

「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」
中間評価報告書

2019年12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

2019年12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 石塚 博昭 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 小林 直人

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」
中間評価報告書

2019年12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
評価概要	4
研究評価委員会委員名簿	6
研究評価委員会コメント	7
第1章 評価	
1. 総合評価	1-1
2. 各論	1-4
2. 1 事業の位置付け・必要性について	
2. 2 研究開発マネジメントについて	
2. 3 研究開発成果について	
2. 4 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて	
3. 評点結果	1-18
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	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、「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業」の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」（中間評価）分科会において評価報告書案を策定し、第60回研究評価委員会（2019年12月20日）に諮り、確定されたものである。

2019年12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（2019年7月3日）

公開セッション

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明

非公開セッション

6. プロジェクトの詳細説明
7. 全体を通しての質疑

公開セッション

8. まとめ・講評
9. 今後の予定
10. 閉会

● 現地調査会（2019年6月26日）

産業技術総合研究所 つくばセンター西 分離技術開発センター

● 第60回研究評価委員会（2019年12月20日）

「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」

中間評価分科会委員名簿

(2019年7月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	おおわだ しゅうじ 大和田 秀二	早稲田大学 理工学術院 創造理工学研究科 地球・環境資源理工学専攻 教授
分科会長 代理	まつの やすなり 松野 泰也	千葉大学大学院 工学研究院 都市環境システムコース コース長 教授
委員	しばた ひろゆき 柴田 浩幸	東北大学 多元物質科学研究所 材料分離プロセス研究分野 教授
	しばやま あつし 柴山 敦	秋田大学大学院 国際資源学研究科 資源開発環境学専攻 教授
	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 製造部 部長
	まつば え かずよ 松八重 一代	東北大学大学院 環境科学研究科 先進社会環境学専攻 教授

敬称略、五十音順

評価概要

1. 総合評価

本プロジェクトは、リサイクル素材の単一化・高付加価値化、処理方式の合理化・効率化の必要性等、日本のリサイクル産業の課題の解決策を提案するものであり、公共性や先進性での点で大いに評価できる。各研究開発項目は、資源循環システムをより高いレベルで構築しようとする挑戦的志向があり、各要素技術やシステムの高度化に加え、日本がもつノウハウを、将来に渡って蓄積するものである。日本が得意とする AI やデータベースを活用した大規模リサイクルの試みは、世界的にもあまり例がなく、海外 PR や国際貢献の点で評価できる。将来的には、動脈産業と静脈産業の一体感を強め、個別リサイクル技術と社会インフラをパッケージ化できる多面的な要素があり、その実現に向け、研究の進展には大いに期待したい。

一方で、実用化に向けて、回収・処理できる対象品の規模や回収素材全体の価値の定量的な把握が必要である。

今後、成果をどのように社会で使えるものにするのか、動静脈産業の連携はもちろん、将来のビジネスモデルや使用例、我が国資源政策への貢献の仕方などを鮮明にすることが望まれる。

2. 各論

2. 1 事業の位置付け・必要性について

本事業のコンセプトは、資源循環における成分分離プロセスとして最高効率を目指す画期的なものであり、大量処理型である欧米のプロセスに対して、少量・個別・高度処理を実現する日本独自のものである。日本国内において、資源リサイクルの静脈を完全に結合させることは重要な課題であり、かつ国内でその技術を持つことは我が国の競争力維持や資源安全保障の観点からも重要で本事業目的は高く評価される。各研究テーマの技術の融合を含め、動静脈産業の連携を図り、社会性・公共性を意識した事業展開は民間任せでは進めにくい面を考えると、NEDO が果たす役割は大きい。

2. 2 研究開発マネジメントについて

設定されている数値目標は、具体的かつ明確であり、内外の技術や市場動向を踏まえた戦略的な目標が設定できている。開発計画については、目標達成に必要な要素技術は網羅されていると判断され、要素技術間の関係も適切である。研究体制も、国内の第一線級の研究者、関係企業等の各機関が密接に関わるなど、プロジェクトリーダーのリーダーシップを中心に、十分な推進体制と協力関係が築かれている。進捗管理については、各種検討会が適切な間隔で開催されており、課題解決や進捗の状況が共有されており、評価できる。知財管理については、専属の知財プロデューサを配置することにより、特許出願が加速されていることが評価できる。

今後、各研究開発で得られた成果や知見、経験等を共有するとともに、将来に渡って引き継げるような管理・運営体制の構築が望まれる。また、技術開発だけで全てを解決するのではなく、もっとメーカーを巻き込んでいく仕組み作りも必要であると思われる。

2. 3 研究開発成果について

開発項目のいずれも計画通りに進められ、技術レベルを含め、最終目標に向け順調に進行している。静脈産業において、AI やデータベースを活用し、数百種類に及ぶ多様なメーカー・年代に対応した廃製品、あるいは廃部品の自動選別要素技術を開発したことは、世界で初めてのことであり、大いに評価できる。高効率製錬技術開発において、鋳型分離に関しては、分離メカニズムの解明や鋳型の設計も行われ、熔融塩分離についても大変ユニークであり、いずれの学術的価値も高い。論文発表、国際学会発表も、2年目から活発に行っており、マスコミからの注目も大きい。本事業の成果等を基に、実施者が技術アカデミーを開催するなど、成果普及に努めている。また、知的財産権の出願・審査請求・登録等を、実用化の戦略に沿って国内外で適切に行っている。

一方、各要素技術のスケール感が異なり、システムとして完成形に近いのか、そうでないのか、完成する可能性はあるのか、判断が難しい。

今後、開発した技術をうまく生かすために、メーカーとの情報共有のあり方、インセンティブの付与、国内における資源利用効率向上を促すための方策などについての対応が望まれる。

2. 4 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

3つの研究開発項目とも、それぞれ妥当な実用化戦略を設定しており、技術的課題の抽出や解決策が具体的に提示されている。実施者が主体となり実施している SURE アカデミーの取組は大変素晴らしいものと評価される。技術開発のみならず、それを支え、普及、改善をするための人材育成は重要である。研究項目①、②の開発の考え方は、小型家電のリサイクルにとどまるものではないので、他の分野での活用も期待される。研究項目③については他の元素への応用の可能性もあり、今後の発展が期待される。

一方で、実用化に耐え得る処理能力を想定し、プロセスのあり方を再構築すべきである。経済性や採算性の評価は技術開発の早い段階から必要と思われる。

今後、廃小型家電に関する収集可能性を可能な限り定量的に推定して、それに耐え得るプロセスの構築が望ましい。また、本事業での技術開発は小型家電のみならず各種廃製品にも適用可能であり、その可能性についても具体的な提示が望ましい。

研究評価委員会委員名簿

(2019年12月現在)

	氏 名	所属、役職
委員長	こばやし なおと 小林 直人	早稲田大学 研究戦略センター 副所長・教授 ／研究院 副研究院長
委員	あさの ひろし 浅野 浩志	一般財団法人電力中央研究所 エネルギーイノベーション 創発センター 研究参事
	あたか たつあき 安宅 龍明	先端素材高速開発技術研究組合 (ADMAT) 専務理事
	かめやま ひでお 亀山 秀雄	東京農工大学 名誉教授
	ごないかわひろし 五内川 拓史	株式会社ユニファイ・リサーチ 代表取締役社長
	さく まいちろう 佐久間 一郎	東京大学大学院 工学系研究科 教授
	たからだ たかゆき 宝田 恭之	群馬大学 大学院理工学府 環境創生部門 特任教授
	ひらお まきひこ 平尾 雅彦	東京大学大学院 工学系研究科 化学システム工学専攻 教授
	まつい としひろ 松井 俊浩	情報セキュリティ大学院大学 情報セキュリティ研究科 教授 ／国立研究開発法人産業技術総合研究所名誉リサーチャ
	まるやま まさあき 丸山 正明	技術ジャーナリスト／横浜市立大学大学院非常勤講師
	よしかわ のりひこ 吉川 典彦	名古屋大学 名誉教授
	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 経済政策部 主席研究員

敬称略、五十音順

研究評価委員会コメント

第60回研究評価委員会（2019年12月20日開催）に諮り、本評価報告書は確定された。研究評価委員会からのコメントは特になし。

第1章 評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の箇条書きは、評価委員の主な指摘事項を、参考として掲載したものである。

1. 総合評価

本プロジェクトは、リサイクル素材の単一化・高付加価値化、処理方式の合理化・効率化の必要性等、日本のリサイクル産業の課題の解決策を提案するものであり、公共性や先進性での点で大いに評価できる。各研究開発項目は、資源循環システムをより高いレベルで構築しようとする挑戦的志向があり、各要素技術やシステムの高度化に加え、日本がもつノウハウを、将来に渡って蓄積するものである。日本が得意とする AI やデータベースを活用した大規模リサイクルの試みは、世界的にもあまり例がなく、海外 PR や国際貢献の点で評価できる。将来的には、動脈産業と静脈産業の一体感を強め、個別リサイクル技術と社会インフラをパッケージ化できる多面的な要素があり、その実現に向け、研究の進展には大いに期待したい。

一方で、実用化に向けて、回収・処理できる対象品の規模や回収素材全体の価値の定量的な把握が必要である。

今後、成果をどのように社会で使えるものにするのか、動静脈産業の連携はもちろん、将来のビジネスモデルや使用例、我が国資源政策への貢献の仕方などを鮮明にすることが望まれる。

〈肯定的意見〉

- ・ 事業の位置づけ、目標、研究開発体制、実用化への見通しなど、各項目とも良好である。
- ・ 評価に関わる資料が大変よく準備されており、事業の内容を理解し、評価することに役立ちました。現地調査も大変有益でした。
- ・ 結論としては、実用化を見据えた開発が着実に実行されていることを高く評価いたします。
- ・ 高効率な資源循環システムを構築するという大目標を前提に、着実に研究開発が進められている点は高く評価できる。研究の構想、計画が明瞭に示されている点が特徴であり、国が進める資源戦略や資源の安定確保に直結する事業として、その役割を十分に果たしていると考えられる。研究実施者の連携、協力・管理体制が整備され、成果の普及・広報などを精力的に行っている点も評価できる。
- ・ 4つの研究開発項目を進めることで、資源循環システムをより高いレベルで構築しようとする挑戦的志向が読み取れるほか、各要素技術やシステムの高度化に加え、日本がもつノウハウを、将来に渡って蓄積しようとする点も重要な考えである。将来的には、動脈産業と静脈産業の一体感を強め、個別リサイクル技術と社会インフラをパッケージ化できる多面的な要素があり、その実現に向け、研究の進展には大いに期待したい。
- ・ 今はまだ中間評価であるが、本事業で得られる最終成果が、社会実装されていくことを大いに期待する。
- ・ リサイクル素材の単一化・高付加価値化、処理方式の合理化・効率化の必要性等、日本のリサイクル産業（静脈産業）が現在（あるいは近将来）抱える課題の解決策を提案す

る事業の目的となっており、公共性や先進性での点で大いに評価できる。

- ・ 日本が得意とする AI やデータベースを活用した大規模リサイクルの試みは恐らく世界的にもあまり例がなく、海外 PR や国際貢献の点で評価できる。
- ・ 民間のリサイクラーを巻き込んだ体制となっており、「実用化」目標が明確に設定されている点は、技術だけが孤立しないような歯止めとなっている。
- ・ 現状では民間企業が統括的に取り組みにくい課題の解決策を提案しており、NEDO が取り組むべきテーマとなっている。
- ・ 資源利用効率の向上、希少資源散逸削減を支える重要な技術開発であり、順調に研究開発が進められているものと高く評価いたします。2020 年以降はマテリアルフローや資源性評価なども加わり、また各プロセスが接続し、一気通貫した都市鉱山活用プロセスが実現することを期待いたします。

〈改善すべき点〉

- ・ 中間評価として研究開発は順調に進んでいると考えられるが、前述した幾つかのポイントについては、今後可能な限り取り入れていくことを期待したい。例えば以下の項目である。
 - (1) 各研究開発項目間の課題や方向性を認識し、着実な成果獲得に向けて共有化を図る。
 - (2) 実用化のイメージやユーザー側の意向を取り入れ、装置・システム・技術の社会実装への道筋を具体化する。
 - (3) 開発した成果の経済性評価やコスト分析等を可能な限り進める。
- ・ 「実用化」に向けて、回収・処理できる対象品の規模や回収素材全体の価値を定量的に把握し、将来の事業化可能性についての判断材料を準備すべきでは？
- ・ 機械学習を用いた基盤等における微細部品の同定などについては、重要な技術開発であると認識する一方、メーカーなどの協力により、より対費用効果の高い技術開発が進められるのではないかという思いもいたします。是非、将来のあるべき動静脈一体形の都市鉱山活用の仕組みも提案いただければと思います。

〈今後に対する提言〉

- ・ 先進的な技術開発だが、近い将来、対象を広げる際により多くのあるいは他分野の協力が必要になると考える。センサー選別等においてはより先進的な技術・ノウハウを有する専門家の協力が必要か。
- ・ CAD 図面を持っている製品メーカーが作るいわゆる逆工場プロセスとどのように協力体制を築くかが重要である。
- ・ 現状の市場ではレアメタルへの需要・必要性が低くなっており、(本事業の内容ではないが) 各種資源の定量的リスク評価を行うことにより、そのリサイクルの重要性を明確にすることが必要である。
- ・ 委託先が多い研究開発項目もある故、プロジェクトリーダーの産総研の強いリーダー

シップを期待する。

- リサイクルの輪がつながることは大変難しい課題であると認識しております。個々の技術の完成度が高まるだけではリサイクルの輪がつながりませんので、次工程までを考慮した開発が行われている点で大変期待しております。静脈と動脈をつなげる部分が製錬技術でありますので、本事業で提案されている製錬技術がさらに進展することを大変期待しております。
- 中間評価として、十分な成果を得つつ着実に進んでいると総括できるが、これからの研究期間は、より実用化、社会実装をイメージした開発が必要である。そのためにも本成果をどのように社会で使えるものにするのか、動静脈産業の連携はもちろん、将来のビジネスモデルや使用例、我が国資源政策への貢献の仕方などを鮮明にした研究開発が必須である。天然資源に乏しい日本だからこそ、このような研究開発事業を推進すべきであり、着眼点や開発主旨は極めて高く評価できる。最終的な目標達成に向け着実な進展と成果の獲得を期待するとともに、基盤技術として確実な社会実装が実現することを切に望む。
- 経済性・採算性に考慮したビジネスモデルの構築をぜひ期待したい。
- 上記を実現するためには **NEDO** のサポートも重要と思います。メーカーとの対話など、積極的に場作りが必要と思われるので、ご検討をいただければと思います。

2. 各論

2. 1 事業の位置付け・必要性について

本事業のコンセプトは、資源循環における成分分離プロセスとして最高効率を目指す画期的なものであり、大量処理型である欧米のプロセスに対して、少量・個別・高度処理を実現する日本独自のものである。日本国内において、資源リサイクルの静脈を完全に結合させることは重要な課題であり、かつ国内でその技術を持つことは我が国の競争力維持や資源安全保障の観点からも重要で本事業目的は高く評価される。各研究テーマの技術の融合を含め、動静脈産業の連携を図り、社会性・公共性を意識した事業展開は民間任せでは進めにくい面を考えると、NEDO が果たす役割は大きい。

〈肯定的意見〉

- ・ 本事業のコンセプトは、資源循環における成分分離プロセスとして最高効率を目指す画期的なものであり、大量処理型である欧米のプロセスに対して、少量・個別・高度処理を実現する日本独自のものである。このコンセプトによる画期的なプロセスが創出されることにより、この分野における従来にない高度な分離そして省エネルギーを達成することができる。
- ・ なお、従来、この分野では、日本は欧米の技術・プロセスをそのまま導入する傾向にあり、国内に先進的な破碎・粉碎機および選別機のメーカーが育っていない状況において、こうしたコンセプトを取り入れることは民間企業ではほぼ不可能であり、ここに NEDO 事業としての重要性がある。
- ・ 循環型社会の形成は、持続社会構築のために世界的に推進すべき重要事項であり、我が国が先駆的規範になるべきものである。本事業の目的はそれに合致している。
- ・ しかるに昨今、小型家電に含まれる金などの貴金属含有量は総じて減少傾向にあるとともに、一時に比べレアメタル価格は相対的に安価で推移しており、使用済み機器からの金属等素材回収のインセンティブが働きにくくなっている。それゆえ、民間活動のみでは改善できない状況になっており、国が研究開発費を補助することでブレークスルーを実現することが必要不可欠である。
- ・ 本事業により生み出される市場規模は約 1,000 億円と試算されており、世界に技術供与した場合はさらに一桁大きくなるものと考えられる。それゆえ、投じた研究開発費との比較において十分である。
- ・ 事業目的の妥当性：金属リサイクルシステム全体のコストを低減化し、都市鉱山から排出されるレアメタルをリサイクルするための要素技術開発は大変重要である。日本国内において、資源リサイクルの静脈を完全に結合させることは重要な課題であり、かつ国内でその技術を持つことは我が国の競争力維持や資源安全保障の観点からも重要で本事業目的は高く評価される。
- ・ NEDO の事業としての妥当性：レアメタルリサイクルの事業は市場の動向に左右され、静脈産業が開発コストを継続的に負担し、開発を推進することは難しいと考えられる。この点から NEDO が本事業を推進することは意義が高い。

- ・ 高効率な資源循環システムの構築を主な目的に、新たなリサイクル技術を開発すべく、独自の構想とアイデアをもって研究を進めている点が本事業の最大の特徴である。資源の循環利用を革新する新たな要素技術開発としての価値もあり、波及性や社会基盤の強化、政策貢献などの観点から、国が進めるべき事業としてその役割を十分に果たしていると考えられる。
- ・ 具体的な研究テーマについても、これまでになかった発想と着眼点にもとづいて進められている点が興味深い。これら技術の融合を含め、動脈産業の連携を図り、社会性・公共性を意識した事業展開が濃厚に取り入れられている。民間任せでは進めにくい面を考えると、NEDO が果たす役割は大きく、事業の価値、必要性は十分にあると判断できる。
- ・ 事業分野に関わらず、日本のリサイクル産業（静脈産業）は現在、下記の課題を抱えている。
 - ① 中国の廃プラ・雑品輸入規制に代表される国際間のリサイクル素材物流の変貌により、複合品や混合物での有価売却が、国内外関わらず価格・物量両面で困難となり、より単一素材化の必要性が高まっていること。
 - ② 動脈産業では、原料・資材原低のために従来から継続的に低品位の素材比率を高める技術開発を行っており、（例えば金属→プラスチックやガラス化、銅→アルミ化等）、静脈産業で回収できる素材の品位が年々低下、有価で売却しやすい状態（＝単一素材化）への加工が、さらに求められていること。
 - ③ 性状が変貌していくリサイクル対象品の単一素材化のためには、継続的なリサイクル技術開発が必要であるが、動脈産業側がリサイクルに必要な情報公開や技術開発に積極的でなく、動脈－静脈を結んだ統括的な水平リサイクルの仕組みが民間企業では形成されにくいこと。
 - ④ いわゆる 3K 職場のイメージがまだまだ強い静脈産業では、動脈産業以上に人手不足が深刻なこと。
- ・ これらの課題を解決するために、日本では、従来型の破砕機を駆使した最大公約数的なリサイクルよりも、様々な対象製品から最大価値を引き出す選別・回収の仕組みを形成する多品種小ロット的なリサイクルや、AI やデータベースを活用した省人・省エネ型の合理的かつ効率的なリサイクルが求められている。
- ・ 以上の背景を考慮すると、今回の事業目的は時代のニーズによく合致し、日本が得意とする多品種小ロット生産的な技術を静脈産業へ適用するという先進的な開発課題を内含していると言える。また、海外においては、破砕方式中心の欧米、手解体中心のアジア圏と、未だ従来型のリサイクルが主体と推定され、今回の事業で開発する先進的なリサイクル技術や仕組みが、国際的に PR できることも十分予想される。
- ・ ③、④で述べたように、静脈産業においては、今後求められる単一素材化の要求は高くなる一方なのに、技術開発や人材投入・育成が十分でない、というのが実態と思われる。今回の事業で NEDO が民間を先導するような先進的なリサイクル技術の開発を成功させ、適当な時期に技術開示ができれば、十分に公共性の高い成果を得たことにな

る。

- ・ 国際的にも国内的にも関心の高い事象であり、都市鉱山の更なる深化・活用を促す技術開発を行っている点、高く評価される。

〈改善すべき点〉

- ・ リサイクルプロセスとしては理想的なものが提案されているが、現在の市場においてそれを実現させるには、こうした新たな高度分離プロセスの開発に見合った新たな集荷システムを提案する必要がある。
- ・ NEDO 事業の費用対効果の項目では約 1,000 億円相当の金属資源を新たに資源化する目標を掲げている。この点は参入を想定する事業者も加わったより具体的な検討を実施すると、本事業の実現性が増すのではないかと考える。
- ・ 本事業の必要性や妥当性は高く評価できる。ただし、中間評価として見ると、今後に向けて将来構想や社会実装に至る工程、ビジョン、あるいは課題や展望、市場分析などは早期に着手した方がよいと考えられる。例えば、開発した技術のビジネス展開や事業化プロセス、経済評価や将来性などがあるとわかりやすい。事業終了時の最終目標といえるが、今後の3年間でぜひ検討を進めてもらいたい。
- ・ また、次年度から始まる「研究開発項目④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発」とも関わるが、動脈側産業の声や意見を積極的に取り込み、考え方を反映させるなど、連携、協力の仕方を早めに構築し、研究開発に活用していくことが望まれる。
- ・ 本事業の最終成果は、目先の技術開発だけでなく、資源の持続性、持続可能な社会を構築する一助になることから、多面的な議論ができるよう柔軟な実施体制の構築が望まれる。
- ・ 技術開発も重要であるが、それを支える人材育成も同じくらい重要である。現在の体制では、人材育成の部分については、その多くを NEDO プロジェクトとしてではなく、AIST の有していた SURE スキームで支えているように見受けられる。NEDO プロジェクトとしての成果を実用化、普及を促すためにも、人材育成の部分も NEDO が積極的にサポートするべしと考える。

2. 2 研究開発マネジメントについて

設定されている数値目標は、具体的かつ明確であり、内外の技術や市場動向を踏まえた戦略的な目標が設定できている。開発計画については、目標達成に必要な要素技術は網羅されていると判断され、要素技術間の関係も適切である。研究体制も、国内の第一線級の研究者、関係企業等の各機関が密接に関わるなど、プロジェクトリーダーのリーダーシップを中心に、十分な推進体制と協力関係が築かれている。進捗管理については、各種検討会が適切な間隔で開催されており、課題解決や進捗の状況が共有されており、評価できる。知財管理については、専属の知財プロデューサを配置することにより、特許出願が加速されていることが評価できる。

今後、各研究開発で得られた成果や知見、経験等を共有するとともに、将来に渡って引き継げるような管理・運営体制の構築が望まれる。また、技術開発だけで全てを解決するのではなく、もっとメーカーを巻き込んでいく仕組み作りも必要であると思われる。

