

「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」
中間評価報告書

2025年8月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

2025年8月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
理事長 斎藤 保 殿

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長 木野 邦器

NEDO技術委員・技術委員会等規程第34条の規定に基づき、別添のとおり評価結果について報告します。

「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」
中間評価報告書

2025年8月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

目次

はじめに	1
審議経過	2
分科会委員名簿	3
研究評価委員会委員名簿	4
第1章 評価	
1. 評価コメント	1-1
1. 1 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋	
1. 2 目標及び達成状況	
1. 3 マネジメント	
（参考）分科会委員の評価コメント	1-3
2. 評点結果	1-11
第2章 評価対象事業に係る資料	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会公開資料	2-2
参考資料1 分科会議事録及び書面による質疑応答	参考資料 1-1
参考資料2 評価の実施方法	参考資料 2-1
参考資料3 評価結果の反映について	参考資料 3-1

はじめに

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「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」の中間評価報告書であり、NEDO 技術委員・技術委員会等規程第 32 条に基づき、研究評価委員会において設置された「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」（中間評価）分科会において評価報告書案を策定し、第 80 回研究評価委員会（2025 年 8 月 8 日）に諮り、確定されたものである。

2025 年 8 月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

審議経過

- 分科会（2025年6月27日）

- 公開セッション

- 1. 開会
 - 2. プロジェクトの説明・詳細説明

- 非公開セッション

- 3. プロジェクトの補足説明
 - 4. 全体を通しての質疑

- 公開セッション

- 5. まとめ・講評
 - 6. 閉会

- 現地調査会（2025年6月20日）

- 国立研究開発法人産業技術総合研究所 つくばセンター西（茨城県つくば市）

- 第80回研究評価委員会（2025年8月8日）

「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」(中間評価)

分科会委員名簿

(2025年6月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	まつの やすなり 松野 泰也	千葉大学 大学院融合理工学府 先進理化学専攻 共生応用化学コース 教授
分科会長 代理	やまぐち かつのり 山口 勉功	早稲田大学 理工学術院 教授
委員	あおき ちか 栗生木 千佳	公益財団法人 地球環境戦略研究機関 持続可能な消費と生産領域 主任研究員
	いましゆく よしあき 今宿 芳明	R i t a T e c h n o l o g y株式会社 最高執行責任者
	さいとう ゆうこ 齋藤 優子	東北大学 大学院環境科学研究科 教授
	きどおし ひでき 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
	つつい かずなり 筒井 一就	株式会社グリーンサイクルシステムズ 製造管理部 部長

敬称略、五十音順

研究評価委員会委員名簿

(2025年8月現在)

	氏名	所属、役職
委員長	きの くにき 木野 邦器	早稲田大学 理工学術院 教授
委員	あさの ひろし 浅野 浩志	東海国立大学機構 岐阜大学 特任教授
	いなば みのる 稲葉 稔	同志社大学 理工学部 教授
	ごないかわ ひろし 五内川 拡史	株式会社ユニファイ・リサーチ 代表取締役社長
	すずき じゅん 鈴木 潤	政策研究大学院大学 政策研究科 教授
	はらだ ふみよ 原田 文代	株式会社日本政策投資銀行 常務執行役員
	まつい としひろ 松井 俊浩	東京情報デザイン専門職大学 情報デザイン学部 教授
	まつもと まゆみ 松本 真由美	東京大学教養学部附属教養教育高度化機構 環境エネルギー科学特別部門 客員准教授
	よしもと ようこ 吉本 陽子	三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社 政策研究事業本部 産業創発部 主席研究員

敬称略、五十音順

第 1 章 評価

1. 評価コメント

1. 1 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

世界規模の環境問題の深刻化を背景として、サーキュラーエコノミー及びカーボンニュートラルは大きな課題である。日本政府も GX2040 ビジョン等、GX を加速させる政策打ち出しており、本事業は時流に乗った研究開発事業で、循環型社会の形成という国家的な重点課題に対して、その意義は明確である。

リサイクルの分野では、従来は欧州の技術や設備を輸入して用いることが多かったので、選別技術において国産化を目指した本事業は、国内の循環産業の強化という意味でも重要であり、多様な対象への適用を目指した日本の制御技術の高度な活用となっている。また、動脈産業と静脈産業の両事業者が関わっており、製品全体の資源循環を進める点と技術の社会実装を現実的に見据えている点について評価できる。

開発技術を非競争領域と競争領域に分けて、積極的に権利化するものと、ノウハウとして秘匿するものに分けて検討しており、オープン・クローズ戦略は妥当である。再資源化や再製品化における要素技術に関して、特許化やデファクト標準の確立を目指す動きは、国内外の技術競争力強化にも資する。

一方で、アウトカム達成のためには、本事業で開発した技術を社会実装するために必要な社会基盤について検討する必要があると考える。過去のリサイクル技術の歴史を顧みても、優れた技術開発を進めていても原料調達がボトルネックとなってきた事例が存在すると考えられることから、回収システムのあり方についての検討も国と連携しつつ併せて進めていただきたい。

また、動静脈連携は、事業化の段階で実現するのではなく、実用化前に体制構築して、技術、体制のブラッシュアップを進めるべきものであり、その成果を獲得するタイミングを早める検討を期待する。くわえて、前倒しで社会実装が可能と思われる項目、特に、リチウムイオンバッテリー解体時の安全性を確保する自動化など現状既にニーズが逼迫しつつある技術は、個別に前倒し事業化を検討いただきたい。

1. 2 目標及び達成状況

アウトカム目標として設定されている社会実装指標は、循環型社会の実現に向けた定量的目標として適切であり、事業の出口戦略として十分に意識されている点が評価できる。アウトカム達成時における経済波及効果と CO₂ 削減効果を考慮すると、国費投入総額に対するアウトカム目標は妥当と考える。

研究開発の成果として示されたアウトプットである、装置のプロトタイプ化、選別技術の精度向上、アルゴリズムの開発などは、当初計画に対して着実に進展しており、技術的な到達点として十分な成果が見られる。現場での実証実験に結びついている点も高く評価できる。

また、65 名の多くの若手研究者が本プロジェクトに参画しており、副次的効果として人材開発が進んでいる。

一方、開発する技術が社会実装されるための社会基盤の整備、例えば回収のスキームや情報の運用についてはどの主体がどのように管理していくのか、行政機関と連携し検討を進めていただきたい。また、近年小型家電の全国回収量は減少傾向という統計があるなかで、将来的な回収率 50%の見込みが妥当なものか、資源戦略的視点からも現実的かつ戦略的な原料確保目標を今後は掲げていただきたい。

今後 10 t/日スケールへ拡張する際の設備投資・操業コストが不透明であり、実運転時の安全性（リチウム電池混入）・メンテナンス負荷を含めた費用対効果の再検証とともに、将来的に国内のどこにどの規模の装置を設置するのか検討いただきたい。

また、多数の製品を対象にした多くの技術開発項目が必要であるが、全体としての各テーマのつながりが分かり難く、一気通貫でどんな成果が出ているのかも示す必要がある。

人材開発については、自律的に拡大していくための人材交流の推進などの実施を期待する。また、若手の研究者にとっては、論文発表が必須であるので、論文を執筆しやすい雰囲気を作ってもらえるようお願いしたい。中間目標の達成度を考えると、今後、特許、論文が増えていくものと考えられ、積極的に特許化と論文投稿を進めていただき、外国出願も実施していただきたい。

1. 3 マネジメント

NEDO がこれまで各種素材の再生技術の開発で培ってきたネットワークを活用し、動脈産業、静脈産業、研究機関など多くのステークホルダーを取り込み、実施体制を作り上げたことは大いに評価できる。各機関の役割分担が明確に整理されており、それぞれの強みを活かした連携体制が構築され、指揮命令系統及び責任体制も有効に機能していると判断できる。

また、公共性の高い課題を対象としつつも、受益者である民間企業の実装意欲を前提に費用分担の考え方が設計されており、持続可能な運用を意識した計画となっている。

さらに、初期段階から最終成果に至るまでの各フェーズが明確に分かれており、段階的な成果創出を前提とした進行スケジュールになっている点が評価できる。

一方で、各研究タスク間の相互連携に対する整理が不十分であり、今後はより緻密な運営体制の可視化と情報共有を進めることが望まれる。

また、社会実装の必須条件である採算性、量産性や設備稼働率向上といった課題をよく意識して事業を推進いただきたい。

さらに、急激に政策開発が加速化されている再資源化事業等高度化法、資源有効利用促進法改正の関連性について理解を深め、本プロジェクトの結果および本プロジェクトの実用化以後も、現実と政策のフィードバックループができ、政策提言にも資するインプットを創出できる仕組みにさせていただくことを期待する。

くわえて、本プロジェクトで対象とする廃棄物の排出の実態について十分に把握したうえで、各種自治体と幅広い議論を深めて事業を進めていただきたい。

(参考) 分科会委員の評価コメント

1. 1 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

<肯定的意見>

- ・ 世界的に見て CE、CN は大きな課題。METI も GX 戦略を打ち出しており、時流に乗った研究 PJ である。動脈と静脈がかかわり社会実装までもっていかうとしていることは評価できる。リサイクルの分野では、従来では欧州のプロセスを輸入して用いることが多かったので、このような国産プロセス開発は意義深い。
- ・ 良く検討されている。
- ・ 本事業は我が国が掲げる「循環経済ビジョン 2020」に合致したものである。将来的な人口減少を踏まえ、静脈産業の自動化が不可欠であり、本事業の成果への期待は大きい。静脈産業を考慮した動脈産業における製品造り、静脈産業から動脈産業への二次原料の供給など動脈と静脈の産業連携には、国の指導と支援の下で本プロジェクトを実施するとともに、規制緩和、法規制を行うことで社会実装が実現できると考える。
- ・ 以前に実施された先導研究やナショプロで開発した技術を基本として、本プロジェクトが構築されており、アウトカム達成への課題とその課題解決に向けたプレーヤーと時間軸が明確化されており、アウトカム達成への道筋は明確化されている。
- ・ 開発技術を非競争域と競争領域に分けて、積極的に権利化するものと、ノウハウとして秘匿するもの分けることが検討しており、オープン・クローズ戦略は妥当である。本事業で得られた知財の特許管理、知財管理の体制は明確化されており、評価できる。
- ・ 選別技術において国産化を目指した本プロジェクトの意義は、国内の循環産業の強化という意味でも重要課題となっており、その取り組みに対する意義は大きい。また、現状回収が進んでいない小型家電を対象としている点も時機にかなっている。
- ・ 様々な観点から、網羅的に外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を考慮している。
- ・ 知的財産の取扱、人材育成の観点については、十分に考慮され、計画もあるように見られる。
- ・ 循環型社会の形成という国家的な重点課題に対して、処理・解体プロセスの高度化という技術的アプローチを通じて直接的な貢献が期待される点で、その意義は非常に大きい。特に国内循環システム最適化や再生材市場拡大を具体的に後押しする技術開発として意義が明確である。
- ・ ロードマップが年度ごとに分かれており、中間成果を踏まえたフィードバックや実証展開など、段階的な進行計画が整備されている点は評価できる。また、社会実装の視点を早期から取り込んでいることにより、技術開発と制度整備、産業界との連携が並行的に進む可能性が高い。
- ・ 成果物の社会展開を見据えた知的財産および標準化の方向性が早期から検討されており、プロジェクト全体に戦略的視点が組み込まれている点は評価できる。特に、再資源化や再製品化における要素技術に関して、特許化やデファクト標準の確立を目指す動きは、

国内外の技術競争力強化にも資する。

- 複数の国内政策を踏まえ、世界の政策のトレンドにしたがって、的確に進化したものとなっている。諸外国の技術が特定機能の実現や既存技術を活用することが多いが、多様な対象への適用を目指した日本の制御技術の高度な活用となっている。
- 既に多数の特許を取得していることは評価できる。装置に関する特許が積極的に公開され、技術の存在を国内外に示すことで、技術活用への期待を拡大することができる一方で、現実に製造、発展させるためのノウハウは秘匿することを目指した体制ができており、適切な展開ができています。
- 世界規模の環境問題の深刻化を背景として、循環型経済の形成という社会ニーズによく合致したテーマである。再生事業の現場において特有の課題である LIB 解体時の安全性の確保や入荷製品選別時の重筋作業を解消する自動化技術の提案は、今後の再生事業の効率化と人材確保に大いに貢献できる可能性がある。欧州においては、再生資源の創出を支援する高速選別の技術が多数市販されているが、これらは限定的な工程を対象とした汎用技術で、広い製品群や多様な解体方法のニーズに合致したものではない。多数の小型家電群の選別・解体・再生素材回収工程全体を対象とした一連の技術開発は単独のメーカーや再生業者では難しく、多数のステークホルダーを開発体制に取り込み、その成果の全国普及を主導できる立場にある NEDO が実施することに意義がある。
- 現状、充実した品質管理や有害物質の規制値管理ができる事業者が、静脈側に少ないことも再生素材の付加価値を低下させる一因であると思われる。この事業においては動静脈連携の一環として品質保証システム体制の確立に触れていることを評価する。
- オープン・クローズ戦略は知財委員会の中で議論され領域が適切に設定されていると考える。
- 本事業は、サーキュラーエコノミー確立へ向けて、動脈側と静脈側両方の事業者が関わっている。また、製品全体の資源循環を進める点と技術の社会実装を現実的に見据えている点について評価できる。

<問題点・改善点・今後への提言>

- 本プロジェクトの終了時には、アウトカム達成のためには、国内のどこに、どの規模の処理システムを配置することが望ましいのか、提案していくことが望ましい。アウトカム達成においては、アルミニウム以外の銅、スズなどのベースメタル、アンチモンなどのレアメタルなどを含め、マテリアルフローを明確化する必要がある。また、小型家電の収集システムの構築や、二次原料として動脈産業に供給するうえでは、ある一定量を貯めておく必要もある。そのうえでは法規制や規制緩和も必要になること検討する必要がある。
- 本プロジェクトで検討した技術の社会実装に向けて、技術機器の国内量産化に向けたビジネス環境の整備にも留意する必要があるのではないかと。
- 廃家電 9 品目を対象に 50 万トンの回収という見込みであるが、その回収体制構築に関する留意が必要ではないかと。効果については、本プロジェクトでも検討されているリマ

ニューファクチャリングの効果も考慮に入れてはいかがか。

- この観点における活動強化のための具体的な内容やスケジュールをさらに明確にされたい。
- 対象とする「社会的課題の定義」や「ベンチマークとの比較」がやや抽象的で、どの課題をどの程度解決し得るのかといった、政策との因果的つながりが資料上では不明確な部分もある。今後は、定量的な効果予測や他施策との差別化を明示することで、本事業の意義をより説得的に示していく必要がある。
- アウトカム達成に向けた「仮説→実証→実装」の構造が不明瞭な箇所もあるため、各ステップにおける検証方法や評価基準をより明確に設定することが望まれる。
- 知財と標準化の対象技術の選定方針や、特許取得と情報公開の線引きに関しては、PM や PL からのより具体的な指針の提示が求められる。事業終了後の成果展開を円滑に進めるためには、標準化機関や動静脈産業界との早期連携、ならびに国際標準化との整合性の確認が必要である。
- 動静脈連携は、事業化の段階で実現するのではなく、実用化前に体制構築して、技術、体制のブラッシュアップを進めるべきものである。つまり、連携の開始目標を5年程度タイミングとして前倒しし、2030年頃の達成が求められる。実際に動静脈連携は検討は進められているが、その成果を獲得するタイミングを早める検討を期待する。
- 先導研究(2015～2017)や前研究開発事業(2017～2022)の成果があますことなくこの事業にも展開されることを期待する。
- アウトカム(社会実装)には一連の高度解体選別装置群の民間企業への導入が計画されていないが、出口戦略として妥当か。アウトカム目標(事業化)時期が2035年とかなり先になることを懸念。LIB解体時の安全性を確保する自動化など現状既にニーズが逼迫しつつある技術は、個別に前倒し事業化を検討頂きたい。
- 静脈側プレーヤーには外国系や中小規模の事業者が多く、特許侵害や守秘義務に関して動脈側の常識や慣例が通用しないケースも多いので、オープン・クローズの設定議論には細心の注意が必要。
- アウトカム達成のためには、本事業で開発した技術を社会実装するために必要な社会基盤について検討する必要があると考える。過去のリサイクル技術の歴史を顧みても、優れた技術開発を進めていても原料調達がボトルネックとなってきた事例が存在すると考えられることから、回収システムのあり方についての検討も国と連携しつつ併せて進めていただきたい。
- 特許出願、学会発表等をこれまで実施してきているので、今後は論文発表を期待する。

1. 2 目標及び達成状況

<肯定的意見>

- 概ね良好である。
- 研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえ、アウトカム指標・目標値であるCO₂削減量と循環経済の効果は、電気電子機器市場に対して適切に試算している。アウトカ

ム達成時における経済波及効果と CO₂削減効果を考慮すると、国費投入総額に対するアウトカムは妥当と考える。

- ・ 資源循環性高度化プロセス技術開発および②情報連携システム開発の各項目とも、中間目標は達成できていると判断できる。プロジェクトの実施期間が1年程度と短いことを考えると、特許出願も2件は妥当である。65名の多くの若手研究者が本プロジェクトに参画していることは、本分野の人材育成において評価できる。
- ・ いずれも着実な進捗がみられる。
- ・ リサイクル連続資源フィールドを行うことによって各研究開発項目間の有機的關係が明らかになることを期待する。
- ・ アウトカム目標として設定されている社会実装指標は、循環型社会の実現に向けた定量的目標として適切であり、事業の出口戦略として十分に意識されている点が評価できる。
- ・ 研究開発の成果として示されたアウトプット（装置のプロトタイプ化、選別技術の精度向上、アルゴリズムの開発など）は、当初計画に対して着実に進展しており、技術的な到達点として十分な成果が見られる。現場での実証実験に結びついている点も高く評価される。
- ・ 数値的な目標については、根拠ある検討がなされている。技術に関する位置づけは、大変重要であり、日本経済への効果が大きいことは理解できる。
- ・ 設定された中間目標に対する成果が的確に達成されている。副次的効果としての人材開発は進んでいる。多数の論文などの成果が得られている。
- ・ 現状の静脈産業は動脈産業に比べて非効率で労働集約的な側面が多く、回収した再生資源の価値減や海外流出の原因となっている。本事業の成果を静脈側の事業者へ普及することもアウトカム目標として設定されていることを評価する。
- ・ 各研究開発項目において識別率その他の数値目標が達成できていることが報告されており概ね当初の計画日程通り進捗していると考えられる。項目②(2)においては前開発技術事業(2017~22)の成果をCEDESTシステムとして連続稼働させメンテナンス性や量産性の評価を行っていることが報告された。開発技術の孤立化と形骸化防止という意味でこの点を評価する。
- ・ 中間目標は概ね達成しており評価できる。

<問題点・改善点・今後への提言>

- ・ 特に貴金属(Au, Ag, Pd)に関しては、海外に流出したとしても必ずリサイクルされるはずであるので、グローバルで評価した場合のCO₂排出削減効果は過大評価している。数値を修正すべき。
- ・ 多数の製品を対象にするゆえ、多数の技術開発項目が必要で、各項目ごとに成果を示す必要がある。その分、一貫通貫でどんな成果が出ているかが見えにくくなっているため、最終審査ではその点を留意いただいてプレゼンしてほしい。若手の研究者が65名も携わっているため、論文発表が必須である。論文のネタになりそうな成果も出ているため、特許も重要であるが論文を執筆しやすい雰囲気を作っていただけるとよい。

PLおよびPMをお願いします。

- アウトカムとして国内で年間 42 万トンの処理を想定しているが、最終目標では実用化スケールを 10 トン/日としている。365 日稼働しても一台当たりの処理は 3,650 トン/年である。42 万トン/年の処理には、100 台以上を国内に設置する必要がある。現在の静脈産業に、100 台以上の設備をどのように配置するのか提案することが望ましい。個別のテーマにおいて、中間目標を達成できていることは理解できるが、全体としての各テーマのつながりが分かり難く、全体として達成度が判断し難い。中間目標の達成度を考えると、今後、特許、論文が増えていくものと考え。積極的に特許化と論文投稿を進めていただきたい。外国出願がゼロである。外国出願も積極的に実施していただきたい。
- 一方で、各技術の効果的な実施には、回収システムの有無、人材、制度の有無など一定の前提条件があるように思われ、それらの社会制度的前提を整理することも重要と考えられる。
- リマニュファクチャリング含むリサイクル以外の R 促進は、循環経済への移行においての大きな課題である。アウトカムには、本プロジェクトにおけるリサイクル以外の R 促進に関しても考慮に入れてはいかがか。
- リサイクル連続資源フィールドに関するさらなる詳細な計画案や、PDCA サイクルの構築などを期待する。
- 目標達成に向けた進捗の定量的なトラッキング方法や、第三者評価の仕組みについては記述が不十分であり、透明性確保の観点から改善の余地がある。評価制度や外部モニタリング体制の導入を検討いただきたい。
- 今後 10 t/日スケールへ拡張する際の設備投資・操業コストが不透明。実運転時の安全(リチウム電池混入)・メンテ負荷を含めた費用対効果の再検証を推奨する。またアウトプット目標が一部定性的に記載されており、達成度合いを外部が評価しにくい箇所がある。社会実装との接続性を高めるためには、成果の移転先や活用方法を明確化したロードマップとの整合性を図る必要がある。
- 達成見込みについては、具体的な利用者の条件やニーズに関する記述が少なく、利用側の条件をさらに多く抽出することが期待される。経済効果に対する根拠のさらなる詳細検討が期待される。
- 3 品種、6 品種などの数値があるが、これが達成されると、全体の何%が網羅されるのかも示してほしい。人材開発については、育成はされているが実際に開発を行っている人たちにまだ限定されており、自律的に拡大していくための人材交流の推進などの実施が期待される。
- 近年小型家電の全国回収量は減少方向という統計があるなかで、将来的な回収率 50%の見込みが妥当なものか観察を継続頂きたい。本事業においてベースメタルやプラスチックも開発技術の対象としていることは評価するが、小型家電構成素材割合の約 50%を占めるプラスチックについて中間評価では報告が少なかった。
- 項目①(2)においては要素技術の開発進捗に報告が終始し、一環システムまたはラインとしての全体フローや連続性が掴みにくかった。例えばクリーナー 1 台を投入すればど

ここに何がどんな割合で回収されるのか、と言ったモデルで説明頂ければわかりやすかった。

- ・アウトカム目標達成のためには、まず50%回収という目標達成が前提となる。費用対効果の試算についてもリサイクル原料の確保が前提となる。近年、国際的にみても資源戦略を目的とした二次資源確保の動きが非常に活発である。資源戦略的視点からも現実的かつ戦略的な原料確保目標を今後は掲げていただきたい。

1. 3 マネジメント

<肯定的意見>

- ・概ね良好である。
- ・中間目標は達成できており、実施者は技術力及び実用化・事業化能力を発揮していると判断される。また、指揮命令系統及び責任体制も有効に機能していると判断できる。
- ・中間目標は達成できており、最終目標を達成するためにも委託事業として継続することが望ましい。
- ・アウトプット目標達成に必要な要素技術、要素技術間での連携、スケジュールは適切と判断できる。
- ・それぞれの参加機関がそれぞれの専門性を活用して能力を発揮していると考えられる。
- ・関係者間でのシナジーを追求しつつ今後も事業を継続していただくことを期待する。
- ・多くの論文につながるテーマがあり、今後の論文執筆に期待する。
- ・分担機関ごとの役割分担が明確に整理されており、各機関の強みを活かした連携体制が構築されている。特に、執行機関がプロジェクト全体のマネジメントを担う形で調整されており、複数拠点間での連携も円滑に進められている点は、運営の実効性という観点からも高く評価できる。
- ・公共性の高い課題を対象としつつも、受益者である民間企業の実装意欲を前提に費用分担の考え方が設計されており、持続可能な運用を意識した計画となっている点が評価できる。また、開発成果の社会実装に向けた費用負担の配分において、ステークホルダーの巻き込みも意識されている点は好ましいと考えられる。
- ・初期段階から最終成果に至るまでの各フェーズが明確に分かれており、段階的な成果創出を前提とした進行スケジュールになっている点が評価される。また、技術的難易度や開発の実現性に配慮しながら、各年度でのマイルストーンやタスク分担が合理的に設計されており、資源配分や人材投入も適切と判断される。
- ・難易度の高い技術開発ができる専門人材が開発されている。
- ・本事業は、国の産業競争力向上を目的とした基盤技術を開発するためのものであり、国内の技術力向上に貢献する事業者には広く技術を公開する位置づけにある。そのために委託事業として実施していることをよく理解の上で、事業実施者は成果が自社、もしくは関係事業者自身の差別性に寄与するものとならないように広く共有していくことを期待する。本事業では、国の研究機関が推進者となっていることで、公益性を担保するとともに、民間事業者への技術移転を行う体制であり、共有が進みやすい体制である。

- 多数の会議による進捗管理が実施されている。会議では、多数の指摘がされており、適切に機能している。社会状況の変化に適切に対応している。
- 近年は民間においても資本関係のない動静脈のステークホルダーが、再生素材の安定的な供給体制を構築すべく連携するケースはあるが、この事業のように複数の高度な技術開発のテーマにおいて連携できるケースはないと思われ、NEDO が主導する意味は大きい。NEDO がこれまで各種素材の再生技術の開発で培ってきたネットワークを活用し、動脈側、静脈側、研究機関など多くのステークホルダーを取り込み、実施体制を作り上げたことは大いに評価できる。
- 付加価値が低い多種類の小型家電群の再生事業を、多数の小規模業者が担っている現状において、革新的な再生素材化技術を民間主導で長期間をかけて開発することは考えにくい。技術開発を放置しておけばかつての家電4品目と同様にスクラップとして廃小型家電そのものが海外流出してしまうリスクをはらんでいる。
- リマニュファクチャリングという比較的新しい概念を拡大する手法として、共有する設計データのDB化が提案されており、リサイクル配慮設計や最適化設計といったメーカーの設計思想改革を広める可能性がある。
- 計画通りに研究開発を進めており問題ない。

<問題点・改善点・今後への提言>

- 個別の要素技術は必要と考えるが、要素技術の連成で、再生材品種、元素毎の生産量がまだ見えていない。早めに各小型家電の品種毎に回収される再生材と元素毎の生産量を示すことが望ましい。
- 技術的な観点にくわえて、さらに社会経済影響・実施可能性について評価管理促進する体制を期待する。
- 昨今、急激に政策開発が加速化されている資源循環高度化法、資源有効利用促進法改正の関連性について理解を深め、本プロジェクトの結果および本プロジェクトの実用化以後も、現実と政策のフィードバックループができ、政策改善にも資するインプットを創出できる仕組みにさせていただくことを期待する。
- 本プロジェクトで対象とする廃棄物は一般廃棄物において様々な分類で取り上げられるものがあり、排出の実態についてより理解を深められたい。その点において、各種自治体と幅広い議論を深めていただくことを期待する。
- 各研究タスク間の相互依存性に対する整理が資料上では不十分であり、進行中の課題が他領域に波及するリスクについての想定がやや弱い印象を受けた。今後はより緻密な運営体制の可視化と情報共有を進めることが望まれる。
- 早期事業化が期待されるものの、自立化フェーズへの移行戦略（補助率逡減、民間資金誘導）が示されていない。事業後半でのユーザ課金モデルやESG投資活用策を検討し、民間主導への段階的シフトを計画することが望ましい。
- 達成指標や評価基準が定性的な表現にとどまっている箇所があり、実際の進捗状況を定量的にモニタリングする仕組みが不明確である。複数の技術テーマが並行して進行する

中で、全体としての整合性や優先順位づけについても、マネジメント的観点からの再整理が必要と考えられる。

- 実用化、事業化を推進する体制として、動脈・静脈の産業側の人材を積極的に登用して推進することで、NEDOに依存しない体制づくりが期待される。
- 実施体制に多くのステークホルダーが参加しているので、指揮命令と責任体制を明確にして技術流出防止に努めることが肝要。
- 5年で50億円と決して小さくない規模の予算が計上されている。この規模の予算を使用できる再生事業者は国内にごくわずかであることを認識し、社会実装の必須条件である採算性、量産性や設備稼働率向上といった課題をよく意識して今後の事業を推進頂きたい。
- 欧州自動車 ELV 指令や資源有効利用促進法など関連法規類の改正動向を観察して事業との整合を取る必要がある。
- 実施者が技術力・実用化・事業化を早期に発揮できるよう、執行機関間の連携をお願いしたい。また、情報管理についてはどの主体がどのように管理していくのか、データマネジメントプランについても検討いただきたい。今後の資源戦略に向けて重要な情報管理となることから、執行機関と連携し検討を進めていただきたい。
- 開発項目ごとの連携を密に取り、研究開発計画や現状の課題、解決の道筋に関する状況共有およびフィードバックをお願いしたい。

2. 評点結果

評価項目・評価基準	各委員の評価							評点
1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋								
(1) 本事業の位置づけ・意義	A	A	B	A	A	A	A	2.9
(2) アウトカム達成までの道筋	A	B	B	A	B	B	B	2.3
(3) 知的財産・標準化戦略	A	A	B	B	A	A	B	2.6
2. 目標及び達成状況								
(1) アウトカム目標及び達成見込み	B	A	B	B	B	B	B	2.1
(2) アウトプット目標及び達成状況	B	B	B	B	A	B	A	2.3
3. マネジメント								
(1) 実施体制	A	A	B	A	A	A	B	2.7
(2) 受益者負担の考え方	A	A	B	A	A	A	A	2.9
(3) 研究開発計画	A	B	B	B	A	A	B	2.4

《判定基準》

A：評価基準に適合し、非常に優れている。

B：評価基準に適合しているが、より望ましくするための改善点もある。

C：評価基準に一部適合しておらず、改善が必要である。

D：評価基準に適合しておらず、抜本的な改善が必要である。

(注) 評点はA=3、B=2、C=1、D=0として事務局が数値に換算・平均して算出。

第2章 評価対象事業に係る資料

1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

「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	<p>【プロジェクトマネージャー (PM)】 今西 大介 2023 年 4 月～現在</p> <p>【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</p> <p>【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</p>		
0. 事業の概要	<p>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。</p> <p>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認することで、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。</p>		
1. 意義・アウトカム (社会実装) 達成までの道筋			
1.1 本事業の位置付け・意義	<p>■循環経済ビジョン 2020(2020. 5. 22 経済産業省) より引用</p> <p>V. 我が国としての対応の方向性</p> <p>3. レジリエントな循環システムの早期構築</p> <p>(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</p> <p>「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。」</p> <p>「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。」</p> <p>■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</p> <p>(13) 資源循環関連産業国</p> <p>②リユース、リサイクル・排ガスの活用</p> <p><今後の取り組み></p> <p>「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。」</p> <p>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認することで、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</p>		

	<p>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。</p> <p>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。</p>		
1.2 アウトカム達成までの道筋	<p>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。</p> <p>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。</p>		
1.3 知的財産・標準化戦略	<p>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。</p>		
2. 目標及び達成状況			
2.1 アウトカム目標及び達成見込み	<p>■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。</p> <p>■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。</p> <p>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。</p>		
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	アウトプット目標（中間）	達成状況
	①資源循環性高度化プロセス技術開発	<p>(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。</p> <p>(2)再生材多様化に向けた革新的選別システム開発 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。</p>	<p>○ 2026年3月に達成見込み</p> <p>○ 2026年3月に達成見込み</p>

	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	<p>■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</p> <p>■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 マニュファクチャリングイノベーション本部 マニュファクチャリングイノベーションセンター</p>
	委託先	<p>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</p> <p>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</p>

		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	<ul style="list-style-type: none"> ・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	-					
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)	<ul style="list-style-type: none"> ・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事が可能。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。
ピン配列グリッパー	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リッパー。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。
真空吸引グリッパー	吸盤を用いて負圧を発生させ、物体を吸着するグリッパー。重量物やガラス、紙の搬送に適している。
平行グリッパー	2枚の爪が平行に移動し、物体を挟み込むシンプルなグリッパー。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)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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、リマニュファクチュア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、コーヒーメーカーなどの白物家電のサブスク。返品後は97%の商品をリファーマビッシュして再度サブスクへ。リファーマ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を確認することで、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する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

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、製品構造グループ化により、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を確認。

(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。

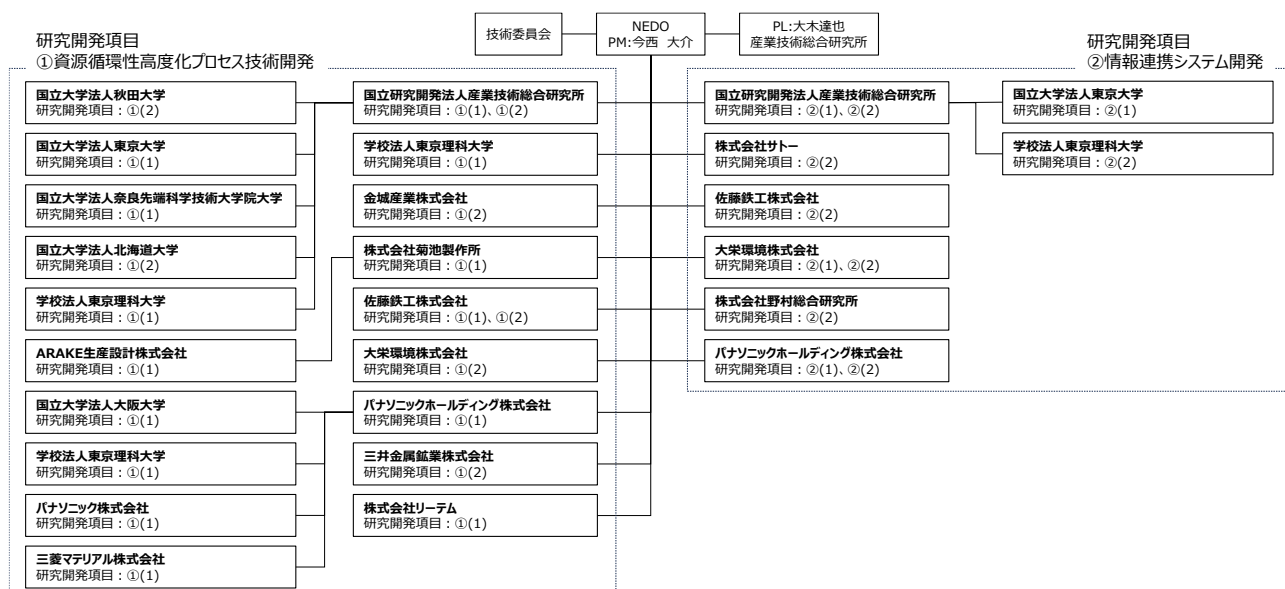


図 3-1 実施体制

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)	①(1)	②(2)	①(2)	①(2)	②(2)	
研究開発中項目	(a)	(b)	(b)	(a)	(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 産総研(松本)	パナソニックHD 産総研(松本) 野村総合研究所	パナソニックHD 産総研(松本) 野村総研	産総研(大木) 産総研(林) 佐藤鉄工 大栄環境 金城産業	産総研(大木) 産総研(林) 佐藤鉄工 大栄環境 三井金属	産総研(大木) 産総研(林) 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			最終目標	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。

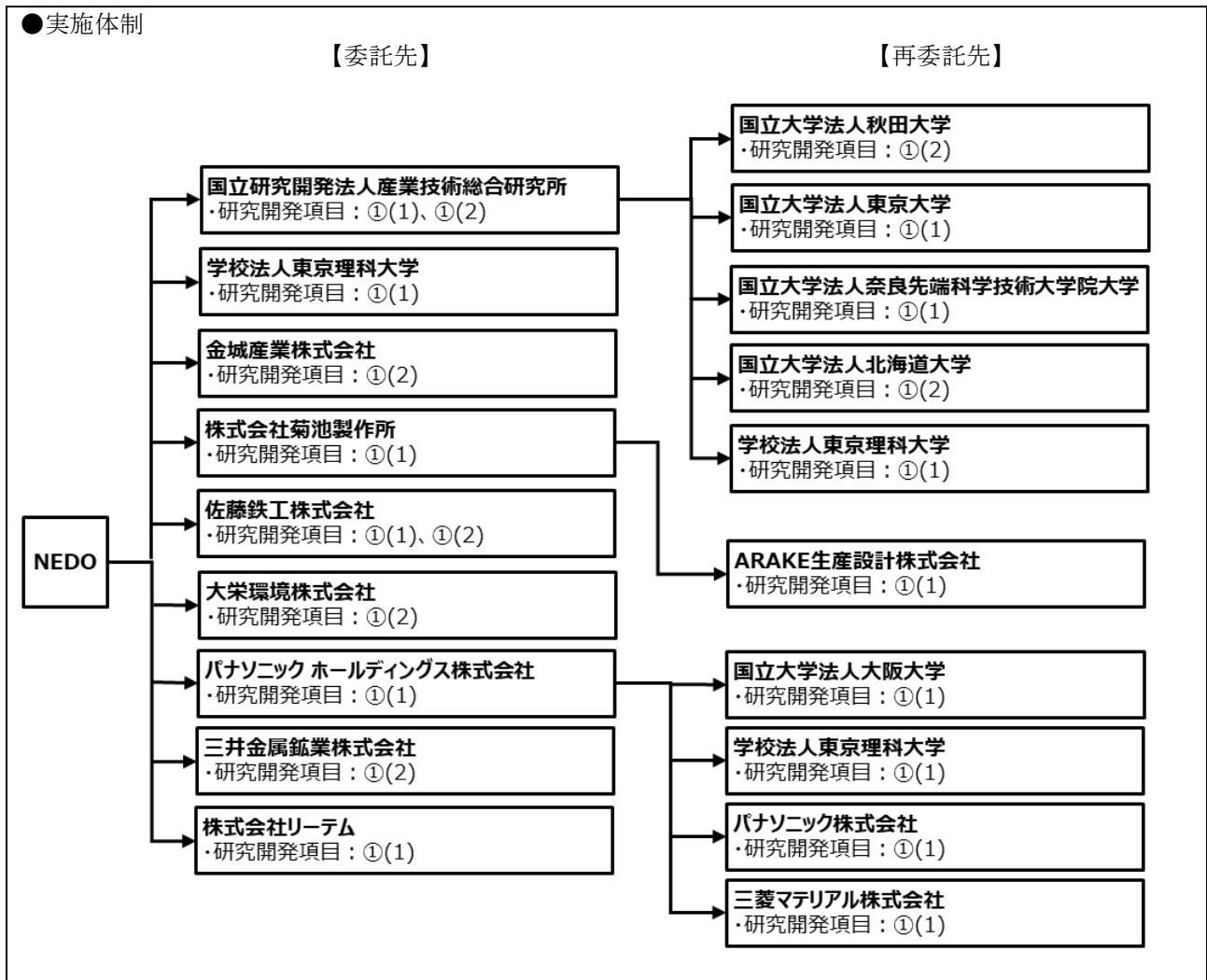
<開発促進財源>

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無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。		
<p>●背景・目的・プロジェクトアウトカム目標との関係</p> <p>[背景]</p> <p>我が国が整備してきたリサイクル環境の基盤は、埋立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。</p> <p>[目的]</p> <p>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。</p> <p>[プロジェクトアウトカム目標との関係]</p> <p>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。</p> <p>●アウトプット目標</p> <p>[中間目標]</p> <p>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。</p> <p>[最終目標]</p> <p>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。</p>			



(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。

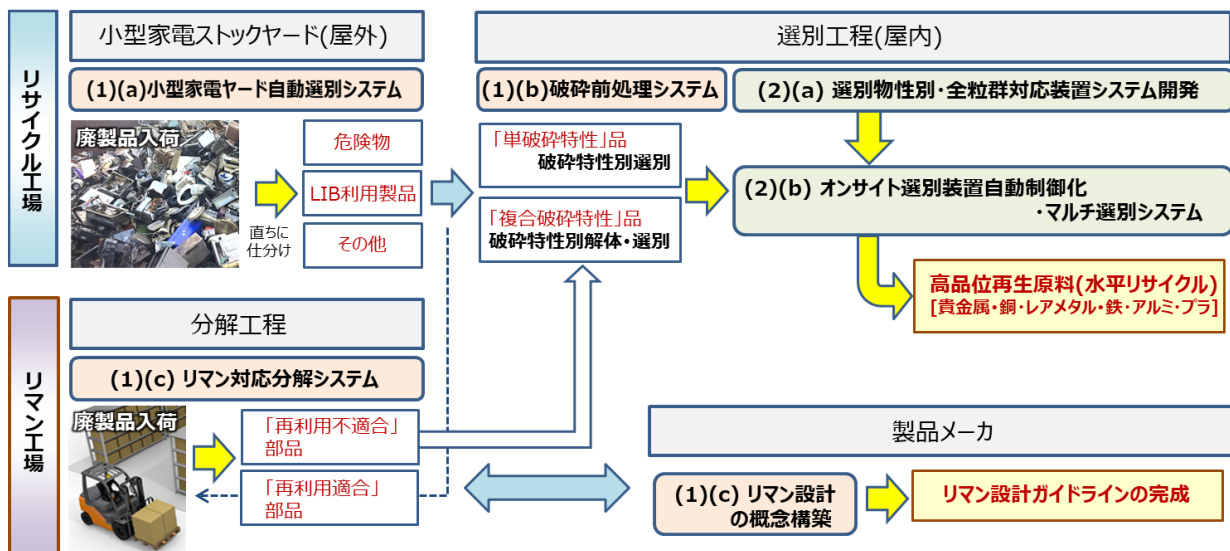


図4-1 研究開発項目①における個別開発項目の構成

(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・破砕・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

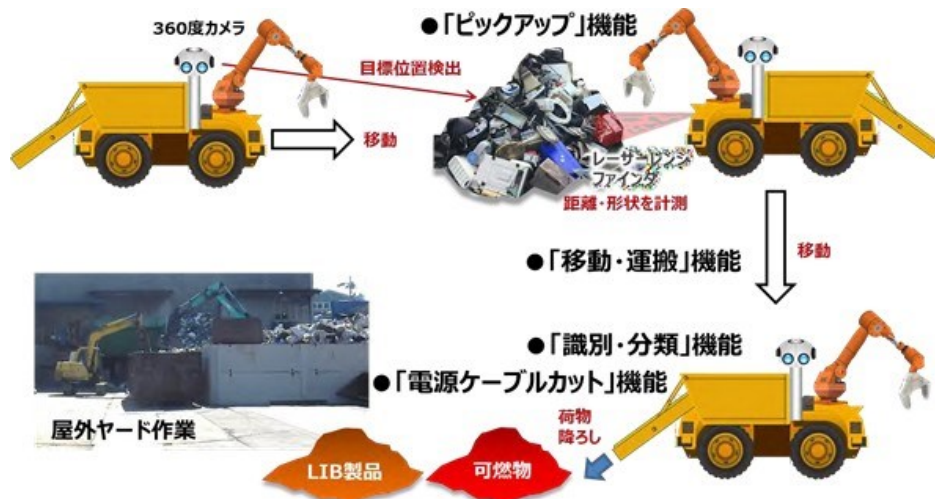


図 4-3 廃小型家電ヤード自律選別システム

(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。

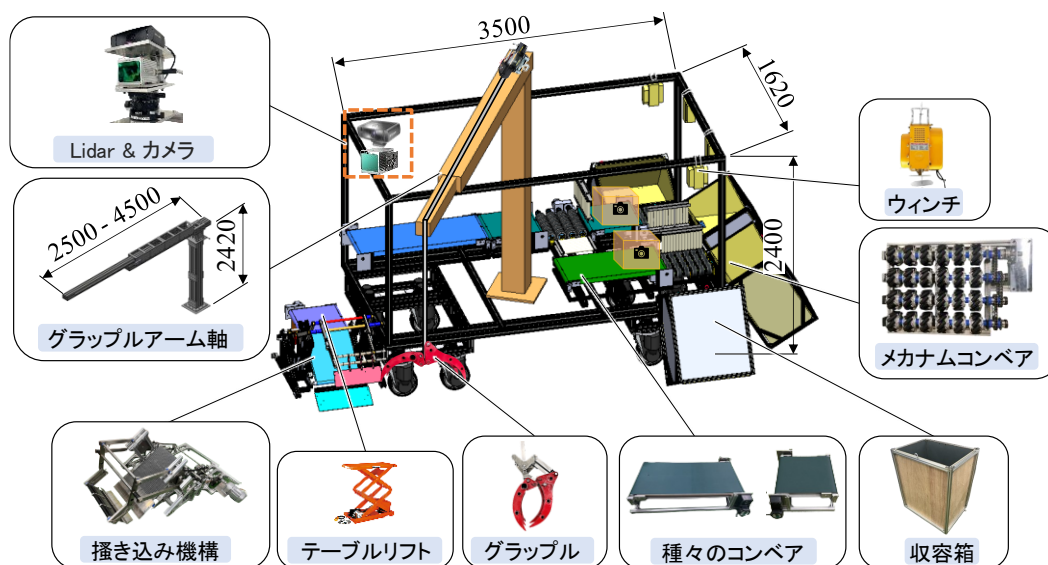


図 4-4 廃小型家電ヤード自律選別システムの構成要素

「掻き込み機構」の概観を図 4-5 に示す。「(i) 掻き込み機構」によって(ii) スロープを上るようにかきこむ。次に、後に続くコンベアに乗せるために、掻き込んだ家電を(iii) 傾斜搬送コンベアによって搬送する。装置全体を可能な限り少ないアクチュエータで動かすために、「(i) 掻き込み機構」には、図 4-6 のようなクランク機構を採用し、1つのモーターで図 4-7 のような掻き込みの複雑な軌道を実現している。また、機構の先端には、平行リンク機構を採用することで、先端が路面やスロープと接触しながら動くことを可能にしている。図 4-6 中のパラメータをそれぞれ、 $h_x = 74 \text{ mm}$ 、 $h_y = 206 \text{ mm}$ 、 $d = 65 \text{ mm}$ 、 $r_1 = 80 \text{ mm}$ 、 $r_2 = 330 \text{ mm}$ 、 $r_4 = 190 \text{ mm}$ 、 $l_2 = 500 \text{ mm}$ 、 $l_3 = 120 \text{ mm}$ 、 $l_4 = 160 \text{ mm}$ 、 $l_5 = 60 \text{ mm}$ 、 $L_3 = 250 \text{ mm}$ 、 $\phi = 135 \text{ deg}$ 、 l_1 は可変で $325 \sim 406 \text{ mm}$ とし、掻き込み量は 440 mm とする。

また、現場の路面では小石や敷板による凹凸、段差があり、かきこみ機構の先端が引っ掛かることによるスタックが想定される。そのため、図 4-8 のようにシリコンゴムを取り付ける。このゴムには、様々な路面状況に対応できるように、複数の切れ目を入れる。シリコンゴムのパラメータとして、ゴムの丈 h 、切れ目の長さ d 、切れ目の間隔 p 、肉厚 t 、硬さ H がある。また、検証の結果、異なる硬さのシリコンゴム（ゴムの丈 h' 、切れ目の長さ d' 、切れ目の間隔 p 、肉厚 t' 、硬さ H' ）を重ねて取り付けることで、家電の回収性能の向上が期待できることが分かった。これらのパラメータは、 $h = 40 \text{ mm}$ 、 $d = 40 \text{ mm}$ 、 $p = 35 \text{ mm}$ 、 $t = 5 \text{ mm}$ 、 $H = \text{ショア A70}$ 、 $h' = 80 \text{ mm}$ 、 $d' = 80 \text{ mm}$ 、 $t' = 5 \text{ mm}$ 、 $H' = \text{ショア A50}$ とした。

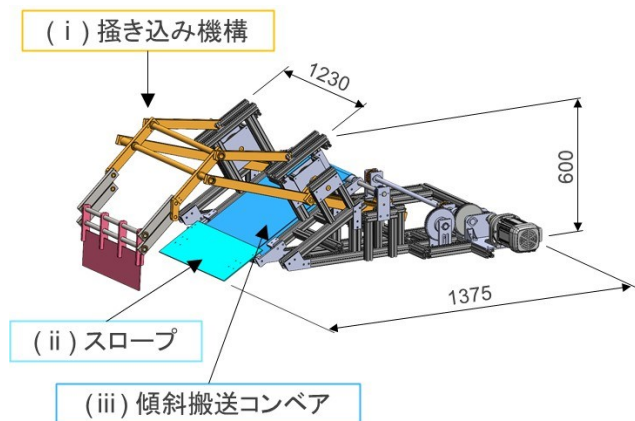


図 4-5 掻き込み部の構造

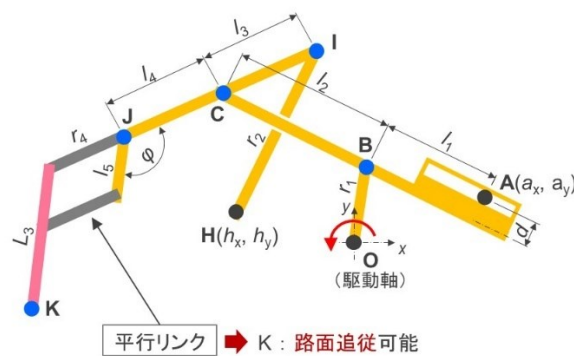


図 4-6 掻き込み部のメカニズム

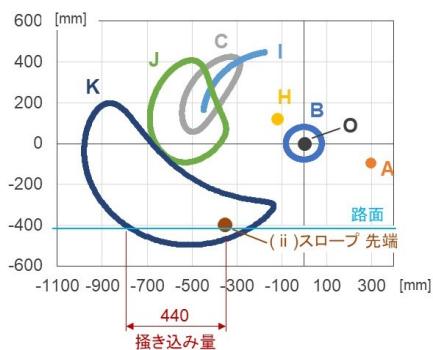


図 4-7 各点の軌道

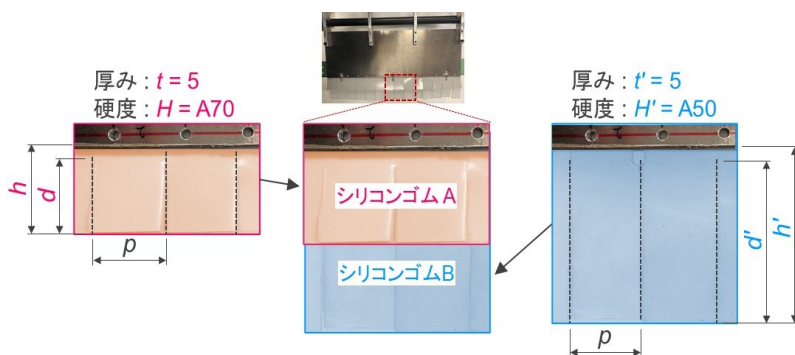


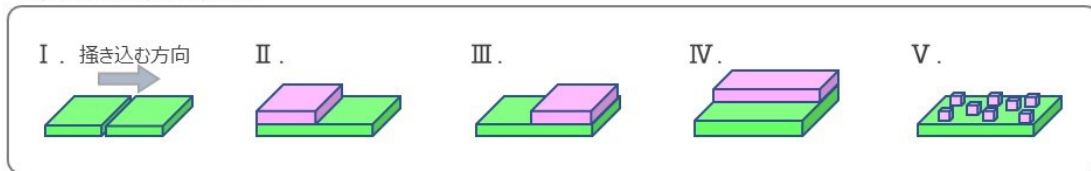
図 4-8 掻き込み部先端の構造

図 4-9 に示すように、掻き込み部において、考える地面状況を用意し、グラップルで掴むことができないと思われる典型的な小家電について掻き込み実験を行い、路面状況と廃小型家電ご

