可能な1t/日級の選別システムを試作。

- ・オンサイト選別装置自律制御化・マルチ選別システム

気流選別のサイズ・形状統一指標を開発し、形状パラメータを組み込んだ拡張版 AESS の試作を完了し性能検証中。マルチ選別システム開発では、選別装置群一貫制御システムを、1t/日級ペンチスケール選別システムに組み込み中。

研究開発項目②情報連携システム開発

(1) データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発

製品選別情報分析では、粗粒破砕物について、製品の 3 次元ボクセルデータを 40 以上取得済みで、製品 3 品種以上の内部構造データ取得方法を開発中。粒子選別情報分析では、2 次元情報から 3 次元構造や単体分離状態に変換する手法の方法論を開発。細粒破砕物について、旧来、ドメイン境界を認識できない複合材を CAMP 合金 MAP で識別可能とし、鉄合金の系別識別が可能であること確認。製品選別情報分析では、70 以上の製品の 3 次元ボクセルデータを取得し、内部構造データも人手の 1/10 以下となる数分/製品程度を達成見込み。粒子選別情報分析では、粗粒・細粒とも、3 次元情報への変換精度を高め、目標達成に資する 2D→3D 変換モデルを確立する予定で、十分達成可能。

- ・製品選別情報自動分析システム

X 線 CT による製品の 3 次元を取得、製品 3 品種以上を対象にルールベース及び深層学習による内部構造データ取得方法を開発中。動脈・静脈の資源循環配慮項目を設定し、動脈の設計改善・静脈の新リサイクル技術の導入・普及前に効果を検証するポテンシャル評価としての指標原案を策定完了。簡易評価に向けた具体製品の 3 品種のマテバラ分析を完了。

- ・粒子選別情報自動分析システム

粗粒破砕物では粒子モデル①の具体化プロセスとして、粒子の画像から 3 次元の単体分離状態に変換する方法論を開発。粒子モデル②では、透過 X 線等の 2 次元情報から 3 次元構造を推定する手法を開発、単純構造物なら高精度推定が可能であることを確認。細粒破砕物では、素材分類アルゴリズムを作成。旧来の BSE 像認識ではドメイン境界を認識できない合金複合材を、CAMP 合金 MAP で識別可能であること確認。

(2) 再生材流通高度化に向けた基盤技術開発

リサイクル工場の情報活用では、CEDEST システムを DINS 関西に移設、連続運転可能なシステムに整備を完了し試運転中。リマン工場の情報活用・動静脈情報連携では、リマン有効性検証のプロトタイプを製作完了。廃製品の供給、回収、需要からアルミとプラスチック回収の資源循環シナリオの評価手法の枠組みを構築。事業・環境評価に向け 3 製品の事業シナリオ検討完了。リサイクル工場では、連続化モデルプラントの整備、タグ利用試作機開発も予定通りに進捗、工場間情報連携評価ソフトも試作完了予定。リマン工場の情報活用・動静脈情報連携では、自律分解システムの開発も完了しており、情報連携基盤システムの PoC に向けたプロトタイプ開発も完了。目標は十分達成可能。

- ・リサイクル工場における情報の活用

静脈プロセス情報の活用に向けたモデルプラントの整備では、DINS 関西に連続運転可能なシステムに整備し、連続運転試験を試行。天井吊り下げ型メンテナンスロボットを試作し、遠隔操作の試行。モデルプラントを利用した情報連携の検証では、RF-ID タグの貼り付け・

読み取り可能位置を導出する画像認識、タグの自動貼付と万能型タグ、小型家電の機種情報管理システムを試作。工場間情報連携による選別工程の高機能化では、コスト算出要素を具体化。情報連携による売却益増大、コスト削減を評価する際の入出力項目を整理。

- ・リマン工場における情報活用と動静脈情報連携基盤の開発

情報連携基盤システムでは、高品位な資源循環の期待値とともに、設計情報の機密性担保の必要性を確認。プロセス高度化に有用な情報群を定義完了。セキュリティを担保できるシステム要件を定義し、リマン有効性検証のためのプロトタイプ製作完了。また、廃小型家電の供給、回収、需要の 3 種類の拠点に対し、アルミニウムとプラスチックを選定した上で、資源循環シナリオの評価手法の枠組みを構築。事業・環境評価に向けた 3 商品のシナリオを検討完了。

3. マネジメント

3.1. 実施体制

＜実施体制＞

本事業は、小型電気電子廃製品のリサイクルに関わるものであり、この問題の解決は国の方針に沿った重要課題である。また、本事業による各種素材の循環並びに CO₂ 排出量の削減は社会的必要性が高く、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なものである。しかし本事業の研究開発は難易度が高く、しかも必要な投資規模が大きい。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ものである。このような事から本事業は NEDO が持つ知識、実績を活かして推進すべき事業として推進するものである。

実施体制としては、PM に NEDO 今西大介、PL に産業技術総合研究所大木達也を配置し、研究開発項目①の(1)、(2)、研究開発項目②の(1)、(2)として役割分担を明確にした体制を構築している。また、本事業では技術開発の専門家や事業化の観点でシンクタンク等の有識者を委員とした技術委員会を定期的に開催している。

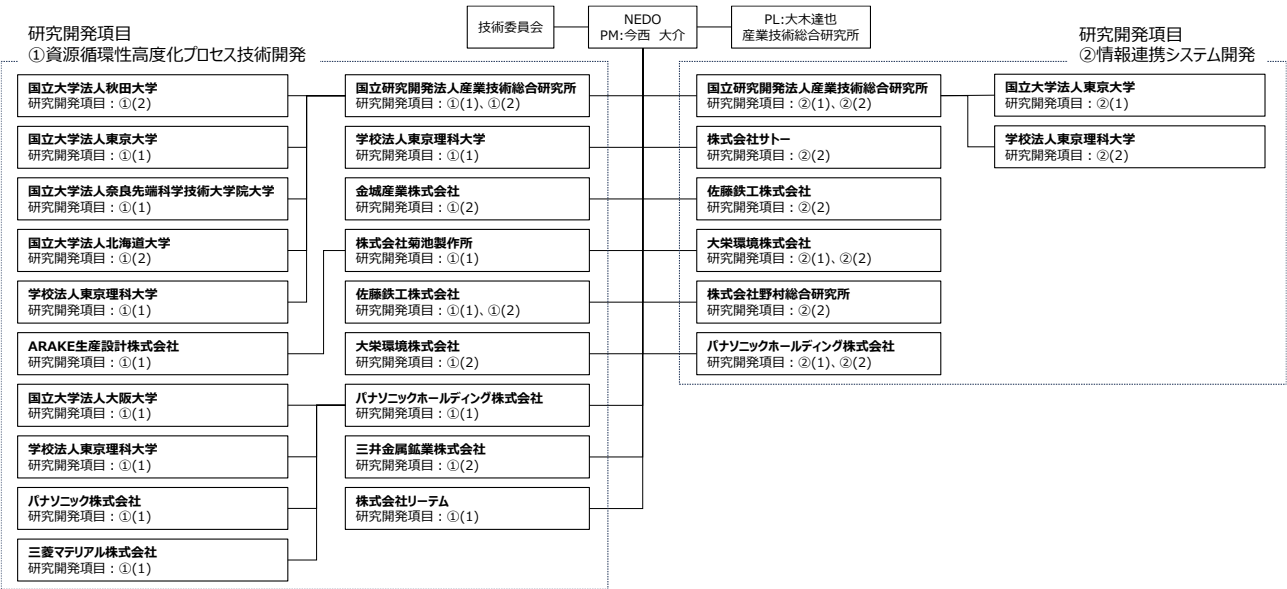


図 3-1 実施体制

また、実施体制にも示す通り本事業は多くの事業者が参画するものであり、研究開発チームごとにチーム代表を選任し推進している。

表 3-1 研究開発事のチーム代表

チーム代表	東京理科大 小林 弘	産総研 林 直人			パナソニック 松田 源一郎		産総研 大木 達也		
研究開発項目	①(1)	①(1)	②(1)	②(1)	①(1)	②(2)	①(2)	①(2)	②(2)
研究開発中項目	(a)	(b)	(b)	(a)	c	(b)	(a)	(b)	(a)
研究分野	ヤード選別	破碎前選別	粒子選別	製品分析	リデュース/リユース/リサイクル 分解	リデュース/リユース/リサイクル 情報	全粒群選別	マルチ選別 システム	リサイクル情報
委託先	東京理科大(小林研) 菊池製作所	産総研(大木) 佐藤鉄工 リーテム	産総研(林) 産総研(大木)	産総研(林) 大栄環境	パナソニックHD	パナソニックHD	産総研(大木)	産総研(大木)	産総研(大木)
				パナソニックHD 産総研(松本)	産総研(林) 佐藤鉄工	産総研(林) 佐藤鉄工	産総研(林) 佐藤鉄工	産総研(林) 佐藤鉄工	
				パナソニックHD 産総研(松本)	野村総合研究所	野村総研	大栄環境 金城産業	大栄環境 三井金属	大栄環境 佐藤鉄工 サトー
再委託先	ARAKE生産設計	奈良先端大		東京大（醍醐研）	三菱マテリアル 東京大(梅田研) 大阪大学 パナソニック		北海道大 秋田大		東京理科大(竹村研)

＜事業の採択プロセス＞

本事業を進めるにあたり、公募を行う事で広く産業界やアカデミアからの提案を募り事業者の採択を進めた。公募予告から採択公表までのスケジュールは以下の通りである。

- ・公募予告：2023 年 2 月 15 日
- ・公募開始：2023 年 5 月 15 日
- ・公募締め切り：2023 年 6 月 26 日
- ・採択審査委員会：2023 年 7 月 27 日
- ・採択公表：2023 年 8 月 25 日

公募予告期間、公募期間は共に 1 カ月以上の期間を確保し、公募情報に関して十分に周知出来る期間を設定した。

採択審査に関しては、各種領域での有識者、専門家からなる採択審査委員会を設置し NEDO の標準的な採択審査項目により審議した。審議の結果、研究開発計画、予算の精査を行い実施者の採択を行った。

表 3-2 採択審査委員

区分	氏名	所属	役職（当時）
委員長	中村 崇	福岡県リサイクル総合研究事業化センター	センター長
委員	今宿 芳明	Rita Technology 株式会社開発本部	部長
委員	押谷 潤	岡山理科大学工学部バイオ・応用化学科	教授
委員	木通 秀樹	株式会社日本総合研究所創発戦略センター	シニアスペシャリスト
委員	斎藤 優子	東北大学大学院環境科学研究科	准教授
委員	村上 進亮	東京大学大学院工学系研究科技術経営戦略学&システム創成学	教授

3.2. 受益者負担の考え方

＜委託事業＞

本事業の研究開発は難易度が高く、しかも必要な投資規模が大きい。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ものである。このようなことから本事業は NEDO が持つ知識、実績を活かして推進すべき事業として推進するものであり、国の委託事業として進めるものである。その対象は以下の研究開発項目となる。

研究開発項目①資源循環性高度化プロセス技術開発

- (1) 製品解体システム開発
- (2) 再生材多様化に向けた革新的選別システム開発

研究開発項目②情報連携システム開発

- (1) データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発
- (2) 再生材流通高度化に向けた基盤技術開発

3.3. 研究開発計画

本事業は、2023 年度から 2027 年度までの 5 年間の計画で実施する。中間評価時期は 2025 年度、終了時評価時期は 2028 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。

表 3-3 研究開発スケジュール

研究開発項目		2023	2024	2025	2026	2027	2028
①資源循環性高度化プロセス技術開発	(1) 製品解体システム開発	・選別システム各機能要素検討 ・CAD要件検討、識別方法検討	・選別システム連結試作 ・3品種自動解体		・各機能自律制御、機能連結 ・6品種自動解体		
	(2) 再生材多様化に向けた革新的選別システム開発	・各機能要素装置調査、設計検討 ・破砕物供給検討 ・素材別バルク物性の整理	・試作機連結 ・1t/日機検討		・各機能要素自律制御 ・1t/日→10t/日設計仕様		
	予算（億円）	254	927	1,330			
②情報連携システム開発	(1) データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発	・製品破砕情報収集 ・素材種判定モデル構築	・製品構造データ構築 ・判定困難物質検討		・製品構造データ構築システム化 ・素材境界判定、解析ツール化		
	(2) 再生材流通高度化に向けた基盤技術開発	・連続試験フィールド整備 ・市場分析	・自動運転課題抽出 ・シナリオ基礎検討		・機能検証、システム化 ・シナリオプランニング		
	予算（億円）	151	413	484			
評価時期				中間評価			終了時評価

また、本事業では様々な委員会、協議会等を開催している。事業全体の進捗に関わる重要会議として NEDO が選任した外部有識者から様々なアドバイスを頂く場としての技術委員会、マネジメントに関わる方向性の調整としての PL、PM 会議は NEDO が開催を主催するものである。また、事業実施者が率先して進めるものとして、各種事業チームでの協議会や、知財創出、学術発表に関わる事業者の調整をする場としての知財委員会等が設置されている。

表 3-4 外部有識者からなる委員会、協議会等

会議名	主要出席者	目的	頻度	主催
技術委員会	外部有識者、事業者、NEDO	本事業の進捗状況、方針の確認等を第三者である外部有識者からアドバイス、指導を得る。	年 2 回程度	NEDO
PL、PM 会議	PL、テーマリーダー、PM、NEDO	本事業の PL、PM を中心に、事業の進捗状況、予算の執行状況、研究開発の一部加速、削減などについて協議する。	適宜	NEDO
研究開発協議会	事業者、NEDO	全研究開発項目の主たる担当者を集め、事業の進捗状況を共有し、課題点などを協議する。	年 2 回程度	PL
知財委員会	事業者	本事業で発生する成果として、論文発表や特許等の知的財産権の取り扱いについて協議する。	適宜	事業者
テーマ別開発協議会	事業者	各研究開発テーマごとの研究担当が進捗状況を確認するとともに、技術的な課題点を協議する。	適宜	事業者

適切な事業マネジメントを行うために、研究開発スケジュールの進捗状況や各種委員会の意見を基にして各種対応を行っている。以下その事例を示す。

- 他事業成果の活用

革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発プロジェクト（2024 年度終了事業）での選別技術研究成果を本事業へ展開し技術の有効活用を推進

- ・ 新たな課題への対応
事業を推進する上で、新たな課題が発生した案件に関しては積極的に開発促進財源を確保する事で対応
- ・ 技術委員会意見への対応
指摘：リサイクル工場における処理設備の破損・破壊を防ぐため対策として、様々なセンシング情報や設計情報の活用を検討すべき
対応：2025 年度の自動運転課題抽出の取組みにて、設備の安全・安定運転に関わる技術検討を実施

＜動向・情勢変化等への対応＞

本事業を進める上で、様々な状況変化をとらえ、その対応を事業者との共有しながら進めている。社会動向に関しての本事業での検討と取組に関しての事例を示す。

【社会動向】

リチウム蓄電池等の適正処理（2025 年 4 月 15 日）

「市町村におけるリチウム蓄電池等の適正処理に関する方針と対策（環境省）」において、「火災事故等を防ぐためには、破砕機への投入前に X 線検出や、風力、磁力を用いた機械選別等によってリチウム蓄電池を取り除く事が有効である」との通達が発せられた。

【対応】

本事業では製品解体・分解システム開発において、破砕工程前でのリチウム蓄電池内蔵の小型電気電子機器の選別を行う事を想定している。また再生材流通高度化に向けた基盤技術開発では、小型電気電子機器に内蔵されたリチウム蓄電池の安全な取り外しに関わる技術検討も推進しており、廃棄物処理施設での適用が可能なリチウム蓄電池処理方法を継続検討する。

＜成果普及への取組み＞

本事業の成果を発信する場として、日刊工業新聞社が主催する、モノづくり日本会議での「新産業技術促進検討会シンポジウム」の場を活用して、本事業の研究開発成果を発信する。現在企画立案中であり、成果報告の場として 2025 年 9 月にシンポジウムを開催予定である。

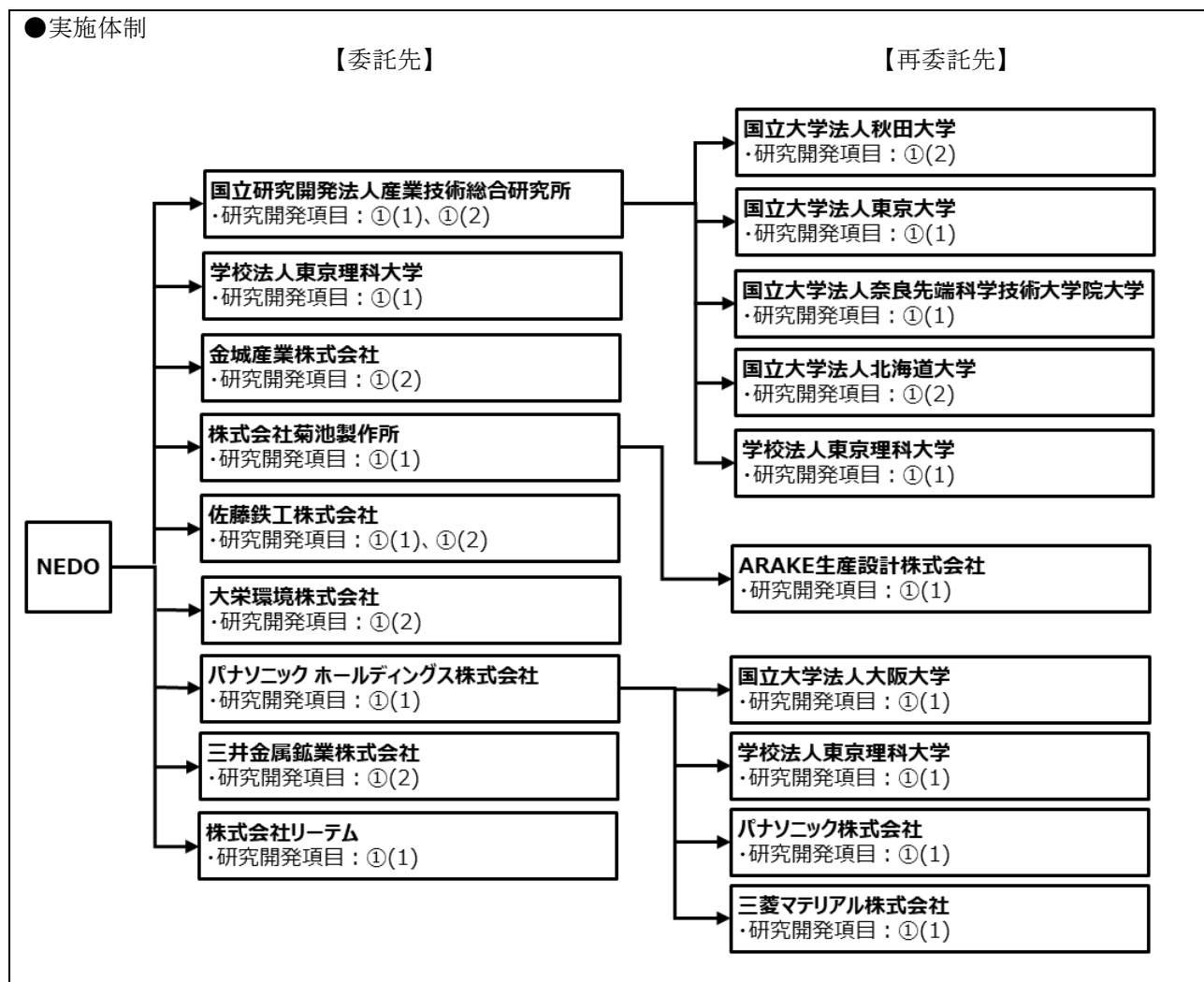
＜開発促進財源＞

事業マネジメントの事例でも紹介した通り、本事業では開発促進財源を積極的に活用し、様々な課題に対応すべく事業を進めている。その事例として、研究開発項目①資源循環性高度化プロセス技術開発の、(1)製品解体システム開発では、廃小型電気電子機器をストックヤードから、対象のピックアップを行いながら製品種別を判別する機構の検討を進めている。廃小型電気電子機器の大きさやケーブルの有り無しなど廃棄された状態が様々であり、様々な試作を進めながら適切な製品解体システムの機構の検討を行っている。この研究開発への開発促進財源の投入を行い、試作機の機能の明確化と適切なシステム構造の基礎を確立できた。

4. 目標及び達成状況の詳細

4.1. 研究開発項目①：資源循環性高度化プロセス技術開発

テーマ名	資源循環性高度化プロセス技術開発	達成状況	○
実施先名 (再委託名)	国立研究開発法人産業技術総合研究所、学校法人東京理科大学、金城産業株式会社、株式会社菊池製作所、佐藤鉄工株式会社、大栄環境株式会社、パナソニックホールディングス株式会社、三井金属鉱業株式会社、株式会社リーテム、(国立大学法人秋田大学)、(国立大学法人大阪大学)、(国立大学法人東京大学)、(国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学)、(国立大学法人北海道大学)、(学校法人東京理科大学)、(ARAKE 生産設計株式会社)、(パナソニック株式会社)、(三菱マテリアル株式会社)		
達成状況の根拠	製品解体・分解システムを構成する小型家電ヤード自律選別、破砕前処理、リマン対応分解・設計について、基本構造を確立済みで、いずれも認識正答率70%を達成できる見込み。選別物性別・全粒群対応装置と、それを利用したオンサイト選別装置自律制御化・マルチ選別システムでは、1t/日級のマルチ選別システム(リコンビナブル選別システム)は予定通りに試作完了。基本的な搬送制御は検証済みであり、いずれも中間目標達成の見込み。		
●背景・目的・プロジェクトアウトカム目標との関係 [背景] 我が国が整備してきたリサイクル環境の基盤は、埋処分量削減を目的としたものであり、高品位再生材が供給できているのは、貴金属や銅などごく一部に限定される。現在、各産業で資源循環の取り組みが加速化しているが、循環利用が可能な高品位原料にするための総合選別技術やリマン工場における分解技術は確立されておらず、資源循環の拡大・普及に向けて急務の課題となっている。 [目的] 多様な素材が混在し、多様な廃製品がカオス様に収集される廃小型家電を対象に、貴金属・銅、レアメタル、アルミニウム、鉄、プラスチックの「5 大素材」の水平リサイクルが可能な、総合選別システムを開発する。廃製品の入荷から、高品位再生原料を素材工場に出荷するまでの一連の工程を開発するとともに、将来のリマニュファクチャリング導入に向け、部品再利用のための分解技術の開発を目指す。 [プロジェクトアウトカム目標との関係] 本項目のアウトプット目標達成は、省人化と高度化を両立する資源循環実現に向けたコア技術の確立を意味する。研究開発項目②において開発する、導入支援技術との連携により、速やかな実用化、社会普及を果たし、アウトカム目標の早期達成が期待できる。 ●アウトプット目標 [中間目標] 製品解体・分解システム開発では、解体・分解すべき廃製品のうち、廃製品3品種に対して、複数想定される解体・分解手法の判断において正答率7割を達成する。自律的な分解システムについて、限られた情報から分解動作を再現するための要素技術確立し、分解手法毎に生産性(処理速度、正確さ・精度等)のベンチマークとなる比較対象を特定する。再生材多様化に向けた革新的選別システム開発では、破砕物を対象にした選別装置の制御技術について、選別条件を提示可能な仮想環境を構築する。これらを実現する選別装置の最適化について、1t/日級の選別装置群を備えた選別システムを導入する。 [最終目標] 製品解体・分解システム開発では、解体・分解すべき廃製品のうち、廃製品6品種に対して、複数想定される解体・分解手法の判断において正答率9割を達成する。自律的な解体・分解システムについて、限られた情報から解体・分解動作を再現する一連の解体・分解システムを導入し、廃製品3品種以上に対する生産性の評価により、ベンチマークに対して同等以上の性能を達成する。再生材多様化に向けた革新的選別システム開発では、多種の素材(貴金属、銅、レアメタル、アルミ、鉄、プラスチック等)が混合した破砕物を対象に、仮想的環境から試算される理論的な選別限界に対して8割の性能値を1t/日級の自動制御選別システムで達成する。また、現状の処理工場で導入可能となる実用化スケール(10t/日級)の設計仕様を提示する。			



(1) 研究開発の概要

近年の循環経済の考え方においては、従来のリサイクルに留まらず、リユース、リマニュファクチャリング等の多様な資源循環ルートへの対応もしくは多様な素材の水平リサイクル促進による再生材利用の製品作りなど、以前より一段上の取り組みが求められる状況にある。本事業「高度循環型システム構築に向けた廃電気・電子機器処理プロセス基盤技術開発」は、多様な廃小型家電製品を対象に、再生材取得プロセスの高効率化による再生材利用率を向上させる研究開発を推進する。研究開発項目①では、廃製品の入荷から選別工場で破碎を行うまでの前処理と、リマニュファクチャリング(使用済み製品内の部品の再生利用、以下「リマン」と呼ぶ)導入に向けた分解技術等の装置及び装置制御技術の開発、選別工場内の破碎・選別工程を自律制御化し、高品位再生原料を素材工場に出荷するまでの個別装置や総合選別システムの開発を実施する。

(1) 「製品解体・分解システム開発」では、リサイクル工場において、野外ヤードで廃製品入荷後、解体・破碎・選別工程前に、危険物等(油・可燃性ガス・リチウムイオン電池(LIB)利用製品等)を仕分ける自律選別システムを開発する。

野外ヤードで仕分けられた廃製品は、その後、選別工程で処理されるが、ここではまず、破碎などの適切な解体操作によって、選別前に単素材粒子(単体分離粒子)にする必要がある。そこで、廃製品の構造を個別に把握・推定し、LIB等の残留の有無や格納位置を把握し、安全に単体分離を促す適切な破碎機を選択するための破碎前処理システムを開発する。

リマン工場に対しては、複数メーカーの類似機種を対象に、機種ごとの分解データベース(DB)と

これと連携するリマンのための自律分解ロボットを開発する。また、多品種・大量の製品のリマンを実現する為に、開発する自律分解システムを想定し、製品メーカーに対するリマン設計ガイドラインの確立を図る。

(2) 「再生材多様化に向けた革新的選別システム開発」では、リサイクル工場内の破碎・選別工程を自律制御化し、高品位再生原料を生産可能な個別装置や総合選別システムの開発を実施する。まず、(1)で開発する破碎前処理システムで把握した製品構造に応じて、単体分離を促進する破碎機を選定するとともに、破碎後の粒子サイズや選別物性を網羅した選別装置群を確立する。この中で、未だ空白地帯となっている装置(既存機では自律制御が困難な装置を含む)について、新たに装置開発を実施する。また、これらの選別装置群を容易に組み替えることが可能なリコンビナブル仕様を確立した上、総合選別システムのベンチスケール機を試作する。これらの各装置の制御や装置の組み合わせは、現在、人の経験に依存している。特に集合選別機は、選別理論が確立されておらず、粒子群情報が備わっていても、選別機を自律制御することはできない。そこで、粒子(製品の破碎物)の情報に基づいて、個別選別装置の運転および総合選別システム全体の自律制御を可能にする技術を開発する。以上の開発により、多様な素材が混在し、多様な廃製品がカオス様に収集される廃小型家電を対象に、②の開発と連携して、貴金属・銅、レアメタル、アルミニウム、鉄、プラスチックの「5大素材」の水平リサイクルが可能な、総合選別システムの開発を目指す。

個別開発項目の構成と開発技術の工場内の役割を図4-1に示す。なお、本研究では、リマン工場において部品の再利用を目的に廃製品をばらす操作を「分解」、リサイクル工場において部品再利用を想定せず、単体分離促進のために廃製品をばらす操作を「解体」と呼んで区別している。

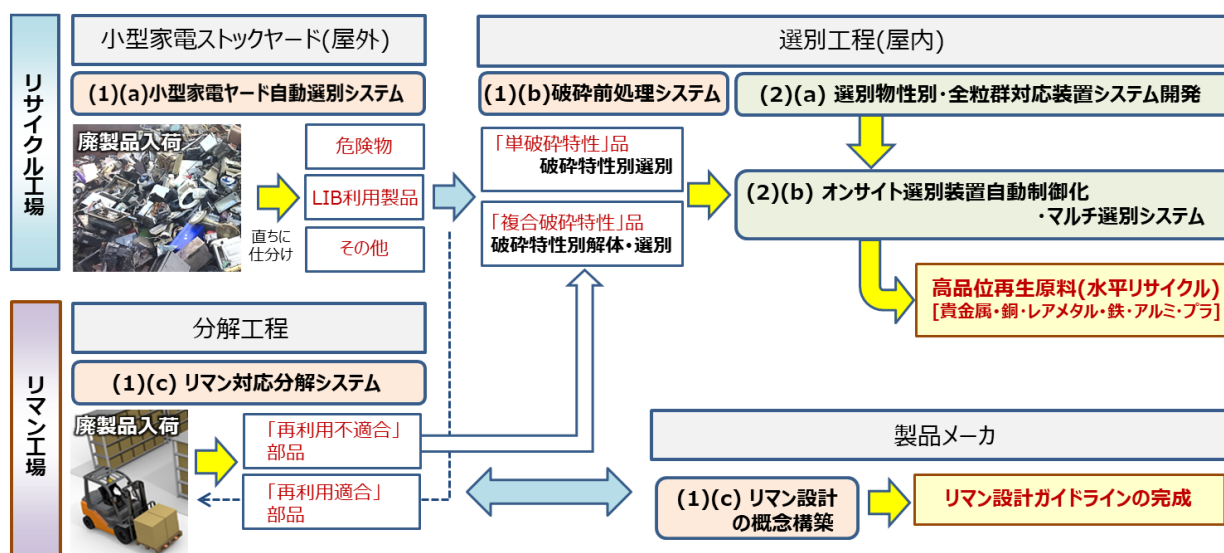


図4-1 研究開発項目①における個別開発項目の構成

(2) テーマごとの目標達成状況と成果の内容

①(1) 製品解体・分解システム開発

(a) 小家電ヤード自律選別システム

研究開発の概要

小型家電リサイクル法等によって回収された廃小型家電は、多種が混在した状態で野外のストックヤードに保管されることが多い(図 4-2 参照)。従来はこれらを一度、ヤードに展開し、高品位品(スマートフォン・ゲーム機など)などを手で回収したり、危険物(石油ストーブ・カセットコンロなど)を避けたりしてから、選別工場に送られる。一方、近年、モバイル機器を中心にリチウムイオン電池(LIB)利用製品が増えてきた。自治体でこれらは取り外すことになっていても、未だ相当数の LIB が残留しており、ヤード保管中に火災を発生する事例が多発している。このためリサイクル業者では独自に監視システムを設けるなど対応している。問題を抜本的に回避するため、入荷ヤードにおいて人手によって速やかに、LIB 利用製品と不使用製品を仕分けて別管理するケースもあるが、作業量・コストが増大するとともに、人手不足により受け入れ量を制限するなどの問題が発生している。

本項目では、廃小型家電処理の弊害となっているヤード保管物を対象に、解体・破碎・選別工程前に、LIB 利用製品や危険物、高度な資源回収に向かない粗大物などを、自律的に仕分け可能な「ヤード選別装置」を開発する。開発装置は、該当品目(仕分けグループ)を自律識別し、運搬して所定の置き場に持っていく自走式システムであり、(i) 「ピックアップ」機能、(ii) 「識別・分類」機能、(iii) 「移動・運搬」機能、(iv) 「電源ケーブルカット」機能、(v) 画像処理装置の各機能を実現することにより、全て 1 台で行うことを目指す(図 4-3)。無人で 24 時間稼働が可能であり、自走式のため環境を選ばずに利用可能な、画期的な装置開発となる。下記、項目ごとに、これまでの成果と予定を詳述する。



図 4-2 リサイクル工場における廃小家電の野外ストックヤード

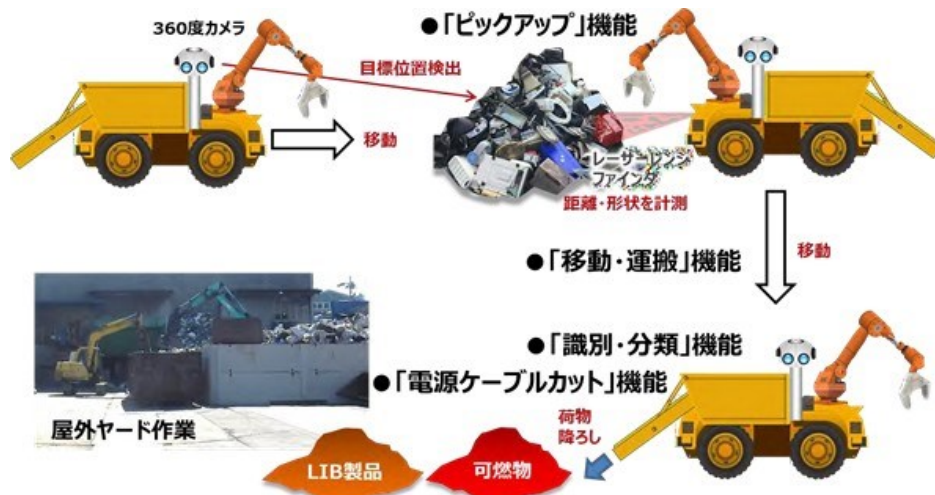


図 4-3 廃小型家電ヤード自律選別システム

(i) 「ピックアップ」機能

ヤードにある廃小型家電を、全て本装置内のコンベア上に移すことを目的とする。その目的を達成するために、一般的に用いられる「グラップルにより小家電をつかみ上げる機能」と、取り残された小型の小家電を装置内に掻き込む「掻き込み機構」を検討した(図 4-4)。「グラップルにより廃小型家電をつかみ上げる機能」では、グラップルの他に、その開閉と上下移動を制御する機構、位置を制御するロボットアームが必要である。グラップルは、大きさや形状の検討が必要なため、まずは市販品を複数購入した。開閉と上下移動については、簡単のため3つのウィンチを採用した。廃小型家電をつかみ上げる際は、開用ウィンチによりグラップルを開き、昇降用ウィンチによりグラップルを降ろし、閉用ウィンチによりグラップルを閉じてグラップル内に小家電を保持し、昇降用ウィンチによりグラップルを上げ、アームの回転と伸縮により、装置内の適切な場所に保持した廃小型家電を降ろす。現状はこれらのシーケンスを手動のボタンで行っているが、機能の確認はできており、シーケンスを自動化するだけなので全体のスケジュールの中で遅延することは考えにくい。また、積み上げられた小家電を、最低限一つずつであればピックアップできることは確認しており、今後、グラップル形状を精査してゆく。

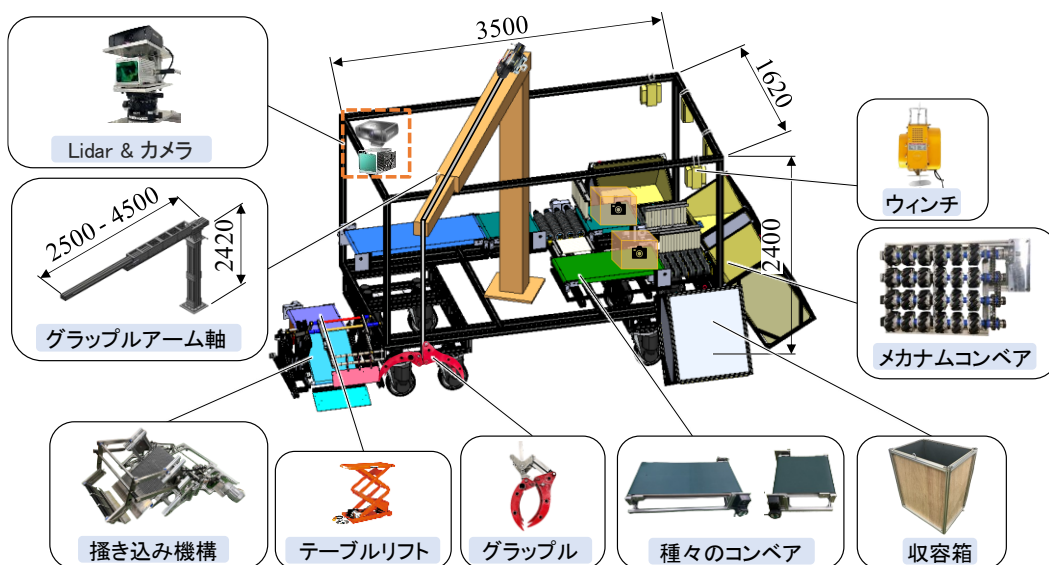
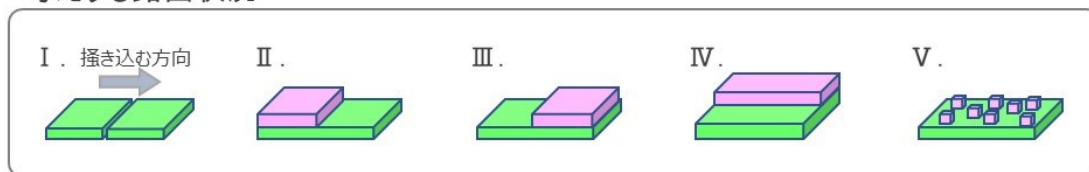


図 4-4 廃小型家電ヤード自律選別システムの構成要素

とのかきこみの可否を確認した。その結果、対象物によっては複数回の掻き込みが必要であったが、スマホが地面形状 III の場合にスタックした以外は、問題なくコンベアに移動させることができた。スマホの対策については、今後、実際の現場を踏まえて対応を検討する。

以上より、基本的な試作と機能は確認していることから、今後の実験により課題を明確にして解決し、地面にある対象物は、全て装置内のコンベア上に移動できると考えている。

考える路面状況



実験に使用した家電

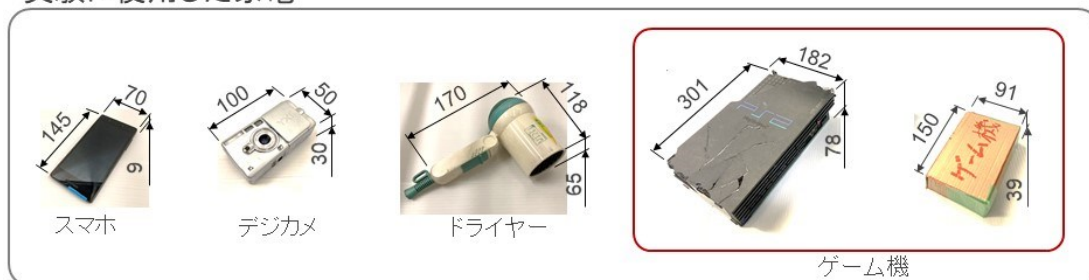


図 4-9 掻き込み実験： 地面形状と典型的な対象物

(ii) 「識別・分類」機能

対象物の数にもよるが、基本的には、①LIB 利用製品 ②危険物 ③低品位品に自動的に分類し、その精度は 70%以上とする。ただし、①LIB 利用製品は発火の可能性がある最も危険であるという認識から、①として分類されたものに②や③が混ざっていたとしても、程度にはよるが許容する。つまり、②、③に①が入っていないことを最優先するという考えで、主に機構により分類を行う。機構による分類の後に画像処理による識別・分類も行うが、この技術に関しては、後述の(v) 画像処理装置で詳述する。

小型家電リサイクル法 28 品目に基づき、各品目から 1 種類以上の家電の寸法を、全品目を網羅する形で調査し、3 つのカテゴリとして、(a)LIB 利用製品、(b)危険物、(c)低品位製品に分類した。実物の小型家電および、インターネットを通じて調査した小型家電の総数は 243 個となった。この際、幅 $w \geq$ 奥行 $d \geq$ 厚さ t となるように家電の寸法を定義し、幅 w を x 軸、厚さ t を y 軸としたときのグラフを図 4-10 に示す。また、LIB 製品のみをさらに細分化したグラフを図 4-11 に示す。これらより、主観的であるが 4 つの領域に分類できそうであると思われたため、その境界として $t=w=250$ mm を採用し、各領域を(1)-(4)とした。図 4-10 をもとに各種小型家電を比較すると、(a)LIB 製品は領域(3)に多く集中していることから、他の家電に比べ比較的小さいことが分かる。次に図 4-11 の領域(4)に注目すると、LIB 搭載の炊飯器や、電気芝刈り機のような園芸用電気機械器具以外は、ハンディ掃除機やノート PC、タブレットなどの円柱型、もしくは薄型の家電であることが分かる。ここで、これらの薄型、円柱型の家電は、寸法の最大長さとなる幅 w が、地面と垂直にして立つことがないと仮定すると、領域(3)、(4)の家電は、実質的な高さは 250 mm 以下であるといえる。

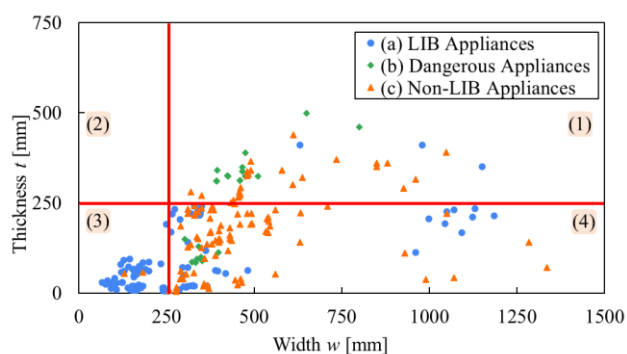


図 4-10 小型家電の大きさ分類

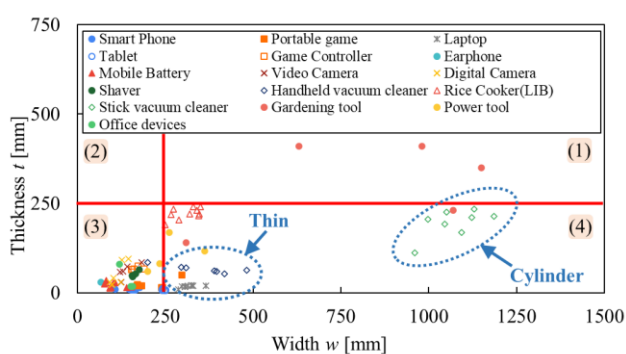


図 4-11 LIB 利用製品の大きさ分類

以上より、LIB 利用製品の仕分け方法として、図 4-12 に示すように、メカナムコンベアと 250 mm の隙間を有するガイドを用いた手法を提案する。

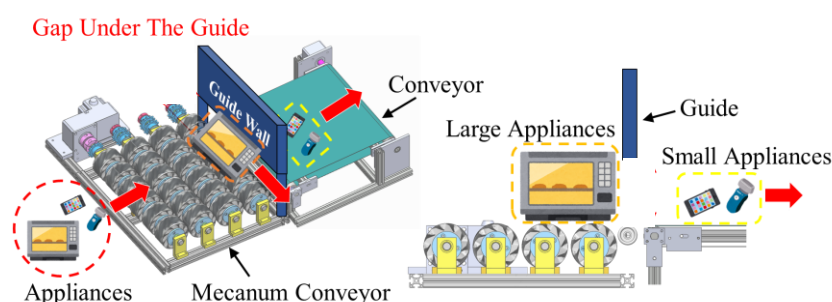


図 4-12 LIB 製品選別方法

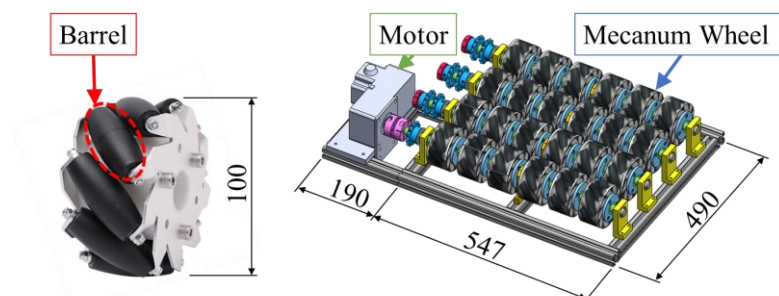


図 4-13 メカナムコンベアの構成

メカナムコンベアは既製品のメカナムホイールで構成されており、メカナムホイールの動作原理を利用して小型家電の仕分けを実現している。動作原理としては、ホイールに取り付けられた独立したバレル（図 4-13）が車軸に対して 45 度の傾きをもっているため、ホイール上を移動している家電がガイドに当たった際にバレルによって左右の決まった方向に家電が流されるようになっている。動力にはブラシレス DC モーターを用いており、インバーターで回転速度を制御している。モーターからの動力はカップリングを介してダブルスプロケット方式で動力を各軸に伝達する。各軸には 6 輪ずつメカナムホイールが付いており、シャフトホルダとキーによって軸に固定されている。また、スマホなどの小物家電の落下を防ぐために、一般的なスマホの厚さが 6-10 mm 程度であることを考慮し、車輪間の隙間は 5 mm に設定した。以上のように、コンベア上を搬送された小型家電はメカナムコンベア上で 250 mm の隙間を有したガイドに当たり、隙間より小さい小型家電はガイドの下を通過し、大きい小型家電のみがガイドに沿って左右に移動する。一方、

この手法では仕分けることのできない一部の LIB 搭載の炊飯器と園芸用電気機械器具や、LIB 利用製品と一緒にガイドを通過してしまう 250 mm 以下の比較的小さな危険物、低品位製品は、後の工程の(v) 画像処理装置により仕分けを行う。

廃小型家電が単体で搬送されることを前提として、メカナムコンベアが機能しているかを検証するために、領域(3)よりスマホ、領域(1)より電子レンジ、石油ストーブを用意した。また、薄型と円柱型家電の仕分けについても同様に検証するために、領域(4)より薄型家電としてノート PC、ガスコンロ、円柱型家電としてハンディ掃除機を用意した。他にも、スタックなどの問題が確認されたキャニスター型掃除機についても述べる。スマホ、ノート PC、ハンディ掃除機はガイドの下を通過し、石油ストーブと電子レンジはガイドに沿って横方向に流れていることから、LIB 利用製品自動仕分けシステムとして機能していることが確認できた。また、スマホの落下がないことより、メカナムコンベアの車輪間の隙間に問題がないことも確認できた。さらに、ノート PC とハンディ掃除機が通過していることより、薄型と円柱型家電が地面と垂直にして立つことがないという仮定は妥当であったと考えられる。ガスコンロに関してはスマホ等の LIB 利用製品と同様にガイドの隙間を通過してしまうが、後の工程の(v) 画像処理装置で危険物として分類する。一方、図 4-14 に示すように、キャニスター型掃除機のホース側はガイドを通過するのに対し、本体はガイドに当たり横に流れようとするからスタックしてしまうという問題点が確認された。これは、ホース側のヘッドが比較的小さくガイドの隙間を通過できるのに対し、本体が隙間よりも大きいいため通過できないことが原因である。このような場合の対策として、ガイドにバリカンを設置してホースの切断を行い本体と分離させることを検討している。

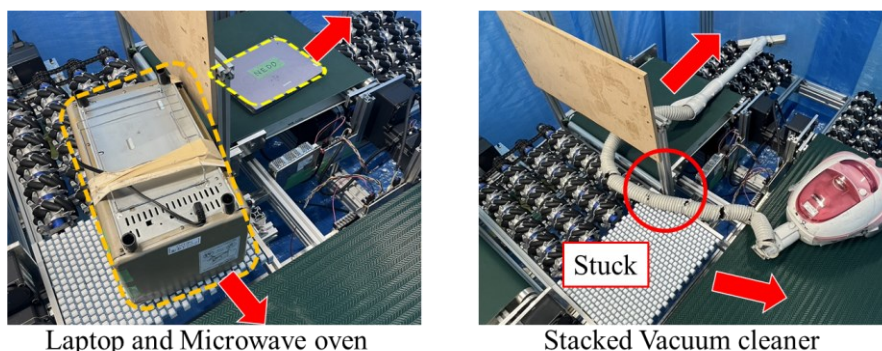


図 4-14 分類実験

以上より、基本的な試作と機能は確認していることから、今後の実験により課題を明確にして解決し、(v) 画像処理装置との統合により、対象物の識別を 70%以上の精度で実現できる見込みである。

(iii) 「移動・運搬」機能

自走する本体の機能であり、「位置認識部」(対象物、自己位置、目的位置)、「駆動部」、「収納・荷降ろし部」からなる。全自動での動作を実現するため、「位置認識部」では廃小型家電が積み上げられている場所、分類した廃小型家電を降ろす場所、自己位置を正確に認識し、「駆動部」は6輪のキャスタにより全方向移動を実現し、「収納・荷降ろし部」では分類された小家電をそれぞれの分類ごとに貯めておき、満杯になった場合に適切な場所に移動して分類された小家電を降ろす。以下、それぞれについて詳述する。

「位置認識部」：ランドマークを用いる方法を提案する。安定した正確な自己位置推定が必要であるが、近年広く普及している SLAM の手法は搬入される廃家電によって周囲形状の変化が予測

されるストックヤードに不向きであり、GNSS やビーコンなどを用いた測位方法では、今回の自律選別システムを稼働させるうえで十分な安定性と精度を確保することが難しい。そこで、30 m 程度であれば方角に依存せずに検出することができるランドマークを提案し、ランドマークの位置を検出してそれを小家電が置かれている場所や分類した小家電を降ろす場所の目印にすると共に、自己位置推定に用いる。本開発で提案するランドマークを図 4-15 に示す。このランドマークは、回転対称な立体である円錐(上下を入れ替えて 2 種類)と球を縦方向に配置するもので、どの方角から見てもカメラ画像には三角形と円のパターンとして映る。積み上げる立体は 3 種類あるため、段数に応じて 3 のべき乗の数だけ ID を設定することができ、2 段であれば 9 種類、3 段であれば 27 種類のパターンを作ることができる。

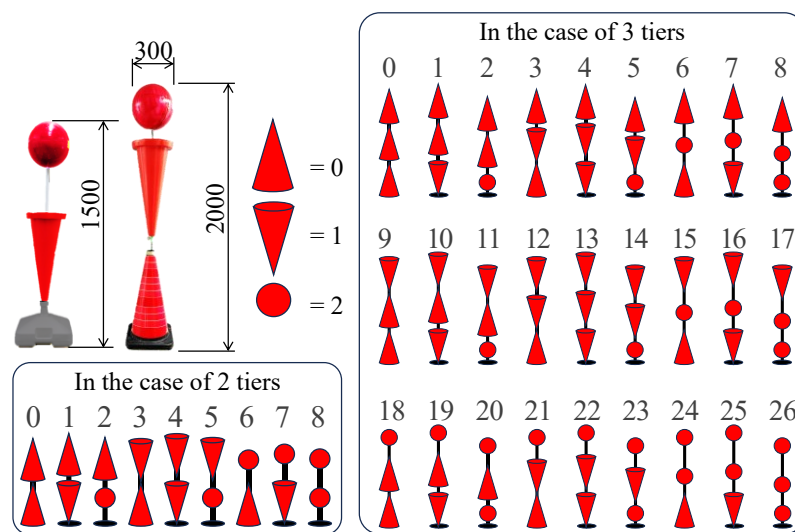


図 4-15 提案するランドマーク

画像内のランドマークの検出には、カメラ画像から得られる色情報を用いている。図 4-16 に示すように、屋内外の明所暗所におけるランドマークの RGB 値の輝度値分布から、どんな環境でもランドマークを抽出できる閾値として、ピクセルごとの R、G、B の総和に対する割合で、R の値が 33 %を超え、G と B の値がともに 44 %未満のものを赤色として安定的に検出できることが分かった。図 4-17 に示すように、ランドマーク検出後に二値化を行い、それぞれの赤色の塊について縦横比と重心上下の赤色の面積により円と上下の三角形とを識別して抽出する。抽出した図形ごとに重心位置を計算し、 x 座標同士の差 Δx が画像中で鉛直方向に整列していることを閾値 d によって確認できた場合にランドマークとする。ランドマークを構成する球と円錐は図 4-15 に示すように、それぞれ 0、1、2 の番号をつけ、上から順に 3 進数として読み取ることで ID を取得する。