〈肯定的意見〉

- ・ 本事業のコンセプトは他に類を見ないものであり、それを実現するための個別技術開発およびそれらを繋ぐプロセスの最適化は非常に難易度の高い課題である。廃棄物処理において欧米とは異なる環境である日本では、こうしたきめの細かい技術開発が必須であり、独自のプロセスとして世界に発信すべきものである。
- ・ 3つの研究開発項目（①廃製品自動選別技術開発、②廃部品自動選別技術開発、③高効率製錬技術開発）とも、それぞれ戦略的な目標を設定している。
- ・ ①廃製品自動選別技術開発および②廃部品自動選別技術開発は、「技術開発に待ったなしの」状況となっており、目に見える成果が出やすいものであり、それに即した目標が掲げられている。一方、③高効率製錬技術開発は、大きなブレークスルーを目指す挑戦的な開発である。それゆえ開発にはある程度時間はかかると予想され、その状況に即した目標設定になっている。

・ ①廃製品自動選別技術

研究開発目標の妥当性：設定されている数値目標は具体的かつ明確である。

研究開発計画の妥当性：開発中の画像解析による選別技術は秀逸であり、目標達成に必要な要素技術は網羅されていると判断される。また、要素技術間の関係は適切である。

研究開発の実施体制：現地調査から、実施者が必要な技術力や事業化能力を有していることは理解できた。指揮命令系統および責任体制についてはグループのリーダーが計画の詳細を十分に把握し、推進していると評価される。事業の担い手又はユーザーは、装置の開発に関しては現在の実施者が行えるものと思われる。分離技術開発センターにて、集中的に開発が行われていることから、実施者間の連携は緊密に行われていると判断される。このセンターの設置は本事業の推進に大変重要であり、評価される。

研究開発の進捗管理の妥当性：各種検討会が適切な間隔で開催されており、課題解決

や進捗の状況が共有されていることが理解でき、評価できる。

知的財産等に関する戦略の妥当性：NEDO 事業専属の知財プロデューサを配置することに、特許出願が加速されていることは評価できる。

- ②廃部品自動選別技術

研究開発目標の妥当性：設定されている数値目標は具体的かつ明確である。

研究開発計画の妥当性：開発中の各モジュールを連結するトランスフォーマブル選別技術は秀逸であり、目標達成に必要な要素技術は網羅されていると判断される。また、要素技術間の関係は適切である。

研究開発の実施体制：現地調査から、実施者が必要な技術力や事業化能力を有していることは理解できた。指揮命令系統および責任体制についてはグループのリーダーが計画の詳細を十分に把握し、推進していると評価される。事業の担い手又はユーザーは、装置の開発に関しては現在の実施者が行えるものと思われる。分離技術開発センターにて、集中的に開発が行われていることから、実施者間の連携は緊密に行われていると判断される。このセンターの設置は本事業の推進に大変重要であり、評価される。北大との連携も開発のコアに位置するものであり、評価できる。

研究開発の進捗管理の妥当性：各種検討会が適切な間隔で開催されており、課題解決や進捗の状況が共有されえいることが理解でき、評価できる。

知的財産等に関する戦略の妥当性：NEDO 事業専属の知財プロデューサを配置することに、特許出願が加速されていることは評価できる。

- ③高効率製錬技術開発

研究開発目標の妥当性：設定されている数値目標は理解できる。鋳型分離、溶融塩分離ともに大変挑戦的な課題を設定しており評価できる。

研究開発計画の妥当性：鋳型分離について、目標は明確である。溶融塩分離については合金としての目標値は少しわかりにくい。

研究開発の実施体制：実施者が必要な技術力を有していることは理解できる。

指揮命令系統および責任体制についてはグループのリーダーが計画の詳細を十分に把握し、推進していると評価される。

神戸大学、佐賀大学、京都大学、大阪大学の連携も開発のコアに位置するものであり、評価できる。

研究開発の進捗管理の妥当性：各種検討会が適切な間隔で開催されており、課題解決や進捗の状況が共有されていることが理解でき、評価できる。

知的財産等に関する戦略の妥当性：NEDO 事業専属の知財プロデューサを配置することに、特許出願が加速されていることは評価できる。

- 研究開発として、大きく4つの項目（開発項目①～③-2）に分けられた個別テーマが順調に進められている。いずれの項目も、新しい着想と独創的なアイデア、開発要素が盛り込まれ、従来技術とは異なる視点で研究が進められる点が高く評価できる。

- 設定された目標や目指すべき姿も具体化され、着実に進んでいる様子が理解できる。特に、研究開発項目①と②では、物理選別の高度化のみならず、自動化・省力化・AI

化を含め、コンセプトそのものを革新させるような考えが導入されており、挑戦的な意味合いが強く、研究テーマとしての評価は高い。また、研究開発項目③—1、③—2においても、従来の製錬技術にはなかった材料・手法の開発を進めている点で今後の期待される。

- 研究体制（事業実施体制）も、国内の第一線級の研究者、関係企業等の各機関が密接に関わるなど、プロジェクトリーダーのリーダーシップを中心に、十分な推進体制と協力関係が築かれている。
- 研究開発目標の妥当性について：1. 1のコメントで述べたように内外の技術や市場動向を踏まえた戦略的な目標が設定できている。
研究開発項目毎に中間目標で数値目標がいくつか設定されていることは評価できる。また、事業の目標の他にアウトカム目標の設定があり、ここに具体的な再資源化の数値目標も設定されている。
- 研究開発計画の妥当性について：今回の中間評価で前期3年間の進捗が客観的に評価される日程となっているが、開発項目③については2023年度の事後評価まで客観評価の機会がないように思えるが、NEDO—事業者間の定例開発会議等で、進捗が管理できていれば可、と思われる。
- 研究開発の実施体制の妥当性：開発項目①、②についてはユーザーとして大手リサイクルプラントを取込み、実用性や経済性の客観的な評価ができる体制になっている。開発項目③についても同様に大手ユーザーを取込んでおり、評価できる。
- 研究開発の進捗管理の妥当性：ヒアリングの範囲ではあるが、とりわけ開発項目①、②においてはリサイクルの対象物の性状や形態の変化に対して、随時、柔軟に技術の取捨選択や見直し等を図っているように思えた。
また、対象物の経済価値の年代的な変貌についてもデータベースを使用した定量的な評価ができている。
- 順調に技術開発がスケジュール通り進められており、成果が上がっていると見受けられる。

〈改善すべき点〉

- 当初から守備範囲を広げることは得策ではないが、今後、こうした技術開発を進めるにあたっては、より多くの他分野を含むプレイヤーの参加が必要に思われる。特に、この技術開発では、各種のセンシング技術、AI・IoTを駆使する必要性も高く、こうした分野のエキスパートを加える必要性を感じる。
- ③高効率製錬技術開発に関しては、関与する委託先が多いので、開発が本末転倒にならぬようプロジェクトリーダーの産総研の強いリーダーシップに期待したい。
- 研究開発項目①廃製品自動選別技術：各選別技術が連結された装置の具体的なイメージがあると分かりやすいと思う。
- 研究開発項目②廃部品自動選別技術：トランスフォーマブル選別機の具体的な実行メニューが設定できると実用化のイメージが付きやすいように思う。

- ・ 研究開発項目③高効率製錬技術開発：革新的な製錬技術の開発ですが、分離後にどのような形態で提供するのかまでイメージできると分かりやすいように思う。
- ・ 全体のテーマを通じ、研究開発の計画、目標、体制等のマネジメントは適切に管理され、事業推進のために十分に機能していると判断する。ただし、事業の効率化、将来性を考えると以下の点は今後明確にしていくことが必要だと考えられる。
 - (1) 各研究開発項目間の課題や方向性の認識と共有化
 - (2) 将来のビジネスモデルや社会実装を考慮したテーマおよび実施者間の連携強化
- ・ 当該事業の成果を活用し、将来の事業化に向け効率を上げるためには、各研究開発で得られた成果や知見、経験等を共有するとともに、将来に渡って引き継げるような管理・運営体制の構築が望まれる。
- ・ 技術開発も重要であるが、それを支える人材育成も同じくらい重要である。現在の体制では、人材育成の部分については、その多くを NEDO プロジェクトとしてではなく、AIST の有していた SURE スキームで支えているように見受けられる。NEDO プロジェクトとしての成果を実用化、普及を促すためにも、人材育成の部分も NEDO が積極的にサポートするべしと考える。

〈今後に対する提言〉

- ・ 例えば、使用済み電気・電子機器から回収したネオジム磁石等を対象に、上記の3つの研究開発項目が一気通貫となるように進めれば最終成果をより明確に示せるようになるかと思う。
- ・ 研究開発項目①廃製品自動選別技術、研究開発項目②廃部品自動選別技術については報告会でも意見交換がありましたが、製品化に非常に近いと思われる装置があります。事業の終了を待たずに次の実用化のステージに進めることがあっても良いと考える。
- ・ いずれの研究開発項目についても、独創性とチャレンジ性を持った特徴ある研究が進められている。各要素技術が高いレベルで開発されていることも評価できる。欲を言えば、将来目指すべき方向性の一つとして、技術の汎用性や応用力（他の材料や小電を超えたりサイクル原料等への展開、技術の拡充）にも期待したい。特に、最近話題の廃プラ等への活用や広義の資源循環、環境対策技術など、持続可能な社会の実現に向け技術的な対応力を上げていくことが望まれる。
- ・ 事業の目標の他にアウトカム目標の設定があるが、事後評価の前段にて、進捗管理の体制や計画が提示されることを期待する。
- ・ 基板中にどのような部品がどう位置しているかといった情報は、メーカー側が持っている情報の活用により、技術開発のスピード向上が期待できると思われる。技術開発だけで全てを解決するのではなく、もっとメーカーを巻き込んでいく仕組み作りも必要であると思われる。

2. 3 研究開発成果について

開発項目のいずれも計画通りに進められ、技術レベルを含め、最終目標に向け順調に進行している。静脈産業において、AI やデータベースを活用し、数百種類に及ぶ多様なメーカー・年代に対応した廃製品、あるいは廃部品の自動選別要素技術を開発したことは、世界で初めてのことであり、大いに評価できる。高効率製錬技術開発において、鑄型分離に関しては、分離メカニズムの解明や鑄型の設計も行われ、熔融塩分離についても大変ユニークであり、いずれの学術的価値も高い。論文発表、国際学会発表も、2年目から活発に行っており、マスコミからの注目も大きい。本事業の成果等を基に、実施者が技術アカデミーを開催するなど、成果普及に努めている。また、知的財産権の出願・審査請求・登録等を、実用化の戦略に沿って国内外で適切に行っている。

一方、各要素技術のスケール感が異なり、システムとして完成形に近いのか、そうでないのか、完成する可能性はあるのか、判断が難しい。

今後、開発した技術をうまく生かすために、メーカーとの情報共有のあり方、インセンティブの付与、国内における資源利用効率向上を促すための方策などについての対応が望まれる。

〈肯定的意見〉

- このようなコンセプトに基づいて破碎・選別プロセスを構築する事業は世界的に初の試みであり、日本発の処理プロセスの提案として評価できる。
- 知的財産権の出願・審査請求・登録等を、実用化の戦略に沿って国内外で適切に行っている。
- 論文発表、国際学会発表も、2年目から活発に行っている。
- マスコミからの注目も大きい。
- 技術アカデミーの開催など、成果普及に努めている。
- ①廃製品自動選別技術開発
研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：中間目標は達成している。
画像解析による選別技術は極めて汎用性が高いものと評価できる。
構築している DB は貴重であり、汎用性もある。
成果の最終目標の達成可能性：課題解決の道筋は明確にされており、最終目標は達成できると判断される。
成果の普及：論文等の発信は十分に行われている。一般への情報発信も行われている。
コンソーシアムとの連携により実用化の担い手やユーザーとの情報共有が行われているとのことであったので、早期の実用化が期待される。
知的財産権等の確保に向けた取組：行われていると判断される。
- ②廃部品自動選別技術
研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：中間目標は達成している。
破碎技術およびトランスフォーマブル選別機は極めて汎用性が高いものと評価できる。
構築している DB は貴重であり、汎用性もある。

成果の最終目標の達成可能性：課題解決の道筋は明確にされており、最終目標は達成できると判断される。

成果の普及：論文等の発信は十分に行われている。一般への情報発信も行われている。コンソーシアムとの連携により実用化の担い手やユーザーとの情報共有が行われているとのことであったので、早期の実用化が期待される。

知的財産権等の確保に向けた取組：行われていると判断される。

- ③高効率製錬技術開発

研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：中間目標は達成している。

鑄型分離に関しては、分離メカニズムの解明や鑄型の設計も行われており学術的価値が高いと判断される。熔融塩分離についても大変ユニークであり学術的価値も高い。

成果の最終目標の達成可能性：鑄型分離と熔融塩分離ともに最終目標は達成できると判断される。

成果の普及：論文等の発信は十分に行われている。

知的財産権等の確保に向けた取組：行われていると判断される。

- 開発項目①～③-2で分類された4つの研究テーマは、いずれも計画通りに進められ、技術レベルを含め、最終目標に向け順調に進行していると考えられる。
- 研究開発項目①および②では、画像認識や新たなセンシング技術、アルゴリズム開発、シミュレーター等を活用した解析技術の高度化により、製品/モジュールソーターや自動解体装置、トランスフォーマブル選別システムなど、斬新な装置が開発され、各種のデータベース化や技術ノウハウの蓄積を含め、物理選別の革新を目指すべく研究開発が進められている。
- 研究開発項目③-1および③-2でも、レアアース元素に対する分離係数3以上の抽出剤（分離材）の開発や熔融塩電解と隔膜技術を利用したNd/Dyの選別回収など、製錬技術の飛躍と可能性を広げるための研究が着実に進められている。
- これら研究成果の公表や広報・普及活動あるいは社会貢献についても、精力的に取り組まれている点が特徴であり、研究事業に向き合う姿勢や努力に関しては高く評価したい。
- 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：静脈産業において、AIやデータベースを活用し、数百種類に及ぶ多様なメーカー・年代に対応した廃製品、あるいは廃部品の自動選別要素技術を開発したことは、恐らく世界で初めてでこの点は大いに評価できる。

事業者で開発したデータベースがユーザー側で更新可能で、ネットを通して共有できるようなシステムに仕上げれば、画期的で汎用性の高い技術となることが期待できる。

開発項目②については、最適条件選択システム、運動予測システム、トランスフォーマブル等革新的な制御技術を取り入れてはいるが、選別手段（破碎、磁力、ECS等）や搬送方式そのものは目で見てわかる比較的単純な従来技術を活用しており、ユーザーとしてはそれほど違和感や拒否反応がなく使いこなせられると思われる。

開発項目③-2については、磁石を構成する希土類の分離・回収を単一工程で可能に

するという革新的な技術で、磁石を回収するリサイクルプラントに取り込めるレベルまで完成できれば、物流コストや加工コストの大幅な削減がなされ、多くの事業者がコスト高で断念してしまったレアアース磁石回収の全国的な機運を復活させる可能性がある。

- 成果の最終目標の達成可能性：開発項目①、②については、微妙なチューニングは必要であるものの目標とする要素技術の開発は達成していると思われる。
- 成果の普及：多数の論文、学会発表、取材等で十分に成果を公表していると思われる。
- 都市鉱山活用の最前線技術開発を行っているものと、高く評価いたします。
- また、製錬側の技術は基礎研究開発段階であるものの、世界に類を見ない技術であり、高く評価されるものと思います。

〈改善すべき点〉

- 中間目標はほぼ達成されているように思えるが、個別技術の成熟度は世界的な視点からすればまだ低レベルと言わざるを得ない。
- 研究開発項目③高効率製錬技術開発：鋳型分離については三徳の寄与は大きいものと考えますが寄与の程度が少し分かりにくかった。
溶解塩分離については大学と産総研の役割分担が少しわかりにくかった。
- 全体を通して研究の進み具合に異論はないが、最終目標や将来に向けた課題として、実用化のイメージやユーザーの視点に立ったビジネスモデル、使用例、技術的な特徴あるいはスケールイメージなどを具体化していくことが望ましい。民間事業者の声や希望、ニーズ等を積極的に取り入れてもよいように感じる。今後は、技術開発から社会実装に向け、一步踏み込んだアイデアや発想の展開（転換）に期待したい。
- 開発項目①については、メカ的なチューニング（例えばフィーダーからの個別切出し性能やコンベア上での分離性能）が今一步で、PRには少し弱いような印象を持った。各要素技術（あるいは各ユニット）のスケール感（処理能力・スピード）が異なる（あるいは合わせ切れていない）こともあって、要素技術はともかくシステムとして完成形に近いのか、そうでないのか、完成する可能性はあるのか、判断が難しい。
- 開発項目③についても、現地調査会の機会が必要ではなかったか？スライドの発表によってのみ中間目標の達成が発表されたため、評価が難しい。
- 現在はまだ個別技術がそれぞれ開発段階であり、入り口から出口まで一貫したプロセスではないことから、今後、これらを接続した一貫したプロセスの提案に期待いたします。
- ご提案技術を組み合わせた一貫したプロセスと、既存プロセスを比較して、どの元素の回収歩留まりがどの程度向上するのか明らかにしていただきたいと思います。すでにプロセス間である程度、関心元素について共通認識はあるものと思いますが、プロセスを接続した際、歩留まりが最も悪くなる箇所がどこなのか、今回のご提案技術のみで改善すべきものなのか、あるいはメーカーとの対話の強化などによって改善されるものなのか、残りの研究開発期間で明らかにした上で、開発した技術をうまく生か

せる仕組みについてもあわせてご提案をいただけるとよいと思います。

〈今後に対する提言〉

- まずは個別技術のより高度化を目指していただきたい。日本の最先端技術を集結すべきであり、より高度な技術・ノウハウを持つプレイヤーの参画が望ましい。
- 委員会においても意見交換が行われたが、動脈産業との連携が行われることによって研究の進捗が加速されることが期待される。すでにコンソーシアム等で行われているかもしれないが動脈産業との意見交換の場が持たれることを期待する。
- 研究項目①、②については、これからの課題として設定されているが製錬資源となるための条件が明確化されたときにどこまでその条件が満たされるのかが早期に明らかになることを期待する。
- 研究項目③については、実際のプロセスのイメージを明確にされることが期待される。
- 研究は順調に進行していると考えられるが、これからの3年間は、成果の有効性や将来の社会実装に向け、残された課題の解決方法や方策などを具体的に検討する必要がある。開発コストや装置1台あたりの費用が高額になる可能性があることも懸念材料である。場合によってはコスト低減策など、費用対効果につながる提案などにも期待したい。事業全体として大きな予算を投じていることを考えると、要素技術としての汎用性や動脈産業への普及のさせ方にも工夫、戦略が必要だと考えられる。
- 将来的な目標である一貫統合システムの処理能力を明確にするために、要素技術（あるいは各ユニット）の能力を詳細に把握することが必要ではないか？例えば品目が変わった場合、機種が変わった場合の処理能力の変化。
- 開発した技術をうまく生かせる仕組み（メーカーとの情報共有のあり方、インセンティブの付与、国内における資源利用効率向上を促すための方策）などについても、是非、提言をご検討ください。

2. 4 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

3つの研究開発項目とも、それぞれ妥当な実用化戦略を設定しており、技術的課題の抽出や解決策が具体的に提示されている。実施者が主体となり実施している SURE アカデミーの取組は大変素晴らしいものと評価される。技術開発のみならず、それを支え、普及、改善をするための人材育成は重要である。研究項目①、②の開発の考え方は、小型家電のリサイクルにとどまるものではないので、他の分野での活用も期待される。研究項目③については他の元素への応用の可能性もあり、今後の発展が期待される。

一方で、実用化に耐え得る処理能力を想定し、プロセスのあり方を再構築すべきである。経済性や採算性の評価は技術開発の早い段階から必要と思われる。

今後、廃小型家電に関する収集可能性を可能な限り定量的に推定して、それに耐え得るプロセスの構築が望ましい。また、本事業での技術開発は小型家電のみならず各種廃製品にも適用可能であり、その可能性についても具体的な提示が望ましい。

〈肯定的意見〉

- ・ 実用化に向けての着実な技術開発が行われ始めている。また、人材育成のためのセミナーが定期的開催されており、この分野の高度化に貢献している。
- ・ 3つの研究開発項目（①廃製品自動選別技術開発、②廃部品自動選別技術開発、③高効率製錬技術開発）とも、それぞれ妥当な実用化戦略を設定している。
- ・ ①廃製品自動選別技術開発および②廃部品自動選別技術開発は、比較的直近に実用化が可能と考えられそれに即した目標が掲げられている。一方、③高効率製錬技術開発は、大きなブレークスルーを目指す挑戦的な開発である。それゆえ実用化にはある程度時間はかかると予想され、その状況に即した設定になっている。
- ・ すべての項目において、企業実施者との連携が効率よく行われていることから、成果の実用化への戦略はあり、課題の整理もできていると評価される。
- ・ SURE コンソーシアムを通じての人材育成にも取り組んでいる点は高く評価できる。
- ・ 研究項目①、②の開発の考え方は小型家電のリサイクルに留まるものではないので、他の分野での活用も期待される。研究項目③については他の元素への応用の可能性もあり、今後の発展が期待される。
- ・ 研究開発項目による違いは若干あるが、中間目標、最終目標のいずれも具体的な数値目標、ベンチマークが設定してあり、それに向かって着実に成果を上げるための努力がなされている。いずれの研究も、従来にはなかったコンセプト、独創性を有している点が特徴であり、リサイクル技術の高度化に資する取組として、リサイクルビジネスの活性化や社会的波及効果を狙った研究として進められている。特に、21世紀型の資源循環システムを確立することや、資源確保の観点から重要な意味合いを持つことは間違いなく、その道筋、可能性を高める上で当該事業が果たす役割、成果は極めて大きい。技術面やインフラ整備を考えても、今後の目標達成に向け、着実に試験開発が行われることを期待する。
- ・ 「実用化」の考え方が明確に定義されていることは評価できる。

- ・ 非公開資料の中で技術的課題の抽出や解決策が具体的に提示されている。
- ・ 開発が必要な要素技術や事業者毎に、開発アロー図と具体的な目標がかなり細かく設定され、全体の進捗が一元管理できることは評価できる。
- ・ **SURE** アカデミーの取り組みは大変素晴らしいものと評価される。前段でも述べたように、技術開発のみならず、それを支え、普及、改善をするための人材育成は重要である。

〈改善すべき点〉

- ・ 実用化に耐え得る処理能力を想定し、プロセスの在り方を再構築すべきである。特に、トランスフォーマブルシステムは一つの案ではあるが、実用化に耐え得るかを詳細に検証すべきである。実用化に向けての具体的な技術ロードマップ（どのような技術をいつ完成させるか）が不明瞭である。
- ・ 研究項目③については、実用化の目標の数値目標が現状は分離効率にとどまっている。
- ・ 鋳型分離と熔融塩分離ともに生産性の観点も必要になるのではないかと考える。
- ・ 中間評価として、個別研究を含め順調に推移していると考えられる。ただし、最終目標やアウトカム目標を達成するためには、以下の点を明確化し、可能な限り検討を進めていくことが必要である。
 - （１）実用化、社会実装ないしは基盤技術とするための課題の明確化と解決に至る道筋の提示
 - （２）開発した成果のビジネスモデルや使用例、動静脈産業との関わり方、民間事業者のニーズ等調査、市場分析あるいは資源循環に果たす役割と効果など
 - （３）成果および技術の汎用性や利用可能な分野の拡充
- ・ 回収素材の価値の評価について：モジュール化された基板については、研究開発項目②において自動選別技術さらに素材化するスキームが提示されたが、ガラス、筐体（プラスチック）、電池など価値の低いモジュールについての言及がなかった。今回の事業の基本概念が「価値の創出ではなく資源のあるべき循環を目指す」ことであつたとしても、「実用化」という最終目標を挙げているのなら、経済性や採算性の評価は技術開発の早い段階から必要と思われる。上記価値の低いモジュールは「産廃（逆有価）」になる可能性が高く、現状（あるいは近将来も）産廃処理費用が完全な買手市場となっている現実を考慮すれば、「実用化」を阻害する可能性はあり、リスク評価としてこれらの低価値モジュールの価値調査を、ユーザーであるリサイクルプラントの協力を得ながら進めておくべきと考える。
- ・ 目標とするリサイクルの規模感について：今後は、研究開発項目①、②をつないで一貫統合システムを構築する段階に入ると思われるが、現段階で目指すところの規模感がよく判らなかつた。例えば、首都圏のリサイクルプラントにおいては年間〇〇t 対象品目の小型家電を回収できるポテンシャルがあり、年間△△の稼働日で全量処理するための実用化ライン構築を想定している、等。処理規模や稼働率に関する目標が先にあって、要素技術毎に目標が展開・設定される