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

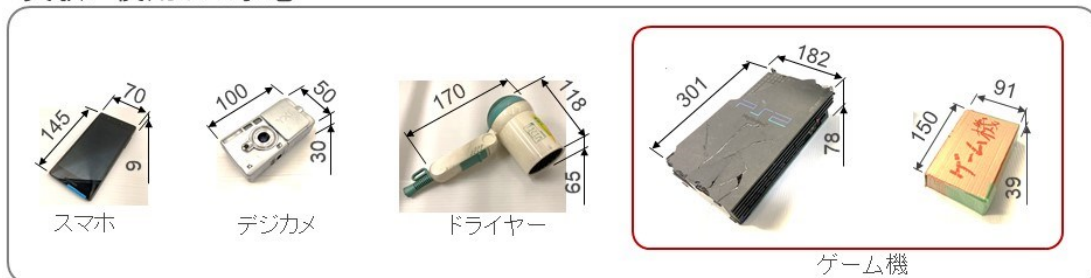


図 4-9 掻き込み実験： 地面形状と典型的な対象物

(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り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。

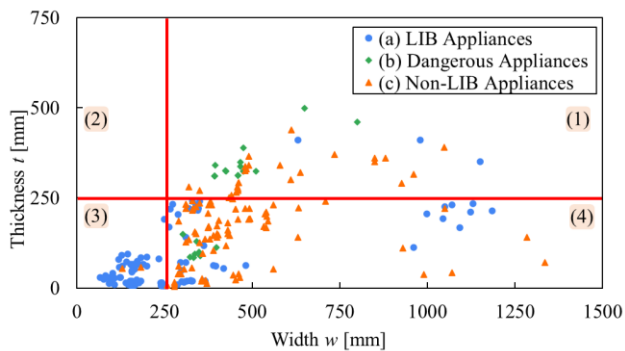


図 4-10 小型家電の大きさ分類

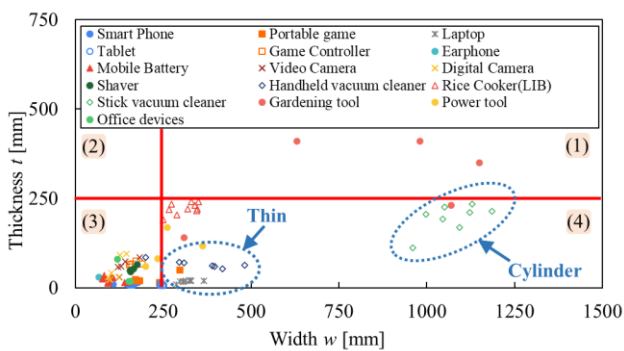


図 4-11 LIB 利用製品の大きさ分類

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。

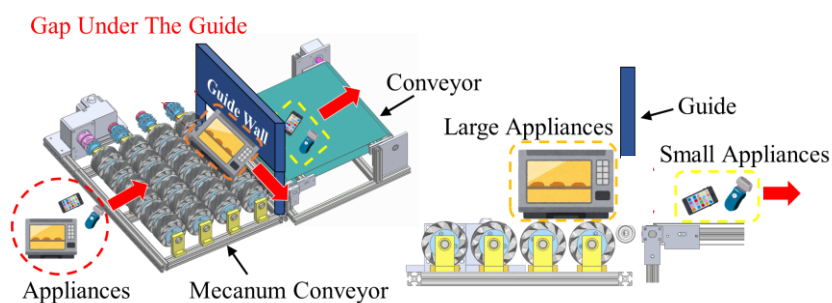


図 4-12 LIB 製品選別方法

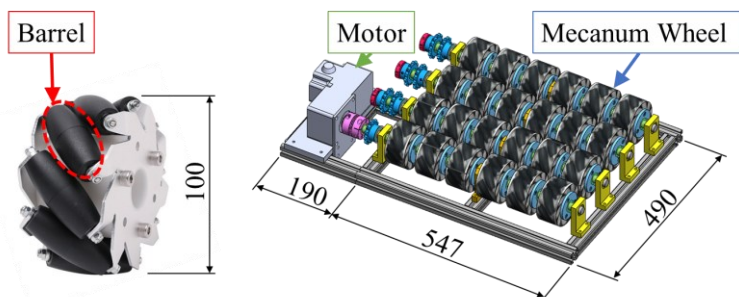


図 4-13 メカナムコンベアの構成

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こと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。

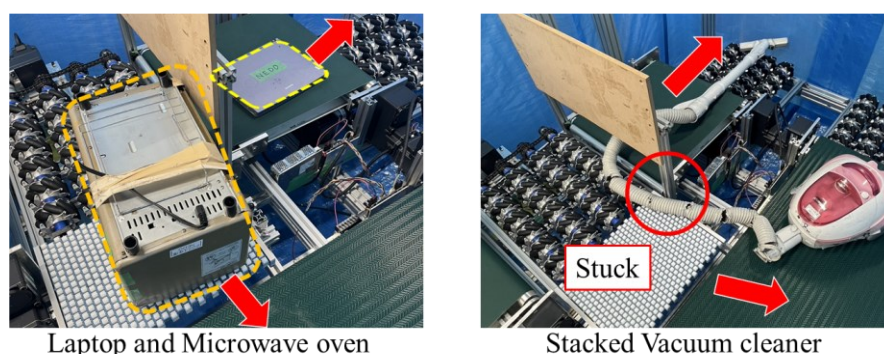


図 4-14 分類実験

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。

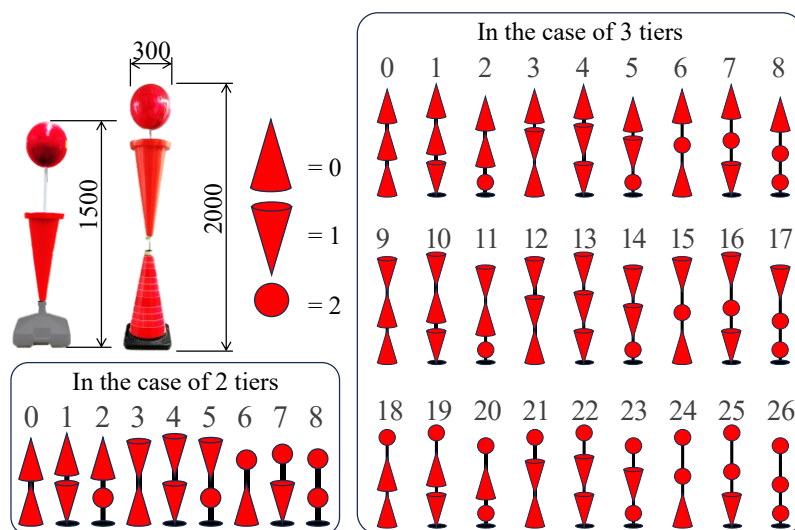


図 4-15 提案するランドマーク

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。

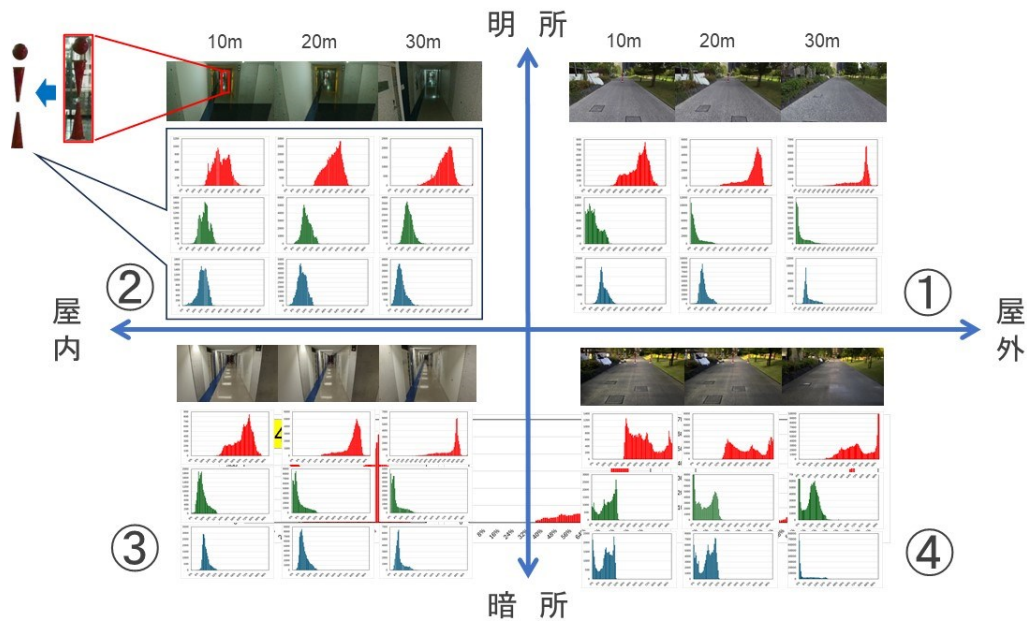


図 4-16 様々な環境中のランドマーク輝度値ヒストグラム

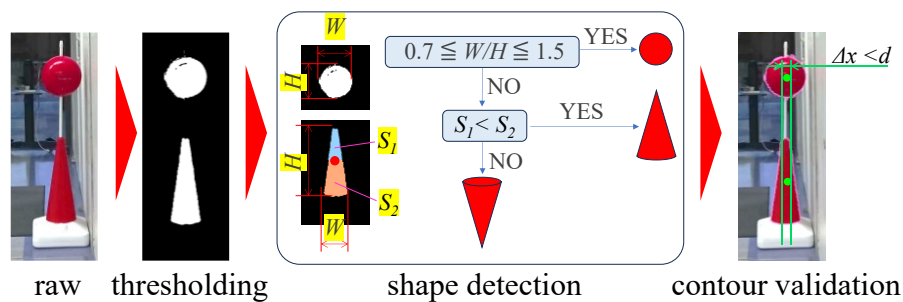


図 4-17 ランドマーク検出からランドマーク種類を検出する手法

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。

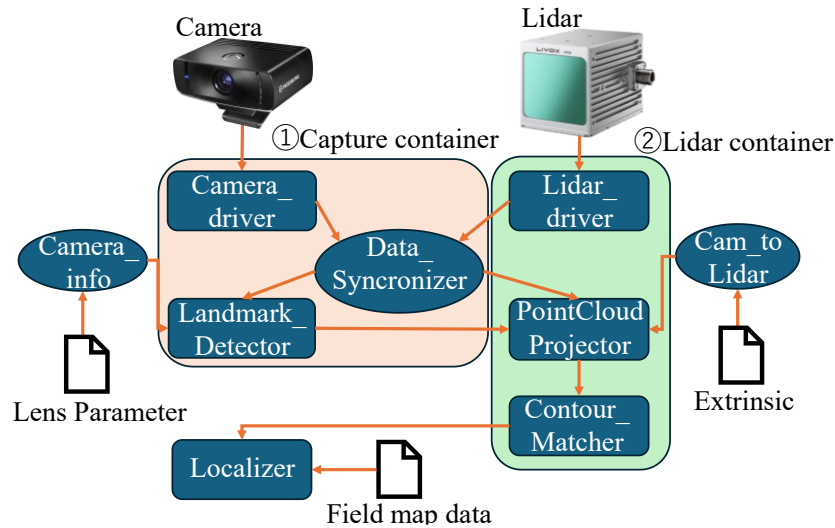


図 4-18 ランドマーク 3次元座標値検出システム

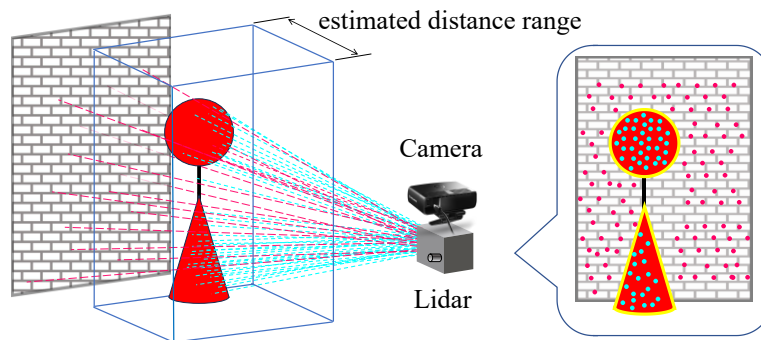


図 4-19 ランドマーク検出からランドマーク種類を検出する手法

「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。

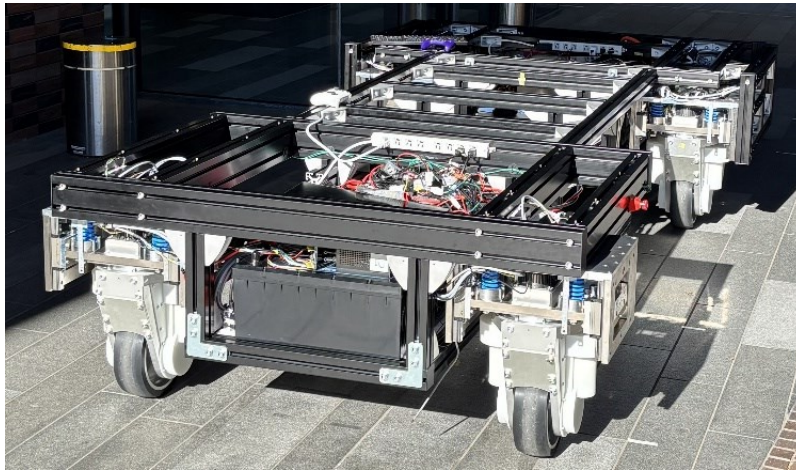


図 4-20 6 輪台車

(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。

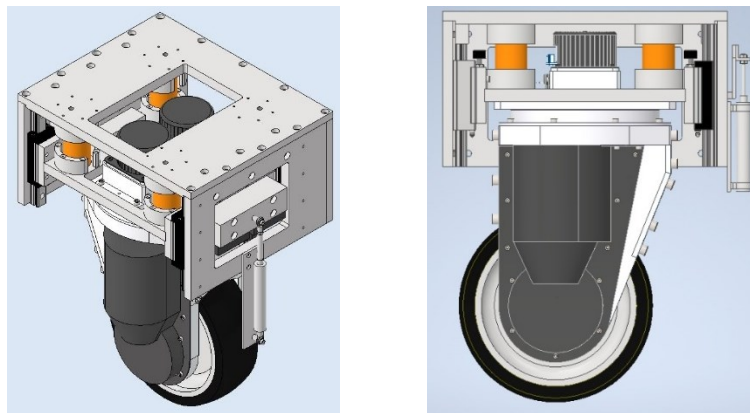


図 4-21 アクティブキャスタ

(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。

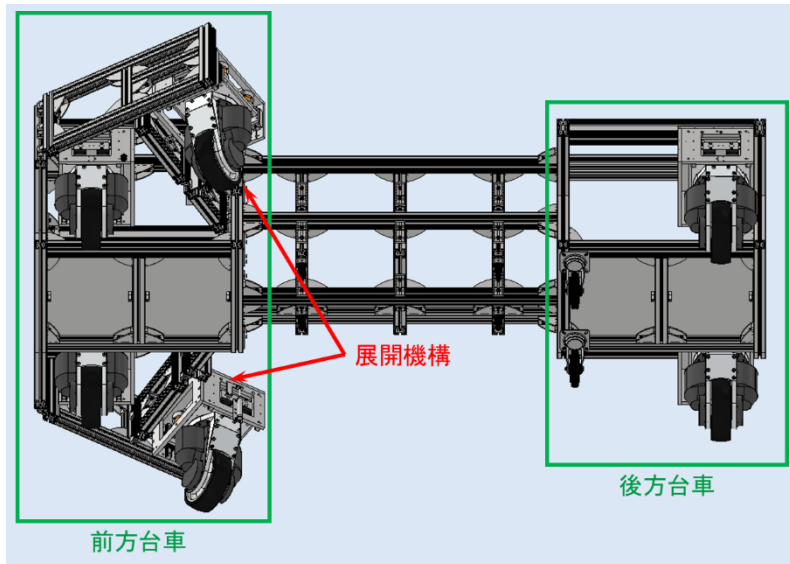


図 4-22 6 輪台車における展開機構

(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。

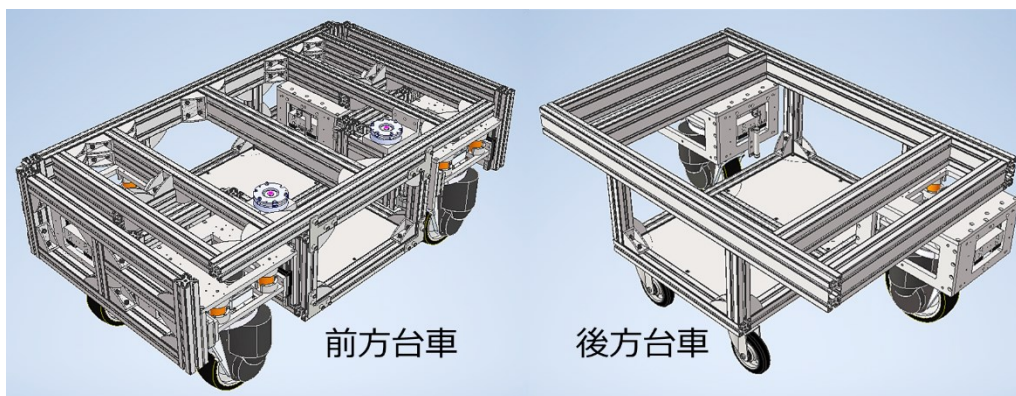


図 4-23 前方台車、および、後方台車

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收容され、箱内にある LED からセンサに向けて発せられる光が、收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容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、家電が收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。

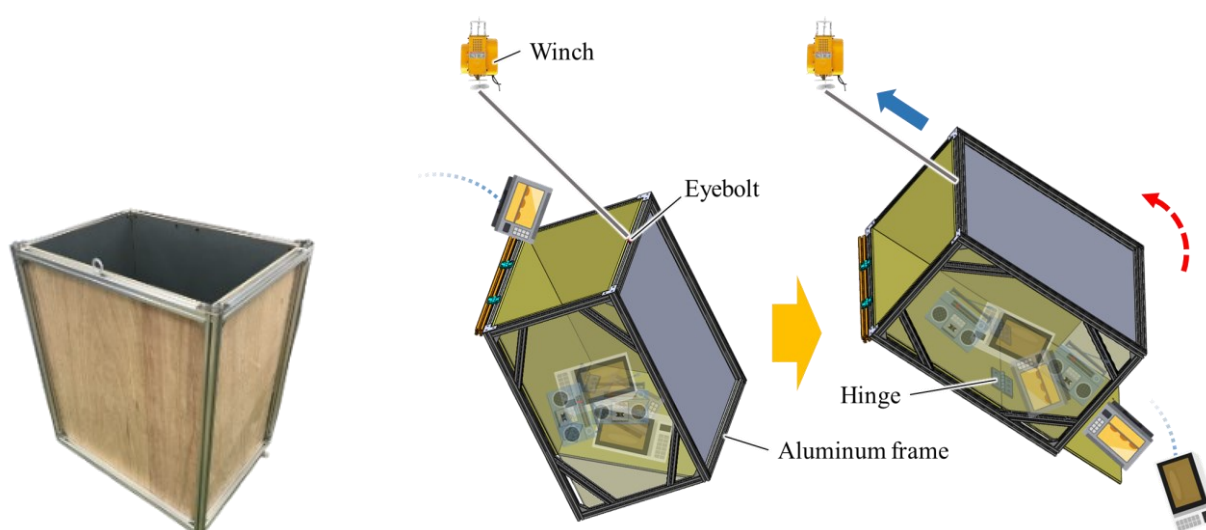


図 4-24 収納・荷降ろし部の構造

(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。

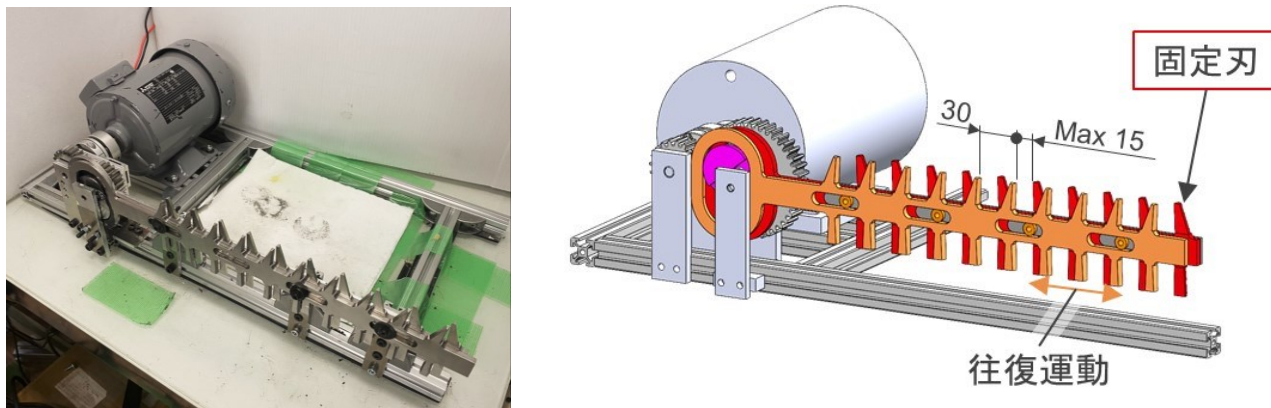


図 4-25 ケーブルカット機構

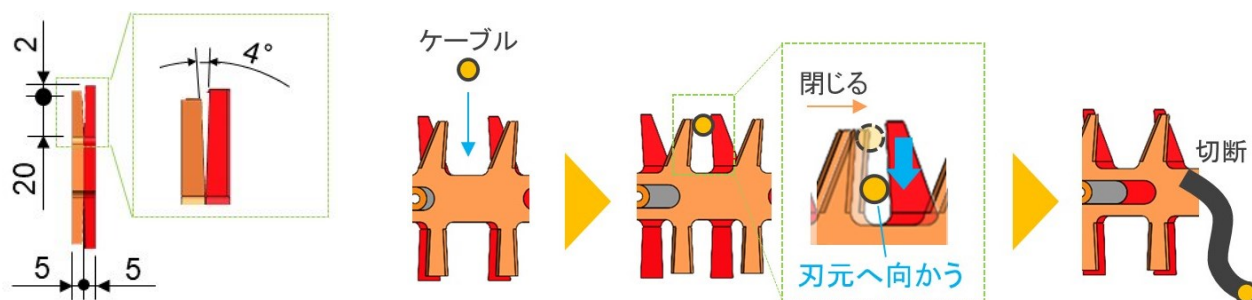


図 4-26 刃の形状と動作



図 4-27 ヘッジトリマ

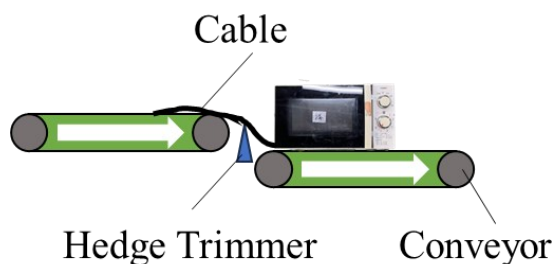


図 4-28 ヘッジトリマの配置

(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。

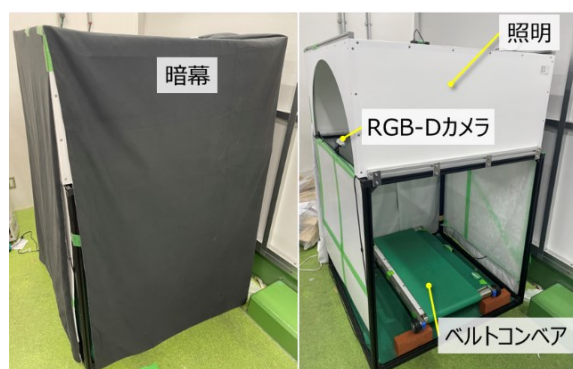


図 4-29 実験環境

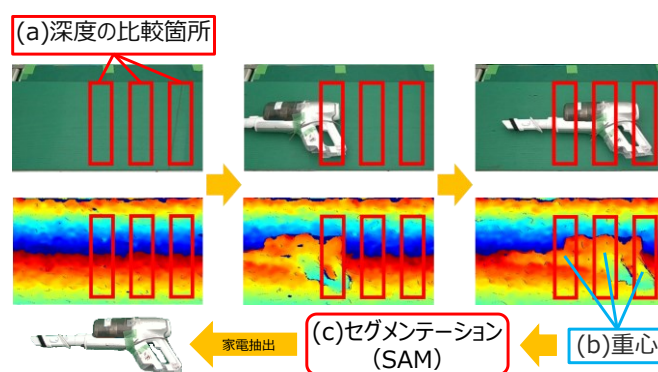


図 4-30 画像検出とセグメンテーション

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かか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。

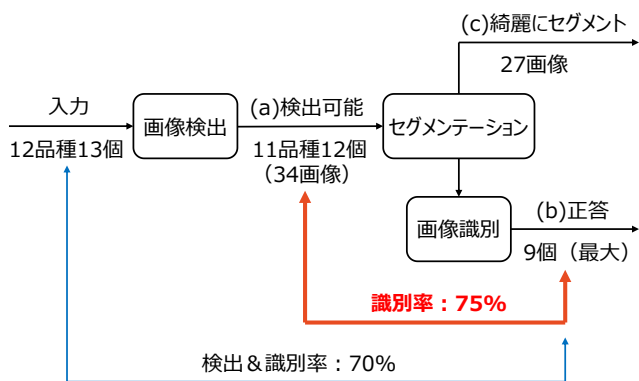


図 4-31 画像検出と画像識別結果のまとめ

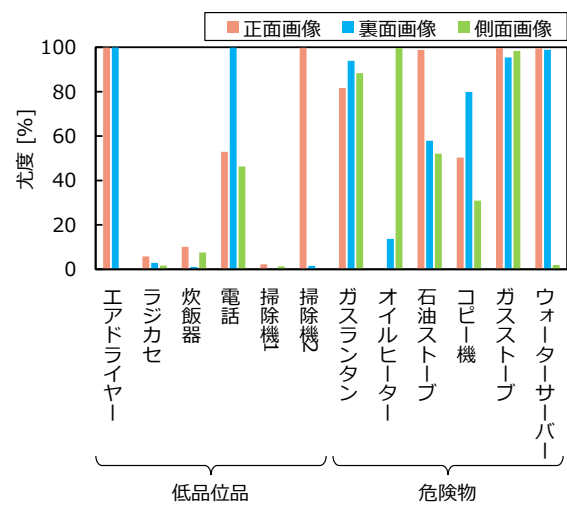


図 4-32 画像識別結果詳細

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。

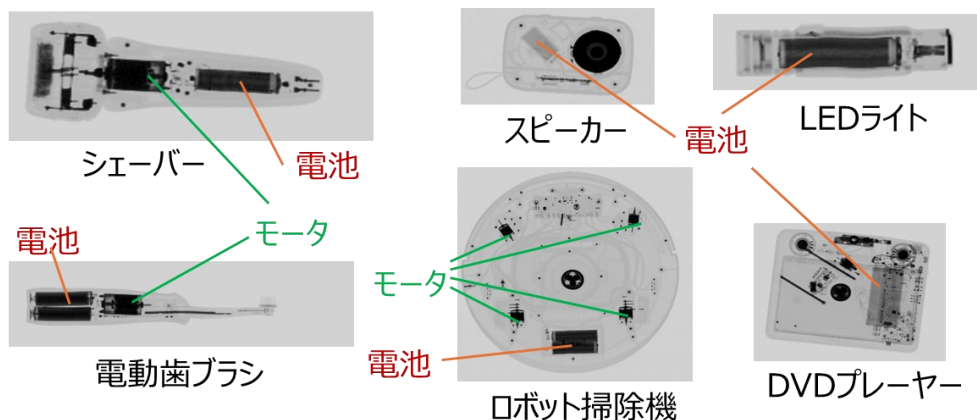


図 4-33 透過 X 線撮影

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)。

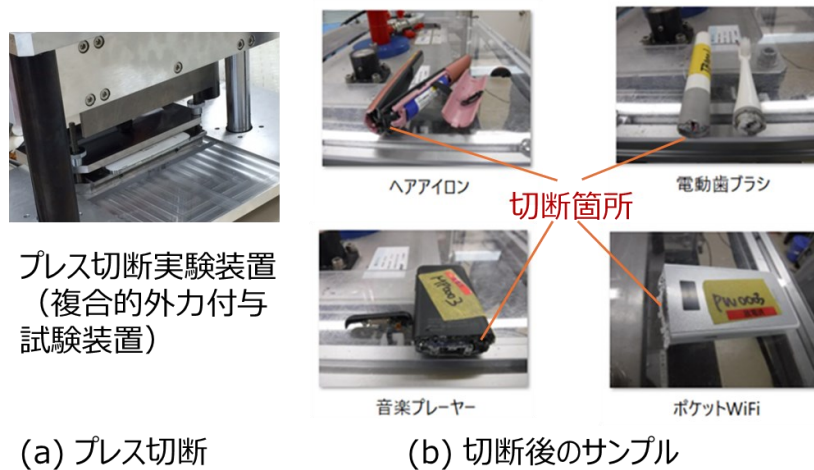


図 4-34 プレス切断実験

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)。

グルーピング案	品目例	粗解体方法案
①【電池使用】 発火危険度 高	モバイルバッテリー	選別のみ、非解体 (現状非解体で業者引き取り可能)
②【電池使用】 発火危険度 中	音楽プレーヤー	プレス切断等
③【電池使用】 発火危険度 低	電動歯ブラシ	プレス切断等
④【電池使用】 最適化された従来通り破碎	マウス	→
⑤【電池不使用】 複合破碎特性品	電源ケーブル製品	プレス切断等
⑥【電池不使用】 単破碎特性品	電源ケーブル製品	→

右側の図には、CFS等破碎機による破碎工程が示されています。

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。

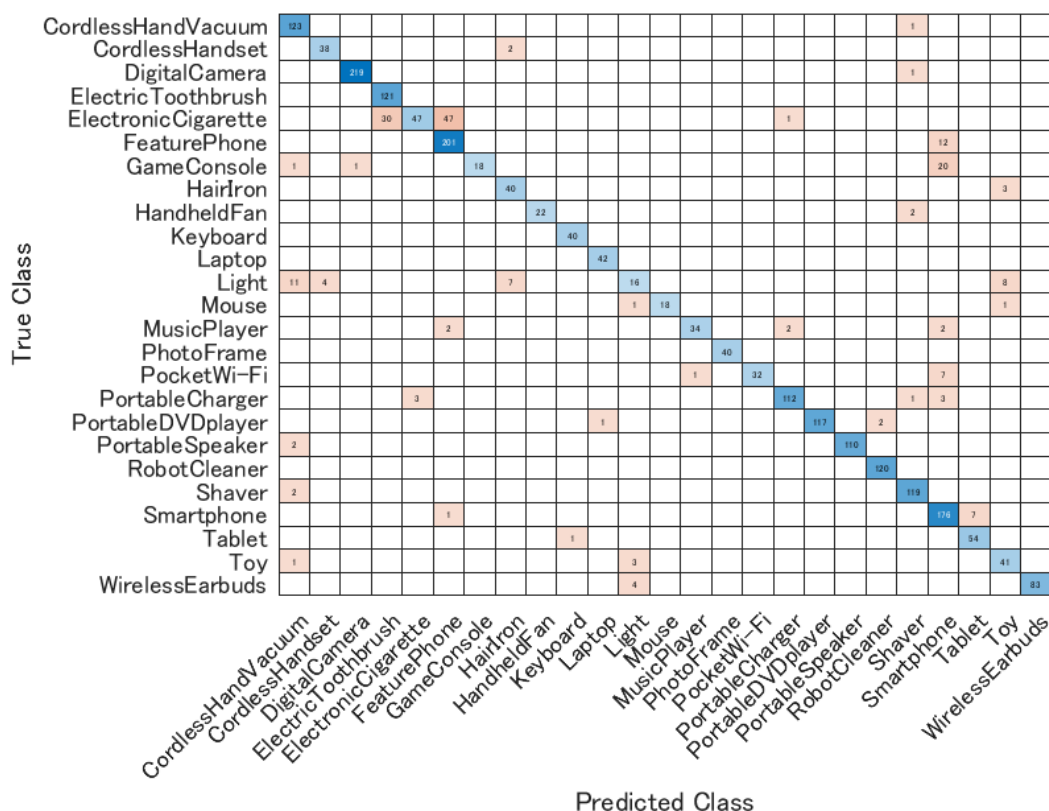


図 4-36 廃製品品目分類の混同行列

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现場(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

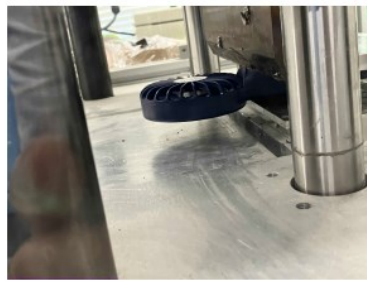
	品目	台数	調査・記録						手解体時間 合計[s]	手解体時間 平均[s/台]
			手解体時間 1台目[s]	手解体時間 2台目[s]	手解体時間 3台目[s]	手解体時間 4台目[s]	手解体時間 5台目[s]			
1	コードレス掃除機	2	80	95				175	87.5	
2	ロボット掃除機	2	15	10				25	12.5	
3	ハンディ扇風機	2	54	29				83	41.5	
4	電動髭剃り	2	110	80				190	95	
5	電動歯ブラシ	2	50	86				136	68	
6	ゲーム機(携帯)	5	10	15	77	59	32	193	38.6	
7	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)。

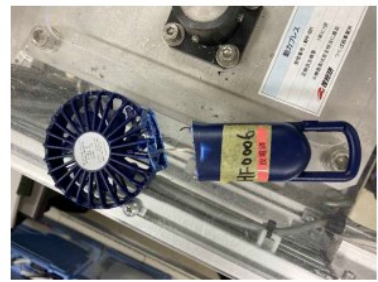
複合的外力付与装置はスマートフォンの弱部形成用に開発した装置であるため、寸法の大きな物や筐体が強固な物は弱部形成ができない。他の品目についても解体の有効性を確認するため、2025年3月末までに、処理対象物を拡大した破砕前解体実験装置(プレス切断型(図 4-38)、回転刃切断型(図 4-39))を用いて、弱部形成試験と課題の抽出を行う。2026年3月末までに弱部形成の機械機構を装置化した破砕前解体システムを開発する。



(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

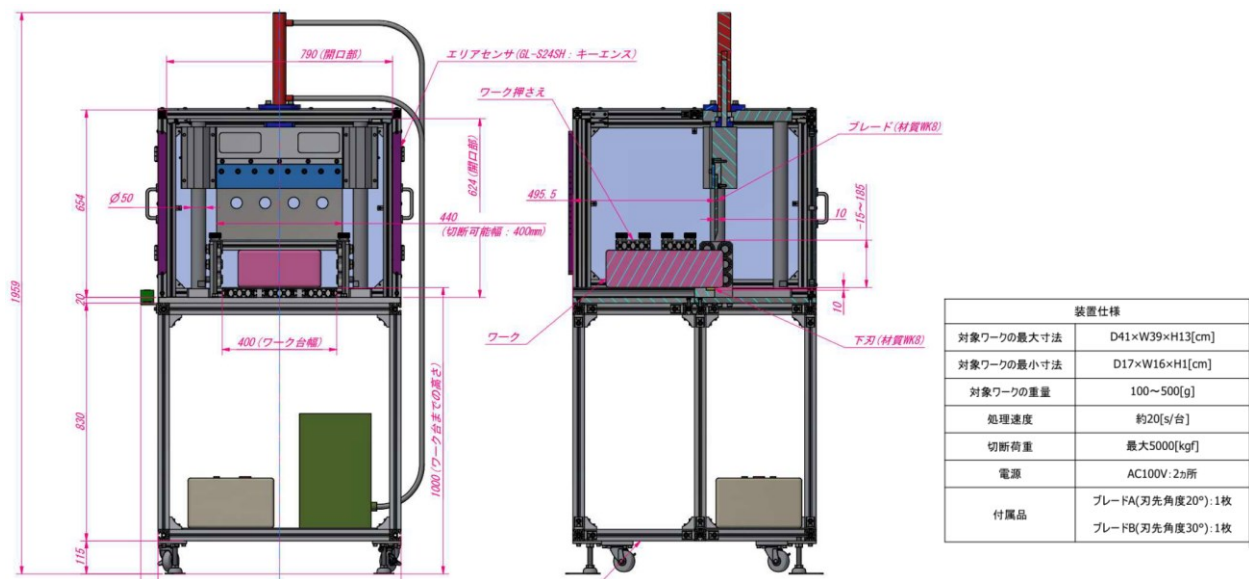


図 4-38 破砕前解体実験装置(プレス切断装置)

装置仕様	
対象ワークの最大寸法	D41×W39×H13[cm]
対象ワークの最小寸法	D17×W16×H1[cm]
対象ワークの重量	100～500[g]
処理速度	約120[s/台]
回転刃回転速度	最大8300[rpm]
電源	AC100V
付属品	回転刃A(ダイヤ,φ100mm):2枚 回転刃B(超硬,φ100mm):2枚 回転刃C(ダイヤ,φ150mm):2枚 回転刃D(超硬,φ150mm):2枚

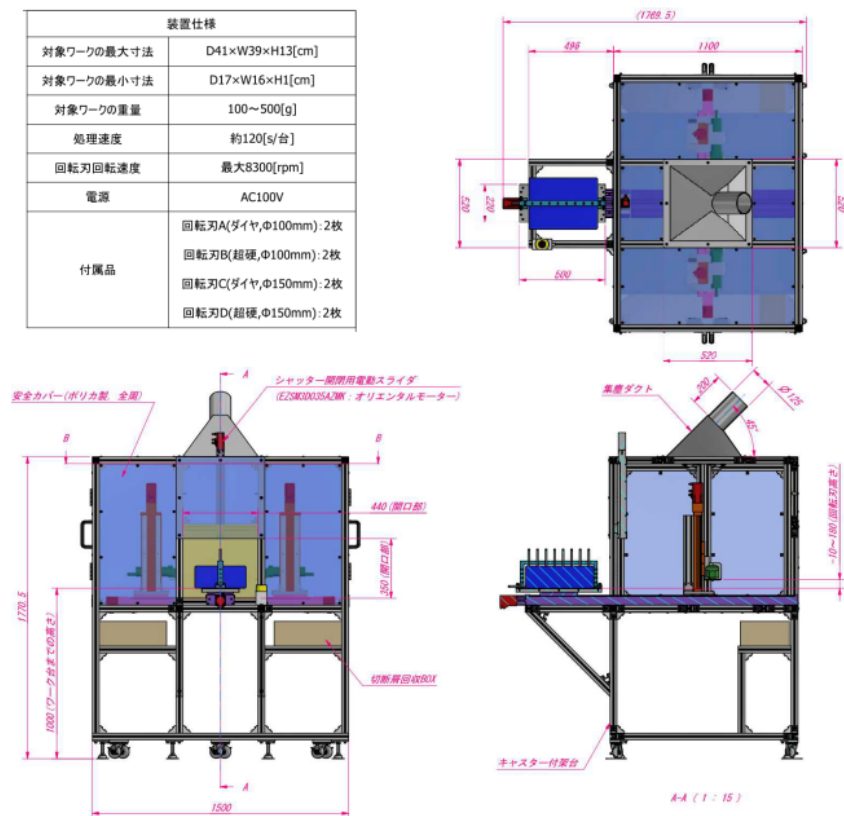


図 4-39 破砕前解体実験装置(回転刃切断装置)

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。

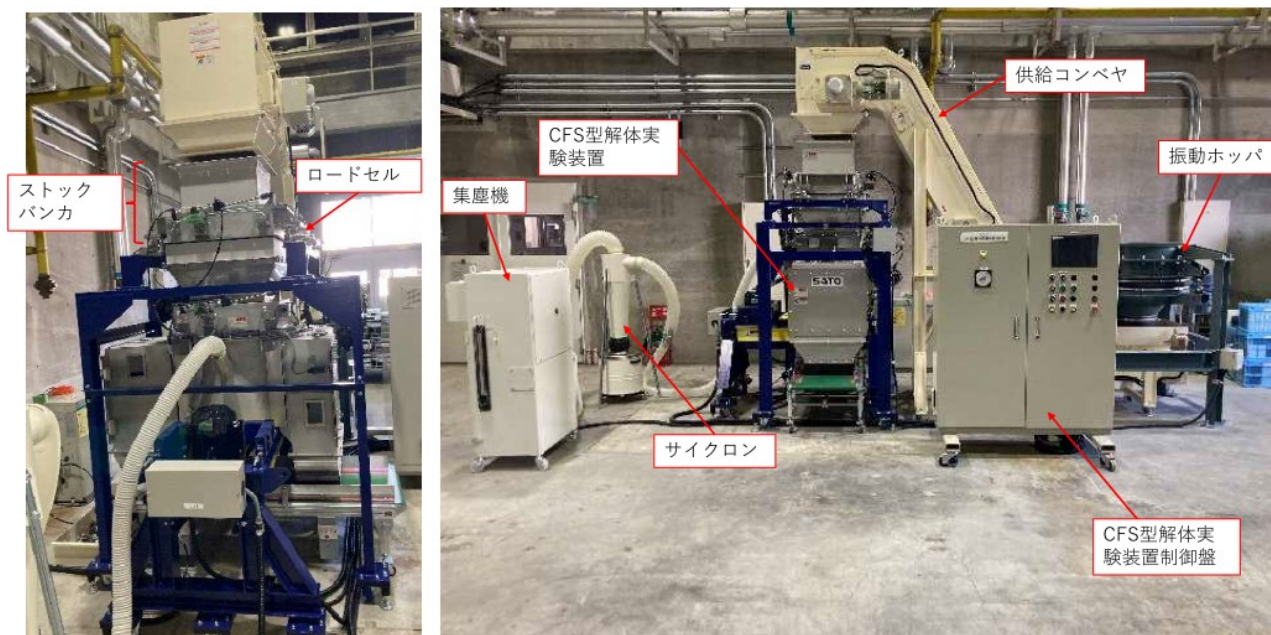


図 4-40 CFS 型解体実験装置(改良型 CFS)の外観

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、電池の占有率が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

破砕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

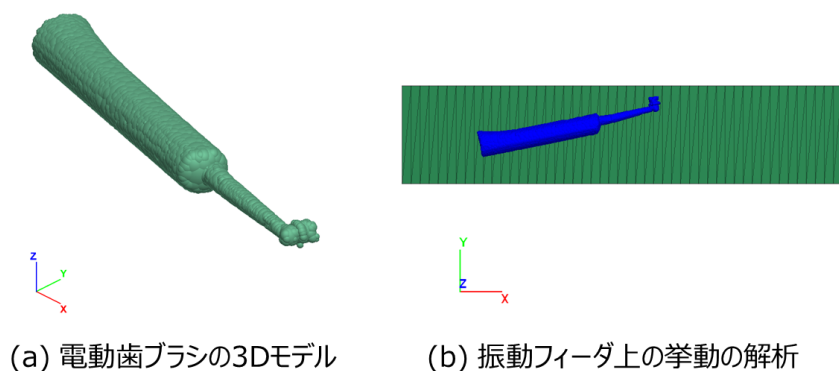


図 4-42 個別要素法による振動フィーダ解析

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。

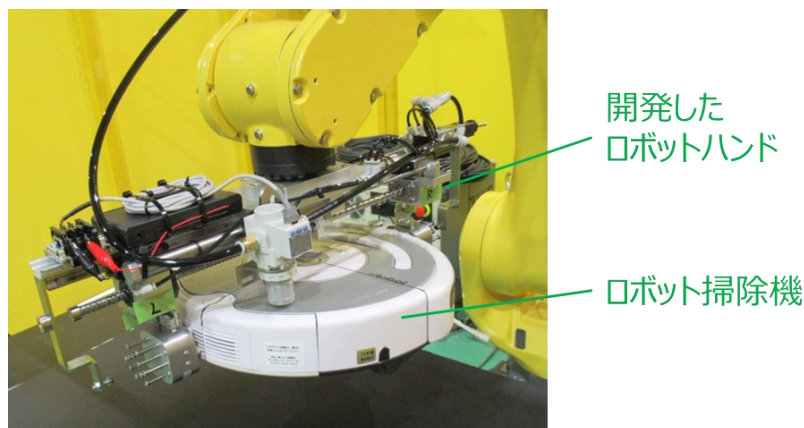


図 4-43 ロボットハンドによる把持実験

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。

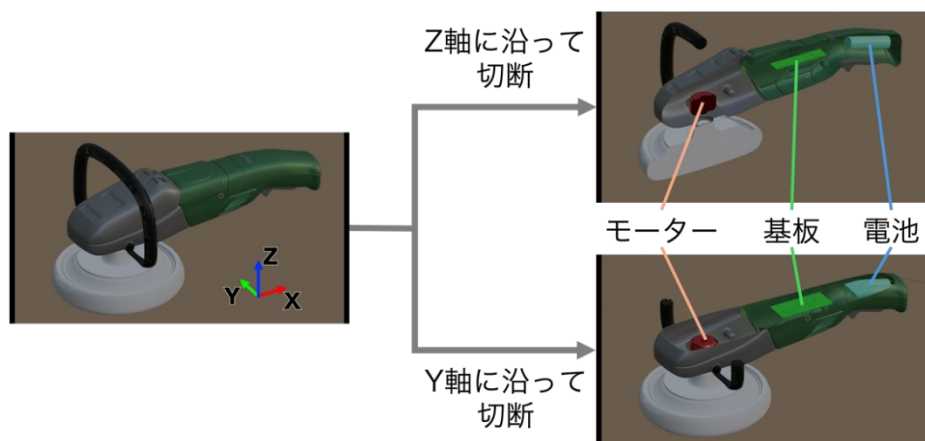


図 4-44 廃製品内部構造シミュレーション環境上での切断操作の実行

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。

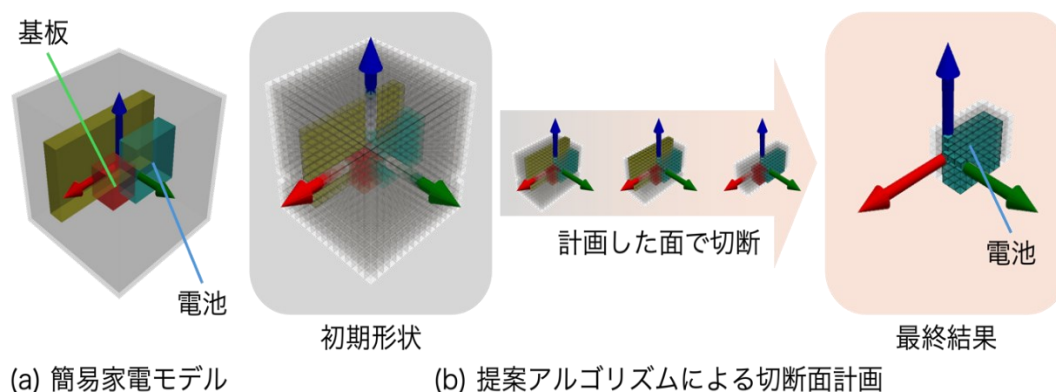


図 4-45 簡易家電モデルを用いた提案アルゴリズムの検証

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。

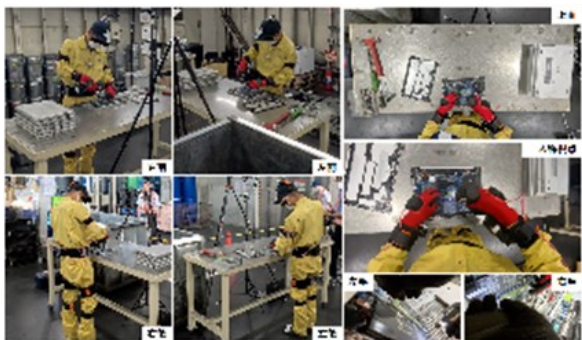


図 4-46 同一時刻・複数視点からの動作計測

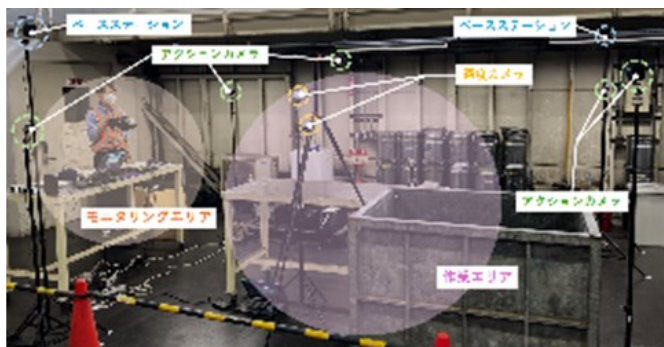


図 4-47 設置型センサ概要及び作業エリア

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

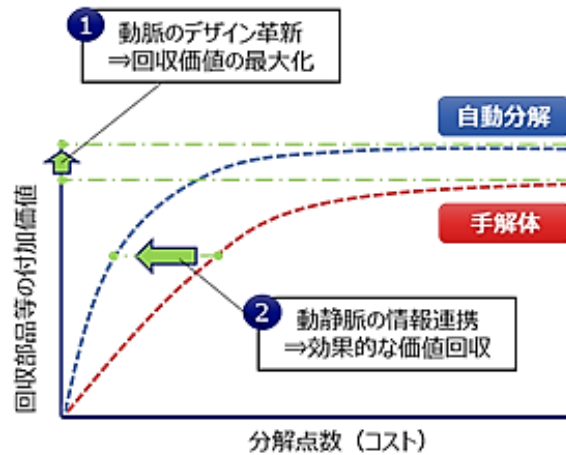


図 4-48 本研究における資源効率最大化の概念

(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)