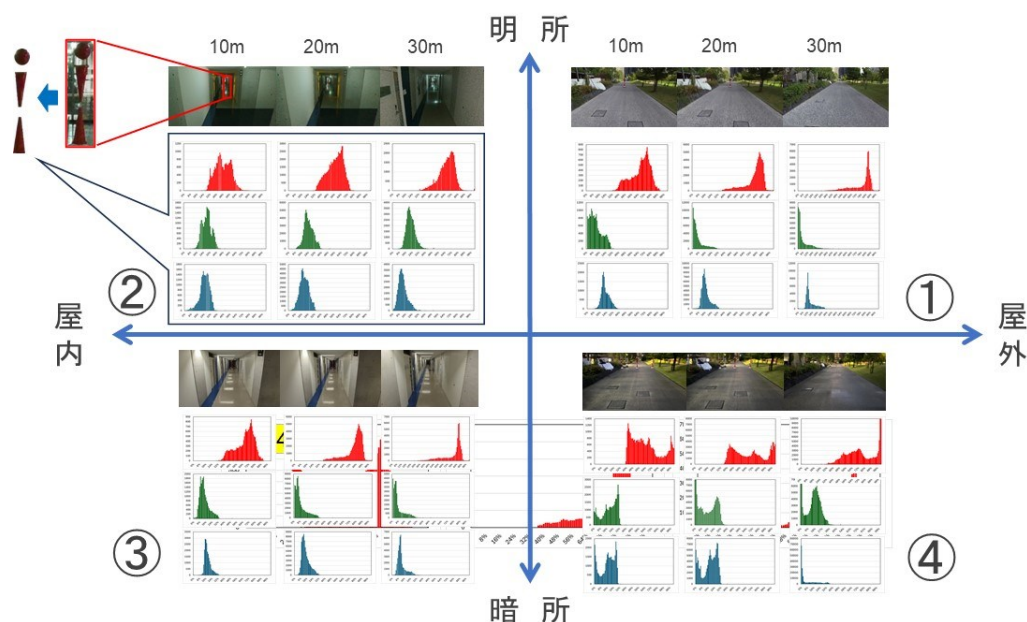


図 4-16 様々な環境中のランドマーク輝度値ヒストグラム

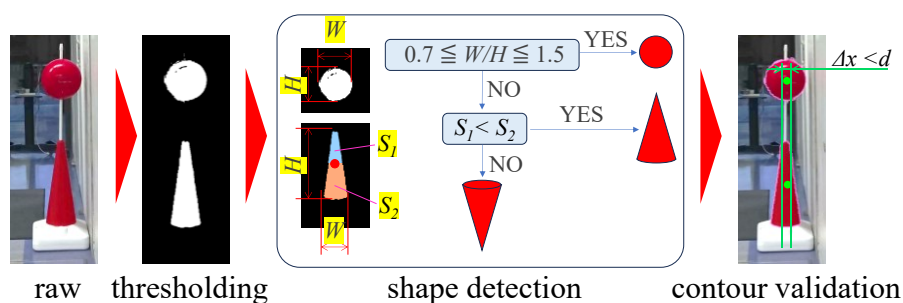


図 4-17 ランドマーク検出からランドマーク種類を検出する手法

ランドマークの位置検出に用いるシステムの全体像を図 4-18 に示す。このシステムの実装には ROS 2 を使用し、複数台の Lidar やカメラの使用を想定し、モジュールごとにプログラムを分割した。画像処理部や Lidar 点群投影処理など、容量の大きなデータを頻繁にやり取りするモジュール間での通信にはコンテナを用いたプロセス内通信を使用し、その他の通信ではプロセス間の非同期通信を行っている。拡張性確保のため、通信するデータにはすべてタイムスタンプを付加しており、非同期通信で取得するデータであっても時刻により同期して処理できる。ランドマークの位置検出では、図 4-19 に示すように、カメラ画像に投影された Lidar 点群（距離を表す）の中から、ランドマークとして識別された色の塊の内部にある点群の平均値を求め、ランドマーク位置として取得する。ここでは、ランドマークの誤検出やキャリブレーション誤差を抑えるため、Lidar 点群の各点について、抽出されたランドマークの色領域内に含まれるかどうか、色領域の面積から予測される距離範囲内にあるかどうか、さらに円や三角の図形の重心同士の距離から推定される 3 次元距離内にあるかどうか、を基準にフィルタリングを行う。自己位置推定では、事前にランドマーク位置をフィールド上の絶対座標系で定義した情報を地図情報としてシステムに入力し、本装置の検出したランドマーク位置との対応付けをランドマークの ID によって行う。これに、特異値分解によって対応するランドマークの位置関係の変換誤差が最小となる剛体変換を求めることで、本装置の自己位置を推定する。

詳細な検証実験はこれから行うが、予備実験では、15m までは高精度に自己位置推定が行われており、その後、距離が遠くなるにつれて精度が落ちることが分かった。今後、より詳細な精度検証を行うが、距離に応じて精度が落ちることを踏まえた位置制御を行うことで実運用上は問題ないと判断している。

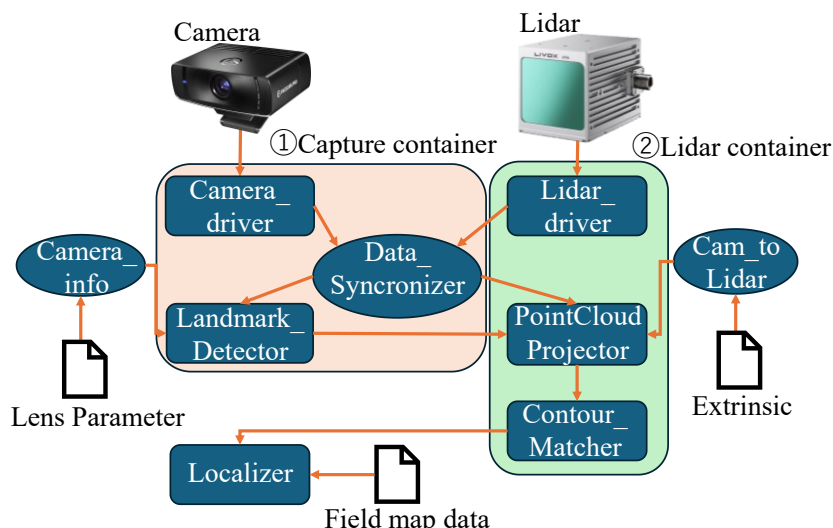


図 4-18 ランドマーク 3 次元座標値検出システム

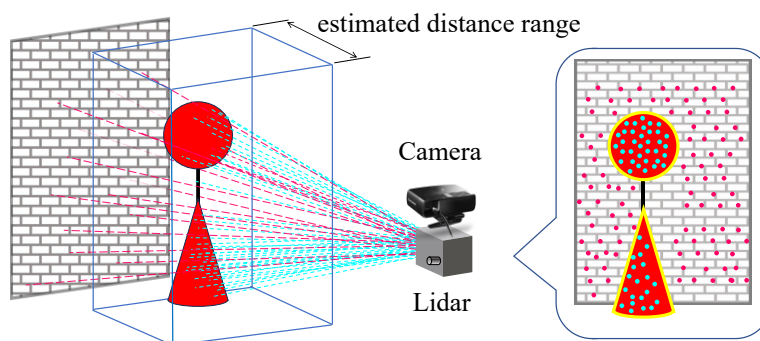


図 4-19 ランドマーク検出からランドマーク種類を検出する手法

「駆動部」（台車システム）：1000kg 程度の可搬重量で、ヤード内を全方向移動できることを目指している。試作した台車システムを図 4-20 に示す。6 輪台車となっており、大きさが幅 1.5m、全長 3.5m、可搬重量が 1000～2000kg 程度であり、（I）アクティブキャスタ、（II）展開機構、（III）分散システムを有している。

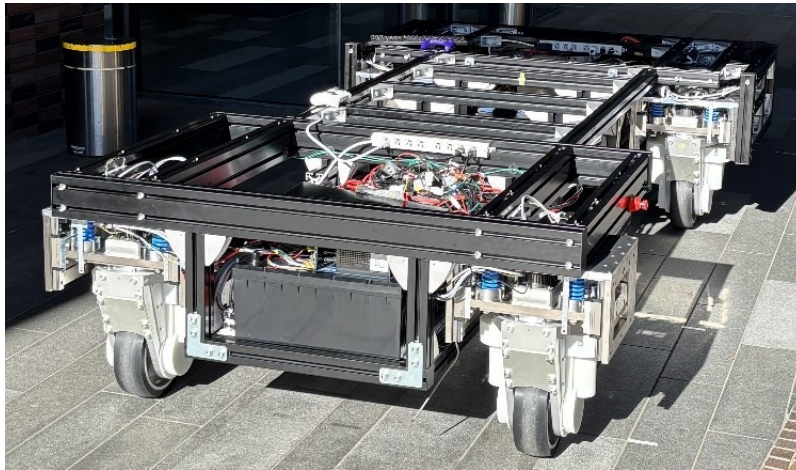


図 4-20 6 輪台車

(I) アクティブキャスタ

廃小型家電を効果的に運搬するために、ヤード内を全方向移動できるように、6 輪台車にはアクティブキャスタ（図 4-21）を搭載した。アクティブキャスタは、車輪の回転と操舵をモーター駆動により能動的に行うことが可能であり、ホロノミックな全方向移動が可能となる。6 輪台車に搭載したアクティブキャスタは、廃小型家電および選別装置を積載する際の重量に対応するため、ホイールの直径が 300mm、耐荷重が 500kg となっている。また、ヤード内の起伏により車輪が浮き上がり空転することを防ぐため、上部にサスペンション機構を搭載している。

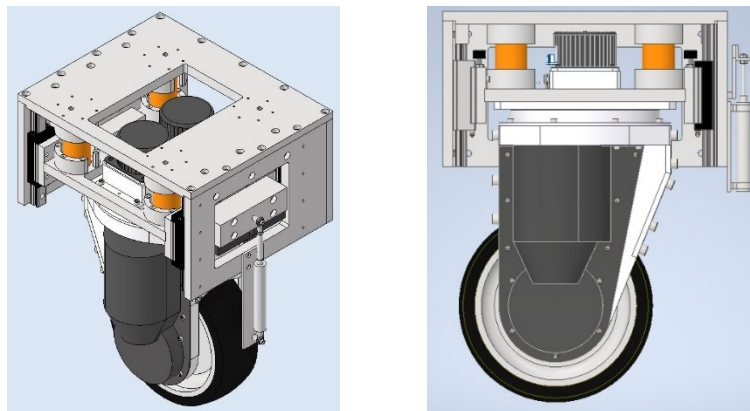


図 4-21 アクティブキャスタ

(II) 展開機構

廃小型家電の積載や選別装置の動作により、開発装置のバランスが崩れて横転することを防ぐために、6 輪台車に展開機構（図 4-22）を搭載している。展開機構は、開発装置の重心が変化した場合、重心が安定となるように台車中央の 2 輪のアクティブキャスタが外側に迫り出すように展開することで、バランスが崩れることを防ぐ機構となっている。また、アクティブキャスタの駆動により機構が展開または格納されるため、展開機構を駆動するために追加のアクチュエータを必要としない構造となっている。

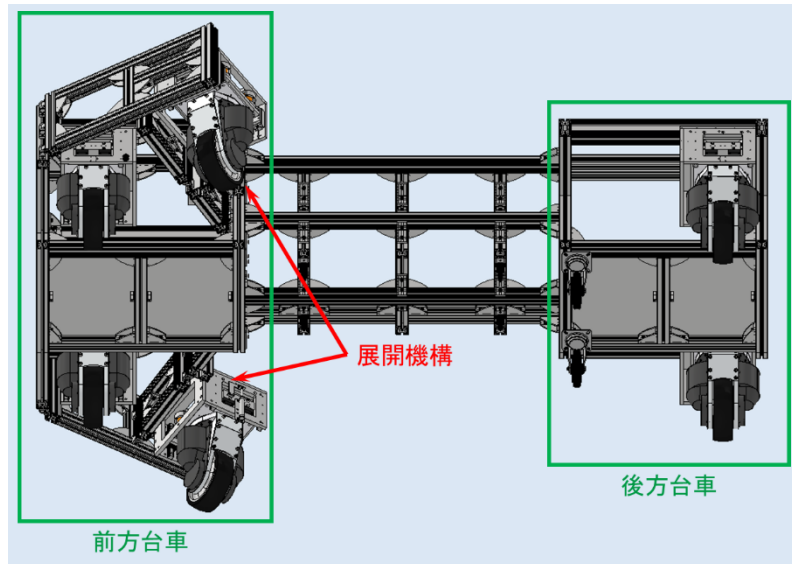


図 4-22 6 輪台車における展開機構

（III）分散システム

選別装置が安定的に稼働し続けること、および、各装置を組み合わせる際の移動性を考慮して、6 輪台車は、前方部、中部、後方部の 3 つの部分に分割した分散システムとなっている。前方の台車には 4 輪のアクティブキャスタを搭載しており、後方の台車は 2 輪のアクティブキャスタと 2 輪の受動車輪が搭載されている（図 4-23）。それぞれの台車には、個別の制御および駆動システムがあり、これらの台車は独立して全方向台車として移動できるようなシステムとなっている。

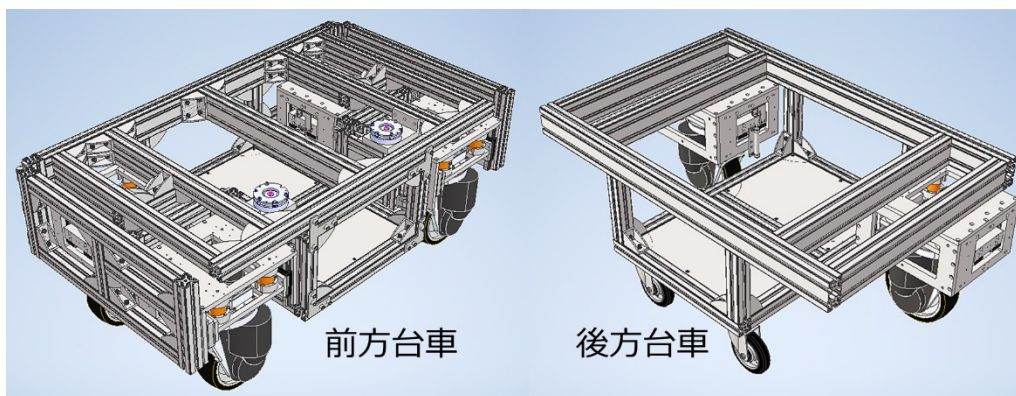


図 4-23 前方台車、および、後方台車

今後、次のような（II）展開機構、（III）分散システムの改良、および、アクティブキャスタを 2 輪追加した 8 輪台車とすることでヤード内の安定した走行を検討する。展開機構は、展開角度が現在は 30 度程度の開閉となっているため、この角度を拡大することで重心の変化に対して安定となる範囲の拡大を図る。分散システムについては、アクティブキャスタを 2 輪追加して 8 輪とする際に、台車の中部分に 2 輪を搭載することにより、中部分も全方向台車として自走できるようにする。また、3 台の台車がそれぞれオドメトリで自己位置を認識し、8 輪台車として稼働する際の結合、分離を自動あるいは遠隔操作でできるようにする。これらにより、選別装置の安定的な稼働性の向上を図る。このように、基本的な機能は実現できており、2025 年度までにより安定した走行の追及を行う。

「収納・荷降ろし部」：仕分けされた小家電を収納し、適切な場所にそれを降ろす。廃小型家電はコンベアにより送られ、図 4-24 に示す収容箱に満杯になるまで収容され、箱内にある LED からセンサに向けて発せられる光が、収容された家電によって遮られることで満杯検知される。満杯検知後、荷降ろし場所に向かい、ウィンチを用いて収納箱底面の開閉を行い、適切な場所に廃小型家電を排出する。回収箱の側面には、内側に厚さ 1.6mm の高耐食溶融めっき鋼板を使用し、外側に厚さ 9mm のベニヤ板を重ねた構造を採用している。骨格部分はアルミフレームで構成され、各側面の板がフレームと固定されている。収容箱は通常、底面の板がフレームなどによって支持されており、ウィンチによりアルミフレームに取り付けられたアイボルトが引っ張られ、箱自体が持ち上がることで、蝶番で接続された底面の板が開く仕組みとなっている。また、ウィンチ自体のスペックとして、電源は 100V 対応で、最大 250 kg の耐荷重があり、家電が収容された際の箱の重量に耐えることができる。動作確認は終了し、問題なく機能することを確認している。

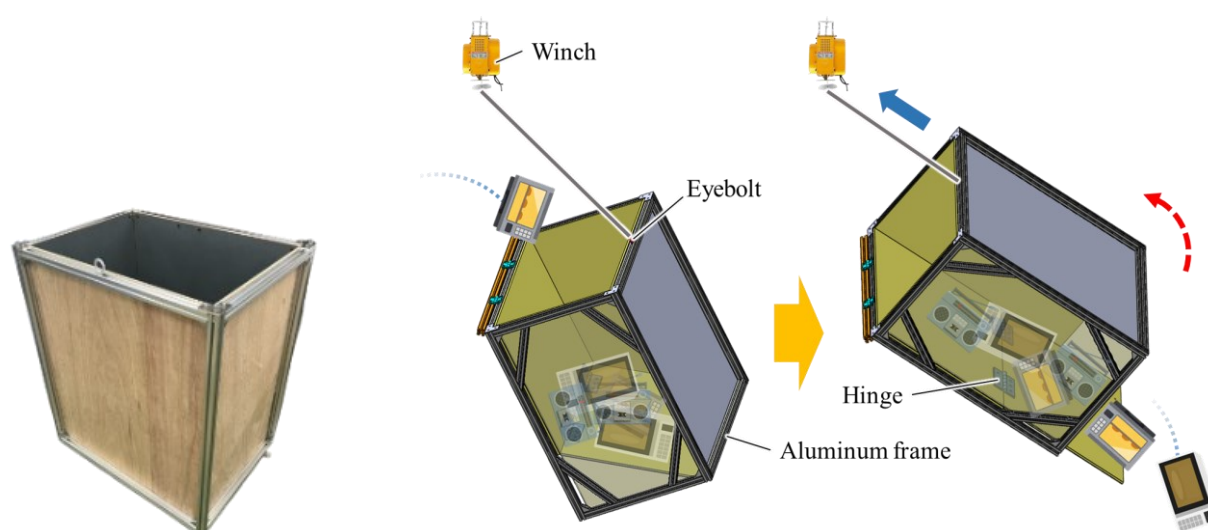


図 4-24 収納・荷降ろし部の構造

(iv) 「電源ケーブルカット」機能

ケーブルカットを実現するためには、ケーブルをカットする機構・デバイスと、それをどのように設置するかを検討する必要がある。そして、本体から独立しているケーブルを 100%カットすることを目指す。図 4-25 に試作したケーブルカット機構の概観を示す。刃はバリカンのように往復運動をする。刃の形状を図 4-26 のようにすることで、切断時に先端から刃元に向かって徐々に刃が閉じていき、刃の間に入り込んだケーブルを逃がさずに切断する。2 枚のうち片方の刃は固定し、もう一方の刃より刃丈を 2 mm 長くする。これにより、筐体を傷つけずにケーブルのみの切断が可能となる。様々な肉厚、角度を試作して試したが、図の形状が最も良く切断できた。駆動方法は、モーターの動力を平歯車によって減速し、カムを利用して片側の刃のみ動作させる。刃の移動速度が速い場合、ケーブルが刃に弾かれてしまう。遅い場合、ケーブルを切断する力が足りずに機構が停止してしまう。そこで本研究では、最も確実にケーブル切断できるような切断速度について検証し、切断可能な最も遅い速度 1008 回/min を採用した。しかしながら、ケーブル単体を上からこの装置にあてた場合の切断確率は 30%、切れ目が入る場合が 60%で、10%ははじかれてしまった。そこで、図 4-27 に示す市販のヘッジトリマを試したところ、ほぼ 100%ケーブルが切断できたので、これを採用することにした。そしてこれを、図 4-28 に示すように、コンベアの

間に配置し、コンベアに段差をつけて小家電を落とすことで、ケーブルが切断できることを確認している。しかしながら、小家電より前にケーブルがある場合は切断できない場合があるため、機構によりそれを検知してケーブルを切断する方法を考案し、制作を開始した。以上のように、方法論は確立しており、課題とその対策も進めているので、当初の目標である独立したケーブルを100%カットすることは可能であると考えている。

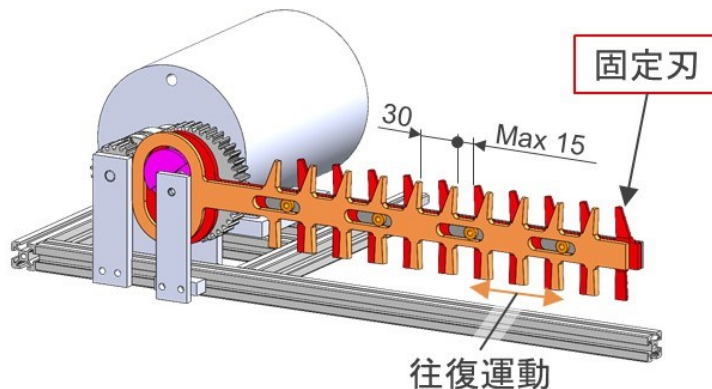
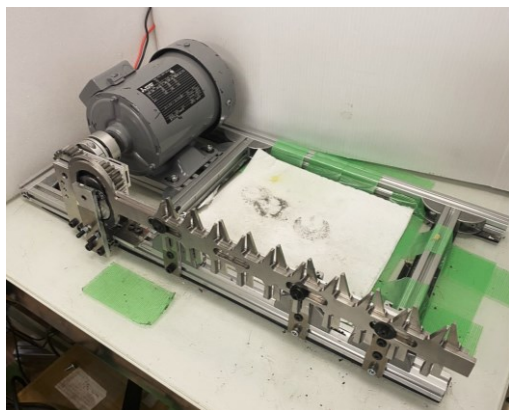


図 4-25 ケーブルカット機構

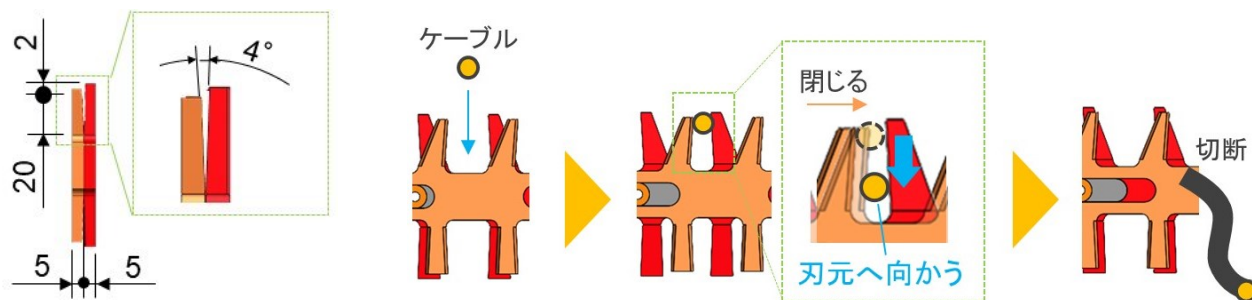


図 4-26 刃の形状と動作



図 4-27 ヘッジトリマ

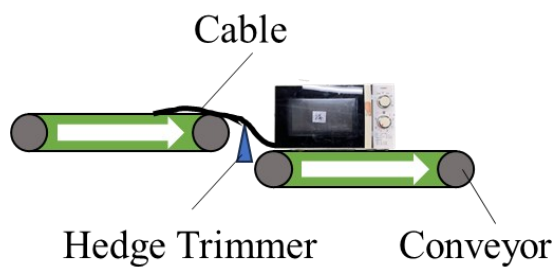


図 4-28 ヘッジトリマの配置

(v) 画像処理装置

回収グループごとの対象製品を3種類選定し、その識別正解率70%を目指し、また、全体の処理速度については、移動から識別・仕分けまでを、全体的に見た場合に1個当たり5分以内を目標とする。ひとまず、LIB利用製品については前段で仕分けられると想定し、画像処理では低品位品と危険物の識別について扱い、画像処理装置全体の方法論を確立する。そこで、ベルトコンベア

上の家電の有無を判断する「家電検出プログラム」と検出された家電の種類を識別する「家電識別プログラム」の開発を行い、それぞれの精度を検証した。

まず、図 4-29 に示すように、小家電システムの家電識別部を模した実験環境を構築した。1 辺の長さが 1m の立方体で、全ての面を遮光幕で覆った。また、家電の有無を検出するための RGB-D カメラを上面から -45° の角度で設置した。下部には家電を流すベルトコンベアを置き、上部にドーム型照明を設置した。

「家電検出プログラム」では、RGB-D カメラで得られる Depth（距離）画像を用いて、ベルトコンベア上に廃小型家電があるか検出する。具体的には、ベルトコンベア上に何も無いときの Depth 画像を予め用意しておき、フレームごとの Depth 画像と比較することにより廃小型家電の有無を判定する（図 4-30(a)）。この際、3 領域で Depth を比較し、閾値を超えた場合に廃小型家電が映っていると判断する。そして、その範囲の重心座標を Segment Anything Model（以下、SAM）に入力し（図 4-30(b)）、家電のみが抽出された画像を取得する（図 4-30(c)）。なお、SAM は、画像内の任意の物体上の点を入力することでその物体と背景を分離できる機械学習モデルである。

「家電識別プログラム」において画像から家電を識別する機械学習モデルは、学習済み分類モデルである ResNet50 をファインチューニングした。学習対象として、独自に撮影した 7,140 枚の画像と、インターネット上で収集した 7,243 枚の画像の合計 14,383 枚を用いた。独自に撮影した画像には、事前に用意した低品位品 11 品種 17 個、危険物 7 品種 7 個の合計 18 品種 24 個の家電が含まれており、インターネット上で収集する際には、同種類の家電を検索した。画像 14,383 枚のうち、12,924 枚（約 90%）を学習用に、残りの 1,459 枚（約 10%）をテスト用に用いた。精度検証用に、学習で用いた家電とは別に低品位品 5 品種 6 個（ヘアドライヤー、ラジオカセット、炊飯器、固定電話、掃除機（家庭用コード付き掃除機、ハンディ式掃除機））、危険物 7 品種 7 個（ガスランタン、ガストーチ、オイルヒーター、石油ストーブ、コピー機、カセットコンロ、ウォーターサーバー）の合計 12 品種 13 個の家電を用意した。そして、ベルトコンベアで家電を端から流し、その様子を RGB-D カメラで撮影した。この際、家電を通常使用する際に見る面を正面とし、正面、背面、側面をカメラに向けてそれぞれ 1 回ずつ撮影した。家電が安定して自立しない場合は除き、結果として合計 37 個の動画を撮影した。最後に、撮影した動画を家電検出プログラムおよび家電認識プログラムに入力し、それぞれの精度を確認した。

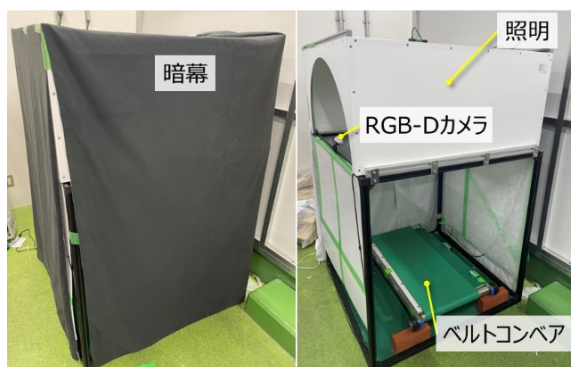


図 4-29 実験環境

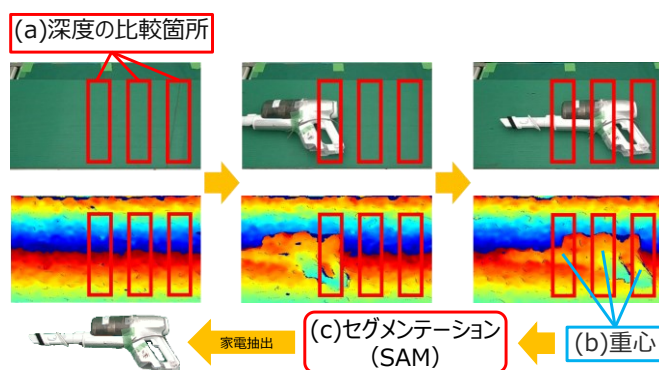


図 4-30 画像検出とセグメンテーション

小型家電検出の結果は、12 品種 13 個のうちガストーチ 1 個のみが検出されなかった（図 4-31(a)）。これは、ガストーチをベルトコンベア上に置いた時の高さが低く、今回用いた Depth カメラの検出限界以下となったためだと考えられる。家電識別では、検出が成功した 11 品種 12 個の

セグメンテーション後の画像 34 枚を家電識別モデルに入力した。この際、今回の学習モデルでは、学習させた 18 品種の家電それぞれに対する尤度が出力され、その合計が 100%になるため、尤度が 50%以上になったものを識別結果として採用した。また、いずれの尤度も 50%未満の場合は、最大のもを識別結果とした。最大尤度だけで見た場合、11 品種 12 個のうち 9 個を正しく識別することができた（図 4-31(b)、図 4-32）。一方、図 4-32 に示すように、同じ小型家電でも撮影面によって尤度のばらつきが大きい結果となった。この原因の一つとして、セグメンテーションの精度が考えられる。実際、家電識別モデルに入力された 34 面の画像に対するセグメンテーション結果を見たところ、27 枚は家電と背景が正しくセグメンテーションされていたが、残りの 7 枚については一部しかセグメンテーションされていない場合や背景と一緒にセグメンテーションされている場合があった（図 4-31(c)）。なお、ラジオや炊飯器、掃除機 1 は正しくセグメンテーションされているにも関わらず全面において尤度が低く、他の家電に識別される結果となった。その原因としては、他の家電に類似した特徴を持っていることや、学習データの不足などが挙げられる。

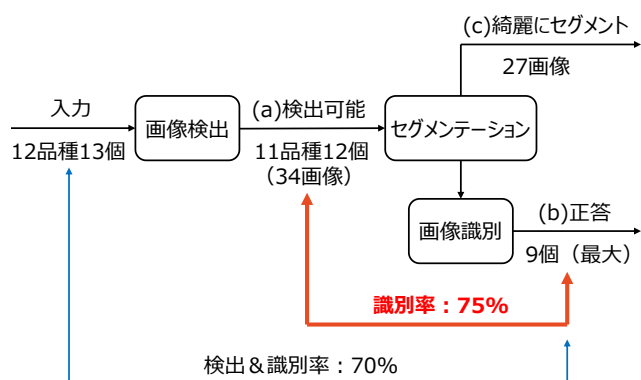


図 4-31 画像検出と画像識別結果のまとめ

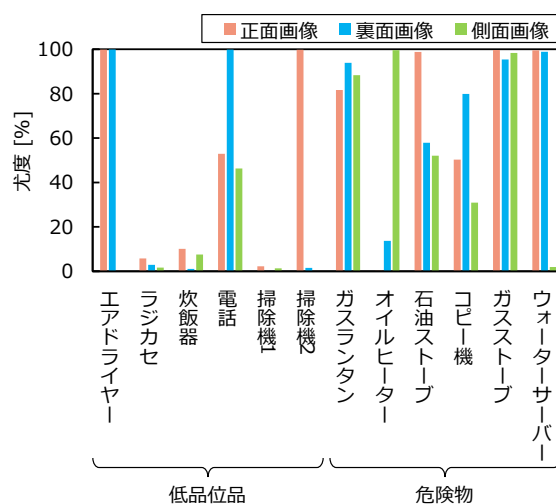


図 4-32 画像識別結果詳細

以上より、低品位品および危険物を含む 10 種類程度の家電について、識別率は 75%となった。また、ベルトコンベア上の小型家電を検出してから識別までにかかる時間は 10 秒以下となることが見込まれ、全体を通して 1 個当たり 5 分以内の実現に支障がないことが明らかとなった。今後、

- (1) ベルトコンベア上の家電検出の精度向上に向けて高精度な距離センサを導入
- (2) 画像中から識別対象家電のみを正確にセグメンテーションできるように、SAM に入力する候補点の選定方法を検討する
- (3) 識別率の向上を目指し、ベルトコンベア上で家電がどのような姿勢になっても識別できるようにする。また、識別対象家電数を増やす (60 種類以上)

ことを行うことで、回収グループごとの対象製品を 3 種類選定し、その識別正解率 70%を目標とする。全体の処理速度については、移動から識別・仕分けまでを、全体的に見た場合に、1 個当たり 5 分以内とすることは実現できる。

(b) 破碎前処理システム

研究開発の概要

前述の小家電ヤード自律選別システムでは、入荷後にヤード展開あるいは山積みされた廃小型家電から、(a)LIB 利用製品、(b)危険物、(c)低品位製品に仕分けされる。(b)は専門業者で処分、(c)はそのまま破碎機に投入する等の対応が想定される。一方で、(a)は、破碎すると火災の危険性がある電池や、資源価値の高い部品類が、低価値の筐体等の構造材に内蔵されていることが多い。現状、電池内蔵が推定される廃製品の多くは、手作業で解体して電池の有無を確認し、残留していた場合はそれを取り除き、残りは一律に破碎される。しかし、電池利用小型家電の増加とともに手作業量が増大し、処理時間やコストの増大を招いている。また、選別工程の初期に、異なる破碎特性を持つ製品を一律に破碎していることも、高度選別の阻害要因となっている。これらの課題を解決するため、従来、機械化されることがなかった「破碎前処理」の工程を、解体すべき廃製品 6 品種に対して解体手法の正答率 90%以上で自律的に行うことが可能な装置システムを開発する。また、限られた情報を元に、解体手法毎に生産性(処理速度、正確さ・精度等)のベンチマーク(最低到達目標)を特定し、試作した一連の解体システムにおいて、廃製品 3 品種以上に対し、各ベンチマークと同等以上の性能を達成する。

(b-1) 破碎前粗解体選別システムの開発

1) 選別システム・装置システム開発のための廃製品品目調査

リサイクル事業者の知見をもとに、安全性・経済性等の観点から破碎前処理システム開発の対象とする廃製品品目を調査し、これまでに手解体の自動化に対するニーズが高い 31 品目を選定した。選定の主な基準には、① 現時点で発生台数が多いこと、② 電池の回収に手間がかかること、③ 資源価値が高いこと、の以上 3 点を設定した。また上記 31 品目より、安全性(電池の発火危険度等)と経済性(資源価値の高低)を踏まえ、24 品目(26 種類)の製品を選定した(表 4-1)。リーテム社水戸工場に搬入された廃小型家電より、これらに対応する廃製品サンプルを選び調整を行った。表 4-1 のとおり、目標台数を予め設定して一定期間に回収を行い(ヘアアイロン(ガス式)は発生量が少なく 23 台)、計 2253 台の廃製品サンプルを準備した。また、リサイクル事業者の経験に基づくグルーピング手法を協議するために、リサイクル現場における手解体の自動化の優先度、既存クロスフローシュレッダー(CFS)による破碎適正に影響する要因(形状のばらつき、内部構造など)、資源価値を基準として各品目の特性の整理も実施した。2025 年度は、後述する改良型 CFS による解体試験の結果を踏まえて廃製品サンプルを再度選定し、試験を実施する産総研への搬出入を行う。また、改良型 CFS の解体条件の最適化結果を踏まえ、グルーピング手法を改良する。

表 4-1 選定した廃製品の品目と搬入台数

品目	回収目標 台数	搬入 台数
ノートPC	100	100
ペンタブレット	100	100
スマートフォン	100	100
ポケットWIFI	100	100
ロボット掃除機	100	100
電動工具	10	10
ハンディ扇風機	100	100
電話子機	100	100
電動髭剃り	100	100
電動歯ブラシ	100	100
デジタルビデオカメラ	10	10
ゲーム機（携帯）	100	100
フォトフレーム	100	100
電子タバコ	100	100
LEDライト	100	100
DVDプレーヤー	100	100
音楽プレーヤー	100	100
コードレスイヤホン	100	100
ヘアアイロン（電池式）	100	100
ヘアアイロン（コード式）	100	100
ヘアアイロン（ガス式）	100	23
コードレススピーカー	100	100
ワイヤレスキーボード	100	100
ワイヤレスマウス	100	100
ランタン	10	10
おもちゃ（乾電池）	100	100



搬入した廃製品サンプル



ヘアアイロン(ガス式)

2) 選別システム・装置システム開発のための廃製品の構造調査

本項目では、非破壊のままで廃小型家電の内部構造を分析し、その情報を活用して自動解体することを目指している。先行事業(NEDO「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業」(2017/6～2023/2)では、スマートフォン及び小型タブレットについて、透過 X 線と深層学習(人工知能(AI)の一種)により非破壊で内部構造を分析した。この手法を多種多様な廃製品に拡張するための初期評価として、約 20 品目の廃製品の透過 X 線撮影を行った。図 4-33 のとおり、透過 X 線撮影により様々な廃製品の内部が可視化され、電池やモーターなどの内部部品が視認できることが確認されたため、深層学習による識別が可能であると推測された。

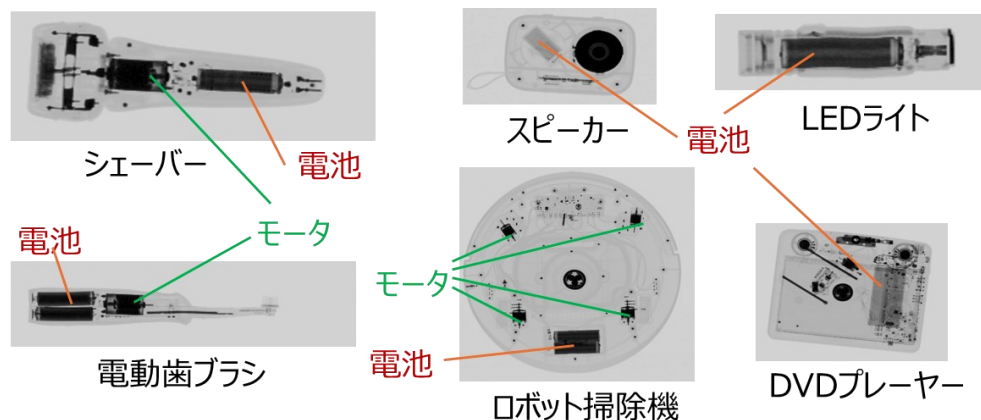


図 4-33 透過 X 線撮影

先行事業では、スマートフォン及び小型タブレットにプレス切断による弱点形成することで、電池を傷つけずに自動解体する技術を開発した。本テーマでは、各種の廃小型家電に対応するため、プレス刃切断を含めた複数の弱点形成方法を検討している。まずはプレス切断実験装置(複合的外力付与試験装置)を用い、約 20 品目の廃製品の切断実験を行ったところ、筐体が頑強な LED ライトやロボット掃除機等を除き、多くの品目で切断可能であることを確認した(図 4-34)。

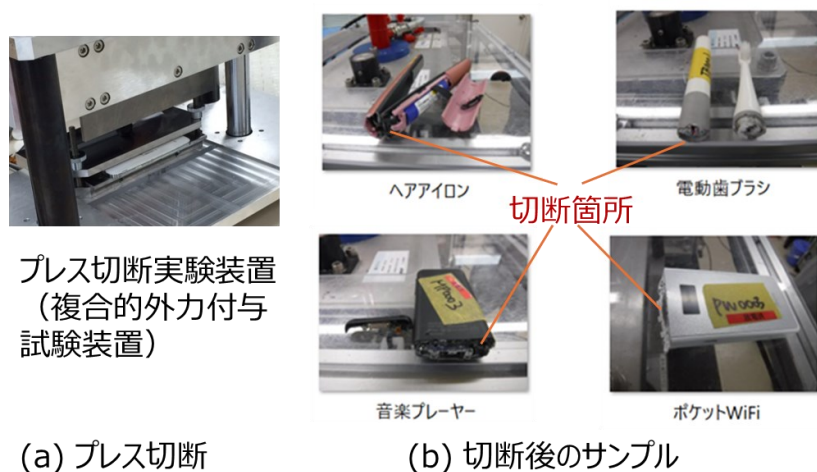


図 4-34 プレス切断実験

3) グルーピング機能開発

各種の廃製品を解体方法に応じてグルーピングする。グループは、解体実験結果に応じて流動的に変更していく予定であるが、現時点では、電池による発火危険度や構造特性に応じた 6 グループを想定している。前工程の小型家電ヤード自律選別システムにより回収された小型家電を、グループに応じて選別を行い、各グループに対して最適化された自動解体を行う流れとなる(図 4-35)。

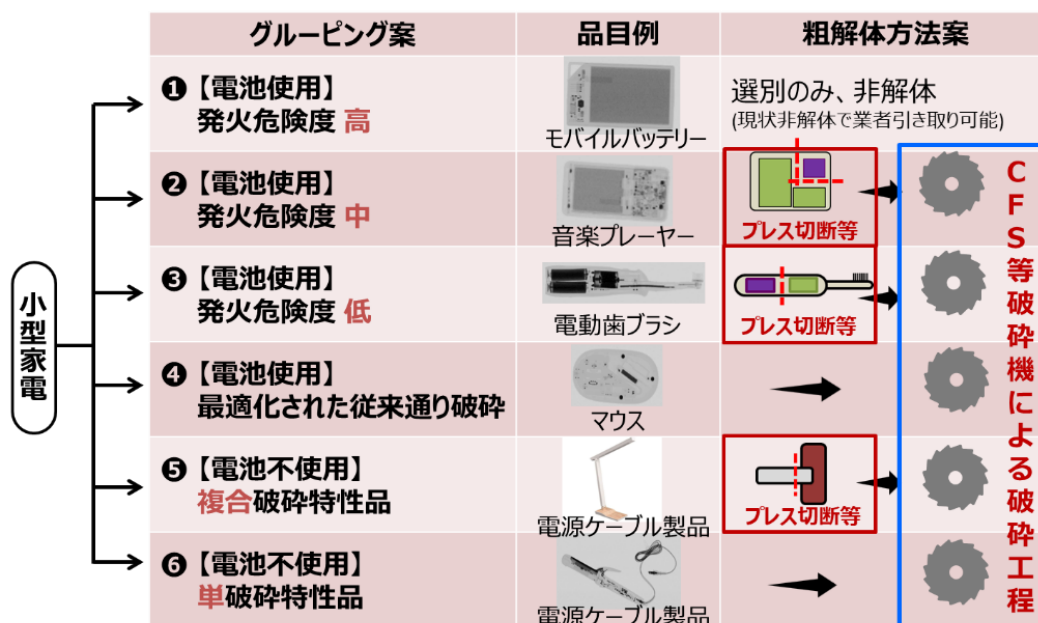


図 4-35 グルーピングの概念図

グループに応じた選別方法としては、透過 X 線及び深層学習による方法を想定している。透過 X 線を用いれば、外観や表面汚れに関わらず、解体手法に影響を及ぼす内部構造を把握することができ、により直接的に選別することが可能となる。25 種の廃製品の透過 X 線画像を取得し(各品目数百枚程度)、深層学習による分類を試みた。混同行列(縦軸に品目の正解値を、横軸に品目の推論値を示す表)を図 4-36 に示す。全体での Accuracy(全画像のうち正しく分類された画像の比率)は 0.91 となった。今回は透過 X 線画像からの品目の分類を試みたが、本テーマで最終的に必要となるのは、複数品目を束ねたグループによる分類である。分類のクラス数が減少するため、精度は現時点よりも向上することが予想される。2026 年 3 月末までに、解体実験結果を踏まえて決定されたグループに基づき、深層学習プログラムの改良を行う。

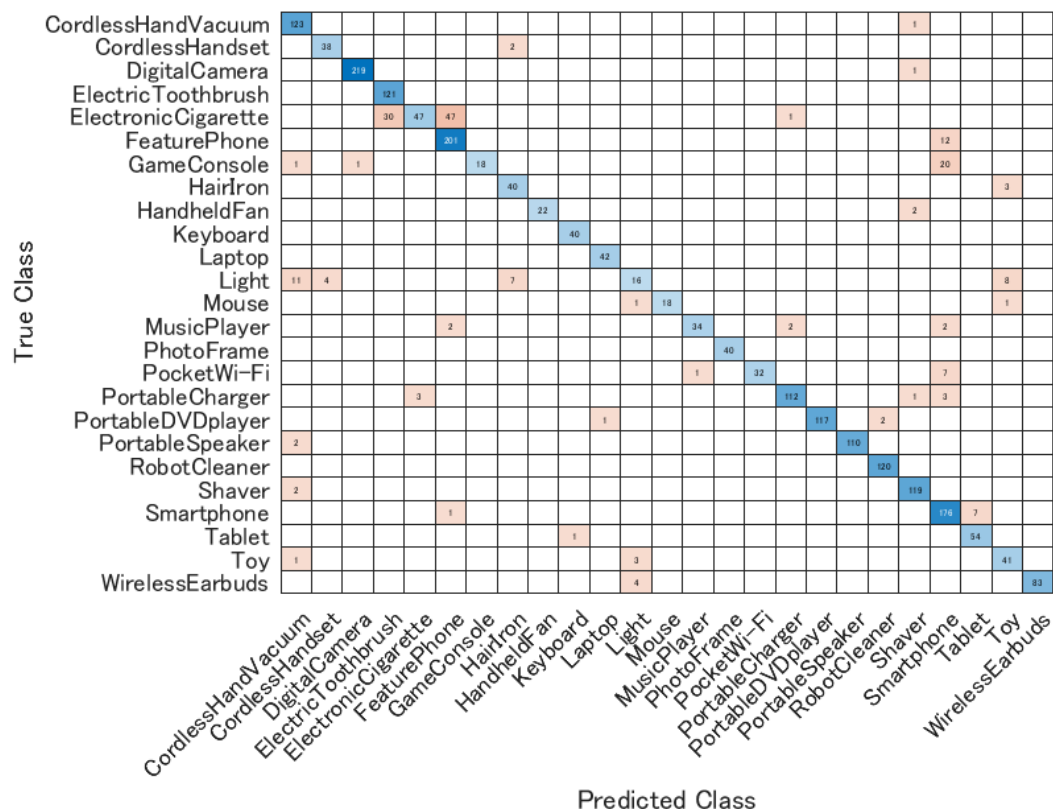


図 4-36 廃製品品目分類の混同行列

4) 選別システムのための教師データ生成技術

一般的に深層学習における教師データの数と種類が大きいほど、推論の精度が高くなる。しかし、廃小型家電を回収して透過 X 線撮影する作業には時間とコストがかかるため、教師データを集める工程が開発のネックになりかねない。そのため、生成 AI によりバーチャルの教師データを作成する技術を開発した。外形や内部構造のバリエーションが大きいハンディクリーナーを対象とした。ハンディクリーナーの透過 X 線画像から、電池・モーターなどの内部モジュールの位置情報を生成する工程と、生成した位置情報を透過 X 線のような画像に変換する工程を組み合わせることにより、新たな教師データを生成する手法を開発した。2026 年 3 月末までに、本手法により教師データ数を増幅することで、深層学習の分類・検出タスク等の精度を上げられるかを検証する。

(b-2) 破砕前粗解体装置システムの開発

1) 装置システム開発のための解体方法の装置化の基礎検討

本項目では、現在、手作業で行われている破砕前の廃小型家電に残留する破砕不適合物(電池等)を取り出すための解体作業を自動化し、処理時間及びコストの低減を目指している。まずは、廃小型家電の手解体現場(リーテム社水戸工場)を訪問し、廃製品 14 品目の手解体に要する時間を調査した(表 4-2)。この調査結果より短時間で自動解体することを処理速度の指標とする。

表 4-2 手解体所要時間測定記録

	品目	台数	調査・記録						
			手解体時間 1台目[s]	手解体時間 2台目[s]	手解体時間 3台目[s]	手解体時間 4台目[s]	手解体時間 5台目[s]	手解体時間 合計[s]	手解体時間 平均[s/台]
1	コードレス掃除機	2	80	95				175	87.5
2	ロボット掃除機	2	15	10				25	12.5
3	ハンディ扇風機	2	54	29				83	41.5
4	電動髭剃り	2	110	80				190	95
5	電動歯ブラシ	2	50	86				136	68
6	ゲーム機(携帯)	5	10	15	77	59	32	193	38.6
7	電子タバコ	2	420	180				600	300
8	DVDプレーヤー	2	80	90				170	85
9	ヘアアイロン	4	2	2				4	2
10	コードレススピーカー	2	300	電池取出不可				300	300
11	コードレスイヤホン	1	45					45	45
12	入力機器(マウス)	2	70	43				113	56.5
13	ノートPC型タブレット	1	180					180	180
14	ノートPC	1	75					75	75

次に、廃小型家電の自動解体装置に必要な機械機構の検討のため、廃小型家電の手解体を行い、製品の内部構造調査を行った。調査の結果から、電子タバコやハンディ扇風機など、電池が筐体の内部に密閉されている品目については、プレス切断による電池格納部と周囲の筐体の分離と、側面からの切り込みによる電池格納部への弱部形成が、解体に有効であると推測した。プレス切断と側面からの切り込みが解体に有効であるかを確認するため、ハンディ扇風機を対象に、先行事業でスマートフォン解体用に開発した複合的外力付与装置による弱部形成試験を行った。試験の結果、プレス切断後、側面からのロール刃圧入により電池の露出に成功し、解体の有効性を確認した(図 4-37)。

複合的外力付与装置はスマートフォンの弱部形成用に開発した装置であるため、寸法の大きな物や筐体が強固な物は弱部形成ができない。他の品目についても解体の有効性を確認するため、2025 年 3 月末までに、処理対象物を拡大した破砕前解体実験装置(プレス切断型(図 4-38)、回転刃切断型(図 4-39))を用いて、弱部形成試験と課題の抽出を行う。2026 年 3 月末までに弱部形成の機械機構を装置化した破砕前解体システムを開発する。



(a)X線画像により
電池の位置を特定



(b)プレス切断



(c)プレス切断後



(d)ロール刃圧入



(e)ロール刃圧入後

図 4-37 複合的外力付与装置弱部形成試験

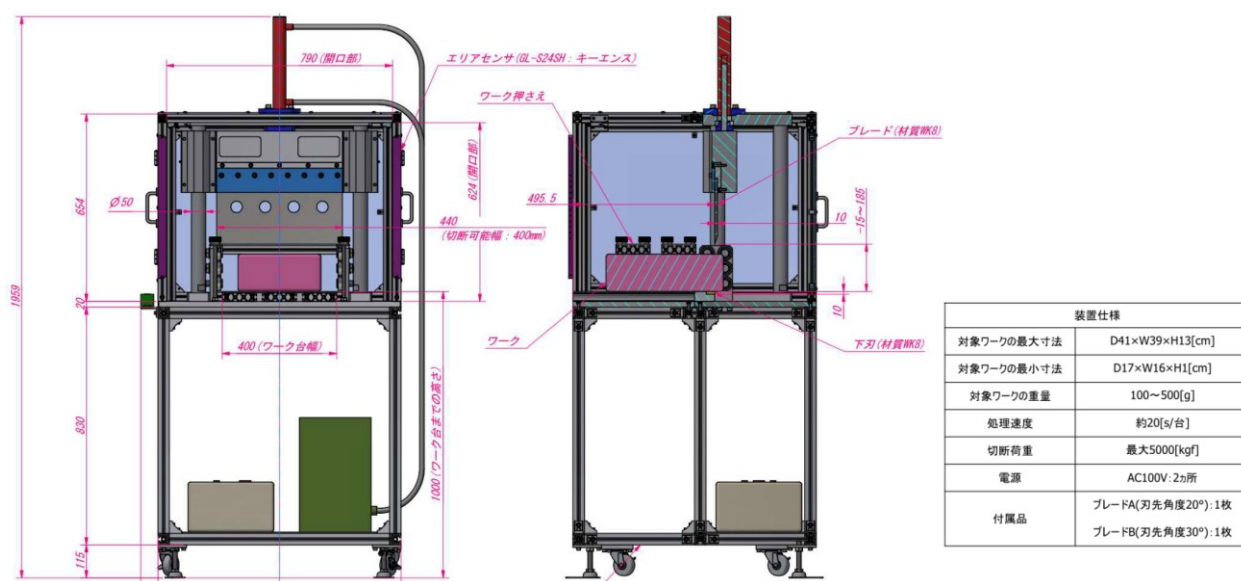


図 4-38 破砕前解体実験装置(プレス切断装置)