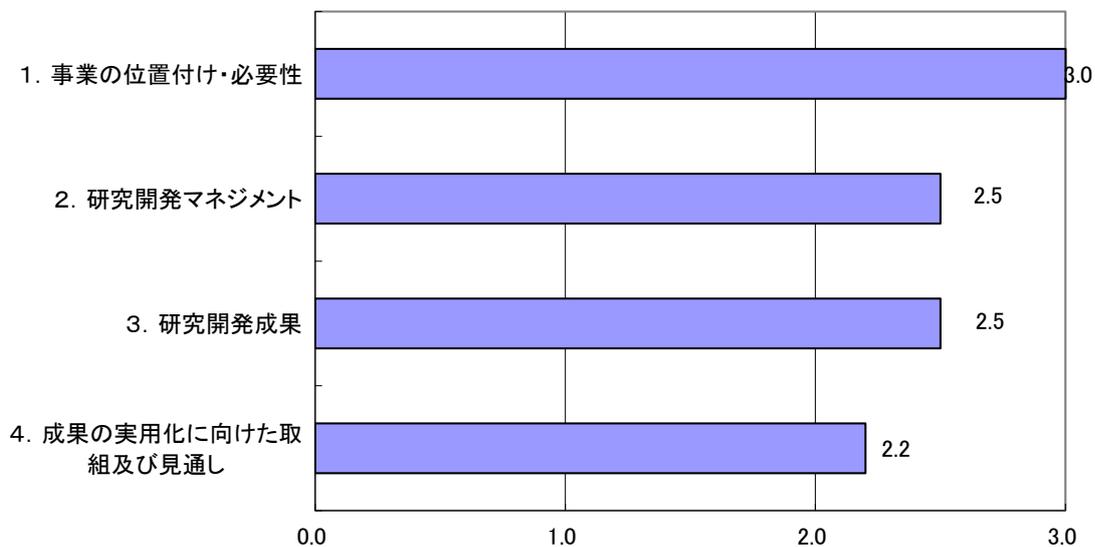
スキームもありえるし、そのスキームの方が実用化や量産化の近道となることもある。

- ・ 前段でも述べたように、NEDOプロジェクトとしても人材育成、人的ネットワークの拡大をより支援する仕組みがあってもよいと考える。
- ・ またメーカーの協力を促すなどして、製品が市場に出て何年かたった後は基盤類の図面を一部共有するような枠組み作りなども、今回開発された技術をより効率よく導入・普及させるために重要であると考ええる。

〈今後に対する提言〉

- ・ 廃小型家電に関する収集可能性を可能な限り定量的に推定して、それに耐え得るプロセスの構築が望ましい。また、本事業での技術開発は小型家電のみならず各種廃製品にも適用可能であり、その可能性についてもなるべく具体的に示すべきである。
- ・ 非鉄製錬会社に、スクラップ買取価格にレアメタルの価値評価を適正に行うこと、希土類製錬会社に貴金属・銅含有量の価値評価を適正に行うような流れを作るように頑張っていたきたい。
- ・ 研究項目①、②については実用化に近いことを感じる事ができた。一方で、委員会でも議論があったが事業として継続させるためにはその経済性が影響してしまう。この点については、補助金などの政策的な対応の検討が必要と考える。
- ・ アウトカム目標など、比較的規模の大きな金額が試算されており、これらの目標を実現できるのか、いささか疑問が残る。研究開発のマイルストーンのみならず、経済的波及効果や資源セキュリティ上の役割、我が国資源戦略への貢献など、付随的効果を取り入れた目標設定が必要だと考えられる。また、各装置の規模感などを踏まえ、装置／システム価格を抑える工夫が今後必要ではないかと考えられる。例えば、研究開発項目①および②で掲げられたベンチスケールシステムの規模感や処理能力、目標設備費などが不明であり、運転費や費用対効果（採算性や経済的なメリット）などを具体化することも必要である。
- ・ 将来の導入のしやすさを考えると、資源価格（金属価格など）の変動にあまり影響を受けない、比較的安価に導入できるプラント／技術について検討を重ねる必要があると考えられる。周辺技術の進展に柔軟に対応できる技術開発のみならず、価格面でもメリットのある成果に期待したい。
- ・ 開発した技術を孤立させないためにも、上記1. 回収素材の価値の評価について、2. 目標とするリサイクルの規模感について、を織り込んだビジネスモデルを今後の早い段階で構築、提示できないか？今回の対象4品目（携帯、スマホ、デジカメ、ビデオカメラ）は小型家電でも最も付加価値の高い製品群と思われ、これらで一定の経済性や採算性を取る絵が描けなければ、その他多数の品目や事業分野で採用しにくい技術とならないか？
- ・ 人材育成・重要なステークホルダーをつなぐネットワーク作りについては、NEDOが積極的に関与・サポートをしていくべきである。

3. 評点結果



評価項目	平均値	素点 (注)					
		A	A	A	A	A	A
1. 事業の位置付け・必要性について	3.0	A	A	A	A	A	A
2. 研究開発マネジメントについて	2.5	A	B	A	A	B	B
3. 研究開発成果について	2.5	B	A	A	B	B	A
4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて	2.2	B	A	A	B	C	B

(注) 素点：各委員の評価。平均値は A=3、B=2、C=1、D=0 として事務局が数値に換算し算出。

〈判定基準〉

- | | |
|--------------------|--------------------------|
| 1. 事業の位置付け・必要性について | 3. 研究開発成果について |
| ・非常に重要 →A | ・非常によい →A |
| ・重要 →B | ・よい →B |
| ・概ね妥当 →C | ・概ね妥当 →C |
| ・妥当性がない、又は失われた →D | ・妥当とはいえない →D |
| 2. 研究開発マネジメントについて | 4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて |
| ・非常によい →A | ・明確 →A |
| ・よい →B | ・妥当 →B |
| ・概ね適切 →C | ・概ね妥当 →C |
| ・適切とはいえない →D | ・見通しが不明 →D |

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

中間評価)分科会 (資料7-1)

「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技
術の研究開発事業」

事業原簿

【公開】

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

目次

概要

1. 事業の位置付け・必要性について

- 1.1 事業の位置付け・必要性について 1-1
- 1.2 目的の妥当性 1-3
- 1.3 NEDO の事業としての妥当性 1-14

2. 研究開発マネジメントについて

- 2.1 事業の目標 2-1
- 2.2 研究開発計画の妥当性 2-3
- 2.3 事業の実施体制 2-7
- 2.4 研究開発の進捗管理 2-10
- 2.5 知的財産等に関する戦略の妥当性 2-15

3. 研究開発成果について

- 3.1 研究開発目標及び研究開発成果と達成度 3-1
 - 3.1.1 事業全体の成果 3-1
 - 3.1.2 研究開発項目ごとの成果 3-2
 - 3.1.3 中間目標達成状況 3-24
- 3.2 成果の最終目標の達成可能性 3-25
- 3.3 成果の普及 3-26
- 3.4 知的財産権等の確保に向けた取組 3-27

4. 成果の実用化に向けた取り組み及び見通し

- 4.1 成果の実用化に向けた戦略 4-1
- 4.2 成果の実用化に向けた具体的取組 4-1
- 4.3 成果の実用化の見通し 4-3

概要

最終更新日

2019年6月19日

プロジェクト名	高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業	プロジェクト番号	P17001
担当推進部/ PMまたは担当者	環境部 PM 阿部 正道 (2017年4月～現在)		
0. 事業の概要	<p>資源・エネルギーの安定供給及び省資源・エネルギー化を実現するため、我が国の都市鉱山の有効利用を促進し、金属資源を効率的にリサイクルする革新技術・システムを開発する。具体的には、使用済み電子機器の個体認識・解体・選別プロセスを無人化する廃製品自動選別システム、廃部品を製錬原料として最適選別する廃部品自動選別システム、従来の金属製錬技術を補完する多品種少量金属種の高効率製錬技術の開発を行う。さらに、情報技術等を有効活用することによって、動静脈産業が一体となった戦略的な資源循環システムを支える技術基盤を構築する。</p>		
1. 事業の位置 付け・必要性 について	<p>現在、経済的にリサイクルが行われている金属種は鉄、アルミ、銅などの主要な元素群もしくは、金、銀、白金などの高価な元素群である。一時期価格が高騰し、リサイクル促進のための様々なプロジェクトが行われたレアメタル、特に希土類元素については、価格が下落した現在、国内で経済的なリサイクルビジネスを成立させることは困難な状況となっている。そのため、これらの資源が、リサイクルコストの安い中国などのアジアへ流出したり、選別コストが合わず、必要な選別がなされないまま既存の製錬工程へ投入され、スラグに分配されて路盤材等へ利用するにとどまっている状況である。将来的に、国内金属リサイクルシステム構築のキーとなるのは、金属リサイクルシステム全体のコスト低減化である。</p> <p>他方、我が国の成長戦略である「日本再興戦略 2016」においては、資源価格の低迷下での資源安全保障の強化等を目指して、都市鉱山の利用を促進し、リサイクル業者や非鉄金属製錬業者等の成長を図るため、動脈産業と静脈産業の連携により金属資源を効率的にリサイクルする革新技術・システムを開発することとされている。また、2018年7月から検討を開始している「循環経済ビジョン研究会」において、静脈産業の生産性向上・集約化、画像認識/自動化等によるリサイクル材の高付加価値化等の重要性が触れられている。</p>		
2. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>【中間目標】 (2019年度末)</p> <p>動静脈連携により、金属資源の循環活用が可能な都市鉱山構築に向け、天然資源からの金属生産コストと競合可能な基盤技術を開発する用途をたてる。具体的には、すべての研究開発項目を一貫して開発を実施し、以下を達成する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 研究開発項目①廃製品自動選別技術開発 廃製品（破壊・変形を伴わない）を、処理速度1秒/製品・個以内に、非破壊で個体認識・資源価値判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。 研究開発項目②廃部品自動選別技術開発 廃製品を構成する主なモジュールから分散・複雑系廃部品を単体分離・選別する自動選別システムにおいて、各種選別産物の製錬原料化（製錬受入れ条件を満たす金属原料化）を実現するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。 研究開発項目③高効率製錬技術開発 イオン半径が近接する希土類元素を対象に、相互分離係数3を有する分離試薬を開発するとともに、ラボスケールで、2種以上の希土類元素を（単体または鉄等との合金として）純度80%以上で各々同時に直接回収する技術を確立する。 研究開発項目④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発 2020年からの研究開発開始のため対象外。 <p>【最終目標】 (研究開発項目①、②：2021年度末、研究開発項目③、④：2022年度末)</p> <p>動静脈連携により、金属資源の循環活用が可能な都市鉱山構築に向け、天然資源からの金属生産コストと競合可能な基盤技術を開発する。具体的には、すべての研究開発項目を一貫して開発を実施し、以下を達成する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 研究開発項目①廃製品自動選別技術開発 廃製品（破壊・変形を伴うものを含む）を、処理速度0.5秒/製品・個以内に、非破壊で個体認識・資源価値判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現するベンチスケールシステムを完成させる。 		

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

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

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

1 事業の位置付け・必要性について

1.1 事業の背景

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

金属資源は、自動車や IT 製品といった我が国の主要製造業において、その高性能化に必須の素材であり、我が国の産業競争力の要である。近年、新興国の経済成長による需要拡大、天然資源品位の低下、資源埋蔵量の偏在性、資源ナショナリズムの台頭などにより将来的な金属資源供給のひっ迫が予測されている。さらに、鉱山の奥地化、深部化や粗鉱品位の低下、環境対策、人件費の増大等により、鉱山開発コストは増大しており、長期的な資源価格の上昇は避けられないと考えられている。我が国では、非鉄金属資源の大半を輸入に依存しており、その安定的な確保が重要な課題となっている。

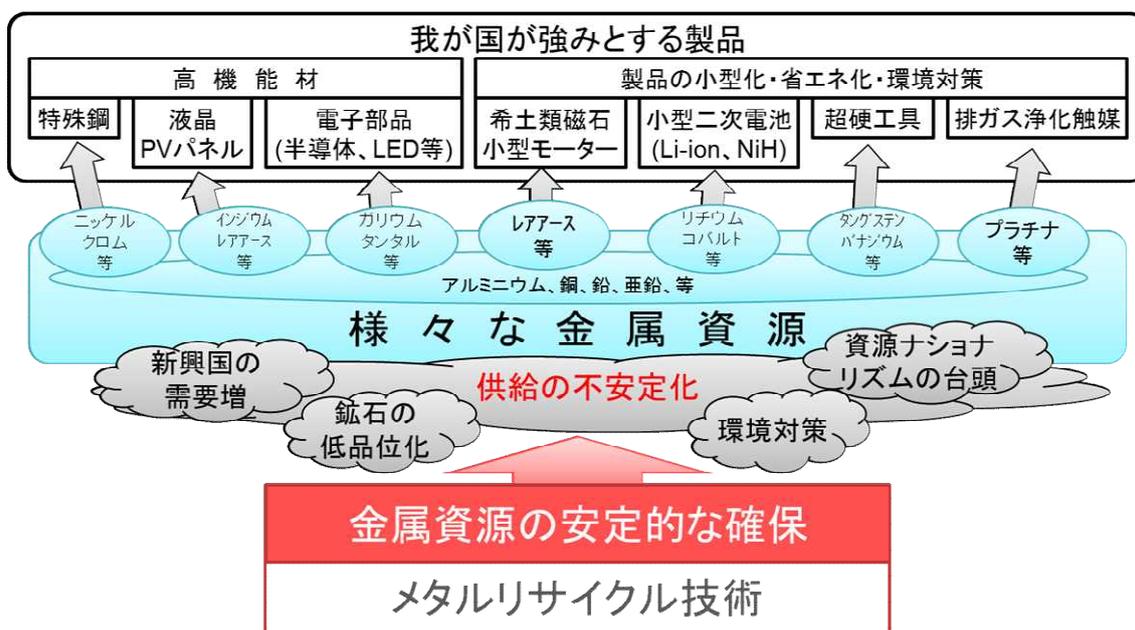


図 1. 1. 1 製品と資源との関係性

(1) 廃棄物中の金属リサイクルの状況

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

家電4品目（エアコン、テレビ、冷蔵庫・冷凍庫、洗濯機・衣類乾燥機）については、家電リサイクル法によって、いわば動脈産業に直結した廃製品のリサイクルシステムを確立している。再商品化率（造業者等が引き取った特定家庭用機器廃棄物の総重量のうち、分離された部品及び材料等で再商品化されたものの総重量）は80%を超えている。

しかし、分離された部品の中でも、モーターやトランス等に含まれる国内で分離困難な金属混合物はミックスメタルとして売買され、海外に輸出されている。また、基板類中のレアメタルのように製錬残渣（スラグ）として路盤材などに利用され、金属資源としてリサイクルされていないものなどが存在する（図1. 1. 2）。

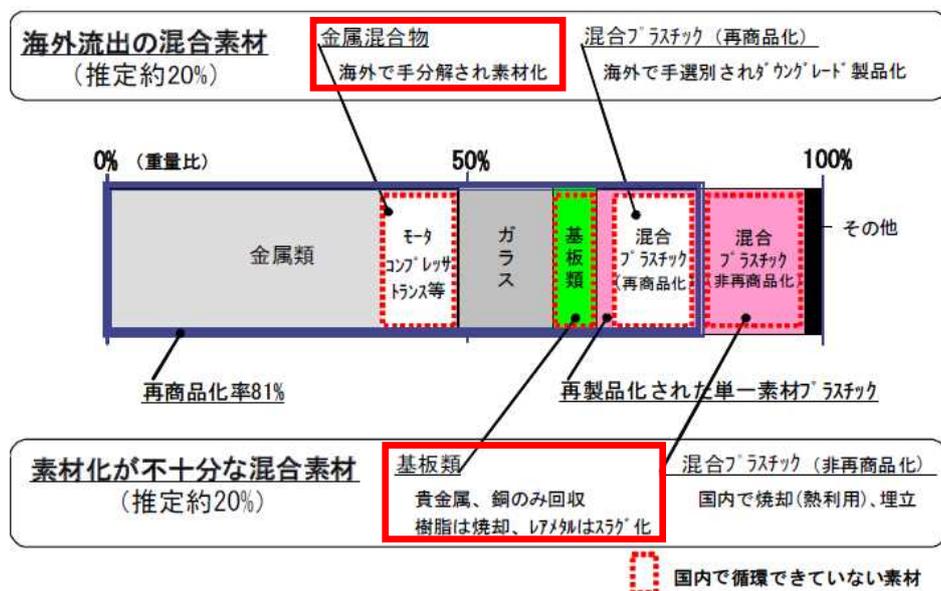


図1. 1. 2 国内でリサイクルされない混合素材内訳（2007年）

出所：産業競争力懇談会 2008年度推進テーマ報告「サステナブル生産技術基盤」
（産業競争力懇談会，2009）

近年世界各国で廃棄量が増加している e-waste に関しては、我が国では 2013 年に小型家電リサイクル法が施行され、リサイクルシステムが構築されている。現在のところ e-waste は、収集後に既存の非鉄金属製錬工程で処理され、主要な非鉄金属が回収されている。しかし、現状では回収可能な金属が銅、金、白金族などに限定されており、その他の希少金属はスラグに分配され回収不可能な状態で路盤材などに利用されている。

(2) 金属種別のリサイクル状況

JOGMEC のマテリアルフローによると、国内におけるメタルリサイクルの状況に関しては、鉛で 45%、金は 30%程度がリサイクルされている。レアメタルのうち白金族は 30%、水銀は 30~50%、スズは 1%、タングステンは 10%、コバルトは 0.6%と、リサイクル率は様々である。

非鉄金属(特にレアメタル等)の国内リサイクルを困難にしている主な要因の一つは経済性であり、現状では、リサイクルにかかる人件費等のコストが有利な海外へ、銅、アルミ、鉛などの戦略的鉱物資源に位置づけられるベースメタルの輸出が増加している。

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

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

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

1.2 目的の妥当性

(1) 事業の目的

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

①市場・政策動向

A. 市場

TSC の「環境産業の市場規模・雇用規模等に関する報告書」を基にした、リサイクル素材(非鉄金属・レアメタル)に関する産業の市場規模の推計によると、我が国のリサイクル素材産業の市場規模は 2030 年度時点において、1.43~1.97 兆円に成長する見込み。また、同報告書では、海外市場の推算も行っており、それによるとリサイクル素材に関する市場規模は 2013 年で約 70 兆円、2030 年では約 130 兆円に拡大するとしている。非鉄金属・レアメタルリサイクルの世界市場も、新興国

の経済発展とともに成長していくと見られる。

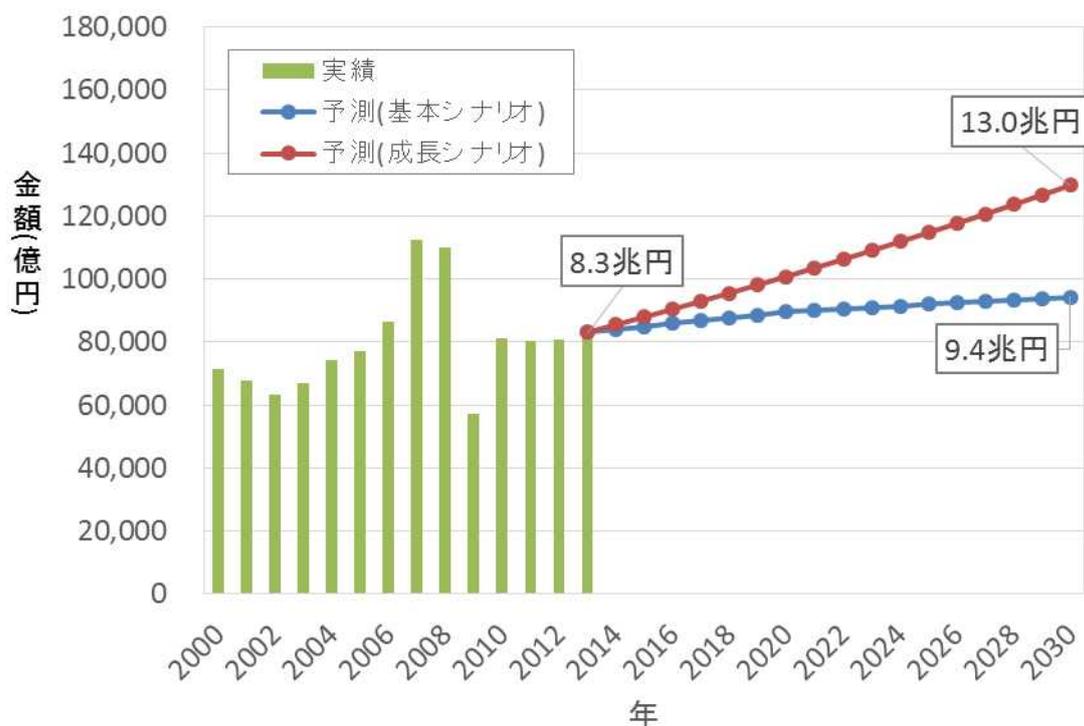


図1. 2. 1 リサイクル素材関連産業の国内市場規模

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

B. 世界的政策

・国連

国連環境計画（UNEP）の国際資源パネル（IRP：International Resource Panel）がまとめた世界の元素に関する使用済製品由来のリサイクル率の現状は図1. 2. 2のようになっている。

・G7の資源効率性に関するフレームワーク

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

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

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

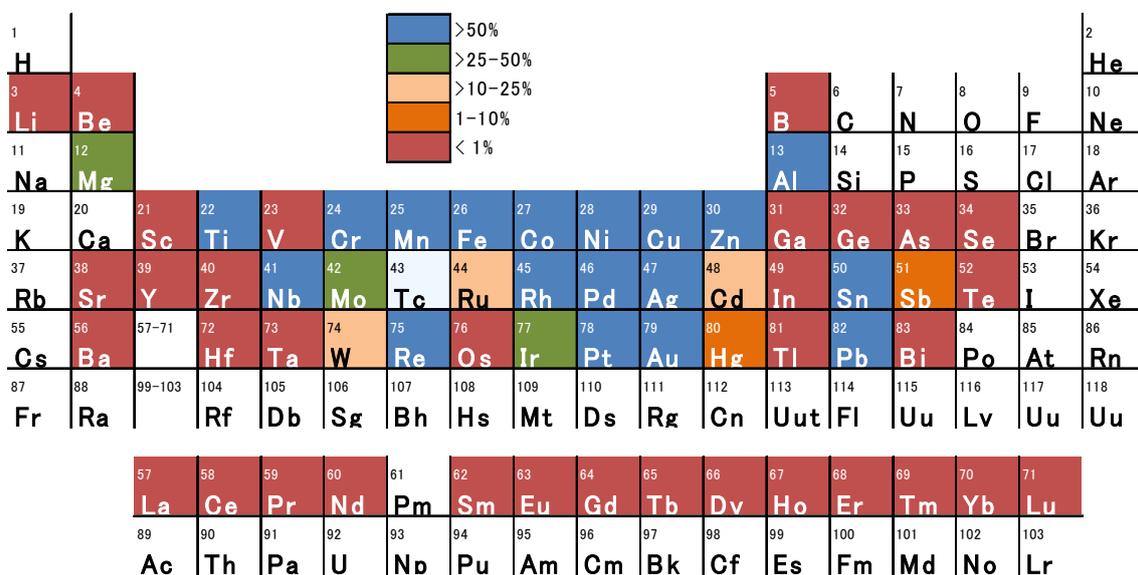


図 1. 2. 1 元素別使用済製品由来リサイクル率(世界規模)