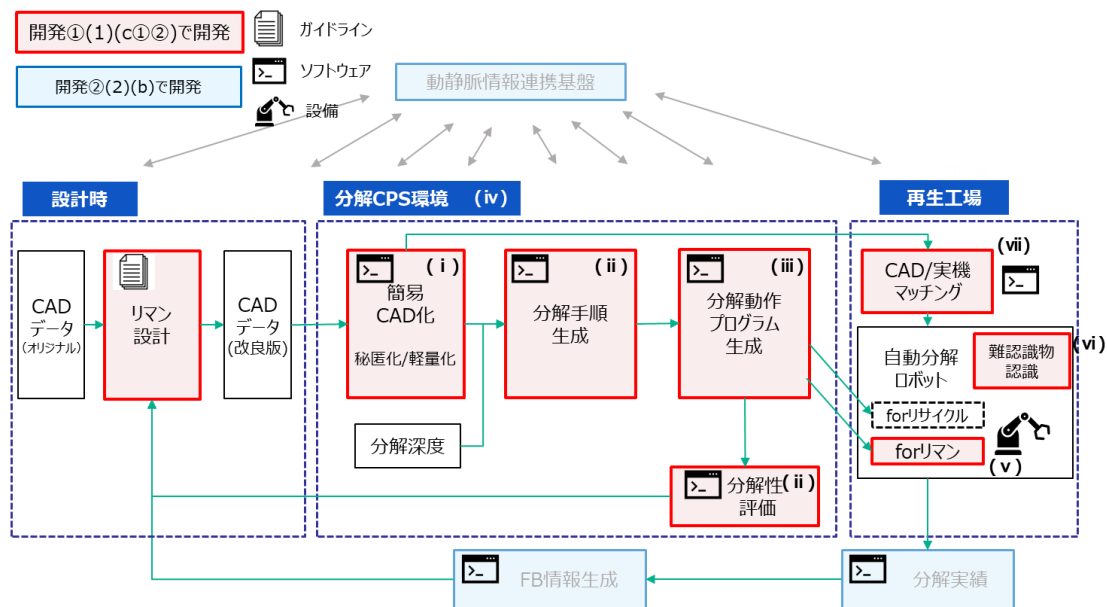


図 4-49 リマン対応分解システムの全体像

<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。

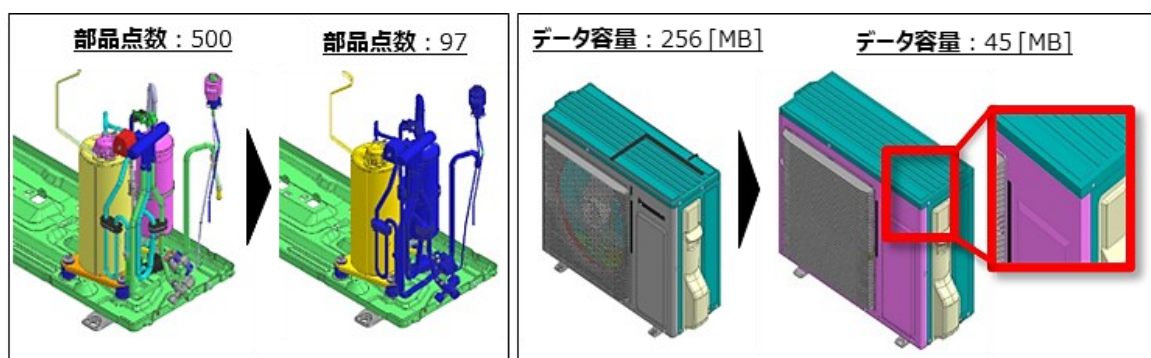


図 4-50 簡易 CAD 化(左：部品点数削減、右：プリミティブ形状化)

(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、 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。

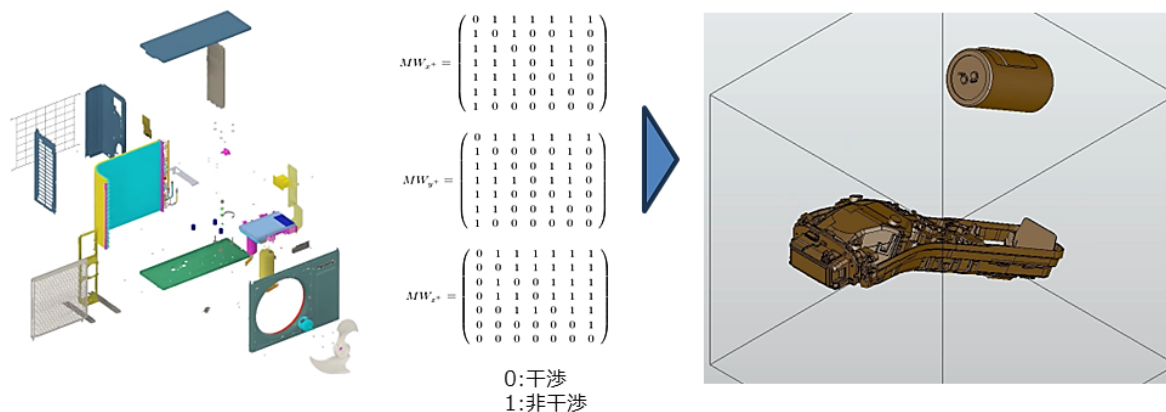


図 4-51 分解手順生成(左：部品間干渉抽出イメージ、右：生成した分解手順の可視化)

(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。

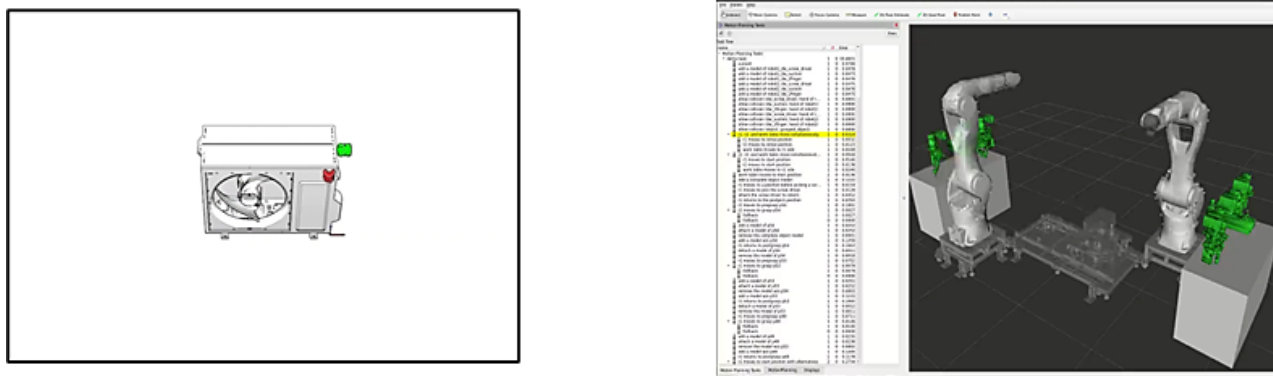


図 4-52 動作生成のための 2 種の計画
(左：接触計画(緑：OK、赤：NG)、右：軌道計画)



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)。

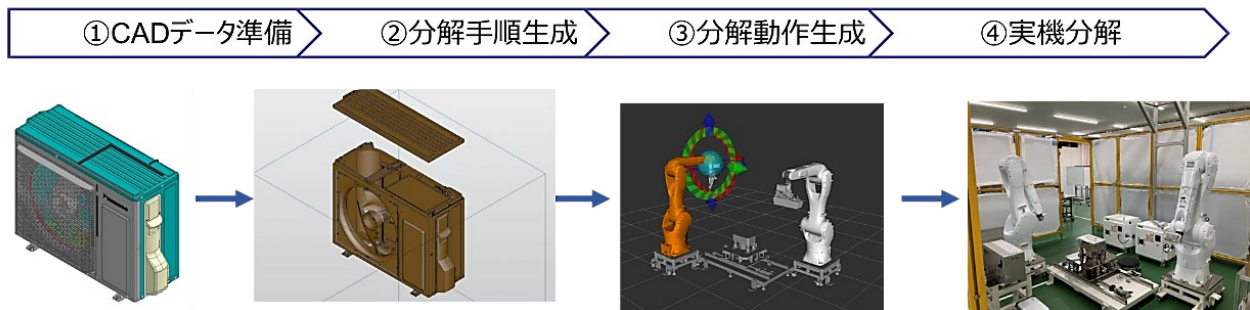


図 4-54 分解 CPS フロー

(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

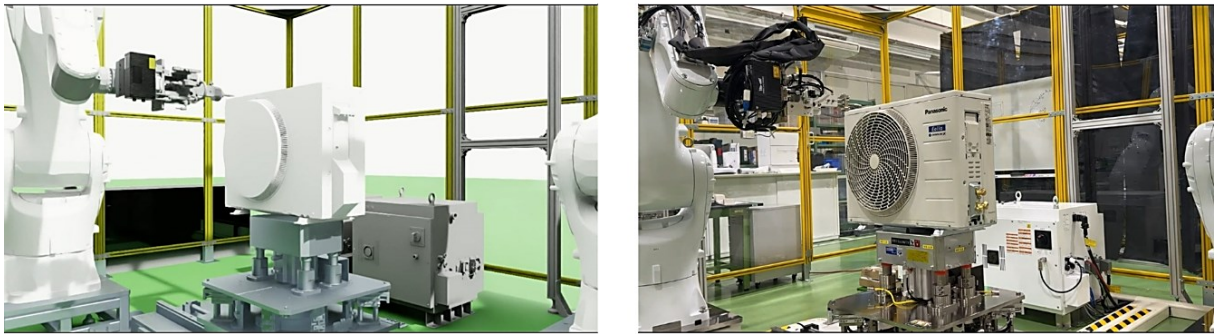


図 4-56 シミュレーションと実機の同期動作

(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。

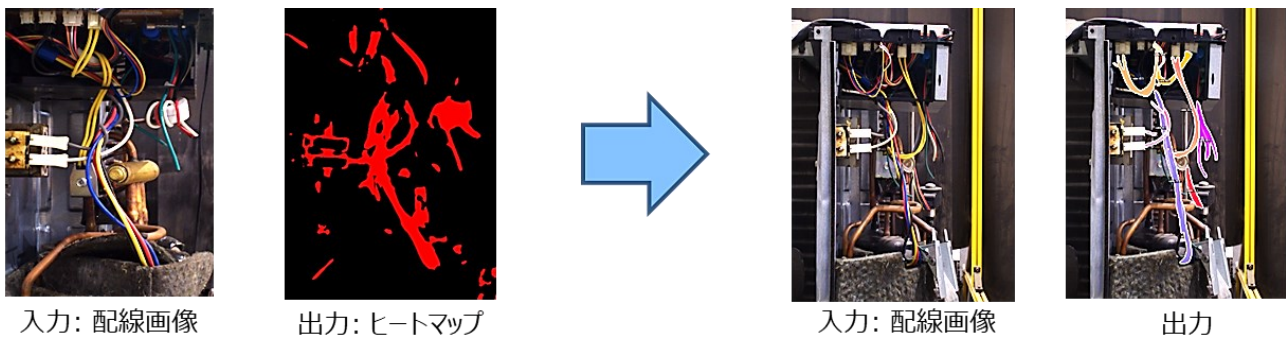


図 4-57 配線認識結果
(左：セマンティックセグメンテーション、右：インスタンスセグメンテーション)

(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。課題であるスナッフ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て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・部品の耐久性を確保する	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	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。	

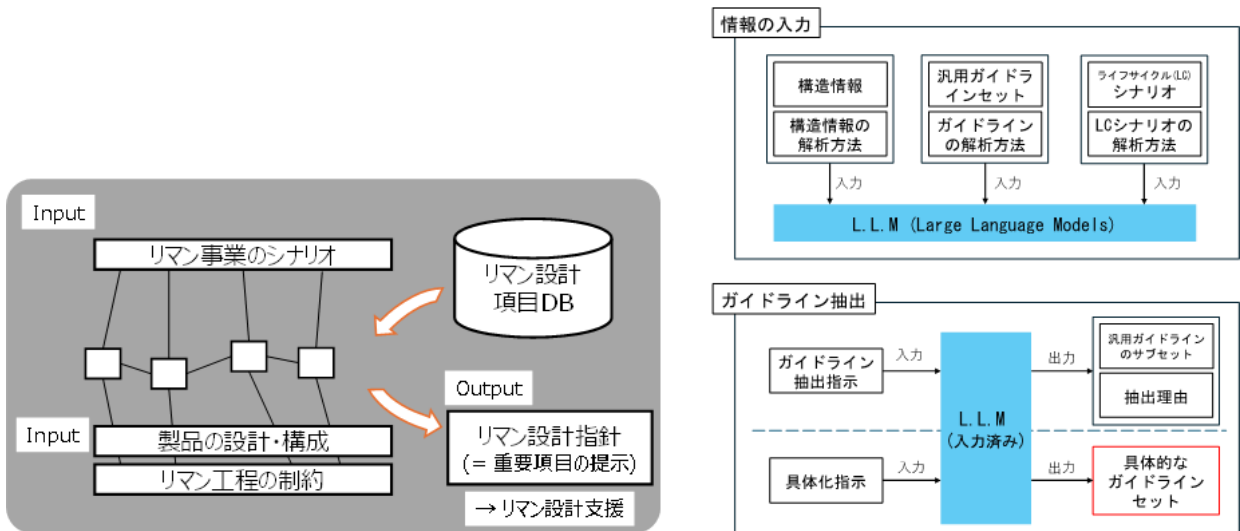


図 4-58 リマン設計ガイドラインのフレームワークのイメージ（左）、生成 AI を利用したリマン設計ガイドラインのフレームワーク（右）

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」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。

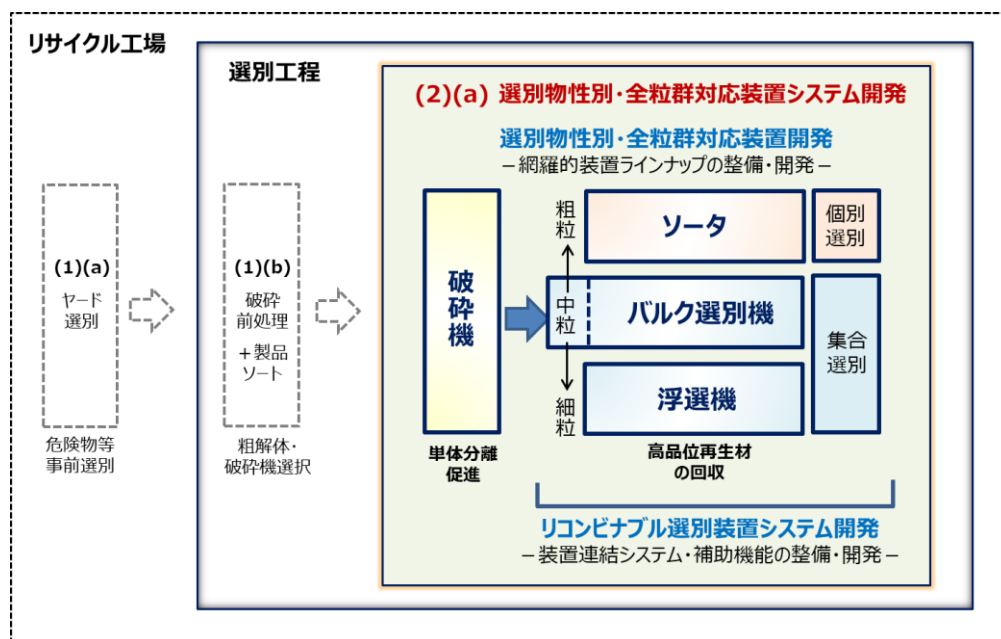


図 4-59 選別物性別・全粒群対応装置開発の位置づけ

(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り、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。

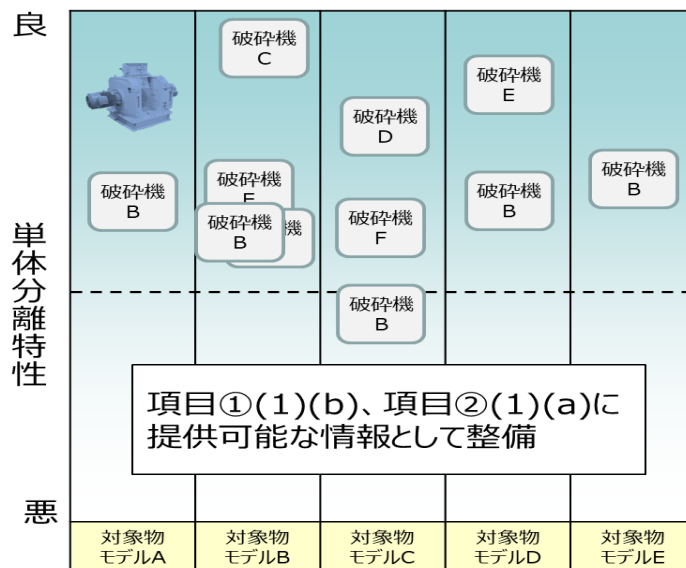


図 4-60 単体分離度最適化 MAP の図案化イメージ

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	
ビデオデッキ、DVDプレーヤー、HDDL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

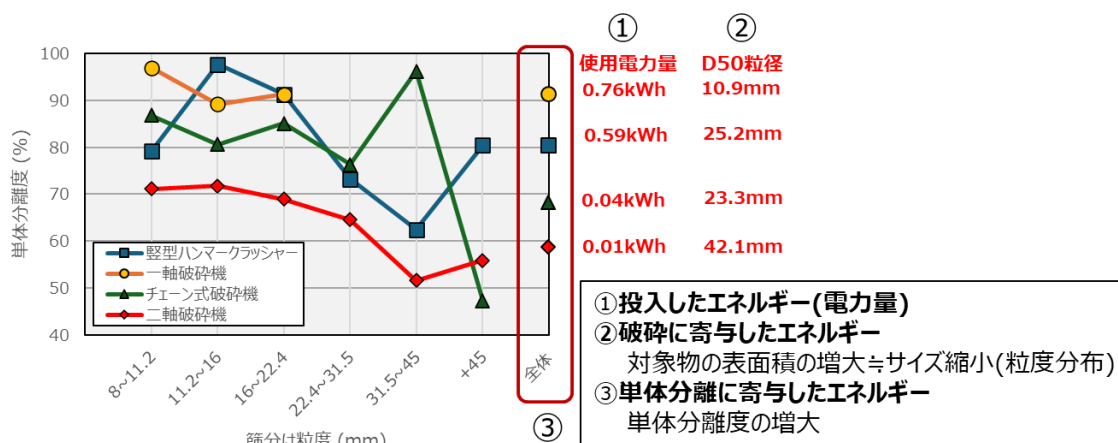


図 4-61 据置型ゲーム機 (PS3) の破碎試験結果

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。

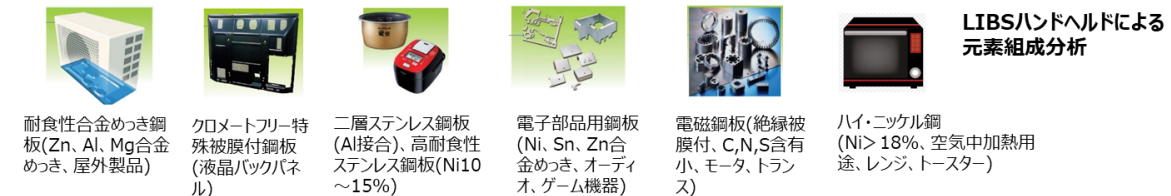
図4-62にMSS(鉄スクラップ向け)の開発イメージを示す。現状のリサイクル現場では、磁選回収される特殊鋼スクラップに対し、手選別で一部のモーターコアを除去するケースが見られる以外は、特に選別は行われていない。各種電気製品に使用される鉄鋼材には、表面に塗装、コーティング、めっき等が施された鋼板やステンレスが広く用いられている。また、Ni含有量が多く、耐熱性に優れたハイ・ニッケル鋼も用いられる。本項目で検討する鉄鋼材のソータシステムでは、LIBS分析による合金元素の検知をベースとし、LIBSソータの高度化(AI画像認識により最適な分析箇所を自動検出)、外観情報の活用、バルク情報の活用により、上述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

1) 製品情報の調査

製品種毎に使用される鋼材種とシュレッダー後のスクラップの外観形状を調査・DB化
(金城産業、産総研)



2) MSSシステム試作

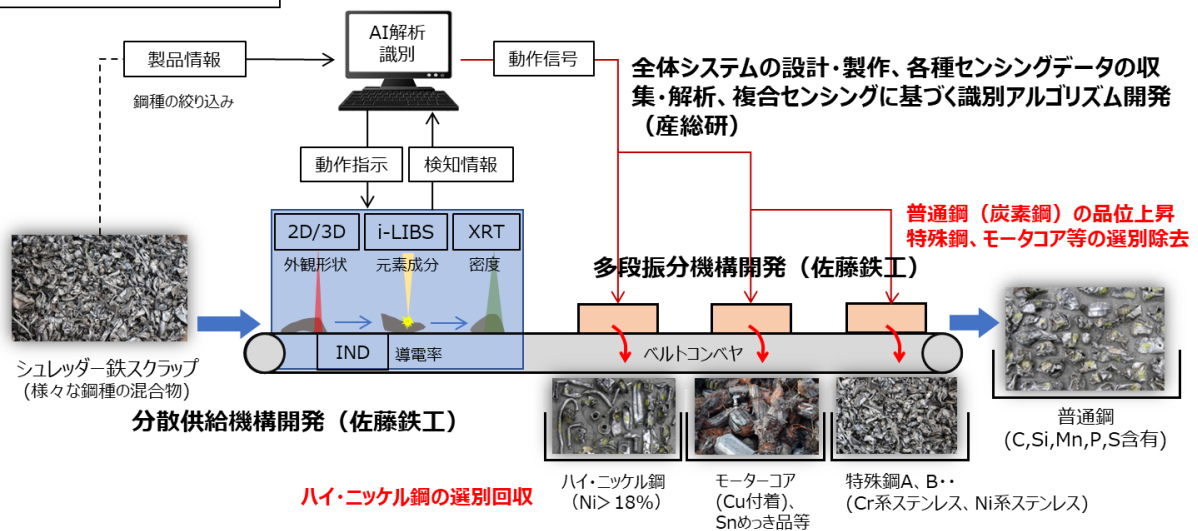


図 4-62 MSS(鉄スクラップ向け)の開発イメージ

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 O2 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。

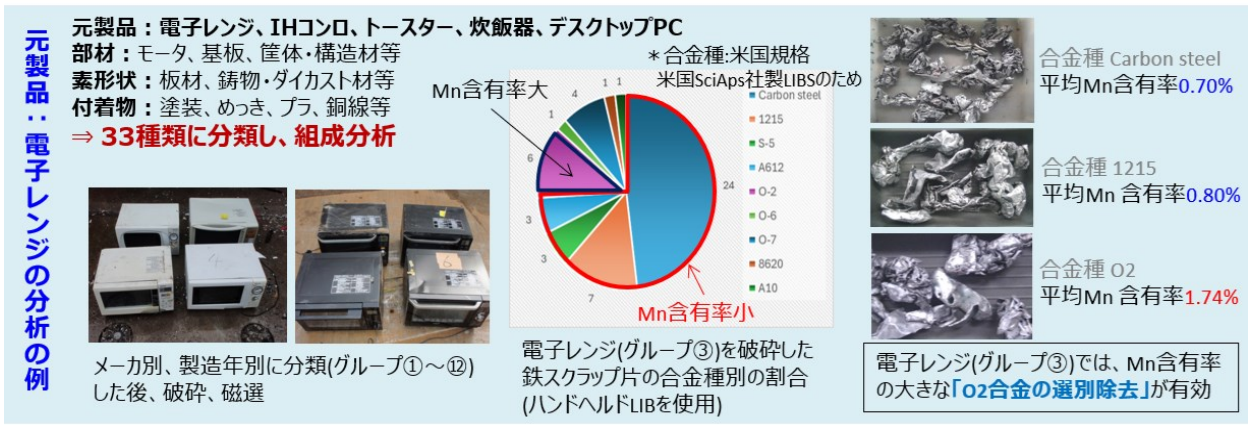


図 4-63 鉄スクラップの元素組成分析の例(元製品：電子レンジ)

2) MSS システムの製作

本項目では、2026年3月末までの中間目標として、「鉄スクラップを対象に1t/日の処理量に対応可能なMSS基本システム(2D/3D、i-LIBS、IND、XRT他)及び分散供給機構の開発」を設定し、装置開発を行っている。これまでにMSS基本システムの設計・開発を行い、図4-64に示す試作機を導入した。これは2D/3D、IND、i-LIBS(基本仕様)の各センサを搭載可能な専用コンベヤ(機長6000mm、有効幅600mm)であり、既に試運転を開始した。2025年度中にXRT他センサを追加する予定である。また、既にMSS基本システムに適合した分散供給機構を開発・導入済である。以上の状況より、本項目では中間目標を達成する見通しである。

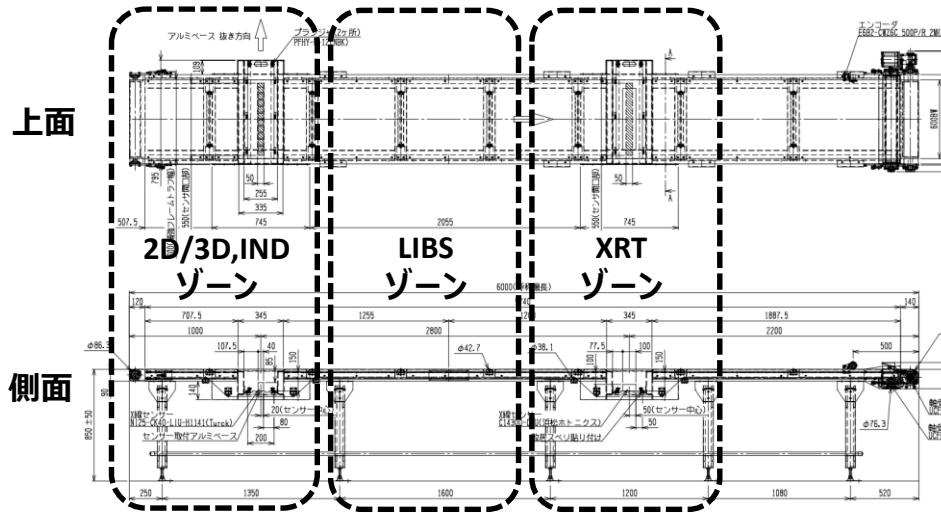


図 4-64 MSS 基本システム

・廃プラスチック選別等へのMSSの展開

本項目についてはNEDO事業「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」(2020～2024年度)の終了に伴い、2025年度より継承実施予定である。

■ 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。

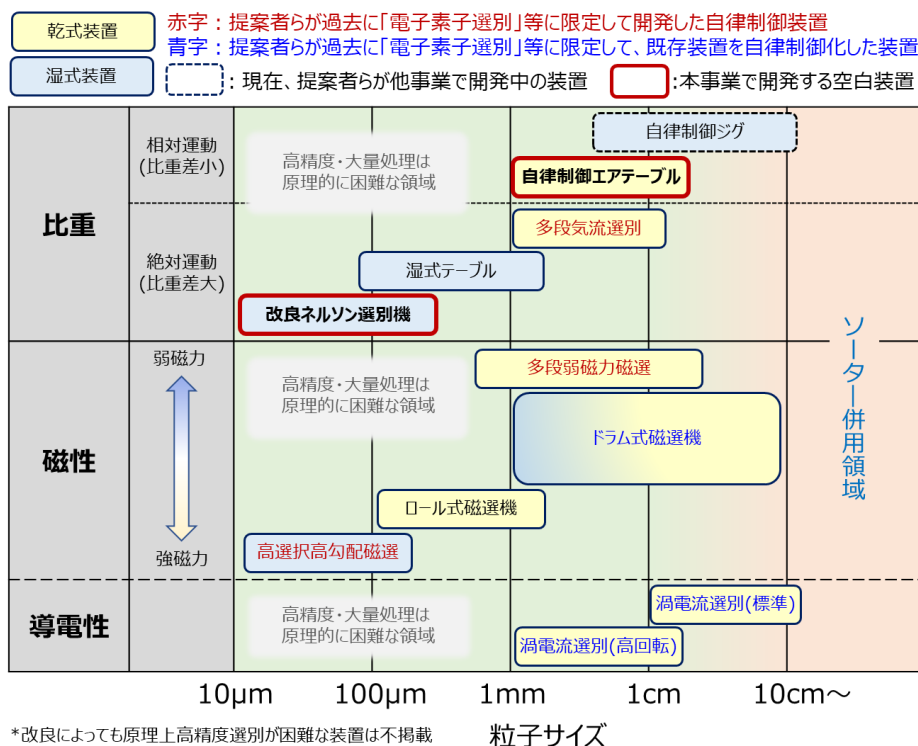


図 4-66 推定される高精度選別可能な中分類装置群と粒子サイズ領域

・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。

本項目の中間目標は、1t/日選別システムに対応可能な自律選別機群を整備し、形状整粒スクリーン試作機を開発することである。磁選機、渦電流選別機、气流選別機については自律制御に対応した装置を整備済みであり、形状整粒スクリーンも試作機の試験、課題抽出、改造を経て1t/日の装置を製作する予定であり、2026年3月までに中間目標を達成可能な見込みである。

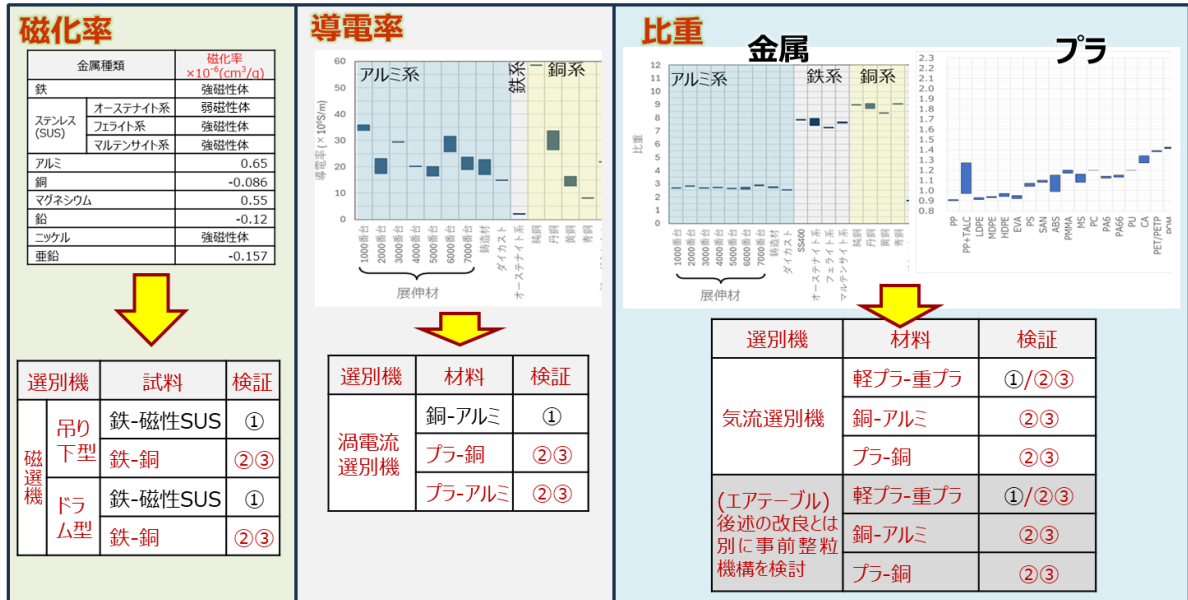


図 4-67 対象選別機に応じた試料の選定

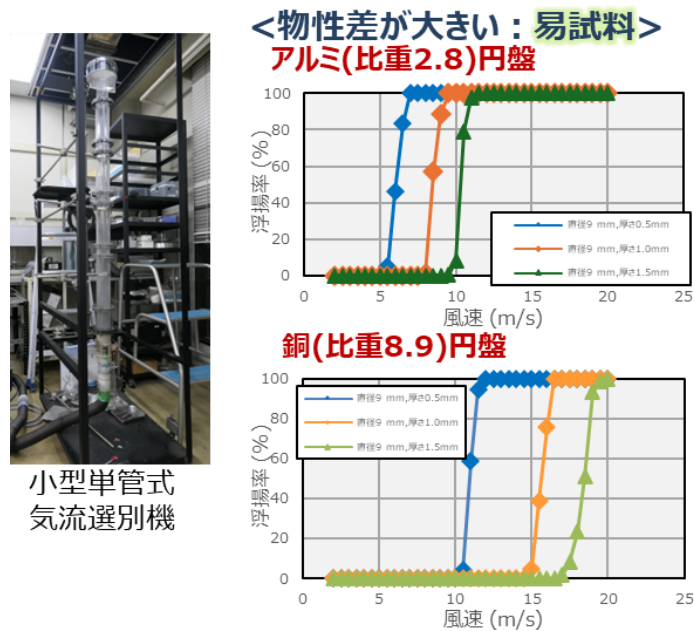


図 4-68 气流選別の選別データ取得例

<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



渦電流選別機

ベルト速度:40m/s,
マグネットロータ回転数:1000rpm

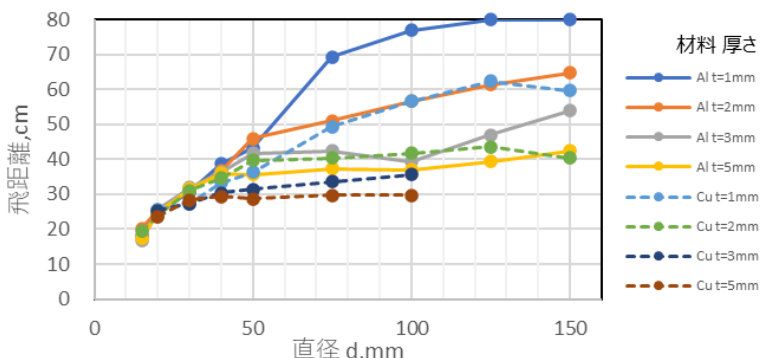
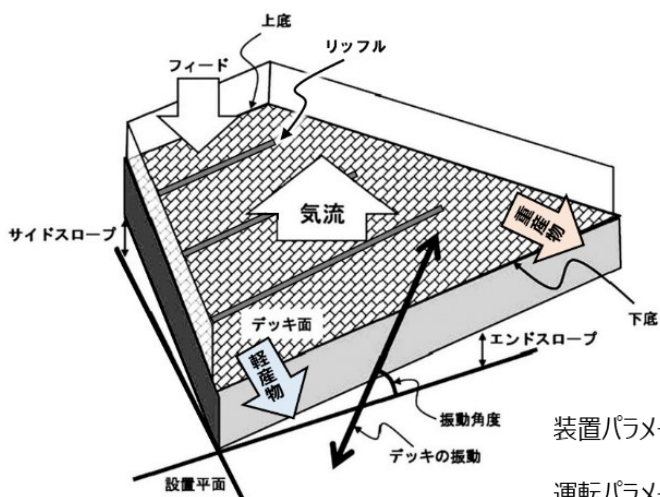


図 4-69 渦電流選別機の選別データ取得例

・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、リップル数、リップル長さ、リップル形状、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エアテーブルが 0.0446m²、SSS ダイナミクス社製エアテーブルが 0.1376m² であり、SSS ダイナミクス社製エアテーブルの方がポケットエアテーブルより 3.1 倍大きい。両エ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。ポケットエ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 ダイナミクス社製エアテーブルの方がポケットエアテーブルより 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エ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エアテーブルの自律制御を実現する。

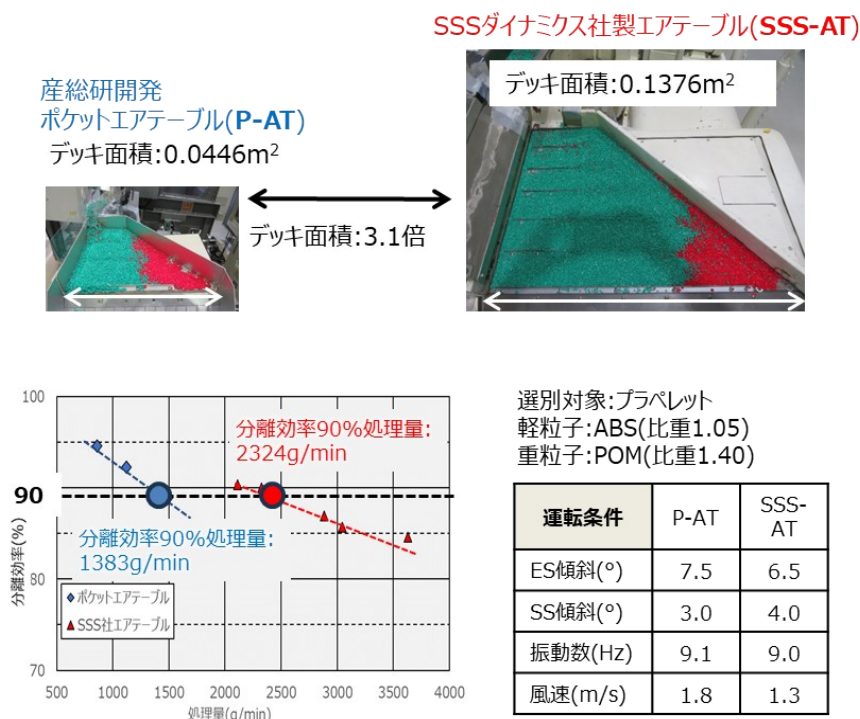


図 4-71 エアテーブルにおけるデッキサイズと処理量の関係

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

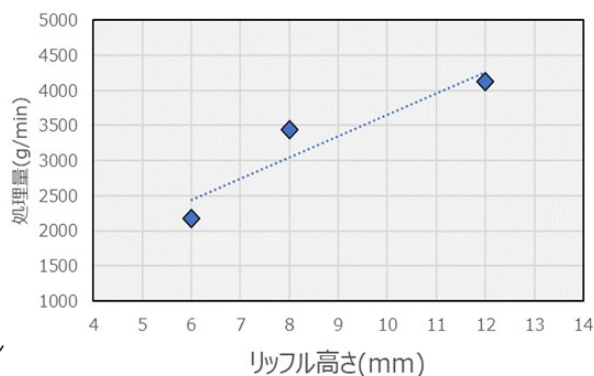


図 4-72 リップル高さと分離効率 90%以上を維持可能な処理量の関係

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砕粒子を扱うため、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 にプラスチック破砕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)の破砕片を示しており、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。

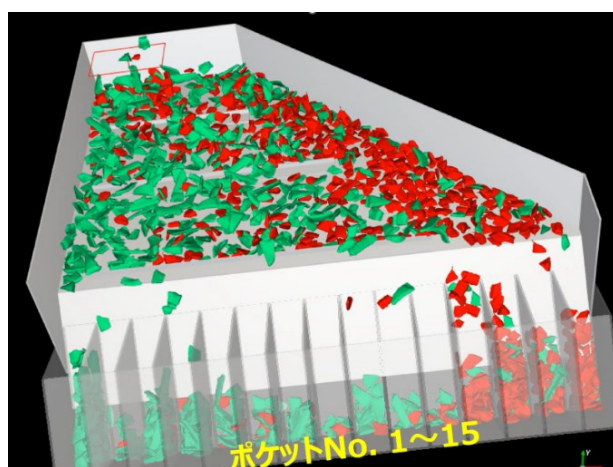


図 4-73 粒子運動シミュレーション例(プラ破砕片)

・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。

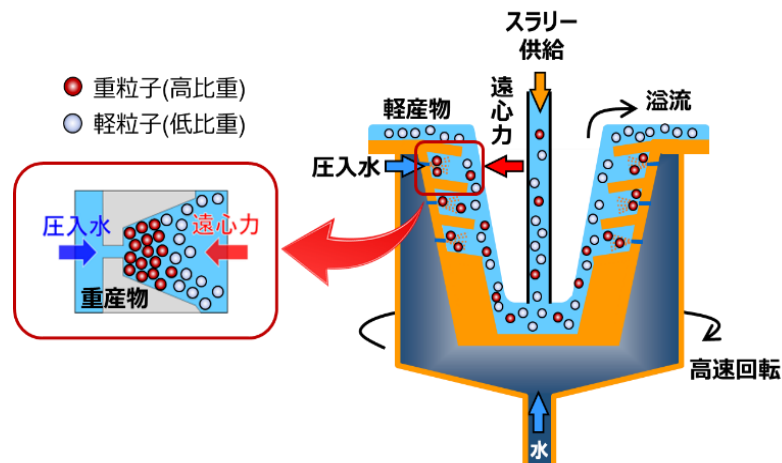


図 4-74 ネルソン選別機の概要

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圧、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、回転速度と圧入水圧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增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。

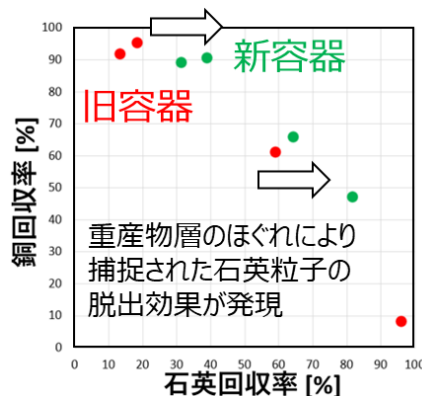


図 4-75 新容器使用による分離効率の向上

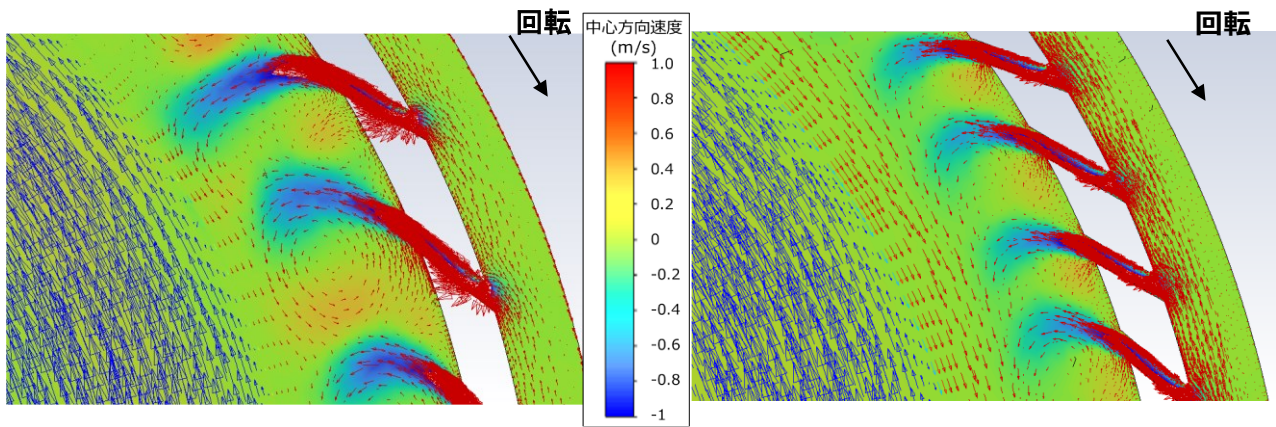


図 4-76 窪み内水流シミュレーション結果(左：旧容器、右：新容器)

■ 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。

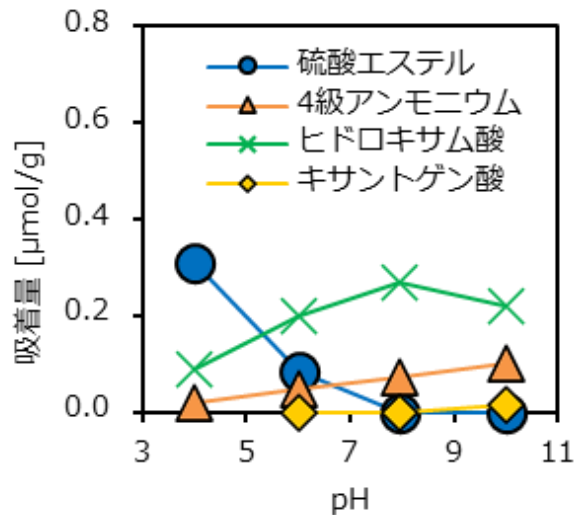


図 4-77 捕収剤吸着量と pH の関係

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。

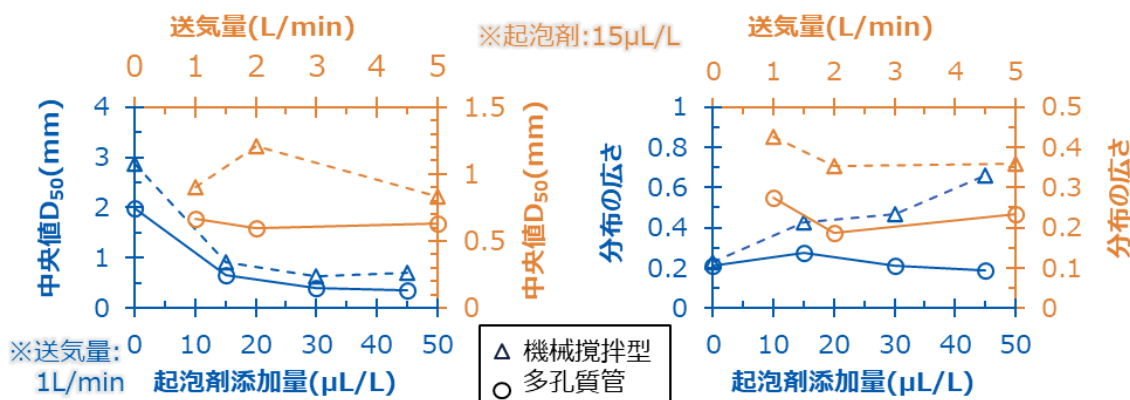


図 4-78 気泡径分布測定結果

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的设计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。

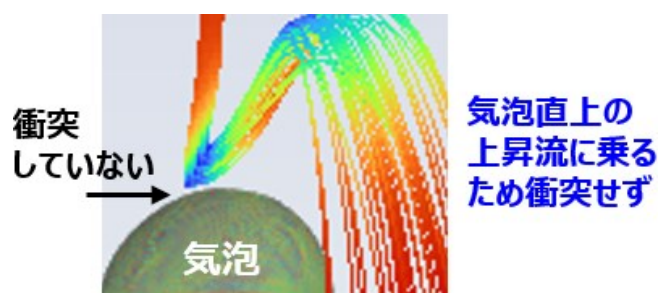


図 4-79 粒子が気泡直上の流れに乗る様子

(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

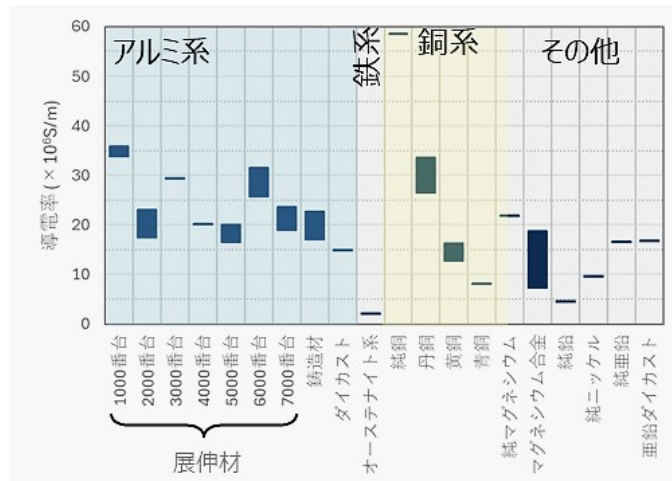
多種の対象物を大量処理するバルク選別機群(磁選や比重選別等)は、装置に検出機能はなく、事前に全対象物を分析することも事実上困難なため、詳細組成が不明なまま選別を行わなければならない。本研究で開発する自律制御エアテーブルも、流動状態を検出するだけで対象物の組成は認識できない。しかし、選別対象の情報が全く無ければ、装置を対象物に合わせて最適に制御することは理論的に不可能である。そこで、本項目では、選別機に投入される粒子群の組成・物性を推定しつつ、バルク選別機群を最適に自律制御する方法を開発することを目指す。本研究で対象とする粒子群は貴金属・銅、レアメタル、アルミ、鉄、プラスチックなどの素材であり、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、選別精度に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易い	
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	帯電列	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