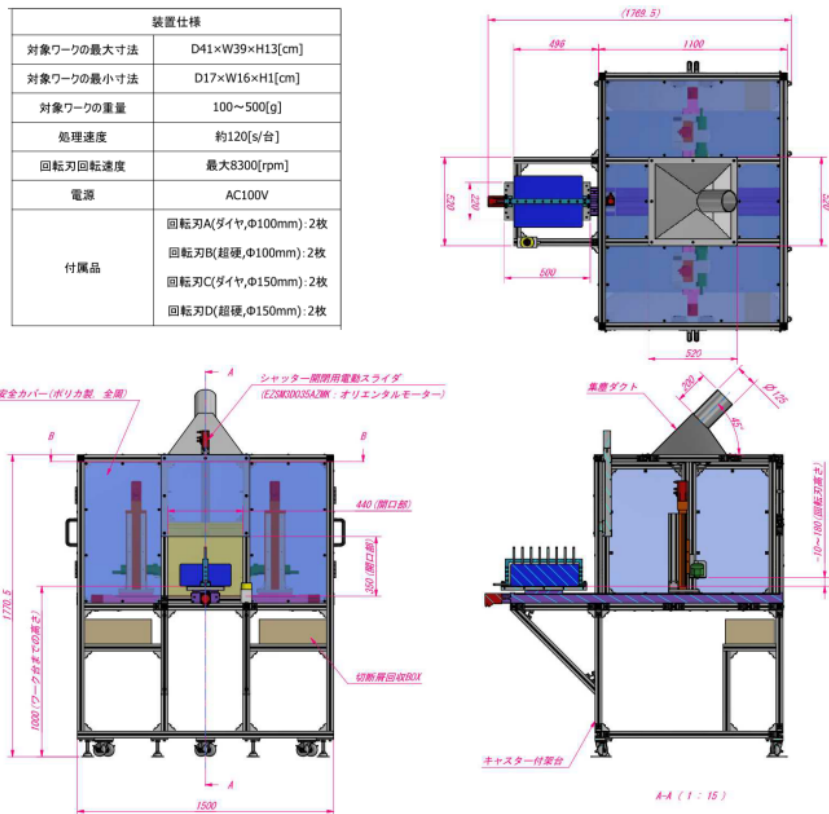


図 4-39 破砕前解体実験装置(回転刃切断装置)

先行事業では、チェーン打撃式解体機として開発した CFS 型解体機にて弱部形成を行わず、デジタルカメラ、フィーチャーフォンの解体に成功した。弱部形成は電池を損傷することなく廃製品を解体する上で重要なプロセスであるが、処理速度、コストの面で弱部形成を行わず、衝撃による解体が可能であることが望ましい。本項目で解体検証を行う廃製品についても、衝撃のみで解体可能な品目を確認し、処理工程のグループ分けをする必要がある。また、上述した手解体調査にて、電池が基板にはんだ付けされている物や電池と筐体が接着剤で固定されている品目があることを確認しており、このような品目については、弱部形成後に衝撃を付与することで電池の単体分離が可能か検証する必要がある。

これらの目的のため、衝撃を付与する実験装置として CFS 型解体実験装置を開発した(図 4-40)。解体手法は先行事業で開発した CFS 型解体機同様、チェーン打撃式を採用した。電動機の高出力化を図るとともに、省エネルギーに配慮した IE5 規格を採用し、対象品目のサイズアップ及び処理量を向上させた。また、将来の実操業を想定し、人手による処理対象物の投入作業を削減するため、投入エリアに大量の処理対象物を貯留する振動ホッパーと投入コンベヤを設け、ロードセル付ストックバンカーを CFS 型解体実験装置の上部に組み込むことにより、CFS 型解体実験装置への処理対象物の自動定量供給に成功した。この他、解体中の電池の損傷を防ぐため、筐体から分離した電池が排出されやすい構造とした。先行事業にて開発した CFS 型解体機では、処理物の個体差により解体の成功率にバラつきがでるケースがあった。この問題を解消するため、本 CFS 型解体実験装置では、解体に必要な衝撃力をコントロールする制御方法を採用した。現在、本装置を用い、弱部形成を行わずに解体可能な品目を把握するための実験的研究を進めている。また、前述の破砕前解体実験装置を用い、弱部形成の有効性についても本装置で検証し、2026 年 3 月末までに破砕前解体実験装置と合わせた装置システム化に至る見込みである。

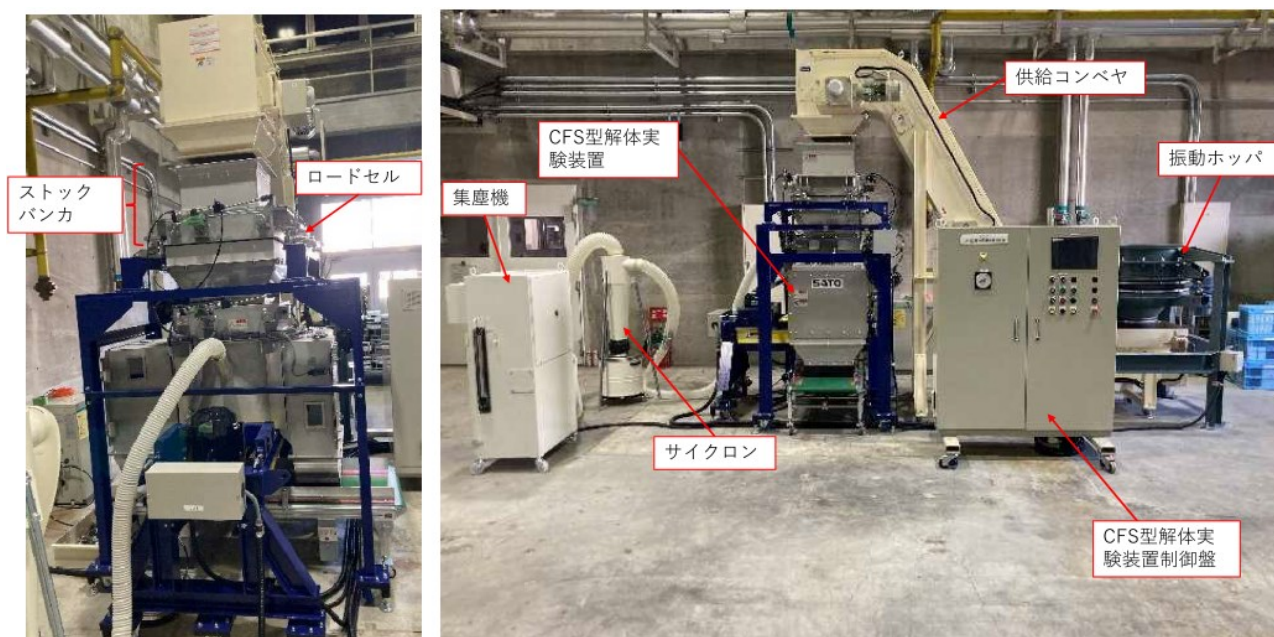


図 4-40 CFS 型解体実験装置(改良型 CFS)の外観

2) グルーピングのための破碎実験

CFS による衝撃のみで解体ができる製品種を特定、拡張するため、図 4-40 に示した CFS 解体実験装置(改良型 CFS)により、前述した小型家電の廃製品サンプルを用いた解体試験を実施し、操業最適化による解体可能性の検討を行った。この改良型 CFS の処理能力や安全性を考慮し、前述した 24 品目(26 種類)から 17 品目を実験対象とした。まず透過 X 線画像で廃製品サンプル内の電池の個数を数えた上で、1 実験につきサンプル 10 台(サイズが大きい品目は 5 台程度)を 1 セットとして投入し、解体して電池を取り出す試験を行った。改良型 CFS においては、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、装置内で外された電池等を傷つける前に自動排出することが可能となっている。

解体試験では、改良型 CFS のチェーンサイズ、チェーンの回転力(周波数)、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)を調整して実施した。試験結果に基づき、それぞれの品目に CFS による破碎方法が適しているかどうかを判断した。CFS による処理方法の適不適の判断基準は、電池がほぼ変形しない状態で 70%以上取り出せることと設定した。試験結果より、CFS による処理が不適と考えられた品目は、電池の占有率高くかつ衝撃に弱いポリマー電池が内蔵されている、本体サイズが小さくかつ筐体の強度が高いため未解体になりやすい等の特徴があることが分かった。「不向き」とした品目は、サイズや形状にばらつきが大きく解体条件が収束しにくいと想定されるものや、筐体強度が高い機種が一部含まれているものであった。ただし、形状や筐体強度が類似する機種を選んで破碎する等、投入方法の工夫により最適な解体条件が見付かる可能性がある。また、CFS 以外の解体方法とも比較し適性を検討する必要があると考えられ、継続する。

2025 年度は、上記の試験結果を踏まえて、CFS による処理方法が適している品目を中心に解体試験を行い、2026 年 3 月末までに中間目標である、電池と基板の取り出しについて最適な解体条件を見出す。また、「不向き」とした品目について、投入方法等の検討と CFS 以外の解体方法と

の比較検討を行う。これらの解体試験結果を踏まえて、廃製品の品目ごとに本プロジェクト終了時点での到達目標(処理速度、解体成功率等)を設定する。

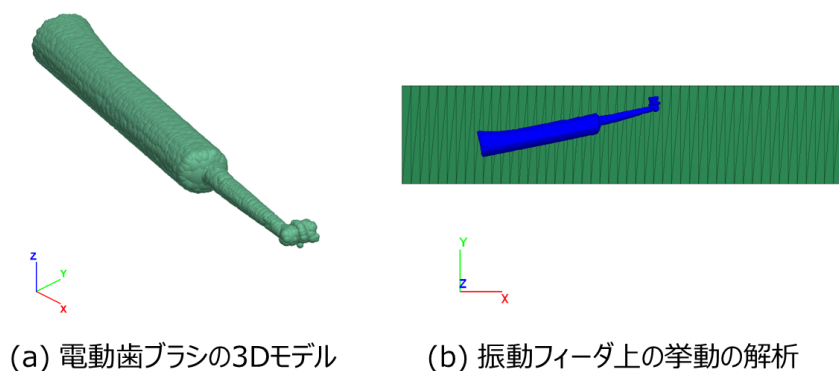
3) 事前選別装置への製品投入機構

破碎前処理工程における事前選別は廃製品単体での選別を想定しているため、前工程の小型家電ヤード自律選別システムにより回収された廃製品を、重なりなく個別に供給する装置が必要となる。先行事業で開発した単品供給フィーダは、スマートフォンやデジタルカメラなど限られた品目を対象としているため、多種多様な品目を対象とした選別システムの製品投入機構を開発する。サイズ・形状が大きくばらつき、形状などのデータの事前登録が不可能な廃製品に対して、山積みになった状態から個別に分離供給できる既存の装置は見当たらないため、開発が必要となる。山積みになった廃製品を振動フィーダとベルトコンベアの自動制御によりばらつかせることを想定しているが、不十分な場合は選別の後工程としてロボットハンドの併用を検討している。

振動フィーダ等によるばらつかせの基礎検討のため、約 10 品目の廃製品を小型振動フィーダに乗せ、振動数に応じた挙動を動画解析した。周波数に応じて前進・後退・滞留といった全く異なる挙動が生じるが(図 4-41)、これは廃製品の形状・サイズ・重量・表面物性が影響していると考えられる。それらを詳しく検証するため、廃製品の形状を 3D スキャナで取得したモデルを作成し、個別要素法による解析モデルを作成した(図 4-42)。



図 4-41 小型振動フィーダ実験の挙動解析



(a) 電動歯ブラシの3Dモデル

(b) 振動フィーダ上の挙動の解析

図 4-42 個別要素法による振動フィーダ解析

また、廃製品の把持に適したロボットハンドの調査・開発も実施した。約 30 品目の廃製品を想定し、各種あるロボットハンドの方式の仕様調査及び把持実験を行ったところ、平行開閉ハンド

によるクランプ式が優れていることが明らかになった。想定する最大の品目であるロボット掃除機から、最小の品目であるワイヤレスイヤホンまで把持できる独自のロボットハンドを開発した(図 4-43)。開発したロボットハンドを用いて、平置きの廃製品を把持し、規定の位置に搬送できることを確認した。上記の成果を踏まえ、2026 年 3 月末までに、選別システムへの製品投入方式を決定し、実験機を開発する見込みである。

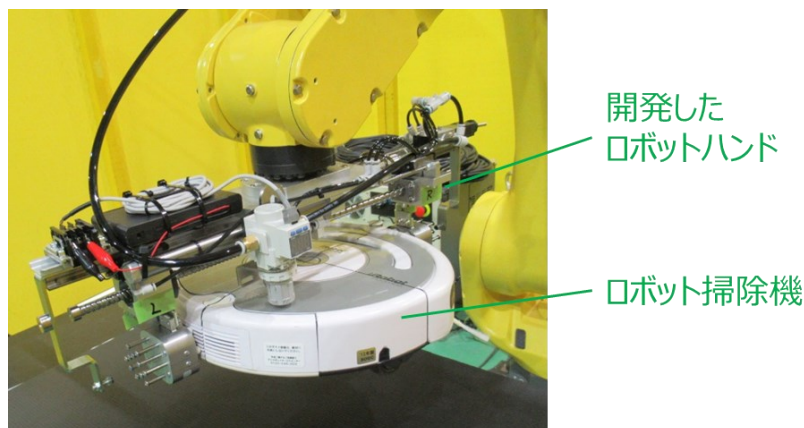


図 4-43 ロボットハンドによる把持実験

4) 廃製品内部構造シミュレーション及び拡散モデル開発環境の構築

X 線画像や可視画像から、内部構造を一意に推定することが困難な廃小型家電の解体を実現するため、シミュレーション環境において、相対的に低リスクな箇所で切断し取得した観測情報を活用して、逐次的に切断位置を判断するアルゴリズムを開発している。具体的には、機械学習における拡散モデルを用いて切断した際の内部構造シミュレーションを実行し、その推定結果から次に切断すべき位置を決定する。拡散モデルの学習には膨大なデータが必要となるものの、切断面の X 線画像をはじめとしたデータを現実世界で大量に収集することは困難であるため、3D シミュレータ上でデータを生成するアプローチを採用した。構築した廃製品内部構造シミュレーション環境上で、既製の電動工具の 3D 外形モデル数種に対してモーターと基板、電池を埋め込んだ製品モデルを作成した。また、シミュレーション環境上で切断操作が実行できること(図 4-44)、及び拡散モデルの学習に必要なデータの収集ができることを確認した。

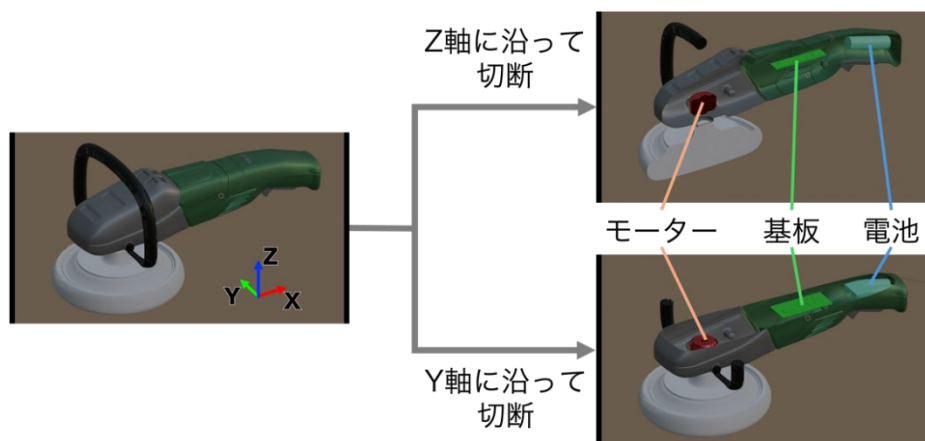


図 4-44 廃製品内部構造シミュレーション環境上での切断操作の実行

提案アルゴリズムの基礎検討として、外形および内部構造を簡易化した小型家電モデルを用いて検証を行った(図 4-45(a))。検証結果より、観測した切断面の情報を基に内部構造の推論ができること、推論した内部構造に基づいて、基板をできるだけ切断せず電池を取り出すための切断面が計画できることを確認した(図 4-45(b))。上記の成果を踏まえ、2026 年 3 月末までに、3D シミュレータ上で実製品を模した数種の製品モデルに対して提案アルゴリズムを適用し、有効性を検証する。

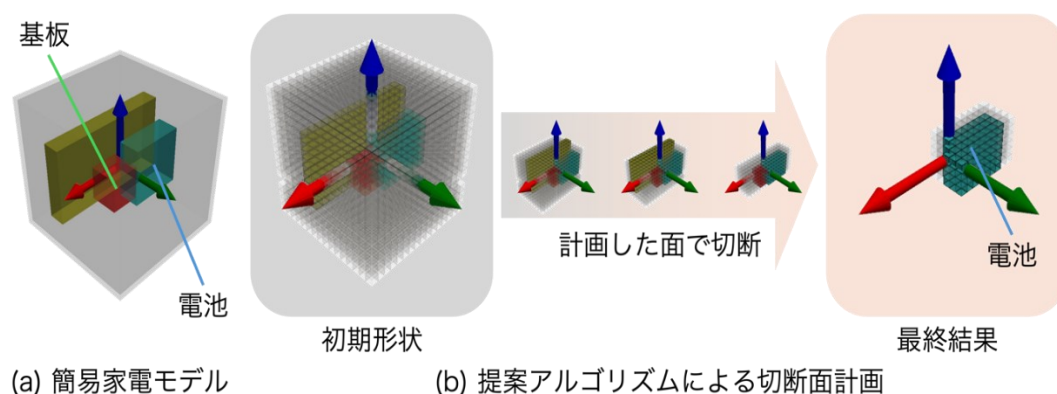


図 4-45 簡易家電モデルを用いた提案アルゴリズムの検証

5) ロボット型解体試験機の開発指針

本項目では、形状や構造が複雑であったりするなど、プレス切断等の単純な解体では難しい廃製品に対応した粗解体方法を検討する。廃製品の解体工場にて、カメラやセンサで作業員の手作業を観察することにより、手作業を自動化装置に置き換えるための指針を得る。どの解体工場においても使用可能なことを念頭に置き、柔軟性と可搬性の高いマルチセンサシステムを構築した。まず全身の姿勢を、慣性式モーションキャプチャを用いて計測した(図 4-46)。頭部、胸部、腕や脚に慣性式計測モジュールを合計 16 個取り付けた。手の姿勢計測は慣性式データグローブを使用して、各指の曲げ角度を取得し、アクションカメラを帽子と胸部に装着させて、廃製品や手元の映像を取得した。加えて、手先の細やかな動作の映像を記録するため、両手首にもアクションカメラを取り付けた。これらのセンサは、装着型と設置型センサの両方で構成されている。作業者の周囲を含む環境情報を計測するために、更に複数のアクションカメラと深度カメラも用いた(図 4-47)。作業エリア全体を網羅するため、前方と後方の左右それぞれ 4 箇所から映像を記録し、作業台の真上から見下ろし視点で更に 1 台設置し、合計 5 台のアクションカメラを使用した。手作業を重点的に記録するため、作業台の中心を捉える位置にも深度カメラを 2 台設置した。アクションカメラと深度カメラの位置姿勢情報は、VR トラックを用いて VR 空間上の座標として取得した。装着型センサと設置型センサで取得したデータは、VR 空間で三次元のデータを統合できる Unity で実装した。



図 4-46 同一時刻・複数視点からの動作計測

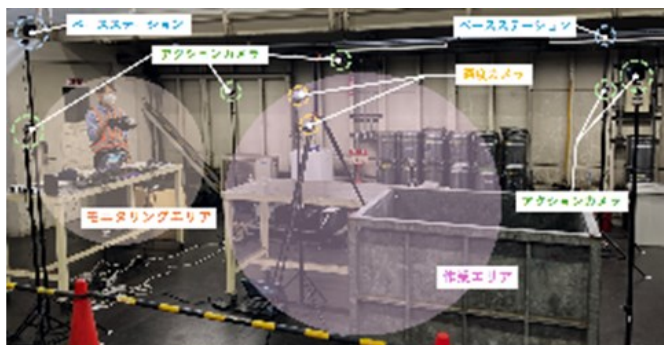


図 4-47 設置型センサ概要及び作業エリア

これまでに、リーテム社東京工場において、ノート PC、ハンディークリーナ、石油ファンヒーター、UPS(無停電電源装置)5 台ずつを対象として、熟練作業員に手解体作業を実演して頂き、その動作を電子情報として取得した。またデータ解析の要点に、熟練した現場作業員の判断や作法を反映させるため、観察者自身も現場での手解体作業を実習した。特にハンディークリーナは、内部の充電電池を取り出すまでに、普段は触らない奥まった部品まで取り外したり、充電電池の端子や配線を工具の刃で短絡接触させてしまうことで、発火しやすいことにも注意が必要であることが分かった。熟練作業員の手作業と廃製品の解体経過を同時に記録することで、作業の解析や分類に加え、判断に迷う場面を整理することができる。また、実用機の実効性(確度)に重要な力情報を、位置情報に追加して検討するため、トルクセンサ付ロボットアームや動作シミュレータの導入なども進める予定である。2025 年度は、引き続き工場での動作観察を実施し、作業員の経験則を分析して、2026 年 3 月末までに解体機構の指針を提案する。

(c) リマン対応分解システム・リマン設計

研究開発の概要

世界的な資源効率(投入資源あたりの付加価値)の最大化が求められている中(図 4-48)、水平リサイクルによる再生材の供給だけでは限界があり、リサイクルに供する前に「リペア・リユース・リマニュファクチャリング(リマン)」と「部品別処理」によって、製品や部品をより長く利用することも求められる。そのためには、廃小型家電を丁寧に分解したのち、高品位な部品を回収する CE ビジネスモデルへの変革が必須である。しかしながら、より多くの部品を取り出すには、分解に人手を要するなど、作業コスト(時間)が大きくなり経済合理性が成り立たない。そのため、極力人手を介さずに分解コスト(時間)を削減することが必要不可欠であり、分解技術および製品のエコデザインがそのキー・テクノロジーとなる。本項目では上述の課題を解決するため、世界に先駆けて、設計情報を活用した高精度な自律分解技術、および自律分解を前提としたリマン設計について、以下 2 課題の検討を実施する。

- ① 動脈のデザイン革新：リマン設計の概念構築、模擬サンプルによるリマン基礎検証
- ② 静脈の機能強化：設計情報を活用した自律分解支援、分解 DB の構築と、ロボットを用いた自律分解 装置の開発・検証

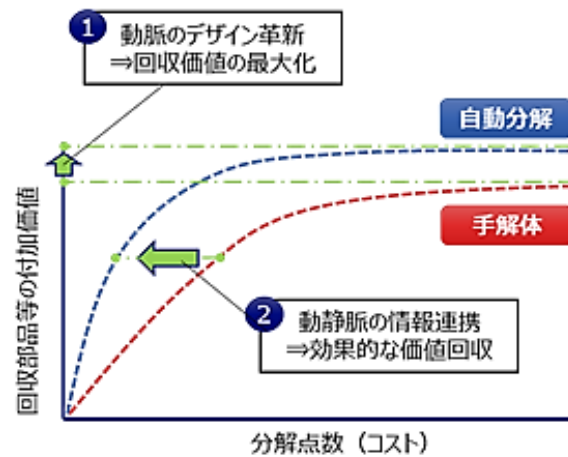


図 4-48 本研究における資源効率最大化の概念

(c-1) リマン対応分解システム

本項目では、リマンに対応した自律分解システムの構築を実施する。開発課題としては、複数メーカーの製品を対象とするかつてない自律分解システムの構築である。この課題を解決するには、設計情報から分解に必要な情報だけを加工・抽出し蓄積した分解データベース(DB)と、分解DBと連携する「自律分解ロボット」からなるシステムの開発が必要である。本テーマは、製品ごとの個別のティーチングを必要とせず、情報連携によって分解手順や分解ロボットの動作を自律的に生成する分解システムとなる。

まず、分解DBにおいて、自律分解を支援するデータ要素を策定し、その結果を基に製品の設計情報(CADデータなど)から分解に必要な情報だけに絞り込んだ、簡易CADデータの生成技術を開発する(i)。この簡易CADデータから分解手順を導出し(ii)、パスプランニングや強化学習を活用したロボットプログラムに落とし込む(iii)、自律生成アルゴリズムを開発する。これら技術をまとめて分解CPS(Cyber Physical System)と呼ぶ(iv)。次に自律分解ロボットにおいては、まずは自律分解の必要機能を定義し、その機能を実現する自律分解ロボットを設計・開発する(v)。さらに、CADデータでは表現の難しい配線やホース等の難認識物に対する認識アルゴリズムを検討し、その対象に対してのロボットマニピュレーションの開発も行う(vi)。加えて、分解DBにて用意された分解情報と、自律分解工程に投入された製品とを紐づけ、自律分解ロボットと情報を連携させる技術の開発を実施する(vii)。

<アプローチ>

以下2つのアプローチをとる。またそれぞれの技術開発の全体像・関係性を図4-49に示す。なお図中の(i)～(vii)は(1)緒言文中の番号と対応している。

アプローチ1：ロボットを用いた自律分解装置の開発・検証

アプローチ2：設計情報を活用した自律分解支援（分解CPS）

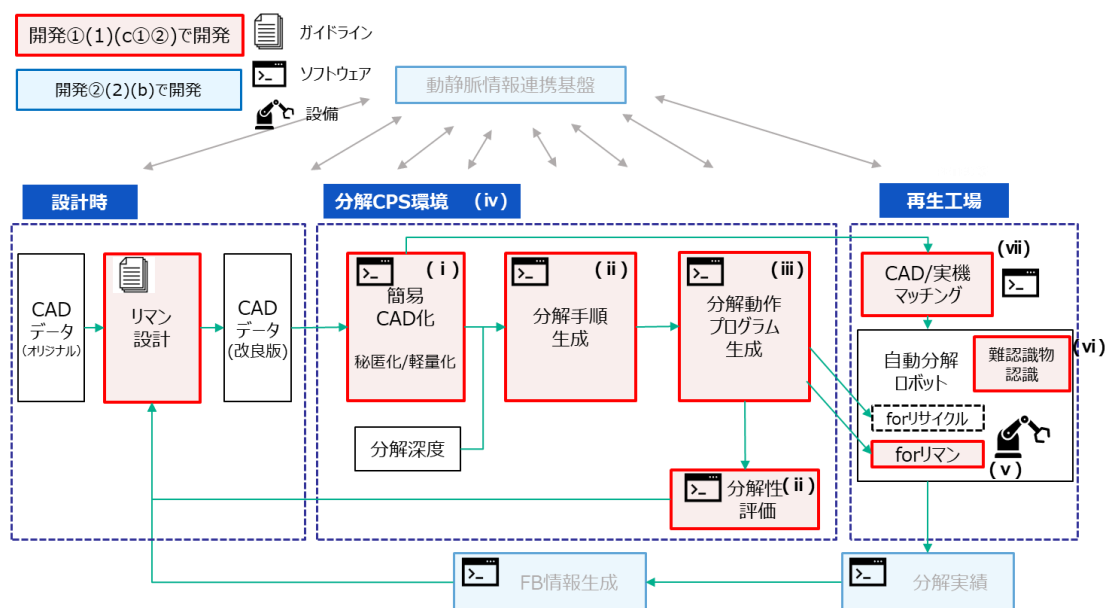


図 4-49 リマン対応分解システムの全体像

<取組結果>

(i) 簡易 CAD 化

複数メーカーの設計情報を取り扱う想定し、秘情報である設計データから分解に必要な情報だけを抽出し、秘匿化および軽量化させた簡易 CAD を生成するアルゴリズムを開発した。具体的には分解単位の部品群でモジュール化する「部品点数削減」と、分解に不必要な詳細な意匠を削除する「プリミティブ形状化」を行った(図 4-50)。このアルゴリズムにより、実際の製品 CAD データを簡易化した結果、目標値であるデータ容量 5 分の 1 まで圧縮することができた。

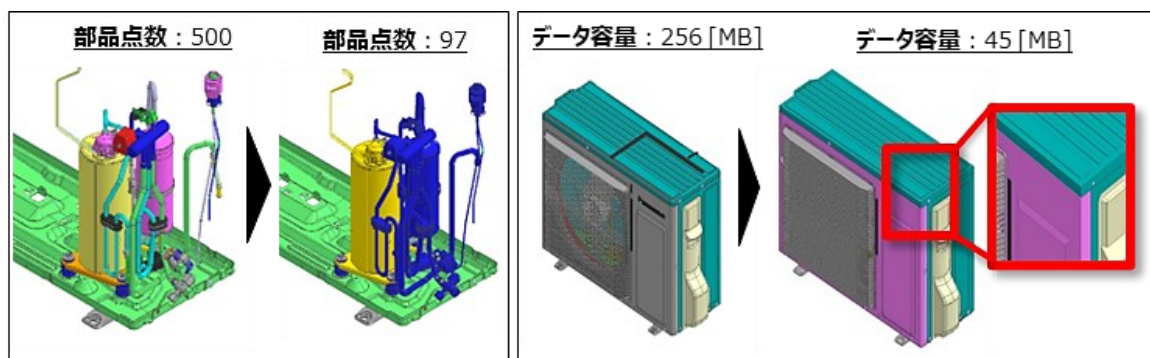


図 4-50 簡易 CAD 化(左：部品点数削減、右：プリミティブ形状化)

(ii) 分解手順生成

様々な製品を様々な目的でリマンのために分解するため(ex. 部品取り、部品交換、全バラシ)、設計情報と分解深度をインプットとして、動的に分解手順を生成するアルゴリズムを開発した。まずは製品内の部品間の相互移動時の干渉から、 $\pm x, y, z$ 軸方向の幾何的な拘束を探索する。その結果を入力とし、分解性を決定づける 5 つの目的関数をもつ多目的最適化により、先述した分解目的を満たす最適な分解手順を導出する。このアルゴリズムにより、簡易 CAD 化した 7 品目に対し分解手順を生成した(図 4-51)。この手順を実際の製品を分解することで検証したところ、目的の

部品まで到達可能な手順であった。一方で、現状簡単化しているスナップフィットを含む変形を前提とした結合箇所の取り扱いが今後の技術開発となる。

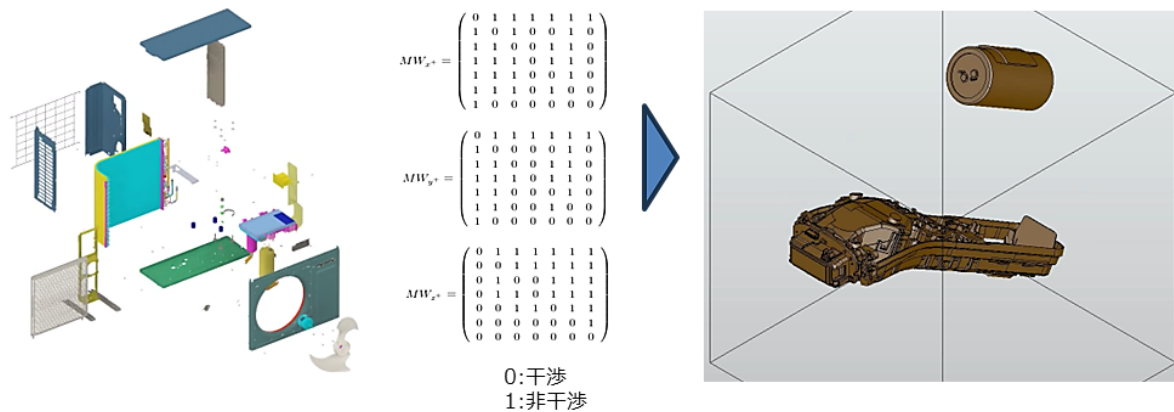


図 4-51 分解手順生成(左：部品間干渉抽出イメージ、右：生成した分解手順の可視化)

(iii) 分解動作生成

(ii)で生成した分解手順をロボットで実現するために、把持する位置など接触する位置と姿勢を計画する「接触計画」とロボットの「軌道計画」を実施し、ロボット分解動作を生成する分解動作生成技術を開発した(図 4-52)。また上記 2 種の計画を統合し、かつ重力や摩擦も表現された物理シミュレーション空間も構築し、サイバー上で製品の分解をシミュレートすることを可能とした(図 4-53)。この環境を用いて、1 品目での動作生成を実施した。

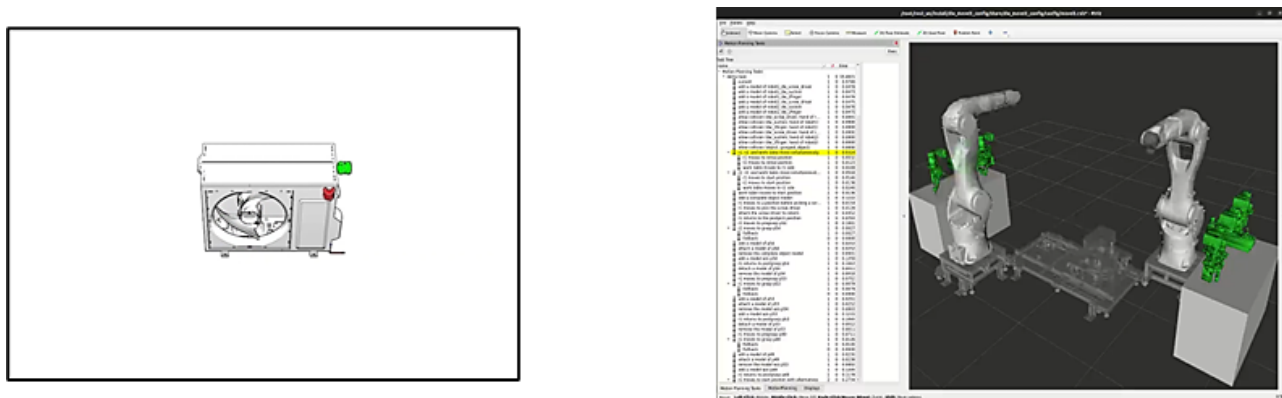


図 4-52 動作生成のための 2 種の計画
(左：接触計画(緑：OK、赤：NG)、右：軌道計画)



図 4-53 物理シミュレーション環境

(iv) 分解 CPS 環境構築

以上(i)～(iii)のサイバー上(C)の開発によって生成される情報を分解 DB に蓄積し、後述する(v)のフィジカルである(P)自律分解ロボットと連携させることが可能な分解 CPS を構築した。これにより設計情報をインプットすることで、サイバー上で自律的に分解動作を生成・分解シミュレーションを行い、その通りに自律分解ロボットが動作することが可能となる(図 4-54)。

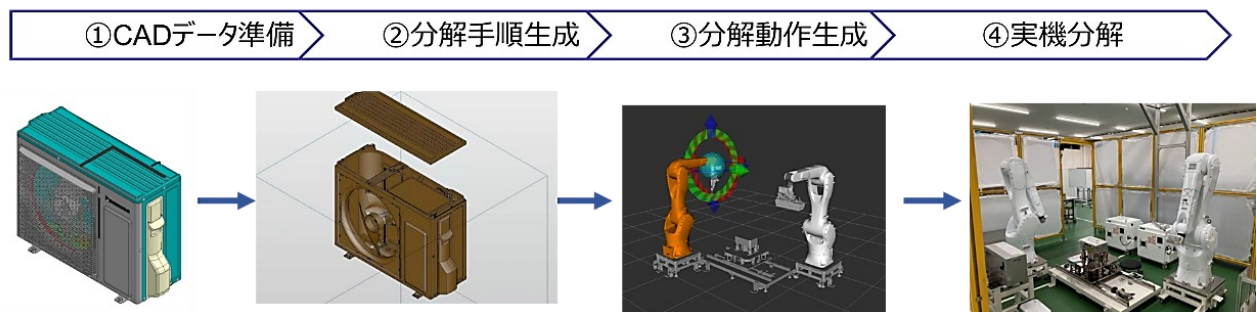


図 4-54 分解 CPS フロー

(v) 自律分解ロボット

前述までの各要素技術と連携し、分解 DB の情報から自律的に分解動作を実行する自律分解システムを構築した。対象となる小型家電の仕様を検討し、ロボットや制御方式などは、多品種・多機種に対応でき、かつオープンソースである ROS(RobotOS)で制御可能なシステム構築をコンセプトに設計・製作した(図 4-55)。

分解 CPS のサイバーパートで生成される情報は理想的な情報であるが、実際には、対象となる製品は機差や千差万別の劣化度合いなどにより誤差があるため、分解 CPS の結果をインストールして動作しつつ、サイバー(C)とフィジカル(P)の差を埋めつつ分解するための技術開発をおこなった。(iii)で生成した 1 品目の分解動作プログラムをインストールし、その通りに動作を実行可能であるか検証・確認した(図 4-56)。



図 4-55 自律分解ロボットシステム

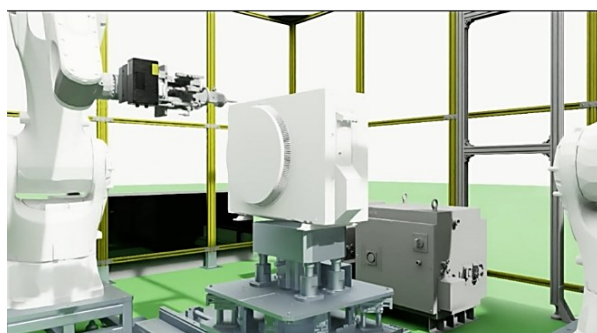


図 4-56 シミュレーションと実機の同期動作

(vi) 難認識物認識

(v)で述べたサイバー(C)とフィジカル(P)の差には機差だけではなく、配線のような柔軟な部品も含まれる。またそれら柔軟な部品は CAD 上に記述されていないこともある。そのため自律分解システム構築のためには CAD データに存在しない難認識部品の認識が必要不可欠であり、これは分解 CPS 上ではなく現場で対応が必要となる課題である。代表部品として配線を例にとり、配線を認識できるか、また切断位置が検出できるか、以下の2パートに分けて検証を行った。

●認識パート：配線周辺を撮像した画像を入力とし、配線を個別に認識する

●切断パート：認識パートで導出した配線のインスタンスごとに切断位置を検出

認識パートにおいては、従来手法であるセマンティックセグメンテーション(配線と配線以外を区別)からインスタンスセグメンテーション(配線を個別に検出)へ変更し、アルゴリズムやディープラーニングのファインチューニングを行い、配線を個別に認識が可能となった(図 4-57)。今後は切断パートにおける、切断位置の検出の高精度化に取り組む。

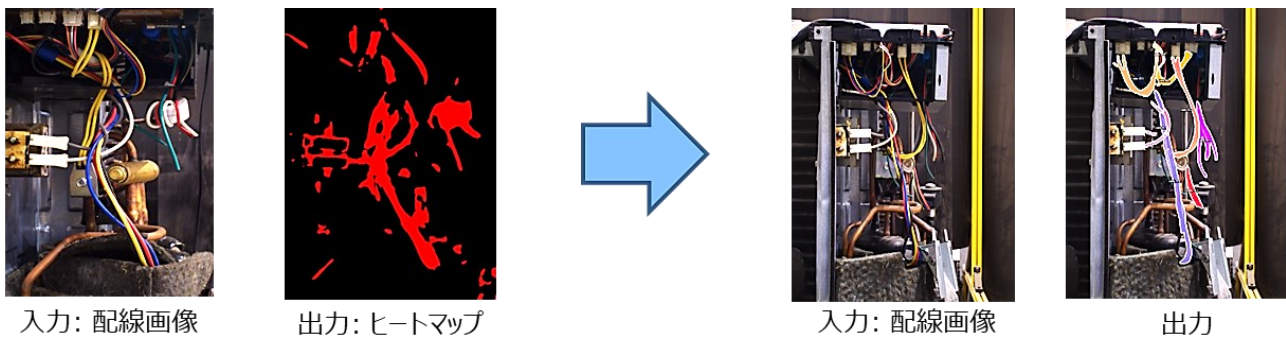


図 4-57 配線認識結果
(左：セマンティックセグメンテーション、右：インスタンスセグメンテーション)

(vii) CAD-実機マッピング

分解 DB に用意された設計データと工程に投入された製品とを紐づけ、自律分解ロボットと情報を連携させる必要がある。基本的には製品に貼付もしくは印字されたラベルを読み込むことで、型番データを検出し連携させることを目指すが、廃製品ということもあり確実に読み取れない恐れがある。そのため、①残存したラベルなら読み取れるか検証し、②読み取れなかった場合を想定し、形状の特徴量から型番を推定する 2 ステップの開発とした。

① ラベル読み取り

36 品目の小型家電のラベルを読み取り、32 品目において正しく型番を認識した (88.9%)。認識に失敗した事例としては、曲面に印字された型番が白飛びや、型番と似た文字列の機器名称を型番と抽出してしまったことが挙げられる。撮像条件の設定や、OCR での型番抽出アルゴリズムなどを改善する必要がある。

② 外観による特定

ある製品種の 5 種の型番違いの製品の外観をあらかじめ学習させ、外観特徴量をもとに品種の判別を行った。正答率は 70.0%となった。この際の学習モデルは 5 種のすべてを学習したモデルであるが、外形のサイズをもとに 2 種にグルーピングしたのちに各グループで学習モデルを構築し、判別する実機についても、サイズで分類したのちに該当する学習モデルで判別した結果、正答率が 100%となった。今後は型番数を増やした状態での判別実験、及び学習画像のバリエーションやデータ数を増加した実験が必要と考えられる。

CAD 情報の簡易化・秘匿化による分解 DB 構築、分解手順・動作の自動生成および、配線などの難認識部品の認識等の要素技術を確立した。またそれらを統合し物理 Sim が可能となる分解 CPS 環境の構築を完了した。分解 DB から自律的に分解動作を実行する自律分解システムを製作し、「分解 DB」と「自律分解ロボット」を組み合わせた連携検証の結果、分解すべき廃製品 1 品種に対して分解検証完了した。分解 CPS、自律分解システムは構築完了し、基本的な製品構造については、既に正答率 70%以上を達成している。課題であるスナップフィット部についても、アルゴリズム構築まで出来ており、システム化を進めることで、達成できる見込みである。

(c-2) リマン設計の概念構築

リマン普及の障害要因は、リマンプロセスが高コストであることと、リマン製品の品質の担保が難しいことである。製品設計時に、リマンプロセスを想定した設計概念を組み入れることによって、リマンの低コスト化と品質管理の向上が期待できる。定性的な言説であるが、設計と製造コストの関係について、設計工程のコストは、製品の製造コスト全体の 5%程度を占めるに過ぎないのに対して、設計は、製造コスト全体の 75%を決定づけると言われる (Huthwaite, 1988)。リマンについても、製品設計が、リマンの可否 (remanufacturability) の 2/3 以上を決定づける

(Steinhilper, 1998)、あるいはリマンの環境効果や社会影響の 80%以上に影響を与える (Nasr et al., 2002) と言われている。つまりリマン設計はリマンの実現に必須要件である。従来行われてきたエコデザイン(3R 設計)では、易分解設計が施されても、それを効率的に実現する分解手段がないために、現場では設計者の意図とは関係なく機械破砕されていることも問題である。既存のリマン設計の事例としては、1990 年代のレンズ付きフィルムのリマン設計とプロセス自律化が挙げられる。また産業機械でもリマン設計の事例は存在する。しかし、実用的な設計ガイドラインはなく、広い産業分野への普及には至っていない。その為、特に、資源を大量に消費しているコンシューマ商品を想定した設計指針となる、リマン設計ガイドラインの確立が重要である。本項目では、多品種・大量なコンシューマ商品に対するリマンを実現する為に、実際に処理を行う前述の自律分解システムとあわせたリマン設計ガイドラインの確立を図る。

<アプローチ>

以下 2 つのアプローチをとる。

アプローチ 1：リマン設計の既存文献も参照して設計要件抽出を行い、ガイドライン作成に繋げる。

アプローチ 2：リマン設計の効果検証対象の候補になる製品をピックアップし、設計データを入手し、ガイドラインを参照しリマン設計を実践する。

<取組結果>

① 文献調査

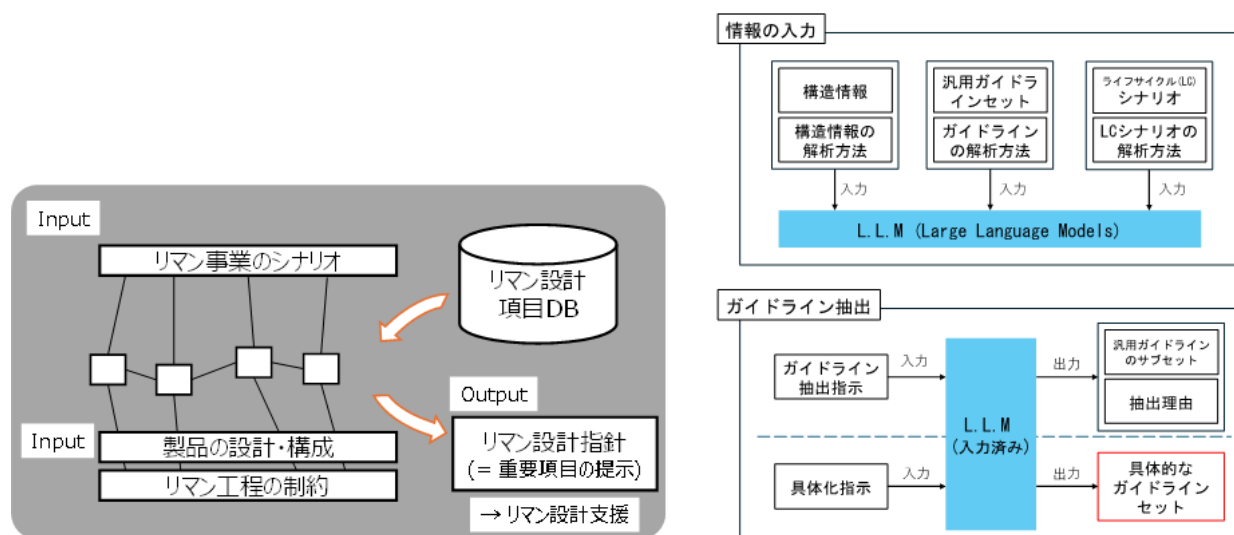
リマン設計要件の抽出を行った。リマン設計要件とは、リマンを効率的に行うための製品設計の指針を指す。例えば「製品のネジの本数を削減する」ことは、リマンの際の分解と再組立ての工程を効率化することに寄与するものであり、リマン設計要件の一例である。こうしたリマン設計要件項目を既存文献から抽出・収集することを行った。調査対象は、学術論文、事例文献、設計規格(例：ICE/JIS Q 62430)、国内外の製品環境ラベルの設計チェックリスト(例：エコマーク、EPEAT、フランス修理可能性指標)等とした。表 4-3 に、抽出・収集したリマン設計要件項目の一部を示す。計 300 項目のリマン設計要件(表中の「設計要件の内容」)を収集した。

② ガイドライン素案

リマン設計要件項目の中から、対象とする製品について、リマン事業のシナリオと、製品の設計・構成、リマン工程の制約を考慮に入れて、特に重要なリマン設計要件項目を選定して、項目を具体化して提示する仕組みを、リマン設計ガイドラインと呼ぶ。図 4-58 の左図にイメージを示す。しかしこの製品やライフサイクルシナリオから、適用すべきリマン設計要件の項目を導出する方法が明らかではなく、設計段階におけるリマン設計実践の課題である。当該課題を解決するために、生成 AI を活用し、製品特性とライフサイクルシナリオを基に、重要なリマン設計要件項目を導出することを行った。図 4-58 の右図に生成 AI 適用の概要を示す。

表 4-3 リマン設計要件項目（一部）

関係する リマンのプロセス	リマン設計要件項目	
	設計要件の分類	設計要件の内容
部品の検査	元の製品材料の容易な識別を考慮した設計	材料識別の容易性を考慮して元の製品を設計する。
		材料評価の容易性を考慮して元の製品を設計する。
		リマンプロセスでの材料評価のために元の製品を設計する。
部品の識別	幾何学的観点からの保管の容易さ	同一または著しく異なる部品を使用する。 規則的な形状から外れた突出物を避ける。
	美的観点からの保管の容易さ	色分けを使用する。
部品の洗浄	元の製品部品の耐久性・堅牢性を考慮した設計	元の製品部品の材料は、洗浄プロセスに耐えられるものを使用する。
	元の製品部品の材料種類を最小限に抑える	部品ごとに使用する材料の種類を制限する。 不要な部品を削減・排除する。
	元の製品部品の清掃方法の識別が簡単でなければならない	同様の洗浄または加工モードが必要な元の製品部品を特定する。
	部品へのアクセスのしやすさを考慮した設計	洗浄するすべての部品・コンポーネントへのアクセスを容易にする。
部品の再利用	複数ライフサイクル用に元の製品およびリマン製品を設計する	リマンおよび分解のための「余分な材料」を備えた部品。 元の製品およびリマン製品は耐摩耗性材料を備える。 リマン製品用に強い摩耗耐性を持つ耐久性のある部品を使用する。
		リマン製品の代替要素に耐摩耗材料を使用する。
		リマン製品の制限された耐久性を最小化する
	リマン製品の制限された耐久性を最小化する	部品間の摩擦によって発生する内部成分の劣化を最小化する。

図 4-58 リマン設計ガイドラインのフレームワークのイメージ（左）、
生成 AI を利用したリマン設計ガイドラインのフレームワーク（右）

生成 AI によってリマン設計ガイドラインを作成した。表 4-4 に、リマン設計ガイドラインが提示するリマン設計要件項目の例を示す。項目を提示することに加えて、製品構造情報を入力することによって、項目を具体化して提示した（表 4-4 参照）。提示される項目の妥当性を現在評価している。妥当性の高い項目が多いが、無関係な項目の提示も見られる。製品構造情報、ライフサイクルシナリオ、具体化指示の情報精緻化によって、精度の向上を試みている。加えて、小型家電 1 製品に対してガイドラインに沿ったリマン設計の組み入れを実施した。

表 4-4 導出されたリマン設計指針（例；一部）

リマン設計要件項目	導出されたリマン設計指針（具体的なガイドラインセット）
【製品の検査】検査を容易にする組立ておよび分解方法の開発	「冷却ファン」のようなサポート部品の設計は、必要なファスナーの数を減らす必要がある。これは、分解と再組み立てを簡素化し、人件費を下げ、自動化をサポートする。これは、特に、Screwing 関係で接続された部品に適用される。 関連部品：冷却ファン、マグネトロン、ファンモーターブラケット
【製品の検査】部品の状態を識別しやすい構造の設計	分解後、「ドアアセンブリー」のような部品は、材料の種類に基づいてグループ化されるべきである。「マグネトロン」は機能別に分類し、検査方法によって不良ユニットを簡単に特定できるようにしなければならない。こうすることで、分類ミスを減らし、さらに正確な処理が可能になる。 関連部品：マグネトロン、ターンテーブル、ドアアセンブリ
【部品の洗浄】リマンのクリーニング工程で簡単な洗浄方法を使用	「庫内」は、特にリマンの洗浄工程で腐食しにくい、洗浄しやすい素材で設計されるべきである。部品を損傷することなく、汚れやコンタミを簡単に除去できるようにすることが、部品の寿命を延ばすことにつながる。汚れの残りやすい鋭い角を避ける。 関連部品：ターンテーブルサポート、庫内、ドアアセンブリ

① リマン設計対象製品選定

リマン設計ガイドラインを策定する上では、実製品における課題を分析し、ガイドライン案の策定に反映させるとともに、ガイドラインに沿った設計変更、模擬サンプルを製作し、リマン設計の効果を検証する必要がある。そのために、ビジネススキームとしてリマンが可能であると想定される製品をリストアップし、各製品設計・製造を担う、事業会社に対しアプローチを取り、本実証事業への協力を募るとともに、秘情報である設計データの提供を依頼した。

結果、8 品目の設計データを入手した。この中には、ベンチマークとするために、すでに 3R 設計が施されている家電リサイクル法対象の大型家電 2 品目も含まれている。

② 小型家電を対象としたリマン設計の実施

上記小型家電のうち、1 品目を例にとり、ガイドラインを参照しリマン設計を施した。リマンを伴うビジネススキームとしては、サブスクリプションで製品を提供し、中途解約により返却された製品の外装を交換することで、2nd ユーザーに再度提供することを想定した。つまり外装を分解するためにかかる工数の削減を目的とし、設計変更を行った。前述の分解手順生成により、分解性を簡易的に評価したところ、外装を外すまで工数を約 56%削減できた。この変更により、機能性・意匠性の担保が可能であるか検証が必要となる。

約 300 項目からなるリマン設計ガイドライン素案の策定を完了した。リマン設計要件の中から、対象製品に対して特に重要な項目を選定して、項目を具体化して提示する仕組みを以って、リマン設計ガイドラインとすることとした。生成 AI によってリマン設計ガイドラインを作成した。小

型家電 1 製品に対してガイドラインに沿ったリマン設計を実施した。現在、リマン設計ガイドラインが提示するリマン設計要件項目の妥当性を評価している。妥当性の高い項目が多いが、無関係な項目の提示も見られる。製品構造情報、ライフサイクルシナリオ、具体化指示の情報精緻化によって、精度の向上を試みている。リマン設計ガイドラインの作成は達成できる見込みである。また実製品に対して、ガイドラインが提示する設計項目を参照して設計変更を行い、その有効性をモックで検証することについても達成できる見込みである。