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

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

C. 各国の政策動向

a. 欧州の動向

リサイクルに関して廃棄物、容器包装、e-waste、ELV(使用済み自動車)等の、使用済み製品品目ごとに個別の廃棄物リサイクル政策を実施してきたが、「持続可能な資源管理に関する非公式環境閣僚理事会の議長サマリー」(2010)によって、

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

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

欧州のRE（資源効率）/CE（循環経済）政策について

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



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



図：CEN and CENELEC作成

【ビジョンの狙い】

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

【ビジョンの内容】

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

図 1. 2. 3 欧州における資源循環に関する政策

b. 米国の動向

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

は広大な土地が余っており埋設処理費用が格安なため特段の規制は設けていない。

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

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

c. 中国の動向

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

その後、国務院により2013年に「循環型経済発展戦略及び透明の活動計画」が公布され、2015年末までに資源リサイクル産業の生産額の目標を1兆8000億元とし、鉄鋼、非鉄金属業等で金属スクラップ再利用などの取組による産業のモデル転換を進めている。近年では、中国製造2025の中でグリーン発展を掲げ、循環経済に向けて取り組んでいる。

e. 日本

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

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

表1. 2. 1 リサイクルに関わる法制度と主な課題の変遷

法律の制定	主な課題	フェーズ
・清掃法 (1954)	・環境衛生対策	公衆衛生の向上
・廃棄物の処理及び清掃に関する法律(1970)	・公害の顕在化 ・埋め立て地対策の拡大	公害問題と生活環境の保全 埋め立て地対策
・広域臨海環境整備センター法 (1981) ・ごみ処理施設構造指針の改正 (1986)	・廃棄物処理施設整備の推進 ・廃棄物処理に伴う環境保全	埋め立て地対策
・再生資源有効利用促進法 (1991) ・容器包装リサイクル法(1995) ・家電リサイクル法 (1998) ・ダイオキシン類対策特別措置法 (1999) ・建設リサイクル法 (2000) ・食品リサイクル法 (2000)	・廃棄物の排出抑制、リサイクル推進 ・各種リサイクル制度の構築 ・有害物質(ダイオキシン等)対策	リサイクル推進
・循環型社会形成推進基本法 (2000) ・自動車リサイクル法 (2002) ・循環型社会形成推進基本計画 (2003)	・循環型社会の構築	3Rの推進
・レアメタル確保戦略の策定 (2009) ・エネルギー基本計画 (2010) ・小型家電リサイクル法 (2013) ・資源確保戦略 (2012)	・資源供給対策 ・使用済製品の資源化	都市鉱山資源化の推進
・循環型社会形成推進基本法 改正(2013) ・日本再興戦略 (2016)	・資源効率の向上 ・情報活用	動静脈連携の推進

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

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

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

②内外の技術動向及び国際競争力の状況

D. 諸外国の研究開発政策の状況

a. 欧州の研究開発政策の状況

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

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

EU の金属リサイクル技術開発の傾向として、対象は e-waste に関するものが多い。また、回収対象金属としては CRM (Critical Raw Materials) に指定されているレアメタル、レアアースが中心だが、銅やアルミ、チタン、プラスチックやガラスなど、対象に応じた金属やそれ以外の構成材を含め、経済的に回収するための技術開発が多くなってきている。また、最近では ProSUM や SMART GROUND のような情報利用に関するプロジェクトが増えており、廃棄物の流れをデータ化し可視化することで、処理の最適化や、より多くの事業者の参加、政策立案への活用などを狙っている。

表 1. 2. 2 HORIZON2020 等 EU における金属資源リサイクル関連プロジェクト

プログラム名	期間	物理選別 関連技術	化学分離 関連技術	情報連携 関連	プロジェクト概要
Eco-innovation initiative	2007-2017	4.8M€	1.3M€	1.2M€	WEEE から Nd 磁石を回収するプラントや、エコデザイン技術の開発、PGM 等の湿式製錬技術開発
FP7	2012-2016	19.4M€	3.8M€		WEEE や廃ディスプレイからレアメタル・レアアースを回収する破碎技術や湿式製錬技術の開発
LIFE-13	2014-2018	1.4M€	1.8M€		HDD から磁石を回収するプラントの開発、Al や Ti の切削チップをリサイクルするための技術開発
WASTE-3-2014	2014-2018	5.9M€			WEEE からレアメタルや高品質プラスチックを回収するための前処理技術開発
LIFE-14	2015-2019	0.9M€	11.7M€	2.1M€	廃ディスプレイから In や Y を回収するための分解技術の開発、焼却灰からの Cu の溶液抽出技術、情報利用によるリサイクルフローの検証・最適化
SPIRE-7-2015	2015-2019	6.6M€	12.8M€		レアアース回収のための省エネ低コスト製錬技術(イオン液体、高温電解)技術開発、WEEE の自動解体・選別技術の開発
WASTE-1-2014	2015-2019	9.3M€	9.7M€		鉄鋼スラグや PV パネルからのレアメタル、貴金属回収技術の開発
WASTE-4a-2014/ WASTE-4b-2014/ WASTE-4c-2014/ WASTE-4d-2015	2015-2018			10.8M€	WEEE のリサイクルに関するデータベース構築、システム導入支援ツール開発、ステークホルダーのネットワーキング、リサイクル資源に関する情報統合プラットフォームの構築
SPIRE-4-2014	2015-2016			0.5M€	製品のライフサイクルに関する持続性を計算するツールの開発
小計		48.3M€	41.1M€	14.6M€	
合計		104.0M€ (124.8 億円)			

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

b. 米国の研究開発政策の状況

米国ではエネルギー省（DOE）が重要原料研究所（CMI）を設立し、2013年より5年間、年30億円の予算で磁石や蛍光体等からのレアアース類の回収に関する技術開発プロジェクトを行っている。

一方、エネルギー高等研究計画局（ARPA-E：Advanced Research. Projects Agency-Energy）ではエネルギー消費低減を目的に、次世代の自動車や構造材として需要が高まるであろう軽金属（Al、Mg、Ti）をターゲットにした廃製品からのソーティング技術を開発している。

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

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

c. 中国の研究開発政策の状況

中国では国家発展改革委員会が2011年に第十二次国民経済・社会発展五カ年計画を策定し、その中で循環型経済発展強化が取り上げられ、工業固体廃棄物の総合利用率を72%まで引き上げることや、産業の循環連携により資源生産率を15%向上させることなどの目標が設定されている。

その中で、有色金属・レアメタル資源の循環利用に対する対策として、レアメタル製錬業の技術向上や「城市鉱産」プロジェクトによるリサイクルの推進などが挙げられている。「城市鉱産」プロジェクトは循環利用、再製造、ゼロ排出、産業リンク技術などの開発や、管理システムの改善などを進めるため、モデル拠点を認定するものであり、2011年までに22拠点が認定されている。

中国では資源循環産業の構築を重点課題としてとらえている。李克強副総理は2011年の「循環経済専門家視察」シンポジウムにおいて「重点課題では先端技術の開発と利用について、地方政府による政策の制定、投資、管理などの支援を行う」と述べており、資源循環産業の構築を重視している姿勢が窺える。現在、経済的にリサイクルが行われている金属種は鉄、アルミ、銅などの主要な元素群もしくは、金、銀、白金などの高価な元素群である。一時期価格が高騰し、リサイクル促進のための様々なプロジェクトが行われたレアメタル、特に希土類元素については、価格が下落した現在、国内で経済

的なリサイクルビジネスを成立させることは困難な状況。そのため、リサイクルコストの安い中国などのアジアへ流出したり、選別コストが合わず、必要な選別がなされないまま既存の製錬工程へ投入され、スラグに酸化物として分配され、路盤材等に利用されている状況である。将来的に、国内金属リサイクルシステムの構築のためのキーとなるのは、金属リサイクルシステム全体のコスト低減化である。

(2) 世界全体・日本の上位の施策・制度への寄与に向けた本事業の目的

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

日本再興戦略2016 第二部 具体的施策(2016.6.2閣議決定)

I 新たな有望成長市場の創出、ローカルアベノミクスの深化等

10. 環境・エネルギー制約の克服と投資の拡大

(2) 新たに講ずべき具体的施策

v) 資源価格の低迷下での資源安全保障の強化等

①国内外での資源開発・確保の推進（一部抜粋）

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

新しい経済政策パッケージ（2017.12.8閣議決定）

第3章 生産性革命

3. Society5.0の社会実装と破壊的イノベーションによる生産性革命

(4) Society 5.0のインフラ整備

⑤大胆な省エネ・再エネ投資の促進等（一部抜粋）

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

第五次環境基本計画（2018.4.17閣議決定）

第2章 重点戦略ごとの環境政策の展開

1. 持続可能な生産と消費を実現するグリーンな経済システムの構築

(循環資源の利活用、都市鉱山)

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

第四次循環型社会形成推進基本計画(2018.6.19閣議決定)

5.3. ライフサイクル全体での徹底的な資源循環

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

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

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

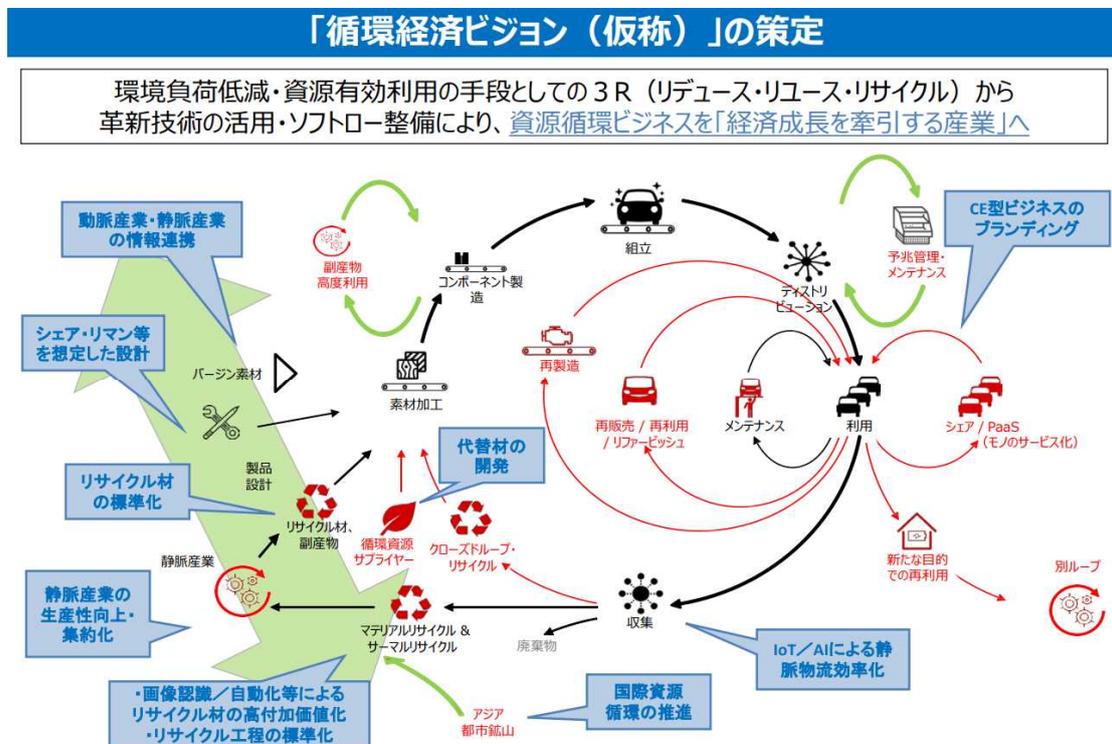


図 1. 2. 4 循環経済ビジョンイメージ

出所：経済産業省 資源循環ビジョン研究会

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

1.3 NEDOの事業としての妥当性

(1) 技術戦略との関係性

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

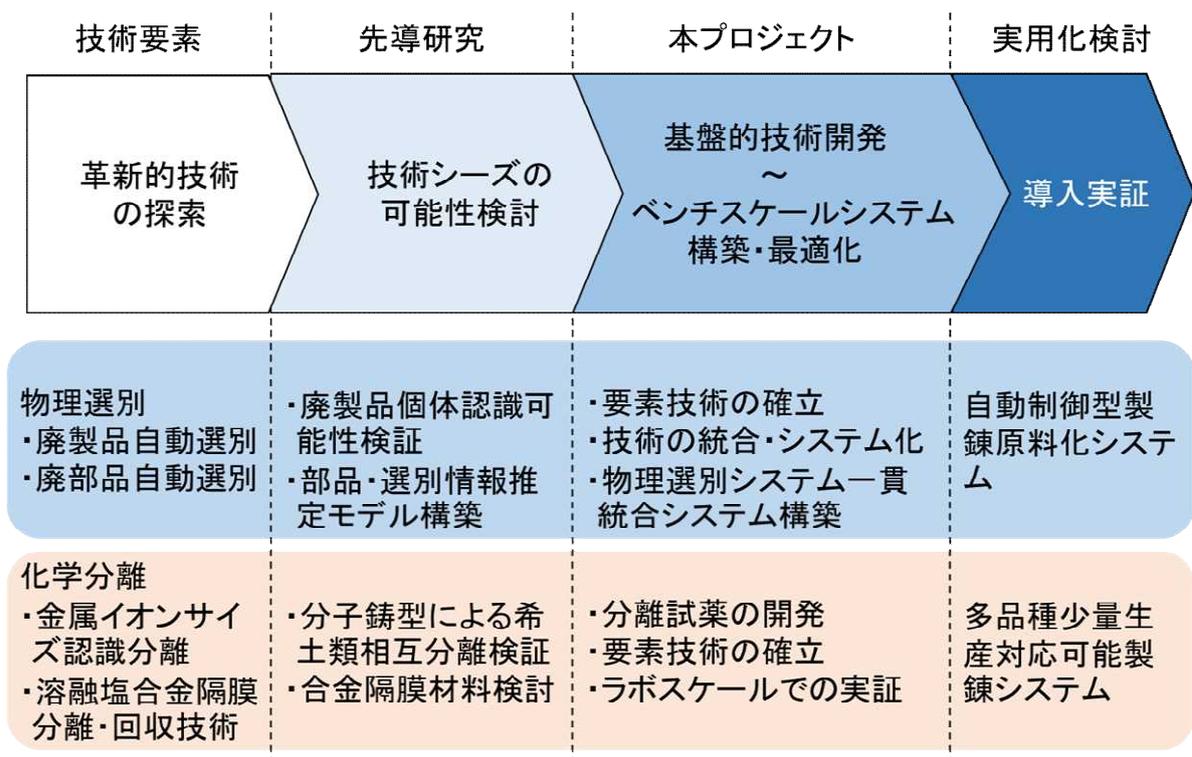


図 1. 2. 5 技術戦略との関係性イメージ

(2) NEDO 関与の必要性

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

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

表 1. 2. 3 資源循環関連事業

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

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

●社会的必要性が大きい

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

●資源循環産業の競争力強化に貢献

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

●異業種間連携が必要不可欠

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

(3) 本事業の概要

使用済み電子機器の個体認識・解体・選別プロセスを無人化する廃製品自動選別システム、廃部品を製錬原料として最適選別する廃部品自動選別システム、従来の金属製錬技術を補完する多品種少量金属種の高効率製錬技術の開発を行う。さらに、情報技術等を有効活用することによって、動静脈産業が一体となった戦略的な資源循環システムを支える技術基盤を構築する。

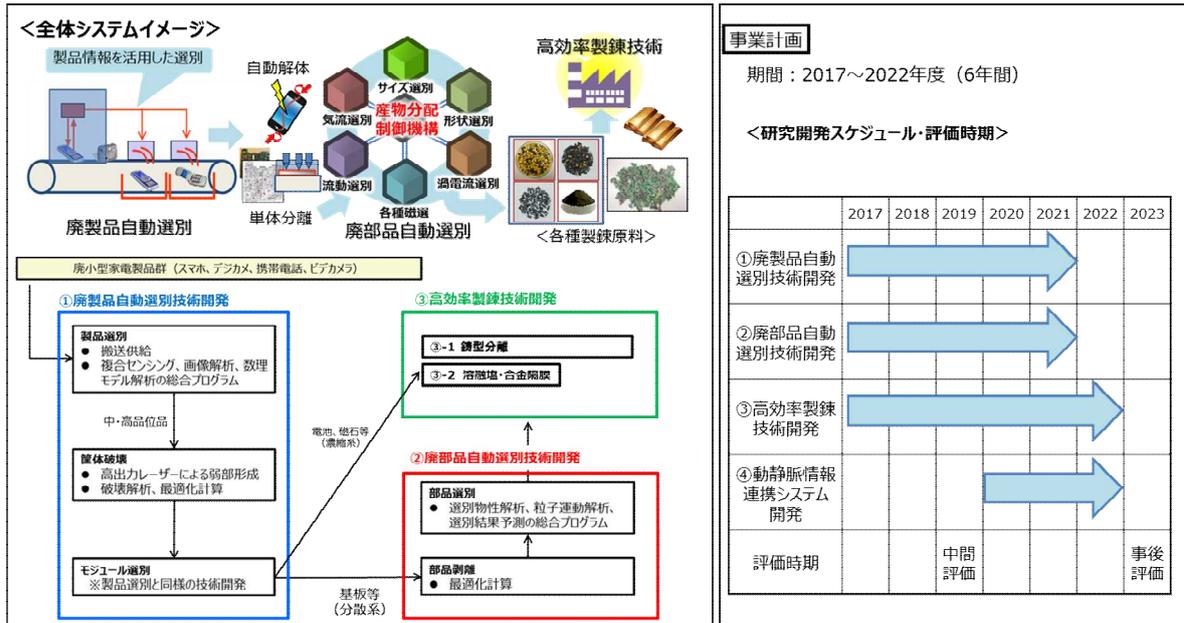


図 1. 2. 6 事業の概要

(4) NEDO の事業の費用対効果

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

表 1. 2. 3 事業の費用対効果一覧

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

2. 研究開発マネジメントについて

2.1 事業の目標

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

(1) アウトプット目標（最終目標、中間目標）

本事業の目標を以下の通り設定する。

中間目標(2019年度)：

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

研究開発項目① 廃製品自動選別技術開発

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

研究開発項目② 廃部品自動選別技術開発

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

研究開発項目③ 高効率製錬技術開発

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

研究開発項目④ 廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発

2021 年からの研究開発開始のため対象外。

最終目標(2022年度)：

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

研究開発項目① 廃製品自動選別技術開発

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

研究開発項目②廃部品自動選別技術開発

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

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

研究開発項目③高効率製錬技術開発

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

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

研究開発項目④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発

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

(2) アウトカム目標

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

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

・ 目標設定の根拠

なお、各研究開発項目に対する目標設定の根拠は以下のとおり。

・ 研究開発項目①

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

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

・ 研究開発項目②

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

・ 研究開発項目③

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

2.2 研究開発計画の妥当性

(1) 研究開発手法の非連続性・効果・効率性

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

研究開発項目①廃製品自動選別技術開発

研究開発項目②廃部品自動選別技術開発

研究開発項目③高効率製錬技術開発

研究開発項目④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発

研究開発項目①廃製品自動選別技術開発

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

研究開発項目②廃部品自動選別技術開発

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

研究開発項目③高効率製錬技術開発

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

研究開発項目④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発

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

(2) 研究開発スケジュール・事業予算規模

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

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

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

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

表 2.1.1.1 研究開発の目標

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

表 2.1.1.2 研究開発予算

(百万円)

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

2018年度は事業原簿作成段階の契約額

2.3 事業の実施体制

(1) 実施体制の決定方法

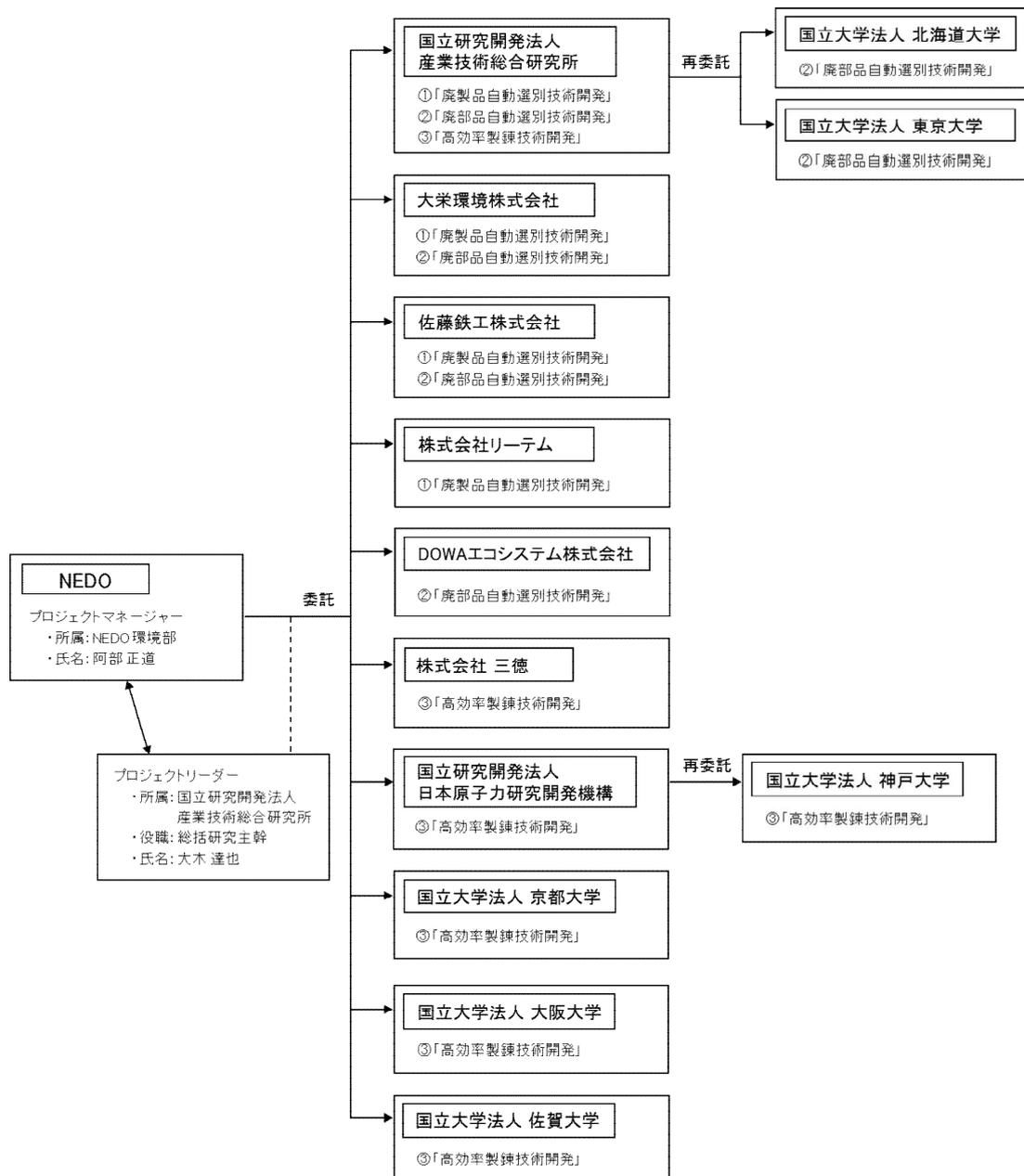
本プロジェクトは産学官の叡智を集結して実施すべく 1 カ所に集中研拠点を形成して実施することを前提に 2017 年度から事業を開始出来るように公募を行った。