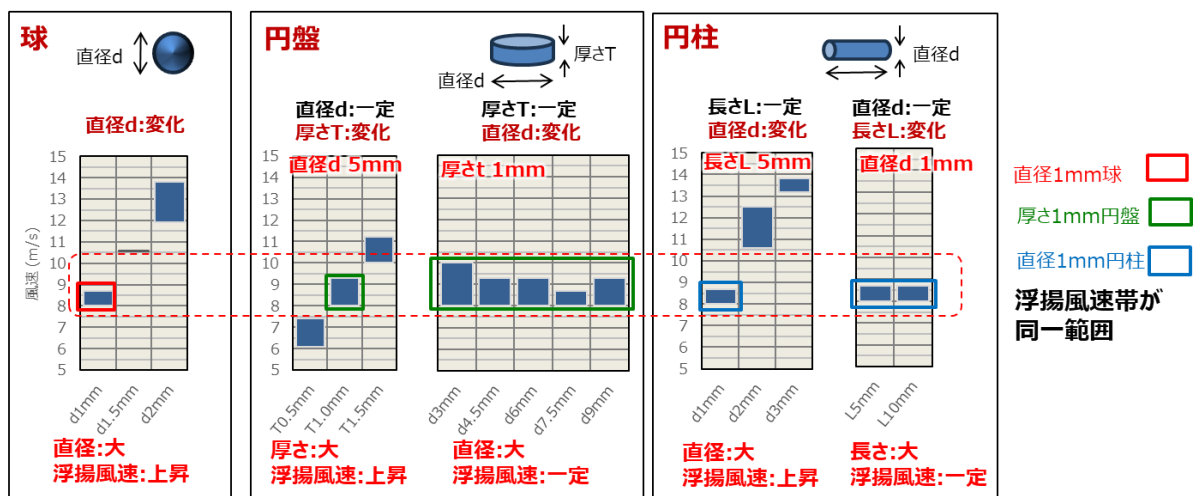


図 4-83 集合選別で利用する粒子性質と選別精度に及ぼす影響

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、各バルク選別機の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。

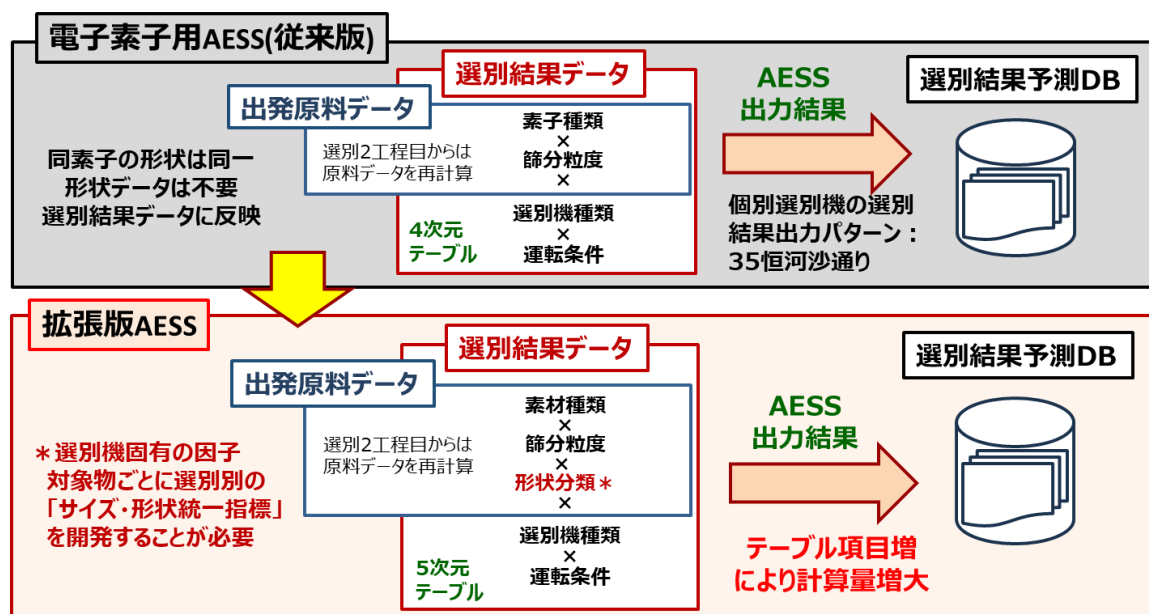


図 4-84 拡張版 AESS の概要

(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。

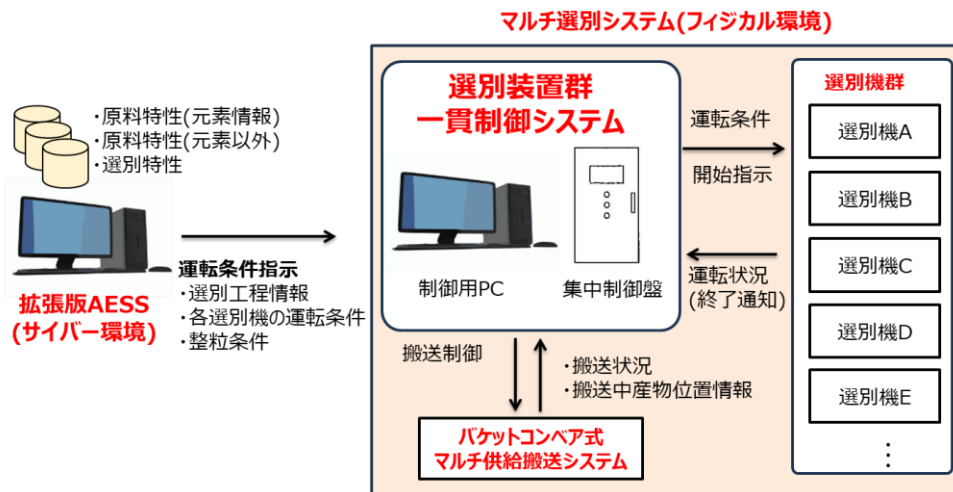


図 4-85 選別装置群一貫制御システムの概要

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

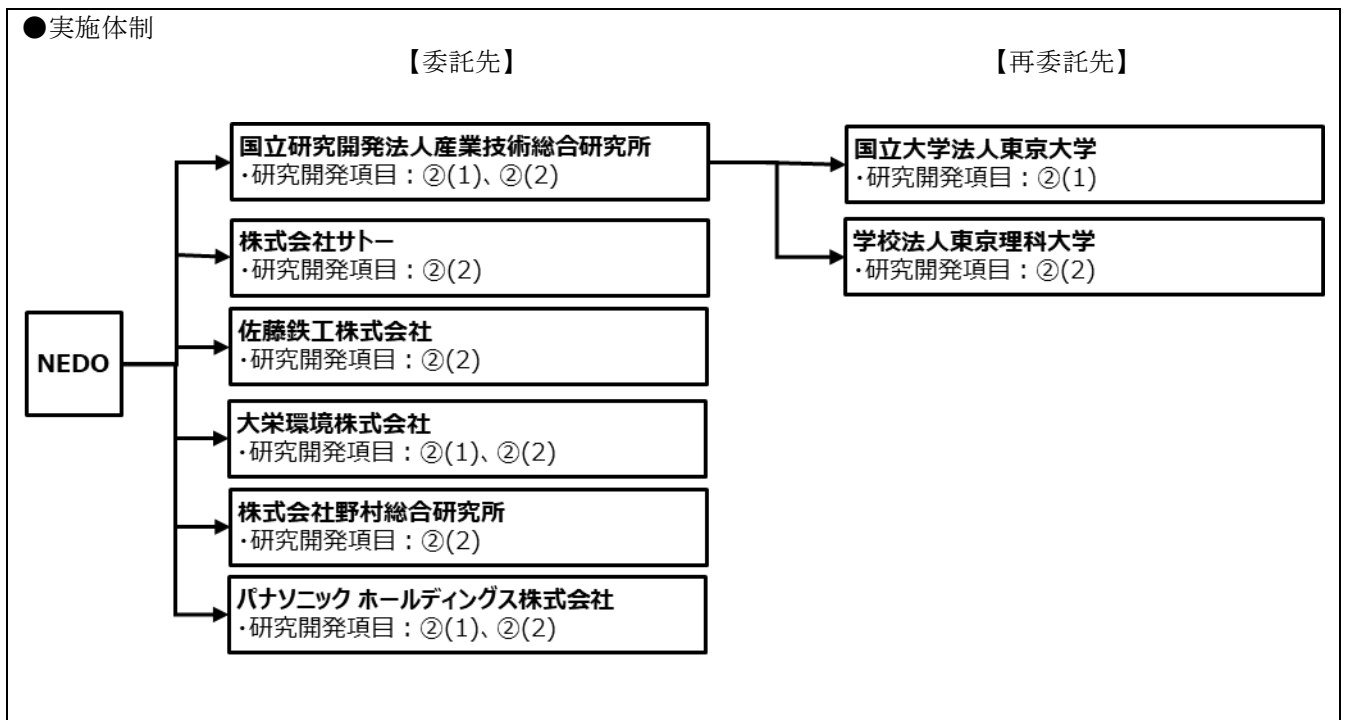
の生成過程がある程度限定的であるため、それぞれの鉱石に対する製錬技術はほぼ構築できている。一方、都市鉱山由来の原料については、新たな製品製造技術が導入されるたびに、銅・鉛・亜鉛の別でいう単一の製錬技術のみでは対応できない素材構成や、非鉄金属全般として回収不能な元素、製錬精製工程に悪影響を与える製錬忌避物質への対応に迫られている。リサイクル原料中の5大素材の中で最も価値の高い銅・貴金属については、既存の天然資源を扱う銅製錬で対応するものの、主に都市鉱山由来の製錬忌避物質については一般化されていない。また、レアメタル各種については、湿式処理工程における忌避物質情報はほとんど開示されていなかった。そこで、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。		
<p>●背景・目的・プロジェクトアウトカム目標との関係</p> <p>[背景]</p> <p>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ー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。</p> <p>[目的]</p> <p>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。</p> <p>[プロジェクトアウトカム目標との関係]</p> <p>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。</p> <p>●アウトプット目標</p> <p>[中間目標]</p> <p>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。</p> <p>[最終目標]</p> <p>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。</p>			



(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。

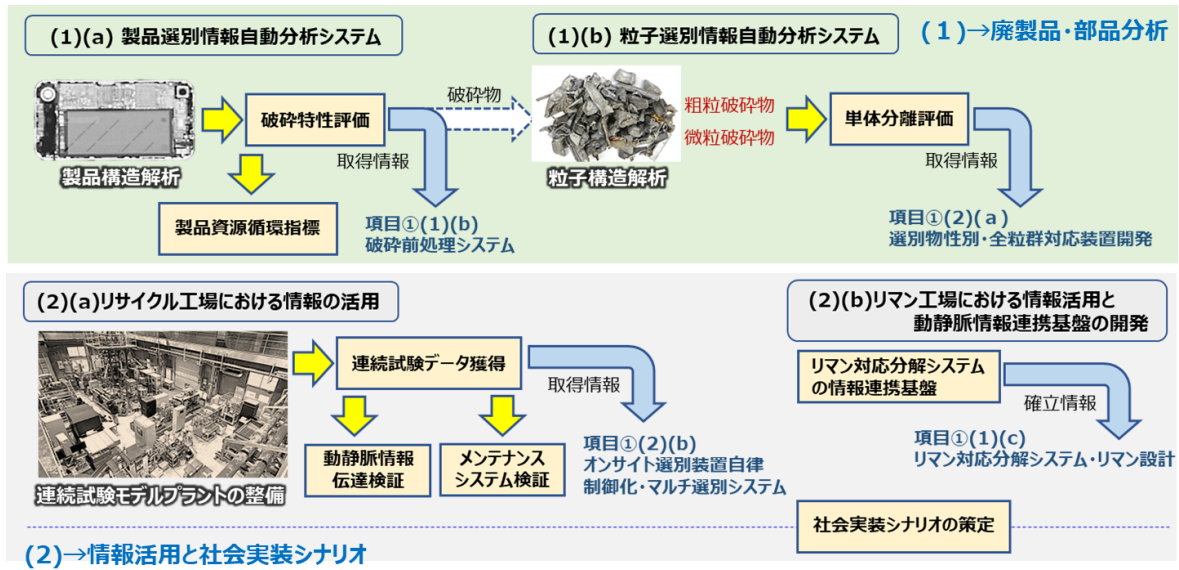


図4-86 研究開発項目②における個別開発項目の構成

(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機種の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。

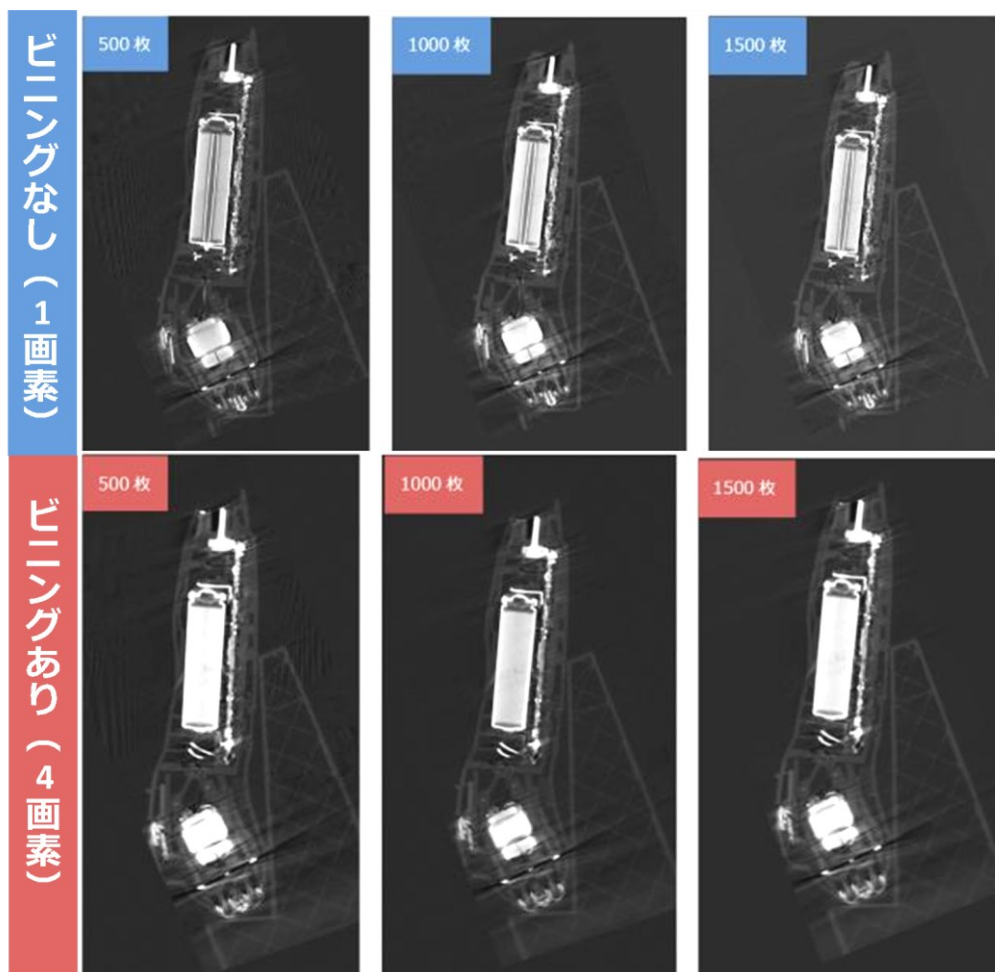


図4-87 CT画像撮影条件の検討

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 of 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。

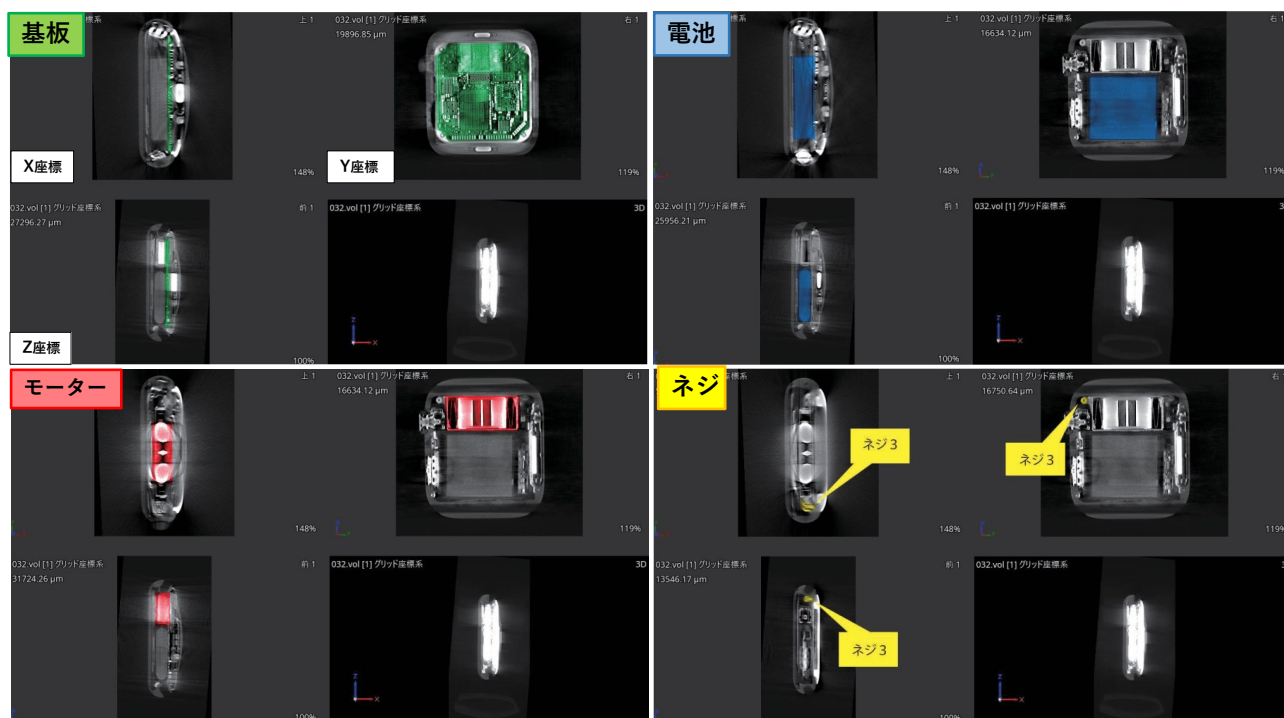


図 4-88 CT 画像上への各部品の図示の例(スマートウォッチ)

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。

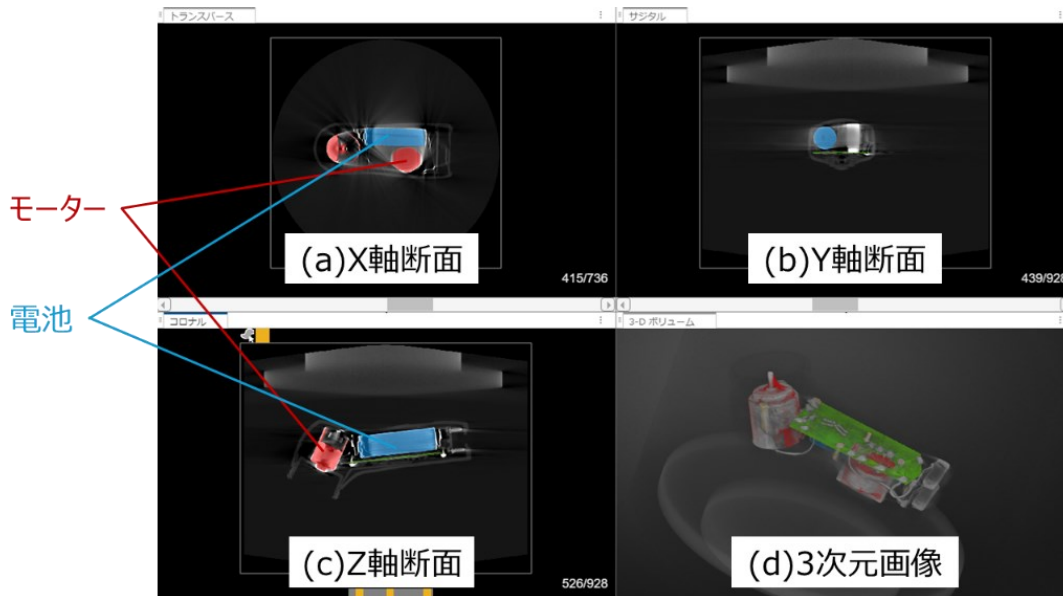


図 4-89 X 線 CT 撮影データのアノテーション

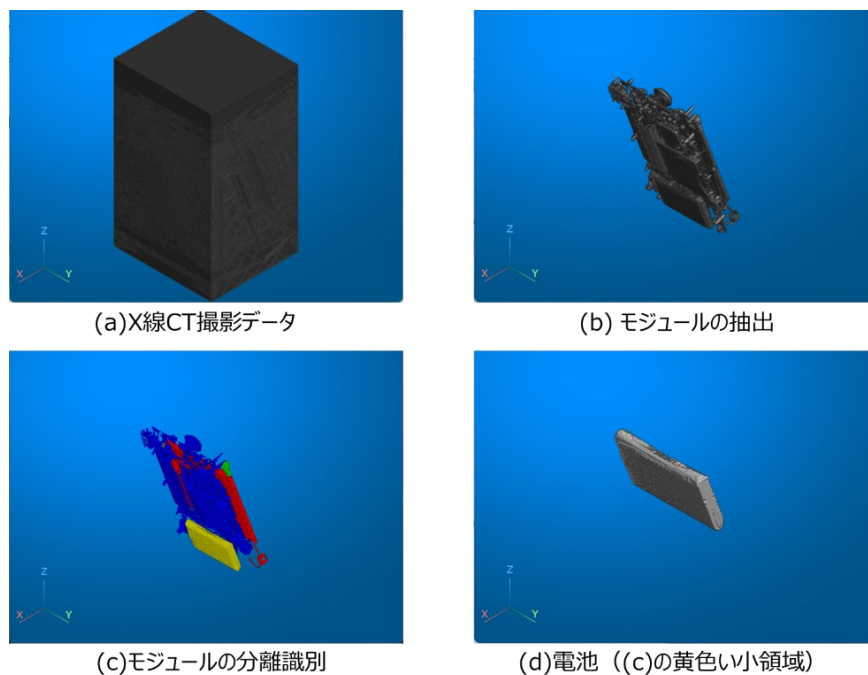


図 4-90 ルールベースでの部品識別手法

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。

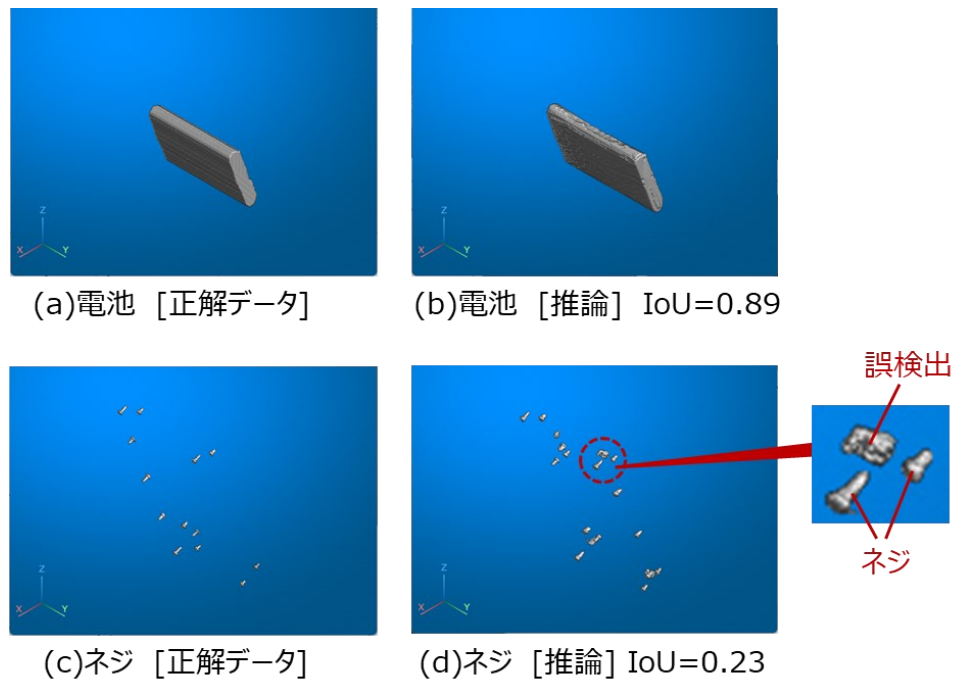


図 4-91 携帯ゲーム機からの部品検出結果

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。

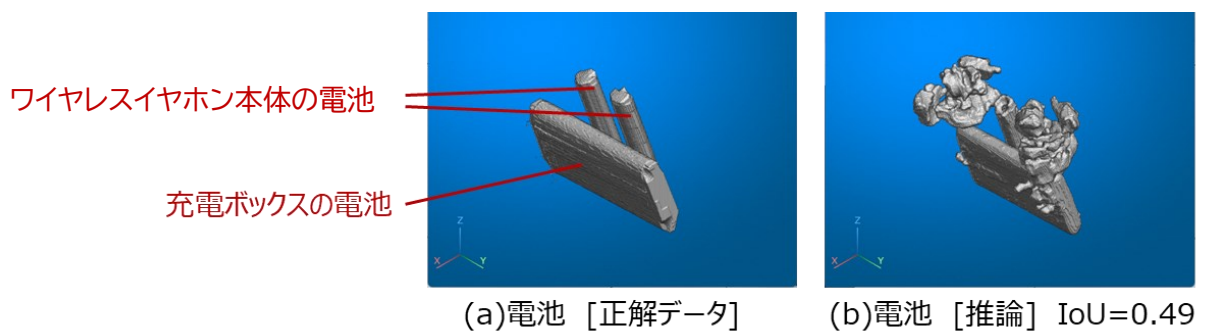


図 4-92 ワイヤレスイヤホンからの部品検出結果

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。

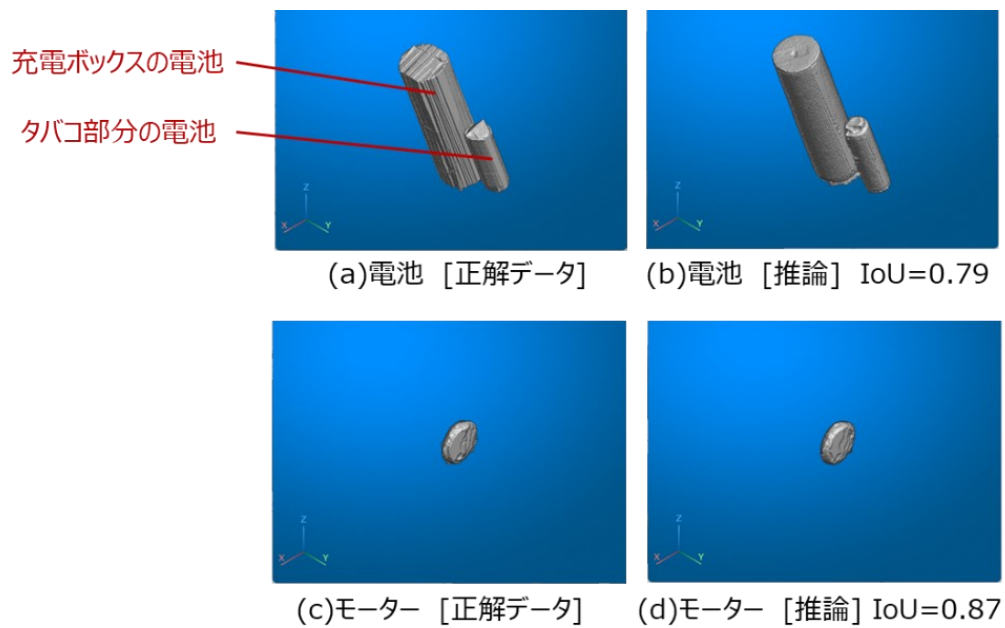


図 4-93 電子タバコからの部品検出結果

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。

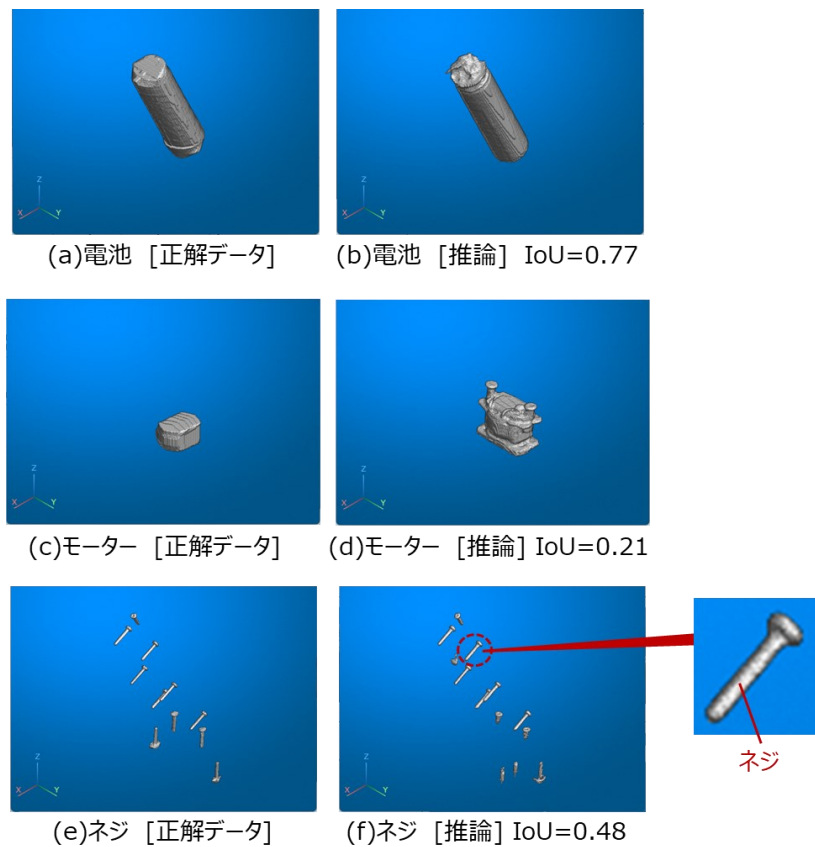
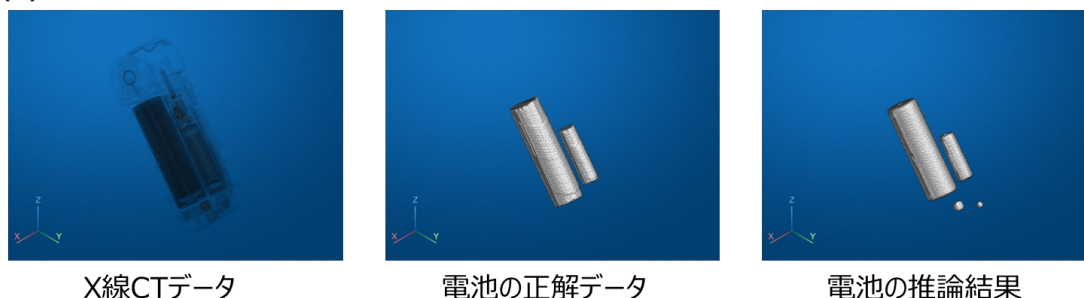


図 4-94 シェーバーからの部品検出結果

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



(b) 携帯ゲーム機

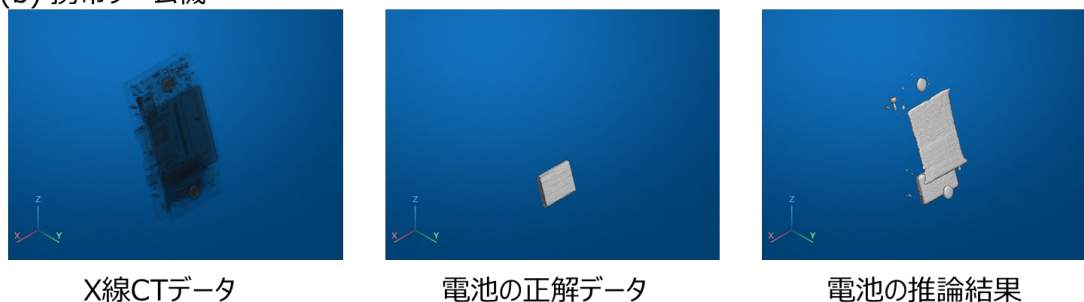


図 4-95 深層学習による推論結果

2026年3月末までに、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、低炭索性、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。

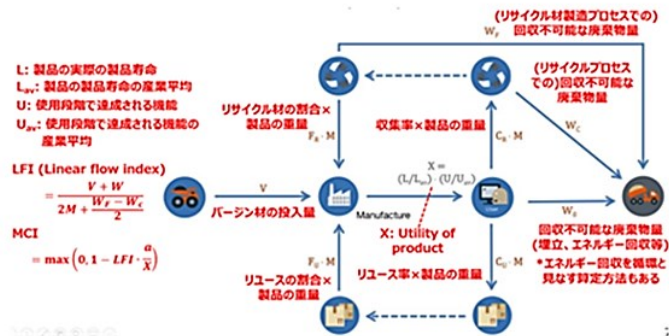
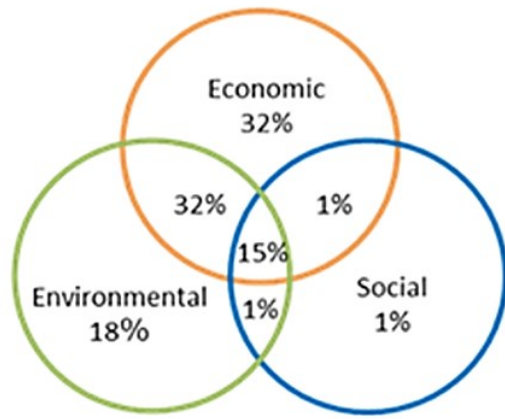
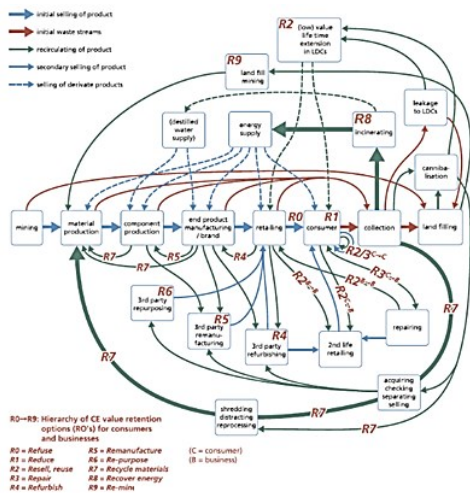


図 4-96 調査した指標の例

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

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なわれてきた。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、1mm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。

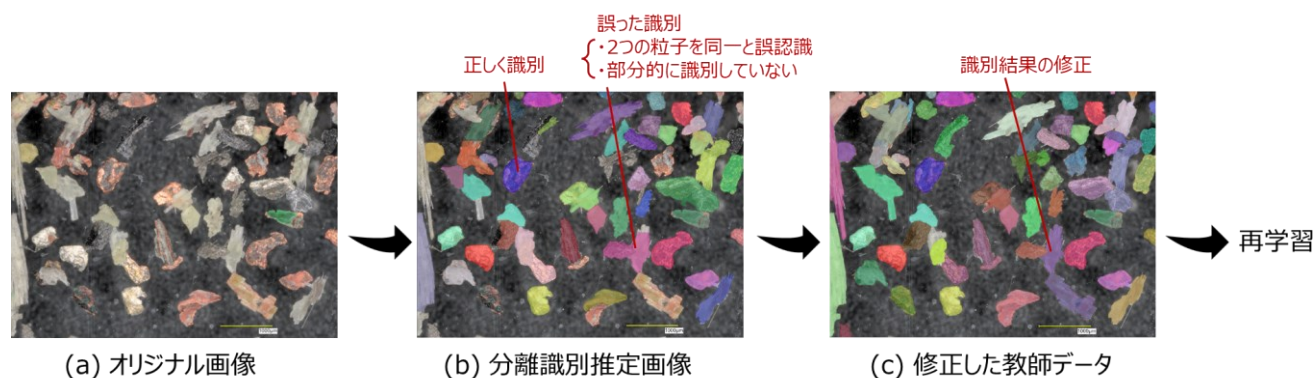


図 4-99 深層学習による粒子分離識別

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。

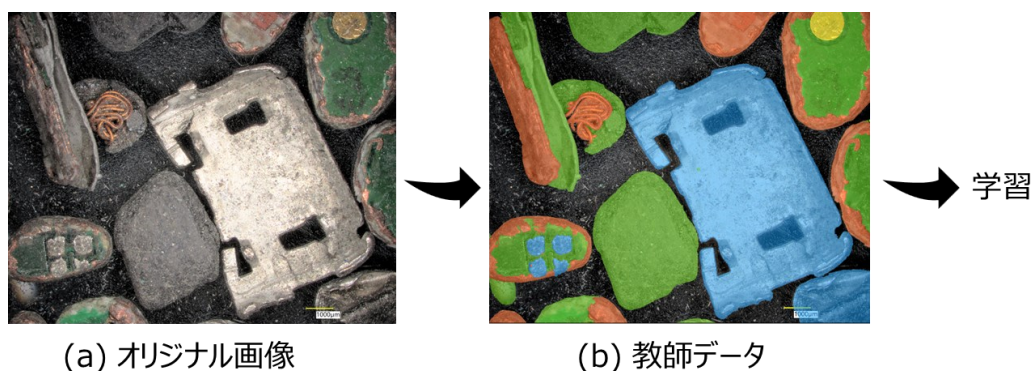


図 4-100 深層学習による2次元単体分離情報取得

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。

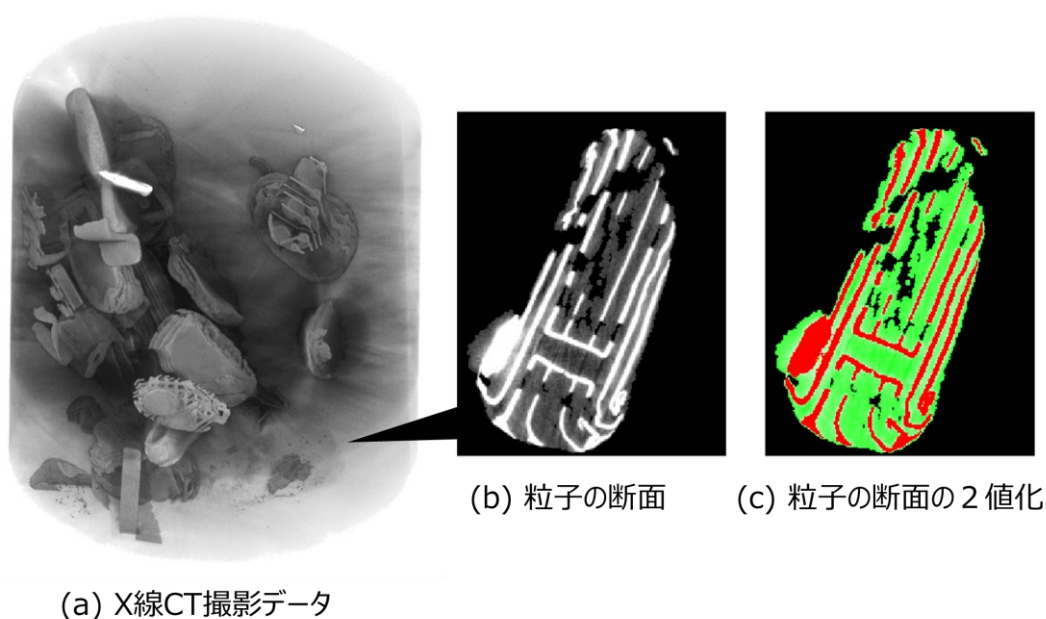


図4-101 X線CTによる2次元及び3次元の単体分離情報分析

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スキャンデータを使用する。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。

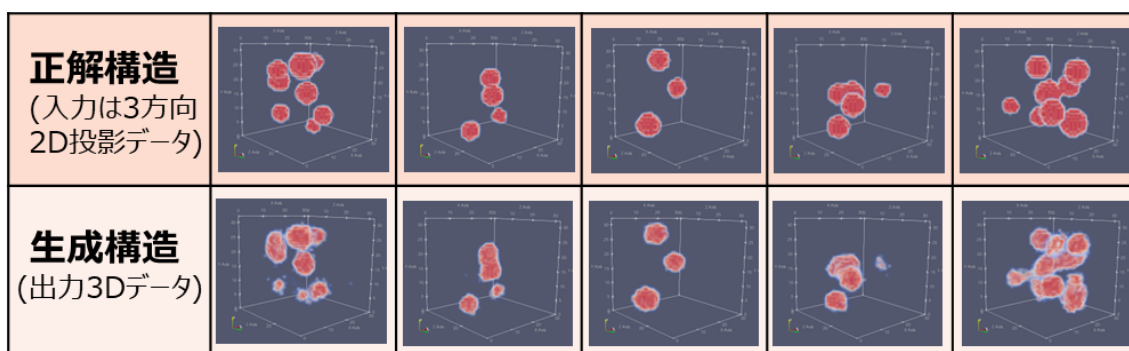


図 4-102 深層生成モデルによる単純な3次元構造の推定例

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スキヤ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	0.15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)
塩じ用安定剤	鉛(Pb)、バリウム(Ba)、亜鉛(Zn)、カルシウム(Ca)、錫(Sn)

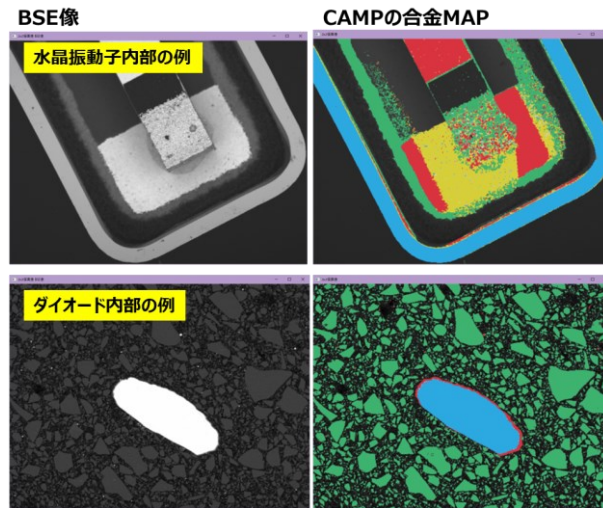


図 4-103 CAMP による合金の識別例

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つた。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の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、どのような箇所でも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。

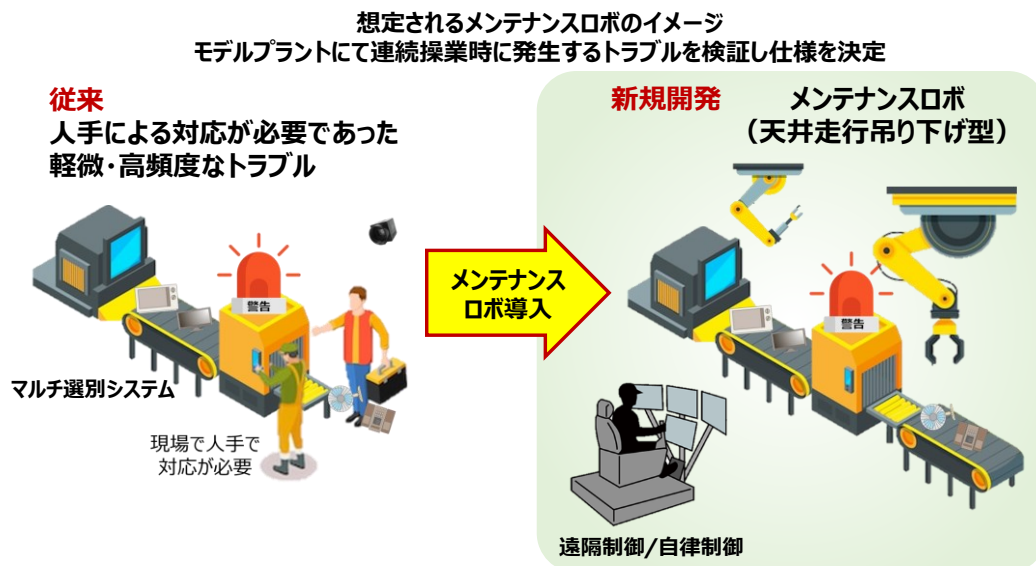


図 4-105 想定されるメンテナンスロボットのイメージ

・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

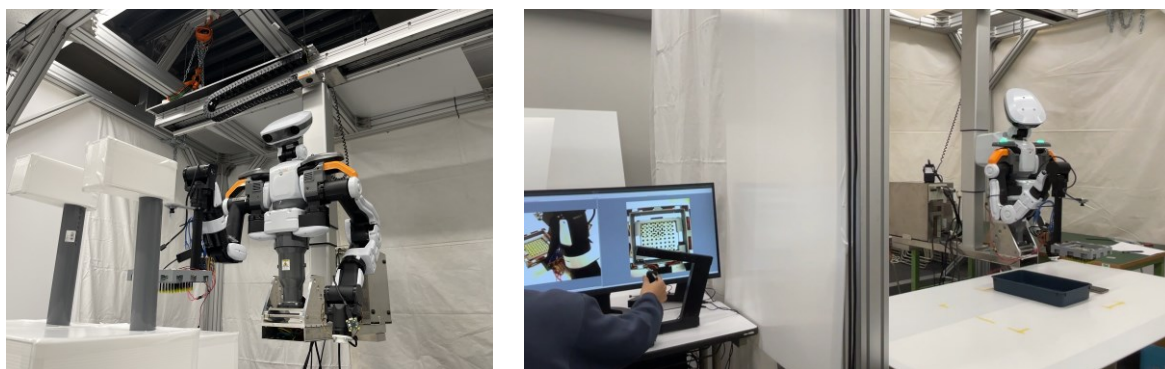


図 4-106 試作した天井吊り下げ型ロボットと遠隔操作装置

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と比べて、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起こ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リッパー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（グリッパー）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リッパーがある。ピン配列グリッパーは、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い操作が必要になる。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リッパーを導入予定であり、グリッパー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。

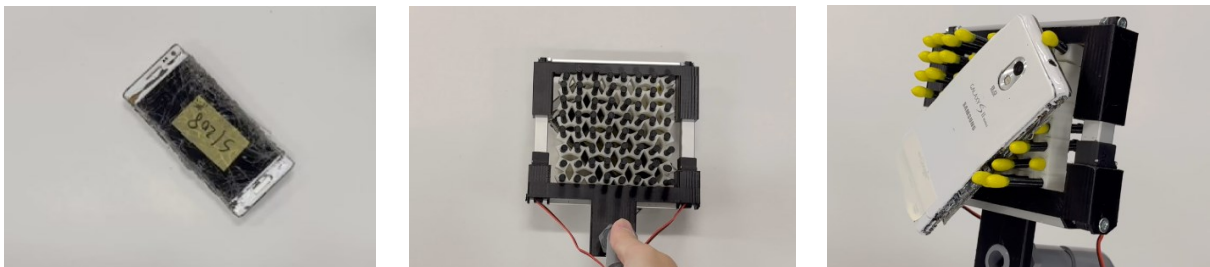


図 4-107 試作したピン配列型グリッパー（特願：2025-025300）

(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

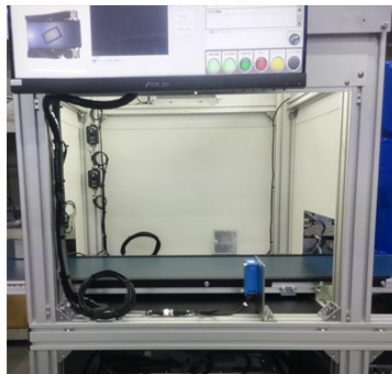
た小型家電を売却する際の貼付、消費者が自治体施設等に持ち込んだ際の貼付など、様々なケースが考えられる。いずれのケースにおいても、RFID への情報の書き込み、RFID を製品の適切な位置に貼付する作業を人手に依存すると、人件費の増大や、貼付位置不適切によるリサイクル工場での読取不調などが懸念される。その解決には自動貼付が期待されるが、既存装置は主として箱などの平面に貼付するものであり、複雑な形状物に対して自動貼付できる装置は存在しない。そこで、前期3年において、品種を入力してRFID タグへ書き込み、最適な読取が可能なRFID タグ開発と、様々な形状を有する小物家電を2D/3D 画像認識し、貼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