①(2):再生材多様化に向けた革新的選別システム開発

(a) 選別物性別・全粒群対応装置システム開発

研究開発の概要

研究開発項目①(1)(b)において、破碎前処理システムで破碎特性別に仕分けられた製品や解体された部品は、次工程で破碎機に投入され、各粒子が単成分で構成されるように「単体分離」させる。単体分離された粒子群は、バルク物性利用選別機の 1 種であるスクリーンで粒度ごとに選別されたのち、各サイズの粒子群に対し、回収対象物に応じて適切な選別物性を利用した選別機が選択される(図 4-59)。しかしながら、現状の破碎・選別装置の多くが他産業利用品の転用であり、従来、カスケード利用のための選別が主体であったため、高度選別を実現する「対象サイズ×選別物性」のマトリックスをカバーできていない。そこで本項目では、多様な小型家電から多様な素材(貴金属・銅、レアメタル・アルミ、鉄、プラスチック)の水平リサイクルが可能な「対象サイズ×選別物性」マトリックスをカバーする、選別装置群の開発・整備を実施する。また、各装置・選別システムの自律的制御と、各装置の組み換えを容易にするリコンビナブル機能を開発し、高度選別のための選別装置システムと、それを構成する選別装置ラインナップ(ハードウェア)の確立を目指す。

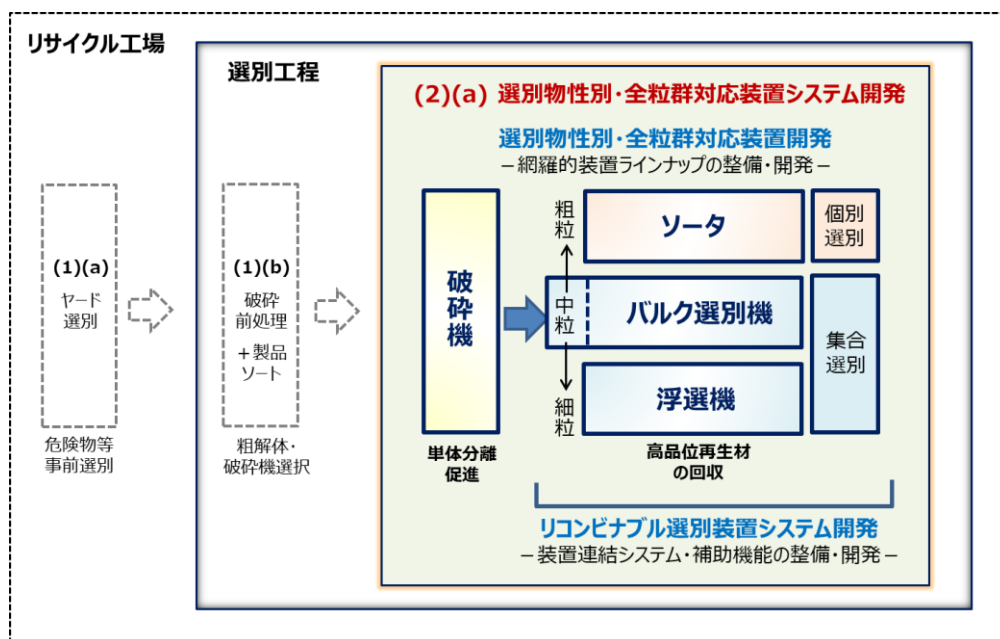


図 4-59 選別物性別・全粒群対応装置開発の位置づけ

(a-1) 選別物性別・全粒群対応装置開発

■破砕機（単体分離特性 MAP）

製品・部品を破砕した結果、単成分で構成されている粒子状態を「単体分離」と言うが、その後実施される選別の良否は、破砕時の単体分離度に大きく影響される。各粒子が単体分離していなければ、その後に如何なる高度な選別を実施しても、高品位再生原料を得ることはできない。一方、リサイクル工場で使用される破砕機のほとんどは、他産業向け装置の転用であるが、他産業における破砕機は省エネルギーに細分化することが目的であり、単体分離を目的としていない。微細化すれば一定の単体分離は達成できるが、粉碎に要するエネルギー・コストが増大すること、微細化によりその後の選別が困難になり選別コストも増大することから、これは極力回避すべきである。なるべく微細化させずに単体分離を達成させるには、廃製品は筐体のみを優先的に破砕する、複合物は異素材境界層で破砕するなど、「選択粉碎」を達成させる必要がある。しかし、これは従来の破砕機で想定していない機能であるため、現状では、リサイクル工場での試行錯誤が余儀なくされている。特に廃製品・廃部品は無数に存在し、多様な破砕機との組み合わせは膨大となるため、多くのリサイクル工場では最適装置を見いだせないまま操業され、再生原料の高品位化を困難にする要因となっている。

単純構造物であれば、DEM シミュレーション等で粉碎速度程度は推定できるが、多様な廃製品の単体分離特性を評価するには、各廃製品の構造に応じた破壊特性を厳密にモデル化する必要がある。計算で網羅的な推定を行うことは事実上不可能である。そこで、破砕対象物の構造特徴からこれらをグループ化し、また、破砕特性から破砕機をグループ化し、両グループの組み合わせによるベンチマーク試験を系統的に実施するとともに、産物の単体分離性を評価して「単体分離最適化 MAP」（図 4-60）のための基礎データを整備する。

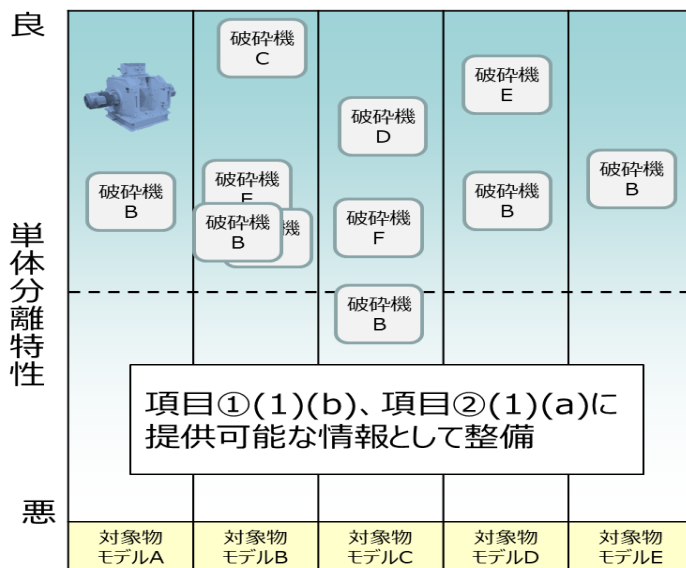


図 4-60 単体分離度最適化 MAP の図案化イメージ

LIB 利用製品は①(1)(b)破砕前処理システムにて選別・解体されるため、ここでは LIB 利用製品以外を対象に構造特徴のグループ化を行った。表 4-5 に廃製品 11 品目 33 製品を解体・構造調査し、製品グループごとに構造特徴をグループ化した結果を示す。なお、この廃製品 11 品目は大栄環境が回収する小型家電全体に対して重量比でおよそ 55%に相当する(2013 年 大栄環境調査結果)。

製品グループごとに筐体材料、筐体の接合方法、筐体内部の金属構造材有無、基板やモーターなど粗破碎後に個別に回収して破碎・選別する部品の有無により分類を行った。

表 4-5 対象物構造のグループ化

製品グループ	筐体	筐体接合法 (ネジ止め)	筐体内部 金属構造材	個別処理部品		暫定グループ
				基板	モーター	
ビデオデッキ、DVDプレーヤー、HDDレコーダー	金属・プラ複合	有	無	△(低価値)	△(小型)	A
電子レンジ	金属・プラ複合	有	無	△(低価値)	△(小型)	
扇風機	金属・プラ複合	有	無	△(低価値)	○	B
ディスプレイ	金属・プラ複合	有	有	△(低価値)	×	C
ゲーム機(据え置き型)	プラ	有	有	○(高価値)	△(小型)	D
電話機、FAX	プラ	有	有/無	△(低価値)	×	E
プリンタ	プラ	有	有	△(低価値)	△(小型)	
掃除機	プラ	有	無	△(低価値)	○	F
空気清浄機、除湿機	プラ	有	無	△(低価値)	○	
炊飯器	プラ	有	無	△(低価値)	×	G
ラジオ、ラジカセ	プラ	有	無	△(低価値)	× △(小型)	

暫定7グループ

表 4-6 に破碎機の特徴グループを示す。主たる作用力、打撃体や刃の種類、作用力の方向により代表的な破碎機を 6 種類選定した。構造特徴グループ、破碎機特徴グループのいずれも現時点では暫定的なグループ化であり、単体分離結果に基づき、最終的なグループ化を決定する予定である。対象物構造グループ×破碎機グループの組み合わせで破碎試験を行い、単体分離分析を実施中である。単体分離特性試験の実施例を図 4-61 に示す。ここで単体分離は破碎物を篩分けし、+8mm の粒子について目視で単体素材か複合材か判別した。

表 4-6 破碎機特徴のグループ化

主たる作用力	打撃体・刃	作用力方向	代表的な破碎機
衝撃	ハンマー	垂直	横型ハンマークラッシャー
	ハンマー	水平	縦型ハンマークラッシャー
	チェーン	水平	チェーン式破碎機
衝撃、圧縮	歯板	水平	ジョークラッシャー
せん断	回転刃	垂直	二軸破碎機
	固定刃・回転刃	垂直	一軸破碎機

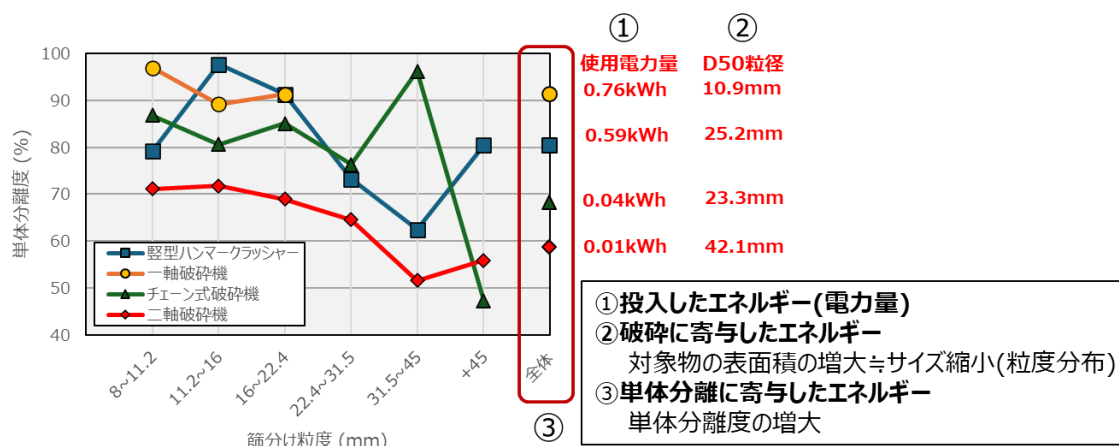


図 4-61 据置型ゲーム機(PS3)の破碎試験結果

なお、モーター、基板、電子素子、被覆線は単体分離粒子とみなし、メッキや塗装は考慮せず母材の単体分離粒子とみなした。単体分離の評価方法について、以下2つの指標で単体分離特性を評価する。ひとつは「単体分離度」であり、当該破砕機にて達成可能な単体分離度を評価する。もう一つは「破砕エネルギー効率」であり、投入したエネルギー(電力量)に対する破砕に寄与したエネルギー、あるいは投入したエネルギー(電力量)に対する単体分離に寄与したエネルギーで評価する。ここで破砕に寄与したエネルギーは対象物の表面積の増大と考えられるが、サイズ縮小(粒度分布)で近似する。また、単体分離に寄与したエネルギーは単体分離度の増大で評価する。これらの指標を用いて一定基準の単体分離度を達成可能な破砕機のうち、破砕エネルギー効率の良い破砕機を単体分離に適した破砕機と評価する方針である。

本項目の中間目標は、対象となる廃棄物全体のうち5割以上に相当するサンプルを対象に破砕対象物の構造特徴からこれらをグループ化するとともに、破砕特性から破砕機をグループ化し、両グループの組み合わせによるベンチマーク試験を系統的に実施するとともに、産物の単体分離性を評価して「単体分離最適化MAP」のための基礎データを整備することである。対象構造物特徴のグループ化、破砕機特徴のグループ化は暫定で決定済みであり、単体分離試験結果により最終決定を行うことで対応可能である。対象物構造特徴グループと破砕機特徴グループの組み合わせによるベンチマーク試験も進行中であり、このベンチマーク試験の結果を元に評価指標を改善することで2026年3月までに中間目標を達成可能な見込みである。

■ ソータ(マルチセンシングソータ(MSS)の開発)

近年、廃棄物ソータに使用される各種センサの小型化、低価格化が進んでおり、従来の選別プラントのように、複数台のソータを直列に配置して多段で選別・回収する必然性は低下している。しかし、各種センサの組み合わせやセンサ発生源情報の利用がもたらす効果は、十分に検討されているとはいえず、最近のAI技術の急速な進展と相まって、1台で多種類の対象物の選別が可能な汎用性が高いソータシステム開発の期待が高まっている。本項目では、従来、複数種のソータが担っていた機能を、1台のソータで網羅的に対応が可能なマルチセンシングソータ(MSS)を開発する。2D/3D画像、レーザー誘起プラズマ分光(LIBS)、誘導起電力(IND)、透過X線(XRT)等の測定部を有し、選別目的に応じて最も効果的なセンサの組み合わせと、センシングフローを評価可能なシステムを開発する。データ解析部では、各種センサの検知データを融合してAI解析するとともに、処理ロット毎の発生源(製品)情報を活用することで、候補となる合金種等を限定して識別精度の向上を図る機能を開発し、そのためのDBを構築する。LIBS等の試料表面状態の影響を受けやすいセンサでは、2D/3D画像と組み合わせ、表面異物が存在しない分析に適した領域を自律的に判断し、そこからの検知情報を活用して種別判定する機能を組み込む。加えて、MSSに適した供給・搬送機構を新規に開発する。

図4-62にMSS(鉄スクラップ向け)の開発イメージを示す。現状のリサイクル現場では、磁選回収される特殊鋼スクラップに対し、手選別で一部のモーターコアを除去するケースが見られる以外は、特に選別は行われていない。各種電気製品に使用される鉄鋼材には、表面に塗装、コーティング、めっき等が施された鋼板やステンレスが広く用いられている。また、Ni含有量が多く、耐熱性に優れたハイ・ニッケル鋼も用いられる。本項目で検討する鉄鋼材のソータシステムでは、LIBS分析による合金元素の検知をベースとし、LIBSソータの高度化(AI画像認識により最適な分析箇所を自動検出)、外観情報の活用、バルク情報の活用により、上述した表面異物の影響を最小化することを目指している。

1) スクラップ元素組成／外観調査結果の DB 化

鉄の含有率が高い廃小型家電として、電子レンジ、IH コンロ、トースター、炊飯器、デスクトップ PC を選定し、元製品種毎に、破碎スクラップ片の組成データを蓄積、選別課題(何と何を分けるのか)を抽出する。また、スクラップ片の外観と組成の関係性のデータを蓄積し、表面異物により LIBS 分析が困難なスクラップ片の外観・形態選別の可能性を検討するとともに、i-LIBS ソーティングのセグメンテーション用画像データ(AI 判定向け教師データ)を収集している。

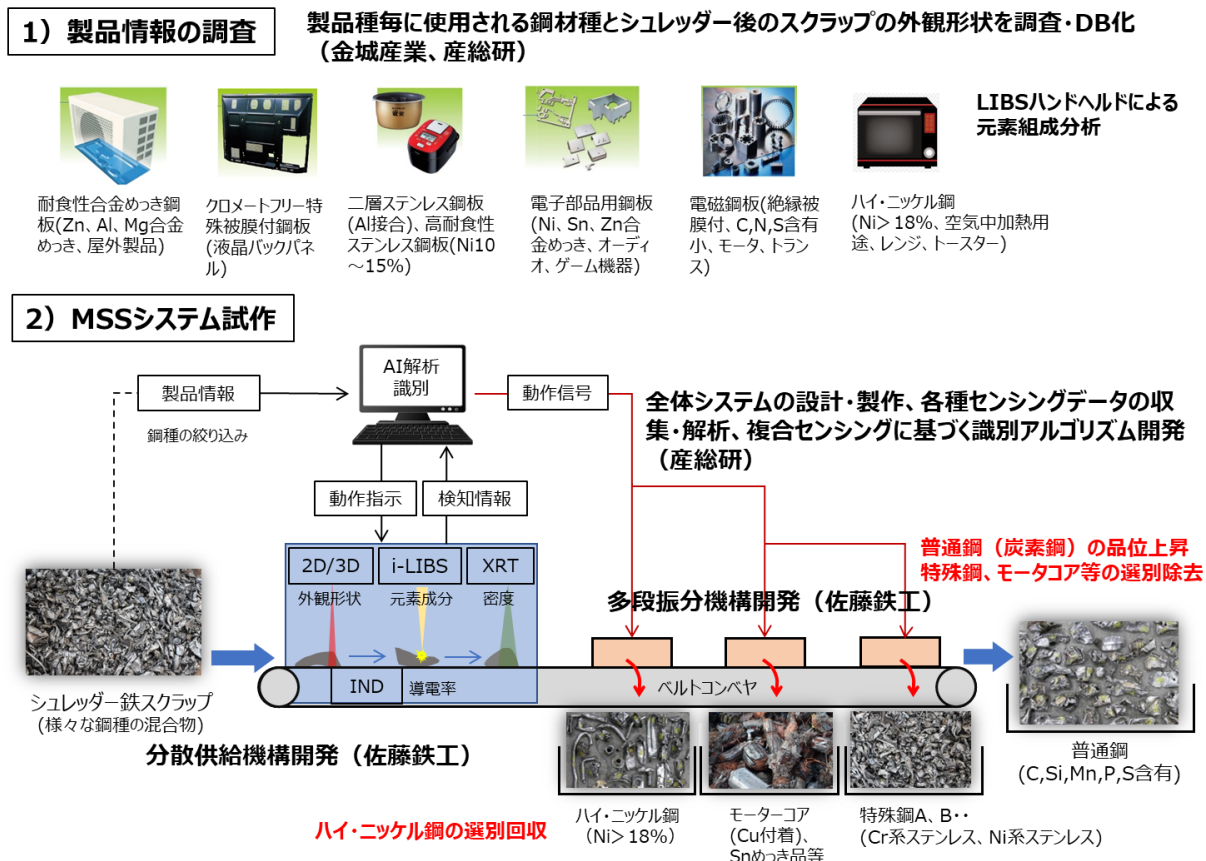


図 4-62 MSS(鉄スクラップ向け)の開発イメージ

図 4-63 に、元製品が電子レンジの場合の元素組成分析の例を示す。金城産業社にて元製品をメーカー別、製造年別に分類(グループ①~⑫)した後、グループ別に破碎、磁選した鉄スクラップ数 10kg を対象に、外観の違いに基づき 33 種類に分類し、ハンドヘルド LIBS 分析により組成を分析、外観写真を記録した。このグループに属する電子レンジには、Ni や Cr 等を含む特殊鋼は使用されておらず、炭素鋼(Carbon Steel)が主体となっていることが確認された。このスクラップの選別では、Mn の含有率が高い 02 合金(米国規格)を選別・除去することにより、鉄スクラップの「炭素鋼」としての付加価値の向上を選別課題とすれば良いことが明らかになった。他の元製品 4 品目についても、これと同様の元素組成分析・DB 化及び選別課題調査を実施した。

■ バルク性質利用選別機の開発・整備

磁選や比重選別に代表されるバルク性質利用選別機(以下、バルク選別機と呼ぶ)は、磁場や遠心場など特殊な場に粒子群を投入することで、各種の金属やプラスチックなど素材固有物性(比重、磁性、導電性等)に応じた粒子運動の違いにより、選別を行う装置群である。集合選別で利用される粒子物性(図 4-65)のうち、バルク選別機で利用される主な素材固有物性(バルク物性)は、比重、磁性、導電性である。この図は、バルク選別機を大分類(利用する粒子性質)、中分類(装置機構)、小分類(個別選別機)として整理した時の「大分類」を示したもので、個別選別機の種類は数百種に及ぶ。また、各選別機には、選別機構上の適応粒径が存在し、粒子サイズに応じて選別機を選択する必要がある。ところが前述のように、これらの装置は他産業用途で開発された転用品であるため、各産業の用途に応じた発展をしてきており、多種多様な素材やサイズに対応した選別機が網羅的に揃っている訳ではない。特に、本研究の対象である小型家電のように品目を限定せず、多様な素材種に対して高度選別を試みた例はほとんどなく、このような目的に対する選別機の「対象サイズ × 選別物性」の適用性自体が明確になっていない。

利用する 粒子性質	外形		バルク物性		
					
	大きさ	形状	密度(比重)	磁性	導電性/磁性
集合選別 (大分類)	篩選別	形状選別	重選	磁選	渦電流 選別
	比重選別				

図 4-65 集合選別で利用する粒子性質

そこで、本項目では、「対象サイズ × 選別物性」における既存装置の適応領域を明確化する試験を実施した上、高度選別に適用可能な装置が存在しない空白領域については新たな装置を開発し、網羅的な装置ラインナップの確立を目指す。厳密な適応領域の整理自体が研究課題となるが、想定される「対象サイズ × 選別物性」の概念を、前述した装置の「中分類」で示すと図 4-66 の通りである。制御条件の精緻化による粒度域拡張などを含め、粒度領域に漏れが生じないよう装置ラインナップを整備する。また、本研究の最終目的は、装置を自律制御化することにある。幾つかの装置においては、先行事業等で、限定した対象物に対する自律制御化を実現している。精密な制御による対象物や粒度の拡張は①(2)(b)で実施するが、自律制御化のために装置改良から必要な選別機(空白領域)は、本項目で装置開発を行う。

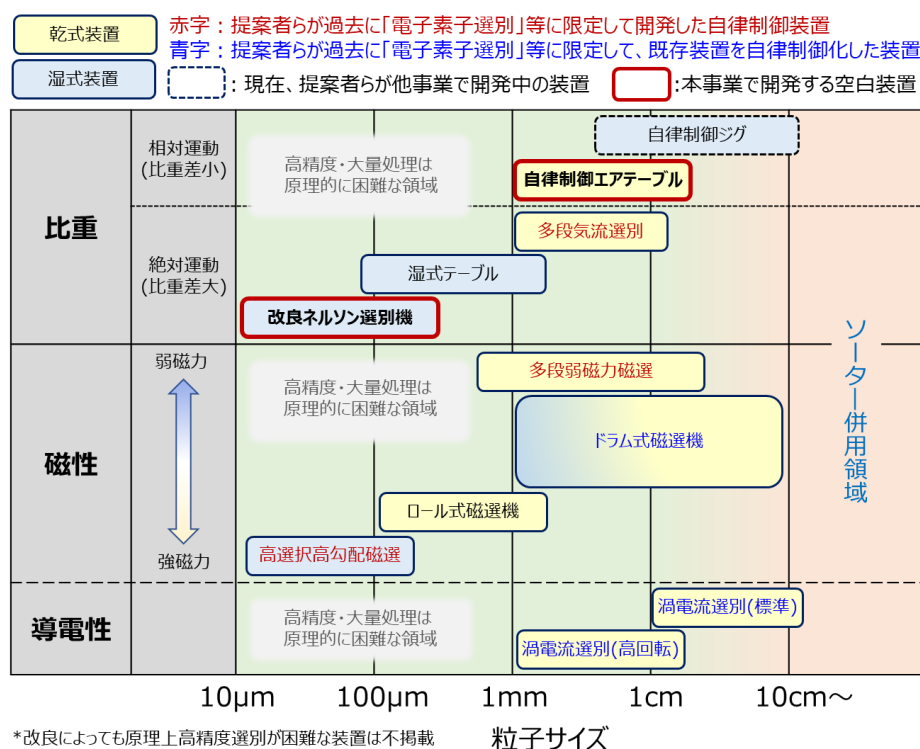


図 4-66 推定される高精度選別可能な中分類装置群と粒子サイズ領域

・既存選別機の選別物性・サイズ限界の検証

図 4-66 に示した中分類の中で、高度選別に適した代表的な装置群(小分類に該当)について、選別物性差に基づく選別機構上の下限粒径検証、選別物性差による要件を満たすサイズ・形状範囲を検証し、選別の理論限界を整理した上で各選別機のサイズ・形状範囲に基づく事前整粒機構を開発する。はじめに素材のバルク物性を調査し、選別機毎に①選別基準物性の選別限界、②下限粒径、③適応粒子形状範囲の影響を検討するための試料を選定した(図 4-67)。それぞれ選別物性差が小さい素材(難試料)を用いて①選別基準物性の選別限界の検証を行い、物性差が大きい素材(易試料)を用いて②下限粒径、③適応粒子形状範囲の検証を行う。なお、気流選別におけるプラスチック同士の選別については、比重差は小さい 2 種のプラを用いて①選別基準物性の選別限界の検証を、比重差は大きい 2 種のプラを用いて②下限粒径、③適応粒子形状範囲の検証を検証する。選別機について、素材、サイズ、形状の異なる模擬試料の選別データを取得中であり、取得した選別データの一部を図 4-68 と図 4-69 に示す。図 4-68 は同一形状(円盤)のアルミ(比重 2.8)と銅(比重 8.9)の気流選別の選別データ取得例である。図 4-69 は同一形状(円盤)のアルミ(導電率 $58.6 \times 10^6 \text{S/m}$)と銅(導電率 $35.8 \times 10^6 \text{S/m}$)の渦電流選別の選別データ取得例である。これらの選別データは①(2)(b)「個別選別装置の自律制御化/サイズ・形状統一指標の開発」にてサイズ・形状の整粒要件を確定する。また、本項目ではサイズ・形状範囲に基づく事前整粒装置を開発する。現時点で気流選別機については粒子の厚さが形状整粒条件となることを確認している(詳細は①(2)(b)項)。粒子の厚さで選別する形状整粒スクリーンを試作した。

磁化率

金属種類		磁化率 $\times 10^{-6} (\text{cm}^3/\text{g})$
鉄		強磁性体
ステンレス (SUS)	オーステナイト系	弱磁性体
	フェライト系	強磁性体
	マルテンサイト系	強磁性体
アルミ		0.65
銅		-0.086
マグネシウム		0.55
鉛		-0.12
ニッケル		強磁性体
亜鉛		-0.157

導電率

比重

金属

プラ

選別機		試料	検証
磁選機	吊り下型	鉄-磁性SUS	①
		鉄-銅	②③
	ドラム型	鉄-磁性SUS	①
		鉄-銅	②③

選別機	材料	検証
渦電流選別機	銅-アルミ	①
	プラ-銅	②③
	プラ-アルミ	②③

選別機	材料	検証
気流選別機	軽プラ-重プラ	①/②③
	銅-アルミ	②③
	プラ-銅	②③
	軽プラ-重プラ	①/②③
(エアテーブル) 後述の改良とは別に事前整粒機構を検討	銅-アルミ	②③
	プラ-銅	②③

＜物性差が大きい：易試料＞
アルミ(比重2.8)円盤

風速 (m/s)	直径9 mm, 厚さ0.5mm (%)	直径9 mm, 厚さ1.0mm (%)	直径9 mm, 厚さ1.5mm (%)
0	0	0	0
5	10	0	0
6	85	0	0
7	100	0	0
8	100	55	0
9	100	90	0
10	100	100	75
11	100	100	100
20	100	100	100

銅(比重8.9)円盤

風速 (m/s)	直径9 mm, 厚さ0.5mm (%)	直径9 mm, 厚さ1.0mm (%)	直径9 mm, 厚さ1.5mm (%)
0	0	0	0
5	0	0	0
10	55	0	0
11	100	0	0
15	100	35	0
16	100	75	0
17	100	100	10
18	100	100	50
19	100	100	100
20	100	100	100

小型単管式
気流選別機

4-48

<物性差が小さい：難試料>

銅(導電率 $58.6 \times 10^6 \text{S/m}$)円盤

アルミ(導電率 $35.8 \times 10^6 \text{S/m}$)円盤

ベルト速度:40m/s,
マグネットロータ回転数：1000rpm



渦電流選別機

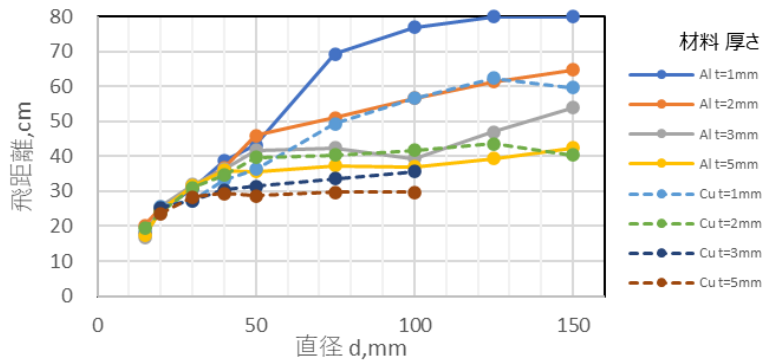
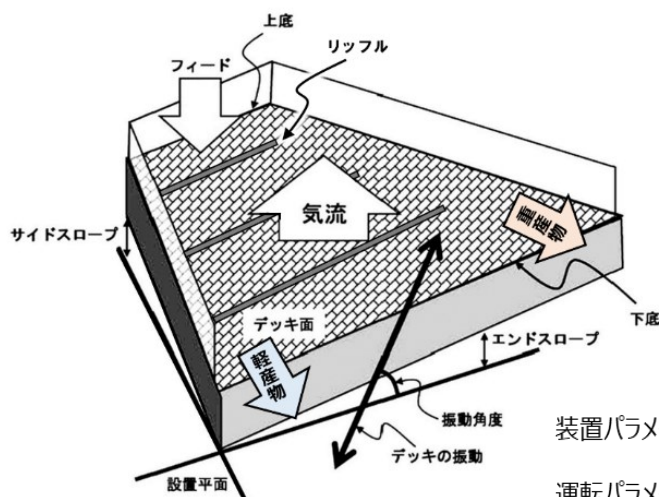


図 4-69 渦電流選別機の選別データ取得例

・自律制御エアテーブルの開発[空白装置]

異比重粒子間の相対運動に基づいて比重選別を行うエアテーブルは、プラスチックの種別回収など、乾式で比重差の小さな粒子選別をも達成できる特徴を持つ選別機である。エアテーブルは、スクリーンが貼られた選別デッキを傾斜させ、振動させつつ、デッキ下部から上方に向けて気流を送るのが基本的な構造である (図 4-70)。デッキ上にフィードされた粒子は上昇気流により流動化し、軽粒子は上層に、重粒子は下層に移動する。重粒子はデッキ面との摩擦と振動によりデッキを登るように移動し、一方で上層の軽粒子はリップルを乗り越えてそのまま滑り落ち、選別が達成される。



装置パラメータ：サイドスロープ長、エンドスロープ長、リッフル数、リッフル長さ、リッフル形状、デッキ形状等
 運転パラメータ：サイドスロープ角度、エンドスロープ角度、風量、振動周波数、振幅、フィード量、フィード位置等
 粒子パラメータ：粒径、粒径分布、形状、形状分布、比重、重量比(重粒子/軽粒子)等

図 4-70 エアテーブルの構造及び各種パラメータ

しかし、選別機構上、他の比重選別機と比べてもサイズ・形状の影響を強く受けるため、対象物に応じた適切な事前整粒や、選別機の運転制御を行うことが難しい。同選別機の他に代えがたい特徴と、その選別ポテンシャルを最大限に引き出すには、対象物に応じて、装置の多様な選別パラメータ(運転パラメータ：サイド/エンドスロープ角度、風量、振動周波数、フィード量等、粒子パラメータ：サイズ、形状、比重、重量比(重粒子/軽粒子)等)を自律的に制御することが必要である。そこで、本項目では自律制御型のアアテーブルの開発を目的とした。装置パラメータであるデッキサイズによる影響検証のため、相似形でデッキサイズの異なるアアテーブルを用いてプラスチックペレットの選別試験を実施した(図 4-71)。デッキ面積は産総研開発ポケットアアテーブルが 0.0446m²、SSS ダイナミクス社製アアテーブルが 0.1376m² であり、SSS ダイナミクス社製アアテーブルの方がポケットアアテーブルより 3.1 倍大きい。両アアテーブルの最適運転条件にて ABS ペレット(比重 1.05)と POM ペレット(比重 1.40)の選別を行い、分離効率 90%以上を維持可能な処理量を測定した。ポケットアアテーブルの処理量は 1383g/min、SSS ダイナミクス社の処理量は 2324g/min で、SSS ダイナミクス社製アアテーブルの方がポケットアアテーブルより 1.7 倍の処理量となることを確認した。次に、装置パラメータのひとつであるリップルの高さの影響検証を行った。図 4-72 にリップルの高さと処理量の関係を示す。リップルの高さとともに処理量が増大することが分かる。これはリップルの高さが高くなることによるデッキ上の粒子層の層厚が厚くなることにより処理量が増加したためである。以上のように自律制御アアテーブルの開発に必要な重要パラメータを実験的に解明するために系統的な試験を実施中である。得られた実験結果は後述の選別結果予測システムに利用することでアアテーブルの自律制御を実現する。

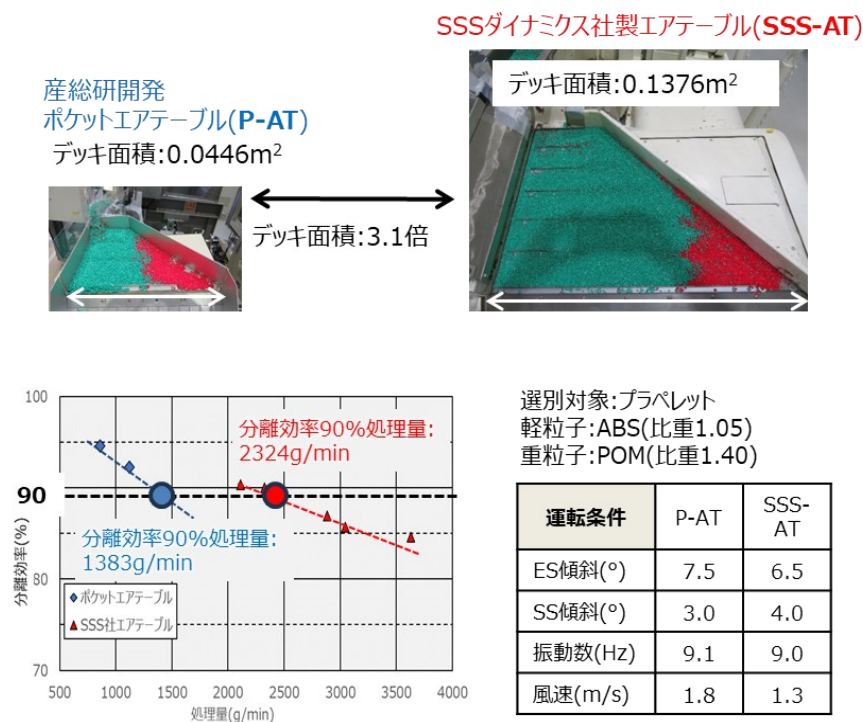


図 4-71 エアテーブルにおけるデッキサイズと処理量の関係

選別対象:プラペレット
 軽粒子:ABS(比重1.05)
 重粒子:POM(比重1.40)

運転条件	
ES傾斜(°)	6.5
SS傾斜(°)	4.0
振動数(Hz)	9.0
風速(m/s)	1.3

試験装置:SSSダイナミクス社エアテーブル

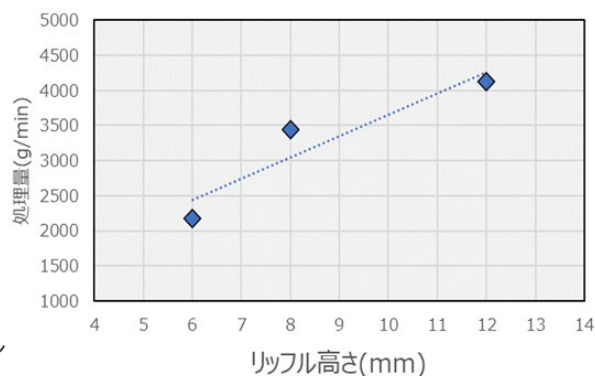


図 4-72 リップル高さと分離効率 90%以上を維持可能な処理量の関係

エアテーブルの自律制御のために、デッキ面上の粒子群の運動をモニタリングし、その解析情報を用いて選別結果を予測する、選別結果予測システムを開発する。予測した結果に基づいて、自律的な制御が可能となるシステムの構築を目指している。これまでに、選別結果を予測するため、PC 上で粒子運動を再現するシミュレーションモデルを構築した。このモデルには、廃製品起源のプラスチック等の破碎粒子を扱うため、非球形粒子に対応した離散要素法と、デッキ面下からの気流の流体解析を連成させる手法を適用した。図 4-73 にプラスチック破碎片粒子を選別した時のシミュレーションの例を示した。緑色が ABS(比重 1.04)、赤色が PVC(比重 1.38)の破碎片を示しており、各回収ポケットに入る ABS と PVC の割合が、実際の選別試験データと概ね一致し、一定の再現性を確認することができた。

また、デッキ面上方にビデオカメラを設置し、そのモニタリング情報より、粒子の形状特徴を抽出し、粒子の運動を追跡することが可能な観測システムの構築にも至った。その中で重粒子と軽粒子の運動の違いを観測する手法を検討・開発し、重／軽粒子群の境界となる位置を推定することが可能となった。2026 年 3 月末にはシミュレーションと観測システム情報をリンクさせ、シミュレーションを微調整することにより、分離効率を 80%以上の精度で予測可能なシステムの構築に至る見込みである。

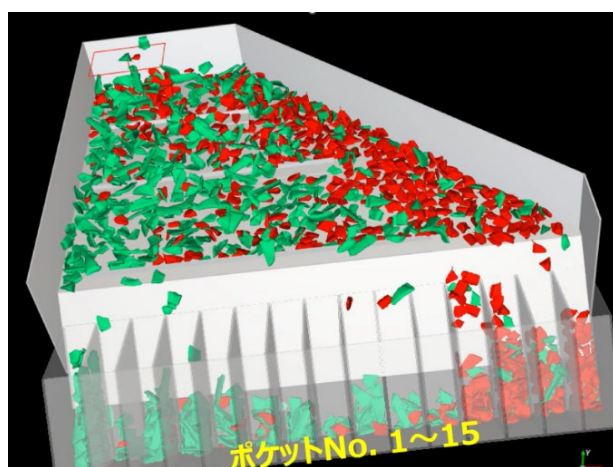


図 4-73 粒子運動シミュレーション例(プラ破碎片)

・改良ネルソン選別機の開発[空白装置]

粒径が 10～100 μ m 程度の細粒子の選別には、主に、表面疎水性の差を利用する浮選が用いられるが、本研究で扱うような組成変動が激しい対象物に対しては導入が非常に難しい。一方、粒子に相応の比重差が存在すれば、より扱いが容易な比重選別機で対応できる可能性がある。金の選鉱などに広く利用されているネルソン選別機は、構造が単純で扱いやすく、選別原理を忠実に再現できれば、高い選別精度を発揮することが期待できる。同装置は、高速回転するすり鉢状の選別容器の中心からスラリーを供給し、容器の内周部の窪みから中心方向へ射出される圧力水と遠心力のバランスにより、重粒子は窪み内に留まり、軽粒子は水とともに上部へ溢流する仕組みを持つ(図 4-74)。極めて比重の大きい金(19.3)の選鉱には実用化されているものの、アルミニウム(2.7)～銅(8.9)の比重域に対しては思うような選別精度が発揮できず、リサイクル用途への活用を阻む要因となっていた。このような課題に対し、先行事業において選別メカニズムの解明を図り、遠心力と対抗する方向に射出しなければならない圧入水が高速回転で乱れ、想定 of 選別原理が実現できていないことを突き止めた。そこで本項目では、圧入水が遠心力に対して対抗流れになる機構・条件を検討し、最適機構を有する改良ネルソン選別機の開発を実施している。

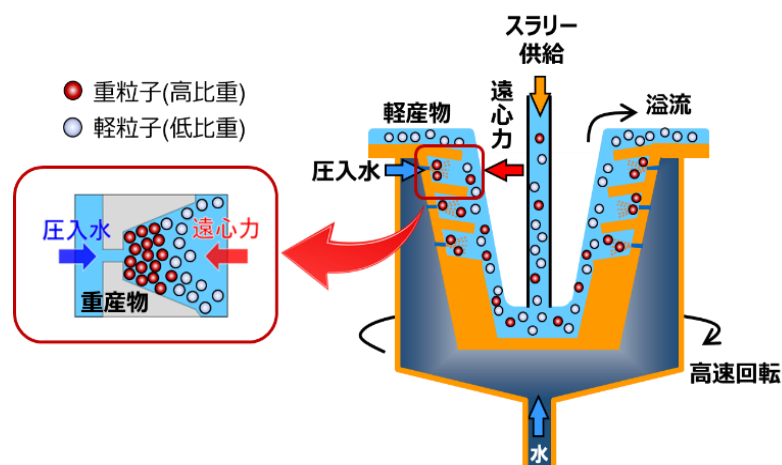


図 4-74 ネルソン選別機の概要

圧入水が遠心力に対して対抗流れを実現し得る改良ネルソン選別機を用いて選別試験を行った。表 4-7 に改良ネルソン選別機による銅(比重 8.93)と石英(比重 2.66)の選別結果を示す。圧入水の入射角が 30° の選別容器では選別精度を向上させることができなかったが、検討中の対抗流れ発現機構により選別精度に影響を及ぼし得ることを確認した。今後、圧入水の入射角を変えた選別容器での試験を行うことにより対抗流れ発現機構の有効性を検証する。また、この検討を通じて、選別精度向上のためには原料スラリー供給速度を一定に保つことが重要であることを突き止めた。従来のラボ試験では原料スラリーをスラリー攪拌容器(ビーカー)から、スラリー攪拌容器を傾けて選別容器に直接投入する方法を取っており、原料スラリーの供給速度が安定しなかった。これを容器下部に管径が一定の排出口を持つカップを介して原料スラリーを供給することで、スラリー供給速度を一定にすることが可能となり、従来の原料スラリー供給方法では分離効率 42.3%であったところ、従来条件でも分離効率 77.9%に改善した。本項目の中間目標は、選別性指標(等速沈降比)2.5 以下での分離効率を 80%以上の精度で分離可能な装置を開発することである。銅(比重 8.93)と石英(比重 2.66)の選別(等速沈降比 2.19)にて分離効率分離効率 77.9%の結果を得ており、今後、圧入水の入射角度のバリエーションと対抗流れ発現機構の条件の組み合わせにより、目標選別性能を有する改良ネルソン選別機を開発可能な見込みである。

表 4-7 改良ネルソン選別機 選別結果

圧入水の入射角	運転条件	分離効率
30°	従来条件	77.9%
30°	新機構 条件1	68.9%
30°	新機構 条件2	70.4%
30°	新機構 条件3	63.8%

銅(比重8.93)-石英(比重2.66)
(等速沈降比2.19)
サイズ: 20-45um粒子

また、選別容器形状の改良方法を検討するため、容器回転速度や圧入水压、入射角度が分離効率に及ぼす影響を解析した。様々な圧入水角度(30～90°)を持つ容器を作成し、回転速度と圧入水压を変化させた選別試験と、容器内で粒子が受ける力のバランス式の導出を行い、容器・試料性状に応じて適切な運転条件を導出する手法を提案した。しかし実用に際しては、試料の粒度や比重によって適切な容器が異なるため、同じ容器を使用した場合でも圧入水角度の影響を軽減するような改良を検討した。具体的にはラギング層導入法、圧入水孔仕切り壁法、多孔質構造導入法、圧入水孔数の増大法の検討を行った。ポイントとしては、分離効率の低下が、容器窪み内の重粒子沈積部に捕捉された軽粒子が脱出できない状態(軽粒子回収率の低下)にあることに起因していると推察されたため、この点の解消を図った。圧入水孔数を約 1.5 倍に増加させた新容器を使用することにより、既存の容器よりも分離効率が増大することを見出した(図 4-75)。図 4-76 に窪み内の水流シミュレーションの結果を示した。コンターの色は中心方向に向かう水流の向き(マイナスが中心方向)、ベクトルは容器回転に対する相対速度ベクトル、ベクトルの色は水(赤)か空気(青)かを示している。旧容器でも新容器でも中心に向かう流れと内壁に向かう流れが交互に出現するが、新容器の方がその間隔が短いため、窪み沈積部にて重産物がほぐされ、混入した軽粒子が中心方向に脱出する機会が増した効果が高いと考えられる。また、新容器では内壁に向かう流れが内壁付近でのみ生じており、窪み深さの半分より表面付近にある粒子が内壁に向かう機会は少ないことも予測された。他のアイデアとして、軽産物側の回収率を高く維持したまま、重産物回収率を増大させる手法も得ており、2025 年度はこれらの改良による分離効率の増大効果を把握するとともに、試料条件に応じた容器形状の改良法として、試料に応じた適切な圧入水孔数、圧入口径の推定法を開発する。

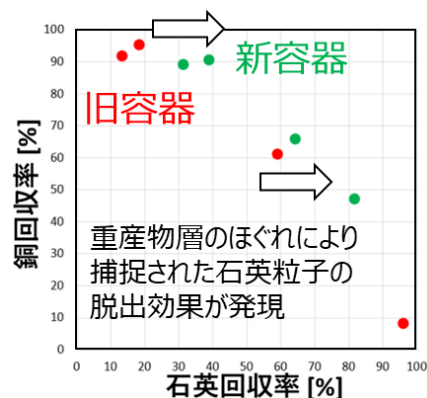


図 4-75 新容器使用による分離効率の向上

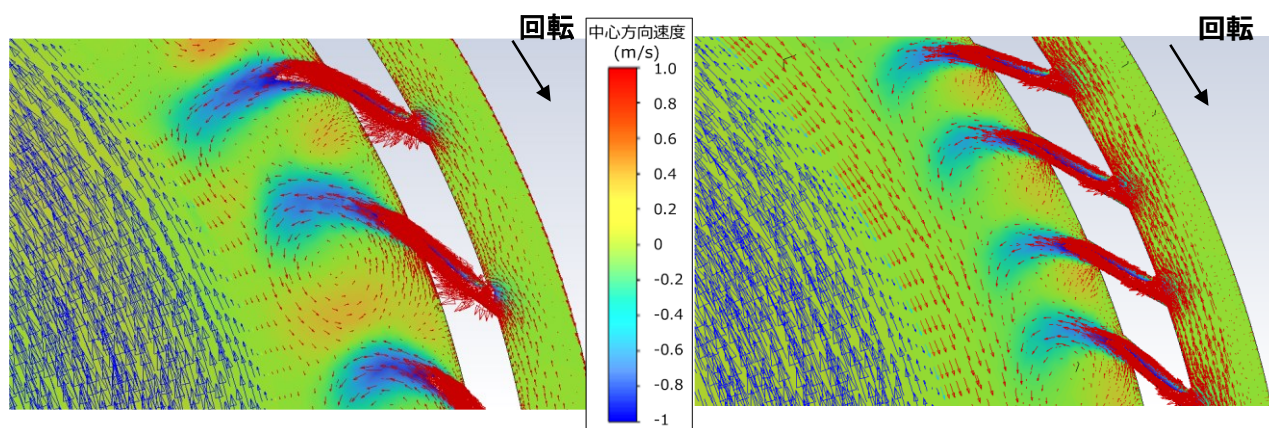


図 4-76 窪み内水流シミュレーション結果(左：旧容器、右：新容器)

■ 浮選(浮選解析手法開発による対象粒子拡張)

・浮選液性評価技術の開発

浮選のリサイクル応用には、粒子表面の物性制御と適切な捕収剤の選定が不可欠である。しかし、多様なリサイクル原料に対応する基準は確立されておらず、体系的な指針が必要である。浮選は捕収剤の吸着、粒子の疎水化、気泡との付着などが関与する複雑な現象であり、既往の浮選条件の最適化は、一部の限られた因子に基づく手探り状態といえる。その結果、粒子の疎水化や付着現象はブラックボックス化し、効率的な最適化が妨げられ、リサイクルへの応用を困難にしている。本項目では、この課題を解決するため、捕収剤の吸着量と粒子の疎水度との関係を解明し、指針の構築を目指す。この目的のためには、捕収剤を吸着させた粒子の疎水性を評価する必要があるが、従来法である接触角法と浸透速度法では困難である。接触角法は必要な液滴量が少なく、UV 法での吸着量測定が難しいことに加え、未吸着捕収剤が表面張力を変化させるため、疎水性の測定値が過小評価されることがある。また浸透速度法は、粉体と溶液の接触が不均一であるため再現性に乏しく、吸着量の評価に限界がある。そこで本研究では、粒子表面の束縛水量に着目した。疎水化が進むと、粒子表面の束縛水が減少すると考えられるため、束縛水の量を定量することで、粒子の疎水性を評価できると考えた。核磁気共鳴(NMR)を用いることで、この定量が可能であると期待される。NMR と UV 法を組み合わせることで、吸着量と疎水度の関係を定量的に把握し、指針の構築につながると見込まれる。

まず、検証用の粒子と捕収剤の選択を行った。リサイクル原料には、天然鉱山資源にはない多様な粒子が含まれると考えられる。そこで、模擬粒子として、アルミナ(金属酸化物)、硫化銅(金属硫化物)、シリカ(非金属酸化物)、ポリスチレン(プラスチック)、及び黒鉛(LIB の負極材)を用いた。また捕収剤には、以下の代表的な官能基を持つ捕収剤を選定した。

硫酸エステル、4 級アンモニウム、キサントゲン酸塩、ヒドロキサム酸

次に、各粒子に対する捕収剤吸着量の評価を実施した。捕収剤の吸着量は、粒子の疎水化を決定づける重要な因子であり、指針の提示に不可欠な情報である。そこで、各粒子に対する捕収剤の吸着量を様々な pH 条件下で測定した。代表例として、アルミナ粒子に対する吸着挙動を図 4-77 に示す。酸性領域で硫酸エステル、弱アルカリ性領域でヒドロキサム酸が良好な吸着を示した。また、実際に NMR を用いた粒子の疎水性評価も行った。捕収剤の吸着量と粒子の疎水度の関係性を把握するため、ヒドロキサム酸の吸着量を変化させたアルミナ粒子を NMR で測定した。その結果、捕収剤の吸着量が増加すると束縛水の量が減少し、粒子の疎水性が向上することが確認された。

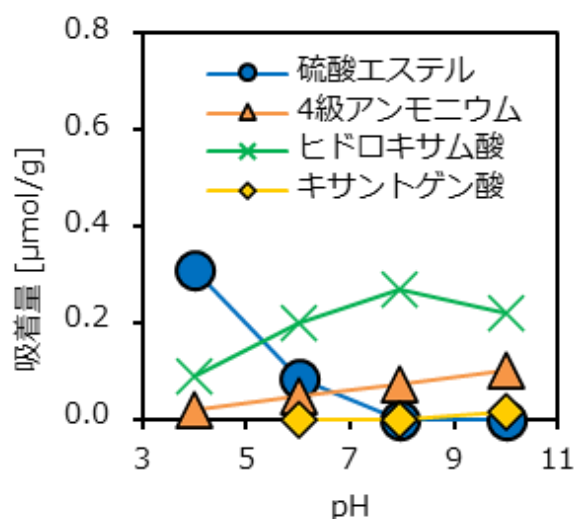


図 4-77 捕収剤吸着量と pH の関係

本研究では、2026 年 3 月末までに、捕収剤の吸着量と粒子の疎水度の関係を整理することを目指しており、これを達成するには、「NMR を用いた純水の測定」など計 6 項目の実施が必要と考えている。これまでにこのうち 4 項目が完了しており、1 項目が実施中である。残る 1 項目については、2025 年度内に実施予定であり、これらの進捗を踏まえ中間目標の達成を見込んでいる。

他にも本項目において、新たな対象物に対して溶出イオンによる意図しない表面改質の有無を検証することが可能な、浮選液性評価技術を開発することを中間目標の 1 つとしている。これまでの検証結果から、異種の粒子共存下でイオン溶出が促進されたため、現在、溶出イオンによる表面改質の有無や、浮選における回収率への影響を検証している。これらの検討や、策定した処理フローに基づき、2026 年 3 月末までに中間目標を達成できる見込みである。

・浮選機の自律制御機構開発

本項目では浮選液性と浮選環境下で起こる各種現象との関係性を明確化した上で、液性を評価し制御することで、浮選プロセスを制御するための概念を構築する。また、浮選槽内で粒子と気泡の挙動を実験・シミュレーションを駆使して解析し、予測精度の高いシミュレータを開発する。これらの目的に資する浮選試験データを得るため、適切な気泡発生機構・フィード機構を備えた標準浮選機を試作し、粒子情報や浮選条件が与えられれば浮選結果を精度良く予測できるシステムを開発する。最終的には浮選の制御システムを構築し、ベンチスケール機にて自律制御性能を検証する。