(2) 実施体制及び役割分担

① PL、PM について

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

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



②実施体制について

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

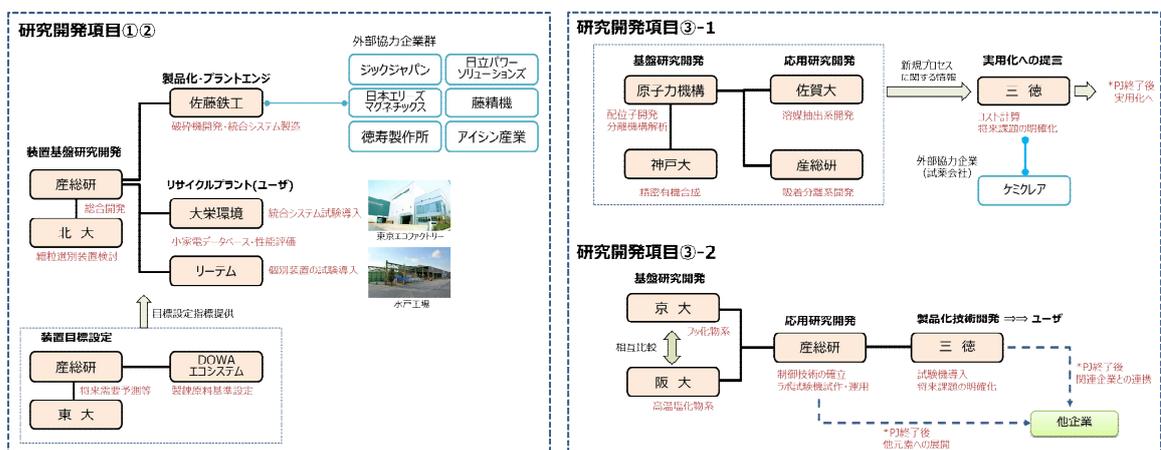


図 2.1.2.1 参画機関の連携体制

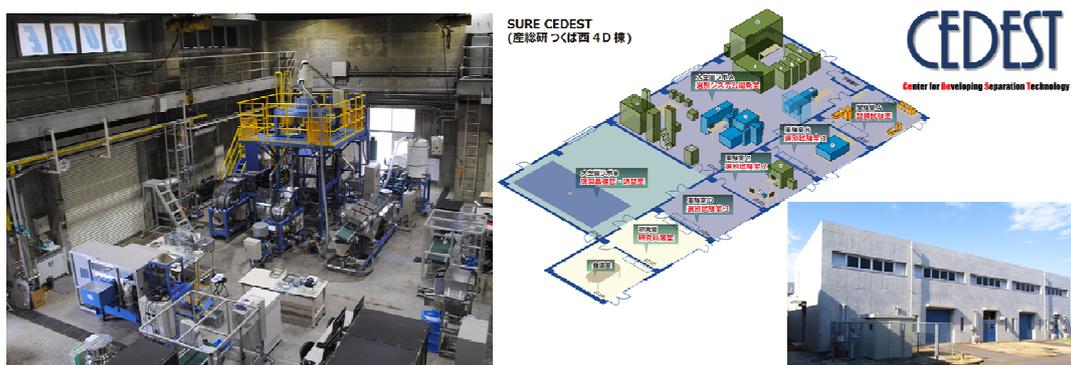


図 2.1.2.2 集中研究施設 CEDEST

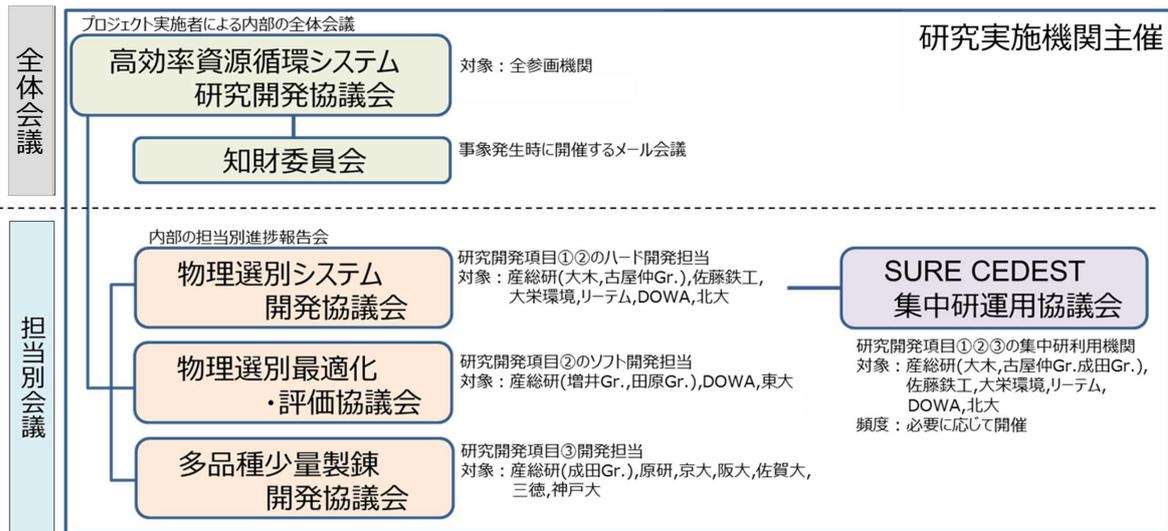


図 2.1.4 連携促進のための各種委員会・協議会

(4) 再委託先間の連携

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

表 2.1.1.3 研究開発予算

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

2.4 研究開発の進捗管理

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

(1) 事業実施・進捗管理のための委員会

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

表 2.1.1.4 NEDO 開催委員会及び委員リスト

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

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

(2) 研究開発マネジメントの妥当性

①各種検討会の開催

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

表 2.1.1.4 会議リスト

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

③関連製品・技術との優位性の確認

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

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

④ 特許出願動向

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

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

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

⑤事業採算性関連調査事業

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

A. 製品毎の中間処理コスト調査

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

B. リサイクルの採算性向上に向けた今後の中間処理工程等のコスト分析

リサイクルの採算性向上にむけた今後の中間処理工程等のコスト分析として、「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業」で開発中の技術を取りあげ、1.で調査した調査対象品目毎の中間処理プロセスと比較対照しながらコスト分析を行った。また、分析結果に基づく課題整理を行った。

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

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

⑥加速予算

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

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

2.5 知的財産等に関する戦略の妥当性

(1) NEDO の取組

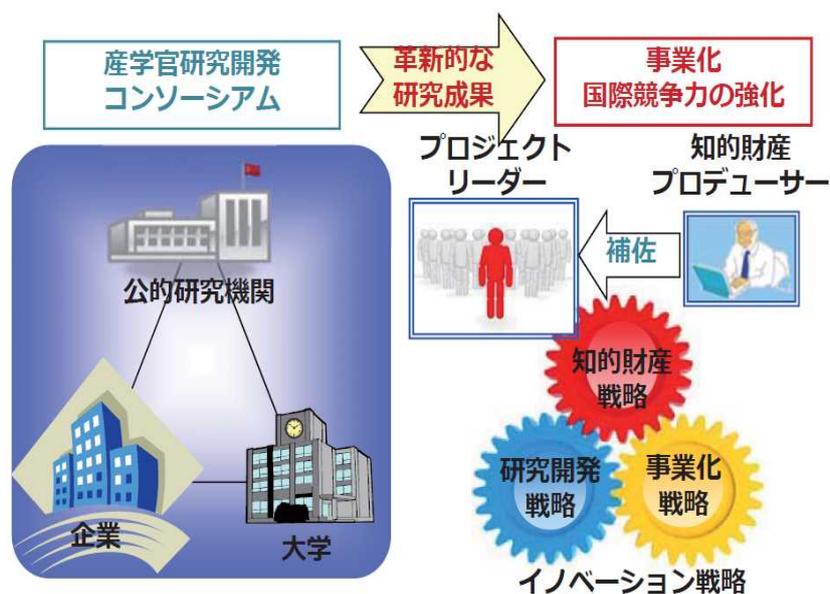
「知財マネジメント基本方針」に準じて、開発拠点への知財集約及びデータ等の取扱いを明記した知財合意書を全参加者で締結し、知財運営委員会の設置による透明性の高い知財管理を図っている。

(2) 実施者の取組

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

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

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



3. 研究開発成果について

3.1 研究開発目標及び研究開発成果と達成度

3.1.1 事業全体の成果

(1) 研究開発目標

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

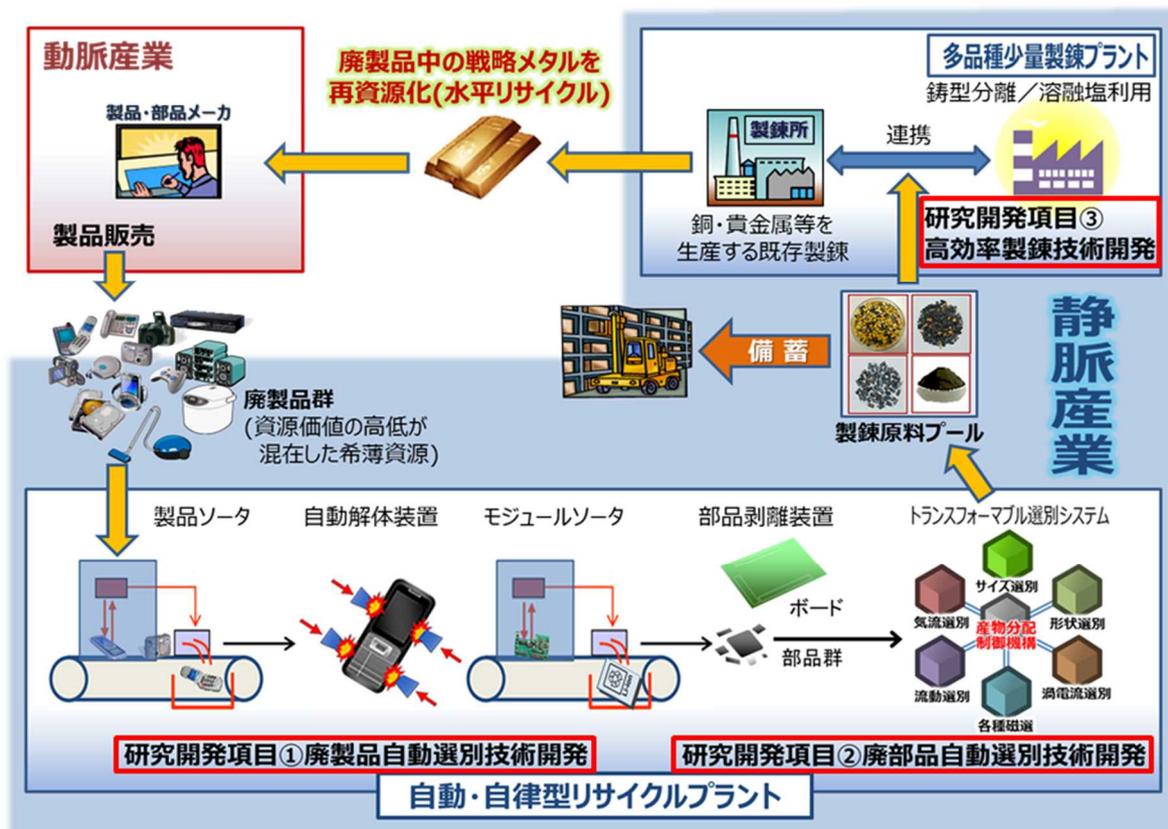


図3.1.1.1 将来における研究開発の実施イメージ

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

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

(2) 研究機開発成果

表3.1.1.1に示すとおり、事業全体として、中間目標は達成する見込み。

表3.1.1.1 研究開発成果の目標達成度

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

※◎ 大きく上回って達成、○達成見込み、△一部未達、×未達

3.1.2 研究開発項目ごとの成果

(1) 研究開発項目①「廃製品自動選別技術開発」

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

基本計画における達成目標は以下の通りである。

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

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

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

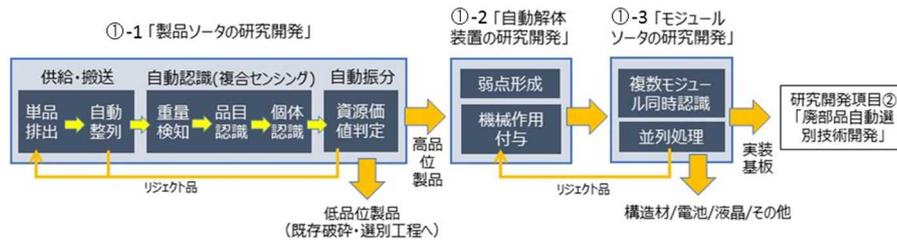


図 3.1.2.1 研究開発項目①における選別フローと研究項目

(1-1) 製品ソータの研究開発

(1-1-A) 複合センシングによる自動認識システム開発

■ 目標

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

■ 研究開発の成果

a. 製品ソータ試験用モジュールの開発

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

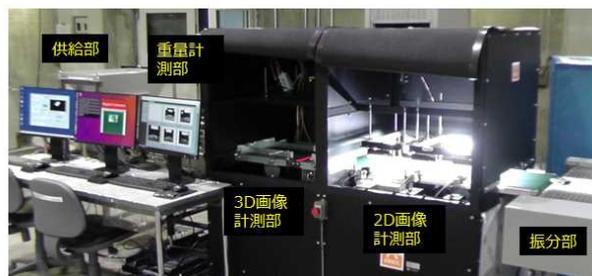


図 3.1.2.2 製品ソータ試験モジュール

b. 深層畳み込みニューラルネットワークによる品目及び個体認識

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

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

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

(1-1-B) 製品データベース管理技術開発

■ 目標

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

■ 研究開発の成果

a. 製品 DB(装置稼働 DB)の構築

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

b. 資源価値評価 DB の構築

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

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

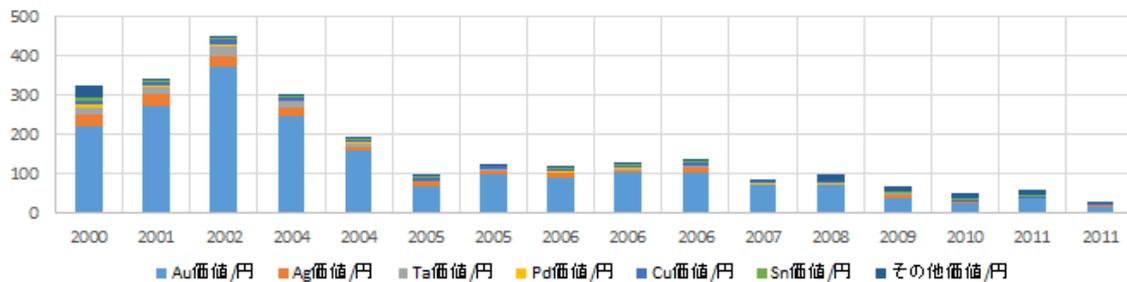


図 3.1.2.3 A 社デジタルカメラ製品の資源価値の変遷

(1-1-C) 供給・搬送システムの開発

■ 目標

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

■ 研究開発の成果

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

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

(1-2) 自動解体装置の研究開発

(1-2-A) 製品構造 DB の構築

■ 目標

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

■ 研究開発の成果

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

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

(1-2-B) 筐体解体技術の開発

■ 目標

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

■ 研究開発の成果

a. 複合的外力付与試験装置

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

b. 筐体破壊試験装置の開発

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

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



図 3.1.2.4 筐体破壊試験結果の例

c. 既存破砕機による筐体破壊試験

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

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

(1-3) モジュールソータの研究開発

■ 目標

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

ロボットアームによるピックアップを併用するシステムを新たに開発する。

■ 研究開発の成果

a. モジュールソータ基本システムの開発

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

b. モジュールDBの構築

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

c. 並列処理システム開発

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

表 3.1.2.2 3D画像認識による携帯電話破碎物の識別結果の例

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

(2) 研究開発項目②「廃部品自動選別技術開発」

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

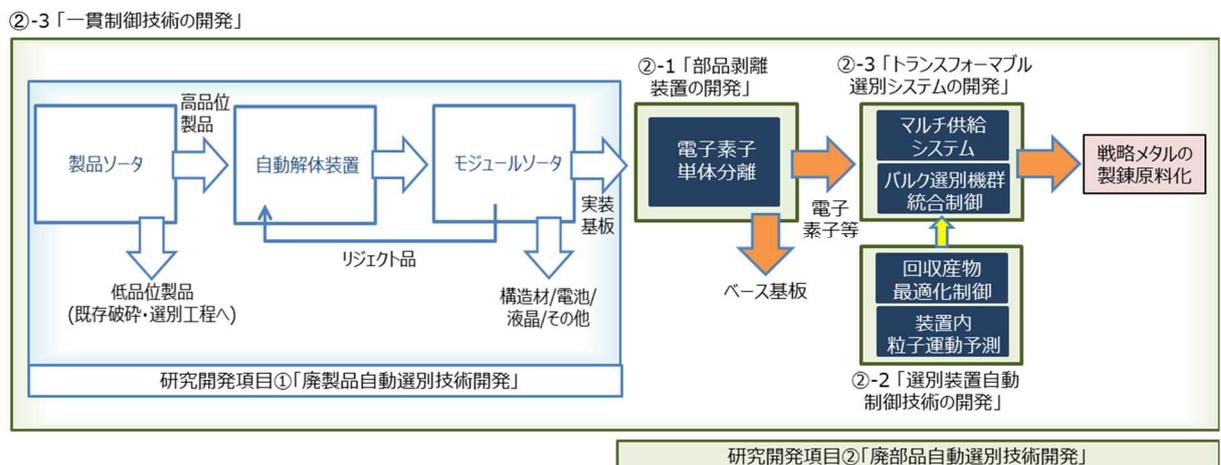


図 3.1.2.5 研究開発項目②における選別フローと研究項目

基本計画における達成目標は以下の通りである。

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

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

(2-1) 部品剥離装置の開発

a. 基板構造 DB の構築

■ 目標

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

■ 研究開発の成果

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

b. 基板剥離技術の構築

■ 目標

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

■ 研究開発の成果

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

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

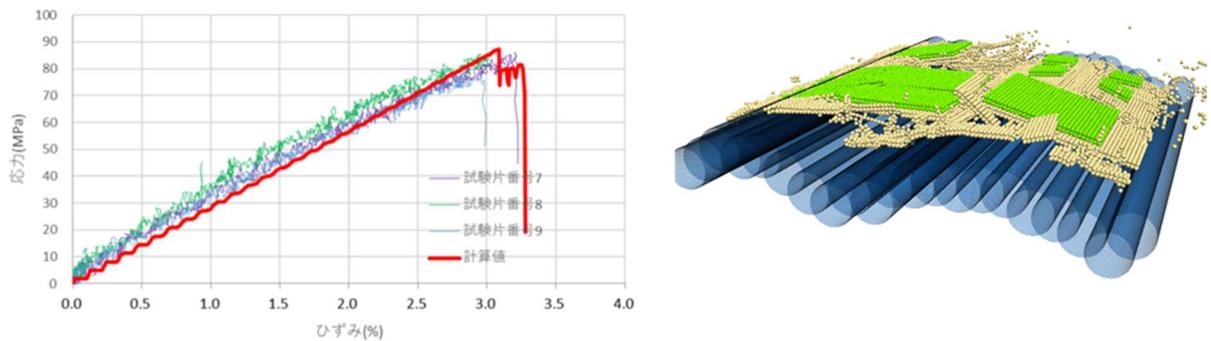


図 3.1.2.6 3DDEM解析(左)及び部品剥離解析(右)の例

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

(2-2) 選別装置自動制御技術の開発

a. 電子素子基礎情報の選別物性への変換

■目標

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

■研究開発の成果

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



図 3.1.2.7 スマートフォンの電子素子調査の例

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

b. 装置内運動予測システムの開発

■ 目標

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

■ 研究開発の成果

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

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

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

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

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

c. 回収産物の最適化条件

■ 目標

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

■ 研究開発の成果

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

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

開発システムの導入最適化では、まず、動静脈情報連携シナリオの検討に向けた情

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

(2-3) トランスフォーマブル選別システムと一貫制御技術の開発

■目標

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

■研究開発の成果

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

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

■研究開発の成果

(3-1-A) 鑄型分離メカニズムの解明

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

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

a. 鑄型錯体形成および鍵分子による相互作用のメカニズム解析

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

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

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

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

b. 鑄型錯体形成の境界制御

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

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

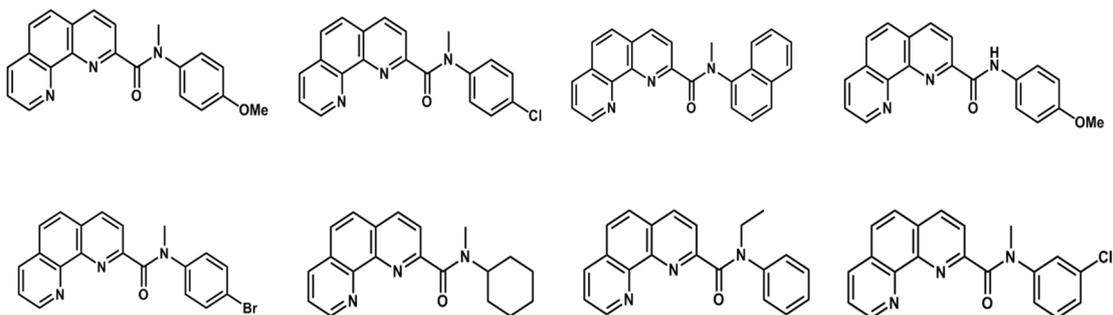


図 3.1.2.10 合成に成功している PTA 誘導体

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

c. 重希土類元素間の相互分離

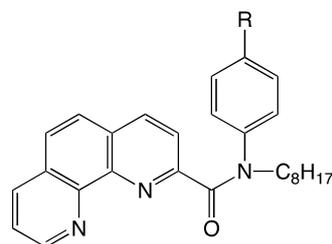
ヘテロドナー配位子を中心にその錯形成特性を調査した結果、(1*H*-benzimidazol-2-yl)pyridine-6-carboxamide (BIZA) が Tb や Dy などの重希土類元素の分離に有望であることが明らかとなった。今後、BIZA の鑄型分離特性を調べる計画である。

(3-1-B) 鑄型分離技術の従来型分離法への展開

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

a. 溶媒抽出法による基本性能評価

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



R : H (OctPhPTA)
CH₃ (OctTolPTA)