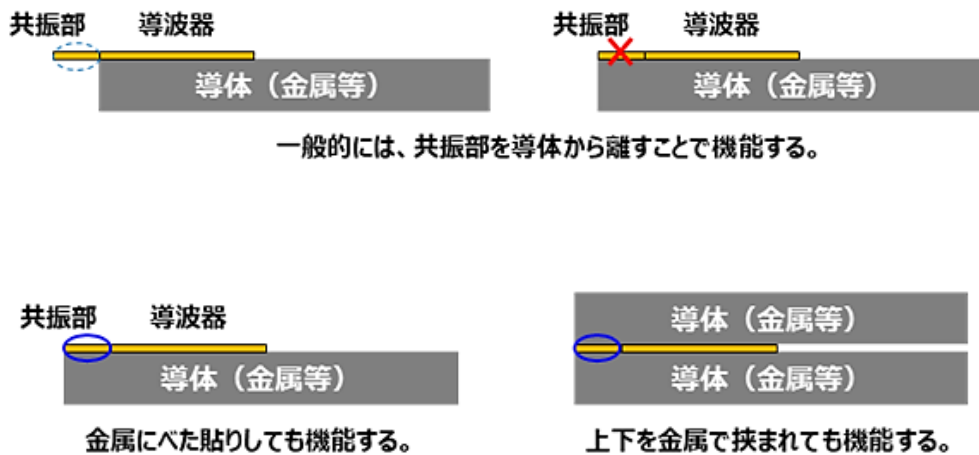


図 4-109 RFID タグの開発コンセプト(上：従来品、下：開発品)

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

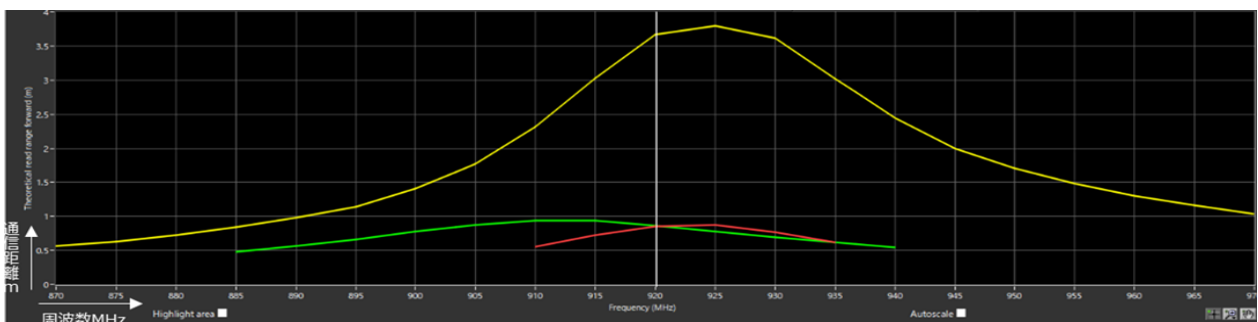


図 4-110 RFID タグ(試作品)の通信距離の測定結果例

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も視野に入る。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	電気料金(円)		減価償却費(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)				
Output	回収物	人件費(円)	人件費単価(円/時)	
		メンテナンス費(円)		
		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「ウラノス・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

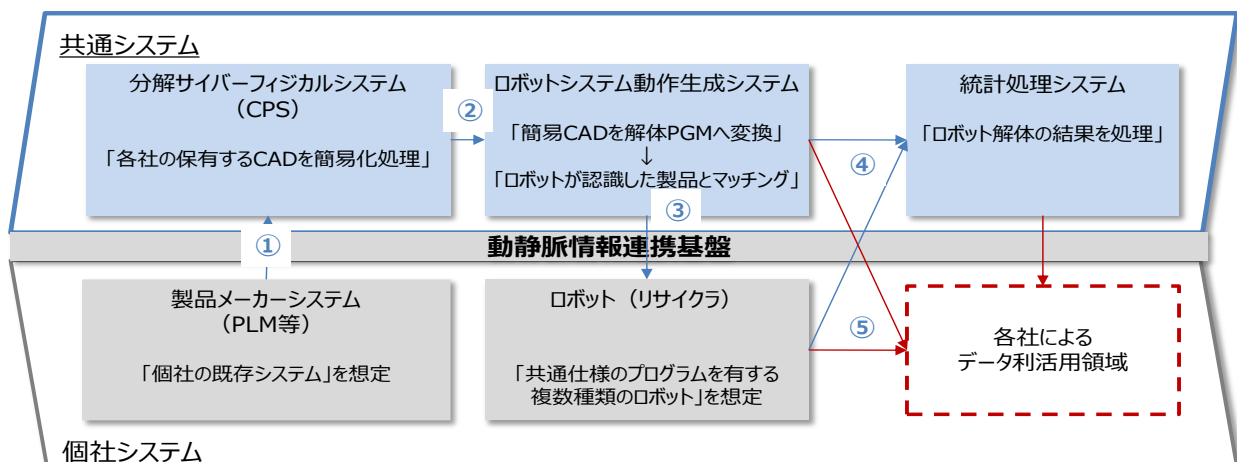


図 4-111 情報連携基盤コンセプト

- 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。

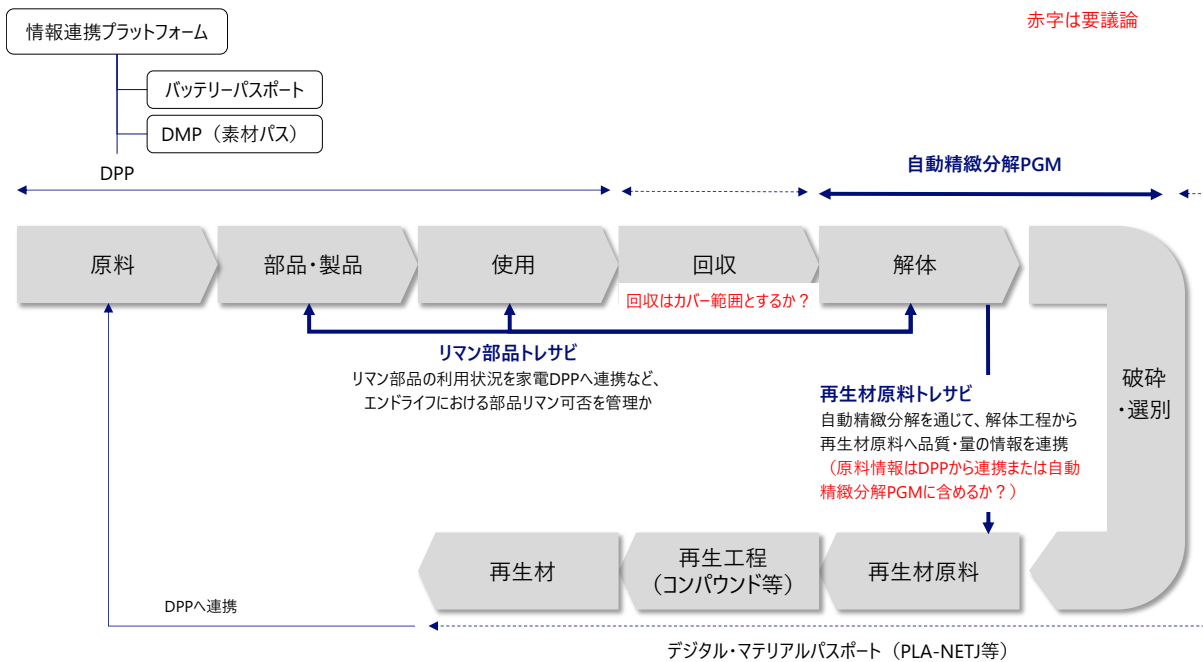


図 4-112 社会実装における情報連携基盤の位置づけ

■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と言える）

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)。

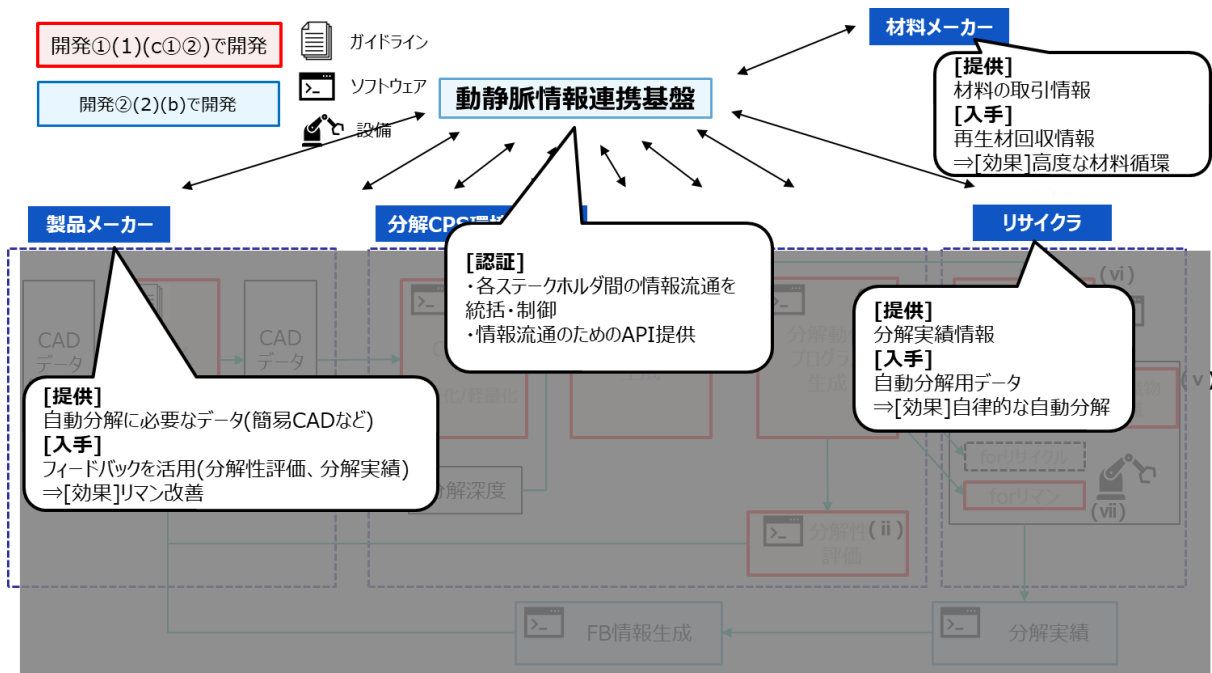


図 4-113 開発全体像(情報連携基盤フォーカス)

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しない。

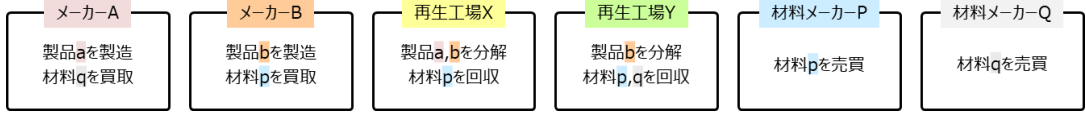
- 簡易パッケージ

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。

ステークホルダ



情報オーナー メーカーA(B)		関係区分A	関係区分B-1	関係区分B-2	関係区分C
		メーカーA(B)	再生工場 X(X,Y)	材料メーカー Q(P)	その他
情報区分A		read:○ write:○	read:× write:×	read:× write:×	read:× write:×
情報区分B-1 (再生工場向け)	・簡易CAD ・部品ごとのサブライ ヤー ・分解深度	read:○ write:○	read:○ write:×	read:× write:×	read:× write:×
情報区分B-2 (材料メーカー向け)	・リサイクル材需要量	read:○ write:○	read:× write:×	read:○ write:×	read:× write:×
情報区分C	・メーカー名 ・製品名 ・製造国	read:○ write:○	read:○ write:×	read:○ write:×	read:○ write:×

情報オーナー 再生工場X(Y)		関係区分A	関係区分B-1	関係区分B-2	関係区分C
		再生工場X(Y)	メーカーA,B(B)	材料メーカー P(P,Q)	その他
情報区分A		read:○ write:○	read:× write:×	read:× write:×	read:× write:×
情報区分B-1 (メーカー向け)	・分解成否(OK/NG) ・分解成否(どこまで) ・分解時間 ・リサイクル材回収量 ・リユース部品回収量 ・設計との乖離	read:○ write:○	read:○ write:×	read:× write:×	read:× write:×
情報区分B-2 (材料メーカー向け)	・リサイクル材回収量	read:○ write:○	read:× write:×	read:○ write:×	read:× write:×
情報区分C	・処理製品名	read:○ write:○	read:○ write:×	read:○ write:×	read:○ write:×

情報オーナー 材料メーカーP(Q)		関係区分A	関係区分B-1	関係区分B-2	関係区分C
		材料メーカー P(Q)	メーカーB(A)	再生工場X,Y(Y)	その他
情報区分A		read:○ write:○	read:× write:×	read:× write:×	read:× write:×
情報区分B-1 (メーカー向け)	・材料別 買取価格	read:○ write:○	read:○ write:×	read:× write:×	read:× write:×
情報区分B-2 (再生工場向け)	・材料別 売却価格	read:○ write:○	read:× write:×	read:○ write:×	read:× write:×
情報区分C		read:○ write:○	read:○ write:×	read:○ write:×	read:○ write:×

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。

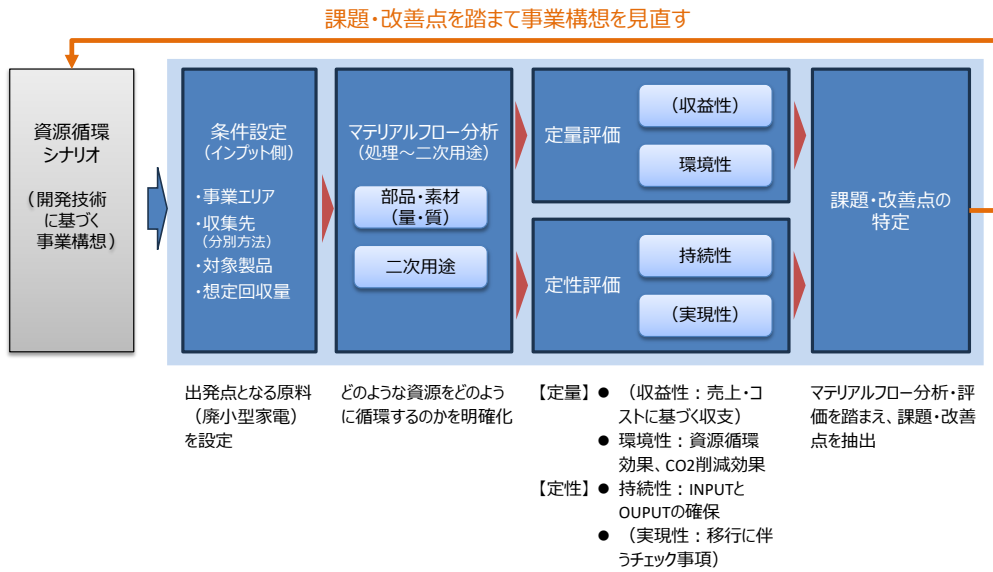


図 4-117 資源循環シナリオ評価手法の全体像 (枠組み)

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)。

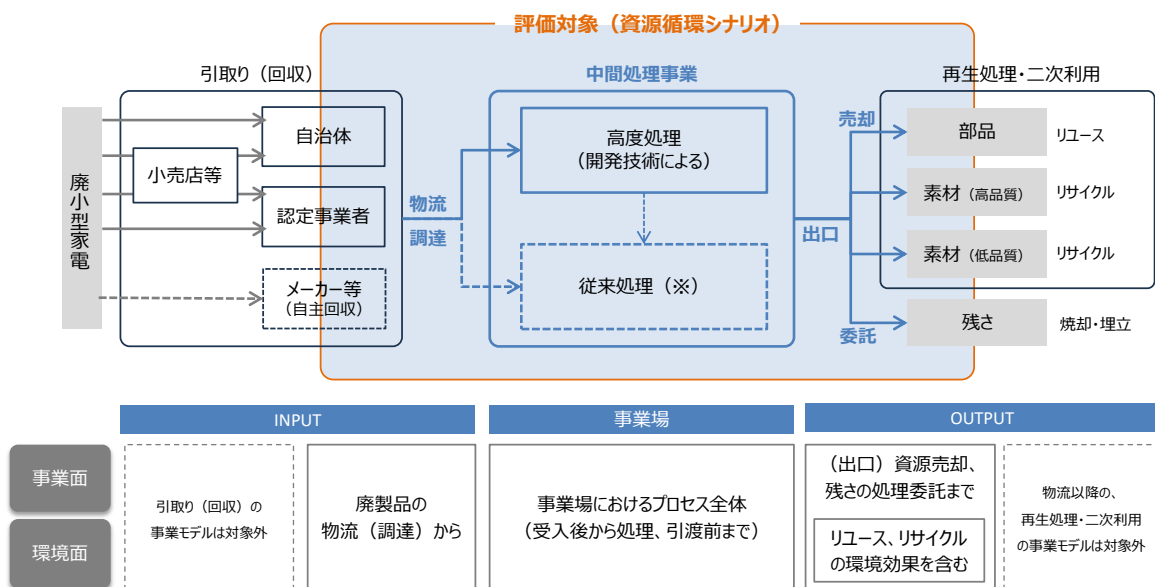


図 4-118 資源循環シナリオ評価の対象・範囲

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、従来処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）

従来処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） ー調達量の安定性の確保

ー調達品質の安定性、安全性の確保

（処理） ー危険物、処理困難物への安全対策

ー処理データ・ノウハウの蓄積・活用

（売却） ー売却先（二次用途）の安定確保

ー売却先への安定供給の対応

（データ活用） ー処理プロセスの省人化・効率化

ーサプライチェーン連携

（地域貢献） ー地域再生・雇用創出

ー地元の自治体、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処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）。

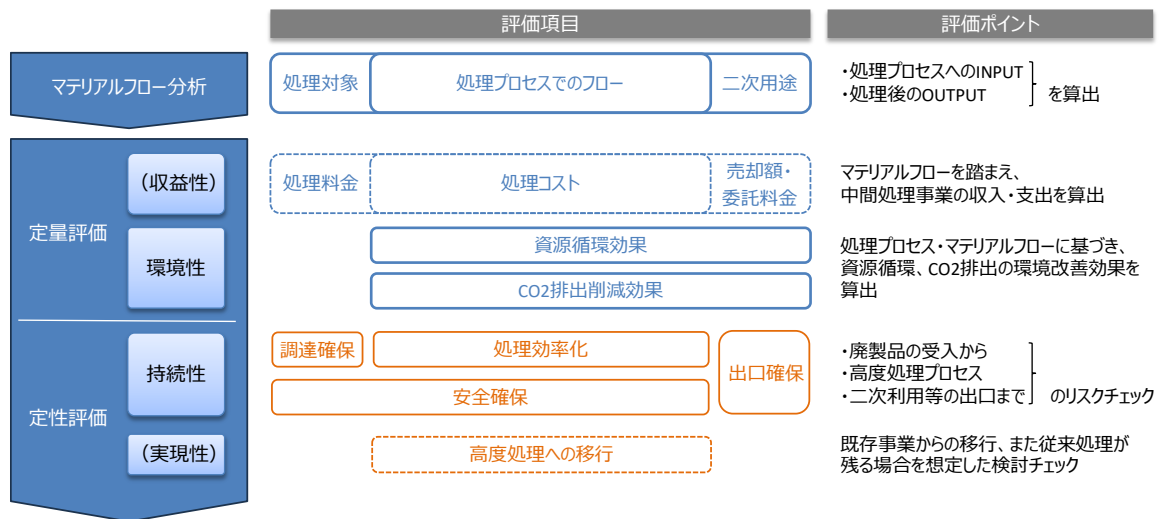


図 4-119 資源循環シナリオ評価手法の概要

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

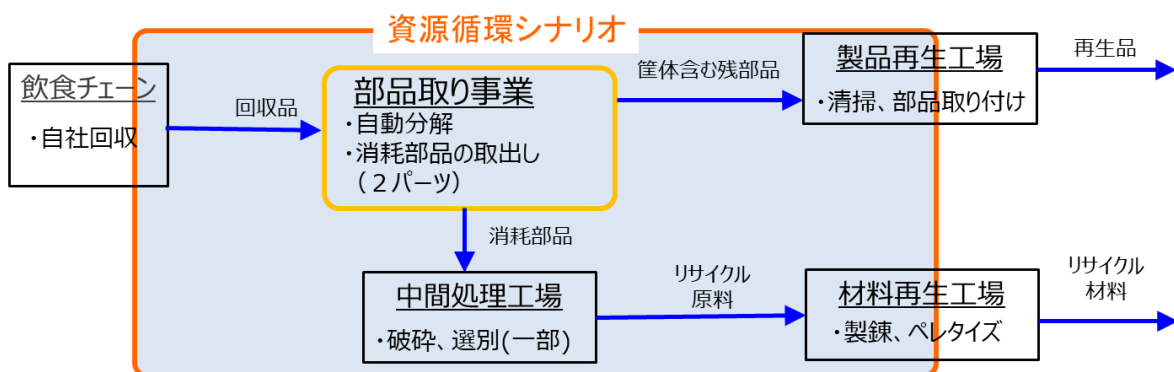


図 4-120 部品取り事業の評価範囲

・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。

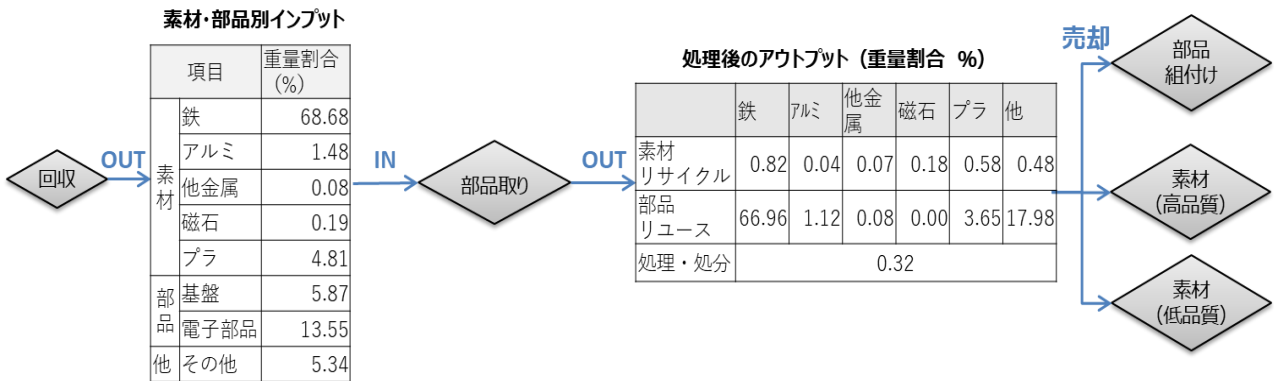


図 4-121 部品取り事業のマテリアルフロー

・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。

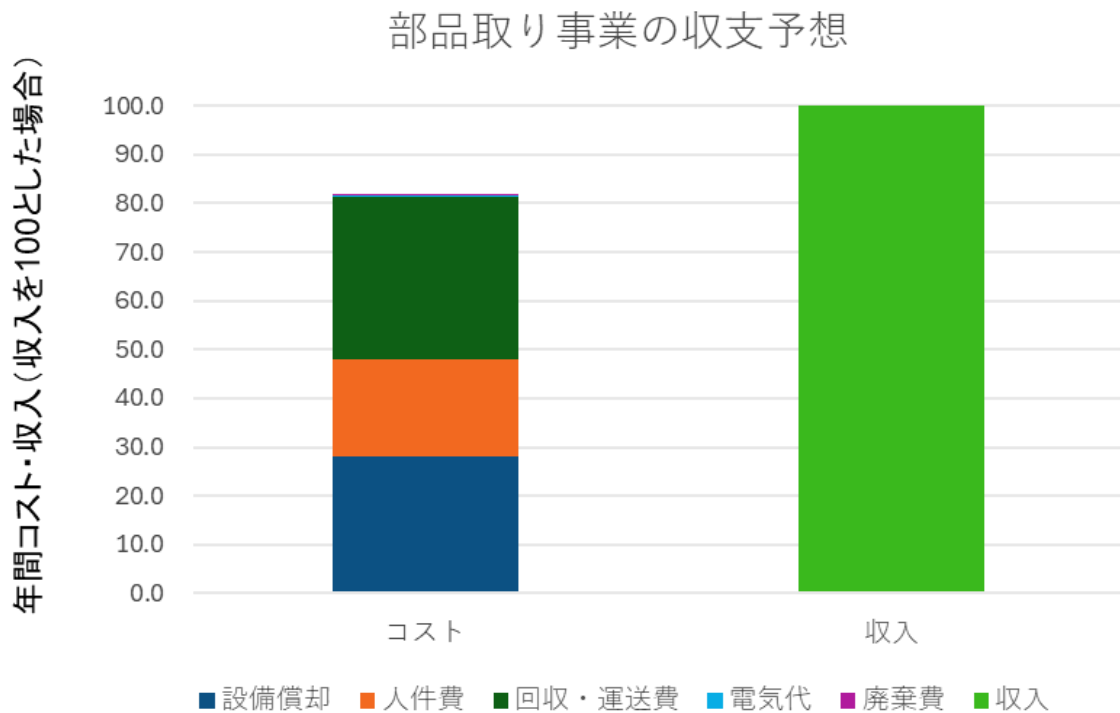


図 4-122 部品取り事業の収支予想

・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	非公開	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)。

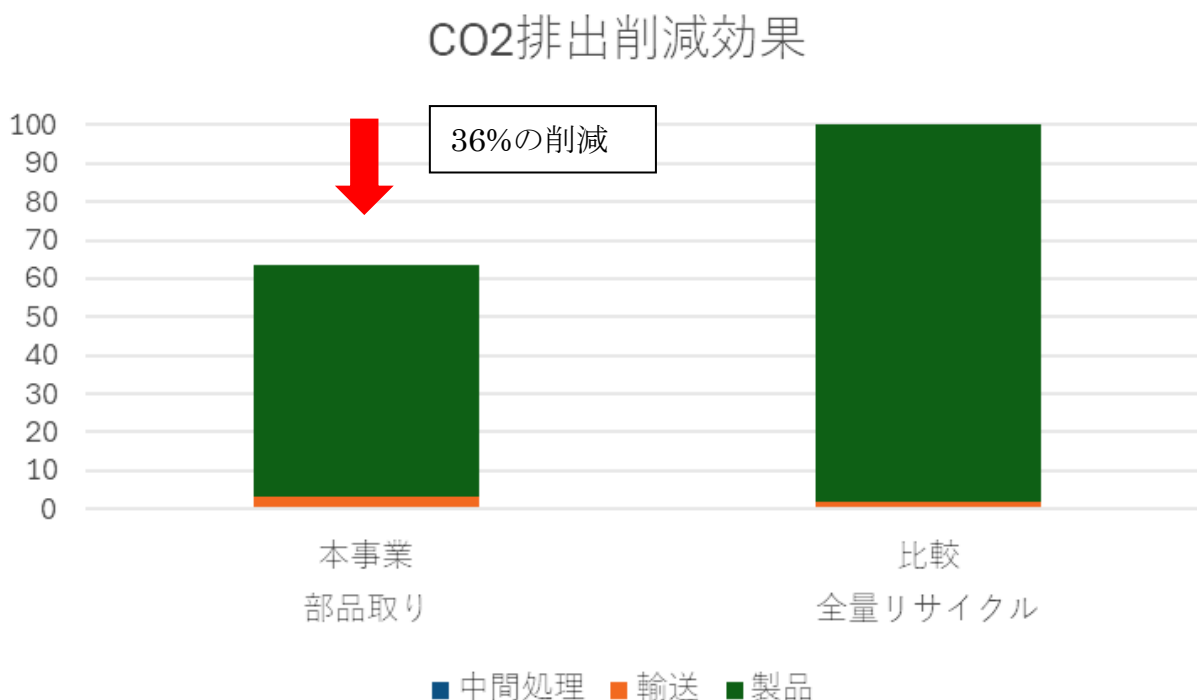


図 4-123 部品取り事業の CO₂ 排出削減効果

・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。

劣 1 → 5 優

	#	チェックすべき項目（定性）	判断ポイント	重要度	判定	根拠	
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

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

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を確認することで、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。

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

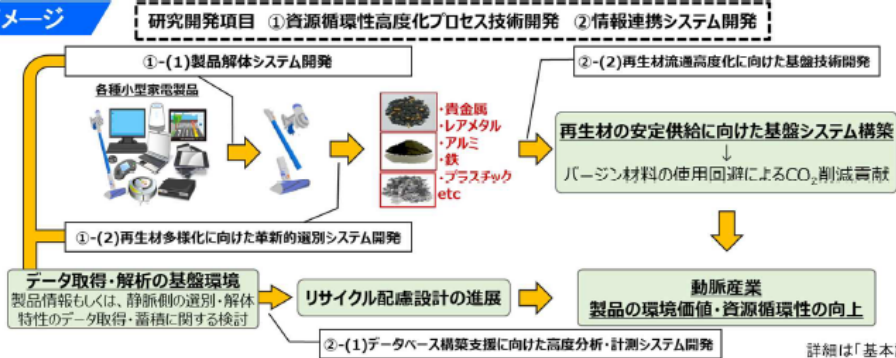
(2) 再生材流通高度化に向けた基盤技術開発

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

プロジェクトの規模

- ・事業費総額 5.5億円(予定)
- ・NEDO予算総額 5.5億円(予定)
- ・実施期間 2023～2027年度(5年間)

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。

1. 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
2. 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 ROBOTICS 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ラー 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ラー 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ラー 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ウム	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

2. 分科会公開資料

次ページより、推進部署・実施者が、分科会において事業を説明する際に使用した資料を示す。

「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」(中間評価)

2023年度～2027年度 5年間

プロジェクトの概要説明 (公開版)

2025年6月27日

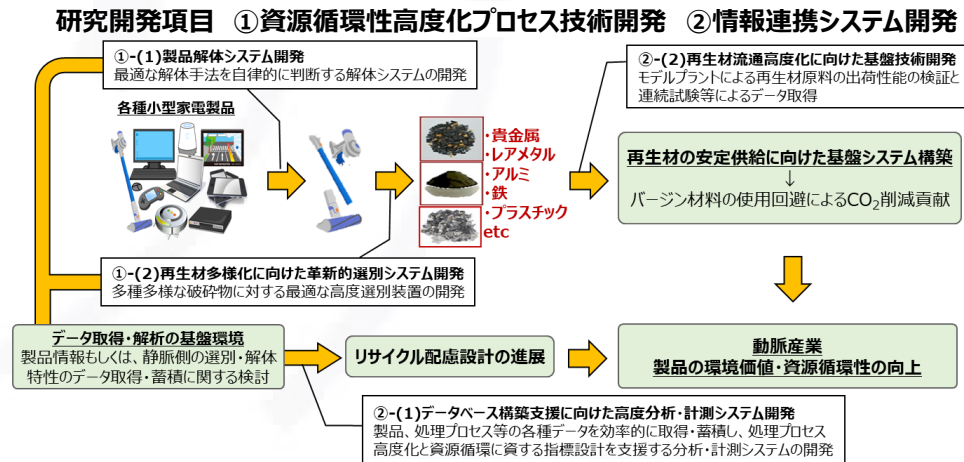
国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

サーキュラーエコノミー部

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

プロジェクトの概要

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。



【PMgr】サーキュラーエコノミー部（チーム長・今西大介）

【プロジェクト類型】基礎的・基盤的研究開発

政策や他事業との関係

- 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（2017-2022年）：スマートフォンやゲーム機、デジタルスチルカメラ、ビデオカメラ等に含まれる貴金属等の効率的リサイクル技術を開発。
- 脱炭素型金属リサイクルシステムの早期社会実装化に向けた実証事業（2020年-2022年：環境省）：電子基板から白金族の回収、リチウムイオン電池のリサイクル技術開発のための実証事業

事業計画

期間：2023～2027年度（5年間）

総事業費（NEDO負担分）：55.0億円（予定）（委託）

2025年度政府予算額：18.1億円（需給）

＜研究開発スケジュール・評価時期・想定する予算規模＞

	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			終了時評価
予算（億円）	4.1	13.4	18.1	(12.0)	(7.4)	

想定する出口イメージ等

アウトプット目標	<p>【研究開発項目①資源循環性高度化プロセス技術開発】</p> <p>(1)製品解体システム開発：廃製品6品種に対し、複数想定される解体手法において、正答率9割を達成する。</p> <p>(2)再生材多様化に向けた革新的選別システムの開発：仮想環境から試算される理論的な選別限界に対して8割以上の性能値を1t/日級の自動制御選別システムで達成する。</p> <p>【研究開発項目②情報連携システム開発】</p> <p>(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、従来の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する。</p> <p>(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。</p>
アウトカム目標	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により、2035年におけるCO ₂ の削減貢献として226万t/年を目指す。また、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/年以上の貢献を目指す。
出口戦略（実用化見込み）	プロジェクト終了後の5年を目処に製品解体システムならびに革新的選別システムの商用レベルへの対応、高度分析・測定システムのデータ提供基盤整備、再生材流通最適拠点の抽出を終え、設備共有を開始する。

<評価項目 1> 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

- (1) 本事業の位置づけ・意義
- (2) アウトカム達成までの道筋
- (3) 知的財産・標準化戦略

ページ構成

- 事業の背景・目的・将来像
- 政策・施策における位置づけ
- 技術戦略上の位置づけ
- 外部環境の状況（技術、市場、制度、政策動向など）
- 他事業との関係
- アウトカム達成までの道筋
- 知的財産・標準化：オープン・クローズ戦略
- 知的財産管理

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

- (1) 本事業の位置づけ・意義
- (2) アウトカム達成までの道筋
- (3) 知的財産・標準化戦略

2. 目標及び達成状況

- (1) アウトカム目標及び達成見込み
- (2) アウトプット目標及び達成状況

3. マネジメント

- (1) 実施体制
- (2) 受益者負担の考え方
- (3) 研究開発計画

事業の背景・目的・将来像

■ 社会背景・事業の目的

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なか、我が国は資源を海外に依存しており、資源自律経済の確立のため、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。

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ために、小型デジタル機器から小型電気電子機器全般に処理の対象を拡張し、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、軽金属も対象素材とし、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た技術開発を構築。

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

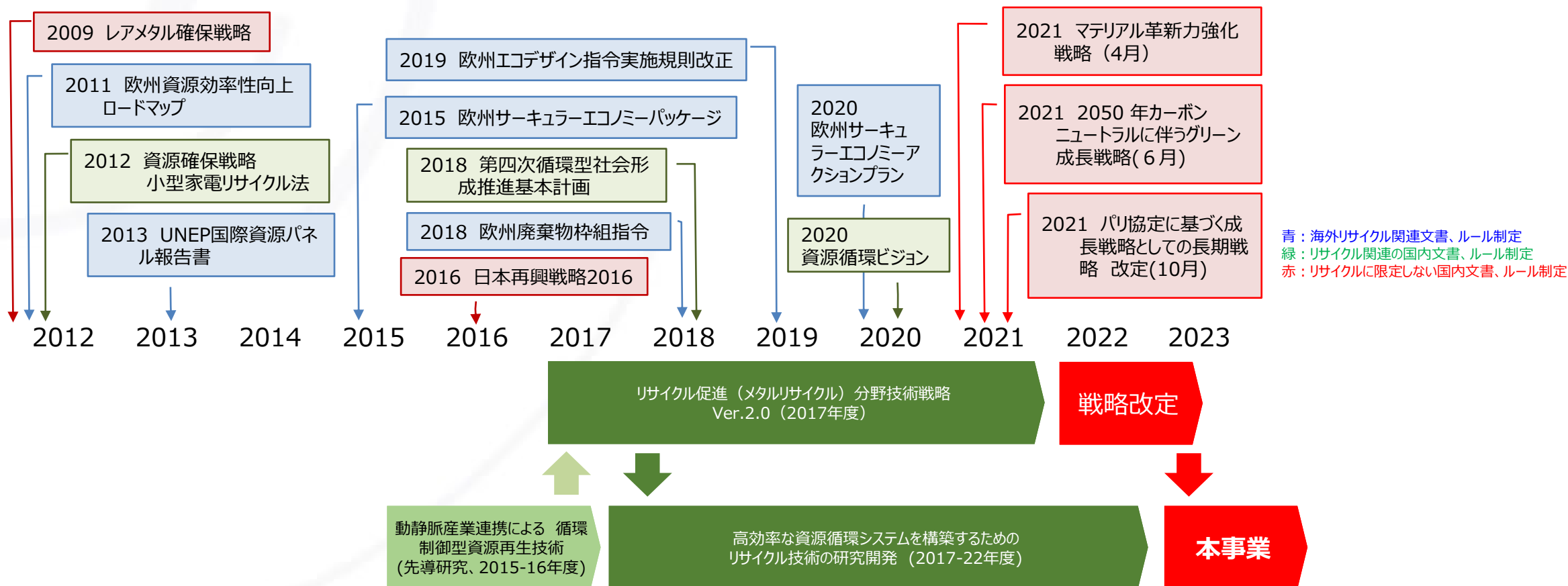
②リユース、リサイクル・排ガスの活用

<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。」

技術戦略上の位置づけ

- 資源循環への関心の高まりを背景として2017年度に戦略を策定し、小型デジタル家電を対象に金属資源有効利用技術に係る開発を実施
- 幅広い小型電気電子機器での高度資源循環プロセスの早期社会実装を目的として、新たな取り組みを開始するために技術戦略の改訂を実施



外部環境の状況（技術、市場、制度、政策動向など）

- グローバルには、特にEUで政策的な議論が盛んに行われている状況。具体的には、再生素材（二次原材料）の積極的な活用やエコデザインの推進に向けた政策的な動きがみられる。また、廃製品や二次原材料の情報管理の方向性も打ち出されている。
- 技術面では、対象物の範囲や性能に課題があるものの、欧米の装置メーカーが複数の素材に対応したAIソーターや高速選別機を上市（国内でも稼働）。また、自社製品に特化した実績として、Apple社によるスマートフォン解体ロボットの稼働実績がある。

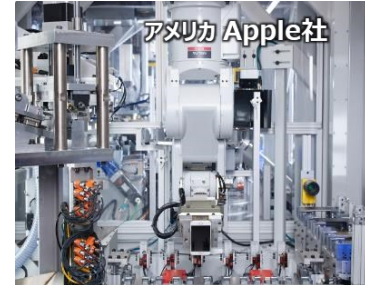
■ 国内外の技術事例（*は本事業の実施機関）

	推進者	国	技術内容	課題	URL
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://www.tomra.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、一部新品に交換をして、リユース家電としてヤマダ電機店舗で販売。旧来のリユース思想に留まる	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
	ポッシュ	ドイツ/オランダ	家電サブスク	洗濯機、冷蔵庫、掃除機、コーヒーメ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

AIソーター、高速選別機



解体ロボット



■ EUの主な動き

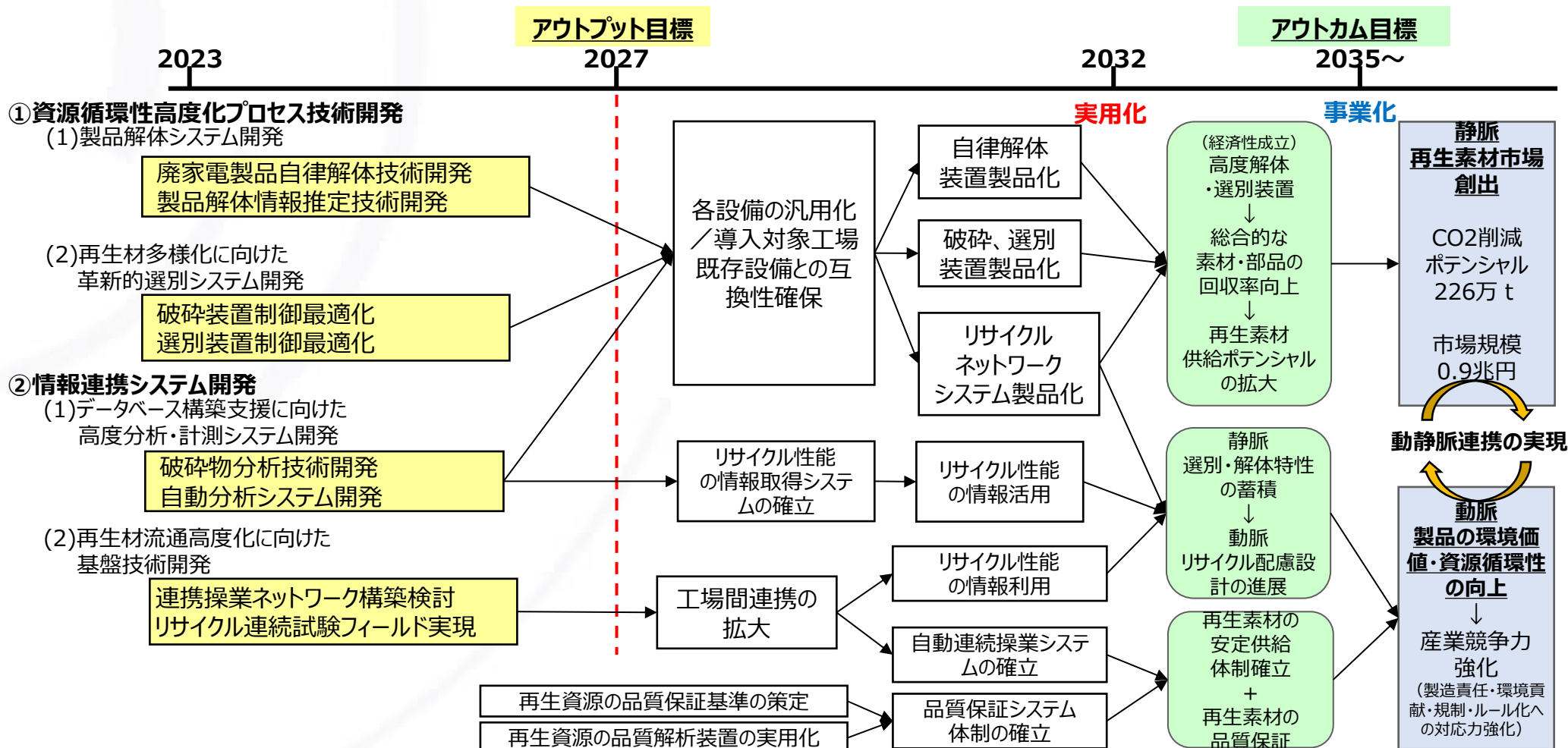
年	EUにおける循環経済に係る目立った動き
2015	「循環型経済行動計画」を発表し、自治体廃棄物や包装廃棄物のリサイクル率の目標を設定
2018	「欧州プラスチック戦略」を発表し、廃棄削減、回収・リサイクル促進、海洋投棄抑止など対策強化へ
2020	気候中立目標の達成には完全な循環型経済への移行が欠かせない位置づけとして、「新循環型経済行動計画」を発表。

他事業との関係

項目	実施機関	プロジェクト名	期間	事業タイプ	事業内容
1	JST	未来社会創造事業/新たな資源循環サイクルを可能とするものづくりプロセスの革新	2017 ~2024	基礎 応用研究	製品使用から、再（生）利用・長期利用にわたる様々な場面での先端的な「製造・分離・評価」等の要素技術とそれらに基づく設計体系やそれらの技術を用いたシステムの研究開発
2	環境省	脱炭素型金属リサイクルシステムの早期社会実装化に向けた実証事業	2020 ~2022	実証事業	電子基板等の白金族やリチウムイオン電池、太陽光パネル等、特定の製品を対象とした金属資源のリサイクルシステムの実証事業。
3	JOGMEC	金属資源の生産技術に関する基礎研究	2016~	基盤研究	レアメタル等を対象とした、採鉱技術、選鉱・精錬技術、尾鉱・製錬残渣等に残存する有価金属の回収技術及び使用製品のリサイクル技術をテーマとした基礎研究
4	NEDO	希少金属代替材料開発プロジェクト	2012 ~2013	補助事業	希少金属の代替技術、使用量低減技術に係る技術開発
5	NEDO	希少金属代替省エネ材料開発プロジェクト	2014 ~2015	補助事業	希少金属の代替技術、使用量低減技術に係る技術開発
6	NEDO	情報技術を活用したレアメタル等金属を高効率にリサイクルする革新プロセスの開発	2015 ~2016	先導研究	動脈産業-静脈産業が連携を深め、天然鉱山と価値競争できる金属資源循環の基盤を構築するため、製品の資源配慮設計指針や、都市鉱山ポテンシャルの推計手法の確立、手作業を一掃する自動自律型都市鉱山や少量多品種製錬を実現するための要素技術の確立を行う。
7	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	ナショプロ	スマートフォンやゲーム機、デジタルスチルカメラ、ビデオカメラ等に含まれる貴金属や、レアメタル、レアアースの効率的なリサイクルを行うための解体選別、金属精錬の技術開発を実施。
8	NEDO	革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発	2020 ~2024	ナショプロ	本事業の中では様々なプラスチックのリサイクル基盤技術の開発が行われた中、プラスチックの精緻な分別分離技術の基盤研究も行われた。

本研究開発は、6の先導研究と7のナショプロで構築された小型デジタル家電の処理技術と、8のナショプロで基盤研究を実施したプラスチックの精緻な分離技術を基にして、広く小型電気電子製品を素材ごとに適切に処理し資源循環を行うためのものである。

アウトカム達成までの道筋



アウトカム達成への政策的動き

- ・資源の有効な利用の促進に関する法律の改正（経済産業省）：再生材利用の義務化や環境配慮設計
- ・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の通達（環境省）：廃棄物の高度な選別

知的財産・標準化:オープン・クローズ戦略

■知的財産に関する戦略

	非競争域	競争領域
公開	<ul style="list-style-type: none"> 一元化されたフォーマットを提供 再生素材のストック可視化 品質基準・トレーサビリティの指針/ガイドライン 	<ul style="list-style-type: none"> 下記の技術をモジュール化 モジュール化した個別技術を組み込んだ装置群
非公開		<ul style="list-style-type: none"> 解体手法の動作制御アルゴリズム 廃製品特有データを考慮可能なシステム、ライセンスの活用と個別データの蓄積による選別効率の高度化 廃製品特有の検知データ処理/センシング技術 測定条件、測定ステップ、ノイズ除去、解体対象の構造認識、不定形状への解析精度等

積極的に
権利化

ノウハウとして
秘匿

■バックグラウンド特許を基とした権利範囲の拡大

本事業参画者のこれまでの研究開発成果によるバックグラウンド特許を多数保有し、直近でも知財の創出に積極的に取り組み（公開）、これらを基に本研究開発で小型電気電子製品リサイクルに関わる特許権利拡大を進める（2025/4/16現在で2件の出願）。

特許権取得：17件

公開済み特許：16件（右表）

	公開番号	名称
研究開発項目①関連	特開2024-089032	物体選別のための情報処理方法、プログラム及び情報処理システム（産総研）
	特開2023-120478	製品の製造元を特定するためのプログラム及び情報処理システム（産総研）
	特開2023-023312	電子機器又は基板の資源価値を推定するプログラム、方法及び情報処理システム（産総研）
	特開2022-061635	高速打撃による解体装置（産総研）
	特開2021-81971	識別装置プログラム及び識別装置方法（産総研）
	特開2023-075625	部品剥離ユニット及び破碎装置（産総研）
	特開2022-158594	廃家電の解体方法及び装置(パナソニックHD)
	特開2023-17424	解体手順選択装置及び解体手順選択方法及び解体装置(パナソニックHD)
	特開2023-23610	ビス外し方法(パナソニックHD)
	特開2023-117226	多指エンドエフェクタ及び多指エンドエフェクタの教示装置(パナソニックHD)
	特開2023-175331	ロボット教示方法及びロボット教示装置(パナソニックHD)
	特開2023-182359	ビス緩締装置(パナソニックHD)
	特開2024-167586	分解対象物の分解方法(パナソニックHD)
研究開発項目②関連	特開2023-084273	供給搬送ユニット及びマルチ搬送選別システム（産総研）
	特開2023-075625	工程条件管理装置、工程条件管理プログラム、工程条件管理方法、及び指標データベースの作成方法（産総研）
	特開2023-049479	ラベル貼付装置、ラベル貼付方法及びプログラム（サトーホールディングス）

知的財産管理

- 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
 - 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。

<評価項目 2> 目標及び達成状況

- (1) アウトカム目標及び達成見込み
- (2) アウトプット目標及び達成状況

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

- (1) 本事業の位置づけ・意義
- (2) アウトカム達成までの道筋
- (3) 知的財産・標準化戦略

2. 目標及び達成状況

- (1) アウトカム目標及び達成見込み
- (2) アウトプット目標及び達成状況

- ・ 実用化・事業化の考え方とアウトカム目標の根拠
- ・ アウトカム目標の達成見込み
- ・ 費用対効果
- ・ 非連続ナショプロに該当する根拠
- ・ 本事業における研究開発項目の位置づけ
- ・ アウトプット目標の設定及び根拠
- ・ アウトプット目標の達成状況
- ・ 研究開発成果の副次的成果等
- ・ 特許出願及び論文発表

3. マネジメント

- (1) 実施体制
- (2) 受益者負担の考え方
- (3) 研究開発計画

実用化の考え方とアウトカム目標の設定

■ 実用化の考え方

『研究開発に係る成果（装置、システム等の基盤技術）が製品製造事業者、リサイクル事業者、関連装置開発事業者等により利用が開始されること』をいう。

■ アウトカムについて

本事業は国の委託事業であり、アウトカムは本事業成果を社会へ広く普及させることで本事業者を含む様々なステークホルダーの寄与を以て実現を見込むものである。

■ 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/年以上の貢献を目指す。

アウトカム目標の根拠

- 2035年の日本での小型電気電子機器排出量は104万トン予測しており、その50%を回収し72%の効率でリサイクルを行うとことで42万トン/年が再資源化されると想定(※1)
- 2035年の全世界の家庭用電化製品市場は180兆円を予測しており、そのうち日本企業の寄与は10%、また、本技術開発成果による電気電子機器設計製造の寄与を8%とすると想定(※2)