中間目標の 1 つとして、シミュレータを開発するために適切な気泡発生機構やフィード機構を開発し、これらを備えた標準浮選機を試作する。まず気泡発生機構の開発では、既存の浮選機の気泡発生機構(機械攪拌型／多孔質管)を用いて気泡径分布を測定し、各機構の特性を検証した。いずれの気泡発生機構においても、制御が困難であることが明らかになった(図 4-78)。次に、既存の浮選機のフィード機構を検証し問題点を抽出した。これらの検討結果に基づいて、これまでに新規の気泡発生装置、フィード装置の試作に至った。現在、各装置の検証・改良を実施しており、適切な気泡発生機構とフィード機構を備えた標準浮選機を、2026 年 3 月末までに試作できる見込みである。

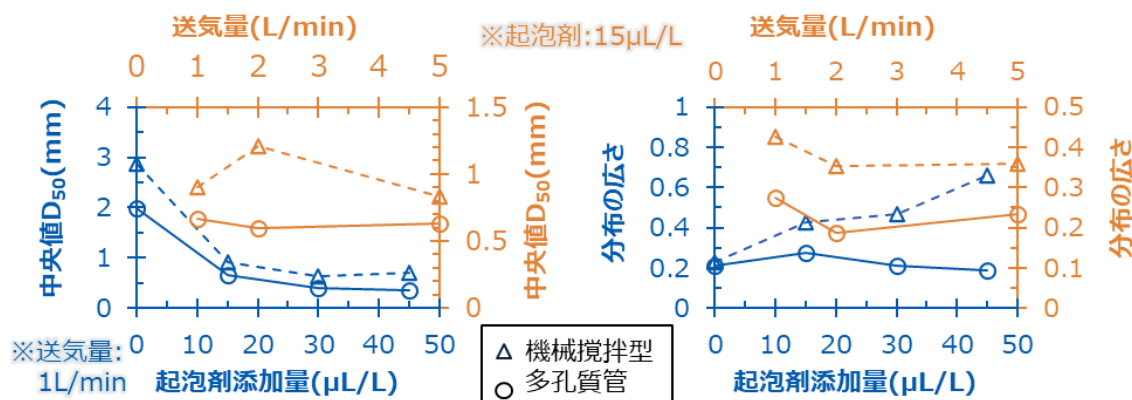


図 4-78 気泡径分布測定結果

また、浮選槽内の粒子挙動の予測を行う浮選挙動シミュレータの開発に資する、気泡－粒子付着条件の解析を行った。具体的には、粒子と気泡がどのような条件で付着するのかを解析するために気泡－粒子観察システムを作成するほか、観察システムから取得したデータから自動で付着確率を求める気泡－粒子付着・脱着判定システムを開発する。これまでに、ハイスピードカメラを搭載した試作版気泡－粒子観察システムを用いて、1 視点からの気泡－粒子条件を解析したほか、追跡アルゴリズムを活用した気泡－粒子自動判定システムの開発を試みた。気泡－粒子観察システムを用いた気泡－粒子条件の解析では、粒子表面の疎水度が気泡との付着性のどのような影響を与えるかを明らかにするため、インダクションタイマーを用いたバブルピックアップ試験（粒子と気泡の付着時間を測定する試験）を行った。実験には、0.5mm の球状銅粒子を用い、未処理の銅粒子と硫化＋疎水化処理を施した銅粒子が気泡と付着するために必要な時間を測定した。その結果、未処理の銅粒子に比べ、硫化＋疎水化処理を施した銅粒子の方が気泡との付着性が向上することを確認した。この結果を踏まえ、硫化＋疎水化処理を施した銅粒子を用いて、試作版の気泡－粒子観察システムによる付着条件の解析を行った。解析の結果、気泡と粒子の付着には粒子と気泡の接触速度および接触角度が所定の条件を満たすことが必要であることを確認するなど、気泡と粒子の付着に関する境界条件を明らかにすることができた。

一方、気泡－粒子自動判定システムの開発では、追跡用の AI アルゴリズムを用いた物体検出学習モデルにより、気泡と粒子を自動認識し、追跡することが可能か検証した。初めに、気泡－粒子観察システムから取得した動画に対し、ラベル付けとデータ拡張を行い、そのデータセットをモデルに学習させ、確率計算に必要な気泡と粒子の検出に特化した物体検出モデルを作成した。現状のモデルでは、浮選確率の計算値と実測値には乖離があったものの、気泡と粒子の認識自体は高精度で可能であることを確認した。浮選確率の算出精度が低い原因として、今回解析した動画は 1 視点からの動画であり、気泡の背面に粒子が隠れると、モデルが粒子を見失うため、正しい追跡ができていないことが判明した。以上の結果を踏まえ、2025 年度は、気泡－粒子観察システム内のハイスピードカメラの台数を増設し、多視点からの動画同期撮影を行うことで、これまで課題となっていた各確率の算出精度の向上を図る。また気泡と粒子の接触条件についても、気泡サイズを調整することにより、気泡と粒子の間に働く物理的な因子についても詳細に解析することで、浮選挙動シミュレータ並びに標準浮選機の設計に資するデータの蓄積を実施する。これらにより、2026 年 3 月末までに、気泡－粒子付着判定システムの構築に至る見込みである。

本項目にて開発する浮選挙動シミュレータについては、最初に 2 種類のシミュレーションモデルを作成する方針を定めた。1 つ目は気泡－粒子間衝突確率を推定するためのモデル、2 つ目は気泡に衝突した粒子がそのまま気泡に付着する確率、及び付着した後に脱着する確率を推定するモ

デルとなる。まず前者について、気泡の表現には自由表面解析によく使用される VOF (Volume of Fluid) 法を、そして気泡運動によって誘起される水流も再現できるよう、有限体積法に基づく流体シミュレーションモデルを使用して作成した。また粒子運動解析については、粒子同士の衝突の可能性は低いと考え、気泡や水流の影響は受け、気泡にも水流にも影響を及ぼすが、粒子同士の衝突は考慮しない DPM (Dispersed Particle Model) 法を適用した。これまでに、静水中を浮上する気泡 1 個 ($\Phi 2\text{mm}$) の真上から、銅粒子 ($\Phi 0.2\text{mm}$ 、比重 8.9) を落下させた場合、上昇する気泡の直上に形成される上昇水流の影響により、気泡には衝突しない様子がシミュレートされた (図 4-79)。一方で、ある程度サイズの大きな粒子の場合、気泡上のどの位置から落下しても必ず衝突することが分かり、粒子サイズや落下位置が及ぼす衝突確率の影響を推定することが可能となった。2025 年度は気泡に衝突後の粒子の付着現象を再現するシミュレーションモデルを開発し、気泡-粒子間衝突モデルとリンクさせることで粒子浮遊確率を推定可能とし、浮選挙動シミュレータの試作に至る見込みである。

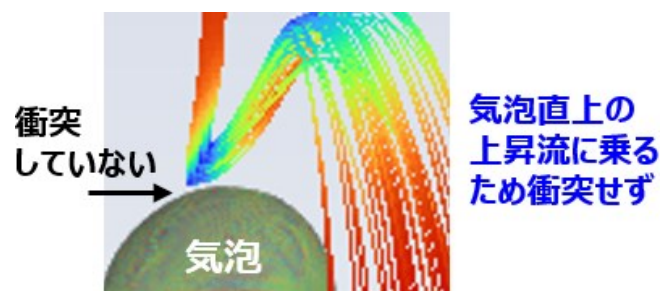


図 4-79 粒子が気泡直上の流れに乗る様子

(a-2) リコンビナブル選別装置システム開発 【装置システムの連結・統合】

既存の選別装置の多くは他産業開発品であり、リサイクル工場において複数の装置を選別システムとして組み上げるには、オーダーメイドで装置間をコンベア等で接続する必要がある。このような選別システムは、装置を直線的に接続することが多いことから、一般に「選別ライン」と呼ばれる。従来の固定された選別ラインでは装置の組み換えが容易でなく、対象物に応じて選別工程を最適化するには、複数の選別ラインが必要であった。しかし、目的に応じて多数の選別ラインを設置することは現実的でないため、汎用の選別ラインで純度不十分のままカスケード向けに出荷させるのが現状である。これに対し、先行事業で電子素子選別向けに開発したトランスフォーマブル選別システム (TF 選別システム) では、中央に設置した供給搬送システムの周囲に選別機を配置した「選別サークル」機構によって、選別装置間を自在に産物搬送することで、物理的な装置の移設なしに選別工程の組み換えを可能とした。他方、対象物の組成は年々変化してゆき、産出する再生原料の品位を維持するには、変化した組成に対応した新たな装置の追加も必要となる。TF 選別システムの選別装置群は、各装置の供給・排出機構に応じて供給搬送システムとオーダーメイドで接続しており、新たな装置を組み込むにはこのシステムでも工事が必要であった。また、TF 選別システムでは、搬送対象を電子素子に限定したため、省スペースで速やかな搬送が可能な気流搬送機構を採用していたが、この方式では多様な粒子を搬送させることはできない。以上のことから本項目では、多様な粒子に対応できる選別サークル機構を実現するため、接続した選別装置群への自在な粒子搬送を可能にする供給搬送システムを開発することを目的とする。また、接続する各選別機について、従来機の改良によって装置及び制御情報のやり取りを容易にするジョイント機構を開発し、リコンビナブル設計の指針を確立する。

サイズ・形状が様々に異なる対象について、同時に多系統の排出が可能なバケットコンベア式の搬送機構を採用し、粒群ごとに装置間の自在な搬送が可能な「供給搬送システム」を開発した(図 4-80)。この装置はベンチスケール機であり、搬送物サイズは篩分け粒度 50mm 以下(長径 150mm 以下)を想定している。大小様々なサイズの粒子を搬送することが必要であるため、大サイズ粒子として篩分け粒度 30~50mm 粒子と小サイズ粒子として篩分け粒度 1~2mm 粒子の搬送試験を行った。ベルトコンベア、バケットコンベアともにトラブルなく装置間の試料搬送が可能であることを確認し、今後、このシステムを拡張することで複数の選別機間の相互搬送を実現できることを確認した。



図 4-80 ベルトコンベア型マルチ搬送システム基本モジュール

また、供給搬送システムに接続する各装置群の機械的接続方法と、情報接続方法(通信規格、選別機別の情報入出力仕様)のそれぞれの統一規格を決定し、旧来選別装置の脱着や新規選別装置の接続を、特別な工事なしに実現するリコンビナブル設計を実施した。このリコンビナブル仕様(自律制御が可能な装置・情報の機械接続仕様)を採用したことで、どのメーカーの装置でも本システムの機械的接続規格、情報接続規格に適合した装置であれば速やかに接続し、自律制御することが可能となる。以上、バケットコンベア式供給搬送システムの開発と、リコンビナブル仕様の規格化は順調に進んでおり、2026 年 3 月までにリコンビナブル化した選別物性別・全粒群対応装置群を連結させ、後段で開発する自律制御機構に対応した 1t/日級の「ベンチスケール選別システム」を試作することが達成可能な見込みである。

(b) オンサイト選別装置自律制御化・マルチ選別システム

研究開発の概要

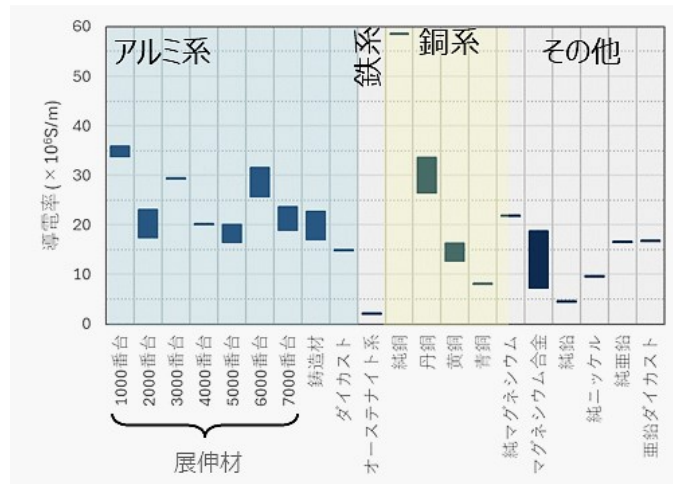
多種の対象物を大量処理するバルク選別機群(磁選や比重選別等)は、装置に検出機能はなく、事前に全対象物を分析することも事実上困難なため、詳細組成が不明なまま選別を行わなければならない。本研究で開発する自律制御エアテーブルも、流動状態を検出するだけで対象物の組成は認識できない。しかし、選別対象の情報が全く無ければ、装置を対象物に合わせて最適に制御することは理論的に不可能である。そこで、本項目では、選別機に投入される粒子群の組成・物性を推定しつつ、バルク選別機群を最適に自律制御する方法を開発することを目指す。本研究で対象とする粒子群は貴金属・銅、レアメタル、アルミ、鉄、プラスチックなどの素材であり、単体分離していれば素材特有のバルク物性(比重・磁性・導電性)を有するが、外形(サイズ・形状)は素材とは無関係である。図 4-81 は、図 4-65 の集合選別で利用する粒子性質を、選別精度対する影響の特徴をまとめたものである。比重選別、磁選、渦電流選別は、粒子の比重差、磁性差、導電性差で選別する装置であるが、実際には、サイズ差、形状差による選別が同時に起きる。これが素材の高品位化を阻害する主要因であり、外形因子による選別阻害が起きない状態にしなければならない。静電選別や浮選においても、サイズや形状差は選別精度を低下させる要因になるが、表面状態によって選別する物性自体が変わるため、むしろそちらの要因の方が影響が大きい。また、静電選別や浮選をリサイクル工場で利用する頻度は高くないことから、本項では、比重選別、磁選、渦電流選別に対して、サイズ・形状の影響をキャンセルし、固有物性に基づく選別性能を最大限に発揮する選別システムの開発を目的とする。

	事前整粒可能		固有物性			表面修飾可能	
特徴	「金属・素材種」と直接関係がない後天的性質		選別精度に影響 ↓ 単体分離していれば「金属・素材種」に固有の性質			対象物が限定 要工程管理 ↓ 「金属・素材種」に固有の性質だが変化しやすい	
利用する 粒子性質	外形		バルク物性			表面性質	
							
	大きさ	形状	密度(比重)	磁性	導電性	帯電性	濡れ性
集合選別 (大分類)	篩選別	形状選別	重選	磁選	渦電流選別	静電選別	浮選
	比重選別						

図 4-81 集合選別で利用する粒子性質と選別精度に及ぼす影響

(b-1) 個別選別装置の自律制御化

はじめにアルミ・鉄・銅・プラスチックなど代表的な素材(合金 55 種類、プラ 41 種)のバルク物性を実測、または一部文献調査により取りまとめた。調査結果の一部(導電率の違い)を図 4-82 に示す。選別精度は、対象物のバルク物性差の大きさと選別阻害因子の差小ささにより決定されるため、対象物のバルク物性自体が小さければ、選別阻害因子の差の大小に関わらずそのバルク物性差による選別は困難となる。



※強磁性体を除く(測定不可)

図 4-82 合金種別導電率測定結果

そもそも実際に行う選別において、サイズや形状という概念は精緻に理論化できていない。詳細は割愛するが、粒子の形に起因する性質の一面を篩などを用いて切り分けているが、本来、サイズと形状は一体化して考えるべき性質と捉えている。そこで、各選別機における選別結果に基づき、選別精度を阻害しないサイズ・形状範囲を、「サイズ・形状統一指標」として数値化し、選別前に整粒によってグループ化すべき指標値を求めた。比重選別機の1つであるカラム型気流選別機によって、各種形状のアルミ粒子を選別した結果を図 4-83 に示す。まず、廃小型家電の破碎物については、鋳物を粉砕したときのように、ごつごつした疑球形粒子になることはあまりない。八方が異種鋳物で密にパッキングされている鋳物粒子と異なり、小型家電の筐体内は空間が多く、板材や棒材など、製品を構成する各種部品や素材の形状が一定程度温存される。そこで、試験に供する粒子には、人工物として特徴的な形状の粒子を用いている。一方、気流選別機の特徴としては、浮揚風速に影響を及ぼす粒子の平均姿勢における投影断面積と自重のバランスで選別結果

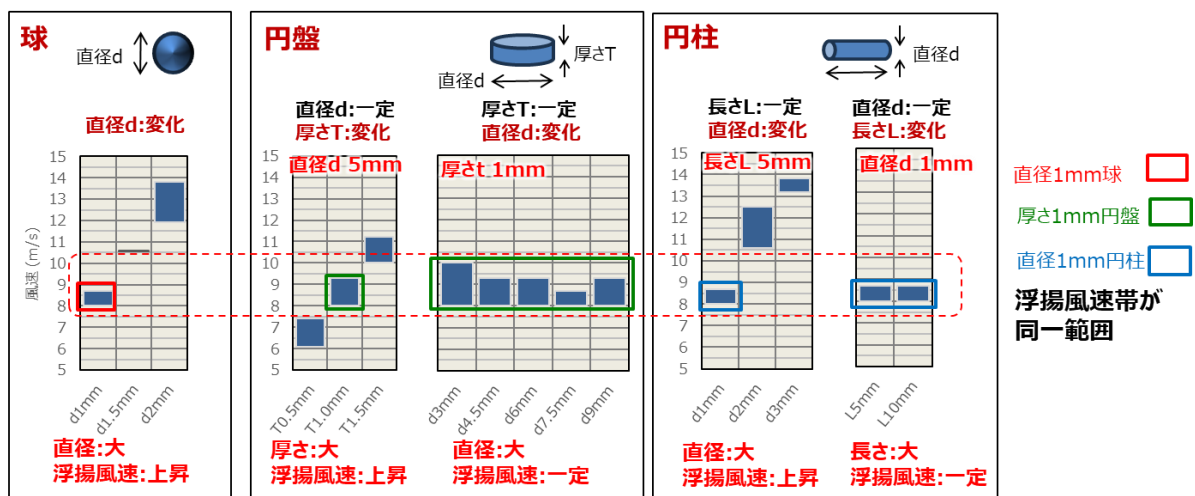


図 4-83 集合選別で利用する粒子性質と選別精度に及ぼす影響

が左右される。選別結果から、サイズ・形状のコアとなる因子は「粒子の厚さ」であり、比重が同一の場合、粒子の厚さにより粒子の浮揚風速が決定されることがわかる。現在、異比重粒子の浮揚風速をまとめており、重産物と軽産物の比重差または比重比に応じて、一定の分離効率を達成し得る粒子厚さ範囲を分析中である。分析結果を元に、気流選別機のサイズ・形状統一指標(公式)とその事前整粒条件に変換する予定である。また、磁選機や渦電流選別機についても気流選別機と同様の手順にてサイズ・形状統一指標の開発を進めている。

一方、先行事業で実施した電子素子選別では、サイズ・形状が素子種に固有である特徴を踏まえ、想定される全ての電子素子が混在していると想定し、特定素子のみを回収するのに必要な選別プロセスを計算する「AESS」というソフトウェアを開発した。これは、各バルク選別機的全運転パラメータを変動させたとき、選別機内の各素子の運動と、その時の分離効率を予測して最適運転条件を算出するソフトである。モバイル機器向けの電子素子を対象とした場合、選別条件と選別産物の組み合わせによる出力パターンは 35 恒河沙(3.5×10^{54})通りに及ぶ。素子種ごとに計算した選別工程を統合し、前述の TF 選別システムの自律制御機構を完成させた。本事業では、AESS を拡張し、サイズ・形状統一指標に基づく形状分類を計算パラメータに加えて分離効率を予測、最適運転条件を算出するソフトウェアを開発中である(図 4-84)。はじめに拡張版 AESS では形状分類を計算パラメータに加えることにより計算量が増大されるため、計算用ハードウェアを更新するなど処理の高速化を図り、その後、形状パラメータを加えた試作プログラムが製作した。現在、プログラムの検証を実施中である。

本項目の中間目標は個別選別装置の自律制御機構を確立するため、選別機種・回収素材種ごとに、新たに形状パラメータを組み込んだ拡張版 AESS を試作することである。拡張版 AESS の開発は試作済で検証段階であり、サイズ・形状統一指標についても選別機ごとに順次開発できている状況のため、2026 年 3 月までに中間目標を達成可能な見込みである。

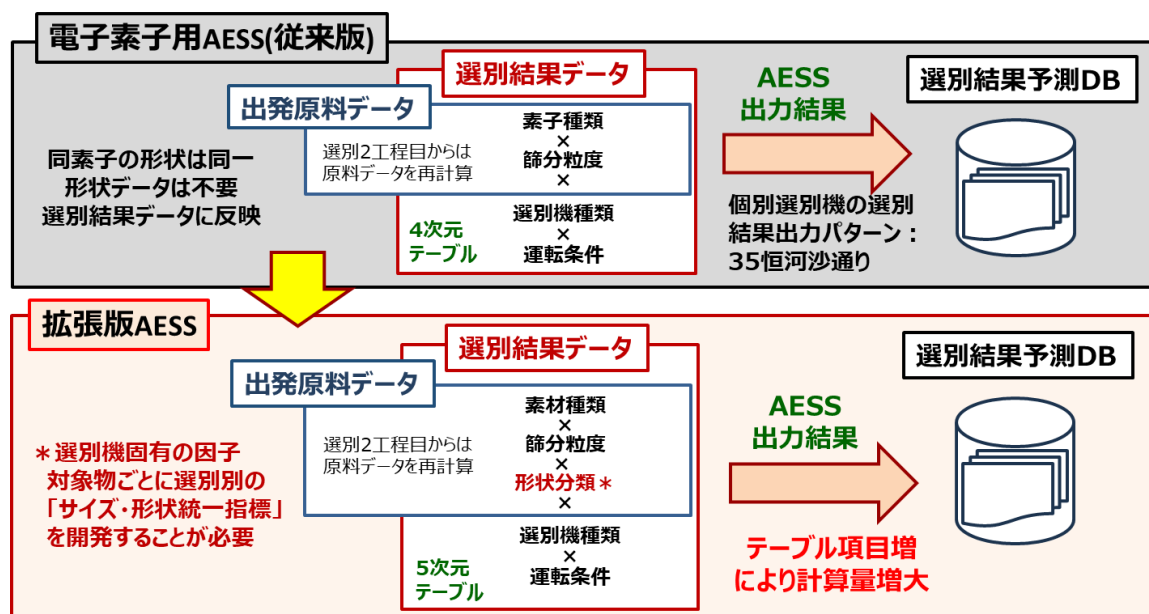


図 4-84 拡張版 AESS の概要

(b-2) マルチ選別システム開発 [選別装置群一貫制御システム]

・選別装置群一貫制御システムの開発

様々な素材種が混在した対象物から特定の素材種を高純度で回収するには、様々な境界条件によって多段階に選別を行う「選別工程」の構築が必要である。さらに、多種の素材種が混在した対象物に対して高品位再生原料となる個々の素材を同時に回収するには、素材種別の各「選別工程」を統合し、合理的な一貫選別システムを構築しなければならない。本項目では、開発する拡張版 AESS の計算結果に基づいて、リコンビナブル化された装置群を一貫制御するシステムを開発することを目的とする。

図 4-85 に選別装置群一貫制御システムの概要を示す。サイバー環境である拡張版 AESS によって選別工程、各選別機の運転条件、粒子の事前整粒条件が出力され、この出力に基づいてフィジカル環境であるマルチ選別システムが動作する仕組みであり、マルチ選別システムを構成する選別機群、バケットコンベア式マルチ供給搬送システムの運転を制御する装置が、選別装置群一貫制御システムである。選別装置群一貫制御システムは、各選別機の運転/停止指示、運転条件指示、対象物の供給/排出、搬送中産物の位置情報管理の機能を有する。現在、2 つの選別機間を相互搬送する試験モジュールを試作し、選別工程管理、対象物の供給/排出管理、搬送物の位置情報管理を検証中である。また、破碎前処理システム、破碎機、選別装置群一貫制御システムで取り扱う情報を整理し、解体・破碎工程を含めた廃製品の情報管理システムの基本システムを構築中である。

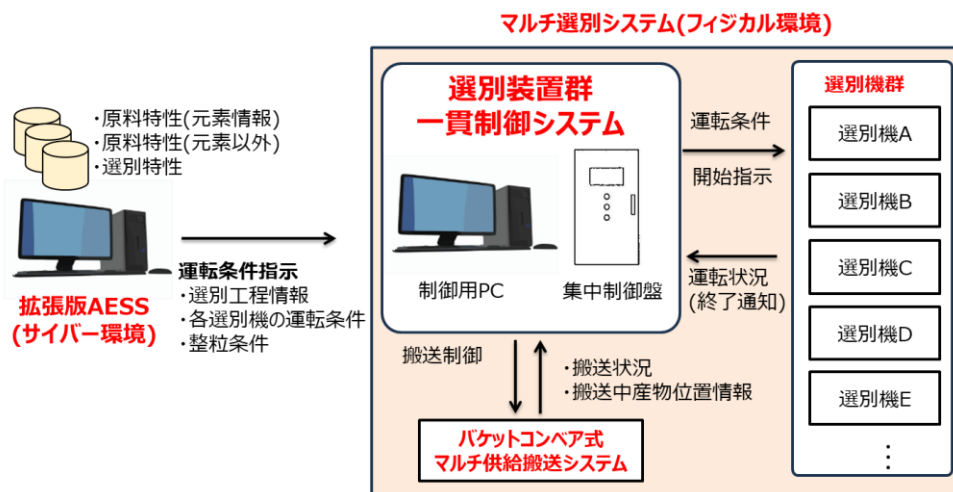


図 4-85 選別装置群一貫制御システムの概要

本項目の中間目標は、個別装置の自律制御情報を元に、選別装置間の供給搬送システムを最適化する選別装置群一貫制御システムを試作し、1t/日級ベンチスケール選別システムに組み込むことである。選別装置群一貫制御システムは 2025 年 3 月に試作プログラムが完成し、試験に着手している。2026 年 3 月までに試作プログラムのテスト、課題抽出、プログラム改造を実施することで中間目標を達成可能な見込みである。

・選別産物の要求組成の算定

本事業では、選別システムをリサイクル原料由来の 5 大素材(銅・貴金属、レアメタル、アルミ、鉄、プラスチック等)に大幅拡張することを目指しているが、現状では水平リサイクルのための素材受け入れが確立されていないものが多い。非鉄金属業界では天然資源とリサイクル原料の双方から、素材製造の両立を図りつつ取り組みを進めている。これまで主体であった天然資源は鉱石

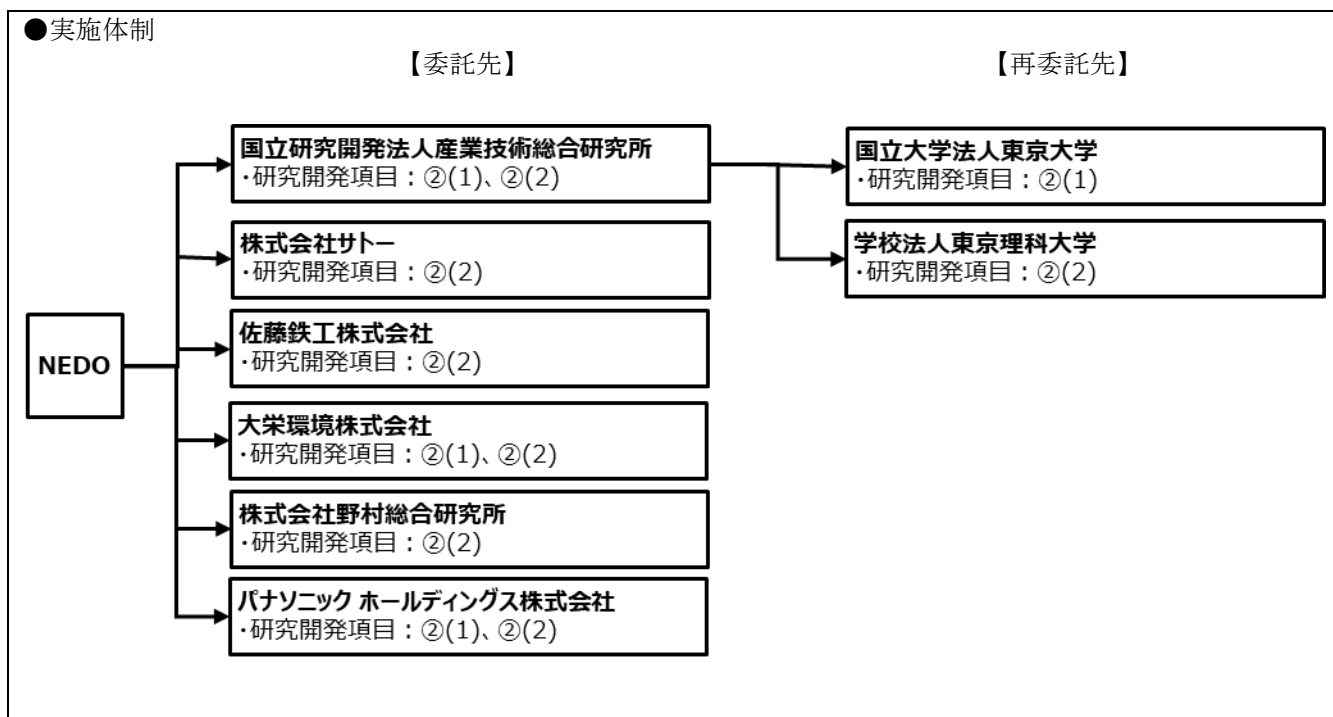
の生成過程がある程度限定的であるため、それぞれの鉱石に対する製錬技術はほぼ構築できている。一方、都市鉱山由来の原料については、新たな製品製造技術が導入されるたびに、銅・鉛・亜鉛の別でいう単一の製錬技術のみでは対応できない素材構成や、非鉄金属全般として回収不能な元素、製錬精製工程に悪影響を与える製錬忌避物質への対応に迫られている。リサイクル原料中の5大素材の中で最も価値の高い銅・貴金属については、既存の天然資源を扱う銅製錬で対応するものの、主に都市鉱山由来の製錬忌避物質については一般化されていない。また、レアメタル各種については、湿式処理工程における忌避物質情報はほとんど開示されていなかった。そこで、まず銅・貴金属・レアメタルそれぞれの製錬精製回収工程別の忌避元素種を、非鉄金属業界各社ヒアリングにより抽出した。また、現行の製錬所の機能に応じた各種選別産物の受け入れ条件についてもヒアリングを進めたが、天然原料とリサイクル原料のバランスによって受け入れ条件が変動することや、製錬各社（特にレアメタル）のノウハウに関わる要素があるため、最終的には推奨レベルを提示するに留まる見込みである。さらに、選別産物の組成決定については、非鉄金属業界で回収不能な元素種が銅スラグや中間品として次工程の原料中に分配されるが、この回収不能な元素種は次工程での忌避元素であることも多いため、他の NEDO プロジェクトや関連業界のヒアリングに基づいて逆算的に行う予定である。

レアメタルについては忌避物質の受入れ条件が非常に厳しく、リサイクル工場における選別技術の高度化のみでは製錬原料条件をクリアできない可能性があり、製錬忌避物質の事前除去技術の開発を実施している。資源循環の高度化プロセスとして、特に電子基板類に付随する製錬忌避物質を銅製錬工程に極力投入しない高度選別技術の開発が不可欠である。従来からの知見と本検討において、エポキシ樹脂や被覆線に製錬忌避物質のハロゲン物質（Br や Cl）の存在が確認されたが、現状ではハロゲン物質の選別をせずに高温処理プロセスに投入した場合、キルンなどの前処理設備も含めてハロゲンによる設備腐食が大きな課題となる。また基板に実装されている部品中にも難燃助剤として銅製錬の電解工程において忌避物質となるアンチモン（Sb）が存在しており、電解工程でのアンチモン濃度が操業基準値を大きく上回ることを確認した。

そこで、これら製錬忌避物質が主に樹脂中に存在することが確認されたため、樹脂を省エネルギーで分解することが可能な OH ラジカルについて、その活用の可能性を検証した。実装部品の中でも紛争鉱物として原産地証明が必要なタンタル（Ta）については少々時間を要したが、OH ラジカルによってアンチモン含有樹脂モールドの脆化が確認でき、後段の選別技術によってタンタルについては忌避物質との選別回収が可能となる道筋を得た。また実装基板そのものについては、現在 OH ラジカルによってエポキシ樹脂の分解自体が確認でき、これから後段の選別技術の適正化によって、有用金属回収の高度化を図る段階である。更に、副次的な効果として、樹脂以外に含まれる銅製錬忌避元素金属であるアルミニウム（Al）や錫（Sn）についても、事前に選別回収が可能となる見込みである。他方、塩ビ被覆線のアルミ線については、塩ビ樹脂の剥離が確認できたが、銅線については試験時の OH ラジカル照射量が過大であり、銅自体も酸化する状況が確認されたため、今後適正な OH ラジカル照射量、温度環境等を検討する計画である。なお、今後行う予定の OH ラジカル追加試験で、特に被覆銅線からの銅回収に良好な結果が得られた場合には、実用化に向けた小規模な試験装置製作も視野に入れている。これまで製錬前処理技術として利用していた高温キルン等に代替する、OH ラジカルを活用した低温型前処理設備が実現することで省エネ化・低 CO₂ 化を図ることができる上、設備腐食懸念から国内で処理が難しかった被覆銅線などの銅原料の海外流失抑止を実現することが可能となる。非鉄金属製錬所での受入れ種範囲が拡大することで日本の資源セキュリティの観点でも本事業が貢献するものである。

4.2. 研究開発項目②：情報連携システム開発

テーマ名	情報連携システム開発	達成状況	○
実施先名 (再委託名)	国立研究開発法人産業技術総合研究所、株式会社サトー、佐藤鉄工株式会社、大栄環境株式会社、株式会社野村総合研究所、パナソニックホールディングス株式会社、(国立大学法人東京大学)、J(学校法人東京理科大学)		
達成状況の根拠	高度分析・計測システムでは、開発中のルールベース及び深層学習による内部構造データ取得方法において、人手による解体・測定時間の1/10以下の時間で処理を達成する見込み。資源循環性指標の原案構築が予定通り完了し、簡易評価を3品目進め指標が完成の見込み。再生材流通高度化では、リサイクル工場にモデルプラントを予定通り整備。タグ貼付試作機を開発するとともに、工場間情報連携にコスト算出要素と計算手法を整理済。リマン工場では、情報連携基盤システムのPoCに向けたプロトタイプが開発完了。資源循環シナリオは、評価の枠組み、評価対象の事業シナリオのさらなる精緻化・内容の充実化を図るフェーズであり、いずれも中間目標達成の見込み。		
●背景・目的・プロジェクトアウトカム目標との関係			
[背景]			
総合選別システムを自律的に制御し、高純度な再生素材を得るには、対象となる廃製品に対する各種選別特性情報の取得が肝要である。解体に資する構造情報、単体分離情報、選別評価情報などはメーカ保有情報だけでは不十分であるが、現状は、合理的に取得する方法に乏しく人海戦術に頼らざるを得ない。また、リマン工場における情報活用法や、新技術導入のための社会実装のシナリオも未確立であり、高度循環型システムの早期実現に向けては、コアとなる装置システム開発の導入支援をするための技術開発が不可欠である。			
[目的]			
廃小型家電を対象に、製品データを速やかに取得することによって解体・破壊の指針を得るとともに、リサイクルの連続試験が可能なモデルプラント整備による情報連携機能強化、リマン工場における情報活用と動静脈情報連携基盤について検討する。また、本研究で開発する高度循環型システム導入実現に向けた社会実装シナリオの提案を目指す。			
[プロジェクトアウトカム目標との関係]			
本項目のアウトプット目標達成は、研究開発項目①で開発する資源循環実現に向けたコア技術に対して、導入支援と社会実装へと導くシナリオの確立を意味する。研究開発項目①②で開発する技術の連携により、速やかな実用化、社会普及を果たし、アウトカム目標の早期達成が期待できる。			
●アウトプット目標			
[中間目標]			
データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発では、解体・選別等の処理プロセスの要素データと要求水準を設定し、製品3品種に対してデータセットの完成例を示す。要素データの取得について、従来に対して1/10以下の時間でデータ取得が可能な分析・計測システムの手法を示す。また、資源循環性のデータベース上の評価指標候補について、各指標の試算手法を含め整理する。再生材流通高度化に向けた基盤技術開発では、小型家電の回収実態と再生材需要のニーズを把握し、再生材の安定供給に向け目指すべき供給水準を整理する。資源循環シナリオにおいて、回収、供給、需要の3種類の拠点による最適化が可能な評価手法の基本設計を完了する。この際、リサイクル工場のモデルプラントの連続試験に向け、再生材原料の供給性能モニタリングが可能となる情報連携機能を整備する。			
[最終目標]			
データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発では、要素データの取得について、従来に対して1/10以下の時間でデータ取得が可能となる一連の分析装置システムを確立し、製品3品種を例にデータセットを作成する。資源循環性のデータベースについて、評価観点となる項目を3つ以上設定し、各指標に対する解析手法を確立する。再生材流通高度化に向けた基盤技術開発では、国内の小型家電の回収実態と再生材需要と連動したマテリアルフローの可視化に向け、代表的な素材2つ以上のケースを対象に資源循環シナリオの評価手法を構築する。この際、提供するリサイクル工場の標準データについて、小型家電の回収実態に応じた連続試験(6時間以上/日)が可能なモデルプラントを整備し、再生材原料の出荷能力の検証を実施する。また、リサイクル工場における最適運転・運用等が流通に及ぼす影響や経済性評価による開発技術の社会実装モデルを提示する。			



(1) 研究開発の概要

研究開発項目②では、①で開発する一連の装置群に対し、これらを自律制御するために必要な情報の分析法と、その結果に基づく製品特性を評価する手法を開発する。また、リサイクル工場では、連続試験が可能なモデルプラントを整備して情報連携機能を検証・強化、リマン工場（リマニュファクチャリング（廃製品を分解し、再利用可能な部品は活用すること。以下、「リマン」と呼ぶ））では、情報活用と動静脈情報連携基盤について検討するとともに、本研究で開発する高度循環型システム技術に関わる社会実装シナリオを取りまとめる。

(1)「データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発」では、①で開発する装置群を自律制御するために必要な情報を、分析法によって獲得するため、製品内の 3D 構造や人工物の形状推定などを含む、製品破碎特性、粗粒（粒子サイズ 1mm 以上）破碎物の選別特性、細粒（粒子サイズ 1mm 以下）破碎物の選別特性に対する各分析技術を開発する。分析結果に基づいて、製品や部品の破碎・選別特性を評価し、①で開発する各選別装置へ提供する。

(2)「再生材流通高度化に向けた基盤技術開発」では、①や②(1)で開発する、リサイクル、リマンに向けた情報利用の各種装置群や分析技術を、未来の産業に速やかに導入させるため、開発システムを実際の工場に適合させ、そこでの技術課題の先取りと、導入・普及に向けた社会実装シナリオを作成する。リサイクル工場については、提案者らが先行事業で開発した高品位モバイル機器を無人選別する世界初のシステムを、本事業のモデルプラント（実験フィールド）として整備し、連続操業や情報利用、メンテナンスの課題、工場間連携や製品情報付与の可能性などを先行抽出して、開発技術の課題として取り込み、解決手段を検討する。リマン工場については、動静脈間のデータ連携システムのプロトタイプを開発し、①(1)で開発するリマン対応分解システムに基づいて、その効果を検証する。また、本研究で開発する新規な資源循環技術の導入に向け、課題やアクションプランを含めた社会実装シナリオを作成する。

以上、開発技術の情報提供・利用や、早期実用化に向けた基盤技術を確立することにより、①の開発と連携して、多様な素材が混在し、多様な廃製品がカオス様に収集される廃小型家電を対象に、貴金属・銅、レアメタル、アルミニウム、鉄、プラスチックの「5 大素材」の水平リサイク

ルが可能な、総合選別システムの開発を目指す。

個別開発項目の構成と開発技術の役割を図4-86に示す。

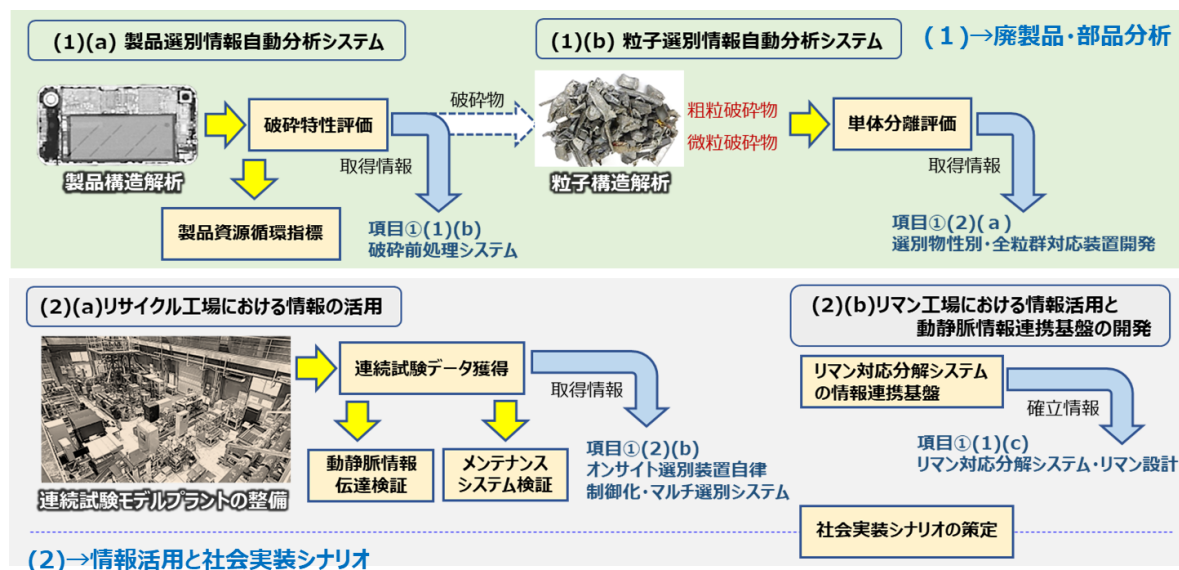


図4-86 研究開発項目②における個別開発項目の構成

(2) テーマごとの目標達成状況と成果の内容

②(1) データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発

(a) 製品選別情報自動分析システム

研究開発の概要

研究開発項目①で開発する装置群は、装置、システム、制御方法の開発・確立が目的であるため、識別に資する境界条件や、グループを代表する製品の判断基準データは構築するが、開発技術の社会導入時には、時代とともに変化する製品・素材データの拡張等が必要である。現状、これらの分析は人海戦術的な手法に依存せざるを得ないが、膨大な時間とコストを要するとともに、選別高度化に資する分析項目自体が明確になっていないため、必要な詳細分析を実施出来ないのが実状である。そこで本項目の(a)では、LIB等の電池残留製品や、単破砕特性品か複合破砕特性品かの判断が可能となる、製品の3D構造を簡便に分析する技術を開発する。また、製品構造に基づく易リサイクル性を要素として取り込んだ、製品自体の資源循環性を評価することが可能な指針(製品資源循環指標)の策定を行う。

(a-1) 製品破砕特性分析技術開発

1) 製品データベース作成調査及び分析

3次元の製品構造解析により製品破砕特性が推定可能な分析技術の開発において、X線CT分析による製品の3次元ボクセルデータの収集に当たり、X線CT分析と手解体による内部構造調査を実施した。まず、X線CT分析を行う対象廃製品の選定を行った。市場に出回る製品数や回収予定の基板の資源価値などの条件に基づき、これまでに5種類の廃製品(携帯ゲーム機、ワイヤレスイヤホン、電子タバコ、シェーバー、スマートウォッチ)を対象に、X線CT分析及び手解体による内部構造調査を進めた。

X線CT分析を実施するに当たり、撮影条件の検討を行った。撮影枚数(500枚、1000枚、1500枚の3パターン)と画素サイズ(ビニング有無の2パターン: ビニング無 → 1画素サイズ0.1mm×0.1mm、ビニング有 → 1画素サイズ0.2mm×0.2mm)の、6パターンの組み合わせでシェーバー1機種を撮影を行ったところ、撮影時間の短さと、後のアノテーション作業(ボクセルに構成部品情報を付与する作業)において必要な解像度をであるかを考慮し、「撮影枚数500枚、画素数ビニングあり」が最適条件であると判断した(図4-87)。上記の条件にて、これまでに携帯型ゲーム機13機種、ワイヤレスホン1機種、電子タバコ12機種、シェーバー8機種、スマートウォッチ10機種の合計44機種の撮影を行った。

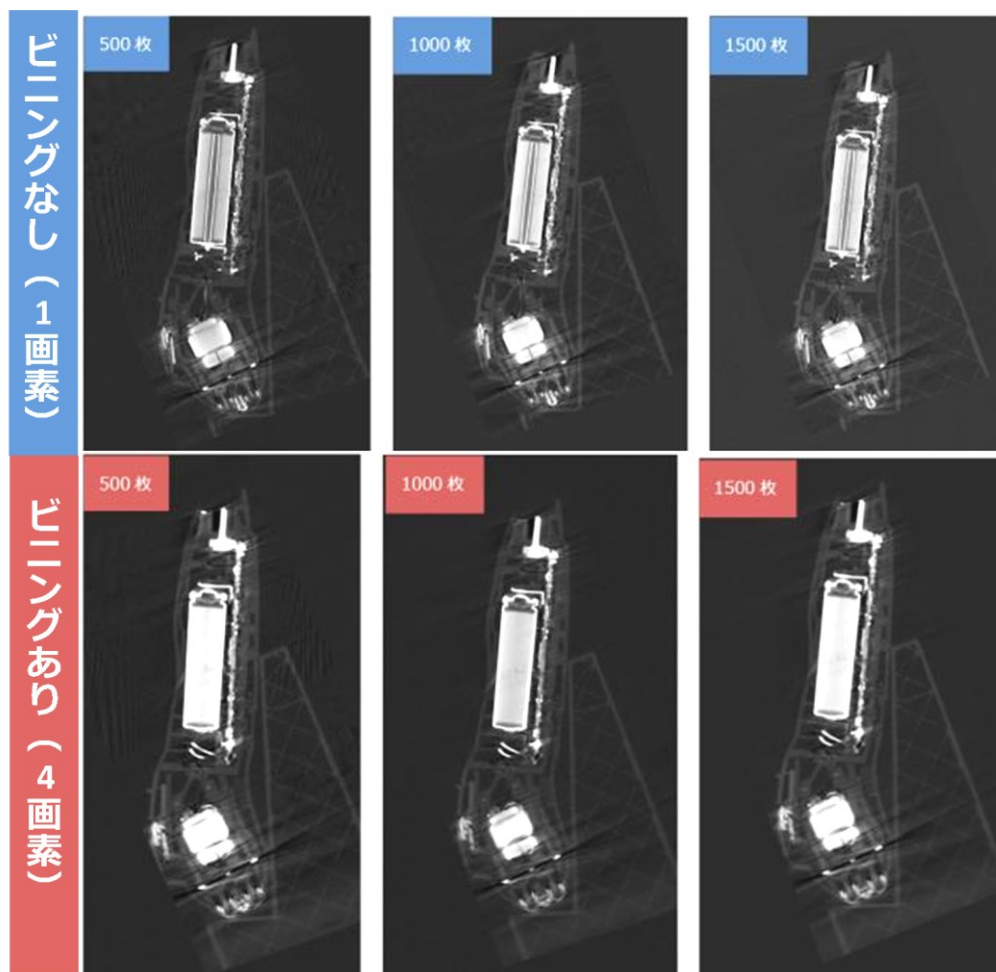


図 4-87 CT 画像撮影条件の検討

X線CT分析を行った機種について、内部構造調査を行った。廃製品を手解体し、基板、電池、モーター、ネジの位置情報や電池仕様、筐体固定方法(ネジ・接着剤等)を調べた。ネジについては、筐体を固定しているものと基板を固定しているものに分けて記録を行った。図4-88は、CT画像上に各部品の配置を図示したものである。なお、携帯型ゲーム機にはモーターが内蔵されていないため、基板、電池、ネジについて調査した。CT画像と手解体による内部構造調査によって得られたデータを製品内部構造データとした。

2025 年度に X 線 CT 分析による製品の 3 次元ボクセルデータを取得し(70 以上)、製品内部構造データをまとめることを目標としている。これまでに 44 機種の製品内部構造データを取得し、2025 年度も 40 機種程度調査を予定しており、中間目標を達成見込みである。

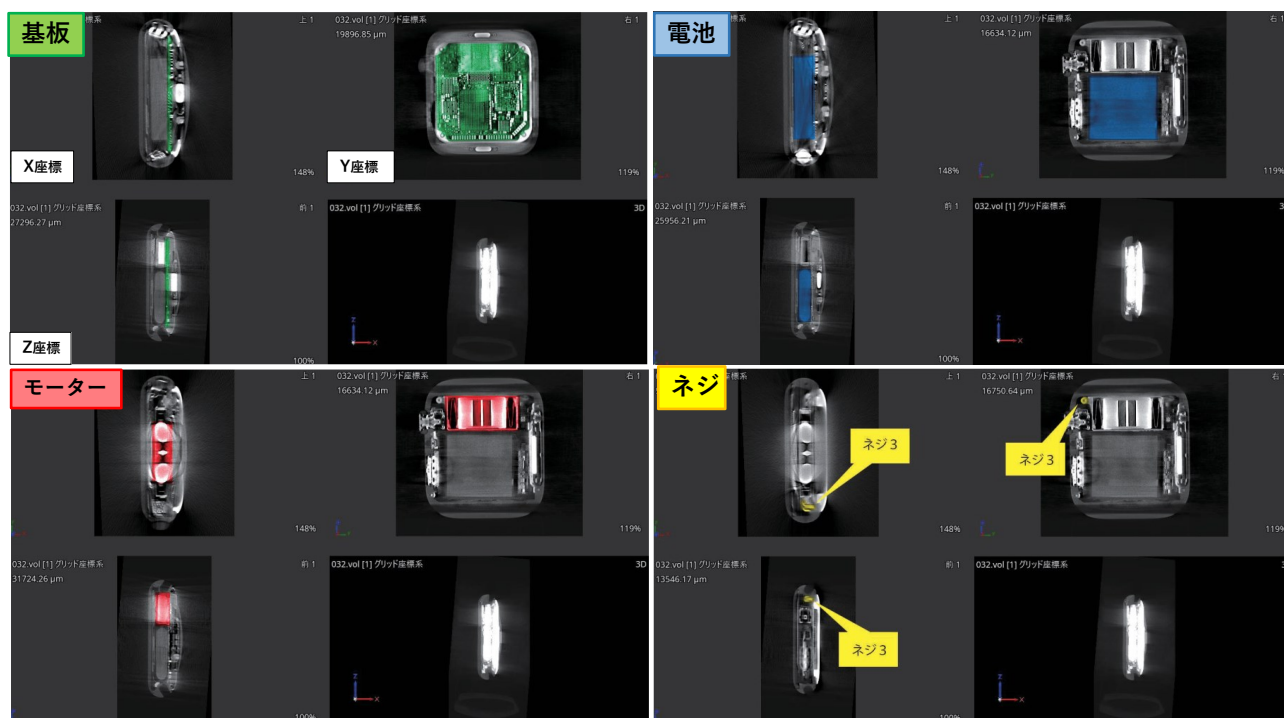


図 4-88 CT 画像上への各部品の図示の例(スマートウォッチ)

2) 製品選別情報取得技術の開発

X 線 CT 撮影データより、リサイクル対象となり得る、または解体の際に位置把握が必要という観点から、4 つの部品（電池、モーター、ネジ、基板）に対してアノテーションを行った。現状では、図 4-89 に示すような専用ソフトを使い、XYZ の 3 方向の断面画像上でボクセルに情報付与(色付け)する作業を行うことが一般的である。単純な形状の部分については、内挿機能等を用いることである程度効率化できるが、現状では約 10h/個の作業時間を要する。アノテーションしたデータを、後述する部品の自動識別データ処理法の正解データとして利用した。

アノテーション時間の短縮を目的に、廃製品の X 線 CT 撮影データから内部の部品を自動識別するデータ処理法として、ルールベースによる手法と深層学習による手法の検討を行った。4 つの製品（携帯ゲーム機、ワイヤレスイヤホン、電子タバコ、シェーバー）を対象とした。まず、ルールベースの手法における検出対象部品としては、リサイクル対象となり得る、または解体の際に位置把握が必要という観点から、電池、モーター、ネジを選定した。当初は資源価値の高い基板も候補としたが、X 線 CT 撮影データにおいて基板は不明瞭に映り、検出の可能性が低いと判断して対象から外した。X 線 CT 撮影により得られた DICOM 形式の画像群から、3 次元ボリュームデータを作成した(図 4-90(a))。輝度値の 2 値化処理により、背景及び筐体を除去し、モジュールを抽出した(図 4-90(b))。続いて輝度値の勾配成分を計算し、固定閾値による分割を行うことで、モジュールを小領域に分離した(図 4-90(c))。分離されたモジュールの小領域から部品を特定するに当たり、以下の手法を採用した。電池については、形状が比較的単純であることから、小領域の表面積/体積を計算し、固定閾値以下のものを採用することで識別した(図 4-90(d))。モーター及びネジにつ