図 3.1.2.11 溶媒抽出試験に用いた PTA 化合物の構造

b. 吸着分離法による基本性能評価

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

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

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

■目標

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

もう一点重要なことは、上記の合金隔膜を用いた分離技術の元となる、金属または

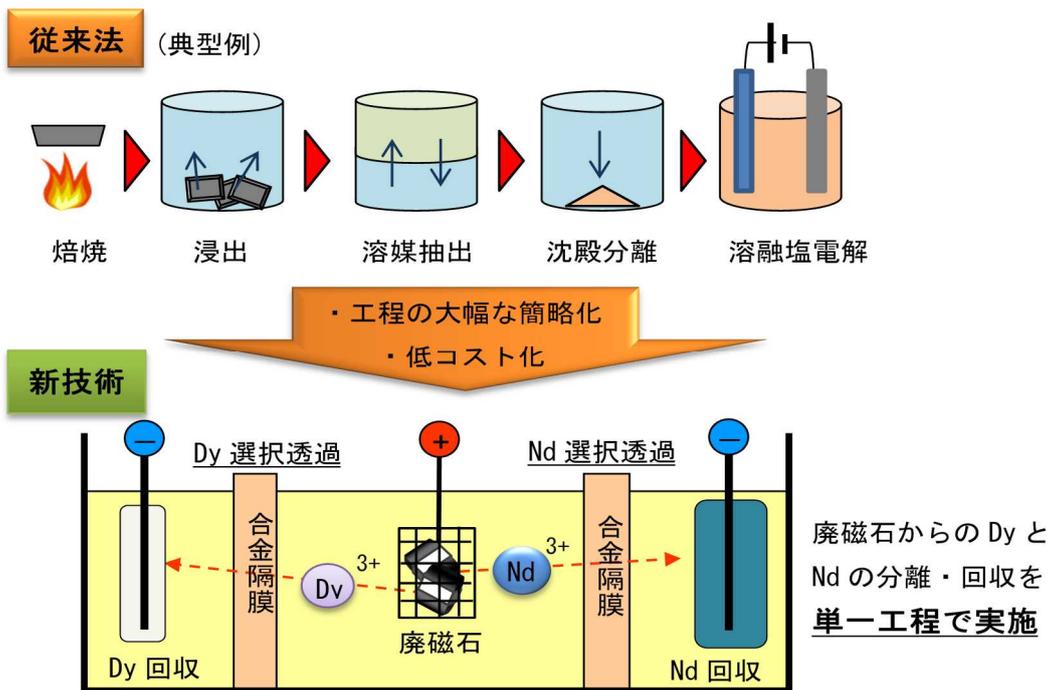


図 3.1.2.12 従来技術と新技術の比較

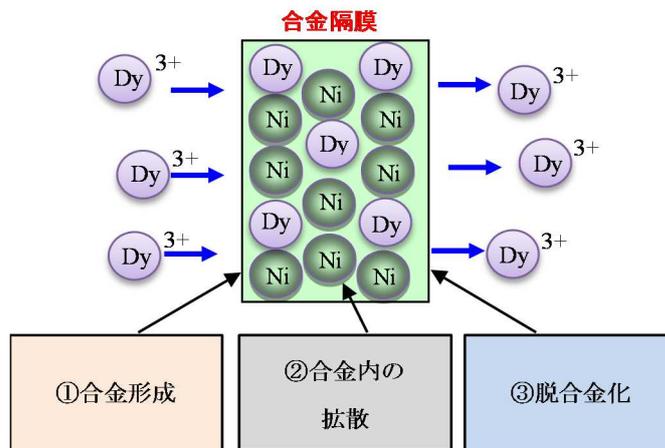


図 3.1.2.13 合金隔膜を用いた希土類イオン選択透過の原理図

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

(中間目標)

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

(最終目標)

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

■研究開発の成果

(3-2-A)合金隔膜の長寿命化

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

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

表 3.1.2.3 各素材の組成 (mass%)

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

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

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

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

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

(3-2-B) 分離性の向上

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

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

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

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

(3-2-C) 複数の合金隔膜制御および連続電解に向けた技術開発

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

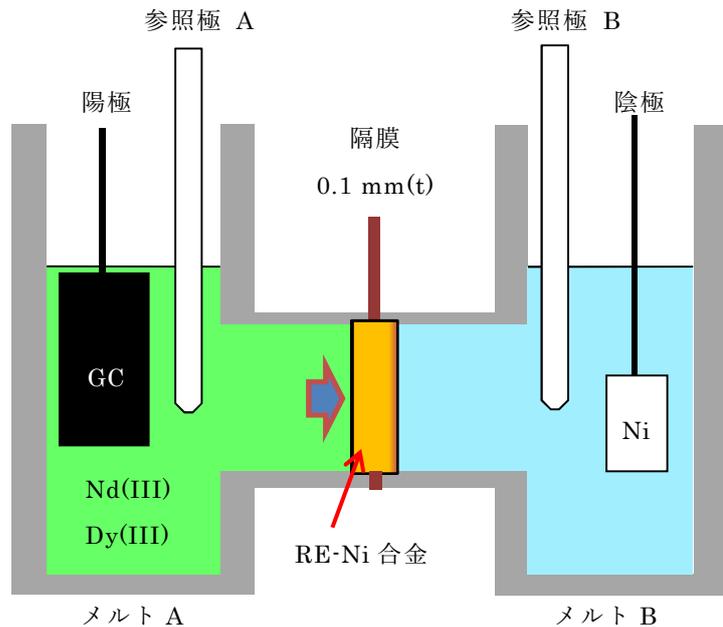


図 3.1.2.14 電解セル模式図

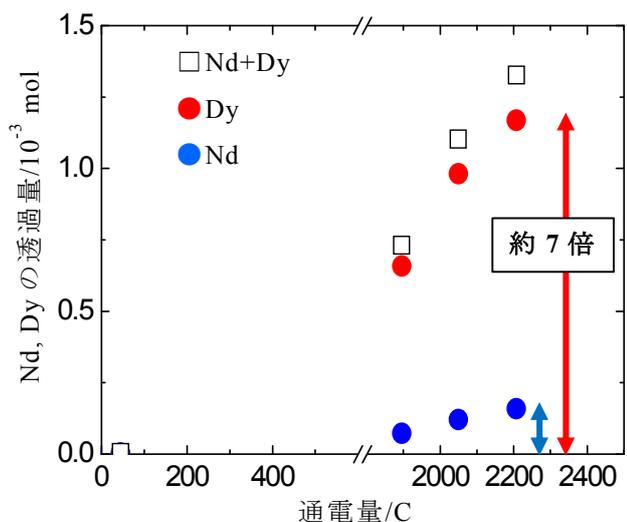


図 3.1.2.15 通電量と透過した Nd, Dy の物質量の関係

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

3.1.3 中間目標達成状況

(1) 目標及び達成度(未達成事項とその対策)

研究項目①②③の中間目標に対する達成見込みを表 3.1.3.1 に示す。

表 3.1.3.1 研究開発項目①②③の目標と達成度

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

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

りなく達成できる見込みである。

3.2 成果の最終目標の達成可能性

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

表 3.2.0.1 研究開発項目①②③研究期間および最終目標

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

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

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

3.3 成果の普及

(1) 論文等研究成果の学術的な对外発表

【論文】

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

【学会発表（国際）】

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

【学会発表（国内）】

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

(2) 実用化の戦略に沿った成果普及の取組

① 専門家、関係企業、成果ユーザー等へ情報発信

【政府間会合】

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

以上、2 件。

【総説・解説】

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

【招待講演等】

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

【セミナー・講座】

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

② 一般向け情報発信

【プレスリリース・記者会見】

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

【報道・テレビ】

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

【機関誌・書籍】

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

3.4 知的財産権等の確保に向けた取組

(1) 知財戦略・特許等の実績

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

【特許】

出願 4 件， 出願準備中 5 件

【プログラム知財登録】

登録 4 件， 登録準備中 3 件

(2) 競合技術と比較した優位性

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

表 3.4.0.1 世界水準の代表的な取り組み及び成果

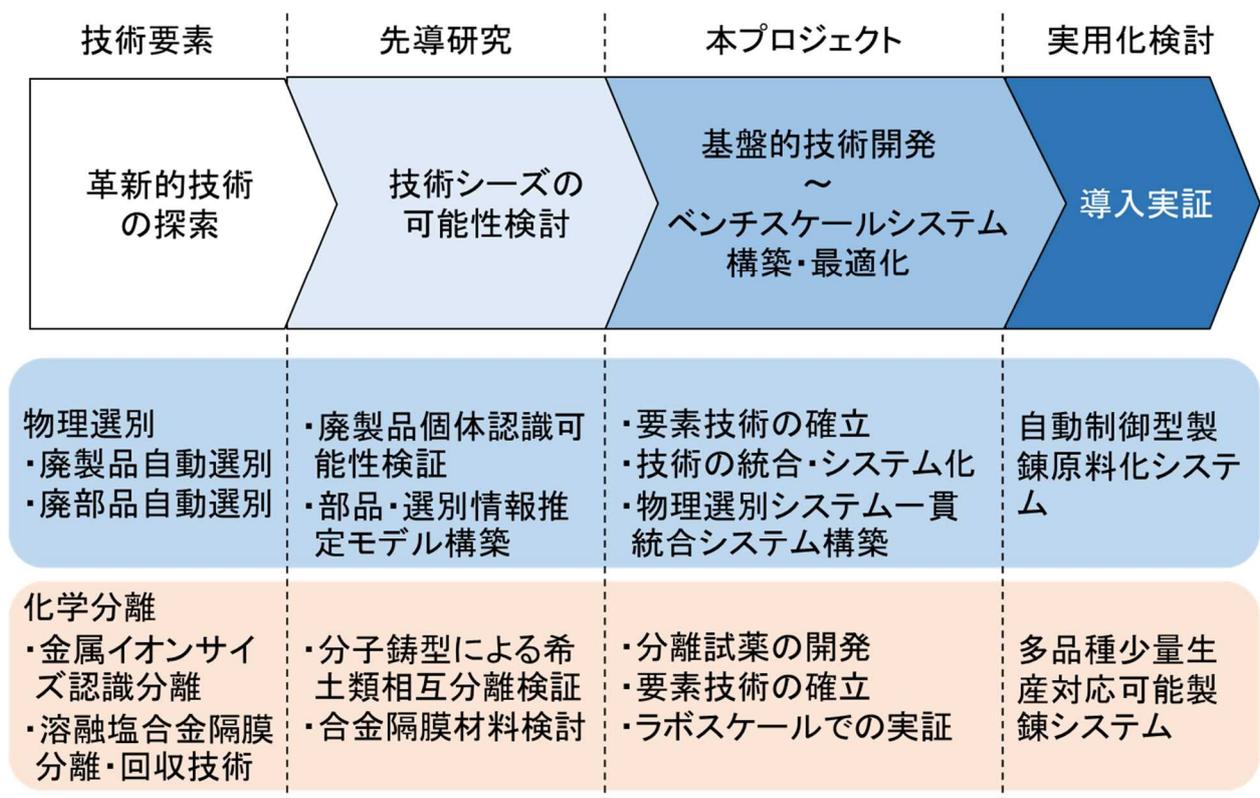
項目①-1 項目①-2	製品選別～筐体解体に至る一連の装置開発	同一メーカー製のスマートフォンなど対象製品を限定した自動選別・解体システムは既に関発されているが、多種多様な廃製品に対して資源価値や構造特性の違いに基づいて最適プロセスを判断する自動選別・解体システムは世界的にも未だ開発されていない。本研究の対象製品は現段階で 4 品目約 1000 機種に達しており、この種のリサイクルシステムの汎用性としては世界最高水準の取り組みと言える。
項目②-3	トランスフォーマブル選別システム	従来、選別システムはコンベアで固定された「選別ライン」であったが、マルチ供給搬送システムの開発により、選別機を円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

4. 成果の実用化に向けた取り組み及び見通し

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

4.1 成果の実用化に向けた戦略

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



4.2 成果の実用化に向けた具体的取組

(1) 研究開発項目①②

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

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

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

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

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

(2) 研究開発項目③

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

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

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

4.3 成果の実用化の見通し

(1) 研究開発項目①②

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

【課題 1】各装置間の産物ハンドリング方法の確立

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

【課題 2】システム統合に向けた制御信号の仕様統一化

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

【課題 3】パイロット機および実機スケール機を想定した安全対策

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

【課題 4】システム技術者の育成

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

【課題 5】処理対象の廃小型家電の物量確保とビジネスモデルの構築

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

(2) 研究開発項目③

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

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

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

「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業」基本計画

環境部

1. 事業の目的・目標・内容

(1) 事業の目的

①政策的な重要性

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

※動脈産業:天然資源を採取・加工して有用な材を生産・流通する諸産業

静脈産業:社会に排出された廃棄物の回収・選別から、素材・製品へのリサイクルを担う諸産業

②我が国の状況

現在、経済的にリサイクルが行われている金属種は鉄、アルミ、銅などの主要な元素群もしくは、金、銀、白金などの高価な元素群である。一時期価格が高騰し、リサイクル促進のための様々なプロジェクトが行われたレアメタル、特に希土類元素については、価格が下落した現在、国内で経済的なリサイクルビジネスを成立させることは困難な状況。そのため、リサイクルコストの安い中国などのアジアへ流出したり、選別コストが合わず、必要な選別がなされないまま既存の製錬工程へ投入され、スラグに酸化物として分配され、路盤材等に利用されている状況である。将来的に、国内金属リサイクルシステムの構築のためのキーとなるのは、金属リサイクルシステム全体のコスト低減化である。

③世界の取組状況

EU は従来の資源消費型の線形経済から、資源生産性効率を最大化する循環経済への転換を図り、循環経済(Circular Economy:CE)パッケージを打ち出している。EU は、EU 域外の資源産出国に供給依存する天然資源に替わり、EU 域内で完結する循環資源利用の社会を目指し、再生品の品質が市場を決定するリサイクル業者のための市場を作りたいと考えている。これはバージン資源使用製品に対して、リサイクル資源使用製品の競争力を強化するということを意味している。EU は 2015 年 12 月、「CE Package」更新版を発表し、5 つの特に注力が必要なマテリアルのひとつとして希少金属を選定した。翌 2016 年には、e-waste や電池など循環資源利用が望まれる製品のリサイクル基準を策定し、2017 年に希少資源に関するレポートや再資源化のベスト・プラクティスの取りまとめを計画するなど、積極的な姿勢を示している。

④本事業のねらい

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

(2) 事業の目標

①アウトプット目標(最終目標、中間目標)

本事業の目標を以下の通り設定する。

中間目標(平成 31 年度):

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

研究開発項目①廃製品自動選別技術開発

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

研究開発項目②廃部品自動選別技術開発

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

研究開発項目③高効率製錬技術開発

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

研究開発項目④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発

平成 32 年からの研究開発開始のため対象外。

最終目標(平成 34 年度):

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

研究開発項目①廃製品自動選別技術開発

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

研究開発項目②廃部品自動選別技術開発

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

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

研究開発項目③高効率製錬技術開発

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

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

研究開発項目④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発

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

②アウトカム目標

平成 37 年度までに、事業により開発された、自動・自律型リサイクルプラント(廃製品・廃部品の自動選別装置)及び少量多品種の金属資源の高効率製錬技術(分離試薬等)の実用化を目指す。これらのリサイクルプラント等の普及により、平成 47 年度までに、これまで国内で再資源化されていなかった年間約 1,000 億円相当の金属資源を新たに資源化し、我が国の資源安全保障に貢献する。

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

③アウトカム目標達成に向けての取組

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

(3) 研究開発の内容

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

2の研究開発スケジュールに基づき研究開発を実施する。

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

研究開発項目①廃製品自動選別技術開発

研究開発項目②廃部品自動選別技術開発

研究開発項目③高効率製錬技術開発

研究開発項目④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発

研究開発項目①廃製品自動選別技術開発

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

研究開発項目②廃部品自動選別技術開発

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

研究開発項目③高効率製錬技術開発

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

研究開発項目④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発

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

2. 研究開発の実施方式

(1) 事業の実施体制

プロジェクトマネージャー(以下「PM」という)にNEDO 環境部 阿部正道を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理や、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。

NEDOは公募により研究開発実施者を選定する。

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

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

(2) 研究開発の運営管理

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

① 研究開発の進捗把握・管理

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

② 技術分野における動向の把握・分析

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

(3) その他

本プロジェクトは非連続ナショナルプロジェクトとして取扱う。

3. 研究開発の実施期間

平成 29 年度から平成 34 年度までの 6 年間とする。

4. 事業の評価に関する事項

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

評価の時期は、中間評価を平成 31 年度、事後評価を平成 35 年度とし、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じて研究開発の加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。

5. その他重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

① 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

研究開発実施者は、研究成果を広範に普及するよう努めるものとする。NEDOは、研究開発実施者による研究成果の広範な普及を促進する。

②標準化施策等との連携

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

③知的財産権の帰属、管理等取扱い

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

④知財マネジメントに係る運用

「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

(2)「プロジェクト基本計画」の見直し

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

(3)根拠法

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

6. 基本計画の改訂履歴

(1)平成 29 年 2 月、制定。

(別紙1) 研究開発計画

研究開発項目①廃製品自動選別技術開発

1.研究開発の必要性

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

2.具体的研究内容

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

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

さらに、廃製品選別技術を、モジュール選別に応用する技術開発を実施する。

3.達成目標

中間目標(平成 31 年度):

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

最終目標(平成 33 年度):

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

研究開発項目②廃部品自動選別技術開発

1.研究開発の必要性

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

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

2. 具体的研究内容

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

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

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

3. 達成目標

中間目標(平成 31 年度):

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

最終目標(平成 33 年度):

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

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

研究開発項目③高効率製錬技術開発

選別された廃部品を原料として、多様な金属の資源化を高効率化するため、基幹製錬技術を補完する希土類元素を対象とした高精度な分離試薬の開発、及び特定の希土類元素が濃縮した部品から目的金属を直接回収する技術を開発する。具体的には、以下の研究開発項目③-1 及び③-2 を実施する。

研究開発項目③-1 高精密金属イオンサイズ認識分離技術

1.研究開発の必要性

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

2.具体的研究内容

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

3.達成目標

中間目標(平成 31 年度):

イオン半径が近接する希土類元素を対象に、相互分離係数 3 を有する分離試薬を開発する。

最終目標(平成 34 年度):

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

研究開発項目③-2 濃縮系少量材料の高効率製錬リサイクル技術

1.研究開発の必要性

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

2.具体的研究内容

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

3.達成目標

中間目標(平成 31 年度):

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

最終目標(平成 34 年度):

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

研究開発項目④廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発

1.研究開発の必要性

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

2.具体的研究内容

本研究開発では、国内マテリアルフロー・製品フロー分析、リサイクルすべき製品・マテリアルの動的な評価を実施し、また製品の含有マテリアル・資源配慮設計情報を管理する情報システムの構築を行う。それにより廃製品リサイクルシステムの社会リスク対応性向上と経済性向上に寄与する。

3.達成目標

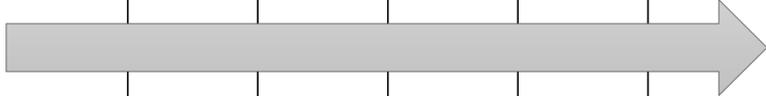
中間目標(平成 31 年度):

平成 32 年からの研究開発開始のため対象外。

最終目標(平成 34 年度):

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

(別紙2) 研究開発スケジュール

	H29 2017	H30 2018	H31 2019	H32 2020	H33 2021	H34 2022	H35 2023
研究開発項目① 廃製品 自動選別 技術開発							
研究開発項目② 廃部品 自動選別 技術開発							
研究開発項目③ 高効率製錬 技術開発							
研究開発項目④ 動静脈情報 連携システム							
評価時期			中間 評価				事後 評価

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

事業所管部局(推進課、主管課)による自己点検・改善状況

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

外部有識者(産業構造審議会評価WG等)の所見【技術評価】

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

外部有識者(産業構造審議会評価WG等)の所見を踏まえた改善点等

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

高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業

平成29年度概算要求額 9.0億円（新規）

産業技術環境局 リサイクル推進課
 製造産業局 金属課
 商務情報政策局 情報通信機器課
 資源エネルギー庁 鉱物資源課
 03-3501-4978、1926、6944、9918

事業の内容

事業目的・概要

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

成果目標

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

条件（対象者、対象行為、補助率等）



事業イメージ



① 廃製品・廃部品の自動選別技術開発

- 複雑な組成の製品から有用物を取り出すために、最適な解体・選別条件を自動的に選択するための技術開発を行います。
- 現行の人の目・手による選別を陵駕する選別時間・精度による手法を確立し、廃製品の中間処理から手作業を一掃することで、選別コストの大幅削減を実現します。

② 高効率製錬技術開発

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

➡ **更なる省エネ、資源の有効利用の促進につなげる**

「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業」の基本計画（案）に対する
パブリックコメント募集の結果について