■ CO2排出削減量

	重量[万t]	CO2削減原単位[tCO2/t]
素材回収総量	42.00	
鉄	10.08	1.21
アルミ	8.40	9.98
銅	1.26	1.74
ステンレス	0.42	1.21
金、銀、Pd	2.10	9.98
プラスチック	19.74	5.41
CO2排出削減量		226[万tCO2]

42万トン/年を適切に再資源化する事で
CO2削減効果：226万トン/年

■ 経済効果

2035年時点の電気電子機器市場	180兆円/年
日本企業シェア	10%
2019年時点での電気電子機器回収割合	17%
2035年時点での電気電子機器回収割合	25%
本技術導入寄与（上記項目の差）	8%
経済効果	1.4兆円/年(>0.9兆円)

2035年に想定される電気電子機器市場を想定すると
経済効果：0.9兆円/年以上

※1:「Global E-waste Monitor2020」、「リサイクルデータブック2021」、「国民生活2021.8」より、2035年での日本国内の小型電気電子機器の推定排出量を算出。現状10%程度の回収率を2035年までに50%まで向上し、廃小型電気電子機器の製品別選別割合を90%、選別された製品からの資源再生効率を80%と仮定。

※2:「Global Market Insightの家庭用電化製品市場予測」によると、2034年には180兆円（1.25兆ドル）の市場を形成（2035年の見込みはほぼ2034年と同等とする）。「JEITA電子情報産業の世界生産見通し2024年」のデータでは全世界生産額のうち日本企業シェアは8%であり2035年は10%を仮定。また、「Global E-waste Monitor2020」によると2019年の全世界での電気電子機器の回収量は17%であり、2035年には本技術の導入により25%を目指すとして8%増加を仮定。

アウトカム目標の達成見込み

技術要件	達成見込み	課題
製品解体システム	ストックヤードでの自走式処理装置での小型電気電子機器 6 品種のハンドリング、切断処理は要素技術の開発が進みつつあり、このシステム化の検討は堅調に進捗している。ストックヤード内で必要とされる安全で効率の良い処理を実現することが可能な見込み	ストックヤードで山積みされている小型電気電子機器を対象とするものであり、今までにない新規カテゴリの製品の上市により、新たな処理方法での対応が求められる可能性があることが課題
選別システム	含有物の異なる素材の効率の良い選別方法の要素技術を複数方式開発し、そのシステム化としてリコンビナブル選別システムの実現に向けて堅調に進捗している。このシステムでは新しい技術と従来からの技術による選別装置を混載する事が可能であり、リサイクラーの設備投資計画に合わせたシステム提案が可能となる事で円滑に社会実装が進む見込み	本取り組みにより様々な選別方式が実現していく中、選別方式の選別システムへの組み込みに関して、装置間のインターフェース等のフォーマットが広く関連事業者へ開示されるようなコンソーシアムの様な連携の取り組みの実装が必要
高度分析・測定システム	小型電気電子機器の自動分析・測定を行う事で、その製品の有価性や解体処理の容易性を評価する事が出来るようになる。この分析・測定データに基づき動脈産業は資源循環性の高い製品設計が可能となる見込み	分析・測定システムが広く動脈産業側で活用されるように公的な機関での運用や、その情報活用を促すためのコンソーシアムの様な取り組みの実装が必要
再生材流通の高度化	小型電気電子機器を処理する連続試験フィールドの整備によりモデルプラントを完成し、この設備を廃棄物処理の実事業者が運用する事により、事業性を念頭においた操業の形態を見出す事を堅調に進めている。この設備で得られるリサイクラー側からの資源回収情報を基にした動脈側での再生材の積極利用が可能となる見込み	施設で処理する小型電気電子機器の有価性や解体処理の容易性に関わる情報を活用することを前提として処理施設の実装を進めるため、動脈企業間での情報開示のコンセンサスがどこまで得られるかが課題

■ アウトカム目標

本研究開発での技術開発成果として、2035年にCO2削減効果226万トン、増大する電気電子機器市場への資源循環対応として経済効果0.9兆円を見込む。

費用対効果

【インプット】

- 事業費用の総額 55.0億円（5年）

【アウトカム達成時】

- 経済波及効果 0.9兆円/年以上
- CO2削減効果 226万t/年

非連続ナショナルプロジェクトに該当する根拠

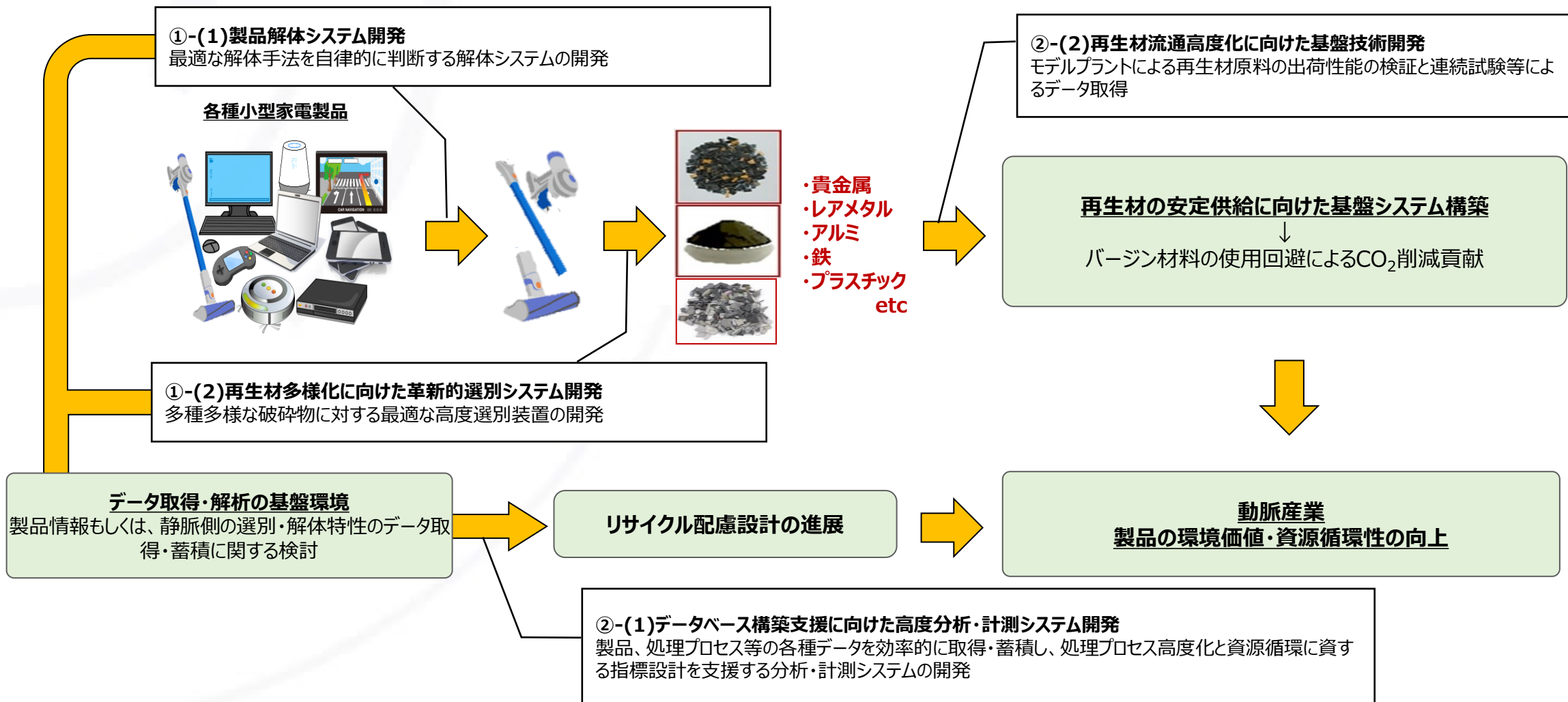
	理由
①非連続的な価値の創造	<ul style="list-style-type: none"> ・レアメタル等高付加価値品限定の資源回収から脱却し、小型デジタル家電から小型電気電子機器を対象を大幅に拡大。将来的にはその他製品も視野に、金属からプラスチックに至る素材の最大限の二次利用によるサーキュラリティの最大化、資源に係る経済安全保障の向上および大幅なCO2削減を実現するエコシステムを確立する。 ・廃製品選別工程の省人化に対応する。
②技術の不確実性	<ul style="list-style-type: none"> ・廃製品から純度の高い素材を効率良く回収するための装置の最適制御技術は、製品の種類や構成要素の変動が大きく、不確実性が高い。 ・画像処理、ロボット、材料化学、機械設計等の幅広い分野にまたがる技術を高度に統合することが必要となるため不確実性が高い。

※非連続ナショナルプロジェクトの定義

	内容
非連続的な価値の創造	画期的で飛躍的な変化を伴う価値が創造され、提供されることにより、生活、環境、社会、働き方などを変える
技術の不確実性	難易度が高い技術的課題や、新領域へのチャレンジなどにより、目標とする特性値や技術は従来の延長上にはなく、リスクが特に高い

本事業における研究開発項目の位置付け

研究開発項目 ①資源循環性高度化プロセス技術開発 ②情報連携システム開発



アウトプット（中間）目標の設定及び根拠

研究開発項目		中間目標（2026年3月）	最終目標（2028年3月）	根拠
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。	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。	2035年には、小型電気電子機器9品種を対象として日本国内で排出される小型電気電子機器由来の約42万トンが資源として循環されると想定。本事業期間中では6品種を対象として、廃棄された小型電気電子機器品種の選別正答率9割を達成する選別・解体システムの基盤技術を実証する。
	(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。	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。	企業等へのヒアリングでは既存装置での選別再生率分離効率は5割程度との情報であり、本事業ではそれを超える8割の性能値を設定。本事業の研究開発では基盤研究として1t/日級の自動制御選別システムの達成を目標とし、将来的には10~40t/日級の処理装置が必要となる。
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。	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。	国内で対象9品種に対して各々毎年100製品が新規に上市されるとする。現在小型電気電子機器の分析・解析には30日程度を必要としている。分析・解析時間が1/10になると3日で1製品が可能になる。年間200日稼働で約70製品の解析が可能となる。日本各地にこの分析が可能な施設が13か所出来ると1年間の新製品の分析・解析が出来る。
	(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。	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。	代表的な素材（例えばアルミニウムとプラスチック等）を想定。回収、処理、需要のマテリアルフローの可視化を行うことで適切な資源の循環が可能となる。この可視化には処理プロセスとしてなんらかの実設備で検証が必要であり、最適処理に必要な技術要素や実施設備の安定稼働の検証により再生素材の流通に及ぼす効果を明確にする必要があるため。

アウトプット目標の達成状況

研究開発項目	目標 (2026年3月)	成果(実績) (2025年4月)	達成度 (見込み※)	達成の根拠/解決方針
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認し、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。	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認。	○ 2026年3月に達成見込み	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、製品構造グループ化により、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。
研究開発項目① 資源循環性高度化プロセス技術開発 (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。	全粒径対応装置では、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。	○ 2026年3月に達成見込み	全粒径対応装置では、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AESSを試作済みであり、目標は十分達成可能。
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。	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。	○ 2026年3月に達成見込み	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。
研究開発項目② 情報連携システム開発 (2)再生材流通高度化に向けた基盤技術開発	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。	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。	○ 2026年3月に達成見込み	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。

◎大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

研究開発成果の副次的効果等

■ 高度な廃棄物処理技術研究者の育成

【循環経済ビジョン2020より】

静脈産業は依然として労働集約的な側面が残っており、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る。AI技術の導入により、光学選別、磁力選別、浮沈選別等の基盤技術を更に効果的かつ効率的に開発・利用していくとともに、そのための人材育成を続けていくことが重要である。

■ 本研究開発での効果

NEDOプロで醸成された新技術の普及・展開に関して、実施機関の企業研究員やアカデミア学生、国研研究員等の若手研究者の本研究開発への参画が、将来の社会実装の際の核となる人材育成へと繋がっている。

本研究開発に関わる若手登録研究者

研究開発項目①：45名（うち女性4名）

研究開発項目②：20名（うち女性2名）

特許出願及び論文発表

	2023 年度	2024 年度	2025 年度	2026 年度	2027 年度	計
特許出願(うち外国出願)	0(0)	2(0)	—	—	—	2(0)
論文	0	0	—	—	—	0
研究発表・講演	3	11	—	—	—	14
受賞実績	0	0	—	—	—	0
新聞・雑誌等への掲載	0	1	—	—	—	1
展示会への出展	0	1	—	—	—	1

※2025年4月16日現在

<評価項目 3> マネジメント

- (1) 実施体制
- (2) 受益者負担の考え方
- (3) 研究開発計画

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

- (1) 本事業の位置づけ・意義
- (2) アウトカム達成までの道筋
- (3) 知的財産・標準化戦略

2. 目標及び達成状況

- (1) アウトカム目標及び達成見込み
- (2) アウトプット目標及び達成状況

3. マネジメント

- (1) 実施体制
- (2) 受益者負担の考え方
- (3) 研究開発計画

- NEDOが実施する意義
- 実施体制
- 個別事業の採択プロセス
- 予算及び受益者負担
- 目標達成に必要な要素技術
- 研究開発のスケジュール
- 進捗管理
- 進捗管理：事前評価への対応
- 進捗管理：動向・情勢変化への対応
- 進捗管理：成果普及への取り組み
- 進捗管理：開発促進財源投入実績
- モティベーションを高める仕組み

NEDOが実施する意義

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

NEDOが持つ知識、実績を活かして推進すべき事業

関連事業（高効率な資源循環システム構築事業）での終了時評価コメント

- リサイクル処理システムとして、静脈企業のニーズに合わせたより安価で効率的な個別最適システムの提案や拡販を図るべき
- 効率的な水平リサイクルを実現するモデルを構築する事が必要と考えられることから、メーカーなどの動脈産業のプレイヤーも取り込んだ動静脈連携体制の構築を図るべき

実施体制



個別事業の採択プロセス

【公募】

公募予告：2023年2月15日⇒公募：2023年5月15日⇒公募〆切：2023年6月26日

【採択】

採択審査委員会：2023年7月27日

採択審査項目：NEDOの標準的採択審査項目

採択条件：無し

【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	齋藤 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

予算及び受益者負担

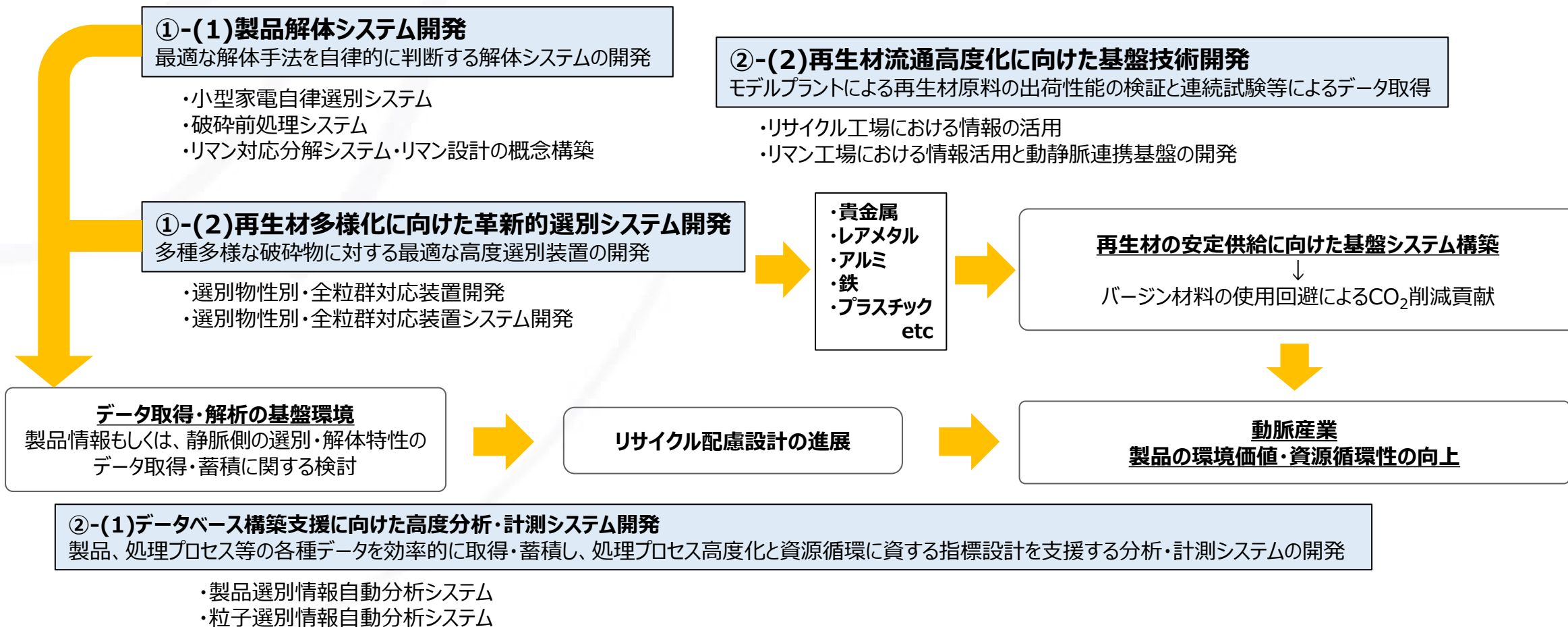
◆ 予算: 契約額 (委託事業)

	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度	2027年度	合計
研究開発項目①	254	927	1,330	-	-	2,511
研究開発項目②	151	413	484	-	-	1,048
合計	405	1,340	1,813			3,560

(単位: 百万円)

目標達成に必要な要素技術

研究開発項目 ①資源循環性高度化プロセス技術開発 ②情報連携システム開発



研究開発のスケジュール

	2023	2024	2025	2026	2027	2028	
研究開発項目①(1)	<ul style="list-style-type: none"> ・選別システム各機能要素検討 ・CAD要件検討、識別方法検討 		<ul style="list-style-type: none"> ・選別システム連結試作 ・3品種自動解体 	<ul style="list-style-type: none"> ・各機能自律制御、機能連結 ・6品種自動解体 			
研究開発項目①(2)	<ul style="list-style-type: none"> ・各機能要素装置調査、設計検討 ・破碎物供給検討 ・素材別バルク物性の整理 		<ul style="list-style-type: none"> ・試作機連結 ・1t/日機検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・各機能要素自律制御 ・1t/日→10t/日設計仕様 			
研究開発項目②(1)	<ul style="list-style-type: none"> ・製品破碎情報収集 ・素材種判定モデル構築 		<ul style="list-style-type: none"> ・製品構造データ構築 ・判定困難物質検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・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 			
研究開発項目②(2)	<ul style="list-style-type: none"> ・連続試験フィールド整備 ・市場分析 		<ul style="list-style-type: none"> ・自動運転課題抽出 ・シナリオ基礎検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・機能検証、システム化 ・シナリオプランニング 			
評価時期				中間評価			終了時評価

【研究開発マネジメント事例】

- 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）でのプラスチック選別技術研究成果を本事業へ展開
- 新たな課題への対応
事業を推進する上で、新たな課題が見いだされ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

進捗管理

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

進捗管理：事前評価結果への対応

	指摘	対応
1	成果が国内の循環に寄与するだけでなく、開発したシステム・技術の海外展開にも少しふれておいた方がよい	開発装置の国内外の展開を念頭に、公開可能情報をHP等で発信することを指導した
2	本研究開発において国内外動向を注視しつつ開発成果の早期実用化を期待する	各研究開発項目で、国内外の研究開発の動向情報を収集し事業に生かし研究開発成果の早期実現に繋げる旨指導した
3	製品特定が容易となる情報や解体しやすい設計を求めたり、解体方法を開示したりする仕組み作りが、本事業から得られる成果や議論を基に効果的に推進されることを期待する	研究開発項目①で推進するリマニュファクチャリング対応解体システムを推進することで解体方法の基本設計を行い、また得られた情報を研究開発項目②でのリマニュファクチャリング工場における情報活用で検討し仕組み作りに繋げる旨指導した
4	厳格化していく化学物質規制への対応方針を早期にクリアにしておくことが望ましい	様々な政策、規制等の情報を収集し、研究開発に生かすようにマネジメントを行う
5	再生材の流通最適化という目標が、高度な製品リサイクルにも適合するような方向性を希望する	研究開発項目②での動静脈情報連携基盤技術の開発により適切に素材が循環するような仕組みづくりを検討することを指導した
6	長寿命化のための設計技術、メンテナンスを通じた長期使用、リユースやリマニュファクチャリングによる部品の機能価値を維持した循環などへ貢献することにも期待したい	研究開発項目②でのリマニュファクチャリング工場における情報活用で各種情報を適切に利活用し製品設計に繋げる仕組み作りの検討を指導した

進捗管理：動向・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。

進捗管理：成果普及への取り組み

■ 新産業技術促進検討会シンポジウム

9月にモノづくり日本会議（日刊工業新聞社）主催の「新産業技術促進検討会シンポジウム」にて、本研究開発の進捗状況・成果等を報告するシンポジウムを企画中。



モノづくり日本会議
日刊工業新聞

新規イベント会員登録 ログイン

ホーム モノづくり日本会議活動 掲載記事 イベント&研究会 運営組織 会員企業 入会案内

年間40本を超えるシンポジウムや勉強会を開催

持続的に成長可能なモノづくり社会に向けて

<https://www.cho-monodzukuri.jp/>

進捗管理：開発促進財源投入実績

件名	年度	金額 [千円]	目的	成果・効果
破碎前粗解体装置システム機能追加	2023	5,148	指の力点やねじり動作といった手解体作業の再現が可能なロボット解体機を検討するために、ロボット解体試験機を設計・製作費用を計上する。	作業員の手作業に近い動作が可能なハンド部機構や治具の基本ツールを製作し、手元の細かい動作種類のグループ化を検討した結果、AI型搭載システムとして自動機械化を進めることが可能となった。
家電分類ライブラリ追加実装		1,300	分類精度の目標達成には、当初想定した以上の画像ライブラリが必要であることが判明しライブラリを追加実装するため。	研究加速の為に約60種類の家電が必要と判断し、4方向の写真撮影像をライブラリに追加し研究の加速につながった。
LED照明とコントローラ		1,690	太陽光の影響により画像認識精度が低下し、家電分類の精度が低下することが判明した。ドーム型照明とコントローラを購入・設置する。	購入したドーム型照明により安定して小家電の撮影ができ、研究開発の加速につながった。
ロボット解体装置の開発	2024	15,900	難解体物への対応を速やかに図るべく、これらのシステム構築・運用に要する費用を計上する。	小型廃家電の解体作業の効率を向上するための調査データを初めて取得した。
拡散モデル学習用GPU搭載計算機		13,000	実構造を反映した廃製品のモデルを構築すべく、GPU搭載により演算性能が20倍程度向上した計算機を導入するため。	廃製品の切断面画像に基づく反復的な内部構造の推定の実現可能性を検証することができた。
バスプランニング検証用のロボットシステム		12,350	複雑な動作にも対応可能とすべく、双腕ロボットによる検討を進めるために、再委託費を計上する。	はめ込み構造等の複雑な分解動作の検討・開発加速につながった。
6自由度ロボットアーム		9,360	難認識物を含む製品内部の微細な構造に対応した解体動作研究のために6自由度ロボットアームを設置する。	製品内部の微細な構造データを効率的に収集することができ、AIによる難認識物認識の開発加速につながった。
高性能計算機導入		12,155	動画や位置センサー情報から作業動作を予測する深層学習モデルの構築に要する性能として、50倍以上の処理能力を有する高性能計算機が必要になったため。	部品調達の遅延等により25年度に納品予定である。
補助員費の追加		2,860	深層学習モデルの構築に要する人材として、データベース構築とデータからの作業特徴抽出に係る人件費を計上する。	廃小型家電製品の種類の別の手作業動作の詳細な情報をデータベース化する解析作業を遂行できた。
ハンディFTIR購入		9,724	破碎前の部品を対象としてプラスチックの種類分析を実現すべく、非破碎で分析可能なハンディタイプの当該装置を購入するため。	単体分離分析作業や破碎後産物のプラスチック選別精度判定についても作業効率化が見込まれる。
流体解析シミュレーション能力の強化		12,055	エアテーブルでの実験値との比較を通じてシミュレーションによる予測精度を高めるべく、3倍の解析条件の検討を可能とするソフトウェアライセンスを計上する。	シミュレーションに成功するとともに、重要なパラメータである摩擦係数の範囲を特定することができた。
ベルトコンベア型マルチ搬送システム追加		27,170	一つの搬送ラインで複数の産物を同時に搬送するためにコンベア位置の原点を自動調整する機能が必要であることが判明し、試作品を作製する費用を計上する。	複数装置間を相互搬送する各ベルトコンベア、バケットコンベアにおける搬送の課題を早期に抽出し対応方法を検討できた。
識別・分類機能/電源ケーブルカット機能試作		14,040	電源ケーブルの切断機構の改良および切断位置の検討が不可欠であることが判明し装置を試作するための費用を計上する。	問題点と限界を明確にすることができ、試作機の機能の明確化と設計の加速につながった。
画像処理装置開発費		9,360	検討すべき対象製品の品種数を当初計画に対して増加する必要があることが判明し調査対象製品の増大のため画像処理装置開発費用を計上する。	当初は識別に30秒以上かかっていたが、12種の家電に対して10秒以内で75%の正解率を実現した。
移動・運搬機能試作	6,500	識別・分類機能/電源ケーブルカット機能やその他の機能と結合した動作確認を検討する事が必要であり、移動・運搬機能との結合試作を行うための備品費を計上する。	装置本体内部の構造は2層となっており煩雑であったが、加速財源により1層で簡潔な構造を実現することができ、今後の全機能の統合と拡張の基礎を確立できた。	
樹脂モールド部品の忌避元素除去試験外注費	5,265	最終選別品への忌避元素の合理的な除去技術としてOHラジカル法の適用が有効である可能性が見いだされ、忌避元素除去技術の検証費用を計上する。	除去技術により忌避物質含有樹脂モールドとTa焼結体バインダーの分解までを確認しTa回収の道筋を得た。	
リサイクル工場における情報の活用	11,326	リサイクル工場のメンテナンスロボット「力覚」のフィードバックが不可欠であることが判明し「力覚」情報フィードバックする装置購入費用を計上する。	視覚情報に加え、力覚情報のフィードバックを導入することで、メンテナンスロボットの遠隔操作性が向上した。	

モチベーションを高める仕組み

本事業では以下の仕組みを導入済み

■ インセンティブ制度

実施者のモチベーションの増大や研究開発成果の社会実装の加速化を図るために、中間評価や終了時審査の際に当初設定した目標の達成度等に応じて顕著な研究開発成果を出した案件に金銭や物的なインセンティブを付与する制度。

事業者の皆様へ

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター

NEDO「交付金インセンティブ制度」の導入について

研究開発改革WG 必要経費の一定額を支払いつつ、評価のタイミング等において、成果に連動したインセンティブを支払う仕組み等（インセンティブ制度）を広く導入【令和5年度以降導入】

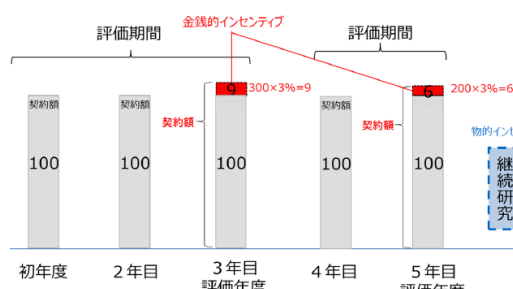
- ・ 顕著な成果を出した案件にインセンティブを支払う仕組みを試行的に導入し、実施者のモチベーションの増大や研究開発成果の社会実装の加速化を図る。

事業期間中の成果が目覚ましい案件に対して、以下のインセンティブを付与

- ① **金銭的インセンティブ**：委託事業 契約額を増額（配賦予算※の範囲内）
助成事業 助成率の増率
- ② **物的インセンティブ**：事業終了後、NEDOが一定期間資産を貸与（委託事業のみ）

※評価年度に当たる全契約の評価期間契約額に定率（試行的には当面、3%を想定）を乗じた額（プロジェクトによって運用は異なる）

委託事業のインセンティブ付与イメージ



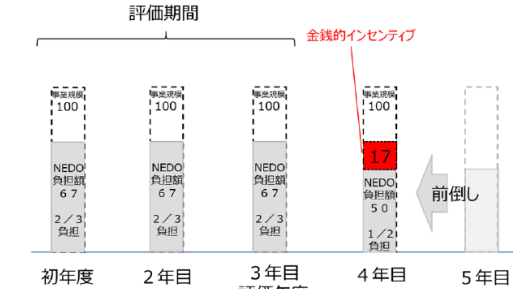
初年度 2年目 3年目 4年目 5年目

契約額 100 100 100 100 100

金銭的インセンティブ 9 (300×3%=9) 6 (200×3%=6)

物的インセンティブ 継続研究

助成事業のインセンティブ付与イメージ



初年度 2年目 3年目 4年目 5年目

事業規模 100 100 100 100 100

NEDO負担額 67 67 67 50 17

金銭的インセンティブ 17

前倒し

金銭的インセンティブにより
委託事業においては、成果の更なる発展のための装置の追加購入、試験追加等が可能に

物的インセンティブにより
通常、事業終了後は委託研究資産を原則事業者が買い取るところ、引き続き「現役」のNEDO事業として位置づけ、資産を貸与し、社会実装に向けた継続的な研究開発が可能に

「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」(中間評価)

2023年度～2027年度 5年間

プロジェクトの詳細説明 (公開版)

2025年6月27日

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

資料3-1_プロジェクトの説明【公開】

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋



2. 目標及び達成状況



3. マネジメント

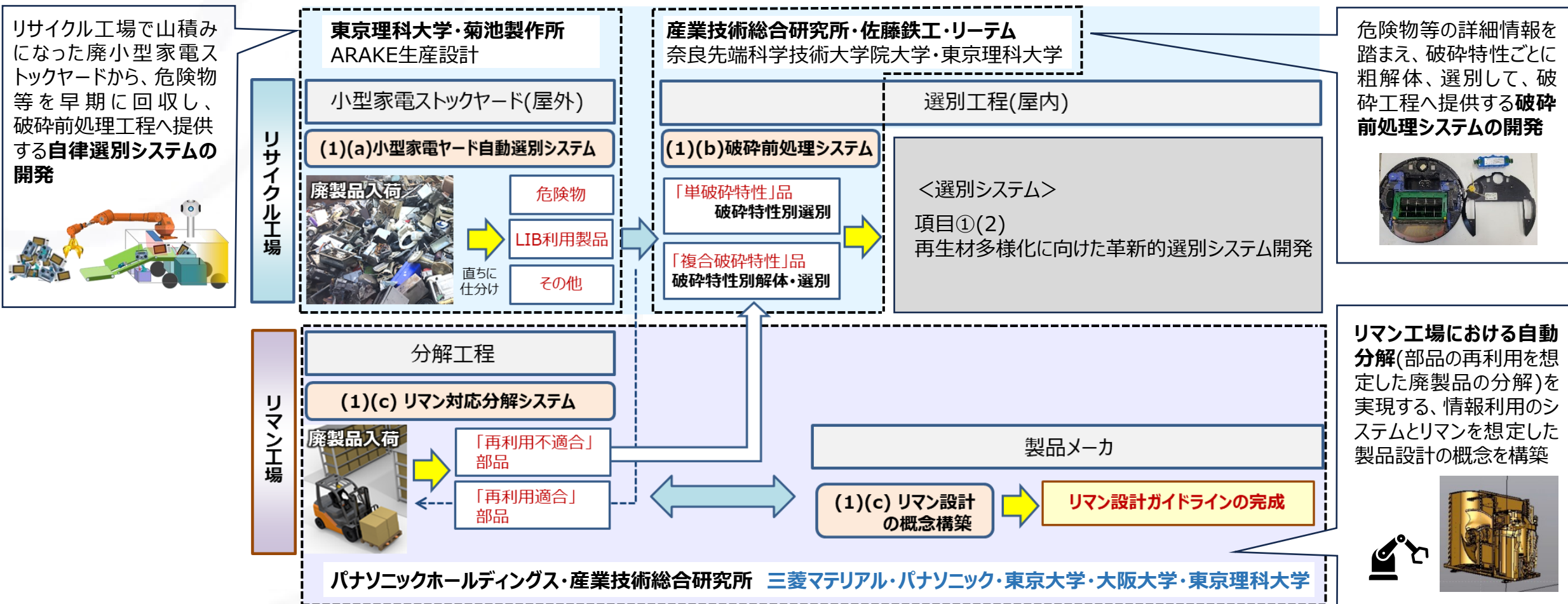
資料3-2_プロジェクトの詳細説明【公開】

2. 目標及び達成状況（詳細）

研究開発項目①(1)の概要

製品解体・分解システム開発

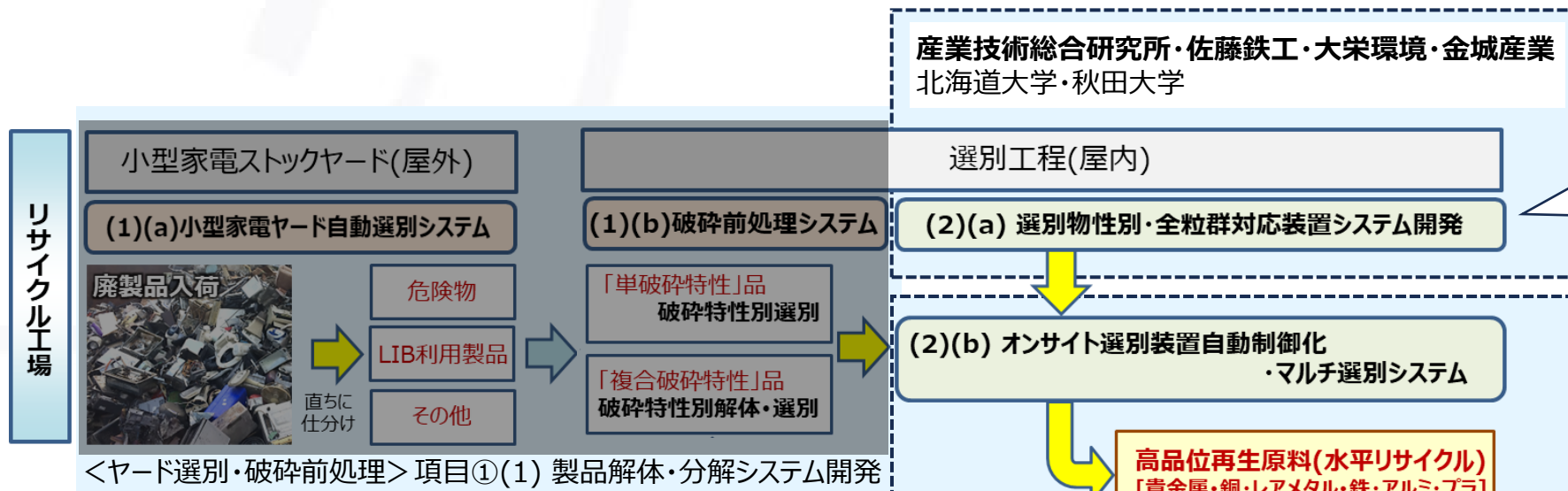
廃小型家電の入荷から選別工場で破碎を行う前の処理と、リマニュファクチャリング(リマン)導入に向けた分解技術等の装置及び装置制御技術の開発を実施する。



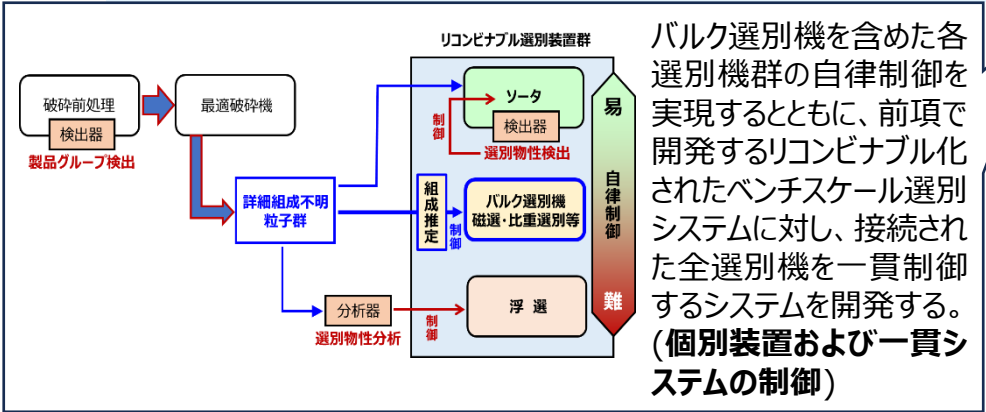
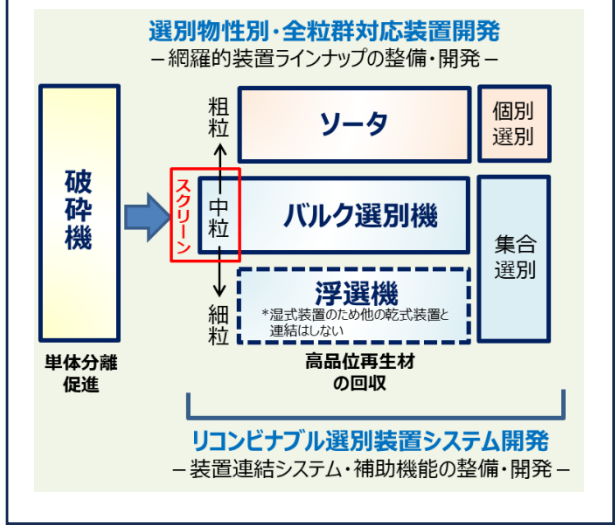
研究開発項目①(2)の概要

再生材多様化に向けた革新的選別システム開発

廃小型家電に対する**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。



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**を実施し、さらに、各装置の組み換えを容易にするため、装置間接続を容易にする**リコンビナブル機能**を開発する。(ハードウェアの網羅的ラインナップ)

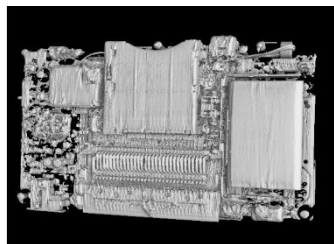


研究開発項目②(1)の概要

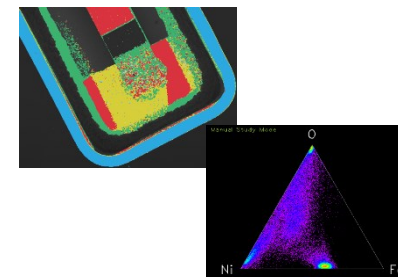
データベース構築支援に向けた 高度分析・計測システム開発

廃小型家電の製品構造を速やかに分析し、製品データを取得することによって、解体、破壊の指針を提供するとともに、製品自体の資源循環性を評価する指針を確立する。

項目①(1)(b)で開発する「破碎前処理システム」に提供可能な、**3次元の製品構造解析**により製品破碎特性が推定可能な**分析技術**を開発。また、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「資源循環性指標」として提示する方法を構築する。



粗粒破碎物の単体分離状態を分析するため、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技術を開発。また、廃製品由来の細粒子に対応した、**SEM-EDX**ベースの**単体分離分析技術**を開発する。



産業技術総合研究所・大栄環境・
パナソニックホールディングス・東京大学

(1)(a) 製品選別情報自動分析システム



製品構造解析

破碎特性評価

取得情報

製品資源循環指標

項目①(1)(b)
破碎前処理システム

破碎物

産業技術総合研究所

(1)(b) 粒子選別情報自動分析システム



粒子構造解析

粗粒破碎物
微粒破碎物

単体分離評価

取得情報

リサイクル工場

項目①(2)(a)
選別物性別・全粒群対応装置開発

研究開発項目②(2)の概要

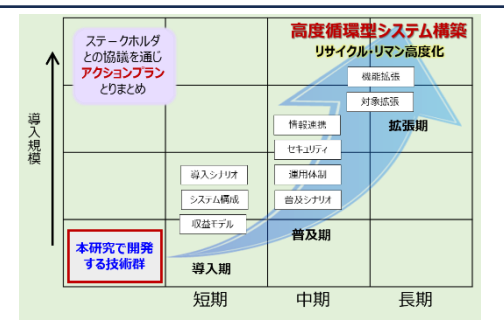
再生材流通高度化に向けた 基盤技術開発

廃小型家電の連続試験が可能なモデルプラントを整備し、情報連携機能を検証・強化するとともに、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技術に関わる、社会実装シナリオを取りまとめ、提示する。

過年度に開発したCEDEST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。



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。また、高度循環型システム構築に向け、段階的導入を想定した社会実装シナリオを策定、本研究で開発する技術群の社会導入を想定し、アクションプランとしてとりまとめる。



産業技術総合研究所・大栄環境・佐藤鉄工・サトー
東京理科大学

(2)(a)リサイクル工場における情報の活用



連続試験モデルプラントの整備

連続試験データ獲得

取得情報

動静脈情報
伝達検証

メンテナンス
システム検証

項目①(2)(b)
オンサイト選別装置自律
制御化・マルチ選別システム

パナソニックホールディング・産業技術総合研究所
野村総合研究所

(2)(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

リマン対応分解システム
の情報連携基盤

確立情報

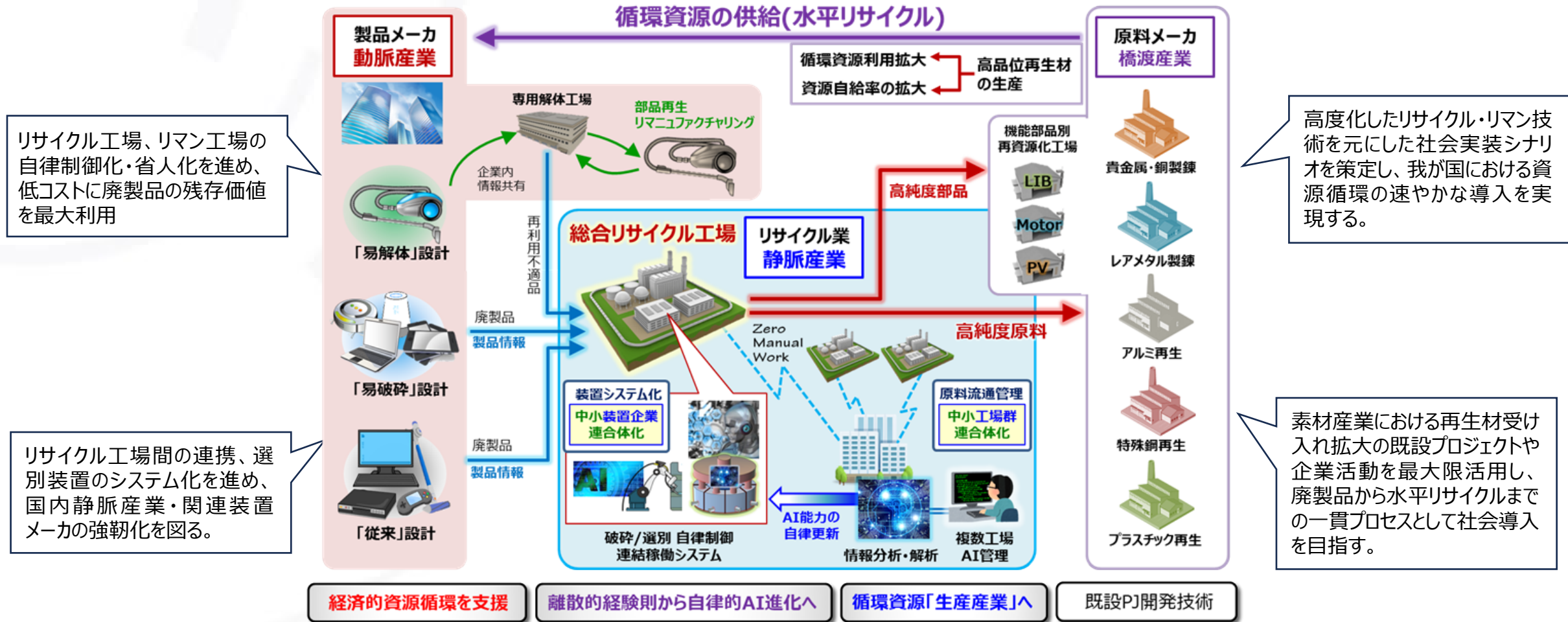
項目①(1)(c)
リマン対応分解システム・リマン設計

社会実装シナリオの策定

研究開発項目①②の概要

社会実装後の未来イメージ

近未来の高度循環型システム構築のイメージ



研究開発項目①(1)の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

テーマ名	製品解体・分解システム開発	達成状況	○(達成見込み)
達成状況の根拠	<p>(a) 小型家電ヤード自律選別システム：ピックアップ機能は、試作により機能を確認済み。識別・分類機能、移動・運搬機構は、動作確認は終え、基本試験を完了。ケーブルカット機構は、不具合の対応策も考案済み。装置開発は、基本的な方法論は確立し実装済みである。</p> <p>(b) 破砕前処理システム：廃製品のグルーピング、前処理の追加で精度向上が見込め、中間目標の解体成功率を達成する見込み。ロボット解体試験機は、既に自動試験機の設計に着手済み、更なる情報追加で解体正答率70%以上を達成見込み。</p> <p>(c) リマン対応分解システム・リマン設計：分解CPS、自律分解システムは構築済みであり、基本的な構造については、既に正答率70%以上を達成。課題であるスナッフ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見込み。</p>		

【開発の意義】

(a) 小型家電ヤード自律選別システム

現 状：廃小型家電入荷時、山積みされたヤード内で危険物や高品位品の仕分けに膨大な人手を要している。
 開発後：世界に類のない自走式の廃製品仕分けシステムによるヤード省人化で、受け入れ可能量が増大。

(b) 破砕前処理システム

現 状：入荷物は直接、破砕機に投入され、単体分離不十分のまま選別されるため高純度化が困難となる。
 開発後：世界に類のない「破砕前処理」により、LIB火災の回避と単体分離容易な状態での破砕が可能に。

(c) リマン対応分解システム・リマン設計

現 状：リマンが進んでいる複写機等でも手作業が多用され、低コスト化と他製品展開が困難となっている。
 開発後：世界に類のない「リマンシステム」により、多様な製品に対するリマン分解の自動化を実現。



世界に類のない新種装置の開発により、リサイクル・リマンの低コスト化・高度化を実現

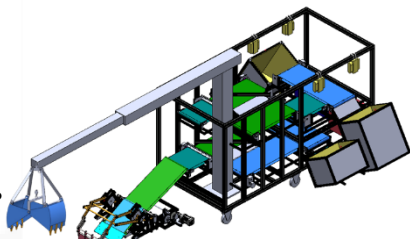
多種多様な廃小型家電の選別前処理とリマン分解の無人化実現により、資源循環の技術的・社会的実装基盤を確立

研究開発成果 項目①(1) : 製品解体・分解システム開発

(a) 小型家電ヤード自律選別システム

(i) ピックアップ機能

掻き込み部、アーム部・先端部を試作。地面上の対象物を全てコンベア上に移動可能にできる見込みを得た。



(ii) 識別・分類機能

画像認識を含む識別機能を試作。対象物の識別が70%以上できる見込みを得た。

(iii) 移動・運搬機能

6輪全方向移動台車を試作。(i)～(iii)を統合し、3次元マップに基づき自在かつ確実に移動・運搬・排出ができることを確認予定。



(iv) 電源ケーブルカット機能

性能試験ユニットを試作。本体と絡まりのない状態なら100%カットできる見込みを得た。

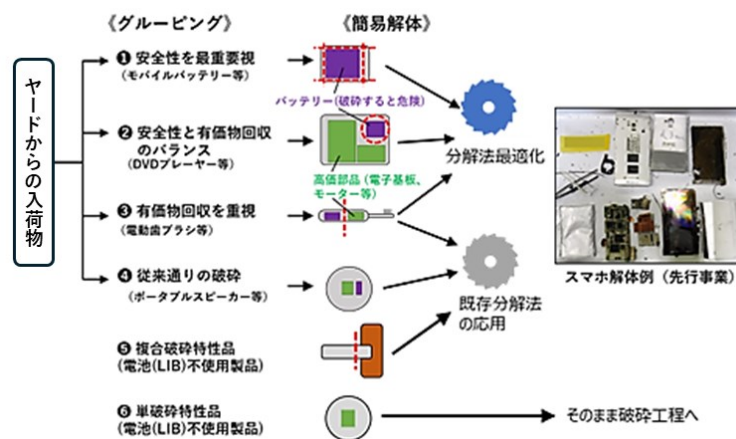


(v) 画像処理装置

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%、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分以内を実現予定。

(b) 破砕前処理システム

透過X線及びAIを用いてグルーピングを行い、破砕前粗解体選別システム開発用ソフトウェアとして、可視光及びAIによるソーティングプログラム及びGAN等を用いた教師データ生成プログラムの機能拡張を実施。また、弱点形成の機械機構を装置化した破砕前解体システムを試作するとともに、対象品目・弱点形成プログラムの対象品目を拡張。振動機又は衝撃破砕機による弱点形成後の解体方法を開発。廃製品3品種以上に対し、解体手法の正答率70%以上で自律的に行うことが可能な装置システムを開発し、解体手法毎に策定した生産性(処理速度、正確さ・精度等)のベンチマークと同等以上の性能を達成する見込み。



(c) リマン対応分解システム

・リマン設計の概念構築

各要素技術を開発・連携したリマン対応分解システムを試作。分解手順生成する簡易CADの検証し、これをもとに分解手順生成および強化学習を活用したパスプランニングにより、ロボット動作の生成を行う。「分解DB」と「自律分解ロボット」を組み合わせた連携検証を実施し、分解すべき廃製品3品種に対して分解手法の正答率70%を達成する見込み。