いては、輝度値による 2 値化による識別が可能であるが、現状は任意の閾値を用いており、閾値の自動決定方法を開発する必要がある。

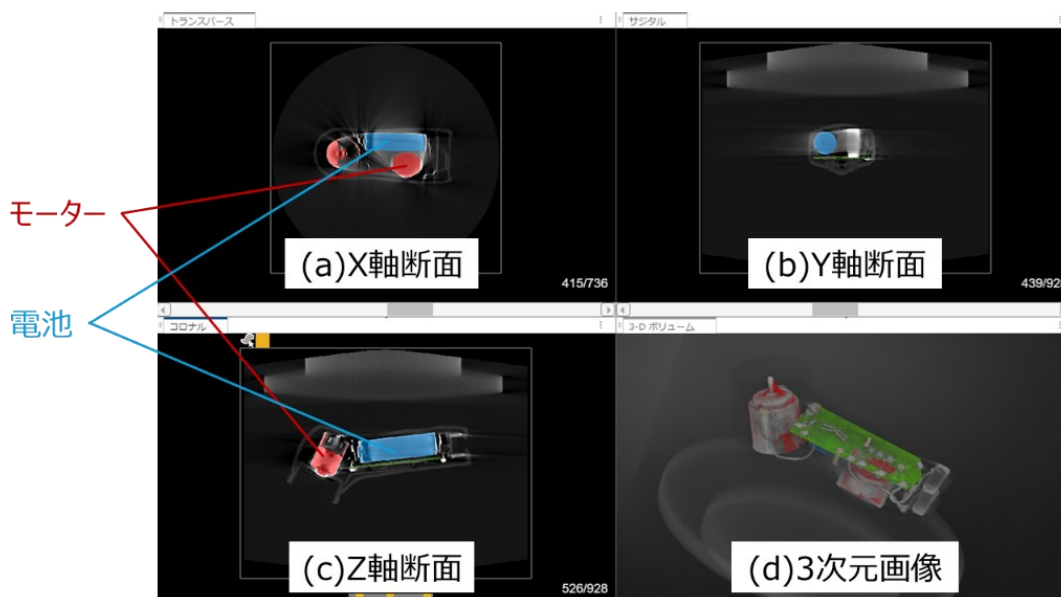


図 4-89 X 線 CT 撮影データのアノテーション

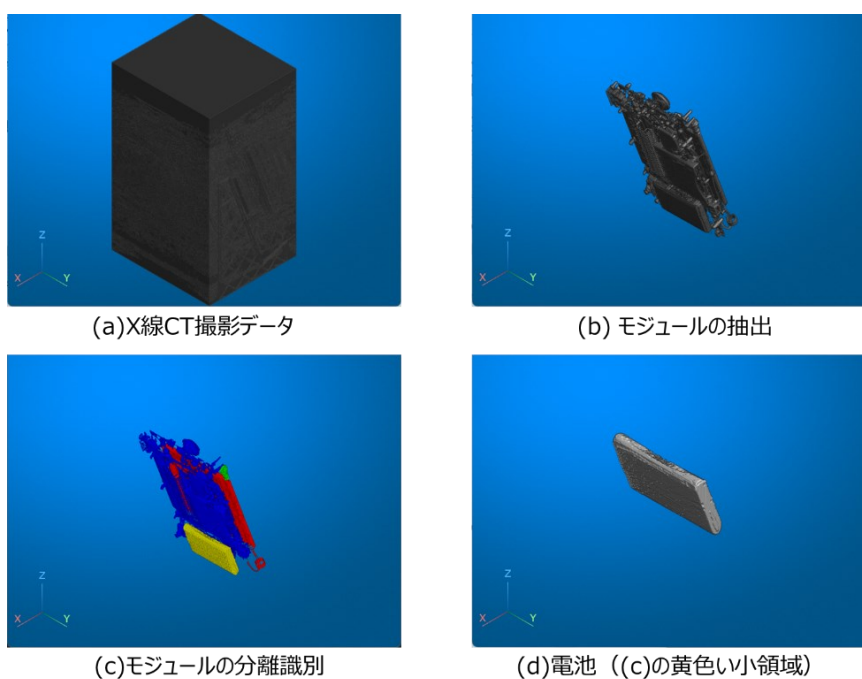


図 4-90 ルールベースでの部品識別手法

上記の手法により 4 製品から電池、モーター、ネジを検出した結果を図 4-91～図 4-94 に示す。今回撮影した携帯ゲーム機にはモーターが含まれておらず、電池とネジの検出を試みた。図 4-91 のとおり、電池、ネジともに概ね良好に検出できたが、ネジには一部誤検出が生じた。検出精度

を IoU (Intersection over Union : 正解領域と推論領域のうち、重複した領域の比率) で評価すると、電池は 0.89 だったのに対して、ネジは 0.23 と低い値となった。

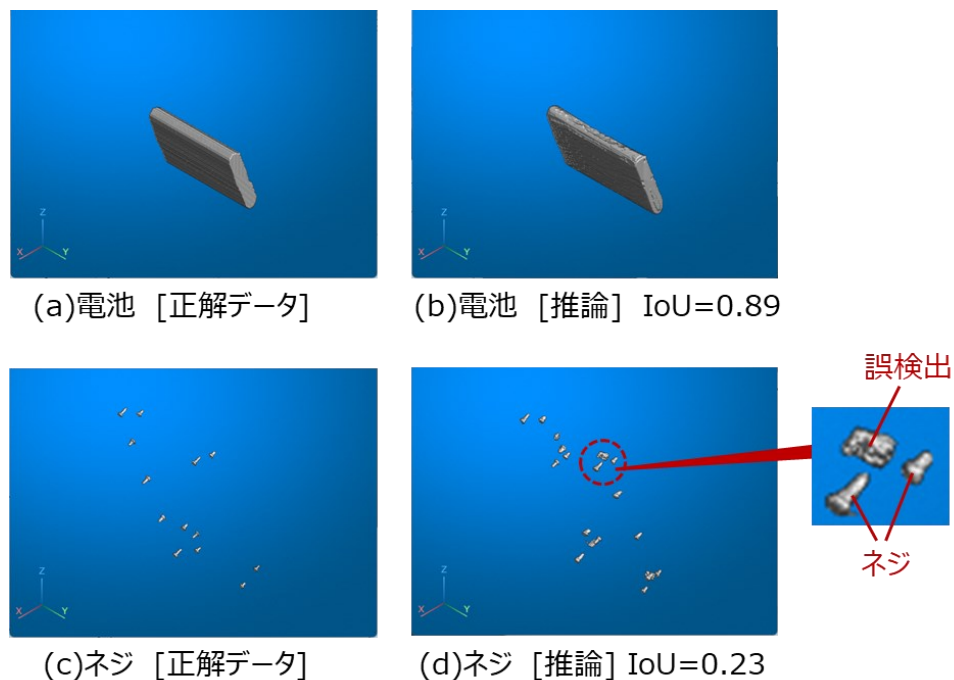


図 4-91 携帯ゲーム機からの部品検出結果

ワイヤレスイヤホンには電池のみ含まれていた。ワイヤレスイヤホン本体の電池は非常に小さく、他の部品との分離が困難であった。図 4-92 に示すとおり、本体の電池周辺に誤検出が生じており、IoU は 0.49 に留まった。

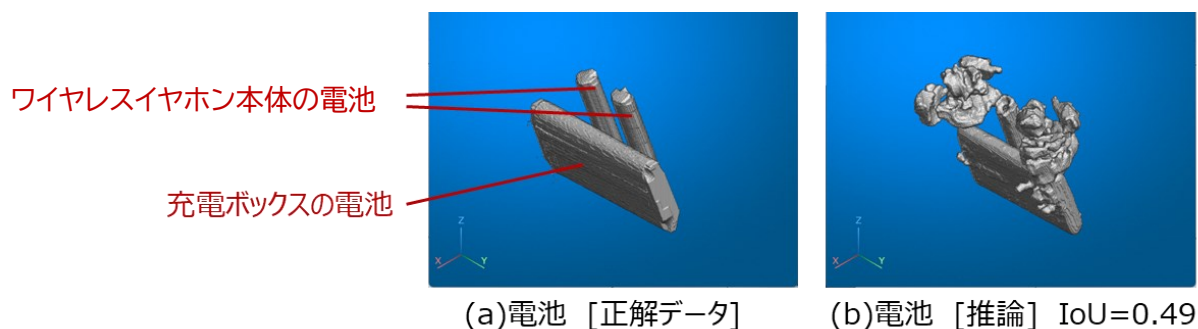


図 4-92 ワイヤレスイヤホンからの部品検出結果

電子タバコには電池とモーターが含まれていた。図 4-93 のとおり電池、モーターともに良好に検出することができ、IoU はそれぞれ 0.79、0.87 と高い数値となった。

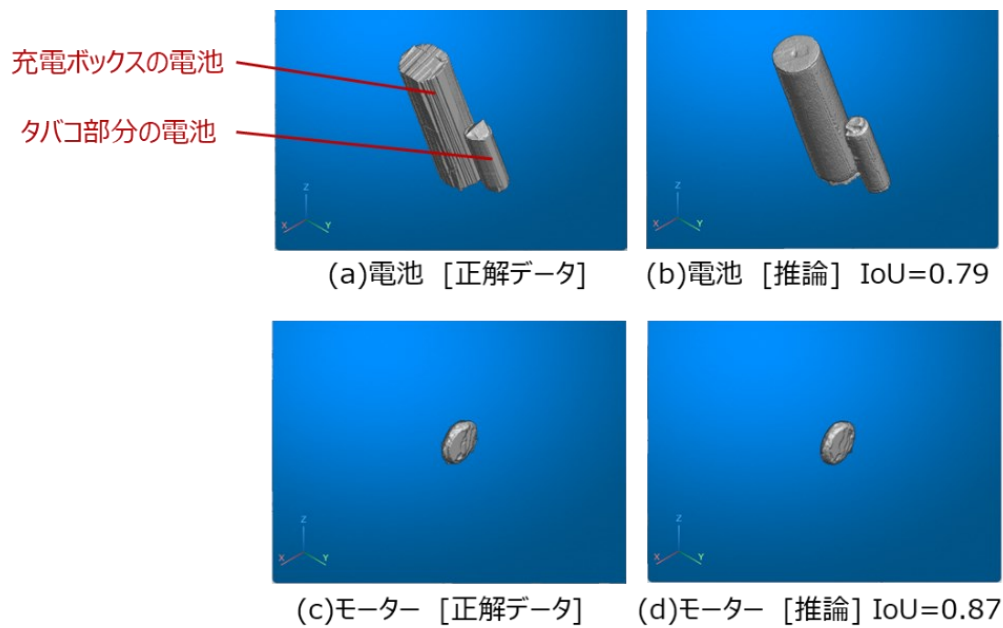


図 4-93 電子タバコからの部品検出結果

シェーバーには、電池、モーター、ネジの 3 部品が含まれていた。図 4-94 に示すとおり、電池は良好に検出でき、IoU は 0.765 となった。モーターは周囲の異物を誤検出してしまい、IoU は 0.21 に留まった。ネジの IoU は 0.48 と高い値ではなかったが、良好に検出できた。

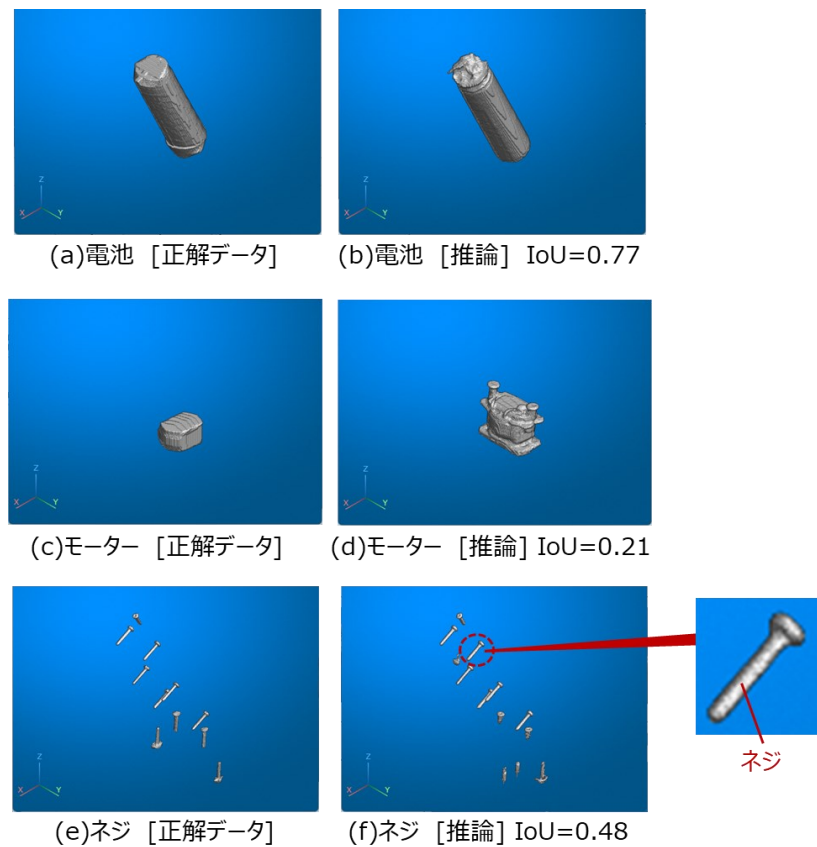
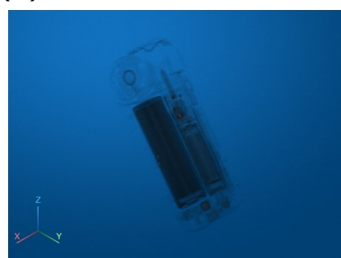


図 4-94 シェーバーからの部品検出結果

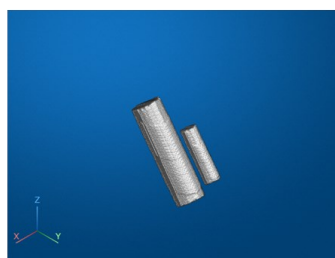
深層学習を用いた手法としては、(1) 3D データをそのまま深層学習で処理する方法と、(2) 3D データから鳥観図を作り 2D の深層学習で処理した後に 3D データに変換する方法があるが、X 線 CT により得られるボクセルデータへの適応性が高いことから、(1) の手法を試みた。4 製品(携帯ゲーム機、ワイヤレスイヤホン、電子タバコ、シェーバー)を X 線 CT 撮影し、電池、モーター、ネジ、基板にアノテーションしたが、今回は予備調査として電池の学習・推論のみを試みた。

X 線 CT データの前処理を行った後に、ランダムに切り取った直方体領域を教師データとして、深層学習プログラムの学習を行った。図 4-95 に(a) 電子タバコと(b) 携帯ゲーム機の結果を示す。(a) 電子タバコでは、電池の正解データと推論結果が概ね一致している。一方で、(b) 携帯ゲーム機では、電池の推論結果において、正解データに加えて余計な部品を抽出してしまっている。今回は予備調査のため、教師データ数が 4 個のみと極めて少なかったが、深層学習プログラムにより電池等の内部部品の特徴を抽出できる可能性を見出した。本手法での推論時間は、数分程度/ケースであり、解析時間は現状の手作業と比較し極めて速い。今後教師データ数を増やし、深層学習による手法の精度を検証する。

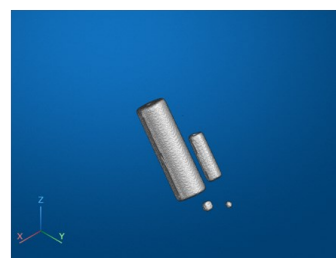
(a) 電子タバコ



X線CTデータ

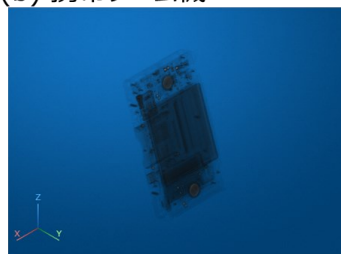


電池の正解データ

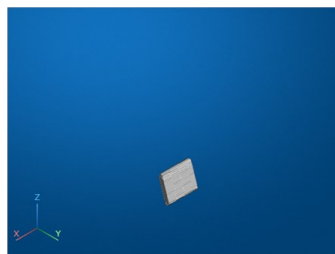


電池の推論結果

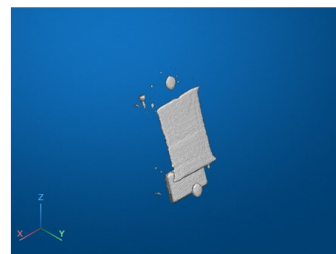
(b) 携帯ゲーム機



X線CTデータ



電池の正解データ



電池の推論結果

図 4-95 深層学習による推論結果

2026 年 3 月末末までに、上記のルールベース及び深層学習による手法を進化させ、製品内部構造データを従来の人手の 1/10 以下の時間で実施できる見込みである。

(a-2) 動静脈連携を考慮した資源循環性に資する指標の提示

高度な資源循環の促進に資する動脈企業の対応について、まずは、必要な製品情報をリサイクル工場やリマン工場に提供することが強く期待されるが、将来的には、製品自体が資源循環性に配慮した設計となっていることが理想である。そのためにも、資源循環性を評価する指標は重要であり、様々な資源循環性指標が提案されている(例、リサイクル率、Factor X、Material Circularity Indicator (エレンマッカーサー財団)、Circular Transition Indicators (WBCSD))。

しかしながら、既存指標では、動脈側から見た資源循環ポテンシャルに重点を置かれていることが多く、静脈側の実際の循環性が反映されていない。また、循環の量に着目されており、循環の質が評価できないカスケード循環と水平循環やリマニュファクチャリングが同様の評価となってしまう。また、資源性以外の価値評価項目が評価されないことが多い。そこで、本項目では、製品の資源循環性を動脈側の「製品の資源循環配慮」、静脈側の「工場の高度さ」の枠組みでの評価指標を提案する。本指標では、循環の「質」が、カスケード循環から水平循環やリマンに高まることによる効果も評価しつつ、低炭素性、コストなどの評価項目を加えて評価手法を開発・提案する。

<アプローチ>

評価指標候補について、動脈側の製品の資源循環配慮性の指標や静脈側の工場の高度さの指標について着目し、各指標の試算手法を含めた整理を文献調査により実施する。そして、指標化の手法を開発し、指標の原案を構築する。動脈側では、製品構造や提供情報と水平リサイクルが可能となる各種素材等の関係性を踏まえ、製品の資源循環に対する優位性を「資源循環性に資する指標」としてその名称も含め提示する方法を構築する。上記の指標コンセプトについて有効性や課題を抽出するために、評価用のデータ収集を実施する。本指標で評価する資源循環性では、メーカーやリサイクラが事業で扱う製造やリサイクルのプロセスだけでなく、使用段階も含んだライフサイクル全体の情報が必要である。そのため、製品の使用材料やリサイクル率などの調査だけでなく、製品の使用時に提供する機能まで考慮した製品ライフサイクル全体を想定し、関連データの収集を実施する。まずは、種類が多くある小型家電の内、どの製品を評価対象とするかを選定し、それらのライフサイクルシナリオを策定する。

<取組結果>

文献調査

指標候補を探索するために文献検索により国内外で提案されている文献を抽出し、各指標の特徴を整理した。今回抽出された 2016 年以降の文献から 186 の指標を調査したところ、85 指標が CE 指標を提案しており、その多くが物質フローに着目した指標になっている。また、2020 年以降では、環境側面だけでなく、環境、社会、経済の 3 つの側面から評価する指標の検討が進んでいることが分かり、その中でもエレンマッカーサー財団の MCI (Material Circularity Indicator) がサーキュラーエコノミーの工学的指標のみならず、社会学的手法な基礎的な指標として大きな影響力を持っていることが明らかになった(図 4-96)。しかしながら、製品の資源循環配慮性を製品の幾何形状まで踏み込んだ評価事例は少ないということがわかり、我々の取組みの独自性が確認できた。

静脈に着目すると、実務家の定義の中では削減というキーワードは、消費抑制や経済成長の阻害を意味する可能性があり頻度が低い。廃棄物の階層は、最近はあまり見られず、実務家の定義ではほとんど含まれない。システムの視点は近年より重要視されてきている。材料種ごとの循環システム全体 (Macro レベル) でのリサイクル性の変化を反映して、個別製品 (Micro レベル) での評価をすることが望まれている。一方、その関係を完全に記述するには、知見が不足するとともに、把握が困難である。

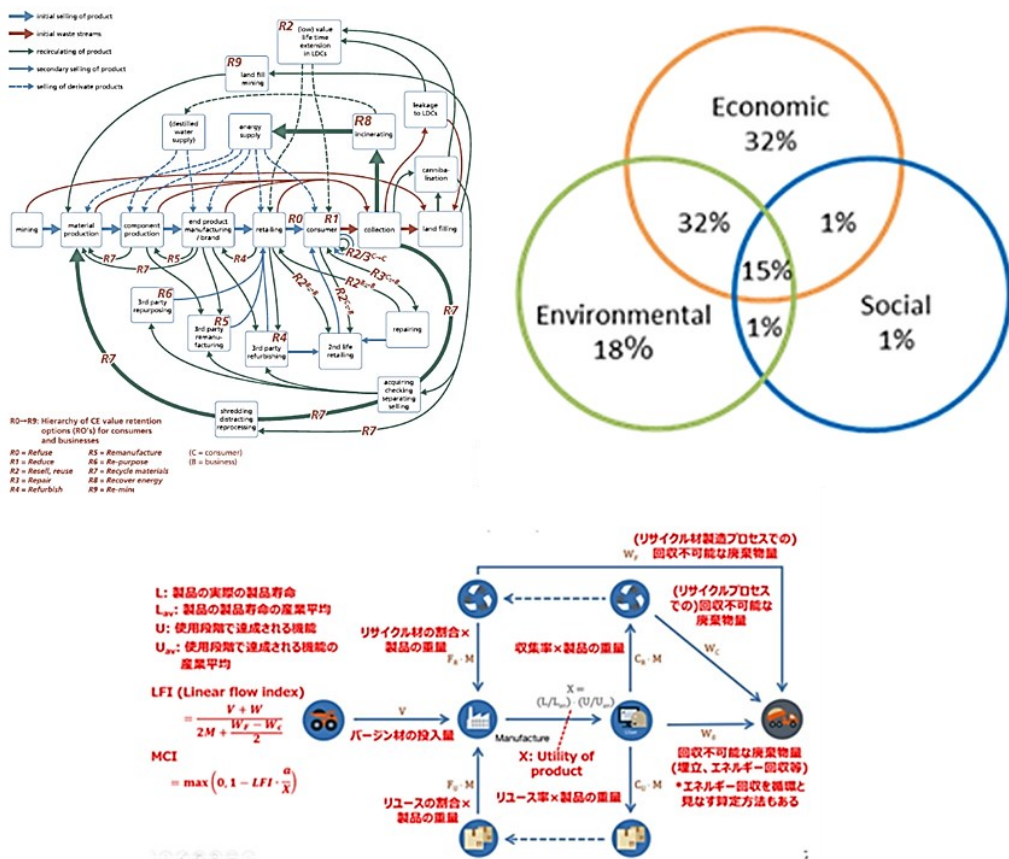


図 4-96 調査した指標の例

コンセプト策定

文献調査を元に、指標のコンセプトの策定を実施した。参考になるのはエレンマッカーサー財団のMCIであるが、物量のみに着目しているため資源の種類つまり、鉄 1kg 循環させるのと、貴金属 1kg 循環させるのは同様に評価される。資源価値をどのようにコンセプトに導入するかを考察した。また、資源は利用することと、資源を廃棄する、または、使えなくなるつまり、散逸させることが循環指標を考えるうえで重要となってくる。今回提案するコンセプトでは、アウトフローにあたる散逸量に着目していくこととした。その理由としては、後述するがリサイクルの質を考慮するときインフローと、アウトフローのバランスをとる必要が無いようにするためである。以上のことを考え次式のように総散逸量を定義した。

$$\text{総散逸量} = \sum \text{散逸量}_i \times \text{資源価値}_i$$

ここで、 i は資源（元素）の種類を意味し、各資源の散逸量と資源価値の積和となっている。これにより、鉄 1kg と貴金属 1kg では影響が異なるように評価ができる。

次に散逸量の算定は以下の式で算定できる。

$$\text{散逸量} = \text{使用量} - \text{リサイクル量} \times \text{リサイクルの質}$$

散逸量は、使用した資源量からリサイクル等で循環させた量に対してそのリサイクルの質を乗じたものを差し引くことで算定ができる。ここで、リサイクルの質は、循環させるスクラップの希釈率や Exergy（エントロピー）を用いて算定することができる。それは、金属リサイクルにおいて、精錬によって除去されない不純物があり、リサイクル材料の特性の発現が制約されることが知

られている。このため質指標に求められる要件として、不純物濃度の違いを評価できることが挙げられた。各指標における不純物濃度に対する評価の尺度は、3つに大別でき、1つ目は、混合エントロピーを尺度とする exergy 系指標であり、embedded exergy、ならびに希釈材料の embedded exergy を参照した exergy efficiency, exergy loss, embodied exergy が含まれる。2つ目は、溶解時の希釈倍率を尺度とする希釈倍率系指標であり、TSS、UO-TMR、自然鉱石換算元素濃度が含まれる。3つ目は、希釈倍率と混合エントロピーの両方を加味した尺度とする exergy-希釈倍率系指標であり、希釈材料の embodied exergy を参照した exergy efficiency, exergy loss, embodied exergy が含まれる。カスケードリサイクルの実態から、繰返しリサイクルによる不純物の濃化が危惧され、将来的なリサイクル制約が見込まれるかどうかにより、評価対象の製品単位でのミクロシステムでの評価と、社会全体でのマクロシステムでの評価との整合性は変わると考えられた。社会全体で不純物によるリサイクル制約が生じる場合、ある二次資源のリサイクル先が変更されても、それに伴い他の二次資源のリサイクル先も変わり、社会全体で変化はない。しかしながら、個別製品ではリサイクル先の変更により、希釈倍率系指標では異なる結果となる。そのため、この条件において希釈倍率系指標は適切な指標ではないとわかった。一方、不純物によりリサイクル制約がない場合、社会全体では質を評価する必要がないため、どのような指標も不整合は起きないと考えられた。

また、動脈側の資源循環配慮と静脈側の資源循環配慮は図 4-97 のように整理され、現状としては、3つの評価観点となる項目は資源量、コスト（経済）、温室効果ガス排出量を設定した。また、製品のライフサイクル全体を評価する指標を目指しており、リユース、リペア、リマニュファクチャリングなどの対策は、製品寿命が伸びることで、製品の利用者の享受する機能が増加したとして評価が可能である。つまり、製品システムの散逸量は、（機能×寿命）が提供する機能として、提供機能あたりの指標とする。

「動脈側の資源循環配慮」

- ・部品の軽量化
- ・部品の共用化
- ・部品のリユース化
- ・再資源化可能率
- ・実証リサイクル率
- ・解体時間
- ・保守容易性
- ・材料の統一
- ・リサイクル処理の容易化

「静脈側の資源循環配慮」

- ・単体分離特性
- ・識別性能
- ・分離効率

Input streams	Industrial streams (metals)									
	Aluminum (cast)	Aluminum (forged)	Copper	Lead	Magnesium	Plastic alloys	Stainless steels	Steel + Cast iron	Zinc	Zinc
Aluminum (cast)										
Aluminum (forged)										
Copper alloys										
Lead alloys										
Magnesium alloys										
Plastic alloys										
Stainless steels										
Steel + Cast iron										
Zinc alloys										
Glass										
Synth. Elastomers										
Natural Fibers										
Natural Rubber										
Porcelain										
Thermosets										
Thermoplastics										

0 - MUST separate, avoid mixing
1 - SHOULD separate, problems can occur
2 - DON'T separate, good combination

図 素材間の相性

図 4-97 動静脈の資源循環配慮項目

評価用データ収集

まず、評価用データとして、種類が多くある小型家電の内、どの製品を評価対象とするかの選定を実施した。選定した製品について、ステークホルダにヒアリングを実施することで、実現性の高いライフサイクルシナリオを策定した。

評価対象の製品選定

「国内市場へのインパクト」と「本事業による改善」の観点から、評価対象製品の候補を選定した。具体的には、国内市場へのインパクトとしては、市場調査資料から、影響を及ぼす台数が

大きいものを抽出した。また、本事業による改善では、本事業の技術開発により改善が来たできる製品群を特定した。今回の候補として、8製品を選定した。

評価対象のライフサイクルシナリオの策定

上記で選定した製品について、ステークホルダーへのヒアリングや実製品の分析を実施し、実現性の高いライフサイクルシナリオを3つ策定した(表4-8)。これらのシナリオによって、動脈側の改善のみ、静脈側の改善のみまたは両方の動静脈の改善の3パターンを網羅しており、評価用データとして適していると判断した。

表 4-8 評価用シナリオ一覧

対象商品	① 調理家電	② 高性能作業ツール	③ 電子機器
シナリオ概要	飲食店で使用される調理家電について、故障する前に部品交換および清掃を実施し、製品の長寿命化を図る。	使用ニーズの期間ズレがある作業用ツールについて、必要な期間だけ貸し出すことで、全体的に必要な台数を低減する。	回収された電子機器を部品交換することで高度な機器再生を実施し、2次利用の拡大を図る。
資源循環タイプ	メンテナンス (予防保全)	PaaS (レンタル)	リファーマービッシュ
提供機能	複数店舗での日常調理支援	複数現場での高性能作業支援	複数の作業環境での情報処理支援
製品の素材構成 (TOP 3)	【鉄】 72% 【ガラス】 10% 【プラ】 8%	【鉄】 56% 【プラ】 33% 【基板】 3%	【電子部品】 56% 【金属】 23% 【プラ】 21%
リサイクル	高度なリサイクル	既存	既存
動脈側の改善	ビジネスモデル	ビジネスモデル	なし
静脈側の改善	廃棄部品の分解	なし	高度な機器再生
比較シナリオ	出張修理	売り切り	清掃のみ

「製品の資源循環配慮」×静脈側の「工場の高度さ」の枠組みでの評価指標のコンセプトを策定した。また、指標コンセプトを検証するためのデータ収集を実施した。2025年度には、収集したデータを用いて資源循環性を評価することで、指標評価の有効性や課題を抽出し、対策を検討する。それらをまとめることで、指標の原案を完成させる見込みである。

(b) 粒子選別情報自動分析システム

研究開発の概要

破碎後の粒子群を各種選別機によって各素材の高品位原料にできるかどうかは、各粒子が単体分離しているかに依存する。貴金属やレアメタル等の高単価素材では、目的成分が一定以上含まれる片刃粒子でも水平リサイクルが可能であるが、プラスチック等の低単価素材では、単体分離した粒子しか水平リサイクルに適用できない。このように、素材種に応じて破碎時に達成すべき単体分離状態が異なるため、様々な条件で破碎したときの単体分離状態を定量的に把握することが重要となる。単体分離の分析は、粒子の研磨面を顕微鏡で観察する方法が、鉱山分野で古くから行われてきた。2000 年頃から、SEM-EDX を応用した MLA(mineral liberation analyzer)に代表される自動分析システムが普及してきたが、原理そのものは昔から変わっていない。鉱山分野で分析対象となる粒子サイズは 1mm 以下であり、数万個の粒子を樹脂内に固め、研磨して粒子断面を観察する。ここで問題となるのは、リサイクルでは主に 1mm 以上の粒子が対象となるが、SEM-EDX に基づく分析法は、1mm 以上、特に cm オーダの粒子を分析できないことである。また、2 次元情報である SEM-EDX に基づく単体分離分析には、本質的に次元の違いに起因する誤差(ステレオロジカルバイアス)が含まれていることも明らかになっている。本項目(b)では、最適化された破碎工程において、粒子がどの程度単体分離されたかを判断可能な分析技術を開発する。サイズ 1mm 以上の粗粒子に対しては透過 X 線による解析手法を、1 mm 以下の細粒子については、内部の詳細構造把握のため、研磨面の SEM-EDX 分析に基づく 3D 構造解析手法を開発する。

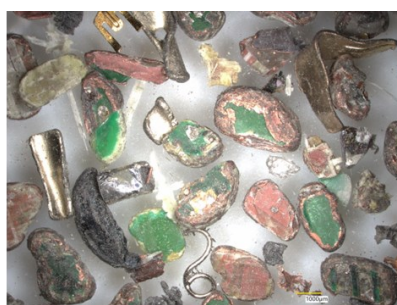
(b-1) <粗粒破碎物の選別特性分析技術開発>

本項目では、現状、測定法が存在しない、1mm 以上の粗粒破碎物粒子の単体分離状態を分析する手法を開発する。基本的な考え方は、粒子の 2 次元的情報である外観特徴、組成情報や、同じく 2 次元情報である透過 X 線像を利用して、粒子の 3 次元構造に基づく粒子内の組成分布を推定することである。この中で核となる、2 次元的情報を 3 次元的情報に変換する手法について 2 種類を検討している。

まず 1 つ目について、粒子の 2 次元的情報を簡易に取得し、2 次元的情報を 3 次元的情報に変換することで、3 次元の単体分離情報を推定する各工程について開発を行った。廃製品は多種多様な素材から構成されているが、典型的な複合材料である実装基板を対象として検討を進めた。10 品目の廃製品から基板を取り出し、カッターミルで破碎し、ロータップ篩振とう機により分級した。ポケット WiFi の基板を破碎・分級した粒子のデジタルマイクロスコープによる撮影画像を図 4-98 に示す。



(a) 4750~2000μm



(b) 2000~1000μm



(c) 1000~710μm

図 4-98 ポケット WiFi の基板の破碎粒子

2次元の単体分離情報の分析にあたり、個々の粒子を分離識別する必要がある。振動等を加えることである程度粒子をばらつかせることができるが、粒子同士の接触を完全に避けることは難しい。そのため、深層学習(セマンティックセグメンテーション)による粒子分離識別モデル開発手法を構築した。現状では、デジタルマイクロスコープによる撮影画像(図 4-99(a))から、ある程度粒子を分離識別できるが精度が高くない(図 4-99(b))。そのため、識別結果を修正した教師データ(図 4-99(c))を作成して、再学習することで、精度を向上させる取り組みを行っている。2026 年 3 月末までに、粒子分離識別モデルを構築する見込みである。

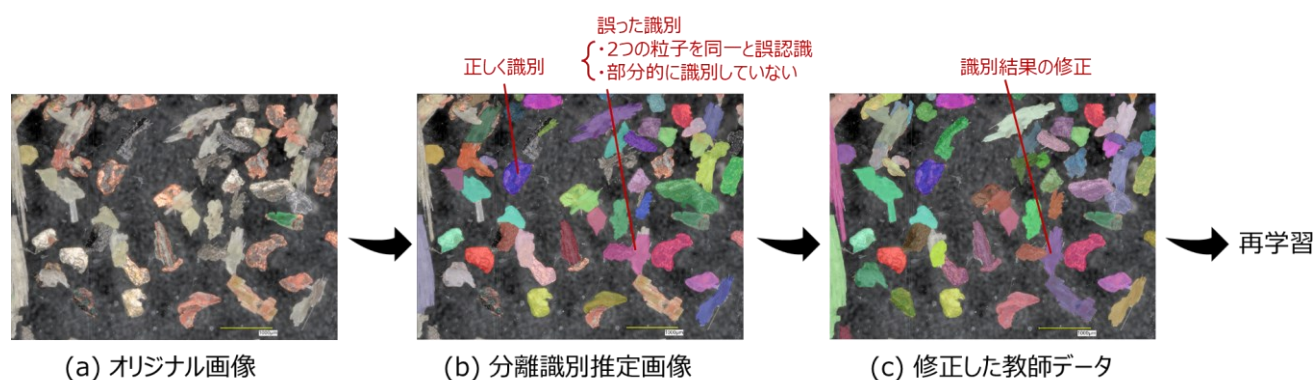


図 4-99 深層学習による粒子分離識別

分離識別された個々の粒子について、2次元の単体分離情報を可視画像から簡易に計測することを目指している。そのため、深層学習(セマンティックセグメンテーション)による2次元単体分離情報取得モデル開発手法を構築した。図 4-100 に示すとおり、デジタルマイクロスコープで取得したオリジナル画像に対し、レーザ誘起ブレイクダウン分光法(LIBS)により表面上の素材を分析し数クラスに分類した上で、画像の画素にクラスの情報を与与することで教師データとする。この教師データを多数準備した上で、深層学習に学習させることで、可視画像から2次元の単体分離情報を取得可能なモデルを構築する。2026 年 3 月末までに、2次元単体分離情報取得モデルを構築する見込みである。

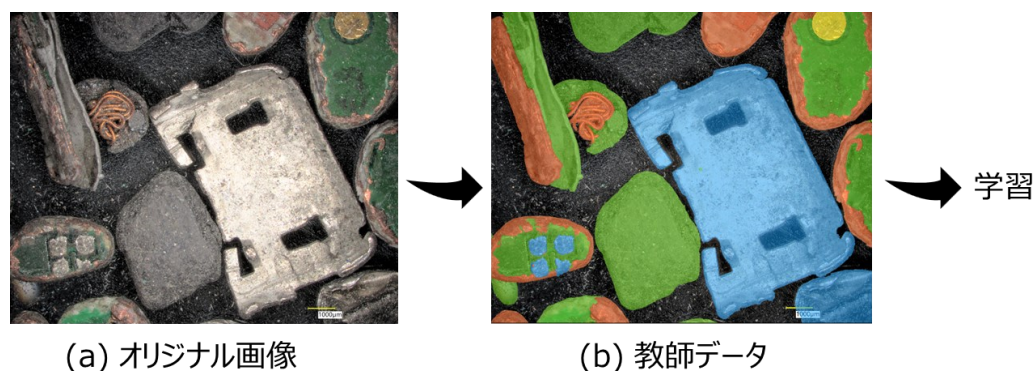


図 4-100 深層学習による 2 次元単体分離情報取得

ここまで述べた手法で取得した2次元単体分離情報から、3次元単体分離情報を推定する必要がある。破碎粒子を分離させて樹脂包埋し、X線CT撮影する。個々の粒子のボクセル情報を取得し、輝度値分布を分析した上で2値化することで、粒子内の素材を識別する。その上で、粒子表面上

の素材の比率(2次元単体分離情報)と粒子全体の素材の比率(3次元単体分離情報)を計算する。多数の粒子について上記の分析を行い、2次元及び3次元の単体分離情報をデータベース化することで、2次元から3次元の推定を可能とする。図4はポケットWiFiの基板の破碎粒子のX線CT撮影データ、そこから取得した粒子の断面画像、その2値化画像を例示している。この粒子では、比重が大きい成分(図4-101(c)の赤色)の比率が、2次元では0.4%、3次元では28.4%となり、ステレオロジカルバイアスに起因する大きな差があることが分かった。今後、X線CT撮影データから取得した3次元粒子形状から、球面調和関数－主成分分析によるモデリングによりバーチャルの粒子データを作成して、データベースを拡張する試みを行う。これらの取り組みにより、2026年3月末までに、2次元及び3次元の単体分離情報データベースを構築する見込みである。



図 4-101 X線CTによる2次元及び3次元の単体分離情報分析

2次元的な粒子情報から3次元的な粒子情報を推定するもう1つの方法は、粒子の透過X線データを基に、深層学習ベースの生成モデルを適用して、元の粒子の3次元構造を推定するものである。透過X線データは、X線CTスキャンを行うよりも短時間かつ低コストで取得が可能であり、ベルトコンベア上に粒子を流しながらインラインでの取得の可能性も見越している。より正確な推定を行うため、2次元情報として粒子表面の外観情報や組成情報の使用も検討する。3次元構造の教師データを作成する段階では、ある程度の時間とコストがかかるが、X線CTスキャニングデータを使用する。これまでに、本方法による推定アルゴリズムを確立するため、まずは実際の粒子ではなく、単純な3次元構造を持つバーチャルデータを対象とした検討を行った。ある長さの立方体中に、乱数によって設定された任意の直径を持つ球体を、任意の個数装入した3次元構造データを数万個のオーダで作成した。そのうち教師データとする分について、いくつかの方向から2次元の投影データを作成し、3次元構造データと併せて、生成モデルの一種である変分オートエンコーダ(VAE)ベースの深層生成モデルに学習させた。図4-102の上の段に、ランダムに作成した3次元構造データ(未学習)の例を示し、下の段に、上段のデータに基づく3方向からの投影

データを入力として生成した、3次元構造の推定結果を示す。1組の投影データから3次元構造を推定するまでの時間は1s未満である。

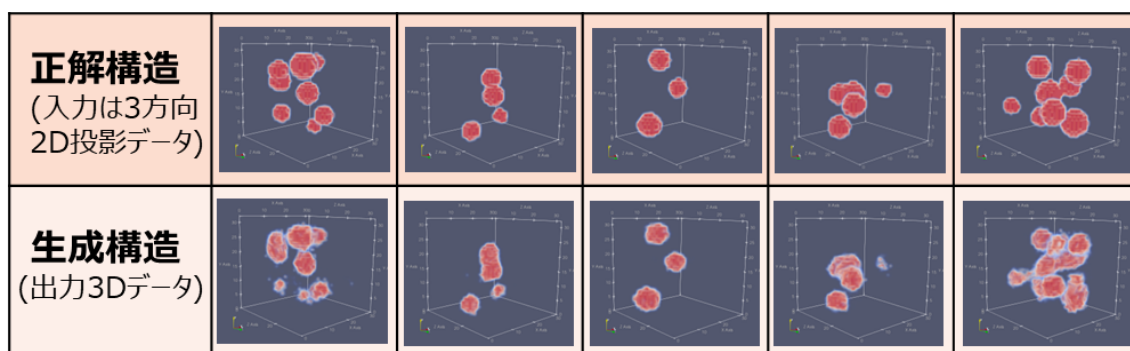


図 4-102 深層生成モデルによる単純な3次元構造の推定例

隣り合う球同士が結合した状態で生成される場合も見受けられたが、概ね、生成した構造は正解の構造に近いものであることが確認された。定量的には、生成した球体の合計体積が、正解の球体合計体積の約±20%の範囲内であり、ある程度の推定精度を示すことができた。これまでに粒子3次元構造の推定アルゴリズムが確立しつつあり、2025年度は教師データ作成において3次元的な組成の違いを適切に抽出する方法の開発を実施し、複数成分からなる実粒子を用いて推定精度を検証する。2026年3月末までに、X線CTスキニングをそのまま分析手法として用いた場合に比べ、1/10以下の時間でデータ取得が可能となる分析装置システムの手法を示すことが見込まれる。

(b-2) 細粒破碎物の選別特性分析技術開発

細粒(サイズ1mm以下)の鉱石を対象とした単体分離分析に。最も普及しているのは、数万個の粒子を樹脂に固めた供試体を作製し、研磨して粒子断面をSEM-EDXベースの装置で分析する方法である。しかし、この方法では、本来3次元情報である単体分離状態を、2次元の断面情報で判断することになり、次元の違いに起因する誤差(ステレオロジカルバイアス)が発生する。そこで数値解析的な鉱物粒子モデルを用いてステレオロジカルバイアスを補正する手法を開発してきた。また、鉱石を対象とする場合には、EDXで検出する研磨面上の元素分布を、粒子内を構成する「鉱物」で区分することが必要で、その正確な鉱物種を同定するクラスタリング解析手法を開発してきている。この鉱物向けに開発済みであるSEM-EDXベース単体分離分析装置を以下「CAMP」と呼ぶ。本項目では、CAMPを廃製品由来の細粒子に対応した、単体分離分析技術として改造することを目指す。人工物特有の形状に合わせたモデリングについては、b-1の開発技術を共有した上、人工物に対してクラスタリング解析手法を適用して、素材種の識別限界を検証する。

人工物において元素分布を区分操作する際には、合金種などの素材種類で分類することが必要となる。そこで、まず、SEM-EDX元素分析データと突合して、素材種類を識別するためのアルミ合金、鉄/ステンレス、銅合金、マグネシウム合金、亜鉛合金など280種の合金素材元素組成情報を整理した(表4-9)。プラスチックについてはSEM-EDXではC,H,O,Nなどの軽元素の分析精度が低く、プラスチック種類を識別できない。しかし、プラスチック中に含まれる添加物元素については分析できる可能性があり、これに基づく選別要件に対応するため、プラスチックに含有される添加物元素を整理した(表4-10)。また、合金識別については、母材の金属に添加する他の金属の含有量で合金種が変わるため、合金の識別アルゴリズムを作成した。合金種類は細分化された種類

の識別には、0.01%単位の識別が必要など SEM-EDX の分析精度では識別不可能な条件も存在するため、SEM-EDX による分析システムの識別限界も併せて調査中である。

次に、CAMP 分析による人工物のクラスタリングを行い、従来の BSE 像の輝度差によるドメイン識別では識別不可能な境界が、CAMP 分析によって識別可能であることを確認した(図 4-103)。図 103 右の合金 MAP の色の違いは金属組成の違うドメインであることを示している。上段の水晶振動子の例では、BSE 像中央の輝度の高い明灰色領域は同じ輝度に見えるが、CAMP の合金分析では金属組成の異なるドメインが複合した状態であることが分かる。下段のダイオード内部も同様に、BSE 像中央の輝度の高い領域は同じ輝度に見えるが、CAMP 分析では高輝度粒子表面に組成の異なるドメインが存在することが分かる。識別したドメインの金属種の特定は、合金標準試料と分析結果を突合し識別可能範囲を検証中である。

表 4-9 アルミ合金の組成情報(調査した 90 種類の合金から抜粋)

(単位:%)

系統		合金番号	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
展伸材	1000系 (純アルミニウム系) 非熱処理型合金	1050	0.25以下	0.40以下	0.05以下	0.05以下	0.05以下	-	0.05以下	99.50以上
	2000系 (Al-Cu系) 熱処理型合金	2017	0.20~0.8	0.7以下	3.5~4.5	0.40~1.0	0.40~0.8	0.10以下	0.25以下	残部
	3000系 (Al-Mn系) 非熱処理型合金	3004	0.30以下	0.7以下	0.25以下	1.0~1.5	0.8~1.3	-	0.25以下	残部
	4000系 (Al-Si系) 非熱処理型合金	4032	11.0~13.5	1.0以下	0.50~1.3	-	0.8~1.3	0.10以下	0.25以下	残部
	5000系 (Al-Mg系) 非熱処理型合金	5052	0.25以下	0.40以下	0.10以下	0.10以下	2.2~2.8	0.15~0.35	0.10以下	残部
	6000系 (Al-Mg-Si系) 熱処理型合金	6061	0.40~0.8	0.7以下	0.15~0.40	0.15以下	0.8~1.2	0.04~0.35	0.25以下	残部
	7000系 (Al-Zn-Mg系) 熱処理型合金	7475	0.10以下	0.12以下	1.2~1.9	0.06以下	1.9~2.6	0.18~0.25	5.2~6.2	残部
	8000系 上記以外の系統	8011A	0.40~0.8	0.50~1.0	0.10以下	0.10以下	0.10以下	0.10以下	0.10以下	残部
鋳造材		Al-Si系	AC3A	10.0~13.0	0.8以下	0.25以下	0.35以下	0.15以下	0.30以下	残部
ダイカスト		Al-Si系	ADC12	9.6~12.0	1.3以下	1.5~3.5	0.5以下	0.3以下	0.30以下	1.0以下 残部

素材種識別元素：SEM-EDXによる検出精度の検証対象

表 4-10 プラスチックに含まれる (CHON 以外の) 元素

プラ構造に含まれる元素

プラスチック種類	元素
ポリ塩化ビニル(PVC)、ポリ塩化ビニリデン(PVDC)	Cl
フッ素樹脂	F

添加物に含まれる元素

添加物種類	種類・元素
充填剤	CaCO ₃ 、TiO ₂ 、SiO ₂ 、タルク(Mg,Si)、クレー(Al,Si)
難燃剤	ハロゲン系有機化合物(Br, Cl)、リン酸エステル系(P)、酸化アンチモン系(Sb)
酸化防止剤、光安定剤	硫黄系(S)、リン系(P)
発泡剤	重曹(Na)
塩ビ用安定剤	鉛(Pb)、バリウム(Ba)、亜鉛(Zn)、カルシウム(Ca)、錫(Sn)

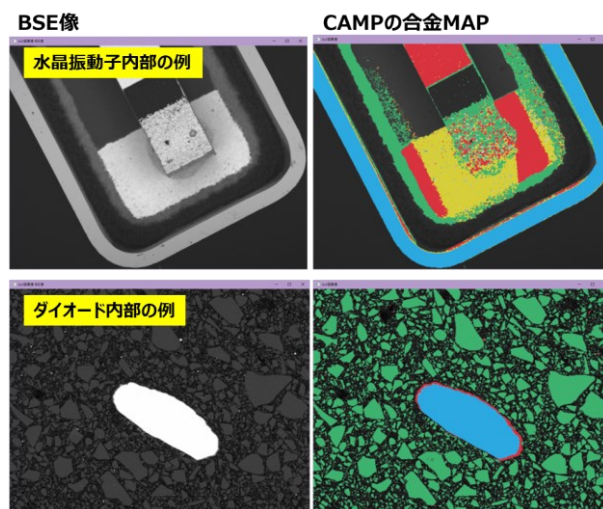


図 4-103 CAMP による合金の識別例

中間目標は、CAMP 独自の組成クラスタリング技術を用い合金の検出精度を検証した上で、人工物の単体分離状態の分析を可能にする解析アルゴリズムを開発し、SEM-EDX ベースの単体分離分析システムを試作することである。合金の検出については前述のように予定通り開発を進めている。人工物の単体分離状態の分析を可能にする解析アルゴリズムと人工物の 3D 変換モデルは、粗粒破砕物の選別特性分析技術と情報共有しながら予定通り開発を進めており、中間目標は予定通り達成見込みである。

②(2)：再生材流通高度化に向けた基盤技術開発

(a) リサイクル工場における情報の活用

研究開発の概要

本研究で開発する選別システムが完成し、リサイクル工場において一連の工程として長時間の連続運転をした際には、詰まりなどの発生に基づくトラブルの解消など、人によるメンテナンスが必要となることも考えられる。このようなトラブルを、システムを構成する個別の装置開発の過程で認識することは難しい。また、リサイクル工場における情報運用を効率化するために、動脈産業から製品情報をどのようにして伝達すべきかも、別途、検証が必要となる。このような運用面における検証を、技術・装置開発と並行して行うことは、開発技術を速やかに社会導入する上で極めて有効であるが、通常は、未踏技術の開発前にこのような知見を得ることは難しい。一方、提案者らは、先行事業において、高品位モバイル機器 6 品目に対し、貴金属やレアメタルを回収する無人選別システムのベンチスケール機を世界で初めて開発している。当該システムは、本研究で開発するシステムに比べると限定的な機能しか持たないが、世界初の自律制御型選別システムとして、その連続稼働データは本研究に有益な情報をもたらすことが期待できる。そこで、本項目では、当該システムを本事業のモデルプラントとして整備し、連続操業や情報利用における課題を抽出して本研究の各検討項目に還元するとともに、一部の解決手段の検討を実施する。

(a-1) 静脈プロセス情報の活用に向けたモデルプラントの整備

■モデルプラントの整備

先行事業では CEDEST システムを産総研内の実験室で開発していたため、実験室の敷地面積の関係で、装置間をすべてコンベア等で接続することができず、廃製品の供給から、各種モジュール

(基板、電池、筐体等)の回収、基板から剥離した電子素子の回収に至る一連の工程を連続的に試験することができなかった。本項目では、大栄環境グループのリサイクル工場内に一連の工程の連続試験(6 時間以上/日)が可能なモデルプラントを設置し、連続操業や情報利用における課題を抽出することを目的とする。2024 年 12 月までに産総研から大栄環境グループのリサイクル工場への装置移設、装置間を接続するコンベアなど不足する装置の整備を完了した(図 4-104)。2025 年 1 月から CEDEST システムの装置単独での試運転を実施し、2025 年 3 月から CEDEST システム連続運転を試行している。また、選別された廃電子部品の回収量をモニタリングする機能を 2025 年度に追加予定である。中間目標は、検証を開始できるようにモデルプラントの整備を完了させ、リサイクル工場のモデルプラントの連続試験に向け、再生材原料の供給性能モニタリングが可能となる情報連携機能を整備することである。プラント設備に関する整備は完了し予定通りに開発が進んでいることから、中間目標は達成可能な見込みである。