平成29年2月16日
NEDO
環境部

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

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

以上



技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

Vol. **13**

メタルリサイクル分野の 技術戦略策定に向けて

2016年12月

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

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

1章 メタルリサイクル技術の概要

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

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

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

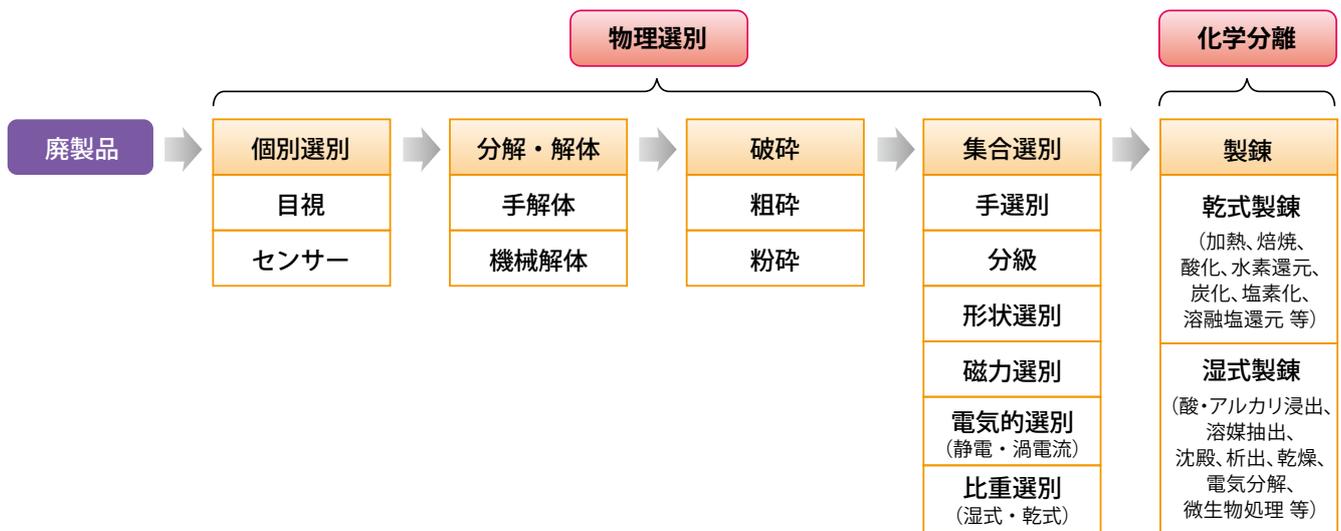


図1 廃製品からのメタルリサイクルプロセスフロー

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

2章 メタルリサイクル技術の置かれた状況

2-1 世界のリサイクルの動向

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

この状況を踏まえて、IRPは、リサイクルインフラ整備の

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

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

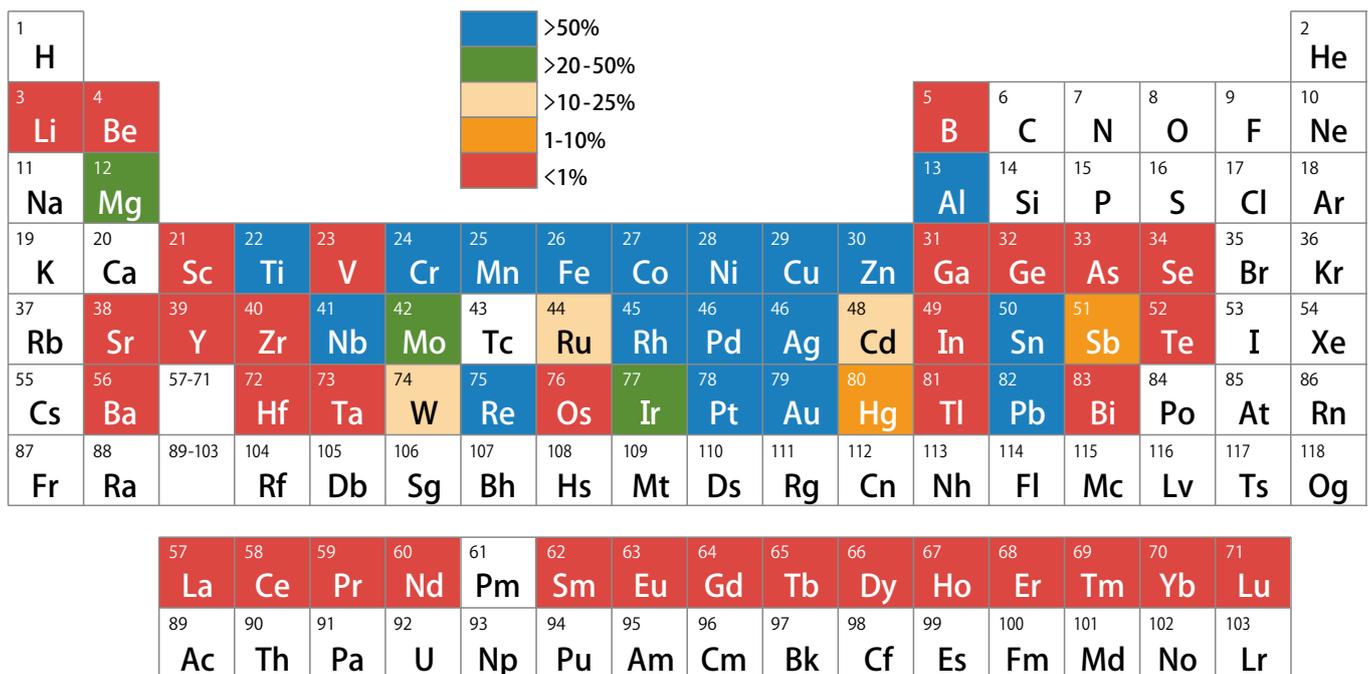


図2 元素別使用済み製品由来リサイクル率 (世界規模)

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

(1) 欧州の動向

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

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

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

(2) 米国の動向

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

(3) 中国の動向

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

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

2 -2 国内におけるリサイクルの状況

(1) 政府方針

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

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

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

表1 リサイクルに関わる主な課題と法制度の変遷

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

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

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

(2) リサイクルビジネスの現状

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

(3) 製品、素材に関するリサイクル状況

① 廃製品中の金属のリサイクル状況

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

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

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

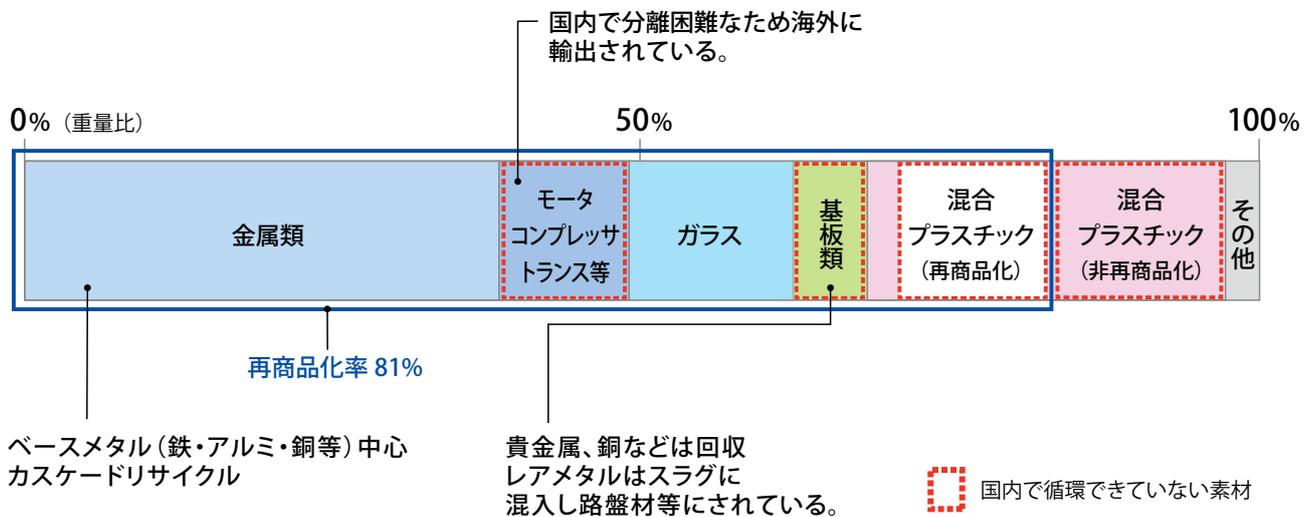


図3 国内での資源循環が不十分な例

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

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

② 金属種別のリサイクル状況

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

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

ルコストが左右され、国内リサイクルの可否が決まる。

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

表2 主なスクラップの資源循環の現状分析

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

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

2-3 市場規模とプレイヤー（国内・海外）

(1) 市場規模

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

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

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

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

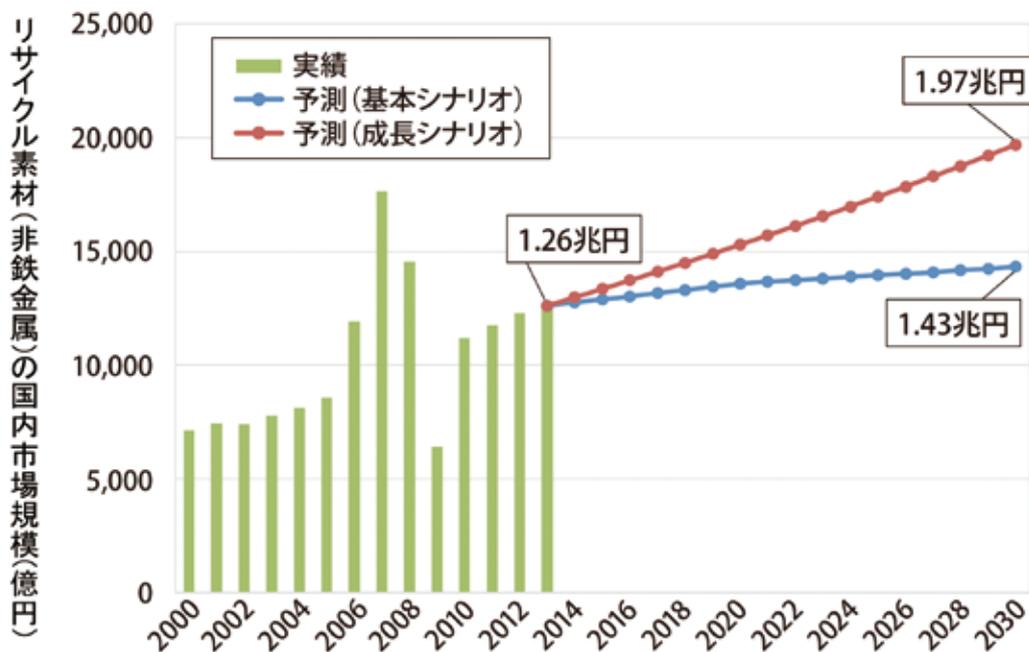


図4 リサイクル素材（非鉄金属・レアメタル）に関する産業の国内市場規模

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

(2) プレーヤー

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

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

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

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

表3 リサイクルビジネスにおける日本企業の国際競争力

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

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

2-4 論文発表・特許出願等の動向

(1) メタルリサイクル関連論文発表の動向

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

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

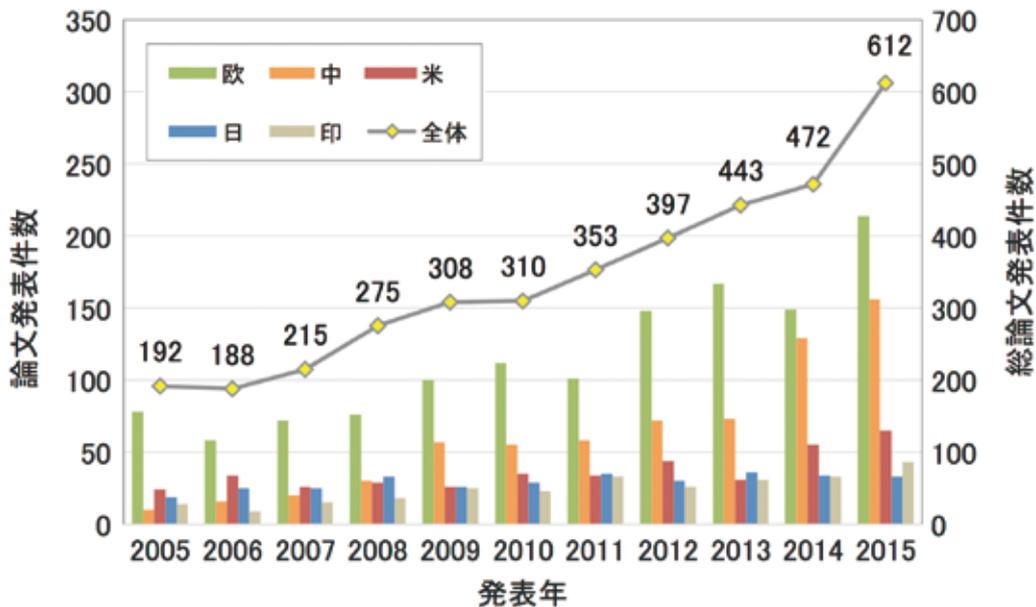


図5 廃棄物からのメタルリサイクル技術に関する国籍別論文発表件数の推移(2005～2015年)
出所: Web of Science™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

表4 発表者所属機関別論文発表件数ランキング(2005～2015年)

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

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

(2) メタルリサイクル関連特許の出願状況

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

① 物理選別技術に関する特許出願の状況

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

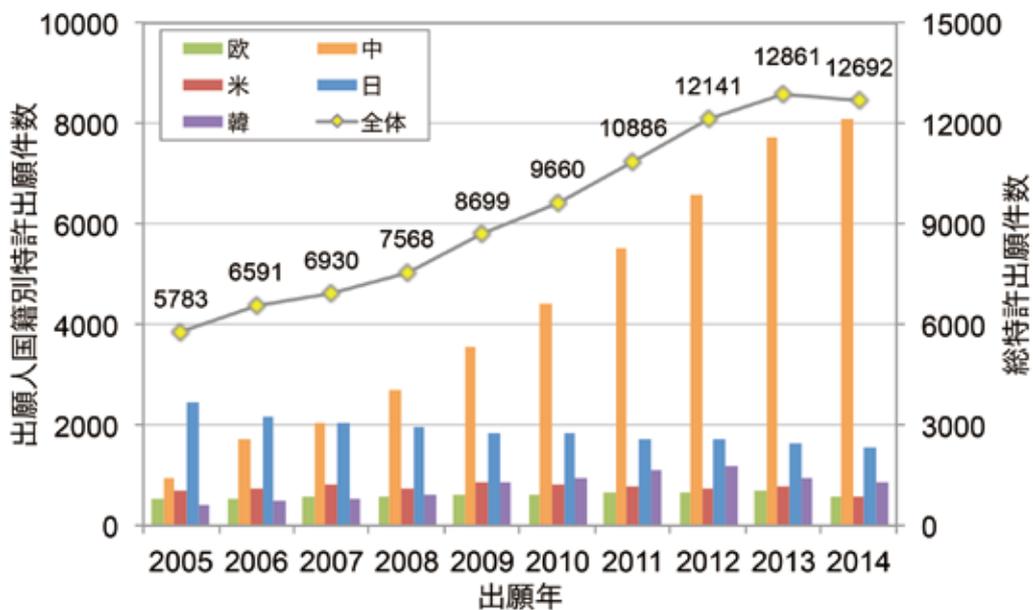


図6 メタルリサイクル技術に関する出願人国籍別特許出願件数の推移 (2005～2014年)
出所: Thomson Innovation™での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2016)

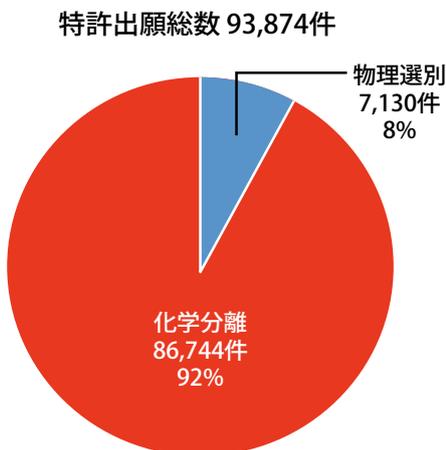


図7 メタルリサイクル技術に関する特許出願件数の内訳 (2005～2014年)
出所: Thomson Innovation™での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2016)

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

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

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

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

② 化学分離技術に関する特許出願の状況

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

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

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

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

2-5 諸外国の研究開発政策の状況

(1) 欧州の研究開発政策の状況

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

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

表7 欧州におけるメタルリサイクル関連技術の開発状況

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

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

(2) 米国の研究開発政策の状況

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

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

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

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

(3) 中国の研究開発政策の状況

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

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

3章 メタルリサイクル分野の 技術課題

3-1 メタルリサイクルに関する技術体系

(1) 物理選別技術

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

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

① 個別選別

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

② 分解・解体

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

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

③ 破碎

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

ている。

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

④ 集合選別

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

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

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

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

(2) 化学分離技術

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

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

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

① 乾式製錬

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

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

② 湿式製錬

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

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

3 -2 メタルリサイクルに関する技術課題

(1) 物理選別技術

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

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

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

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

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

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

(2) 化学分離技術

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

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

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

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

(3) 情報技術の活用

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

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

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

もに廃棄物からの回収ポテンシャルの把握が必要である。

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

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

表8 情報技術適用によるメタルリサイクル処理高度化の可能性

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

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

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

4章 おわりに

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

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

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

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

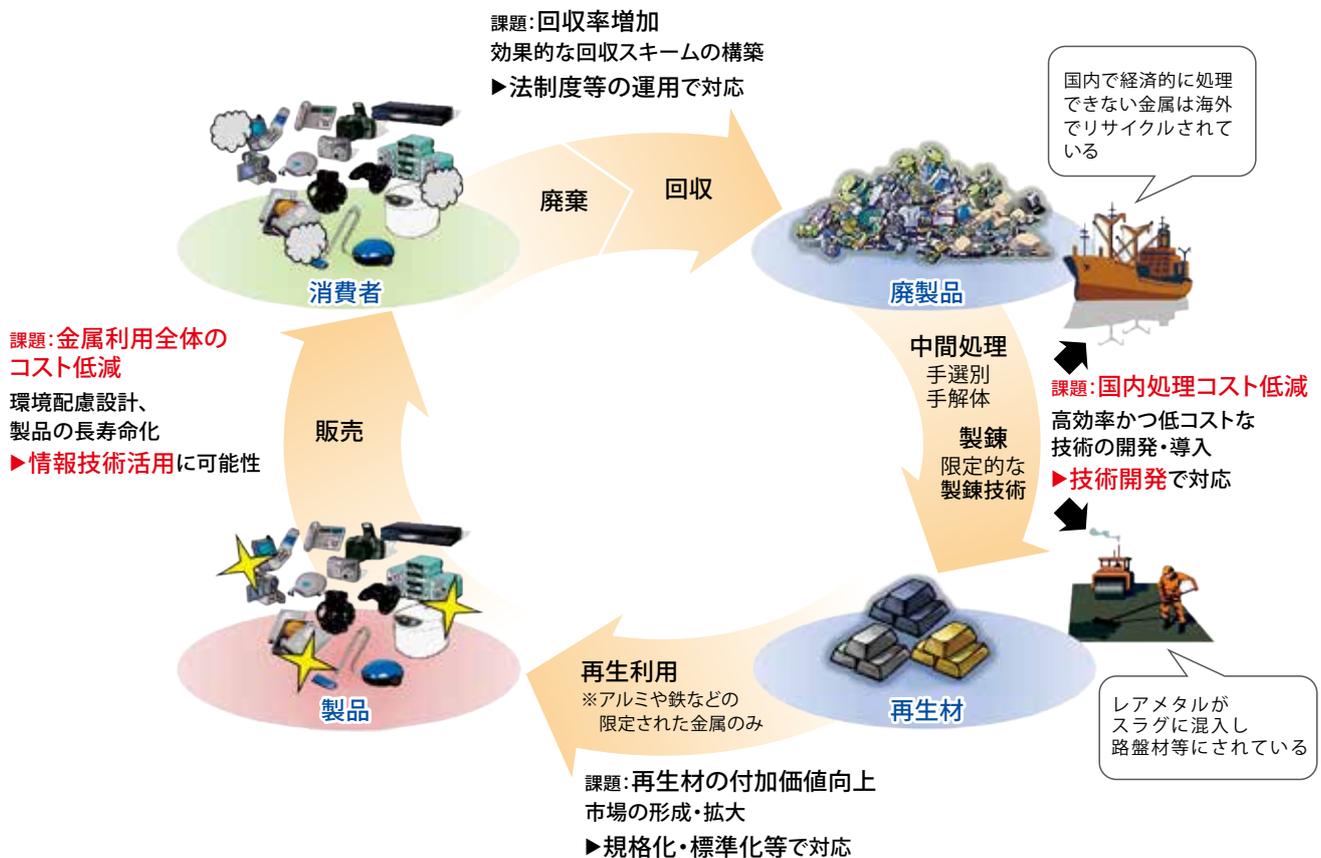


図8 金属資源のバリューチェーンにおける課題と対応策

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

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight Vol.13

メタルリサイクル分野の技術戦略策定に向けて

2016年12月5日発行

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

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

■センター長 川合 知二

■ 環境・化学ユニット

・ユニット長 石田 勝昭

・研究員 山下 勝

高島 正

定兼 修

森 智和

加藤 知彦

・フェロー 指宿 堯嗣 産業環境管理協会 技術顧問

島田 広道 産業技術総合研究所 理事

室井 高城 アイシーラボ 代表

安井 至 製品評価技術基盤機構 名誉顧問

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

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

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

2. 分科会公開資料

次ページより、プロジェクト推進部署・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

「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」(中間評価) (2017年度～2022年度 6年間)

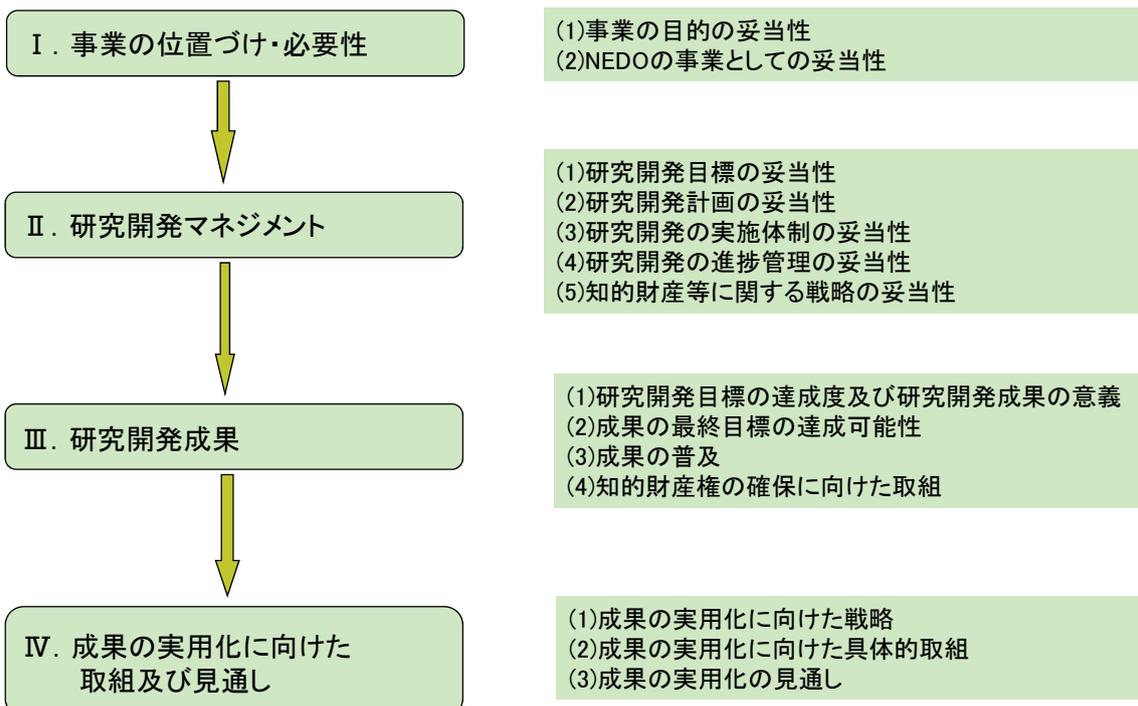
プロジェクトの概要 (公開)

NEDO
環境部

2019年7月3日

0

発表内容



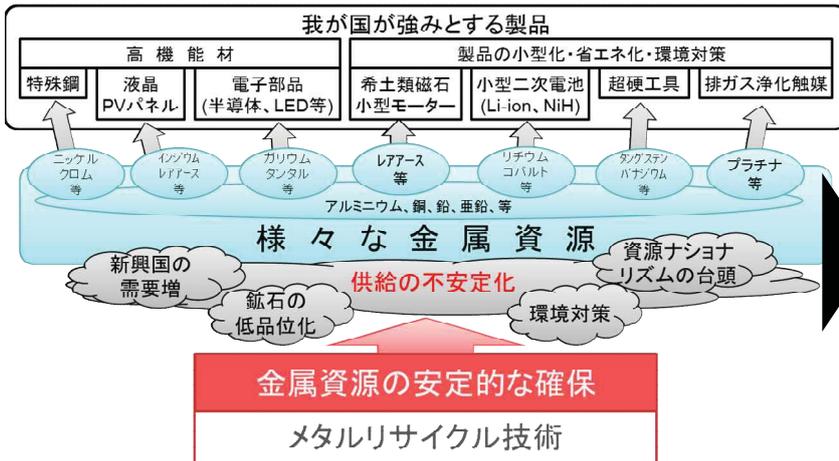
1

●社会的背景

世界規模で資源制約が強まる中で、日本国内においても経済成長と環境が調和した適切な社会基盤の整備が待ち望まれている。

●経済的背景

金属資源は自動車やIT製品といった我が国の主要製造業において、その高性能化に必須の素材であり、これらは我が国の産業競争力の要であるが、非鉄金属資源の大半を輸入に依存しており、その安定的な確保が重要な課題となっている。