リマン設計の概念構築はガイドラインを試作し、リマン設計を施したモックを作成し、分解検証を実施する。実製品の設計変更の結果を反映した設計要件を提示し、設計したモックに対して分解検証、他製品のリマン対応設計も検討。またリマン設計を施したモックでの検証を少なくとも1品種で完了する見込み。



サイバー上での自律分解検証

試作した自律分解システム

研究開発成果 項目①(1)：製品解体・分解システム開発

中分類	小分類 (要素技術)	中間目標 (2026年3月)	成果(実績)	達成(見込み)	達成の根拠/解決方針
(1)製品解体・分解システム開発	(a) 小型家電ヤード自律選別システム	開発するピックアップ機能、識別・分類機能、移動・運搬機能を統合するとともに、地面にある対象物を全てコンベア上に移動、対象物の識別70%以上、3次元マップに基づく移動・運搬・排出、本体から独立した電源ケーブルの100%カット、移動から識別・仕分けまでを1個当たり5分以内を達成する。	ピックアップ機能は、グラブで掴む機構と小物すくい上げる機構を試作。識別・分類機能は、分類を実現し、既にLIB製品はほぼ分類可能。移動・運搬機構では、6輪の全方向移動、カメラとLidarによる自己位置推定と目標値の認識、排出機構を実装し、動作確認した。ケーブルカット機構では、切断不具合等の問題点把握と改良点を明確にした。装置開発では、画像解析による家電識別の認識率向上と処理速度に重点を置いて検討。家電11品種12個に対して75%の識別率であり、識別のみを10秒以下で実現している。	○ 2026年3月に達成見込み	ピックアップ機能は、試作により機能を確認しており、今後、問題が生じるリスクは小さい。識別・分類機能、移動・運搬機構は、動作確認は終え、基本試験は完了している。ケーブルカット機構では、試作機で不具合を確認、既に対応策も考案済み。装置開発では、サンプルを増やすことと識別制度を上げることを進めていくが、基本的な方法論は確立し実装済みである。
	(b) 破碎前処理システム	廃製品3品種以上に対し、解体手法の正答率70%以上で自律的な破碎前粗解体選別システムを開発。解体手法毎に策定した生産性ベンチマークと同等以上の性能を達成する装置システムを試作する。ロボット解体試験機開発では、現場手解体作業の動作解析から現場作業員の経験則を抽出し、上記正答率を更に向上するための指針を得る。	3品種以上の廃製品に対し、コア技術となるX線画像のAI解析による選別プログラムを開発したところ、正答率70%以上で品目識別できることを確認。廃製品の解体実験を行ない、開発装置システムの基盤となる実験装置を試作した。ロボット解体試験機では、工場作業員の動作をマルチセンサ・マルチカメラで追跡できる柔軟で可搬性の高い計測システムの構築に至った。	○ 2026年3月に達成見込み	今後、廃製品をグルーピングにより、選別精度は現状より高くなることが予想される。また、今後、前処理の追加で精度上がり、中間目標の解体成功率を達成する見込み。ロボット解体試験機では、既に、映像やセンサーから距離と必要動作の判断及び実行する自動試験機的设计に着手済。今後、位置情報に力情報を追加する手法も導入するため、現場作業員の経験則をより効率的に取得し、解体正答率70%以上を達成できる見込み。
	(c) リマン対応分解システム・リマン設計	簡易CAD、分解手順生成・識別方法などの要素技術を確立した上で、「分解DB」と「自律分解ロボット」を組み合わせた連携検証を実施し、廃製品3品種に対して分解手法の正答率70%を達成。リマン設計ガイドラインを策定した上で、リマン設計を施したモックでの検証を少なくとも1品種で完了。	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。それらを統合し物理Simが可能となる分解CPS環境の構築完了。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。「分解DB」と「自律分解ロボット」を組み合わせた連携検証を実施し、分解すべき廃製品1品種に対して分解検証完了。約300項目からなるリマン設計ガイドラインの策定完了。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完了。	○ 2026年3月に達成見込み	分解CPS、自律分解システムは構築済みであり、基本的な構造については、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、達成見込みである。

研究開発項目①(2)の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

テーマ名	再生材多様化に向けた革新的選別システム開発	達成状況	○(達成見込み)
達成状況の根拠	<p>(a)選別物性別・全粒群対応装置システム開発：破碎機はMAP作成のための基礎データを整備。MSSは装置試作が予定通り進捗。バルク選別機群は自律制御を阻害する形状を特定可能な状況に。エアテーブル・ネルソン・浮選も予定通り試作可能に。リコンビナブル選別装置システム開発：1t/日級のリコンビナブル選別システムは予定通りに試作完了し、基本的な装置間の試料搬送を検証済み。</p> <p>(b) オンサイト選別装置自律制御化・マルチ選別システム：個別選別装置の自律制御化は、サイズ・形状統一指標の開発可能な状態に。拡張版AESSも試作済で、中間目標の達成は可能。マルチ選別システム開発は、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。基本的な搬送制御えお検証済み。</p>		

【開発の意義】

(a)選別物性別・全粒群対応装置システム開発

現 状：個別対象物に対し個別の選別機試験により試行錯誤で制御。選別機の機能最大化要件が不明で、対象物の多様性や変動にも対応できず、不足分を手解体・手選別で補うため、低コスト化や量産が困難に。

開発後：最適な単体分離・ソータ選別を確立。バルク選別機の阻害因子(サイズ・形状)の影響解消で多様な対象物の選別機能最大化を実現。装置を自在に組み合わせる機能開発で、手作業なしで多様性や変動に対応。

(b) オンサイト選別装置自律制御化・マルチ選別システム

現 状：手解体・手選別でも細部まで対応できなため高純度再生原料とならず、水平リサイクルは銅・貴金属に限定。

開発後：バルク選別装置の阻害因子であるサイズ・形状のバラつきを数値化し制御。選別装置群の最適組み合わせ、各装置の運転を最適化する数値計算の実現により、無人で多様な素材の高純度再生原料が生産可能に。

選別物性別・全粒群対応システム

整粒機構	従来選別機	自律制御
------	-------	------



多様な製品・素材に対応した選別装置・選別システムの自動・自律制御を実現

旧来の貴金属・銅に加え、レアメタル、アルミ、鉄、プラスチックなども、無人の選別システムで、水平リサイクル可能な高純度再生原料として生産可能に。

研究開発成果 項目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

選別物性別・全粒群対応装置開発

■ 破碎機 (単体分離特性MAP)

試料、破碎機のグループの組み合わせによる単体分離特性のベンチマーク試験を実施し、単体分離特性に対する破碎機評価MAPを作成。対象廃棄物の5割以上を検証済み。

■ ソータ:マルチセンシングソータ(MSS)の開発

複数センサに自在に組み合わせ総合判断をするソータを試作。鉄スクラップ選別を例に1t/日の処理に対応可能なMSS基本システム及び分散供給機構を開発。

■ バルク性質利用選別機の開発・整備

比重・磁性・導電性等を利用した各種バルク選別において、計算に基づく自律制御を阻害する形状の影響をキャンセルさせる形状整粒スクリーンを試作。既存選別機群の選別限界と下限粒径を検証。加えて、機構的に自律制御が困難な、エアテーブル・ネルソン・浮選について、半自律的な制御を可能にする機構を開発する。

センシングユニット		選別対象の破砕物				
名称	名称	全粒群別選別	無機物	鉄屑鉄合金選別	非黒色有機物	黒色有機物
2D	2次元カラー画像	●	●	●		
3D	3次元画像	●	●	●		
IND	誘導電磁力		●			
XRT	X線透過率	●	●			
H-LBS	レーザー誘起プラズマ発光スペクトル			●	●	●
NIR	近赤外線吸収スペクトル	●				
THz	テラヘルツ波透過率/反射率				●	●
IES	帯電量					●
Raman/FT-NIR	ラマン分光/フーリエ変換型赤外線分光					●
	データ融合・AI解析	●	●	●	●	●

●:対象物別に使用が想定されたMSSユニット

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]

小型家電破碎粒子の選別装置間の相互搬送を行うとともに、選別装置の組み換えが容易な、ベルトコンベア型マルチ搬送システム(リコンビナブル選別システム)を開発。前記の主要選別装置群を含む、1t/日級の「ベンチスケール選別システム」を試作。

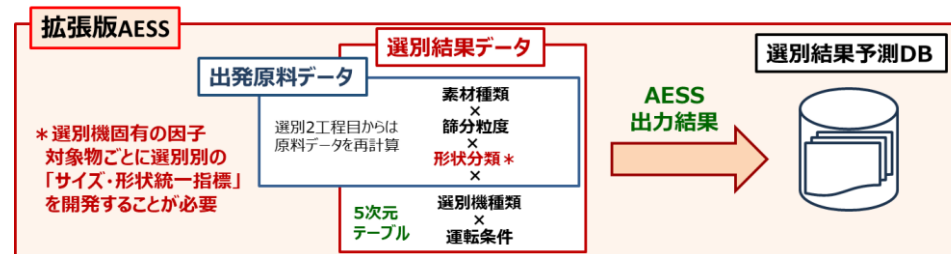


マベル
ルル
基チト
本搬コ
モ送ン
ジシバ
ユスア
ーテ型
ルム

(b) オンサイト選別装置自律制御化・マルチ選別システム

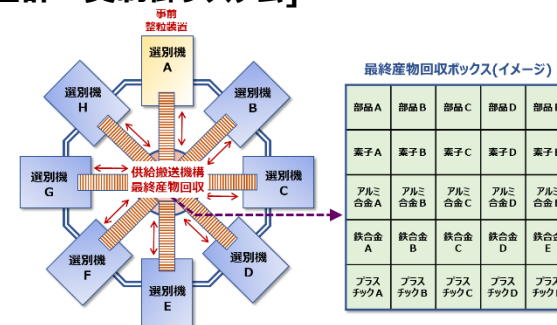
個別選別装置の自律制御化

形状が統一されている電子素子については、ソータはもとより、バルク性質量選別機についても、個別装置の制御及び選別システムを計算で最適化するソフトウェア「AESS」を過去に開発済みである。①(2)(a)で開発する「形状整粒スクリーン」を経ることで、多様な破碎物に対しても形状範囲が認識可能となる。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。



マルチ選別システム開発 [選別装置群一貫制御システム]

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。また、解体・破碎工程を含めた廃製品の情報管理システムを試作するとともに、選別目標となる選別産物の要求組成を算定する。



リコンビナブル選別システムの概念図

研究開発成果 項目①(2)再生材多様化に向けた革新的選別システム開発

中分類	小分類 (要素技術)	中間目標 (2026年3月)	成果(実績)	達成 (見込み)	達成の根拠/解決方針
(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	<p>破砕機:対象物・破砕機グループに対する単体分離特性試験を実施し「単体分離最適化MAP」のための基礎データを整備。ソータ:鉄スクラップの鋼材種、外観形状をDB化。鉄スクラップ選別を例に1t/日選別システムに対応可能なMSS基本システム及び分散供給装置を試作。バルク性質利用選別機の開発・整備:各種バルク選別において、自律制御を阻害する形状の影響をキャンセルさせる整粒スクリーンを試作。機構的に自律制御が困難なエアテーブル・ネルソン・浮選について、半自律的制御を可能にする機構を開発。リコンビナブル選別装置システム:選別装置間の相互搬送と選別装置の組み換えが容易なベルトコンベア型マルチ搬送システム(リコンビナブル選別システム)を開発。主要選別装置群を含む1t/日級の「ベンチスケール選別システム」を試作。</p>	<p>破砕機:対象物構造、破砕機をグループ化、単体分離特性評価方針を決定し、廃棄物全体のうち5割以上に相当するサンプルを対象として、試料、破砕機のグループの組み合わせによる単体分離特性のベンチマーク試験を行った。ソータ:マルチセンシングソータ:対象製品/鋼材種の組成調査、スクラップの外観情報DB化した。また、MSS基本システム、MSS供給分散機構を試作した。バルク性質利用選別機の開発・整備:各種バルク選別の選別データを取得。气流選別機について(2)(b)で開発したサイズ・形状統一指標により自律制御を阻害する形状を特定し、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、実験とシミュレーションにより半自律制御に必要な要素技術を開発し、半自律制御を実現し得る装置を試作した。リコンビナブル選別装置システム開発:リコンビナブル選別機構の機械的接続方法、情報接続仕様を決定し、複数装置間の試料相互搬送が可能な1t/日級のリコンビナブル選別システムを試作した。</p>	○ 2026年3月に達成見込み	<p>破砕機:取得した分析情報に基づきMAP作成のための基礎データの整備が可能。ソータ:中間目標を達成に向けた装置試作が予定通り進捗。バルク性質利用選別機の開発・整備:气流選別と同様の手順で他装置についても自律制御を阻害する形状を特定、整粒スクリーンを開発することが可能。エアテーブル・ネルソン・浮選についても装置の試作は予定通りに進捗。リコンビナブル選別装置システム開発:1t/日級のリコンビナブル選別システムは予定通りに試作完了し、基本的な装置間の試料搬送は検証済み。</p>
	(b)オンサイト選別装置自律制御化・マルチ選別システム	<p>個別選別装置の自律制御化:各選別機に影響するサイズ・形状統一指標を明らかにし、個別装置の自律制御確立のため、形状パラメータを組み込んだ拡張版AESSを試作。マルチ選別システム開発:前記で開発する拡張版AESSの計算結果に基づき、リコンビナブル化された装置群を、選別工程制御、装置間の搬送制御を含めて一貫制御するシステムを開発を試作。1t/日級ベンチスケール選別システムに組み込む。また、解体・破砕工程を含めた廃製品の情報管理システムを試作し、選別目標の産物組成を算定する。</p>	<p>個別選別装置の自律制御化:各選別機毎にサイズ・形状統一指標を検証中。まずは气流選別のサイズ・形状統一指標を開発した。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:選別工程制御、コンベア上の搬送産物位置認識機能を持つ選別装置群一貫制御システムを、1t/日級ベンチスケール選別システムに組み込みテスト中。また、廃製品の情報管理システムを試作。選別産物の要求組成について、貴金属の最低含有率や製錬忌避物質の受入上限の調査するとともに、乾式製錬技術では回収できない金属種の回収技術を検討した。</p>	○ 2026年3月に達成見込み	<p>個別選別装置の自律制御化:サイズ・形状統一指標について、气流選別と同様の手順にて他装置も開発可能な見込み。拡張版AESSも試作済で、中間目標の達成は可能。マルチ選別システム開発: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、2026年3月までに選別工程制御、処理速度の検証を実施予定。</p>

研究開発項目②(1)の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

テーマ名	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	達成状況	○(達成見込み)
達成状況の根拠	<p>(a) 製品選別情報自動分析システム：X線CTによる製品3次元ボクセルデータは合計70以上を達成できる見込み。ルールベース及び深層学習による内部構造データ取得は、数分/ケース程度の処理速度となり、人手の解体・測定時間の1/10以下を達成見込み。ポテンシャル指標の原案構築は予定通り完了し、マテバラ分析をもとに3品目の簡易評価を進め、妥当性を確認予定。</p> <p>(b) 粒子選別情報自動分析システム：粗粒破碎物：モデル①は粒子画像から2次元的な単体分離状態を推定し、3次元の単体分離状態への変換精度を向上。モデル②は、実廃棄物粒子に近い構造を検証し、改造を図ることで目標を達成する見込み。細粒破碎物：合金の人工物分析境界を判定。人工物形状特徴は(a)の成果を共有。この特徴情報と連携し、人工物の2D→3D変換モデルを確立できる予定。</p>		

【開発の意義】

(a) 製品選別情報自動分析システム

現 状：研究開発項目①では、現状の廃小型家電の構造分析データに基づいて破碎前処理のグループ化・最適化を行うが、汎用的な分析手法が確立されておらず、新製品対応など事業終了後の継続的なデータ取得が困難。

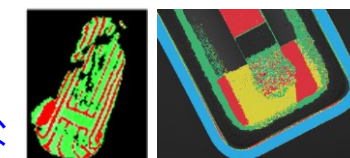
開発後：未知製品について汎用かつ迅速な構造データを取得できるようになり、継続的な情報の拡充が可能となる。



(b) 粒子選別情報自動分析システム

現 状：研究開発項目①では、廃小型家電の破碎データに基づいて破碎産物をグループ化、適正な単体分離の実現を目指す。細粒鋳物の単体分離分析法しか存在せず、人工物の正確な評価に多大な時間を要している。

開発後：人工物に対して粗粒・細粒に対応した単体分離分析法を確立し、リサイクルに適した単体分離・素材の迅速な評価を実現。



廃製品構造や破碎産物の各素材の単体分離を判定・データ化する分析装置群を開発

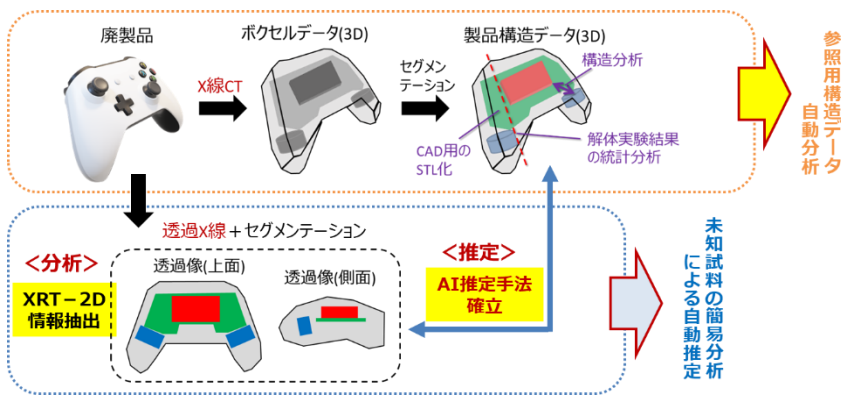
メーカー等から製品情報の提供がなくとも、適切な解体・破碎を行う条件を継続的に取得可能に。粗粒を含めた人工物破碎物の単体分離を精度良く分析することで、選別制御にフィードバック可能に。

研究開発成果 項目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

製品破碎特性分析技術開発

廃製品の破碎特性を分析するには、現状、手作業で行うしかないが、これを短時間に自動で分析するシステム。まずは、X線CTデータから、製品の3次元ボクセルデータの取得(70以上)し、製品3品種以上を例にデータセットの完成例を示す。従来の人手による解体・測定に対して、1/10以下の時間でデータ取得が可能となる分析手法を提示する。



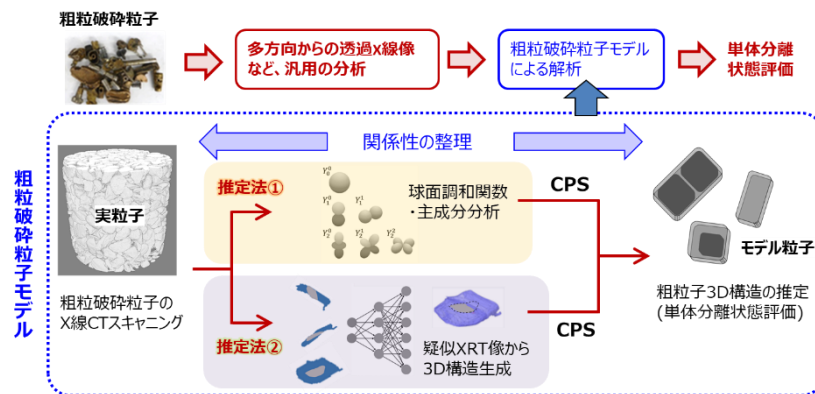
動静脈連携を考慮した資源循環性に資する指標の提示

項目①の開発で、製品情報に基づく資源回収価値が推定できれば、このシステムの利用を前提に、動脈側が販売する製品の構造に基づいて、静脈側でどれだけ資源価値が回収可能かが推定できる。この指標化の手法を開発し、指標の原案を構築。調査結果も踏まえて動脈側の製品の資源循環配慮性と静脈側の工場の高度さの指標についてまとめ、資源循環性に資する指標の案に対して3品目以上で簡易評価を行ったうえで、指標を一旦完成させる。

(b) 粒子選別情報自動分析システム

粗粒破碎物の選別特性分析技術開発

現在は存在しない粗粒を対象とした単体分離分析装置を、人工物粒子の形状特徴に合わせて開発する。2つの破碎粒子モデルを検討し、X線CTデータと比較しつつ、合理的な3D粒子情報生成アルゴリズムを開発する。X線CTスキャン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。



細粒破碎物の選別特性分析技術開発

粒子の3D解析は、粗粒破碎物の選別特性分析技術と共有した上、過去に鉍物向けに開発済みであるSEM-EDXベース単体分離分析装置「CAMP」を人工物に対応した分析装置として開発する。CAMP独自の組成クラスタリング技術用い、合金の検出精度を検証する。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を開発、人工物の3D変換モデルの速度と精度を検証し、SEM-EDXベースの単体分離分析システムを試作する。

研究開発成果 項目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

中分類	小分類 (要素技術)	中間目標 (2026年3月)	成果(実績)	達成(見込み)	達成の根拠/解決方針
(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	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を開発において、X線CTによる製品の3次元ボクセルデータの取得(70以上)を実施し、製品内部構造データをまとめる。製品3品種以上を例にデータセットの完成例を示す。従来の人手による解体・測定に対して、1/10以下の時間でデータ取得が可能となる分析手法を提示する。 資源循環性指標は、各文献調査を踏まえ、動脈(資源循環配慮)と静脈(工場の高さ)を示す項目を設定し、指標原案を策定。3品目以上で簡易評価を行い指標を完成。	X線CTによる製品の3次元ボクセルデータを40以上取得済み。製品3品種以上を対象として、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。既存指標調査を踏まえ、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ための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マテバラ分析(3商品)を完了。	○ 2026年3月に達成見込み	2025年度にX線CTによる製品の3次元ボクセルデータを30以上取得する予定であり、中間目標である合計70以上を達成する見込み。 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では、数分/ケース程度の処理速度となる予定であり、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。 これまでの議論で、本評価指標をポテンシャル指標と位置付けることができ、原案の構築が予定通り完了。今後は、マテバラ分析をもとに、簡易評価を3品目進めることで、妥当性を確認することができ、目標を達成できる見込みである。
	(b) 粒子選別情報自動分析システム	粗粒破砕物：粗粒破砕粒子モデル①及び②を開発し、これらに基づき、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。 細粒破砕物：鋳物向けに開発済みのSEM-EDXベース単体分離分析装置「CAMP」を人工物に対応した分析装置として開発する。素材種の判定と、人工物の形状特性評価を行い、人工物の2D→3D変換モデルを確立し、SEM-EDXベースの単体分離分析システムを試作する。	粗粒破砕物：粗粒破砕粒子モデル①の具体化プロセスとして、粒子の画像から2次元的な単体分離状態を推定し、3次元の単体分離状態に変換する手法の方法論を開発した。また粗粒破砕粒子モデル②の推定法として、透過X線データ等の2次元情報から3次元構造を推定する手法の開発を行い、比較的単純な構造の場合に高精度の推定が可能であることを確認した。 細粒破砕物：素材元素組成情報を整理し、素材分類アルゴリズムを作成した。旧来のMLA(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を確認した。また、鉄合金標準試料をCAMP分析し合金識別可能性を検証し、少なくとも隣接組成合金がなければ、系別の合金識別は可能であることを確認した。	○ 2026年3月に達成見込み	粗粒破砕物：粗粒破砕粒子モデル①開発について、2025年度に粒子データ数を増大することで、粒子の画像から2次元的な単体分離状態を推定し、3次元の単体分離状態に変換するプロセスの精度を高める。粗粒破砕粒子モデル②開発について、2025年度中により実廃棄物粒子に近い構造について検証を実施し改造を図る。上記により、中間目標を達成する見込み。 細粒破砕物：(a-1) <製品破砕特性分析技術開発>にて人工物形状特長を検討中。この特徴情報と連携し人工物の2D→3D変換モデルを確立する予定である。

研究開発項目②(2)の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

テーマ名	再生材流通高度化に向けた基盤技術開発	達成状況	○(達成見込み)
達成状況の根拠	<p>(a) リサイクル工場における情報の活用：モデルプラントの整備は予定通り。トラブル発生箇所と解消方法を破碎・選別装置開発とメンテナンスロボ開発に共有。タグ利用技術では貼付機を試作し、テスト・改造を実施して目標の達成の見通し。工場間情報連携では、コスト算出要素と計算手法は整理済。工場間情報連携評価ソフトも試作完了し、ソフトによる評価の妥当性を検証できる予定。</p> <p>(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：リマン対応自律分解システムの開発、情報連携基盤システムのPoCに向けたプロトタイプの開発を完了し、それらの統合検証を実施予定。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検討まで進捗。ステークホルダ(7社以上)からの意見収集・議論により、さらなる精緻化・内容の充実化を図るフェーズであり、予定通り達成できる見込み。</p>		

【開発の意義】

(a)リサイクル工場における情報の活用

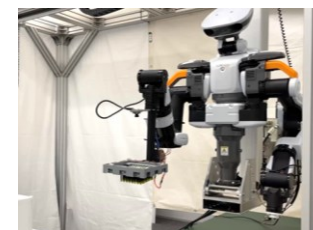
現 状：研究開発項目①で開発する、自律運転可能な選別システムは確立されておらず、情報活用による同システムの活用範囲の拡張は、システム導入後に旧来の経験に基づいて改めて考えることを余儀なくされる。

開発後：メンテナンスロボ、タグ利用システム、工場間連携をモデルプラントで検証することで、システム導入後の速やかな機能選択・拡張が可能となる。

(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

現 状：研究開発項目①で開発するリマン対応分解システムの普及には、動脈-静脈間でのデータ連携など、現状の情報共有では対応できない状況が予想される。また、本事業開発装置の社会実装には、シナリオの作成が重要となる。

開発後：リマン工場向けの製品データ活用法と情報連携基盤・普及シナリオ構築より、速やかな社会実装を実施する。



開発するリサイクル・リマン工場向け装置に対する情報利用技術により機能拡張と普及促進を目指す

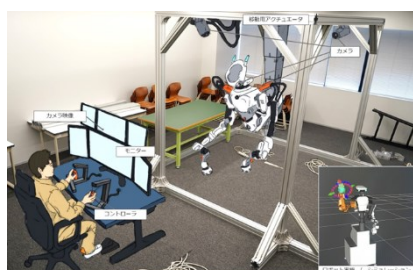
本事業の新規開発装置を前提とした各種の情報活用による技術・システムの提案によって、開発装置の運用方法を同時に検討することで、社会実装の確度を向上。

研究開発成果 項目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

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

先行事業で開発した、一世代前の無人選別システムを本事業において連続操業における課題抽出のモデルプラントとして、連続運転が可能な状態に整備。課題を抽出、原因の切り分けを行い、機械的な機能付与により解消可能なトラブルについては装置改造を行い検証するとともに、新規開発システムへ反映させる。また、遠隔操作のメンテナンスロボによりトラブル解消を行う箇所を特定し、天井吊り下げ型ロボットの移動装置を試作、動作検証を行う。



メンテナンスロボ試作機のイメージ

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

将来製品に情報タグ装着を想定、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。また、RFIDタグ自動貼付装置を試作、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。

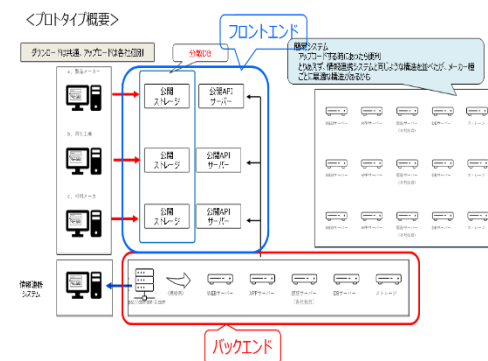
■ 工場間情報連携による選別工程の高機能化

リコンビナブル選別システムをコアに非対応工場との連携する効果を検証。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の検証を行う。

(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

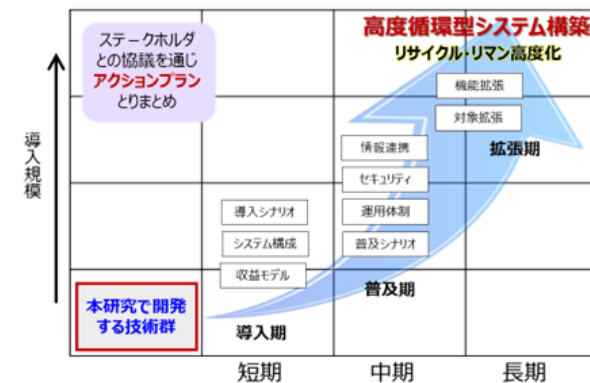
リマン対応分解システムの情報連携基盤に関わるプロトタイプ開発・検証

リマン実現に必要なシステム構成・機能・要件などを設定。リマンの有効性検証で使用するプロトタイプ(情報プラットフォーム及び情報プラットフォームセキュリティソフト)の開発を行う。社会実装を見据えて、情報連携基盤のシステム全体の要件定義を実施し、プロセスの高度化に有用な情報の定義を示す。リマン有効性検証で使用するプロトタイプの稼働検証を行い、その効果の確認。



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

本事業開発技術の社会実装シナリオを作成。資源循環シナリオの評価手法の基本設計について、ステークホルダ(7社以上)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させる。



研究開発成果 項目②(2) 再生材流通高度化に向けた基盤技術開発

中分類	小分類 (要素技術)	中間目標 (2026年3月)	成果(実績)	達成(見込み)	達成の根拠/解決方針
(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	<p>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：先行事業で開発した無人選別システム(CEDESTシステム)を連続運転が可能状態に整備し、連続操業の課題を抽出、遠隔操作メンテナンスロボによるトラブル解消を検証。モデルプラントを利用した情報連携の検証：様々な形状を有する小物家電に貼付可能なRFIDタグ自動貼付システムとRFIDタグ自動貼付システムの動作に必要な小型家電の機種情報管理システムを試作し、成功率70%を達成する。マルチ選別システム導入工場が非対応工場と連携しバーチャル大工場化する効果を検証する。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の検証を行う。</p>	<p>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：CEDESTシステムをDINS関西に移設、不足機器を追加し連続運転可能なシステムに整備を完了し、連続運転試験を試行中。機械的機能付与により解消可能なトラブルについて、選別機ホッパーの閉塞解消機構を改良。また、天井走行吊り下げ型メンテナンスロボを試作し、シミュレーションでの遠隔操作の試行中。モデルプラントを利用した情報連携の検証：RFIDタグの貼り付け・読み取り可能な位置を導出する画像認識システム、RFIDタグの自動貼付システム、自動貼付システムで貼付可能な万能型RFIDタグ、小型家電の機種情報管理システム用DB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。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する際の入出力項目を整理。</p>	○ 2026年3月に達成見込み	<p>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は予定通りに進捗。軽微・高頻度なトラブルの抽出について、トラブル発生箇所と解消方法の詳細を装置開発とメンテナンスロボ開発で共有し、ロボット機能に反映。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では、試作機開発は予定通り進捗し、試作機のテスト、改造を実施し、目標の達成の見通し。工場間情報連携による選別工程の高機能化では、コスト算出要素と計算手法は整理済。プログラミングの実施で、工場間情報連携評価ソフトは試作完了予定。コスト算出要素の情報収集を進めており、実態に即したソフトによる評価の妥当性を検証予定。</p>
	(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	<p>情報連携基盤システムの要件定義し、プロセス高度化に有用な情報を提示。ステークホルダにヒアリング(7社以上)実施し、実現性/受容性を加味。プロトタイプを開発し、リマン有効性を検証。資源循環シナリオについては、廃小型家電の回収実態と再生材需要を調査し、代表素材を2つ以上設定。評価手法の枠組みを構築し、ステークホルダ(7社以上)から意見収集し、評価手法の基本設計を完成。</p>	<p>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。またプロセス高度化に有用な情報群を定義完了。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完了。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。 廃小型家電の3側面(供給、回収、需要)から対象2素材として、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。また事業・環境評価に向けて3商品の事業シナリオ検討完了。</p>	○ 2026年3月に達成見込み	<p>リマン対応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している。25年度は、それらの統合検証を実施するが、リスクは小さい。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検討まで進捗している。25年度は、ステークホルダ(7社以上)からの意見収集・議論により、さらなる精緻化・内容の充実化を図るフェーズであり、予定通り達成できる見込みである。</p>

参考資料 1 分科会議事録及び書面による質疑応答

研究評価委員会
「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」
(中間評価) 分科会
議事録及び書面による質疑応答

日 時 : 2025年6月27日(金) 10:00~16:30

場 所 : NEDO 川崎本部 2301,2302,2303 会議室 (リモート開催あり)

出席者 (敬称略、順不同)

<分科会委員>

分科会長	松野 泰也	千葉大学 大学院融合理工学府 先進理化学専攻 共生応用化学コース 教授
分科会長代理	山口 勉功	早稲田大学 理工学術院 教授
委員	栗生木 千佳	公益財団法人 地球環境戦略研究機関持続可能な消費と生産領域 主任研究員
委員	今宿 芳明	Rita Technology 株式会社 最高執行責任者
委員	齋藤 優子	東北大学 大学院環境科学研究科 教授
委員	筒井 一就	株式会社グリーンサイクルシステムズ 製造管理部 部長

<推進部署>

福永 茂和	NEDO サーキュラーエコノミー部 部長
今西 大介(PM)	NEDO サーキュラーエコノミー部 チーム長
石田 弘徳	NEDO サーキュラーエコノミー部 主査
坂本 友樹	NEDO サーキュラーエコノミー部 主任

<実施者>

大木 達也(PL)	産業技術総合研究所 環境創生研究部門 首席研究員
林 直人	産業技術総合研究所 サーキュラーテクノロジー実装研究センター 研究チーム長
小林 宏	東京理科大学 教授
和田 正義	東京理科大学 教授
荒井 翔悟	東京理科大学 准教授
加藤 努	東京理科大学 技術者
小笠原 伸浩	株式会社菊池製作所 執行役員 ものづくりメカトロ研究所長
川瀬 広之	株式会社菊池製作所 ものづくりメカトロ研究所 製造部長
松田 源一郎	パナソニック ホールディングス株式会社 MI本部 マニュファクチャリングソリューションセンター 課長
濱田 真吾	パナソニック ホールディングス株式会社 MI本部 マニュファクチャリングソリューションセンター シニアエンジニア
三宅 岳	パナソニック ホールディングス株式会社 MI本部 マニュファクチャリングソリューションセンター 主任技師
田島 章男	パナソニック ホールディングス株式会社 MI本部 マニュファクチャリングソリューションセンター CE エキスパート
太田 洋文	三井金属鉱業株式会社 金属事業本部 技術統括部 部長補佐
樹 世中	株式会社野村総合研究所 コンサルティング事業部 シニアプリンシパル

<オブザーバー>

堀 宏行 経済産業省 イノベーション・環境局 研究開発課 課長補佐

<評価事務局>

山本 佳子 NEDO 事業統括部 研究評価課 課長

植松 郁哉 NEDO 事業統括部 研究評価課 主任

須永 竜也 NEDO 事業統括部 研究評価課 専門調査員

宮代 貴章 NEDO 事業統括部 研究評価課 専門調査員

樋口 貴司 NEDO 事業統括部 研究評価課 専門調査員

議事次第

(公開セッション)

1. 開会
2. プロジェクトの説明・詳細説明
 - 2.1 プロジェクトの説明
 - 2.1.1 意義・アウトカム (社会実装) 達成までの道筋
 - 2.1.2 目標及び達成状況
 - 2.1.3 マネジメント
 - 2.2 プロジェクトの詳細説明
 - 2.3 質疑応答

(非公開セッション)

3. プロジェクトの補足説明
 - 3.1 項目①(1)「製品解体・分解システム開発」
 - 3.2 項目①(2)「再生材多様化に向けた革新的選別システム開発」
 - 3.3 項目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」
 - 3.4 項目②(2)「再生材流通高度化に向けた基盤技術開発」
4. 全体を通しての質疑

(公開セッション)

5. まとめ・講評
6. 閉会

議事内容

(公開セッション)

1. 開会、出席者紹介

- ・開会宣言 (評価事務局)
- ・出席者の紹介 (評価委員、評価事務局、推進部署)

【松野分科会長】 松野です。専門はリサイクル全体、湿式製錬になります。よろしくお願いいたします。

【山口分科会長代理】 山口です。専門は高温プロセスを用いた非鉄製錬、リサイクルになります。本日はどうぞよろしくお願いいたします。

【栗生木委員】 栗生木です。専門については循環経済、資源効率性、循環型社会政策一般をやっており、特に国際動向等を見ています。一部論文等では、物質フロー分析、LCA 等も行っています。今日は、どうぞよろしくお願いいたします。

【今宿委員】 今宿と申します。専門は、産業廃棄物分野における AI と IoT といったもののシステム構築をやっております。どうぞよろしくお願いいたします。

【齋藤委員】 齋藤でございます。専門は資源循環分野、技術と社会システムの研究をしております。よろしくお願いたします。

【筒井委員】 筒井です。私どもの会社は、家電リサイクル法由来の混合プラスチックからプラスチックを選別・回収・精製し、それを家電にもう一回戻すといった水平リサイクルに関する量産工場になっており、その技術全般を見ております。今日はよろしくお願いいたします。

2. プロジェクトの説明・詳細説明

(1) 意義・社会実装までの道筋、目標及び達成度、マネジメント

推進部署より資料3に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

(2) プロジェクトの詳細説明

PLより資料3に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【松野分科会長】 ご説明ありがとうございました。

これから、事業全体についてご意見、ご質問をいただきますが、評価項目に従い、まずは1の意義・アウトカム (社会実装達成) までの道筋に関する議論を行います。皆様、いかがでしょうか。

では、私から少し申し上げます。METI の循環経済ビジョン、そしてカーボンニュートラル GX 戦略に沿ってということ、そちらに本プロジェクトが合っているという意味では、非常によいプロジェクトだと思います。確認になりますが、スライド 16 から 18 は 1 ポツで合っていましたか。

【宮代専門調査員】 こちらは項目 2 になります。

【松野分科会長】 承知しました。それでは 1 については、私としては全体的に非常によい道筋と判断いたします。そのほか、いかがでしょうか。今宿委員、お願いします。

【今宿委員】 10 ページになります。これはすぐ回答できるかどうか分かりませんが、循環経済の実現というアウトカムに向けて、静脈連携というのは急がれると思います。こちらの図を見ますと、どうしても事業化というところに書かれているとおおり、2035 年の実現と受け取れますが、技術開発自体が重要なのは理解できるものの、時期の前倒し等々は難しいものでしょうか。

【今西 PM】 ご意見ありがとうございます。前倒しをしていく必要がある非常に重要な課題だと思っております。事業を進めていく中で、事業者様から聞こえてくる、そして私がいろいろなところで聞かせていただくこととして、多分、今宿委員もご存じのことと思われそうですが、やはり各企業様が持っていらっ

しゃる製品情報、CAD 情報というのが、その製品を作っている会社の力になっています。そこを簡単に、解体するための情報として提供するのはハードルが低いものではありません。その中で重要なのは、企業様のそうした戦う力を削いでしまうような形ではなく、うまく皆様と解体するための本当に最適な情報だけを抽出し、それを皆様と共有していく。こういう情報さえあれば解体がうまくその情報を基にして、例えばリマニュファクチャリングをするなど適切な解体ができるということを目指しているものでございます。そこも、実際にはこの事業の中でステークホルダー様のヒアリングを継続して進めていますので、そういう情報を基に、もし前倒しができるようであれば、動静脈連携を進めていきたいと思っております。以上です。

【今宿委員】 ありがとうございます。

【松野分科会長】 筒井委員、お願いします。

【筒井委員】 私の質問も同じ資料のところになります。前回のプロジェクトでは、この CEDEST というシステムを大栄環境様の工場に設置し、今ランニングをかけているわけです。そこでいろいろな評価をされているわけですが、今回開発する 4 つのテーマの技術も同じようにどこかの工場で組み上げて評価するというのを、この期間内で考えているのでしょうか。

【今西 PM】 ご意見ありがとうございます。基本的に、まず CEDEST のシステムを大栄環境に設置し、この設備自体でどのような形でリサイクル処理を行っていくのか、どういうトラブルを引き起こすのかというものの基礎情報を取っていきこうと思っております。それを基に、当然どういう形でシステム運用をしていくのかという知見が得られます。その一方、今いろいろな選別システムが、産総研の大木先生、あとは東京理科大の小林先生と進めていただいておりますが、その技術というのは、そこにもインストールできるのであればそれも検討してまいります。現状では基盤技術としてのいろいろな製品選別、あとは、実際にその製品から解体・破碎していったところの素材の選別についての事業というのは、さらにまた今ハードルの高いところを目指しております。うまくこの事業の後半あたりで技術的に取り込めるものがあれば取り込んでいきたいと思っておりますが、現状、それを例えば来年あたりに大きく取り込んでいくという形では進めておりません。ですが、今いただきましたように、非常に重要なことですので、取り組めるようであれば、そこも前倒しで取り組んでいけるよう考えていきたいと思っております。

【筒井委員】 そうすると、CEDEST のシステムの中に取り込めるものは取り込んでいくという理解でよろしいですか。

【今西 PM】 そうです。取り込むような形も当然私たちの想定の中にありますので、そのような形で進めていく所存です。

【筒井委員】 分かりました。ありがとうございました。

【松野分科会長】 それでは、栗生木委員、山口分科会長代理の順にお願いします。

【栗生木委員】 ご説明ありがとうございます。私もスライド 10 の実用化から事業化までのプロセスについて申し上げます。選別技術であるとか、破碎技術、スライド 8 にもありましたが、海外の技術が多いということが課題になっていると思います。今回まさに国産のプロセスを開発されているということで、非常に重要なプロジェクトだと考えます。その上で、この技術を国内で量産化していくところの社会環境の精査であるとか、そういうことが今後必要になってくるのではないかと思います。恐らくこの技術を量産していただくようなメーカーの方等が必要になっていきますので、そのあたりの検討をいただけるとありがたいと思っております。以上です。

【今西 PM】 ありがとうございます。いただいた件は、まさにそのとおりです。この事業の中には佐藤鉄工様などがまず入っております。佐藤鉄工様などは、このような設備に関わるような設計、施策をしていただいております。実際にその機械を使い、このシステムが構築されています。全てではありませんが、そ

のような形で進めております。当然、この研究開発でできてきたシステム自体、それを例えばシステムインテグレーターみたいな形で大きく提供するのであれば、そういう方たちのご協力も必要になってまいります。そういうものに関しては、今後この事業を通して、いろいろな外部へのPR活動もございまして、この研究開発の成果を皆様に知っていただくような場をつくり、そこでうまくいろいろな方たちにも広げていき、こういう技術を取り扱っていきたいという企業様ともコンタクトをつけていくことを考えていきたいと思っております。

【松野分科会長】 では、山口分科会長代理、お願いします。

【山口分科会長代理】 まず本事業の位置づけ、意義は問題ないと考えております。また、知的財産・標準化戦略もこの提案のとおりでよいと思います。その上で、こちらの図、アウトカムの達成までの道筋ですが、やはり以前からお話ししているように、出口がしっかりしていないと目標を達成できないことになると思いますので、どういう部材であるか、どういう金属の種類であるか、対象を明確化して出口を考えた上でどのように分けていくのか。出口を考えた分別システムと自動化システムを構築されるのが望ましいと思いますが、いかがでしょうか。

【今西 PM】 ありがとうございます。プラスチックの資源回収に関しては、これは環境省、経済産業省が非常に強く意識されているところです。それもあって、特にこの事業の中では、特定の金属種だけではなく、非常に広くベースメタルも扱っていかうということを想定して始めたものになります。その中で、特に最近ですが、政府の骨太戦略というものが発表されました。その中で、やはりベースメタルであるアルミニウムは非常に重要な鉱物であるということが定義されています。そういうことも含め、この事業の中でベースメタルであるアルミニウムということも、私たちは意識して進めており、そこがまず1つ出口の大きな目標になっていくのではないかと考えます。当然プラスチックに関しても今までいろいろな事業で進めておりますが、プラスチックをそのまま燃やしてしまえば、当然エネルギーリカバリーで無駄にはしないものの、やはり炭素循環という観点で資源に戻していくことが非常に重要と思っております。今まで行ってきた貴金属、レアメタル、レアアースに関しては当然ですけれども、この事業の中では今まで手がつけられず、どうしても無駄と思われていたプラスチック種、あとは特に政府も非常に重要だと認識してきているアルミニウムに関しては、重要な取り扱う対象だと思っておりますので、そういうところを経産省、あとは政府の動き等をにらみながら進めていく所存です。以上になります。

【松野分科会長】 ありがとうございます。まだ議論は尽きないと思いますが、時間もありますので、次の項目に移りたいと思います。続いて、2の目標及び達成状況について、ご意見、ご質問を伺いますが、まず私から1点よろしいでしょうか。

最後の山口分科会長代理の質問とまさに絡むところで、それが先ほど冒頭で言おうとしたスライド16でしょうか、ここに何の金属でどれだけを削減するかということで、まさにこれが今アウトカムといますか目標になっているわけです。先ほどの1の内容とも絡むのですが、本プロジェクトのメインは国内にあるとは思うものの、グローバルも多少なりとも考えられると思います。その場合、CO₂削減量のところで金、銀、パラジウムで2万トンがこのプロジェクトでリサイクルされるということですが、貴金属を捨てる人は世の中にいません。今までは、国外から何らかの流出があって途上でリサイクルされていた、それが国内のシステムでよりよく国内に利益をもたらすというのが多分解釈ですから、これは過大に読み過ぎた数字と感じます。この点の修正は、プロジェクトの後半でお願いできればと思います。

【今西 PM】 ありがとうございます。

【松野分科会長】 それでは、齋藤委員、お願いします。

【齋藤委員】 先ほどの1とも関係あるのですが、資源を余すことなく、資源全体として循環させるという

のは非常に重要な視点かと思えます。そうしたときに、16 ページで 50%を回収するという内容があります。今回サーキュラーエコノミーをしていく上でもそうですが、外部環境が非常にドラスティックに変わってきている中、どのように原料を確保するのか。それから受入れ市場、二次資源の市場をどう開拓していくのかというのは非常に重要な視点と考えます。今回優れた技術を実装していくというのは非常に重要と理解しつつも、基盤整備も大変大事です。そのあたりについてコメントをいただければと思います。

【今西 PM】 まず後半の部分ですが、リサイクルされた金属材料をうまく活用していくところに関しては、本事業の特徴ではあるのですが、今までのリサイクラー様がやられていた資源回収にて例えばアルミニウムが集まる、例えばこういうようなものが集まりましたという集め方に関して、相当不純物が多く含まれています。それを受け取る側も、このぐらいの値段であろうということで進めていたものが、今回のこの事業によって精緻に分離ができるようになってまいります。そうすると、静脈産業側も集まったものを次の事業者様、精錬事業者様にお渡しするときに、「これはこういうクオリティーのものです」という形でお渡しすることができるようになります。そこは非常に大きな静脈産業様の付加価値にもなりますし、精錬側のほうもある程度素性の知れたものとして扱うことができるということは、この事業の大きなメリットだと思っております。そこで、今までの取組とはまず大きな違いが出てきていると考えます。

それからもう1つ、これは大きな問題だと思っております。やはり齋藤委員が言われたとおり、物を回収することに関しての手が非常に薄いというのは私たちも強く感じております。廃家電が適当に可燃物と一緒に捨てられてしまっているような現状において、それをどのようにうまく回収し、こういうシステムができたときにそのシステムに投入できていくのか。これは依然として大きな課題です。そのあたりも経済産業省の資源循環経済課もこの事業のほうを支援していただいております、CPs という取組もありますので、そういうところも通して、どのような形でこういう技術が完成した暁に、そこにうまく廃電気電子機器、それ以外のものも含めてなのかもしれませんが、うまく資源が集まってくるようなそういうシステムづくりができるかという点は常に議論していきたいと思っております。

【松野分科会長】 筒井委員、お願いします。

【筒井委員】 このプロジェクトは、ベースメタルとかプラスチックにも取り組んでいただくということで非常に評価したいのですが、まさにこの表ですけれども、プラスチックが素材回収量の半分ぐらい占めています。ご存じかもしれませんが、小型家電のプラスチックは汎用のプラスチックが少ないとか、あるいは塗装しているとか、着色しているとか蒸着しているものが多く、非常にマテリアルリサイクルが難しいのです。今の 5.41 トン CO₂ というのは、多分全量をマテリアルリサイクルしている数字だと思います。その辺の可能性についてはどうお考えか伺います。

【今西 PM】 ありがとうございます。ここで示した数値ですが、筒井委員の言われるとおり、非常に粗い推定をしているというのは間違いございません。電気電子機器の中には、例えば特定のカムとかに PBT が使われているなど、例えば難燃性の材料、不燃性の材料が入っていることもあり、単純にリサイクルすることが非常に難しいものもございます。ですが、第1前提として、このようなものは資源として返ってくるだろうということ、さらに、やはりこの事業を通して、これは大木 PL ともよく話をしているのですが、やはり資源循環に資するための材料の使い方、そこもこの研究開発でいろいろ提案していく。それによってリサイクルしやすいものが製品で使われるようになれば、今おっしゃられたようなことも、この事業を通して皆様に目を向けていただくことで、少しずつ改善できるのではないかと考えております。

【筒井委員】 ありがとうございます。よろしくお願いいたします。

【松野分科会長】 山口分科会長代理、お願いします。

【山口分科会長代理】 こちらの資料ですが、年間42万トンの再資源化を目指すということで、今現時点ではこのままでよいのですが、出口を見据えた上で、消費者のいるところを考えながら、日本のどういうところにどのような工場を造ったらよいか。どの規模で造ったらよいかというものも最終的にはご提案いただけるような形に持って行っていただければと思います。