図 4-104 大栄環境グループリサイクル工場内 CEDEST システム)

■モデルプラントによるトラブル発生を検証と解消技術の開発

本研究で開発する選別システムは手作業を一掃した無人運転を目指すものであるが、実操業においては、単に装置やシステムを自律制御するだけでなく、装置内の詰まりなど、頻度の高い軽微なトラブルを自動・自律的に解消する機構も必要となる。そこでモデルプラントを利用して、どのような箇所でどのようなトラブルが発生するのかを以下のように分類して検証する。

- ② ノッカーなど汎用かつ機械的な機能付与により解消可能なトラブル
- ② 従来、人手による対応が必要であった軽微・高頻度なトラブル
- ③ 消耗品の交換など、装置メンテナンスが必要な低頻度なトラブル

①については、モデルプラントの試運転で摘出したトラブルのうち、ノッカーなど汎用かつ機械的な機能付与により解消可能なトラブルについて、装置に機械的なトラブル解消機構を付与する。一例として、廃電子部品の選別システムで使用する空気搬送システムについて、特定形状の粒子が多い場合に選別産物ホッパーが詰まるトラブルを検出した。これに対応するため、攪拌羽根により機械的に選別産物を攪拌することで、閉塞を防止する機構を開発し設置した。

②については、従来、手による対応が必要であった高頻度なトラブル対応するため、吊り下げ型メンテナンスロボットとその吊り下げ装置及び遠隔制御装置(図 4-105)を作成し動作検証を行う。トラブルの原因および人が行う解消方法や作業環境を解析し、機械的に対応するトラブル解

消機能(メンテナンスロボ)を検討するとともに、その機能の遠隔制御あるいは自律制御の手法を検討する。想定されるトラブル箇所を想定した解消技術から着手し、モデルプラント導入後に、連続運転の課題やメンテナンス箇所の検証を実施する。これによりこれまで人手により対応が必要であったトラブルなどをロボットが対応することで、施設内の無人運転に貢献し、事故や作業コストを軽減に繋がる。

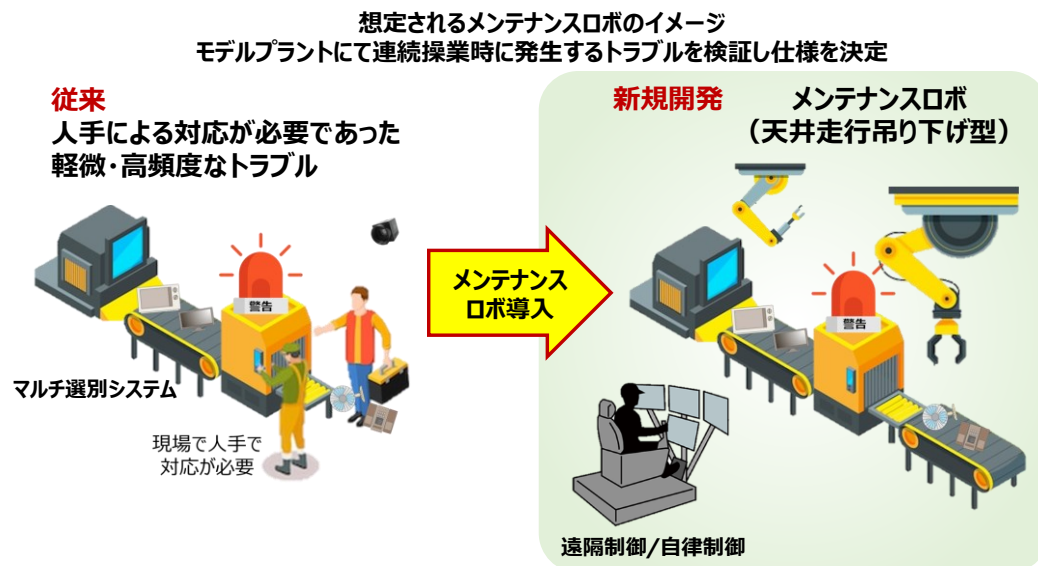


図 4-105 想定されるメンテナンスロボットのイメージ

・天井吊り下げ型ロボット

本研究開発では、カワダロボティクス株式会社製の協働ロボットNEXTAGEをベースとした双腕の天井吊り下げメンテナンスロボットを作製した(図 4-106 左)。開発中のモデルプラント内の床面には様々な形状のモジュールやケーブル類が混在している為、天井から各モジュールにアプローチすることで、床面の影響を受けずトラブルが発生したモジュールへ対応が可能にと予測された。また、ロボットは遠隔操作により制御し、遠隔操作では、操作者が複数のモニターを視認し、ロボットの操作を行う(図 4-106 右)。モニターにはロボット頭部に取り付けられたロボット視点とロボットのアームに取り付けられたカメラの映像が映し出される。加えて、操作者は左右に対応したコントローラを用いることで、双腕を操作することができる。さらに、モデルプラント内で様々なモジュールが稼働している中、メンテナンスロボットが作業を行う際、ロボットと各モジュールが接触し破損する恐れがあるためロボットのアームには距離センサが取り付けられており、モジュールに接近するとコントローラに反力を与えることに加え、アームに取り付けられた

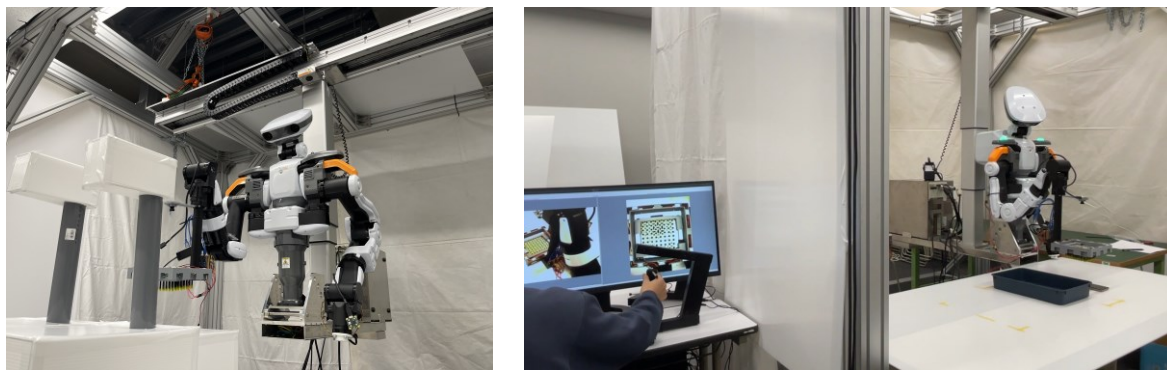


図 4-106 試作した天井吊り下げ型ロボットと遠隔操作装置

LED の色の変化によって、操作者に注意を促す。これにより操作者はカメラ映像だけを見ながら操作するときに比べて、操作への負担感が少なくなる。

・ロボットハンドの開発

プラント内で高頻度にかかるトラブルの一つの候補として、裁断され破損したスマートフォンがラインに詰まるケースが想定される。裁断されたスマートフォンの様な破損した物体は、通常のロボットハンドで多く用いられる真空吸引や並行グripperなどでの把持が困難である。プラント内には裁断されたスマートフォンの様に大きさや形状が様々な物体が存在し、それらに対応可能な汎用性の高いハンドが求められる。そこで、本研究開発では未知の物体に対応可能な、汎用性の高いロボットハンド（グripper）を開発した（図 4-107）。これは様々な形状の物体の把持が可能なピン配列型グripperがある。ピン配列グripperは、物体の形状に複数のピンをなじませ圧力を加えることで、多様な物体を把持することができるものであるが、把持機構が複雑になり、加える圧力の方向が偏ってしまうという問題があった。本研究では、把持機構を新たに開発し、対象物とハンドの位置によらず把持が可能になった。

一方、実プラントへの設置に関して、2024 年 11 月に大栄環境グループに移設されたモデルプラントの設置状況を視察したところ、モデルプラントの各モジュールには安全上のカバー取り付けられ、またそれらが密接した状態であった。そのため、カバーを開け、限られた空間で作業を行うなどの細かな操作が必要になる。また、現在、ロボットには、ロボットのアームが周囲の環境に近づいた際に注意喚起を示す機能はあるが、アームが物体や周囲の環境に接触した情報を得たうえで、その情報操作者にフィードバックする機能がない。遠隔操作を想定しテストを行ったところ、物体に接触した情報が得られないと操作の精度・作業効率が低下する恐れがある。また、物体を把持するロボットハンドに現在開発中のグripperを導入予定であり、グripperが確実に物体を把持するために押し込み量を操作者が知覚する必要がある。加えて、開発中のモデルプラントでは様々な形状のモジュール群が混在し、求められる作業が多岐にわたる故、接触を知覚できない場合、ロボットやモジュールの破損につながる。これらのことから、ロボット自体が現在何に触れているかリアルタイムで操作者に知覚させる何らかのフィードバックが必要となる。今後は、モデルプラント内を移動することを想定した、ロボットの移動装置を作成する。また、より細かな作業実現するために、遠隔操作装置に力覚フィードバック装置を加えることで、ロボットの遠隔操作における作業精度と作業速度との向上し、メンテナンスロボットの研究開発と動作検証が計画通り推進可能である。

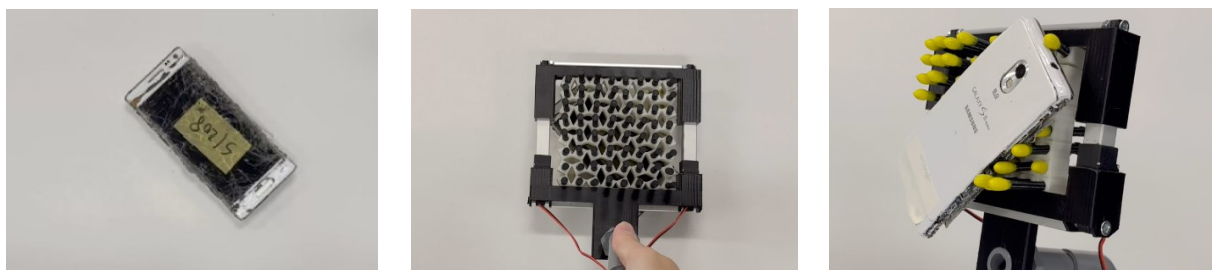


図 4-107 試作したピン配列型グripper（特願：2025-025300）

(a-2) モデルプラントを利用した情報連携の検証

■ タグを利用した動静脈間情報伝達と制御情報への変換

本項目では、動脈産業からの製品情報伝達手段の1つとして、passive 型 RFID タグの利用を検討している。将来的な RFID 貼付の導入を考えると、製造メーカ自身による貼付、量販店が収集し

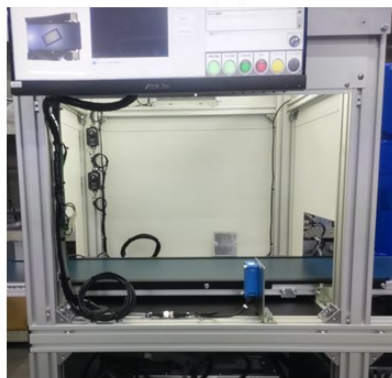
た小型家電を売却する際の貼付、消費者が自治体施設等に持ち込んだ際の貼付など、様々なケースが考えられる。いずれのケースにおいても、RFID への情報の書き込み、RFID を製品の適切な位置に貼付する作業を人手に依存すると、人件費の増大や、貼付位置不適切によるリサイクル工場での読取不調などが懸念される。その解決には自動貼付が期待されるが、既存装置は主として箱などの平面に貼付するものであり、複雑な形状物に対して自動貼付できる装置は存在しない。そこで、前期3年において、品種を入力してRFID タグへ書き込み、最適な読取が可能なRFID タグ開発と、様々な形状を有する小物家電を2D/3D 画像認識し、貼付位置を導出するRFID タグ自動貼付システムを試作する。また、RFID タグ自動貼付システムの動作に活用する小型家電の機種情報管理システムを試作する。

これまでに、主要小型家電6品種を選定し、各ワークに対応可能なRFID タグのサイズや貼付位置を検討し、ワーク形状によりRFID タグが貼付・読取可能な位置を導出する画像認識システムを構築した。更に、RFID タグへ情報をエンコードし、ロボットにより自動貼付可能な試作機を開発した(図4-108)。本システムのフローは「タグに記入する機種情報の入力 → 小型家電製品の形状認識 → 画像処理からの最適貼付位置の検出 → RFID タグの読取精度確認」となっている。2024年度末時点で、最適貼付位置を検出するまでの工程の成功率80%以上を達成している。装置の連動動作についてはダミーのRFID ラベルを活用して確認しており、一連の動作は想定された状態で仕上がっている。今後はRFID タグの開発状況に応じて各部機構の見直しや、RFID リーダーの出力調整・使用部材の使用変更などを重ねながらシステムとして成立させる予定である。

■装置全体画像



■カメラでの貼付可能位置検出エリア



■RFID ラベルの排出及びデータエンコード



■RFID 読み取りエリア



図 4-108 RFID タグ自動貼付システム(試作機)の外観

本研究で開発する RFID タグでは、既存製品との最大の違いとして「1mm 以下のラベル型 RFID タグでありながら、導体(金属)同士に挟まれた状態でも、ID 読取・識別・管理の運用に値する通信性能を発揮すること」を目指しており、以下のコンセプトの実現を目標としている(図 4-109)。

- ・金属面にも樹脂面にも貼れるラベルタグ
- ・基本構造は電界集束型アンテナとし、金属にべた貼りした場合にも機能する
- ・家電の外装への貼付、筐体の内部への貼付(内蔵)、どちらにも使える万能な UHF 帯パッシブ RFID ラベルタグ

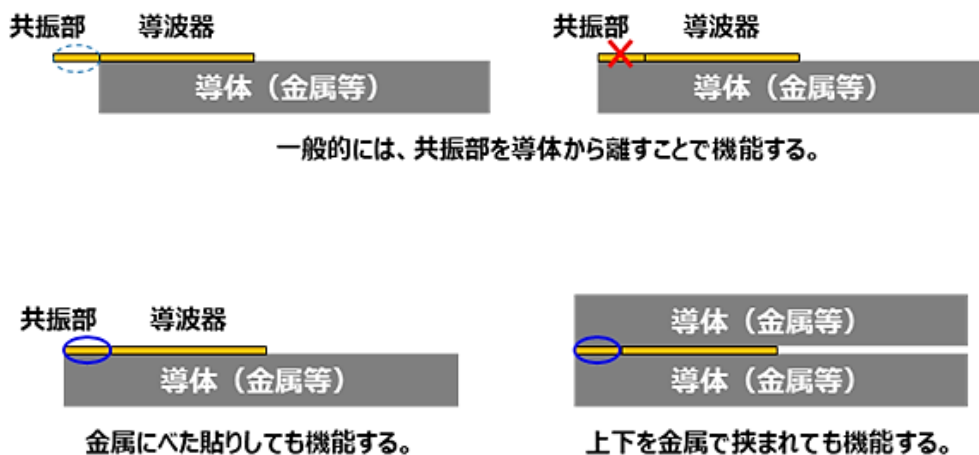


図 4-109 RFID タグの開発コンセプト(上：従来品、下：開発品)

小型で薄型な UHF 帯 RFID ラベル型タグはグローバルでも希有であり、新規性・革新性の高い仕様である。これまでに、サイズとして A：約 40x10mm T=0.9mm、B：約 40x10mm T=0.5mm の 2 種類の RFID タグを設計・試作し、検証を実施した。廃家電(デジタルカメラ)に対して、金属板(SUS304)に貼った場合と、樹脂板(ABS)に貼った場合での性能比較(通信距離)を、周波数測定器(Voyantic Tagformance Pro)により測定した結果の例を図 4-110 に示す。ここで、横軸は周波数(MHz)、縦軸は通信距離(m)である。本図に示すように、国内で使用可能な UHF 帯 RFID 電波帯である 920MHz 域において、通信距離が以下になることを確認した。

A：金属板に貼った場合/黄色線：約 3.6m、樹脂板に貼った場合/赤色線：約 0.8m

B：金属板に貼った場合/緑色線：約 0.8m、樹脂板に貼った場合/水色線：測定不可

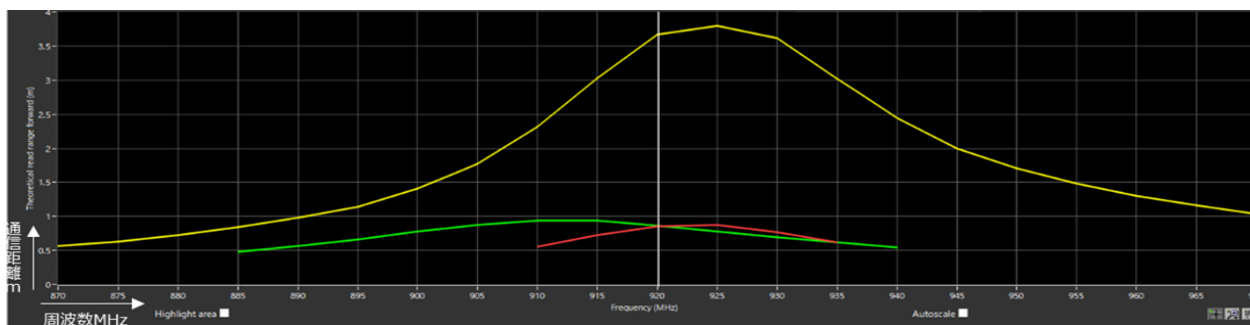


図 4-110 RFID タグ(試作品)の通信距離の測定結果例

このように通信距離性能の差はあるものの「金属面・樹脂面のいずれに貼っても読取が可能なタグ」を実現することができた。更には、本稿には詳細を示さないが、筐体に内蔵しても読取が原理的に可能であることを確認している。これにより上述の開発コンセプトの基礎・要素技術を見出し、性能面でも実証できた。一方、タグの厚みによって通信距離の差が大きかった点については、今後の研究でサイズと通信性能のバランスの良い構造を見出す方針である。なお「内蔵タグ」の開発については、後期の開発テーマとしており、パナソニック HD 社と仕様等に関する協議を行っている。加えて、タグ自動貼付システム向けに 対象製品の品目、型式、外観情報等の DB を構築した。これまでの登録データ数は、スマートフォン 396 機種、デジカメ 263 機種、タブレット 146 機種、携帯ゲーム機 83 機種、ドライヤー 341 機種である。今後、解体情報(解体方式、筐体切断位置情報等)との紐づけを進め、機種情報管理システム(RFID タグに書込む情報を管理)を構築するとともに、モデルプラントにおいて、タグ読取機能の強化のための実験検証と製品選別・解体実験を行う予定である。

本項目では、中間目標として「構築した DB を基に機種情報管理システムを開発し、接続したタグ自動貼付装置の動作検証を実施する。RFID タグ自動貼付装置において、装置の改良等を行うことで形状の異なる 3 品種に対し、情報書込み～自動貼付に至る一連の工程の成功率 70%を達成する」を設定している。上述のように、研究開発は順調に進展しており、2026 年 3 月末までに達成する見通しである。

■工場間情報連携による選別工程の高機能化

我が国のリサイクル工場は、欧米に比べ、小規模な工場が多数存在することが特徴である。様々な選別工程を一貫して実施可能な工場は少なく、中間産物を売却するなど、企業間の個別取引に依存するケースも少なくない。また、企業内に複数の工場があっても、個別製品の詳細情報は管理されていないため、必ずしも工場間連携が効率よく行われてはいない。一方、本研究で開発するシステムでは、製品あるいはグループ毎に情報管理され、ここから産出される各素材原料の純度や、特殊部品も一定の精度で情報管理される。得られた電池やモーターなどの特殊部品は、他の専用工場で処理することを想定しており、将来においては、特定製品をリマン工場へ提供するなど視野に入る。これらの入出物情報を活用すれば、開発システム内の各装置の稼働状況を推定することが可能となる。例えば、同一リサイクル企業内で、本事業で開発するシステムを導入した工場と、異なる選別機能を有する他工場があるとき、「開発システム全体を統括制御管理するシステム」に他工場の選別機能情報を入力することで、複数工場の稼働率が最大となる運用も可能と考えられる。言い換えれば、中小工場が多数ある我が国においても、工場間の緻密な連携・最適化計算により、欧米の大工場と同等以上の効率を獲得する「バーチャル大工場」として機能させることも可能となる。そこで、本項目では、国内に多くの工場を有する大栄環境グループ内の工場間連携を想定して、工場間情報連携と物流最適化による選別工程の高機能化を検証する。

工場間情報連携による効果を評価するための指標として、工場間情報連携による売却益増大またはコスト削減を採用し、大栄環境グループの工場情報を元に工場間情報連携の効果を評価するために必要な要素の洗い出しを行った。抽出したコスト算出要素は、工場の処理能力(選別機スペック、選別機稼働状況)、処理コスト(選別コスト、廃棄物処理コスト、輸送コスト)、選別不十分産物から高品位化産物に選別することによる売却益増分である。ここで高品位化産物の組成情報は、前述の仮想選別環境(拡張版 AESS)の選別結果予測値から推定する。コスト算出要素を具体化し、入出力項目を表 4-11 に整理した。今後、各種単価情報や選別不十分産物の発生量情報を収

集し、評価結果の妥当性を検証する予定である。また、コストによる工場間情報連携評価はプログラム化する計画であり、表を元にしたプログラム要件定義を実施している。2026 年度にはプログラム要件を確定し、プログラム開発を完了する予定である。中間目標は、コスト算出要素の情報収集中間目標は工場間情報連携評価システムの要件定義を行い、工場間情報連携評価ソフトを試作して動作検証を行うことであるが、これまで予定通りに進捗していることから中間目標は達成可能な見込みである。

表 4-11 工場間情報連携による売却益増大またはコスト削減を評価

入出力項目		利益/コスト		コスト算出に必要な項目
Input	選別不十分 産物	売却益/廃棄物処分費(円)		発生量(t)
				売却単価/処分費単価(円/t)
	輸送コスト	輸送費(円)		輸送単価(円/t)
				輸送距離(km)
				人件費単価(円/時)
				燃費(km/L)
				燃料単価(L/円)
				自動車維持整備費(円)
	選別コスト	設備費(円)		減価償却費(円)
		電気料金(円)		処理量(t/時)
				電気量単価(円/kWh)
				選別機単位の処理量(kWh/t)
				選別機毎の電力量(kWh/t)
				搬送装置(kWh/t)
				付帯設備(kWh/時)
		人件費(円)		人件費単価(円/時)
		メンテナンス費(円)		
Output	回収物	売却益(円)	鉄、ステンレス、銅、アルミ、 貴金属、各種レアメタル、 各種プラ	回収量(t)、売却単価(円/t)
		廃棄物処分費(円)		回収量(t)、処分費単価(円/t)

(b) リマン工場における情報活用と動静脈情報連携基盤の開発

研究開発の概要

研究開発項目①(1)(c)にて検討する、リマン対応分解システムの開発やリマン設計のその推進には、製品メーカー等が持つ製品設計・素材に関わるデータの活用が欠かせない。当面は、動脈系企業がリマン対応の廃製品を集約的に回収したケースが対象となるが、前述したように廃小型家電の個体認識が進めば、全国のリサイクル工場または、リマン工場において解体することが想定される。また、電池火災のリスクが高い製品については、(a)で passive 型 RFID タグ貼付も検討するが、その他の多種多様なメーカー・製品に対して、動脈－静脈間で 1 対 1 のデータ連携を行うことは現実的ではない。さらに、本研究で開発する装置・システムを速やかに社会普及させるには、経済効率性との両立は不可欠であり、我が国の資源循環システム構築に向けて、開発技術の機能を最大限活用していくシナリオ作りが重要となる。そこで本項目では、欧州を中心に進められている DPP(デジタル・プロダクト・パスポート)の制度化の動向や EV 蓄電池を対象とした、Catena-X システムの開発普及状況等も踏まえつつ、リマン工場向けの製品データ活用法と情報連携基盤構築に向けた検討を実施する。

(b-1) リマン対応分解システムの情報連携基盤に関わるプロトタイプ開発・検証

近年、DPP などのサプライチェーン全体での情報連携プラットフォームにより、ライフサイクル全体での価値を向上させる取り組みが活発である。しかしながら、リマンプロセスにおいて、どのような情報を連携させれば、リマンプロセスをより高度化できるか、さらにどれほどの改善効果が得られるかは明確になっていない。そこで本研究では、リマンに必要な情報連携基盤のプロトタイプ開発を行い、稼働させることで、プロセスの高度化に有用な情報の定義とその効果の確認を実施する。

<アプローチ>

業界団体および事業者ヒアリング：社会実装に向けて様々なステークホルダーが参画できる管理・運用方法を踏まえたシステム全体の構成や課題などを明確化にし、実現性および受容性のあるシステム全体の要件定義案を作成するため、リマンプロセスによる高度化および情報連携基盤の必要性や、リマン・情報連携に対する期待・課題について家電および小型家電に関わる業界団体や製造者・リサイクラへヒアリング（7社以上）を実施する。

また上記ヒアリング結果を踏まえ、リマンの有効性を検証するための PoC 用情報連携基盤システムのプロトタイプを開発し、セキュアな情報の連携の動作検証を行う。

<取組結果>

■情報連携基盤コンセプト

家電および小型家電のリマンプロセス実現に向けて、自動化と精緻化は必要不可欠であることと、既に自動化への取り組みが開始している中で、精緻化に向けて、コンセプト案として下記①～⑤の要素が必要になると整理している。前提としては、政府主導で整備が進められている「ウラボス・エコシステム」などがデータの受け渡しを行う情報連携プラットフォームと位置づけ、個社システムにあるデータ主権の保護と同時に、リマンに関する共通システムにおいてデータ利活用が可能となるシステム機能の配置・役割分担に関するコンセプトを検討・作成した(図 4-111)。

- ① 各社が PLM (Product Lifecycle Management) 保有する設計データ (CAD) などを利用し、共通システム側にあるデータ処理プロセスへ連携する
- ② 分解 CPS で自動精緻分解に必要な要素のみ抽出した「簡易 CAD」を「分解 PGM (手順)」に変換

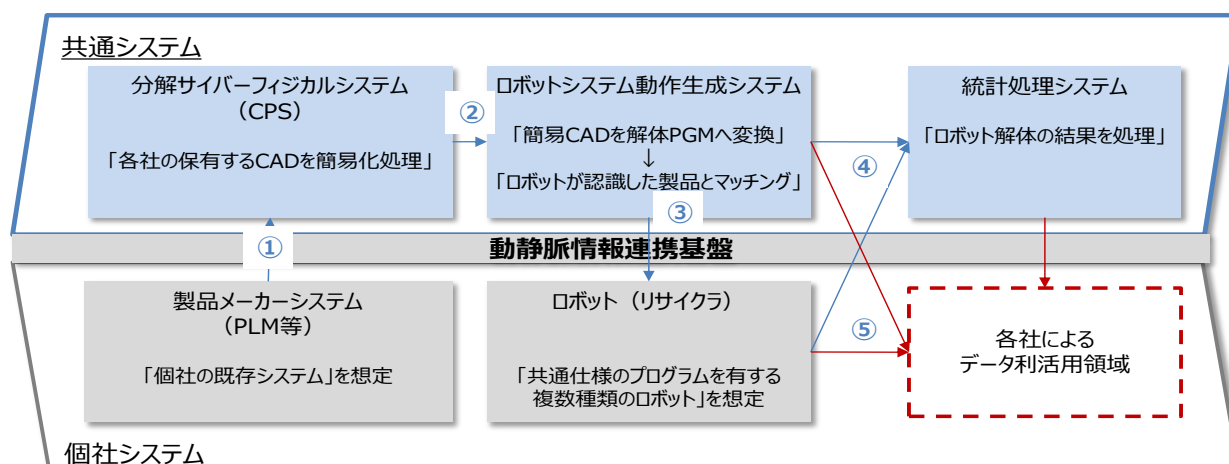


図 4-111 情報連携基盤コンセプト

- ③ 分解 PGM をロボットが認識した製品とマッチングし、ロボットによる分解を実行

④ ロボット分解の結果を集約し、統計処理などを行う（協調領域のデータを中心に扱う）

⑤ 競争性があるデータについては、各社によるデータ利活用領域として扱う

また、コンセプト案にある機能を個社システムと共通システムのどちらで実装すべきか、①～⑤において連携する情報仕様の共通化に関する検討も必要であり、下記に現時点で想定される論点について、今後情報連携に関わるステークホルダ各社と継続議論していく必要がある。

①に関する論点：

- ・製品メーカーシステムから CPS に受け渡す CAD データ等の仕様を共通化すべきか（できるか）
- ・簡易 CAD 生成は共通システム上で行うべきか、CAD データを簡易化処理したものを受け渡すべきか

③に関する論点：

- ・製品メーカーの意向或いはリサイクラ個社の技術・ノウハウに応じて、分解レベルやロボット動作に関する自由度を持たせることが可能か（必要か）

④⑤に関する論点：

- ・ロボットシステム動作生成システムの処理結果やロボット分解の処理結果について、データ所有や利用に関するルールの必要性

また、情報連携基盤の社会動向を踏まえ、情報連携プラットフォームのユースケースの 1 つとして、本事業の取り組みは分解、リマン部品トレサビ、再生材原料トレサビの役割を果たすものになると考えている(図 4-112)。ただし、小型家電は製品やメーカーが多種多様であるため、まずは自動精緻分解が目指すリマン可能性のある製品から優先的に取り組む必要がある。

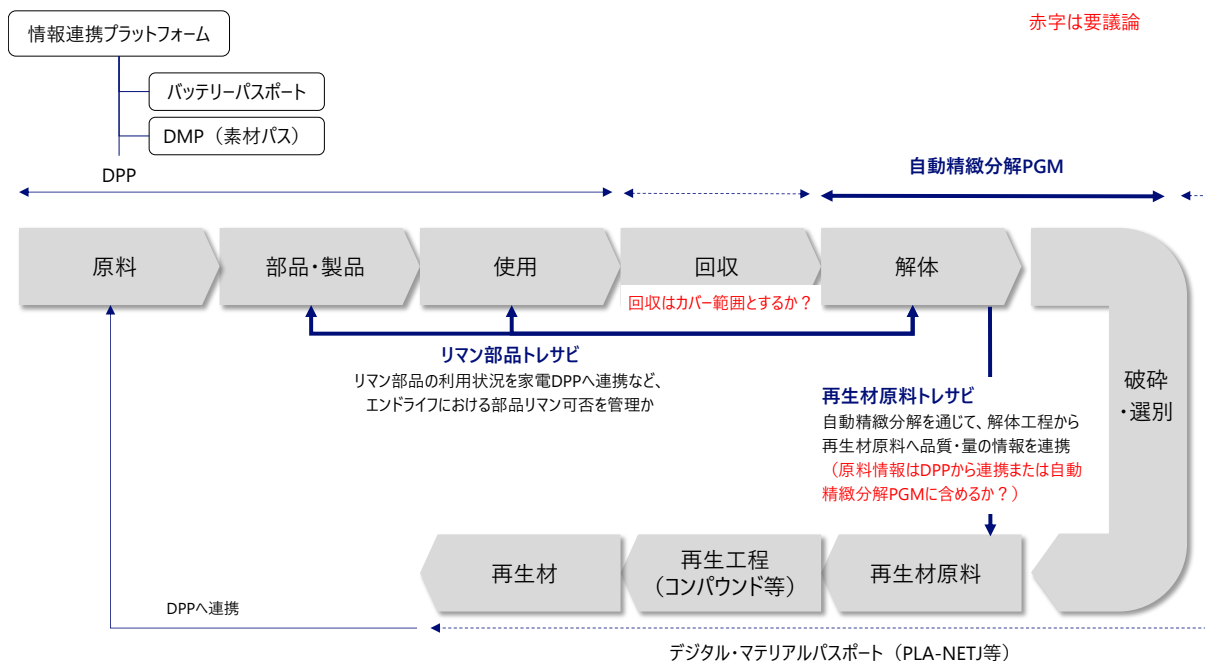


図 4-112 社会実装における情報連携基盤の位置づけ

■ステークホルダヒアリング結果

情報連携基盤の実装に当たっての課題や、各ステークホルダの情報連携に対する期待などを整理するために、家電メーカーや家電リサイクラ、小型家電リサイクラへのヒアリングを実施した。

要点を以下にまとめる。

【情報連携基盤に期待する効果】

小型家電リサイクルは現状として有価性が低く、素材価値が高い鉄・アルミ・貴金属等を主眼にリサイクル技術が確立されてきた経緯がある。ただし、サーキュラーエコノミーが進むにつれて、プラスチックも対象にしなければならず、自動化・精緻化、あるいはリマニュファクチャリングによるトータルでの経済性向上が必要であり、情報連携を通じて促進できることに期待している。

リマニュファクチャリングが可能な製品（部品の価値があり、サイズが大きめな製品がやりやすい）を特定した上で、回収、解体、部品回収などを行うことで、循環の経済性が上がることを期待している。リマニュファクチャリングを前提として自動化と情報連携基盤は必要になると考えられる。（リマニュファクチャリングなしでは効果が薄いとも言える）

素材のグレーディングや貴金属・レアメタル等の含有有無や対象部品に関する情報など、リサイクルの高純度化および経済性を高めることに有用なデータの共有や利用によるリサイクルプロセスの高度化、或いは自動化に期待している。一方で自動化による画一的なリサイクルプロセスはリサイクルの技術力など付加価値や競争力が低下する要因にもなることが懸念している。

【情報連携基盤におけるデータの在り方】

動脈企業を中心に自動化・精緻化の必要性に理解を示すも、情報連携基盤における設計データの取り扱いに現時点では否定的な意見があり、今後どのようなデータを取り扱うことができるか精査が必要と考えている。ただし、この傾向は企業あるいは担当部門によって考え方が画一的ではなく、今後の国内外の DPP に関する議論が進むにつれて、見え方が変わる可能性がある。情報連携の促進はリサイクルだけでなく、デザインの共通化などを促す必要があると考える。その際、リサイクルの付加価値として、メーカーへ情報をフィードバックしリマン、リサイクルがしやすい設計に活かしてもらえる役割の強化など、動静脈連携強化に資する情報連携基盤の在り方が期待されている。

■PoC 用プロトタイプ開発

図 4-112 に示した図について、情報連携基盤に関する部分改めて示す(図 4-113)。

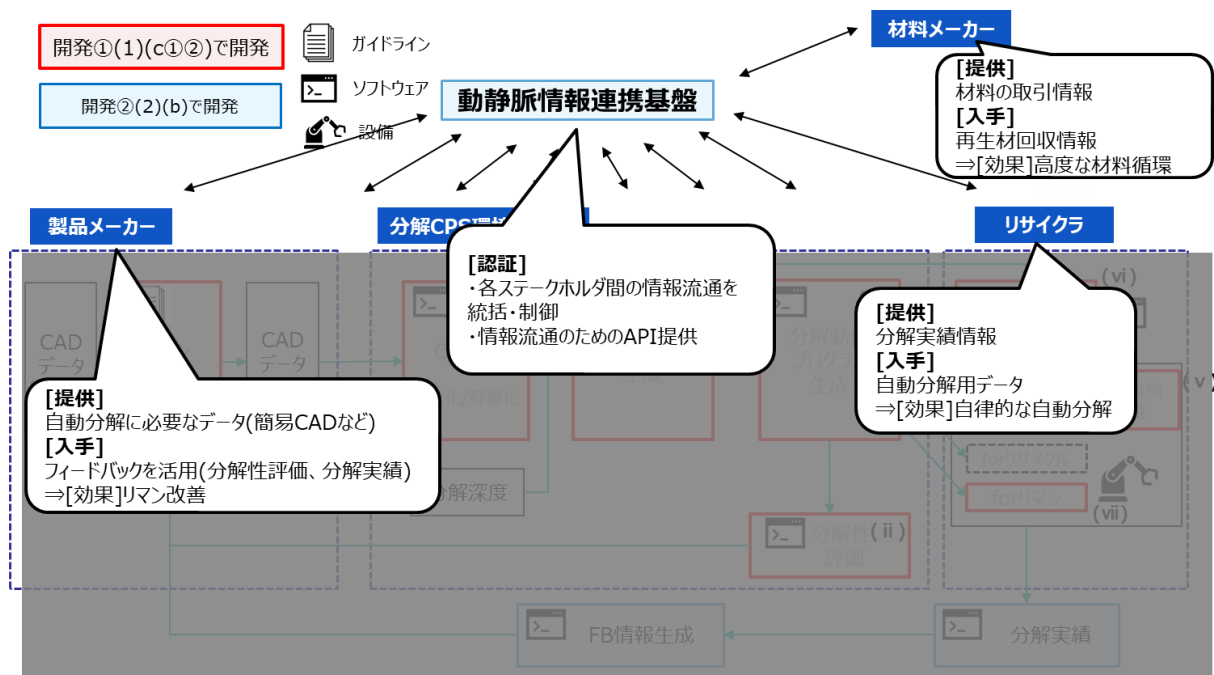


図 4-113 開発全体像(情報連携基盤フォーカス)

図中及び前述したコンセプトの通り、情報連携基盤を通した各ステークホルダの機能として以下を要件とする。

- 情報の授受

自律分解に必要なデータ、分解実績情報、再生材料(部品)の取引情報

- 適切な認証機能

各ステークホルダ間の情報流通を統括・制御、情報流通のための API 提供

以上を要件とし、プロトタイプを以下のように設計した。

- 情報連携システム

各ユーザーの認証およびユーザー間の情報授受のための中継的役割をもち、ユーザーが所有権を持つ各情報 について集約管理することはない。

- 簡易パッケージ

各ユーザーが情報の登録・情報のリクエストをするフロントエンドを含むシステム。

- アクセス認証マトリクス

情報区分とアクセス区分のマトリクスで、各ユーザーは情報を提供してもらいたいステークホルダに対して Read 権限を要請し、許可されれば情報連携システムを通して認証し、データ提供を受けることが可能となる。イメージを図 4-114 に示す。

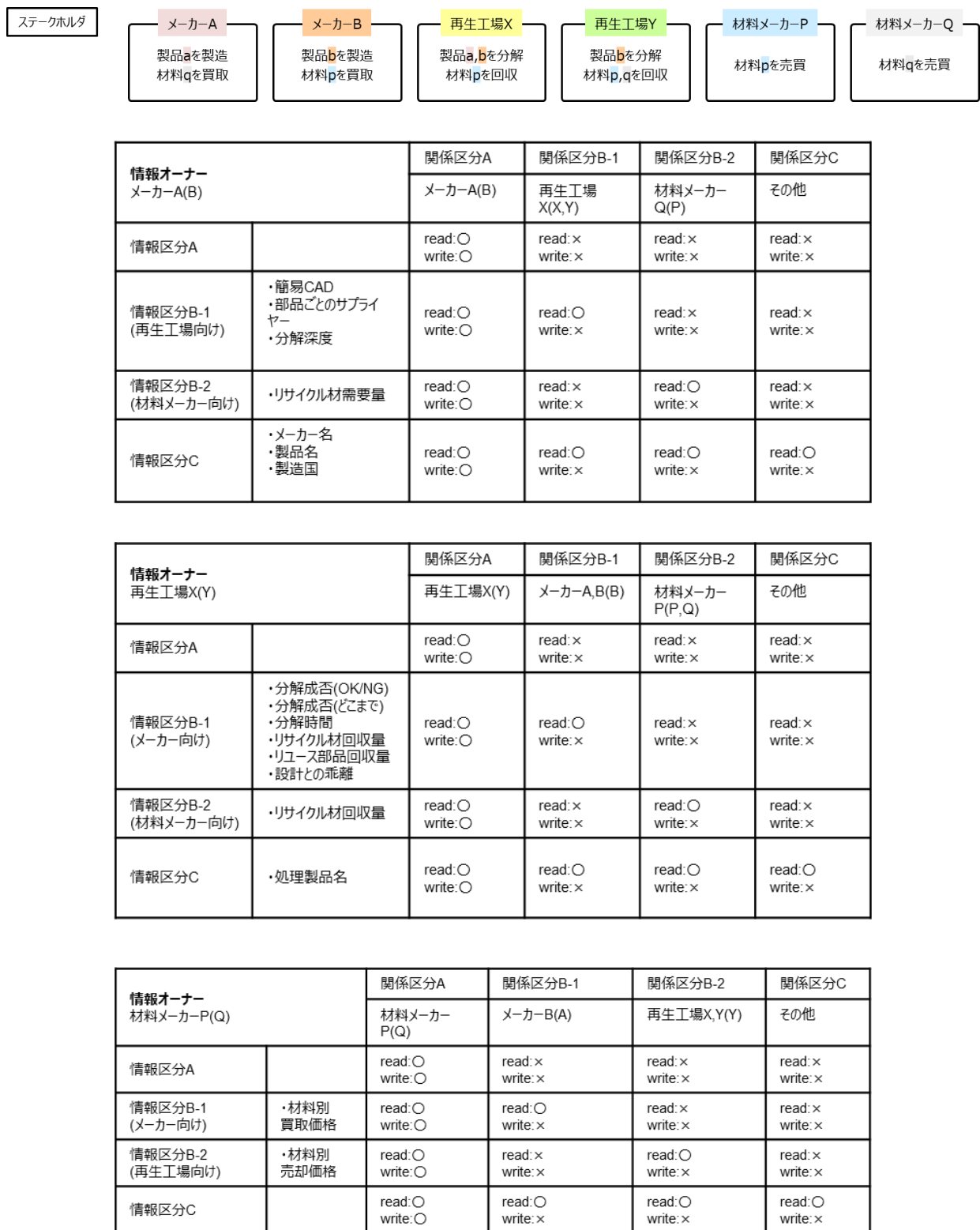


図 4-114 各ステークホルダとアクセス制御マトリクスイメージ

また流通させる情報についても DPP も参考にし、図 4-115 のように設定した。

データセット	大項目	データ名	データ形式	設定値
製品データセット				
DigitalNamePlate				
	メーカー名		文字列	
	製品種		文字列	
	製品型番		文字列	
	シリアルNo		文字列	
	製造国		文字列	
SubModel(SimpleCAD)				
	簡易CAD		CAD(中間)ファイル	
	分解深度		csv or xml	
		条件	文字列or数値	
		取り出し部品名	文字列	
	部品ごとのサプライヤー		csv or xml	
		部品名	文字列	
		サプライヤー名	文字列	
SubModel(DisassemblyResult)				
	分解深度		文字列	
	分解成否		bool	
	分解時間		時間	
	処理日時		時間	
	回収日時		時間	
	回収量		csv or xml	
		材料	文字列	
		重量	数値	
		部品	文字列	
		重量	数値	
	設計との乖離		csv or xml	
		乖離量		
			x	数値
		y	数値	
		z	数値	
再生品データセット				
DigitalNamePlate				
	材料名・部品名		文字列	
	品位		文字列・数値	
Submodel(TradeInformation)				
	需要情報		csv or xml	
		メーカー名	文字列	
		量	数値	
		品位	文字列・数値	
	獲得情報		csv or xml	
		再生工場名	文字列	
		量	数値	
		品位	文字列・数値	
	供給情報		csv or xml	
		材料メーカー名	文字列	
		量	数値	
		品位	文字列・数値	
		単価	数値	

図 4-115 情報連携基盤データセット検討

以上の設計から、プロトタイプを作製した。プロトタイプを用いて、要件となる情報の登録、参照リクエスト、ユーザー認証が正しく動作するか検証した(表 4-12)。

表 4-12 プロトタイプシステム動作検証結果

項目	詳細	判定
情報登録	製品情報の登録(メーカー想定)	○
	分解実績情報登録(再生工場想定)	○
	再生材情報登録(メーカー・再生工場・材料メーカー想定)	○
情報参照	製品情報参照(再生工場想定)	○
	分解実績情報参照(メーカー想定)	○
	再生材情報参照(メーカー・再生工場・材料メーカー想定)	○
ユーザー認証(ログイン)	正しくユーザーを認証するか	○
	参照権限のあるユーザーが参照可能か	○
	参照権限のないユーザーが参照不可能か	○

以上の結果から、要件としていた項目について、正しく動作するプロトタイプを製作した。

情報連携基盤システムに関して、ステークホルダ(7 社)へのヒアリング実施し、高品位な資源循環に関する期待値とともに、設計情報の機密性担保の必要性を確認した。またプロセス高度化に有用な情報群を定義完了した。以上を踏まえ、セキュリティを担保できるシステム要件を定義し、リマン有効性検証のためのプロトタイプの製作を完了した。また連携検証に向けた事前検証として各ステークホルダがセキュアに分解 DB にアクセスできることを確認完了。

以上、リマン対応自律分解システム、情報連携基盤システムの PoC に向けたプロトタイプ開発も完了しているため、25 年度はそれらの統合検証を実施する予定であり、目標は達成見込みである。

(b-2) 高度循環型システム技術に関わる社会実装シナリオの策定

本研究で開発する高度循環型システム構築に向けた各種の技術は、様々な小型家電製品を対象に、提供・分析・推定によって得た情報を最大限に利用し、自律制御によって高度なリサイクルやリマンを達成させるものである。その実現に必要な技術課題を克服するための基盤技術を開発し、研究終了後の実証を経て、早期社会導入を目指している。一方、技術を広く普及させ、社会に定着させるには、動脈産業・静脈産業間で技術や情報を共用・連携させる仕組みが必要となる。これには、多種多様な製品や多くのステークホルダが関わることから、短期から中長期に亘って、段階的にシステム基盤を構築していかなければならない。

本項目では、廃小型家電の回収実態や再生材需要のニーズを踏まえ、代表的な素材 2 つ以上のケースを対象に資源循環シナリオの評価手法を構築する。また、本研究で開発する技術群の段階的な社会導入を想定し、情報連携、資源循環プロセスの構築、評価指標などについて、対策や実施時期、主要課題等を含む社会実装シナリオを提示する。その上で、誰がいつ、何をどのように構築していくかについて、ステークホルダとの議論等を通じて社会実装シナリオを具体化し、アクションプランとしてとりまとめる。

<アプローチ>

(資源循環シナリオの評価手法)

廃小型家電の回収実態と再生材需要ニーズ、家電製品における材料構成などを踏まえた重要素材、資源循環の高度化の必要性という3つの観点から、資源循環シナリオの検討対象として代表的な素材2つ以上のケース候補を選定する。選定した代表素材をケースとして資源循環シナリオの評価手法の枠組みを作成する。評価手法の目的や使い方、資源循環シナリオの実現可能性などの評価の観点を検討した上で、資源循環シナリオの評価手法としての手順や評価項目、検討課題などを具体化し、評価手法の枠組み（案）を作成する。その枠組み（案）をベースに、各ステークホルダーから意見収集等を実施し、資源循環シナリオの評価手法に関する基本設計を取りまとめる。

(ケーススタディ)

上記の資源循環シナリオの評価手法について有効性や課題を抽出するために、本事業での開発技術に関わるビジネスモデルを想定し、シナリオ評価手法の検証を行う。開発技術としては、大きくリサイクル関連技術とリマン技術があるため、リサイクルとリマンの大きく2つのビジネスモデルについて策定する。ビジネスモデルを検討する上で、実製品を参考にしつつも、スキームやビジネス自体は想像上のモデルであり、事業化を保証したものではない。まずは、情報収集のしやすさの観点から、リマンについてのビジネスモデルを検討する。

<取組結果>

素材選定

まず、資源循環シナリオの評価手法の構築のケースとなる代表的な素材の選定をおこなった。小型家電に含まれる素材としては、ベースメタル、貴金属、レアメタル、プラスチックが挙げられる。これらについて、資源循環における素材の供給、資源回収、需要という3つの観点から評価対象としての代表性を検討した（図4-116）。ベースメタルおよびプラスチックは多くの家電製品で使用されており、また現状では異種材料が混ざった低品位の再生原料として回収されていることから、リサイクル・リマン技術の資源循環に対する効果が大きいと考えられた。一方で貴金属やレアメタルは、使用されている製品の種類や製品中の含有量が少ない点がシナリオ評価での障害となることが懸念された。以上から、評価手法構築の優先度が高い素材としてベースメタルおよびプラスチックを候補とした。

	供 給	資源回収	需 要	対象（選定結果）
ベースメタル （鉄、アルミ、銅）	家電製品から回収が期待できる量は他の製品に比べて大きくない（銅除く）	高度化の余地はあるものの、現時点で破碎・選別によるカスケードリサイクルが確保されている（銅除く）	ベースメタルは、求められる素材機能をもつ材料としての需要があり、今後も需要は継続する	ベースメタル リサイクル・リマン技術によって、高純度で取り出せると、水平リサイクルの可能性が高まる
貴金属 （金、銀、Pd）	電子基板などに使用されており、カメラなどの特定製品には多く含まれている	高価な資源であり、電子基板などからのリサイクルが実施されている	部品の使用材料としての需要は確実にあり、一定以上の需要は期待される	—
レアメタル （貴金属を除く）	家電製品中の賦存量の多いものとして、イットリウム、コバルトがあるが、特定製品にしか入っていないものが多い	製品中の含有量が少ないため、相当量の廃製品を集約しなければ事業化は困難	様々な家電製品に使用されるバッテリーが増大しており、今後も使用量の拡大が見込まれる	—
プラスチック	廃プラスチック（容器包装除く）の約10%を廃家電が占める	多種類の樹脂が混ざった状態になることから、大半がサーマル・リサイクルされている	樹脂は、筐体をはじめ、様々な用途で製品素材として使われており、今後も需要は継続する	プラスチック リマン技術によって純度100%で取り出せると、マテリアル・リサイクルの可能性が高まる

図 4-116 資源循環シナリオ評価の対象素材の検討

さらに、ベースメタルのなかでの対象を検討するため、小型家電に含まれる構造材料としてのアルミニウム、鉄、銅の回収状況を分析した。分析では、小型家電 43 品目の国内廃棄台数を過去の生産統計に基づいて推計し、品目ごとの金属含有量を乗じることで廃製品に含まれるベースメタルの量を推計するとともに、この値を環境省が報告するベースメタル回収量の実績値と比較することで回収率を推定した。2020 年の回収率は鉄と銅が約 15%であったのに対してアルミニウムは 33%と推計され、小型家電リサイクル法制定後の向上が顕著であった。また、高度循環型システム技術等の導入により全量循環利用できれば、小型家電向けアルミニウム需要の 90%以上を自給可能と推計された。アルミニウムは異なる合金種が製品に使用されることも多く、それらは回収時に分離されずカスケードリサイクルされているのが現状であり、リサイクル・リマン技術の社会実装の効果が大きいと考えられる。これらの検討結果に基づき、本研究ではアルミニウムとプラスチックをシナリオ評価手法構築の対象素材として選定した。

シナリオ評価

廃小型家電は、リサイクル法のもとで市町村回収や直接回収が段階的に拡大されるなかで、廃小型家電のリサイクル量は着実に増えてきている。しかしながら、小型家電には、多岐にわたる製品メーカーによって製造された多種多様な製品群が含まれるため、資源循環における量的あるいは質的な向上は容易ではない。このため、高度処理技術の開発が NEDO プロジェクト等を通じて取り組まれているが、廃小型家電に特有な事情を踏まえ、技術開発に加えて、仕組みづくりなどを含めた総合的な視点で事業計画を検討することが重要である。高度処理技術（資源循環シナリオ）の社会実装に向けて、事業計画の自己評価と見直しを行って、実現性の高い事業化を目指すことが課題となる。

そこで、以下を目的として資源循環シナリオの評価手法を構築する。

廃小型家電における新たな資源循環シナリオとして「高度処理事業」を想定し、当該事業の自己評価による課題抽出や改善検討に活用することによって資源循環シナリオの実現可能性、導入効果を向上させること

以下では、これまでに検討・作成してきた評価手法の枠組み（案）を報告する。

①評価手法の全体像（枠組み）

評価対象とする資源循環シナリオについて、事業構想の前提条件を踏まえてマテリアルフローを明確化し、定量・定性評価を通じて改善点を抽出する手順を次の図 4-117 のように整理した。