【今西 PM】 そのあたりも、中間評価を行っていく上で、大木 PL とも常日頃話しておりますが、今日は資料では示しておりませんが、私たちが今考えている頭の中での案になりますから、これに関して、最終的にこの事業が終了するまでに何らかの形でこのように進めていくのがよいであろうと示せるよう検討を継続して進めてまいります。ありがとうございます。

【松野分科会長】 今宿委員、お願いします。

【今宿委員】 私もこちらの図の経済効果のところでも伺います。この効果のうちの8%を実現するためには、やはりこちらのプロジェクトの成果が広く一般に広められているという前提になると思います。このプロジェクトが終わってからそこまで実現可能なのか。そのあたりについて何か算出根拠があれば教えていただきたいです。

【今西 PM】 ありがとうございます。基本的に2035年にこの数字、経済効果を達成するところに対し、戦略的にこういう企業様に寄与いただいて例えばこういう製品を出していくであるとか、こういった処理システムをこういうところに置いていくということをまだ絵としては描けておりません。そこも含めて今後検討していきます。重要なことは、2027年に事業が終わってしまいますので、その後、この研究開発の成果がうまく根を生やし、そして育っていくよう NEDO として支援していくことです。そこも私たち意識しながらこの事業を進めていきたいと思っております。ありがとうございます。

【今宿委員】 よろしくお願いします。

【松野分科会長】 栗生木委員、お願いします。

【栗生木委員】 このスライドにおいて、リマニファクチャリングによる CO₂削減効果も、経済効果もあると思うところで、先ほどの10ページもそうですが、リマニファクチャリングがどのようなアウトカムにつながっていくのかが少し分からないところがありました。ですので、リマニファクチャリングに関する検討結果も入れていただくと、よりよいと感じます。また、細かい質問で恐縮ですが、経済効果における2035年時点の電気電子回収割合25%となっているのと、スライドの1ポツ目の50%というものの違いの理由はどういうものでしょうか。

【今西 PM】 恐らく今おっしゃられたのは、右側の表のカラムの下から3つ目、2035年時点の電気電子回収割合というところの25%をおっしゃられたのだと思います。これは2035年時点で、2019年時点では17%ということで、この差分が8%になっております。現状でも、実際にはある程度の電気電子機器の回収はされているわけで、それを25%まで増やしていきたいといった世界の話です。それに対し、先ほどもご説明いたしましたように、日本の国内では電気電子機器に関しては50%を目指しているというものになります。世界の話はNEDOが取り仕切れるものではございませんが、やはり世界として25%程度、つまり日本の回収量の半分程度は目指すべきではないだろうか。その中で、様々なリサイクルに関わる設備や、実際にそれに関わる易解体性、またリマニファクチャリング設計をした実際の電気電子機器を日本がどんどん商品化していく。このようなことでこの計算をしております。まとめますと、2019年時点での17%からの伸びがあって25%になっている。その差分が8%になっているという説明になります。

【松野分科会長】 よろしいでしょうか。そうしましたら、私からスライド24に関して伺います。ほかの委員が誰も指摘されませんので、私がちょっと憎まれ役にならざるを得ないのですが、2年間の論文がゼロになっています。これを見てよい成果が出ているとは、分科会長を誰がやっても言えないと思います。ここはコメントをいただけますか。

【今西 PM】 これに関しましては、実際には大木 PL とお話をしております。論文の発表活動が進んでいないという点で、大木 PL と実施者の方々の思いというのは、まずこの事業が実際に始まったのは 2023 年 9 月、10 月頃のスタートであり、今の状態で 1 年半くらいになります。その期間で実際には非常にしっかりしたエビデンスを持って論文発表をしていきたいというところで、現状ではまだ少し足りない。できれば、もう少し時間をいただいたところで一気に論文化をしていきたいというご意見をいただいております。私たちが論文発表というのは、研究開発成果を示すバロメーターであるということをお重々認識しておりますので、いかがですかという話は行っています。その中で、実施者の方たちとしては、しっかりしたエビデンスに沿った論文発表をしたいということも、それは確かに間違いのないことだと思っております。現状ゼロだということは非常に私たちが残念な思いですが、今後そこは NEDO としても実施者の皆様に叱咤激励をしながら、論文数を増やしていけるよう指導していきたいと思っております。

【松野分科会長】 社会実装に近い研究領域で、特に工場で作られている方がなかなか出せないというのは別に構わないと思います。ただ、10 近くの大学機関が関わっていて、しかも若手が 65 名を売り込まれる以上、若手が研究者として認められるという面で、論文を書いてサイテーションが出ない限り将来的に認められないというのは本当に悲劇です。そこは最終コメントに入れざるを得ないと思いますのでご理解ください。

【今西 PM】 ありがとうございます。

【大木 PL】 PL の大木から、1 つだけ補足いたします。特に大学は論文発表が非常に重要ですから、そこはどうぞやってくださいというスタンスですが、全体として特に企業と議論しているのは、論文などを発表する前には必ず特許を出してくださいということです。特許も 1 年半という非公開の期間があるので、なるべく公開しないほうが得策だと。この手の技術は、公開されてしまうと、適切な言い方ではないかもしれませんが、劣化コピーのような物がすぐに外国から出てしまい、同じような商品が既にあるのではないかと誤解を招きます。我々の研究開発、製品化の道筋の中では、製品化して販売できる段階になって世界に公表しようというベースがあり、若干、そういう思想が大学にも影響しているかと思っております。ただ、分科会長がご指摘されたように、3 年目は、これだけの大学がいるのですから、私は多くの論文が出るものと期待しています。特に初年度については、論文が出たとしても、それはそれ以前の成果になるという点も踏まえ、論文の発信については、もう少しお待ちいただくようお願いできればと思います。

【松野分科会長】 要は、中間評価ですから、こちらとしても少し辛口のコメントをし、最終評価でよくできたと思えるを得ません。その点をご理解いただけたらと思います。

そのほか、いかがでしょうか。特になければ 3 の実施体制に入ります。特にここはあまりないように思いますが、どうでしょうか。

それでは、1 点目、2 点目、3 点目の全体を通して言い忘れたものがあれば、お願いいたします。山口分科会長代理、どうぞ。

【山口分科会長代理】 山口です。モチベーションを高める仕組みとありますが、これは実際、今回、中間評価までに実施されたことはあるのでしょうか。もし実施されていたら、その効果をご報告いただきたい。

【今西 PM】 モチベーションを高める仕組みというのは、実際に NEDO の制度として組み入れられるようになったのが 2023 年度から始まった事業になります。この高度循環の事業というのはまさにその事例の 1 つです。2023 年度から始まっている事業は、一斉に「よーいドン」で始まっておりますので、皆様が今同じ漕ぎにございます。ですから、このモチベーションを高める仕組みを実際に活用し、例えばそこから金銭的インセンティブをいただき、それらを活用して加速的に事業を進めたという事例は

まだないのが現状です。

【松野分科会長】 それでは、お願いします。

【栗生木委員】 すみません、私、先ほどリマニファクチャリングの効果に関するご質問をしたのですけれども。

【松野分科会長】 回答をいただいていたでしょうか。

【栗生木委員】 はい。

【松野分科会長】 では、もう一度お願いいたします。

【栗生木委員】 スライドのCO₂効果のところのリマニファクチャリングの事業をされていますが、それを含めた効果が入れているのかどうか。この点をお伺いしたかったというのが趣旨になります。

【今西PM】 ありがとうございます。まず、このアウトカムというものがどのような形で設定されているかを申し上げます。このような形で国のプロジェクトを開始したいということで、企画立案がされてまいります。そのときに、こういう値を目指していくべきであろうということを私たちが想定したものになります。その中で、今回の研究開発公募を行った際に、今の実施者をご提案いただいた中にリマニファクチャリングという項目が含まれていました。それは非常に重要な内容だと思っており、そこも含め、リマニファクチャリングを捉えている次第です。栗生木委員からいただきましたように、そこも含め、どういう形で効果があるのかということは、ある程度見積もることができると思いますので、今後そこも考慮していきたいと思います。

【松野分科会長】 よろしいでしょうか。あと1件程度ならお受けできます。

それでは、特にないようですので、ここで閉じたいと思います。

【宮代専門調査員】 ありがとうございます。それでは、以上で議事2を終了いたします。

(非公開セッション)

3. プロジェクトの補足説明

省略

4. 全体を通しての質疑

省略

(公開セッション)

5. まとめ・講評

【筒井委員】 グリーンサイクルシステムズの筒井です。今日は1日ありがとうございました。全体を通してですが、今回のプロジェクトは、付加価値があまり高くない幅広い製品群を対象とし、ベースメタルとプラスチックに注目されたという点を非常に評価しております。最初に、小型家電のヤード自律選別システムがありまして、私は資料を見たときに「ここまでやるのか」と思いましたが、安全性と重筋作業といった一番リサイクルの職場で課題になっているところに真剣に向かおうということで、実は、ああいった技術が一番喜ばれるのではないかと思います。ですので、そこはきちんとやっていただきたいです。また、予算を見ると5年で50億、年間10億になります。そんなに投資できるリサイクラーは日本に数が多くないと思いますから、そこは意識していただきつつ、早い段階から、例えば量産性や設備の稼働率の向上、安定化を意識していただけたらと思います。最後にプラスチックの件ですが、この素材構成を見ますと、50%ぐらいがプラスチックになります。私の認識では小型家電のプラスチ

ックはマテリアルリサイクル率が小さいと思っており、今の技術では50%ぐらいだと認識しています。その言及が今日はあまりなかったのですが、そこを有効利用できるような技術開発をお願いしたいと思います。以上です。

【宮代専門調査員】 筒井委員、どうもありがとうございました。続きまして、齋藤委員よろしくお願いたします。

【齋藤委員】 齋藤です。本日は1日ありがとうございました。このプロジェクトは、サーキュラーエコノミーの確立に向け、動脈側と静脈側と両方の方々が関わられ、それを連携していこうというものです。また、製品全体として資源循環を進めていこうというところで非常に新しい視点かと思えます。技術の社会実装を現実的に見据えているというところで、このまま進めていただきたいですし、非常にすばらしいと思っております。一方、今後に向けたコメントとして、本日の冒頭にも申し上げましたが、本プロジェクトでは社会実装シナリオの策定を明確に掲げていられたいと思います。これを現実的に達成するためには、このプロジェクトを通して開発した技術を実装するために社会システムの基盤整備というところも並行してぜひ行っていただきたいと思えます。過去のリサイクル技術等の歴史などを見ても、優れた技術開発を進めていても原料調達がボトルネックになってしまうという事例も幾つかあったかと思えますので、技術の社会実装に力を入れて進めていただきたいです。もう1点はデータ管理についてですが、将来的に誰がどのように運用していくのかというところを見据えてぜひプロジェクトを進めていただきたいと思えます。欧州等を見ても、E-wasteであるとかWEEEというもののデータ運用については回収率やリサイクル率も含め、ユーロスタットであるとか、そうしたところとの連携も非常に密に行われていると思えますので、データ運用についての出口も見据え、ぜひ国への働きかけなども併せて進めていただければと思いました。以上です。

【宮代専門調査員】 齋藤委員、どうもありがとうございました。続きまして、今宿委員よろしくお願いたします。

【今宿委員】 Rita Technology の今宿です。本日はどうもありがとうございました。本プロジェクトは、循環経済の実現に向けて処理・選別・分析の各段階を高度化するという視点で非常に重要な取組であり、これまでの進捗も総じて良好であると本日分かりました。特に、自動解体や選別の技術及びデータ駆動型の分析基盤については、実用化に向けた道筋が明確になりつつあると思えます。一方、今後の展開においては、各研究開発項目が個別に成果を挙げるだけでなく、それらが一体として機能するためのプロジェクト間連携の具体的な可視化が求められると考えます。例えば、分析データが選別装置の制御最適化にどのように活用されるのか。あるいは、解体情報がリサイクル工場の流通設計にどのように結びつくのかといった実運用に即した情報連携の仕組みがより明確になることを期待します。また、プロジェクト終了を見据えた場合、得られた結果が動脈、静脈、両産業の現場へどう波及していくのかという視点での戦略設計も重要です。単なる基礎技術や装置の開発にとどまらず、それらがどのように導入、普及され、産業構造の変革につながるのか。出口までを見据えた取組が望まれます。以上です。

【宮代専門調査員】 今宿委員、どうもありがとうございました。続きまして、栗生木委員よろしくお願いたします。

【栗生木委員】 栗生木でございます。今日は1日ありがとうございました。午前中にも申し上げましたが、今回リサイクル技術の高度化とその国内実施は非常に重要な課題であり、これから日本の国内の循環産業をより活発化していく点で非常に重要な事業と考えております。また、それぞれの研究開発項目の実施状況も良好ということで大変勉強になりました。既に皆様が言われているとおり、社会実装に向けてのプロセスですが、それぞれの研究開発項目の効果が社会実装の段階で十分に発揮されるための前提条件が幾つかある印象です。それは、例えば回収システムの有無であったり、技術を使いこなす

ための人材であったり、また、それらを支える制度の有無であったり様々あると思います。そういった前提条件も整理していただくことで、社会実装に向けた道筋が見えてくるのではないのでしょうか。制度化については、昨日も委員会に出ていたのですが、資源有効利用促進法の改正の議論が進んでおり、これからより細目が決まっていくという段階かと思えます。非常に今回の事業と資源有効利用促進法との関連性が深いと考えます。そういったものと整合性を取ることに加え、資源有効利用促進法が今後より発展していくという面でも、今回の事業で得られた課題が非常に重要になってくるのではないかと感じました。以上です。

【宮代専門調査員】 栗生木委員、どうもありがとうございました。続きまして、山口分科会長代理よろしくお願いたします。

【山口分科会長代理】 早稲田大学の山口です。本日はご説明をいただき誠にありがとうございます。この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の基盤技術開発ですが、分解・解体、破砕、選別・分別の技術を活かすためには製品情報に関するデータベースを構築する必要があり、これを結びつけることで高度の自動化処理、リサイクル工場の連携で経済合理性を高めていくというものです。資源循環システムを構築するという点では非常に目標が明確であり、その位置づけ、意義は大きいと思っています。本日いろいろお話を聞かせていただき、中間目標は達成されていると判断いたしました。個人的には、この基盤技術を使って自動化でどこまで分けられるのかという極みを見てみたいと思っておりますが、やはり事業化ということが大変重要です。齋藤委員からも話がありましたように、どのように集めてくるのかも重要になります。収集システムを構築するとともに、出口を見据え、どういう選別をするのか、どういう分別をするのか、最終的にどういう製品を作っていけば出口側で処理ができるのかということも考えた上で、基盤技術を構築していただければと思います。今回、プラスチック、ベースメタル（アルミニウム）を選んでおりますが、先ほど筒井委員からもありましたように、プラスチックのマテリアルリサイクル率はそれほど高くないということで、リサイクル率を高めていくというのは重要ですし、アルミニウムを基本的にはカスケードという形で鋳物材料になることも多く、水平リサイクルが達成されていないという現状です。社会的な意義が高いですから、ぜひこのプロジェクトを進め、水平リサイクルを達成していただければと思います。そして、実施体制についても、先ほど話がありましたように、企業、大学、廃棄物処理メーカー、電子機器メーカー、装置メーカー、そして非鉄製錬など動脈から静脈まで含まれており、プロジェクトとしてしっかりと実施体制になっていますし、若手研究者が数多く参画されているというのもこのプロジェクトの特徴かと思っております。前回、見学会でお伺いしたときに、人材育成についても進めている、若手や学生向けのセミナーなども計画されているとの話がありました。ぜひさらに進めていただきたいと思います。資源分野の鉱物を分けるための選別の教科書はありますが、リサイクル原料に対する物理選別に関する教科書は存在していません。教科書の作成までつながればよいと思います。簡単ですが、以上です。

【宮代専門調査員】 山口分科会長代理、どうもありがとうございました。それでは最後に、松野分科会長にご講評をお願いいたします。どうぞよろしくお願いたします。

【松野分科会長】 個人的な意見はもちろんあるのですが、それも踏まえた上で、皆様の意見を全体まとめた講評を述べたく思います。

評価項目1、意義・アウトカム達成までの道筋につきましては、肯定的意見が3つほどあります。まず、世界的に見て、サーキュラーエコノミー及びカーボンニュートラルは大きな課題となっております。経済産業省もGX戦略を打ち出しており、本プロジェクトはそれに対応すべく非常に時流に乗った研究プロジェクトであり疑いの余地はありません。また、特に評価が高いものとして、今回、動脈産業と静脈産業が関わり、社会実装まで持っていこうとしているところは非常に評価できます。そして、リサイクルの分野では、昔は欧州のプロセスを輸入して用いることも非常に多かったのですが、今回は日

本の国産技術を開発するものであり、非常に有意義なものと考えます。非常に肯定的なコメントとなり、1に関しては、問題点・改善点のコメントはございません。

続いて、評価項目2、目標及び達成状況について、肯定的意見は様々ありますけれども、おおむね順調に進んでいると整理いたします。問題点・改善点としては大きく2つありますが、1つは、今回多数の製品を対象にするがゆえに多数の技術開発項目が必要となり、各項目において成果を出す必要があり、見せる必要があったというのは十分に分かります。その一方、一気通貫でどういった成果が出ているのか。各項目がどう有機的につながるかが少し見えにくいです。特に最終審査に向けて、その点は常にご留意いただいて進んでいただければと思います。あとは午前中も申しましたが、今回、若手研究者が65名も携わっていることは売りでもありますが、彼らの将来を考えた場合、論文の発表がどうしても必須となります。拝見したところ、論文のネタになりそうな成果も結構出ているようですので、もちろん特許出願も重要ですが、そういった特に若手が論文を執筆しやすい雰囲気をつくっていただけますようPL及びPMをお願いしたいと思います。

続いて、評価項目3、マネジメントにつきましても肯定的意見は様々ありますが、おおむね順調に進んでいるものと整理いたします。それに対する問題点・改善点、要望としては5つほどあります。今回、中間評価委員として進捗を拝見しましたが、前倒して社会実装を進めることが可能と思われる項目がありました。そのため、必要あれば経済産業省に概算要求して予算を確保いただき、前倒して進められるものは進めていただければと思います。これは評価委員会としての申入れです。あとは、量産性、採算性、安定稼働を意識した研究をし、社会実装に持って行っていただきたいと思います。そして、開発する技術が社会実装されるための社会基盤の整備、例えば回収のスキームであるとか情報の運用、誰がどう情報を運用していくのか、これを見据えた上で進めていただきたいと思います。それから直近のこととなりますが、資源有効利用促進法の改正が進められていますので、そこの整合性を取りながら社会実装を進めてほしいと思います。最後の1項目は、もし計算ミスがあったら削除いただきたいのですが、今回の試算で50万トンの小型家電を処理するとすると、1日当たり40トンの処理が必要になります。これが実現可能かどうか、将来的に国内のどこに装置を設置するのかという検討も進めていただきたいと思います。以上になります。

【宮代専門調査員】 委員の皆様、どうもありがとうございました。ただいまの分科会長のご講評につきまして、推進部のほうから、事実の誤認や非公開情報等の意見があればお願いいたします。

【今西PM】 頭の中を今整理しておりますが、いただいた意見に関しましては、本日の中間評価分科会の中で、委員の皆様から伺ったご意見だと思っておりますし、よい評価もいただいているところもございます。最後のマネジメントに関して、特に社会基盤の整備、どのように廃家電を集めてくるのかという点は技術的に解決できない要素もございますので、そこは、この事業を進めている経済産業省の資源循環経済課とも課題の共有を行い、政策としてうまく進めていただければ、そちらのほうでもしっかりと車の両輪で回していければと思っております。あと、50万トンの処理について、処理のシステムは本事業期間中に処理能力10トン/日の設備設計というものを考えております。実際には稼働日数、あとは稼働時間により、どのくらい大きくなっていくのかということも当然考えていかなければいけませんし、例えば日本の中で実装していくのであれば、どういう場所にどういう形で実装していくのか。金属廃棄物が多く出てくる適材適所といいますか、例えば僻地の原野の中に作ってもしょうがないわけです。この点は、実際に実施をしているチームの中で頭を絞っていきたく思います。私からは以上となります。

【宮代専門調査員】 ありがとうございます。特に修正項目はないということでよろしいでしょうか。

【今西PM】 私の一存で決めてよいかどうかは不安もありますが、いただいた意見をもって、しっかり反映していきます。ありがとうございます。

【宮代専門調査員】 それでは、ただいまの分科会長のご講評をそのまま採用いたします。委員の皆様からのご講評を受け、大木 PL 及びサーキュラーエコノミー部の福永部長から一言お願いいたします。

【大木 PL】 大木でございます。本日、午前中から非常に長い時間、ご審査をいただきましてお疲れかと思いますが、本当にありがとうございました。最後にいただいたご講評、肯定的ご意見については、今後も期待を裏切らないよう頑張りたいと思います。検討事項については真摯に受け止め、できる限りプロジェクトに反映していきたいと思います。また、プロジェクト終了以降も、このチームで動けるかどうかは分かりませんが、それぞれが社会実装に向けて動き、特に産総研は中核となる機関として検討してまいりたいと思います。これまでも技術がないから制度が育たないとか、制度がないから技術があっても使えないなど、鶏と卵の議論をずっとしてきたようなところもありますので、このプロジェクトが終わった後、こういう技術ができたので、その運用をシステムに反映してくださいと言えるようなものを提供してまいりたいと思います。引き続きご指導のほどよろしくお願いいたします。今日はありがとうございました。

【宮代専門調査員】 ありがとうございました。

【福永部長】 NEDO サーキュラーエコノミー部部長の福永でございます。本日、委員の先生方には午前中から長時間にわたりご審議をいただきありがとうございました。PM の今西、大木 PL からの内容と重複するかもしれませんが、私からも 3 点ほど簡単に述べたいと思います。1 つはプロジェクト間連携です。今回のプロジェクトは、特にベースメタル、プラスチックの抽出に焦点を当てておりますが、アルミ、プラスチックについては我々 NEDO のプロジェクトとして別途リサイクルを進めていくプロジェクトを行っています。また、鉄のトランプエレメントについても、この影響についての別途プロジェクトを進めているところです。こうしたプロジェクトについては、我々がしっかりと横の連携を取って整合して進めていけるようにしっかりと頑張っていきたいと思います。それからもう 1 つ、データの連携についてもご指摘をいただきました。特にこの分野は、やはり欧州が先んじて、ある意味過剰とも言える規制を導入してまいりますので、そこしっかりと連携といいますか、そこに飲み込まれないように、かつインターフェースは確保して、しっかりとそちらに対応できるような体制を我々としても取っていきます。最後に、回収システムの在り方についても何人かの委員の先生方のご指摘がありました。我々のプロジェクトは、もちろん技術開発をしっかりとしていくことが大事ですが、それと同時に、この技術開発プロジェクトから出てきた様々な課題を抽出し、政府に提言していくことも大事な機能だと理解しております。このプロジェクトを通じて、どういう回収システムであればこちらのリサイクルがしっかりと進んでいくのかという観点からもしっかりと検証し、政府と連携を取って進めてまいり所存です。私からは以上になります。本日は、どうもありがとうございました。

【宮代専門調査員】 ありがとうございました。それでは、以上で議題 5 を終了いたします。

6. 閉会、今後の予定

配布資料

番号無し	議事次第
資料1	分科会委員名簿
資料2	評価項目・評価基準
資料3-1	プロジェクトの説明資料（公開）
資料3-2	プロジェクトの詳細説明資料（公開）
資料4-1~4	プロジェクトの補足説明資料（非公開）
資料5	事業原簿（公開）
番号無し	評価コメント及び評点票
番号無し	評価スケジュール

以上

以下、分科会前に実施した書面による公開情報に関する質疑応答について記載する。

研究評価委員会

「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」（中間評価）分科会

質問・回答票（公開）

参考資料1-16

資料番号・ご質問箇所	質問	委員名	回答
資料3 p.2	5年間で55億円とかなりの事業予算規模かつ民間企業の参加も多いですが、使用される予算の妥当性はきちんと評価されていますか？査定や相見積のルール遵守をチェックする仕組みがありますか？	筒井委員	毎年の予算は経済産業省、財務省での査定プロセスを経たものとなっております。また実際の予算執行に関しましてはNEDOによる定期的な検査を行っており、相見積りのエビデンス等も確認しております。
資料3 p.37	「開発促進財源」は総予算55億円の内数なのでしょうか？どのような性質の予算ですか？例えばいわゆる有形固定資産のようなハードウェアの製作や購入に充てられる？	筒井委員	開発促進財源は、NEDOの中で留保されている予算を活用するものです。適用先は有形固定資産、消耗品、人件費などとなります。また総予算は開発促進財源を含んだものとなります。
資料3 p.16	近年国内における小型家電の回収量が頭打ちになる中で、「2035年に排出量の50%（52万トン）の回収」というのは高すぎる設定ではありませんか？現状家電リサイクル法4品目の回収量が60万トン弱です。	筒井委員	家電リサイクル法対象以外の小型電気電子機器の排出量は環境省の統計データによると65万トンで、世界の小型電気電子機器の排出量データでは2035年には1.6倍へ増加が予測されており、国内でも65万トンに対して1.6倍の104万トンを想定しています。現状の家電リサイクル4品目の回収率70%を参考にしストレッチ目標として50%（52万トン）としています。
資料3 p.16	CO2削減量単位につきまして、回収品目の純度や品位をどのように設定していますか？回収された金属類の精錬や、プラスチックの再選別が必要ななら原単位は小さくなると思うのですが。	筒井委員	各素材の現時点でのCO2排出原単は新材製造時と再生材製造時の立命館大学峰松らの報告、環境省資料を基にしています。2035年時点では再生材製造に関わるCO2排出量が30%削減されると仮定し、現時点の新材製造時との差分をCO2削減原単位としています。再選別等新たな処理プロセスの導入が必要な場合は削減原単位は小さくなる可能性も考えています。
資料3 p.7～8	資源自律経済戦略及び第5次循環型社会形成推進基本計画および循環経済工程表でも優先分野とされている、EUについても重要原材料規則、バッテリー規則・エコデザイン規則などより本事業にかかわる動きが多い。最新動向の文脈に基づいた、事業妥当性の評価についてはいかがか。	栗生木委員	事業立案時の政策とNEDOの技術戦略に基づき進めているものがありますが、本事業分野の動向や技術委員会等での意見から、今後どのように取り組むのかも検討したいと思っております。

資料番号・ ご質問箇所	質問	委員名	回答
資料5 p.2-1	<p>アウトカム目標として、事業終了時で10/dayの処理を見込んでいるが、具体的には小形電気電子製品 6 品種の製品割合はどのように想定しているのでしょうか。その製品の処理の割合にあった規模で処理システムを検討されているのでしょうか。</p> <p>見落としがあれば申し訳ありませんが、同様に、CO2の削減量も処理する製品割合に基づいて、評価しているのでしょうか。</p>	山口委員	<p>現状では対象として、スマートホン、デジタルスチルカメラ、ビデオカメラ、タブレット端末、ゲーム機、ドライヤー、ラジカセ、掃除機、炊飯器、固定電話機等を検討しています。これは開発技術の性能検証のために確認すべき品種としたものであり、本事業では多くの小型家電を対象とするため危険性、構造、選別特性を基準としたグループの構築を検討しています。CO2の削減量は対象となる品種/グループにより変わる可能性があります。</p>
資料5 p.2-4	<p>再生材流通高度化に向けた基盤技術開発において、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したとしているが、その他、鉄、銅、その他の金属についての評価手法も検討されているのでしょうか。</p>	山口委員	<p>本事業で実施するのは方法論の構築となり、金属としてアルミ、非金属としてプラスチックを選定しています。この2例の完成形を提示する予定ですが、他の金属も完成した評価手法を利用して評価可能であるかは継続して検討したいと思います。</p>

参考資料 2 評価の実施方法

NEDO における技術評価について

1. NEDO における技術評価の位置付けについて

NEDO の研究開発の評価は、プロジェクト/制度の実施時期毎に事前評価、中間評価、終了時評価及び追跡評価が行われ、研究開発のマネジメントにおける PDCA サイクル (図 1) の一角と位置づけられています。さらに情勢変化の激しい今日においては、OODA ループを構築し、評価結果を計画や資源配分へ適時反映させることが必要です。

評価結果は、被評価プロジェクト/制度等の資源配分、事業計画等に適切に反映させることにより、事業の加速化、縮小、中止、見直し等を的確に実施し、技術開発内容やマネジメント等の改善、見直しを的確に行っていきます。

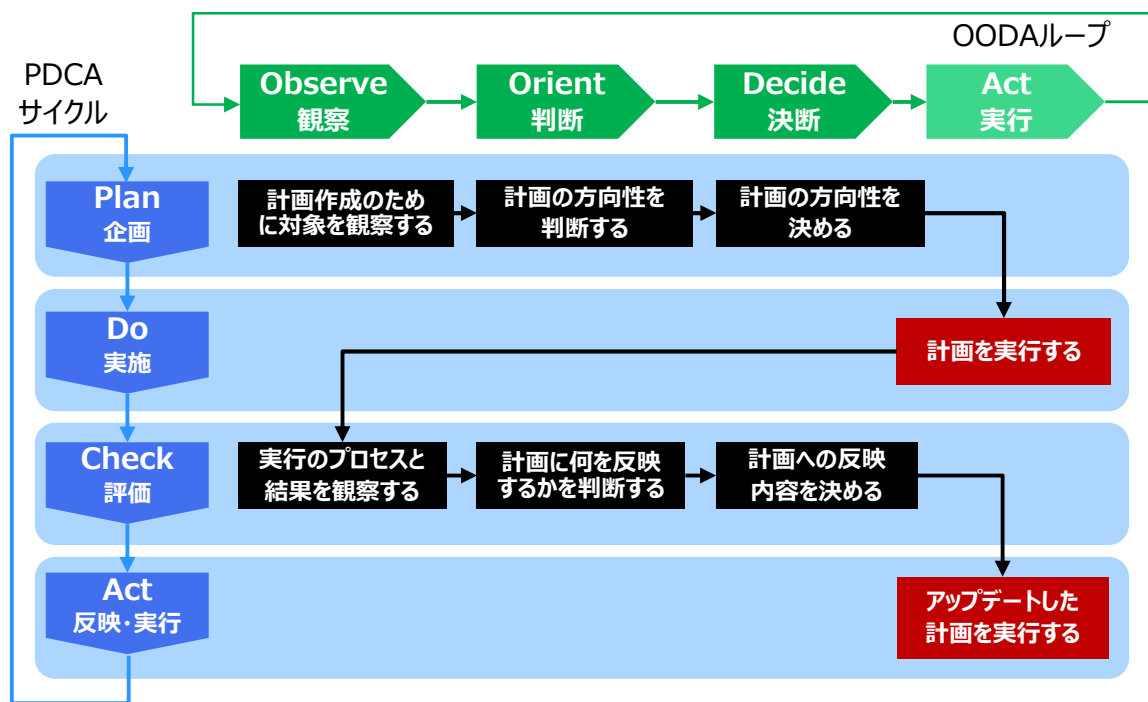


図 1 研究開発マネジメント PDCA サイクルと OODA ループ組み合わせ例

2. 技術評価の目的

NEDO では、次の 3 つの目的のために技術評価を実施しています。

- (1) 業務の高度化等の自己改革を促進する。
- (2) 社会に対する説明責任を履行するとともに、経済・社会ニーズを取り込む。
- (3) 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を促進する。

3. 技術評価の共通原則

技術評価の実施に当たっては、次の 5 つの共通原則に従って行います。

- (1) 評価の透明性を確保するため、評価結果のみならず評価方法及び評価結果の反映状況を可能な限り被評価者及び社会に公表する。なお、評価結果については可能な限り計量的な指標で示すものとする。
- (2) 評価の明示性を確保するため、可能な限り被評価者と評価者の討議を奨励する。
- (3) 評価の実効性を確保するため、資源配分及び自己改革に反映しやすい評価方法を採用する。
- (4) 評価の中立性を確保するため、可能な限り外部評価又は第三者評価のいずれかによって行う。
- (5) 評価の効率性を確保するため、研究開発等の必要な書類の整備及び不必要な評価作業の重複の排除等に務める。

4. プロジェクト評価/制度評価の実施体制

プロジェクト評価/制度評価については、図2に示す実施体制で評価を実施しています。

- (1) 研究開発プロジェクト/制度の技術評価を統括する研究評価委員会を、NEDO内に設置。
- (2) 評価対象プロジェクト/制度毎に当該技術の外部の専門家、有識者等からなる分科会を研究評価委員会の下に設置。
- (3) 同分科会にて評価対象プロジェクト/制度の技術評価を行い、評価（案）を取りまとめる。
- (4) 研究評価委員会の了承を得て評価が確定され、理事長に報告。

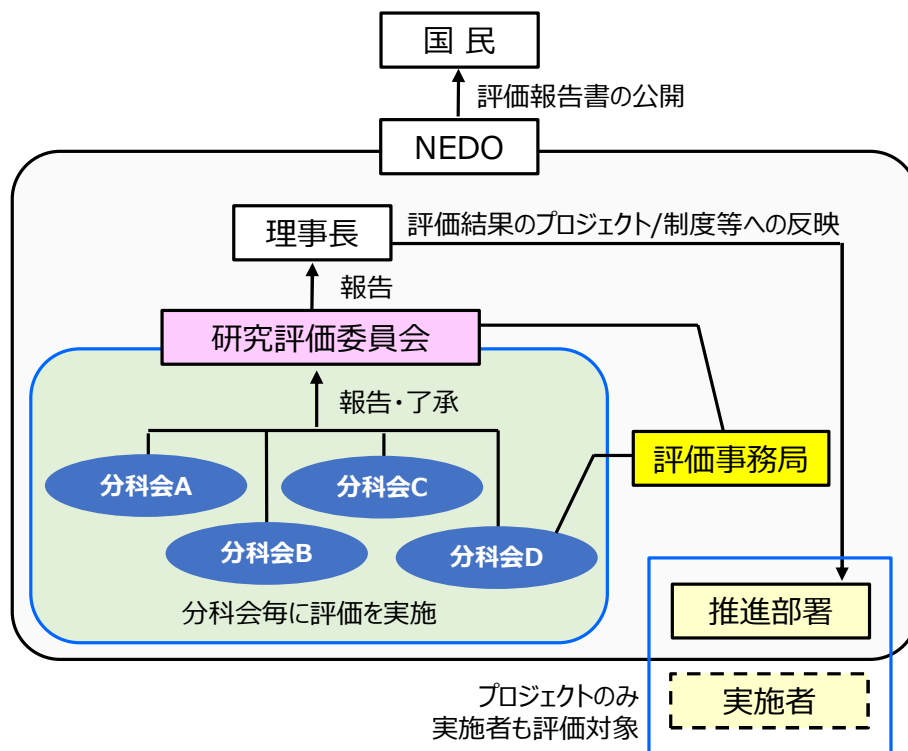


図2 評価の実施体制

5. 評価手順

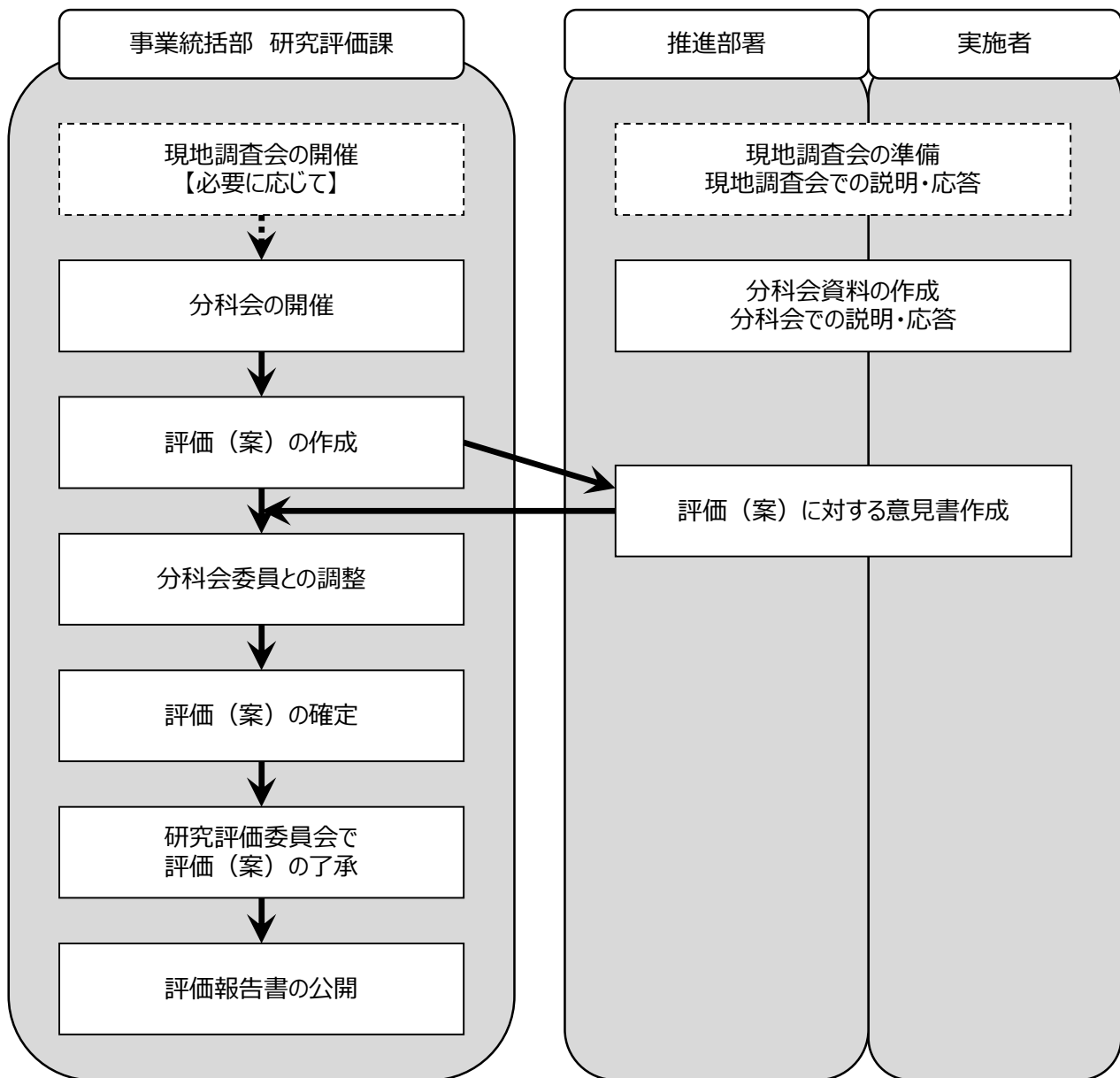


図3 評価作業フロー

研究評価委員会
「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」
(中間評価) 分科会に係る
評価項目・評価基準

1. 意義・アウトカム (社会実装) 達成までの道筋

(1) 本事業の位置づけ・意義

- ・本事業が目指す将来像 (ビジョン・目標) や上位のプログラム及び関連する政策・施策における位置づけが明確に示された上で、それらの目的達成にどのように寄与するかが明確に示されているか。
- ・外部環境 (内外の技術・市場動向、制度環境、政策動向等) の変化を踏まえてもなお、本事業は真に社会課題の解決に貢献し、経済的価値が高いものであり、国において実施する意義があるか。

(2) アウトカム達成までの道筋

- ・「アウトカム達成までの道筋」*の見直しの工程において、外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を考慮しているか。

※ 「アウトカム達成までの道筋」を示す上で考慮すべき事項

- ・将来像 (ビジョン・目標) の実現に向けて、安全性基準の作成、規制緩和、実証、標準化、規制の認証・承認、国際連携、広報など、必要な取組が網羅されていること。
- ・官民の役割分担を含め、誰が何をどのように実施するのか、時間軸も含めて明確であること。
- ・本事業終了後の自立化を見据えていること。
- ・幅広いステークホルダーに情報発信するための具体的な取組が行われていること。

(3) 知的財産・標準化戦略

- ・オープン・クローズ戦略は、実用化・事業化を見据えた上で、研究データを含め、クローズ領域とオープン領域が適切に設定されており、外部環境の変化等を踏まえてもなお、妥当か。
- ・本事業の参加者間での知的財産の取扱い (知的財産の帰属及び実施許諾、体制変更への対応、事業終了後の権利・義務等) や市場展開が見込まれる国での権利化の考え方は、オープン・クローズ戦略及び標準化戦略に整合し、研究開発成果の事業化に資する適切なものであるか。
- ・標準化戦略は、事業化段階や外部環境の変化に応じて、最適な手法・視点 (デジュール、フォーラム、デファクト) で取り組んでいるか。

2. 目標及び達成状況

(1) アウトカム目標及び達成見込み

- ・外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえてアウトカム指標・目標値を適切に*見直しているか。
- ・アウトカム目標の達成の見込みはあるか（見込めない場合は原因と今後の見通しは妥当か）。
- ・費用対効果の試算（国費投入総額に対するアウトカム）は妥当か。

※ アウトカム目標を設定する上で考慮すべき事項

- ・本事業が目指す将来像（ビジョン・目標）と関係のあるアウトカム指標・目標値（市場規模・シェア、エネルギー・CO₂削減量など）及びその達成時期が適切に設定されていること。
- ・アウトカムが実現した場合の日本経済や国際競争力、問題解決に与える効果が優れていること。
- ・アウトカム目標の設定根拠は明確かつ妥当であること。
- ・達成状況の計測が可能な指標が設定されていること。

(2) アウトプット目標及び達成状況

- ・外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえてアウトプット指標・目標値を適切に*見直しているか。
- ・中間目標は達成しているか。未達成の場合の根本原因分析や今後の見通しの説明は適切か。
- ・副次的成果や波及効果等の成果で評価できるものがあるか。
- ・オープン・クローズ戦略や実用化・事業化の計画を踏まえて、必要な論文発表、特許出願等が行われているか。

※ アウトプット目標を設定する上で考慮すべき事項

- ・アウトカム達成のために必要なアウトプット指標・目標値及びその達成時期が設定されていること。
- ・技術的優位性、経済的優位性を確保できるアウトプット指標・目標値が設定されていること。
- ・アウトプット指標・目標値の設定根拠が明確かつ妥当であること。
- ・達成状況の計測が可能な指標（技術スペックとTRL*の併用）により設定されていること。

※TRL：技術成熟度レベル（Technology Readiness Levels）の略。

3. マネジメント

(1) 実施体制

- ・ 執行機関（METI/NEDO/AMED 等）は適切か。効果的・効率的な事業執行の観点から、他に適切な機関は存在しないか
- ・ 実施者は技術力及び実用化・事業化能力を発揮しているか。
- ・ 指揮命令系統及び責任体制は有効に機能しているか。
- ・ 実施者間での連携、成果のユーザーによる関与など、実用化を目指した体制となっているか。
- ・ 個別事業の採択プロセス（公募の周知方法、交付条件・対象者、採択審査の体制等）は適切か。
- ・ 本事業として、研究データの利活用・提供方針等は、オープン・クローズ戦略等に沿った適切なものか。また、研究者による適切な情報開示やその所属機関における管理体制整備といった研究の健全性・公正性（研究インテグリティ）の確保に係る取組をしているか。

(2) 受益者負担の考え方

- ・ 委託事業の場合、委託事業として継続することが適切[※]か。補助事業の場合、現状の補助率の設定を続けていくことが適切[※]か。

※ 適切な受益者負担の考え方

- ・ 委託事業は、「事業化のために長期間の研究開発が必要かつ事業性が予測できない[※]、又は、海外の政策動向の影響を大きく受けるために民間企業では事業化の成否の判断が困難な場合において、民間企業が自主的に実施しない研究開発・実証研究」、「法令の執行又は国の政策の実施のために必要なデータ等を取得、分析及び提供することを目的とした研究開発・実証研究」に限られていること。
- ・ ※「長期間」とは、技術特性等によって異なるものの「研究開発事業の開始から事業化まで10年以上かかるもの」を目安とする。「事業性が予測できない」とは、開発成果の収益性が予測不可能であり、民間企業の経営戦略に明確に記載されていないものとする。
- ・ 補助事業は、事業化リスク（事業化までの期間等）に応じて、段階的に補助率を低減させていくなど、補助率が適切に設計されているものであること。

(3) 研究開発計画

- ・ 外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえ、アウトプット目標達成に必要な要素技術、要素技術間での連携、スケジュールを適切に見直しているか。
- ・ 研究開発の進捗を管理する手法は適切か（WBS[※]等）。進捗状況を常に関係者が把握しており、遅れが生じた場合、適切に対応しているか。

※ WBS：作業分解構造(Work Breakdown Structure)の略。

参考資料 3 評価結果の反映について

「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」（中間評価）の評価結果の反映について

評価のポイント	反映（対処方針）のポイント
<p>【1】動静脈連携は、事業化の段階で実現するのではなく、実用化前に体制構築して、技術、体制のブラッシュアップを進めるべきものであり、その成果を獲得するタイミングを早める検討を期待する。</p> <p>【2】前倒しで社会実装が可能と思われる項目、特に、リチウムイオンバッテリー解体時の安全性を確保する自動化など現状既にニーズが逼迫しつつある技術は、個別に前倒し事業化を検討いただきたい。</p> <p>【3】開発する技術が社会実装されるための社会基盤の整備、例えば回収のスキームや情報の運用についてはどの主体がどのように管理していくのか、行政機関と連携し検討を進めていただきたい。</p> <p>【4】近年小型家電の全国回収量は減少傾向という統計があるなかで、将来的な回収率 50%の見込みが妥当なものか、資源戦略的視点からも現実的かつ戦略的な原料確保目標を今後は掲げていただきたい。</p>	<p>【1】政策や経済情勢を考慮しながら社会実装モデルを検討し、早期の社会実装に向けて経済産業省と適切な対応策を検討していく。</p> <p>【2】喫緊の課題であるバッテリー解体は、社会的な影響が大きいため、早期に適用できる製品種を事業者と検討し、必要な方策を講じていく。</p> <p>【3】廃家電が有する図面等の等情報については、事業者と活用スキームの議論を継続し、回収については所管の経済産業省をはじめ関係省庁とも相談しながら、効果的かつ現実的な回収スキームを検討していく。</p> <p>【4】政策や経済情勢を考慮しながら、NEDO の関係部署と議論し、経済産業省と相談しながら目標に至るマイルストーンを示していく。</p>

評価のポイント	反映（対処方針）のポイント
<p>【5】 今後 10 t/日スケールへ拡張する際の設備投資・操業コストが不透明であり、実運転時の安全性（リチウム電池混入）・メンテナンス負荷を含めた費用対効果の再検証とともに、将来的に国内のどこにどの規模の装置を設置するのか検討いただきたい。</p> <p>【6】 多数の製品を対象にした多くの技術開発項目が必要であるが、全体としての各テーマのつながりが分かり難く、一気通貫でどんな成果が出ているかも示す必要がある。</p> <p>【7】 人材開発については、自律的に拡大していくための人材交流の推進などの実施を期待する。</p> <p>【8】 若手の研究者にとっては、論文発表が必須であるので、論文を執筆しやすい雰囲気を作っていただけるようお願いしたい。</p> <p>【9】 積極的に特許化と論文投稿を進めていただき、外国出願も実施していただきたい。</p>	<p>【5】 従来からコストを留意した技術開発を行っており、モデルプラントで出荷能力の検証を行うことは計画済みであり、検証を通して処理スケールに応じた CAPEX/OPEX を検討していく。リチウム電池混入をはじめとする安全措置の検討は継続する。設置場所と規模については、回収と供給における量と質のバランスを議論し検討していく。</p> <p>【6】 PL,PM 会議、研究開発協議会、テーマ別開発協議会を通して進捗の共有と課題解決の協議を行うことで必要な開発プロセス等を整理し、具体的でわかりやすい成果を示していくようマネジメントする。</p> <p>【7】 PL,PM 会議、研究開発協議会、テーマ別開発協議会では、多くの登録研究員が積極的に参加するよう働きかけ、活発な議論と連携を促進する。</p> <p>【8】 国産技術の保護の観点から積極的に特許出願を行っていく。若手研究者、エンジニアにとってナショプロである本事業の成果を論文にすることは大きな意味を持つ一方、本事業の成果は国産技術の知的財産でもあり積極的に特許出願を行う方針であり、知財委員会でしっかり協議していく。</p> <p>【9】 【8】の再掲。</p>

評価のポイント	反映（対処方針）のポイント
<p>【10】各研究タスク間の相互連携に対する整理が不十分であり、今後はより緻密な運営体制の可視化と情報共有を進めることが望まれる。</p> <p>【11】社会実装の必須条件である採算性、量産性や設備稼働率向上といった課題をよく意識して事業を推進いただきたい。</p> <p>【12】急激に政策開発が加速化されている再資源化事業等高度化法、資源有効利用促進法改正の関連性について理解を深め、本プロジェクトの結果および本プロジェクトの実用化以後も、現実と政策のフィードバックループができ、政策提言にも資するインプットを創出できる仕組みにさせていただくことを期待する。</p> <p>【13】本プロジェクトで対象とする廃棄物の排出の実態について十分に把握したうえで、各種自治体と幅広い議論を深めて事業を進めていただきたい。</p>	<p>【10】【6】の再掲。</p> <p>【11】【5】の再掲。</p> <p>【12】事業環境を政策提言につなげる仕組みづくりについても留意しながら、引き続き政策に沿って本事業を推進していく。</p> <p>【13】廃棄物の排出の実態は地域性や自治体のルールによって異なる。こうした実情を勘案し、各省庁や有識者と相談しながら本事業を推進していく。</p>

本研究評価委員会報告は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）事業統括部が委員会の事務局として編集しています。

NEDO 事業統括部 研究評価課

* 研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。
(https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html)

〒212-8554
神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地
ミュージア川崎セントラルタワー
TEL 044-520-5160