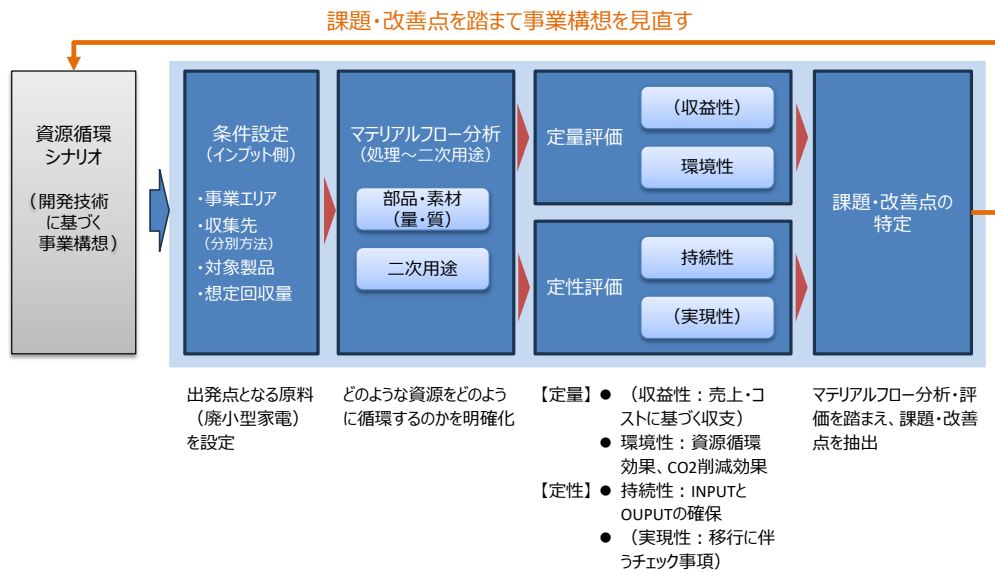


図 4-117 資源循環シナリオ評価手法の全体像（枠組み）

定量評価では、マテリアルフローに基づく「収益性」と「環境性」の観点で分析・評価し、定性面では、事業構想・マテリアルフローにおける「持続性」と「（必要に応じて）実現性」の観点で自己チェックを行う。

②評価の対象・範囲

本評価手法では、「高度処理技術を活用した中間処理事業」を評価対象とし、加えて、CO2 排出削減や資源循環に関する環境評価、事業の持続性や実現性に関する定性評価では、INPUT 側（調達）と OUTPUT 側（リユース・リサイクル）を評価範囲に含める。なお、INPUT 側の引取り（回収）、OUTPUT 側の再生処理・二次利用の事業は、中間処理事業の範囲外であって多種多様な事業モデルが想定されることから、本評価の対象外とした(図 4-118)。

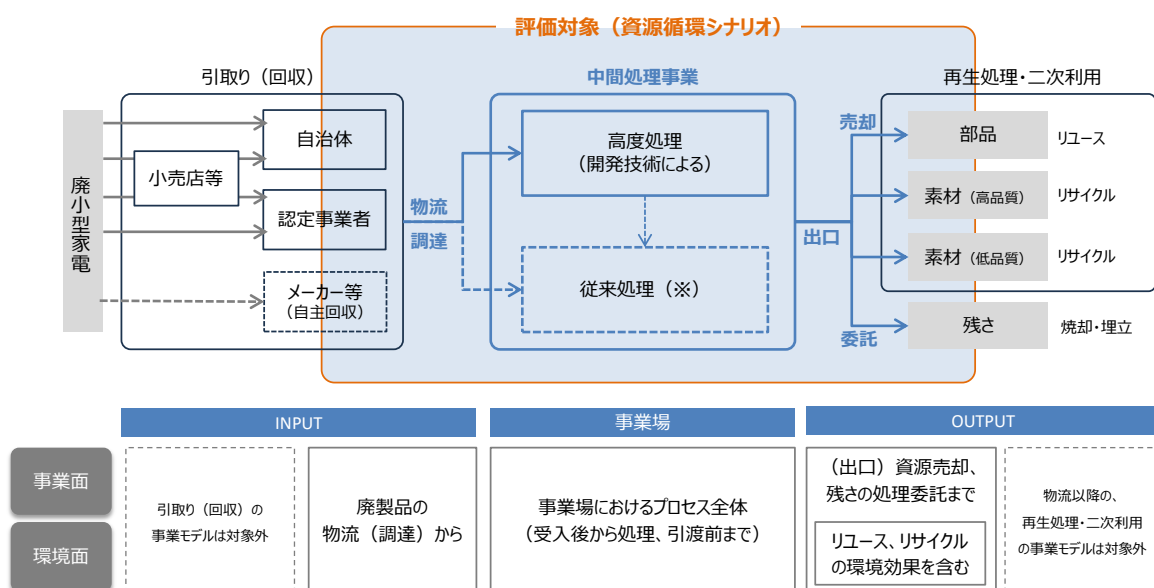


図 4-118 資源循環シナリオ評価の対象・範囲

③評価手法の概要

・マテリアルフロー分析

対象範囲となるエリア・回収ルートを踏まえて、製品別の資源循環ポテンシャルを設定する。具体的には、1年間を想定し、調達される製品別回収量と、各製品の素材・部品の構成割合をもとに、処理対象に含まれる素材重量（INPUT）を算出する。また、高度処理プロセスを通じて、プロセス内で消費される資源量（エネルギー等）と処理後のアウトプットを分析し、素材・部品別の重量を算出する。

・収益性（定量評価）

事業収益については、処理プロセスや各種事情を踏まえる必要があるため、具体的な分析方法は設定せず、参考として算出項目や留意事項などを整理した。

・環境性：資源循環効果（定量評価）

資源循環効果として、従来处理から高度処理へのレベルアップ（前後比較）による指標タイプを3つ設定した。

－資源循環の「増加量」と「増加比率」

－事業全体での「資源循環率※の上昇分」

※（資源循環量）／（処理・処分を含むアウトプット総量）

・環境性：CO2 排出削減効果（定量評価）

従来处理と高度処理のそれぞれで、「処理プロセスに伴う CO2 排出量」と「リユース・リサイクルによる CO2 削減量」の差し引きから「CO2 実質排出量」を計算し、それらの差分を CO2 排出削減効果として算出する。なお、排出量や削減量の計算は（物量）×（原単位）を基本とするが、詳細な計算方法は任意とする。

・持続性（定性評価）

事業課題と社会課題の観点を踏まえ、事業の持続性に関する評価項目を10個設定し、それぞれの評価ポイントを示した。

（調達）－調達量の安定性の確保

－調達品質の安定性、安全性の確保

（処理）－危険物、処理困難物への安全対策

－処理データ・ノウハウの蓄積・活用

（売却）－売却先（二次用途）の安定確保

－売却先への安定供給の対応

（データ活用）－処理プロセスの省人化・効率化

－サプライチェーン連携

（地域貢献）－地域再生・雇用創出

－地元の自治体、企業等との協力関係

・実現性（定性評価）

高度処理事業の構想によっては、処理対象とする廃製品を特定する（絞る）ケースが想定され、処理対象外となる廃製品は従来处理をあわせて行う必要がある。このため、参考として同ケースを想定した際の留意事項を整理した（図 4-119）。

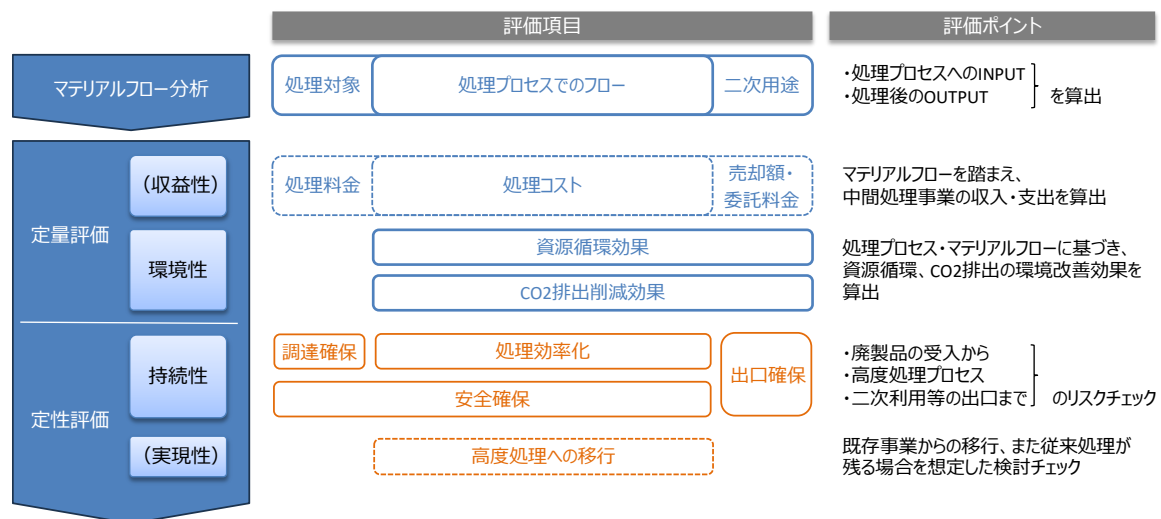


図 4-119 資源循環シナリオ評価手法の概要

ケーススタディ

今回のケーススタディでは、本研究で開発する技術群の内、分解技術に着目し、専用分解工場での廃製品からの部品取り事業の検討を実施した。

・ 条件設定

具体的に検討するに当たり、事業状況を踏まえて、以下の通りに設定した。また、シナリオの評価範囲を図 4-120 のように整理した。

【事業概要】

自社回収された調理家電の部品取り事業を想定。回収製品から消耗が激しい部品を取り出し、筐体を含む残った部品は再生製品用に部品リユースとして売却しつつ、取り出した部品は素材リサイクル用に売却。

【事業エリア】 日本国内の飲食チェーン

【収集先】 サブスクによる自社回収

【対象製品】 調理家電

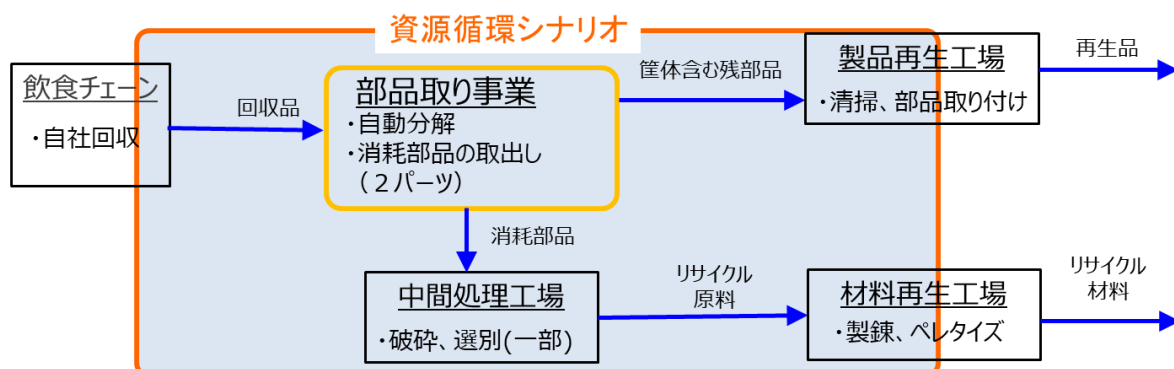


図 4-120 部品取り事業の評価範囲

・マテリアルフロー分析

実製品のマテリアルバランスを調査してインフローを整理しつつ、処理後の部品リユースやリサイクルを想定・調査を実施した。その結果としてのマテリアルフローを以下の図 4-121 のように整理した。

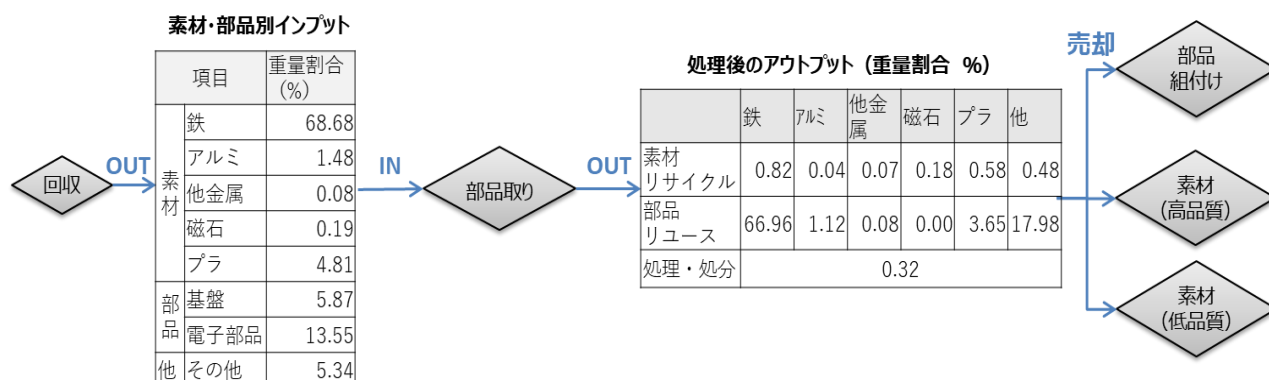


図 4-121 部品取り事業のマテリアルフロー

・収益性評価 (定量評価)

製品価格を参考にしつつ、部品取り事業のコストと収入について算出した。結果を以下の図 4-122 に記載する。自動分解システムを導入した場合でも、黒字事業の見込みである。ただし、回収・運送費がコスト全体の約 3 割を占めており、部品取り作業費だけでなく、輸送効率についても重要である結果となった。

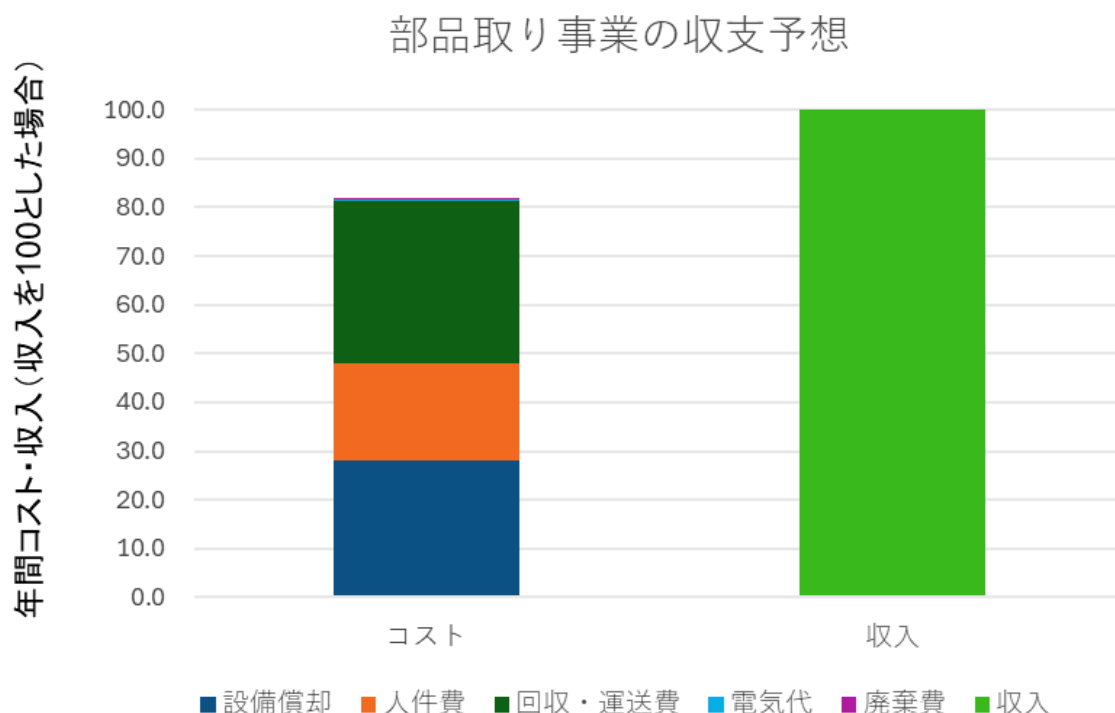


図 4-122 部品取り事業の収支予想

・環境性：資源循環効果、CO₂ 排出削減効果 (定量評価)

環境性評価を実施するために、比較対象として、部品取り事業を実施せずに、全数リサイクルした場合を想定した。まず、資源循環効果として、マテリアルフローを比較することで、表 4-13 のように効果を定量評価した。部品リユースと資源循環全体での比率は増加したが、素材リサイ

クルに回す量は減少している。また、アルミとプラに着目しても、資源循環効果があることを明確化した(表 4-14)。

表 4-13 部品取り事業の資源循環効果（資源投入量を 100 とした）

		本事業	比較用	増量	比率アップ(%)
資源循環	部品リユース	89.78	0	非公開	89.78
	素材リサイクル	2.17	84.77		-82.60
	資源循環	91.95	84.77		7.18

表 4-14 部品取り事業のアルミとプラの資源循環効果

		本事業	比率	増量	比率アップ(%)
アルミ (アルミ投入量を 100 とした)	部品リユース	75.45	0	非公開	75.45
	素材リサイクル	2.51	70.16		-67.65
	資源循環	77.96	70.16		7.80
プラ (プラ投入量を 100 とした)	部品リユース	75.80	0.00		75.80
	素材リサイクル	12.10	0.00		12.10
	資源循環	87.90	0.00		87.90

また、CO₂ 排出削減効果についても、本事業と比較用での CO₂ 排出量を算出し、差分から CO₂ 削減量を明確化した(図 4-123)。

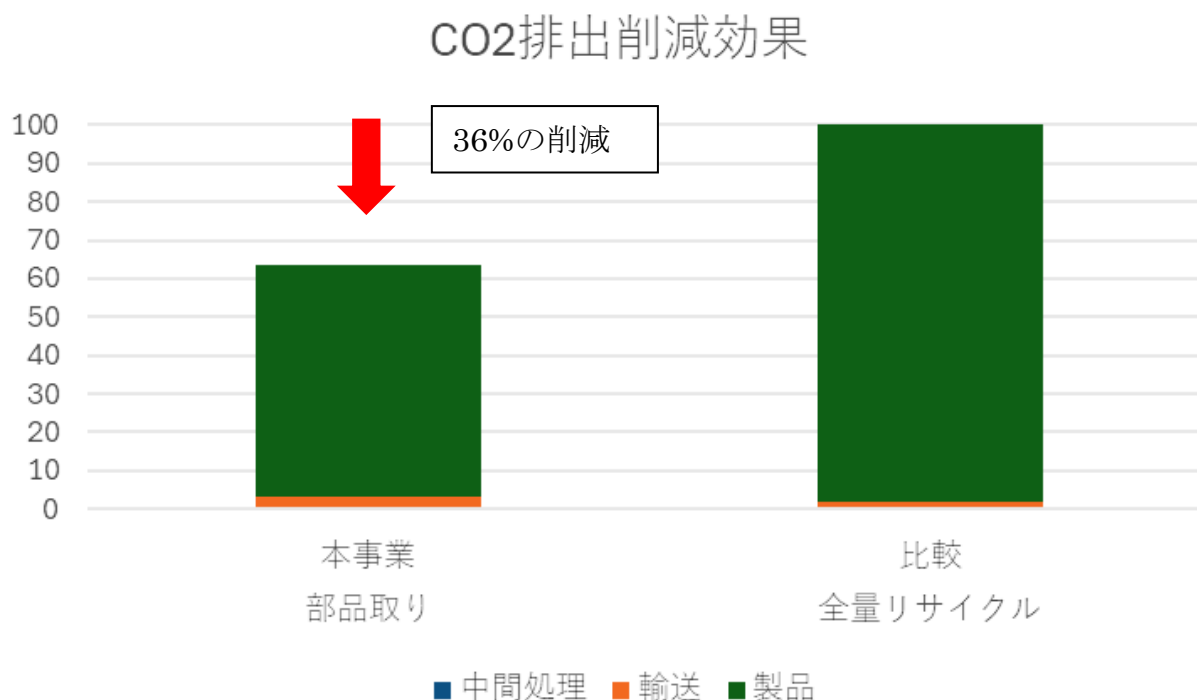


図 4-123 部品取り事業の CO₂ 排出削減効果

・持続性、実現性（定性評価）

想定したビジネスモデルを基に、事業の持続性と実現性をフォーマットに則り、評価を実施した。その結果を以下の図 4-124 に示す。

		#	チェックすべき項目（定性）	判断ポイント	重要度	劣 1 → 5 優	
処理工程	受入	①-1	調達量の安定性の確保	再生品需要に応えるために必要な量を確保できる受入元の協業相手を有しているか？	☆	4	調達量の安定性の確保
		①-2	調達物の品質の安定性の確保	再生処理をしやすい高品質な使用済み家電を調達できているか？	○	5	故障前の製品を確保 & DfCE
	処理	②-1	処理困難物の適正処理実施	Libや重金属等の処理を適正に行っているか？	○	5	製品特性を把握した上で処理
		②-2	処理困難物処理時の安全性確保	安全性確保の措置を行っているか？	☆	4	分解箇所を限定
		③-1	高度処理への移行に当たっての効率性確保	従来処理の設備・既存インフラを可能な限り使用できているか？	○	4	既に一部で実施済み
	売却	④-1	国内での売却量の安定性の確保	十分な量を販売できる売却元の協業相手を有しているか？	☆	5	リース契約で確保
		④-2	国外への輸出ルートの確保	海外への輸出ルートを確保できているか？ 新規顧客開拓の見込みはあるか？	☆	1	国外は対象外
処理工程全体	⑤-1		工程の省人化	工程の効率化、DXによって人員を削減できているか？	○	4	分解CPSを導入予定
	⑤-2		暗黙知の蓄積	標準化・AIを活用した技術を利用して誰でも扱えるようにできているか？	△	4	分解CPSを導入予定
	⑥-1		地域コミュニティの再生や雇用の創出	地方での雇用を行っているか？	△	4	地元住民を雇用予定
	⑥-2		地方公共団体、NPO/NGOとの協力体制	地域における協力団体はあるか？	△	-	-

10

図 4-124 部品取り事業の持続性、実現性評価

廃小型家電の回収実態と再生材需要ニーズ等を踏まえて代表的な素材として、アルミと樹脂を選定し、資源循環シナリオの評価手法の枠組み（案）を作成した。また事業・環境評価に向けて3商品の事業シナリオ検討を完了した。2025年度には、ステークホルダからの意見収集、実施者との議論などを通じて、資源循環シナリオの評価手法の基本設計を完成できる見込みである。

添付資料

●プロジェクト基本計画

「高度循環型システム構築に向けた廃電気・電子機器処理プロセス基盤技術開発」
基本計画

サーキュラーエコノミー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

①政策的な重要性

世界経済の成長に伴う国際的な資源需要の増加や、地球温暖化をはじめとする環境問題の深刻化を背景として、線形経済から循環経済への転換が求められている。我が国では、環境活動としての 3R の取り組みを最大化するため、経済産業省が 1999 年に「循環経済ビジョン」を策定したが、上述のように資源循環は環境活動としてではなく循環経済という経済活動として捉える必要があることから、新たに「循環経済ビジョン 2020」を 2020 年 5 月に策定している。この中で、動脈産業には産業廃棄物の排出者としての役割（排出者責任）に加え、リサイクルまで含めた循環システム構築の役割を、静脈産業にはあらゆる使用済製品を可能な限り高度な素材として再生し動脈産業に供給する「リソーシング産業」としての役割を担うことを期待している。また、再生材の利用拡大には、動静脈のコミュニケーションの円滑化が重要であるとしている。

さらに、静脈産業は依然として労働集約的な側面が残っているため、将来的な人口減少を踏まえれば自動化プロセスへの転換は不可欠であり、効率的なリサイクルに向けた回収・解体・分別技術の高度化も重要であるとしている。

動脈産業：資源を採取・加工し、製品を製造・流通・販売する産業

静脈産業：生産・消費活動から排出・廃棄される廃棄物を回収・処理する産業

②我が国の状況

我が国は資源を海外に依存しているため、資源自律経済の確立という点でも、廃製品の確実な再利用を前提とする循環経済への移行が必須となる。NEDO「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業」（2017～2022 年度）において、資源価値の高い小型家電の廃製品（スマートフォン、携帯電話およびデジタルカメラ）から、貴金属、銅およびレアメタルを低コストで高効率に再生する革新的技術の開発に取り組み、個体認識・解体・選別プロセスを無人化する製品自動選別システムにおいて、人手による解体・選別プロセスの 10 倍以上の処理速度を、また、廃製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において、廃部品の分離効率 80%以上を実現し、ベンチスケールシステムを完成させた。

③世界の取組状況

環境配慮への要請や SDGs 策定を背景に、循環経済に転換する政策を打ち出す国が増えている。特に、EU は、EU 域外の資源産出国に天然資源の供給を依存する代わりに、EU 域内で完結する資源循環社会の構築を目指している。2020 年 3 月には、「新循環経済行動計画」を公表し、循環経済の政策実現に向け、製品をより循環的なものとするため、冷蔵庫、洗濯機、食洗機などエネルギー

ギーを使用する「エネルギー関連製品」からエネルギー関連製品以外の幅広い製品に、「エコデザイン」の枠組みを適用できるようにして、循環経済の実現を目指している。中国は、廃棄物輸入規制を含めた環境関連の取組を急速に進めており、2025 年までに電気電子機器廃棄物のリサイクル率を 50%に、再生材の使用率を 20%とすることを目標として掲げている。また、ISO において、循環経済分野の標準化について、2018 年 9 月に ISO/TC323 の設置が決定し、検討が進められている。

④本事業のねらい

本事業では、多様な廃家電製品を対象に、貴金属・銅、レアメタル、ベースメタル、プラスチック等の資源を余すことなく循環利用が可能となる基盤技術を確立することで、経済活動と環境負荷低減を両立した循環経済関連産業の創出・成長促進を目指す。

(2) 研究開発の目標

①アウトプット目標（最終目標、中間目標）

2022 年度までに実施したプロジェクトでは、廃製品の対象をスマートフォン、携帯電話、デジタルカメラを対象に、ベンチスケールの無人化製品自動選別システム、廃部品自動選別システムの開発に取り組んだ。また、製品の情報技術等を有効活用する要素技術の開発に取り組んだ。

本プロジェクトでは、我が国全体における循環経済への移行を推進するための資源循環技術の基盤開発として、廃製品の対象を既存のシステムでリサイクルが不十分な小型家電全般に拡張し、有価性の高い部品や貴金属やレアメタルのみならず、プラスチック、鉄、軽金属も含め対象素材を拡大する。金属からプラスチックに至る素材が最大限に二次利用され、サーキュラリティの最大化、資源に係る経済安全保障の向上および大幅な CO₂削減を実現する資源循環システム確立のための基盤技術構築に向けて、研究開発項目に掲げる技術開発を組み合わせ、以下を達成する。

【中間目標（2025 年度）】

研究開発項目①「資源循環性高度化プロセス技術開発」

(1) 製品解体システム開発

解体すべき廃製品のうち、廃製品 3 品種に対して、複数想定される解体手法の判断において正答率 7 割を達成する。自律的な解体システムについて、限られた情報から解体動作を再現するための要素技術を確立し、解体手法毎に生産性（処理速度、正確さ・精度等）のベンチマークとなる比較対象を特定する。

(2) 再生材多様化に向けた革新的選別システムの開発

破砕物を対象にした選別装置の制御技術について、選別条件を提示可能な仮想環境を構築する。これらを実現する選別装置の最適化について、1t/日級の選別装置群を備えた選別システムを導入する。

研究開発項目②「情報連携システム開発」

(1) データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発

解体・選別等の処理プロセスの要素データと要求水準を設定し、製品 3 品種に対してデータセットの完成例を示す。要素データの取得について、従来に対して 1/10 以下の時間でデー

タ取得が可能な分析・計測システムの手法を示す。また、資源循環性のデータベース上の評価指標候補について、各指標の試算手法を含め整理する。

(2) 再生材流通高度化に向けた基盤技術開発

小型家電の回収実態と再生材需要のニーズを把握し、再生材の安定供給に向け目指すべき供給水準を整理する。資源循環シナリオにおいて、回収、供給、需要の3種類の拠点による最適化が可能な評価手法の基本設計を完了する。この際、リサイクル工場のモデルプラントの連続試験に向け、再生材原料の供給性能モニタリングが可能となる情報連携機能を整備する。

【最終目標（2027年度）】

研究開発項目①「資源循環性高度化プロセス技術開発」

(1) 製品解体システム開発

解体すべき廃製品のうち、廃製品6品種に対して、複数想定される解体手法の判断において正答率9割を達成する。自律的な解体システムについて、限られた情報から解体動作を再現する一連の解体システムを導入し、廃製品3品種以上に対する生産性の評価により、ベンチマークに対して同等以上の性能を達成する。

(2) 再生材多様化に向けた革新的選別システム開発

多種の素材（貴金属、銅、レアメタル、アルミ、鉄、プラスチック等）が混合した破砕物を対象に、仮想的環境から試算される理論的な選別限界に対して8割の性能値を1t/日級の自動制御選別システムで達成する。また、現状の処理工場で導入可能となる実用化スケール（10t/日級）の設計仕様を提示する。

研究開発項目②「情報連携システム開発」

(1) データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発

要素データの取得について、従来に対して1/10以下の時間でデータ取得が可能となる一連の分析装置システムを確立し、製品3品種を例にデータセットを作成する。資源循環性のデータベースについて、評価観点となる項目を3つ以上設定し、各指標に対する解析手法を確立する。

(2) 再生材流通高度化に向けた基盤技術開発

国内の小型家電の回収実態と再生材需要と連動したマテリアルフローの可視化に向け、代表的な素材2つ以上のケースを対象に資源循環シナリオの評価手法を構築する。この際、提供するリサイクル工場の標準データについて、小型家電の回収実態に応じた連続試験（1日当たりの操業時間を目安）が可能なモデルプラントを整備し、再生材原料の出荷能力の検証を実施する。また、リサイクル工場における最適運転・運用等が流通に及ぼす影響や経済性評価によるモデルプラントの社会実装モデルを提示する。

②アウトカム目標

本プロジェクトにおける成果を基にした再生材取得プロセスの高効率化による再生材利用率の向上、これによる新規素材使用の回避等の効果により、2035年におけるCO₂削減貢献として226万

t/年を目指す。また、本プロジェクトで得られる各種装置もしくはシステム等の成果の実用化により、2035 年における国内外の循環経済関連市場で、10%以上の新規シェア獲得により、0.9 兆円以上/年規模の貢献を目指す。

③アウトカム目標達成に向けての取組

設定したアウトカム目標（2035 年度に CO₂削減量：226 万 t/年、市場創生効果：0.9 兆円以上）の達成に向け、システム開発とデータ取得から得られる成果の連携を図ることで、廃小型家電製品の対象を拡大し、再生材の供給ポテンシャル増大へ貢献する。また、得られた成果を早期社会実装と普及に結び付けるため、事業期間内からも成果の担い手に対するセミナー等の情報発信を実施する。

（3）研究開発の内容

近年の循環経済の考え方においては、従来のリサイクルに留まらず、リユース、リマニュファクチャリング等の多様な資源循環ルートへの対応もしくは多様な素材の水平リサイクル促進による再生材利用の製品作りなど、以前より一段上の取り組みが求められる状況にある。本事業は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤技術開発」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。

目標達成に向け、以下の研究開発項目について、別紙 1 の研究開発計画および別紙 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。

研究開発項目①「資源循環性高度化プロセス技術開発」

廃家電製品の多様な資源循環ルートへの対応に貢献する技術として、廃製品の（1）製品解体システム開発および（2）再生材多様化に向けた革新的選別システム開発を実施する。

研究開発項目②「情報連携システム開発」

再生材流通の基盤技術確立に向け、製品処理プロセスを含めた総合的な情報連携による循環性の向上を目指し（1）データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発および（2）再生材流通高度化に向けた基盤技術開発を実施する。

2. 研究開発の実施方式

（1）研究開発の実施体制

プロジェクトマネージャー（以下「PMgr」という。）（候補）にNEDO 環境部 今西大介を指名する。PMgr は、事業の成果・効果を最大化させるため、実務責任者として担当事業全体の進行を計画・管理し、事業遂行にかかる業務を統括する。

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、企業や大学等の研究機関等（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はプロジェクトリーダー（以下「PL」という。）を委嘱する。PLは、PMgrの指示の下、プロジェクトに参画する実施者の研究開発を主導する。

（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

PMgrは、PLおよび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、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

② 技術分野における動向の把握・分析

PMgr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、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

2023年度から2027年度までの5年間とする。

４．評価に関する事項

NEDOは技術評価実施規程に基づき、技術的およ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2025年度、事後評価を2028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およ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

本プロジェクトは、「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。

⑤データマネジメントに係る運用

本プロジェクトは、「NEDOプロジェクトにおけるデータマネジメント基本方針（委託者指定データを指定しない場合）」を適用する。

（2）「プロジェクト基本計画」の見直し

PMgrは、当該研究開発の進捗状況およびその評価結果、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

本プロジェクトは、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号ニおよび第9号に基づき実施する。

（4）その他

本事業は、交付金インセンティブ制度を活用することとする。当該事業における具体的運用等は、公募を経て採択された実施者に提示する。

6. 基本計画の改訂履歴

2023年3月、制定

(別紙1) 研究開発計画

研究開発項目①「資源循環性高度化プロセス技術開発」

(1) 製品解体システム開発

1. 研究開発の必要性

廃製品の再資源化の推進に向け、製品、部品、素材単位と、各段階での高効率な回収には、廃製品の処理工程の初期段階で可能な限り無秩序な混合状態を抑制することが重要であり、初期段階での処理に相当する解体技術が資源循環ルートの多様化への鍵となる。

現状、家電4品目に対応した国内のリサイクルプラントでの解体作業においては、ネジを外すといった工程等が部分的に機械化されているものの、手作業の占める割合が多く、省人化への期待が大きい。また、廃小型家電のリサイクル処理における処理現場では、一般的に解体工程を介さず破砕機へ投入されるが、破砕処理前の解体工程導入が再資源化率の向上に貢献することが知られている。現状、廃製品解体装置の開発事例も存在するものの、対応可能な製品が限定的であり、再資源化率の拡大に向けた対応としては、多種多様な製品や構造ならびに変形等の廃棄物特有の多様性に対応した解体技術が求められる。

2. 具体的研究内容

本項目では、廃製品性状に応じた資源循環の多様化に貢献すべく、多品目の廃製品の受け入れが可能となる解体技術の開発を実施する。

廃製品投入時点での性状識別において、部品再利用等の繊細な扱いを要する精密な解体のみならず、リサイクルにおける破砕処理等を視野に、選別効果を最大化する適切な解体手法を判断するための技術開発を実施する。加えて、廃製品毎の性状の多様性に起因し、製品情報からの単純なパターンマッチングが困難なケースも想定されるため、解体の実施においては限られた情報から解体動作を再現することが可能な自律的な解体システムを開発する。この際、製品・機種の変動や製造年代毎で生じる設計・構造変化といった製品の多様性に加え、廃製品毎の性状の多様性として変形や汚れや複数製品の混在状態からの前処理対応を考慮するとともに、再資源化可能な部品・素材の取り出し、バッテリー等の安全面の観点を考慮した解体システム開発を実施する。

3. 達成目標

中間目標 (2025 年度)

解体すべき廃製品のうち、廃製品3品種に対して、複数想定される解体手法の判断において正答率7割を達成する。自律的な解体システムについて、限られた情報から解体動作を再現するための要素技術を確立し、解体手法毎に生産性(処理速度、正確さ・精度等)のベンチマークとなる比較対象を特定する。

最終目標 (2027 年度)

解体すべき廃製品のうち、廃製品6品種に対して、複数想定される解体手法の判断において正答率9割を達成する。自律的な解体システムについて、限られた情報から解体動作を再現する一連の解体システムを導入し、廃製品3品種以上に対する生産性の評価により、ベンチマークに対して同等以上の性能を達成する。

（２）再生材多様化に向けた革新的選別システム開発

１．研究開発の必要性

前述の循環処理工程の起点となる技術開発に対し、本項目では、廃製品解体後の選別工程の高度化に着目するものである。

リサイクルのための選別工程に用いられる破碎・選別装置は、他産業向けの装置を転用し、現場の経験則から得られた条件での制御が主流であり、リサイクル選別に特化した科学的知見が十分に生かされていない。また、処理工場での選別工程は一般的に大量処理を前提として設計され、複数の装置群の組み合わせで再生材が生産されるが、装置の組み合わせ、使用順序等のレイアウトの柔軟性の付与が難しい状況にある。

先行事業においては、対象とする廃小型家電をモバイル機器と有価性の高い金属（貴金属、レアメタル等）を含む構成部品に限定するなど前提条件を設けていた。一方で、本事業では対象とする廃小型家電の品目を拡大し、回収対象も部品類のみならず、破碎物も対象に含めた多種多様な素材（貴金属、銅、レアメタルのみならずアルミ、鉄、プラスチック等）となるため、これらの製品・素材の効率的な再資源化に適した選別装置の選択、使用順序、各装置の運転制御の条件設定の最適化が必要となる。小型家電製品を対象にあらゆる素材を余すことなく高度に再資源化する場合、選別工程が大規模化する恐れ等、既存のリサイクル工場での対応が困難であることが想定されるため、新規の制御機能とその運用が可能な選別装置の開発・整備が必要不可欠である。

２．具体的研究内容

本項目では、廃小型家電製品から価値の高い素材の選別・回収のみに限定せず、破碎物を主体に、多様な再生素材を高効率に回収可能とする選別装置システムの開発に取り組む。

選別システムの開発について、少量多種の廃小型家電製品由来の素材毎の固有の物理化学的性質に対し、破碎物のサイズ・形状等、廃棄物特有の性質を考慮したパラメータを設定し、選別性能をシミュレーション等で出力できる仮想的な環境構築に取り組む。

また、これらを反映した選別装置設計を基に、多種多様な廃小型家電製品および高品位な再生素材の需要等に対応可能となる選別装置の組み合わせや使用順序等の最適化により、これまでにない柔軟性を発揮する革新的な選別装置（もしくは装置群）の開発を実施する。

３．達成目標

中間目標（2025 年度）

破碎物を対象にした選別装置の制御技術について、選別条件を提示可能な仮想環境を構築する。これらを実現する選別装置の最適化について、1t/日級の選別装置群を備えた選別システムを導入する。

最終目標（2027 年度）

多種の素材（貴金属、銅、レアメタル、アルミ、鉄、プラスチック等）が混合した破碎物を対象に、仮想的環境から試算される理論的な選別限界に対して 8 割の性能値を 1t/日級の自動制御選別システムで達成する。また、現状の処理工場で導入可能となる実用化スケール（10t/日級）の設計仕様を提示する。

研究開発項目②「情報連携システム開発」

(1) データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発

1. 研究開発の必要性

欧州における製品の持続可能性（製品の耐久性、再利用性、修正可能性、カーボンフットプリント等）を証明する情報を電子的に把握する「Digital product passport」の概念が打ち出されて以降、我が国では資源循環を実現するための製品情報やその情報管理手法ならびに ISO/TC323 の国際標準化についての動向が注視される状況にある。

我が国のこれまでの技術開発においては製品の情報管理ではなく、動静脈産業間での情報連携の考えに根差し、処理プロセスの高度化を目的とした製品の仕様情報の取得が検討されてきた。ただし、処理プロセスの高度化に向けた製品情報のデータ取得は、動脈産業側からの提供が難しく、必要なデータセットの構築には人海戦術的な手法に依存する部分が多い。本事業では特に、更新頻度の高い小型家電品目を対象とすることによるデータ収集の負担・コストの増大が想定されるため、これらの課題対処が不可欠といえる。

2. 具体的研究内容

本項目では、処理プロセス高度化を念頭にしたデータセットの構築手法の開発とそれを基にした資源循環性に係るデータベースについて検討する。

データセット構築に向け、動静脈産業の双方向の情報を兼ね備えることを念頭に、要素データ（カタログ・規格値、標準物性・組成、もしくはそれを基に加工を要するデータ等）を定義する。要素データの水準に対し、継続的なデータ収集に係る負担・コストを軽減できるような分析・計測システムを開発する。この際、試料数の少なさ、分析時間の短縮、分析条件の緩和等に伴うデータの精度低下に対する補完的な手法、もしくは必要な特性値に対して直接的な分析・計測装置を要することなく最小限のデータ種から目的情報を生成・抽出する等の解析手法を備えるなどの装置単体に留まらない総合的な分析・計測システムを開発することで多種多様な製品に対する継続的なデータ収集の負担・コストの低減を目指す。

また得られるデータセット利用の検討として、環境負荷性、製品設計性、処理時の安全性等の資源循環性に係る評価指標を導入し、その指標の試算手法の開発に取り組む。

3. 達成目標

中間目標（2025 年度）

解体・選別等の処理プロセスの要素データと要求水準を設定し、製品 3 品種に対してデータセットの完成例を示す。要素データの取得について、従来に対して 1/10 以下の時間でデータ取得が可能な分析・計測システムの手法を示す。また、資源循環性のデータベース上の評価指標候補について、各指標の試算手法を含め整理する。

最終目標（2027 年度）

要素データの取得について、従来に対して 1/10 以下の時間でデータ取得が可能となる一連の分析装置システムを確立し、製品 3 品種を例にデータセットを作成する。資源循環性のデータベースについて、評価観点となる項目を 3 つ以上設定し、各指標に対する解析手法を確立する。

（２）再生材流通高度化に向けた基盤技術開発

１．研究開発の必要性

資源循環型のサプライチェーン構築に向けた製品製造を担う動脈産業側の要請として、各種素材産業でも再生材を利用した素材生産に向けた取り組みが始められているが、「循環経済ビジョン 2020」においても素材提供の役割を担う「リソーシング産業」に対して「自動選別技術等を活用した高品質な再生材の安定供給」への方向性が掲げられているように、再生材市場に向けては基盤的な支援が不可欠である。現状のリソーシング産業の流通において、再生材はリサイクル工場毎に個別取引され分散的に流通していることに加え、前述したように破碎・選別装置やその条件設定も現場の経験則に頼った局所最適での生産管理となるため、流通最適化を主体とした情報連携の技術基盤については発展途上にある。将来的な再生材の流通に対し、リサイクル工場に入荷する廃製品や、各リサイクル工場から出荷される再生材、リサイクル工場間での流通などに係る生産管理機能と得られる情報の利用に関する検討が期待される状況にある。

２．具体的研究内容

本項目では、リサイクル工場側からの情報提供を起点としたデータ連携により、回収、輸送などを踏まえた需要・供給について、資源循環シナリオに関する評価手法の開発に取り組む。

流通で想定される小型家電の回収、リサイクル工場からの再生材供給、再生材ユーザーからの需要の調整に要する運転条件等の検証を目指し、家電製品を対象に選別と処理産物等の情報等を取り扱えるリサイクル工場のモデルプラントを整備することで、社会実装に向けた課題抽出を行う。なお、これらのデータ連携に係る組織横断的な情報の取り扱いについて、信頼性の高い情報連携のために講じるべき対策を含めた検討を実施する。

資源循環シナリオの評価手法の開発について、多様化する資源循環ルートや国内外動向を考慮し、我が国における再生材の流通の最適化の検討を可能とする仮想的な環境を上記の検証で用いるデータ等を活用しながら構築する。

３．達成目標

中間目標（2025 年度）

小型家電の回収実態と再生材需要のニーズを把握し、再生材の安定供給に向け目指すべき供給水準を整理する。資源循環シナリオにおいて、回収、供給、需要の３種類の拠点による最適化が可能な評価手法の基本設計を完了する。この際、リサイクル工場のモデルプラントの連続試験に向け、再生材原料の供給性能モニタリングが可能となる情報連携機能を整備する。

最終目標（2027 年度）

国内の小型家電の回収実態と再生材需要と連動したマテリアルフローの可視化に向け、代表的な素材２つ以上のケースを対象に資源循環シナリオの評価手法を構築する。この際、提供するリサイクル工場の標準データについて、小型家電の回収実態に応じた連続試験（１日当たりの操業時間を目安）が可能なモデルプラントを整備し、再生材原料の出荷能力の検証を実施する。また、リサイクル工場における最適運転・運用等が流通に及ぼす影響や経済性評価によるモデルプラントの社会実装モデルを提示する。

(別紙2) 研究開発スケジュール

	2023	2024	2025	2026	2027	2028
製品解体 システム開発						
革新的選別 システム開発						
高度分析・測定 システム開発						
再生材流通高度化 基盤技術開発						
評価時期			中間 評価			事後 評価

●関連する施策や技術戦略

政策・施策における位置づけ

- 循環経済ビジョン 2020(2020. 5. 22 経済産業省) より
(引用)

V. 我が国としての対応の方向性

3. レジリエントな循環システムの早期構築

(1) 国内循環システムの最適化とためのリサイクル先の質的・量的確保

「最大限の国内循環を実現していく上で、資源投入の最適化と循環利用の拡大を進め、これらを最大限バランスさせていくことが必要である。とりわけ、あらゆる製品がいずれは廃棄物等の形で排出されることを踏まえれば、リサイクル技術の高度化・多角化とそのキャパシティ（リサイクル受入可能量）を確保していくことが不可欠である。」

「リサイクル技術の高度化・多角化を検討していくにあたっては、ベースメタル（鉄、アルミ、銅等）、セメント、紙、ガラス、プラスチック等の主要素材について、改めて今後の需給見通しや再生材の利用可能性について評価・分析をしていくことが重要である。」

- 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(2021. 6. 18 経済産業省) より
(引用)

(13) 資源循環関連産業

②リユース、リサイクル・排ガスの活用

〈今後の取組み〉

「リサイクルについては、更なる再生利用拡大に向け、リサイクル性の高い高機能素材やリサイクル技術の開発・高度化、回収ルートの最適化、設備容量の拡大に加え、再生利用の市場拡大を図る。」

●プロジェクト開始時間関連資料

NEDO POST 2023年度新規／拡充プロジェクト(案)概要



作成:2022年12月

プロジェクト名:高度循環型システム構築に向けた廃電気・電子機器処理プロセス基盤技術開発

研究開発の目的

・世界経済の成長に伴う国際的な資源需要の増加や、地球温暖化をはじめとする環境問題の深刻化を背景として、線形経済から循環経済への転換が求められている。
・我が国は資源を海外に依存しているため、資源自律経済の確立という点でも、廃製品の確実な再利用を前提とする循環経済への移行が必須となる。
・「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」(2017～2022年度)では資源価値の高い廃小型家電から、貴金属、銅およびレアメタル再生の革新的技術開発に取り組み、ベンチスケールシステムを完成させた。
・本事業は、多様な廃家電製品を対象に、貴金属、銅、レアメタル、ベースメタル、プラスチック等の資源を余すことなく循環利用が可能となる基盤技術確立することで、経済活動と環境負荷低減を両立した循環経済関連産業の創出・成長促進を目指す。

プロジェクトの規模

・事業費総額 55億円(予定)
・NEDO予算総額 55億円(予定)
・実施期間 2023～2027年度(5年間)

研究開発の内容

①資源循環性高度化プロセス技術開発

(1)製品解体システム開発

各種廃小型家電の最適な解体手法を自律的に判断する解体システムを開発する。
＜ポイント＞ 廃製品の自動解体による人手作業の代替と解体における生産性向上

(2)再生材多様化に向けた革新的選別システム開発

多種多様な素材の破砕物に対する最適な高度選別装置を開発する。
＜ポイント＞ 従来の破砕物選別に対する飛躍的な選別性能の向上

②情報連携システム開発

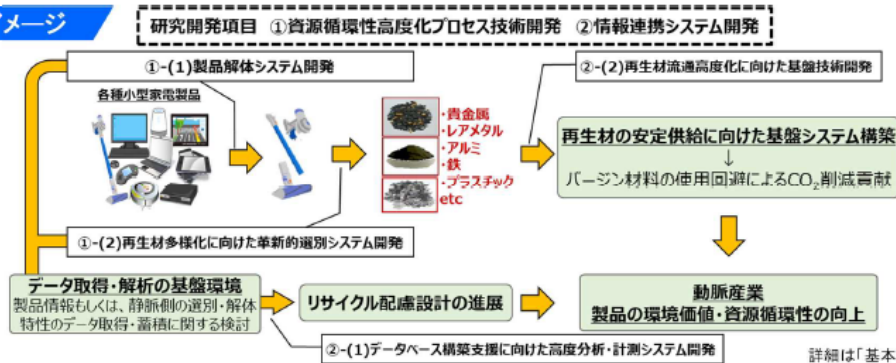
(1)データベース構築支援に向けた高度分析・計測システム開発

処理プロセス高度化に要する各種データを効率的に取得・蓄積可能な、分析・計測システムを開発し、それらを基に資源循環性の向上に資する指標を設計する。
＜ポイント＞ 資源循環に係るデータ取得コスト低減と資源循環性に係る貢献指標の可視化

(2)再生材流通高度化に向けた基盤技術開発

モデルプラントによる再生材原料の出荷性能の検証と連続試験等を介し、最適なマテリアルフロー等のシミュレーション技術を開発する。
＜ポイント＞ 再生材流通最適化検証の仮想環境構築

成果適用のイメージ



詳細は「基本計画(案)」をご参照ください

「高度循環型システム構築に向けた廃電気・電子機器処理プロセス基盤技術開発 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

2023年4月5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。

- パブリックコメント募集期間
2023年1月10日～2023年1月23日
- パブリックコメント投稿数＜有効のもの＞
計0件

以上

●各種委員会開催リスト

採択審査委員会		
件名	内容	実施日
採択審査委員会	外部有識者委員による本事業の申請内容の審査	2023 年 7 月 27 日

技術推進委員会		
件名	内容	実施日
第 1 回技術委員会	外部有識者委員を含めて、事業の進捗状況の確認と今後の開発について協議	2024 年 4 月 12 日
第 2 回技術委員会	外部有識者委員を含めて、事業の進捗状況の確認と今後の開発について協議	2024 年 10 月 22 日

●特許論文等リスト

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外 国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	東京理科大学	特願 2024-198359	国内	2024/11/13	出願	仕分対象物選別システム、及び識別体	小林宏 他
2	東京理科大学	特願 2025-025300	国内	2025/2/17	出願	把持装置及び把持ロボット	竹村裕 他

(Patent Cooperation Treaty: 特許協力条約)

【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	産業技術 総合研究所	金属資源循環の課題と展望 ～質のリサイクルに向けた物理選 別の役割～	エンジニアリング協会 エネルギー・資源開発環 境安全センター講演会	2023/11
2	大木達也	産業技術 総合研究所	金属資源循環の技術的課題と将来 展望	日本塑性加工学会 塑性加工シンポジウム	2023/11
3	大木達也	産業技術 総合研究所	金属資源循環の課題と展望 ～選別技術の展開と資源循環に向 けた取り組み～	エンジニアリング協会 エネルギー・資源開発環 境安全センター講演会	2023/12
4	清川拓哉	大阪大学	異なる操作戦略を要する多様な部 品を含む大型家電の分解作業計画	ロボティクス・メカトロ ニクス 講演会 2024	2024/5
5	松田源一郎	パナソニック ホールディン グス	高品位な資源循環に向けた技術開 発について ～設計情報を活用した自律分解ロ ボット開発～	JEITA 技術セミナー「AI とロボティクスで社会を 変える、 DX の実践と展望。」 JEITA 関西支部	2024/9
6	山岸黎大	東京理科大学	30m 四方の小型家電ヤードにおけ るランドマーク位置の検出	第 67 回 自動制御連合講演会	2024/11
7	内野大瑚	東京理科大学	Development of Sweeping Mechanism in Auto-Sort System for Small Home Appliances on the Ground	IEEE ROBIO 2024	2024/12
8	内野大瑚	東京理科大学	小型家電自律選別システムにおけ る掻き込み部の開発	第 25 回計測自動制御学 会システムインテグレー ション部門講演会 (SI 2024)	2024/12
9	佐々木智也	東京理科大学	工場内作業者の動作計測・解析に 向けた可搬性の高いマルチセンサ システムの構築	第 25 回計測自動制御学 会システムインテグレー ション部門講演会 (SI 2024)	2024/12
10	鉢峰拓海	奈良先端科学 技術大学院大 学	拡散モデルによる内部部品抽出 器：切断面観察による内部構造推 定と対象部品抽出計画の反復実行	第 25 回計測自動制御学 会システムインテグレー ション部門講演会 (SI 2024)	2024/12
11	大木達也	産業技術 総合研究所	資源循環促進のための物理選別技 術	エレクトロニクス実装学 会 材料環境技術委員会 第 1 回非公開研究会	2024/12
12	宮地直也	パナソニック ホールディン グス	高品位な資源循環に向けた技術開 発について ～設計情報を活用した自律分解ロ ボット開発～	CVC コンソ第 25 回セミ ナー「サーキュラーエコ ノミーにむけた解体技術 の展開」	2024/12

13	松田源一郎	パナソニック ホールディングス	Development of An Autonomous Disassembly Robot Using Design Information	IEEE/SICE SII2025	2025/1
14	清川拓哉	大阪大学	複数ロボットによる拘束構造の分解作業計画- 拘束を考慮した順序とタスクの階層的最適化-	第 30 回 ロボティクスシンポジア	2025/3

(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	産業技術 総合研究所	戦略的都市鉱山	日経トレンディ 2025 年 1 月号 p. 61	2024/12

(c) その他

番号	発表形式	発表者	タイトル	展示会名	発表年月
1	展示会	パナソニック ホールディングス	Design for Circular Economy	CES2025	2025/1