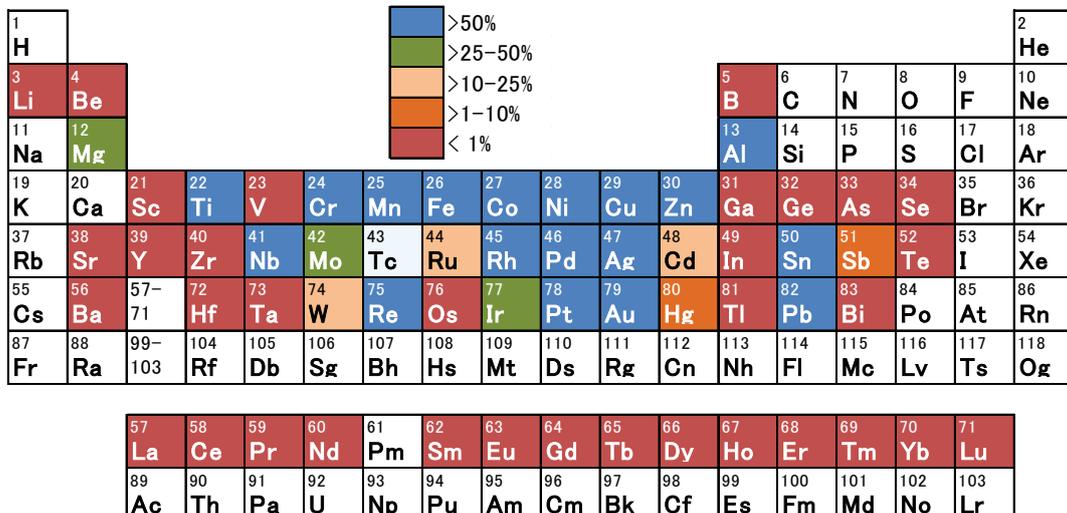


事業の目的・意義

資源・エネルギーの安定供給及び省資源・エネルギー化を実現するため、我が国の都市鉱山の有効利用を促進し、金属資源を効率的にリサイクルする革新技術・システムを開発する。

出所：NEDO技術戦略研究センター作成(2016)

- 国際的にも金属資源の安定供給・持続的な利用が課題となっており、リサイクルがその解決の重要な手段と位置づけられている。
- IRP(国際資源パネル)は2011年に世界のリサイクル率調査を行い、現状のリサイクル率は決して満足できるものではなく、研究開発・法体系の改善等の取組が必要と主張している。



元素別使用済製品由来リサイクル率(世界規模)

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

1. 事業の位置付け・必要性 (1)事業の目的の妥当性

- 欧州は資源効率を最大化することが、持続可能な成長に資すると位置づけ、「**循環経済**」への転換を目指している。近年ではエコデザイン指令等が検討されている。
- 米国は安全保障の観点から金属資源の確保を重視しており、リサイクルについてはビジョンを示すのみに留まっている。
- 中国は経済発展に伴い急増する廃棄物への対応として、**中国製造2025**の中で**グリーン発展**を掲げ、循環経済に向けて取り組んでいる。

欧州CEの概要
出所: EU公開資料を基にNEDO 技術戦略研究センター作成(2015)

米国の重要金属評価
出所: Critical Materials: Technology Assessment (DoE, 2015)

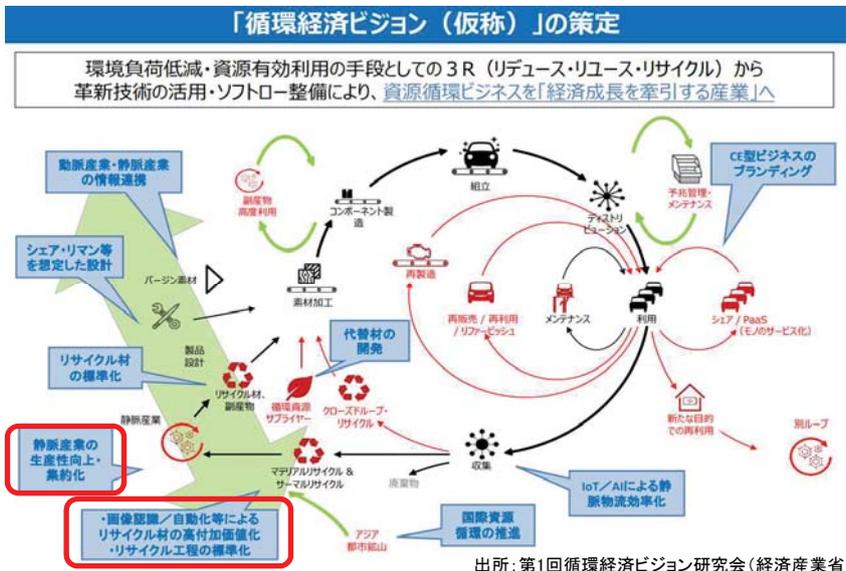
中国廃棄物量の予測(上:自動車、下:家電製品)
出所: 3R分野の技術戦略に関する検討(NEDO, 2014)

1. 事業の位置付け・必要性 (1)事業の目的の妥当性

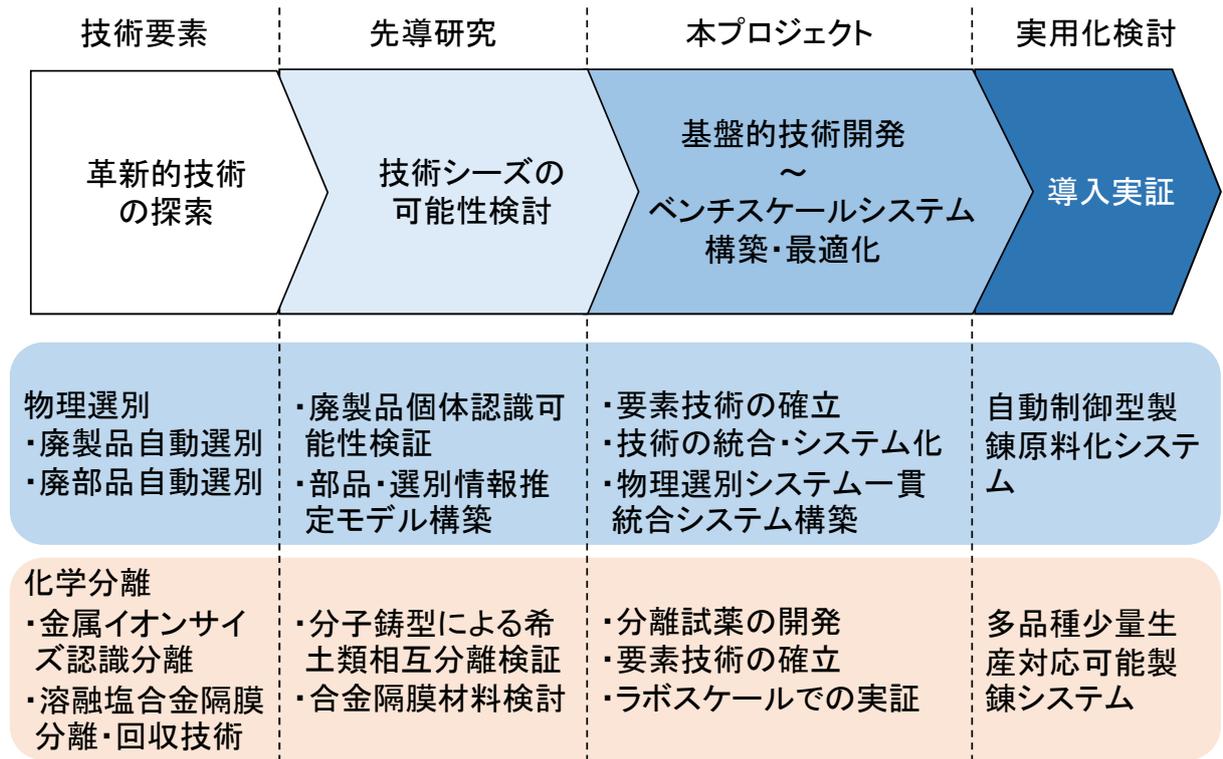
第四次循環型社会形成推進基本計画(2018.6.19閣議決定)

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

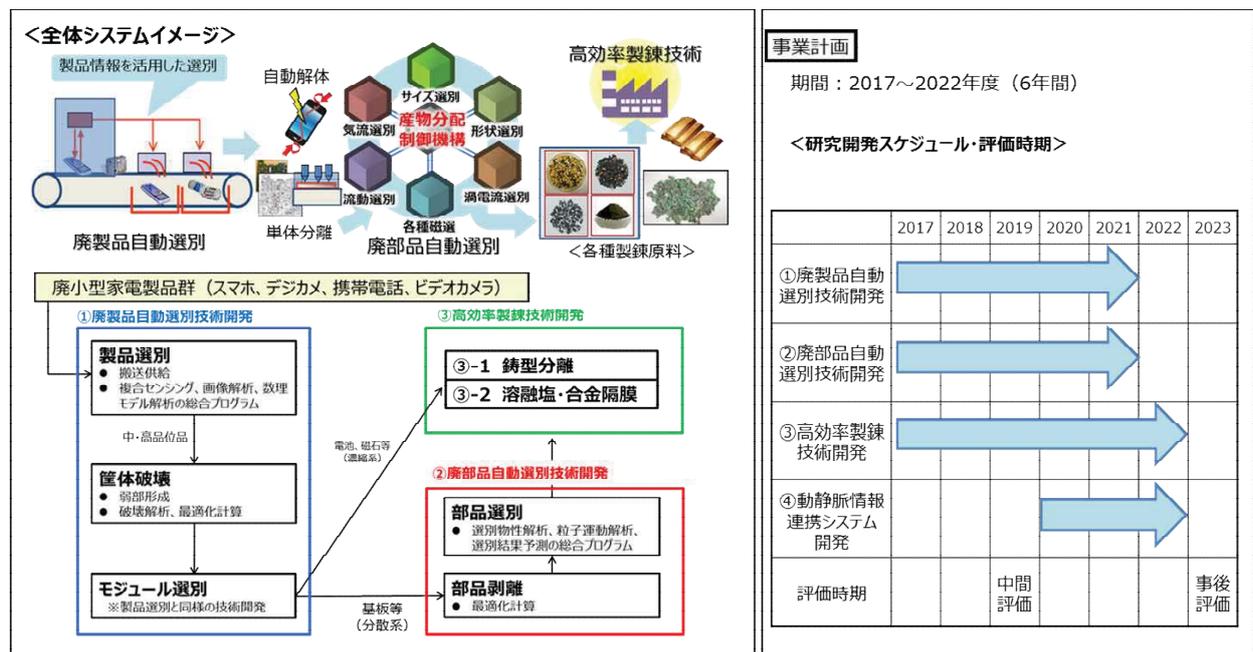
循環経済ビジョン研究会(2018～検討中；経済産業省)



- 画像認識/自動化等によるリサイクル材の高付加価値化
- 静脈産業の生産性向上・集約化



使用済み電子機器の個体認識・解体・選別プロセスを無人化する廃製品自動選別システム、廃部品を製錬原料として最適選別する廃部品自動選別システム、従来の金属製錬技術を補完する多品種少量金属種の高効率製錬技術の開発を行う。さらに、情報技術等を有効活用することによって、動静脈産業が一体となった戦略的な資源循環システムを支える技術基盤を構築する。



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

国研、大学、企業を結集させて共通基盤技術の開発から実用化を目指した長期的な開発を行うための研究開発事業をNEDOが実施すべき。

8

本事業で構築を目指すリサイクルシステムは、

●**社会的必要性が大きい**

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

●**資源循環産業の競争力強化に貢献**

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

●**異業種間連携が必要不可欠**

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

国研、大学、企業を結集させて共通基盤技術の開発を行うため、NEDOがもつこれまでの知識、実績を活かして推進すべき事業

9

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

10

●事業の目標

・中間目標(2019年度)

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

・最終目標(2022年度)

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

●アウトカム目標

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

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

11

◆研究開発目標と根拠

2. 研究開発マネジメント (1)研究開発目標の妥当性

	中間目標 (2019年度末)	最終目標 (①、②: 2021年度、③: 2022年度)
研究開発項目① 廃製品自動選別技術開発	廃製品(破壊・変形を伴わない)を、 処理速度1秒/製品・個以内に、非破壊で個体認識・資源価値判定し、資源価値別に選別 するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、 従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現 するため、装置群システム・制御の要素技術を完成させる。	廃製品(破壊・変形を伴うものを含む)を、処理速度0.5秒/製品・個以内に、非破壊で個体認識・資源価値判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現するベンチスケールシステムを完成させる。
研究開発項目② 廃部品自動選別技術開発	廃製品を構成する主なモジュールから分散・複雑系廃部品を単体分離・選別する自動選別システムにおいて、各種選別産物の製錬原料化(製錬受入れ条件を満たす金属原料化)を実現するため、 装置群システム・制御の要素技術を完成 させる。	廃製品を構成する主なモジュールから分散・複雑系廃部品を単体分離・選別する自動選別システムにおいて、廃部品を分離効率80%以上で選別する性能を有し、各種選別産物の製錬原料化を実現するベンチスケールシステムを完成させる。 研究開発項目①及び②を連動させて一貫制御するベンチスケールシステムを完成させる。
研究開発項目③ 高効率製錬技術開発	イオン半径が近接する希土類元素を対象に、 相互分離係数3を有する分離試薬を開発 するとともに、ラボスケールで、 2種以上の希土類元素を(単体または鉄等との合金として)純度80%以上で各々同時に直接回収 する技術を確立する。	イオン半径が近接する希土類元素を対象に、相互分離係数5を有する分離試薬を開発する。また、2種以上の希土類元素を(単体または鉄等との合金として)純度80%以上で各々同時に連続的に直接回収する技術を実現するとともに、プロセス適用時のコストを1/2以下(従来比)にする見通しを立てる。
研究開発項目④ 廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発	2020年度からの研究開発開始のため対象外	戦略的鉱物資源20種のマテリアルフロー、製品群30種の製品フローを考慮した都市鉱山ポテンシャル評価・廃製品リサイクルコスト評価システムの構築と、それをういたリサイクル対象鉱種・製品を選定する。

◆研究開発のスケジュール

2. 研究開発マネジメント (2)研究開発計画の妥当性

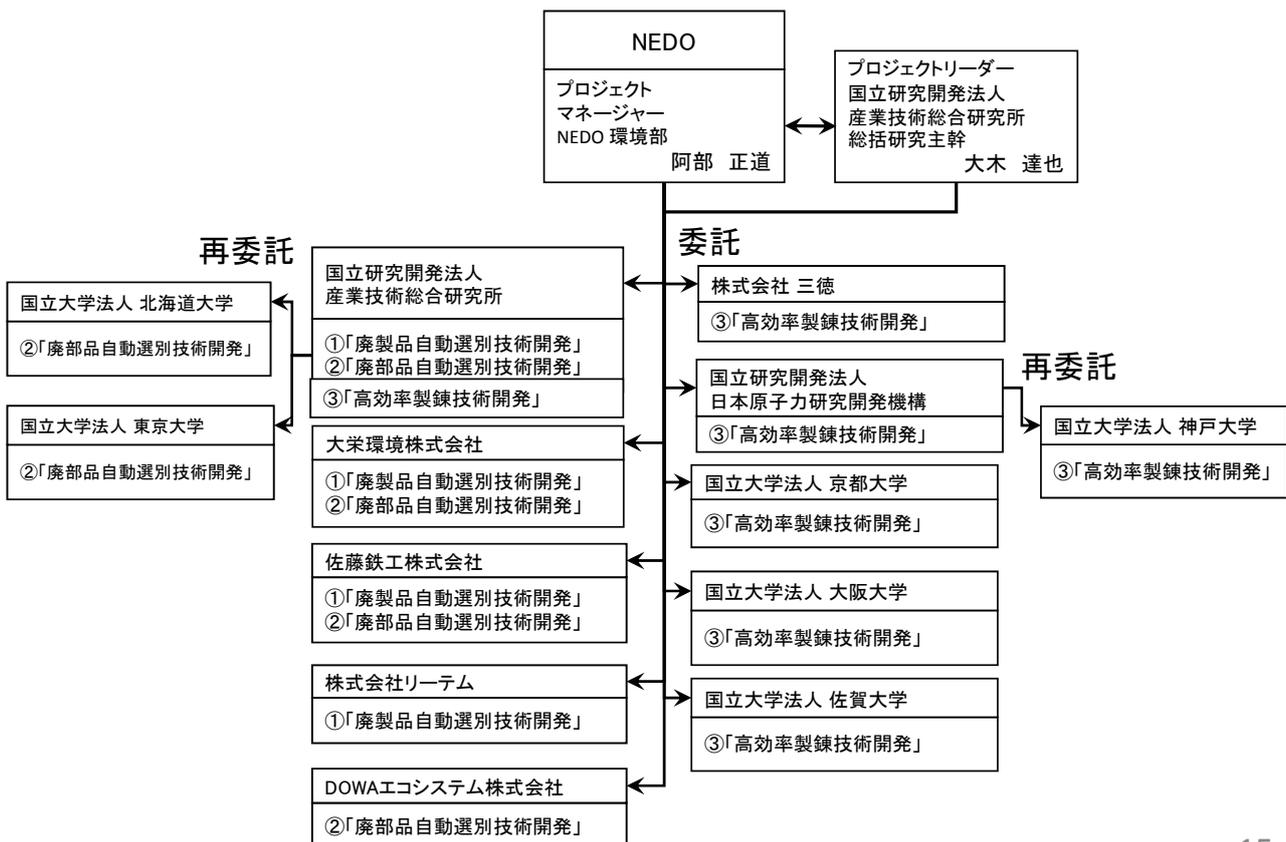
本プロジェクトは実用化まで長期間を要するハイリスクな基盤的技術開発であり、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であることから、委託事業として実施。

プロジェクトの前期3年間は個別要素技術開発、後期3年間はシステム統合・実用化に向けた開発を実施

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

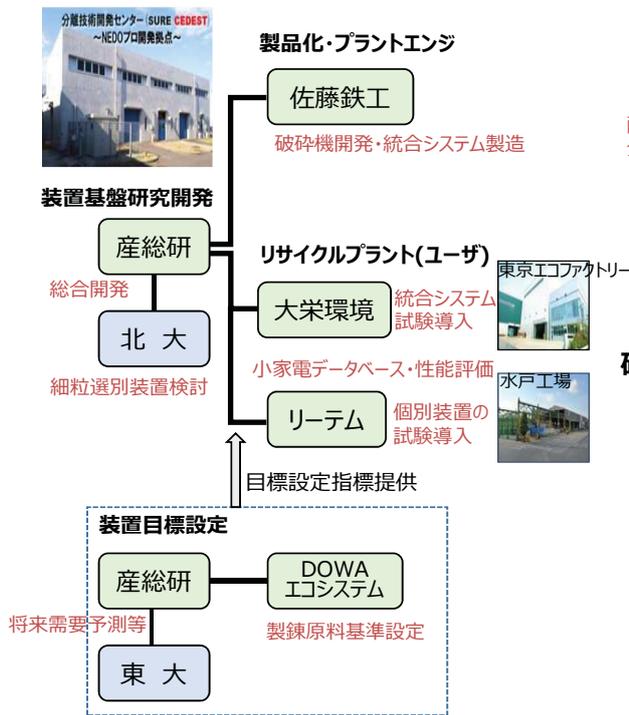
単位：百万円（税込）

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

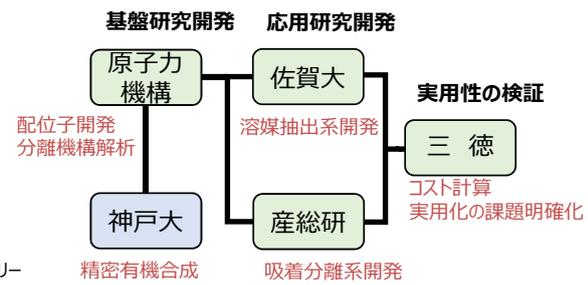


◆ 研究開発の実施体制

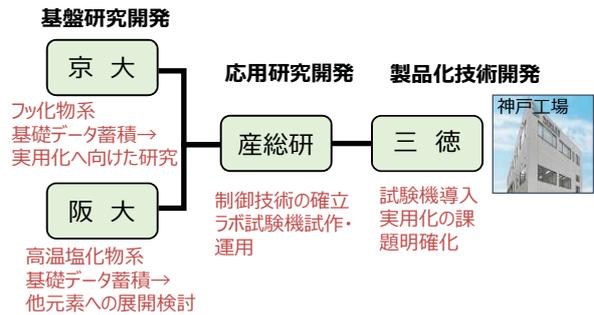
研究開発項目①,②



研究開発項目③-1



研究開発項目③-2



◆ 研究開発の進捗管理

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

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

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

2. 研究開発マネジメント (4)研究開発の進捗管理の妥当性

◆研究開発の進捗管理

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

会議名	主要出席者	目的	頻度	主催
DJ会議 (進捗状況共有会議)	METI、事業者、NEDO	METI予算要求原課等の関係原課に対して事業進捗状況を共有するとともに、新政策への対応等を検討する。	隔月	NEDO (環境部)
PL、PM会議	PL、テーマリーダー、PM、NEDO	本事業のPL、PMを中心に、事業の進捗状況、予算の執行状況、研究開発の一部加速、削減などについて協議する。	隔月	PL、PM
研究開発協議会	事業者、NEDO	全研究開発項目の主たる担当者を集め、事業の進捗状況を共有し、課題点などを協議する。	年2回程度	PL
知財委員会	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。	適時	事業者
テーマ別開発協議会	事業者、NEDO	各研究開発テーマ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。	年2回程度	事業者
SURE CEDEST 集中研運用協議会	事業者	産総研に設置した集中研（CEDEST）における運用（研究機関の出入り制限等）について協議する。	適時	事業者

2. 研究開発マネジメント (4)研究開発の進捗管理の妥当性

◆開発促進財源投入実績

2017年10月に56百万円の追加的な開発促進財源投入を実施した。
主な購入装置、目的、成果は以下のとおり。

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

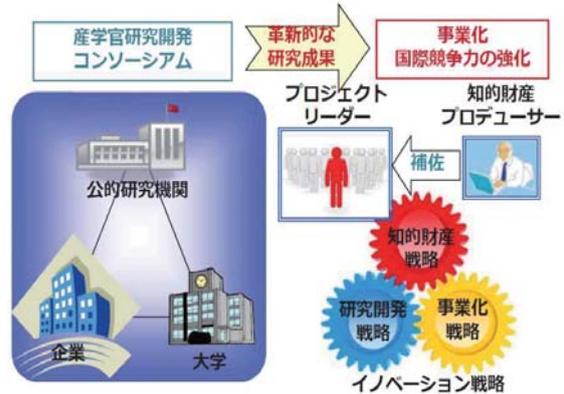
● NEDO

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

● 実施者

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

本事業は独立行政法人工業所有権情報・研修館(INPIT)の知的財産プロデューサ派遣事業に採択され、本年4月より、NEDOプロジェクト専属の知財プロデューサが産業技術総合研究所に半常駐している。本制度では、NEDOプロジェクトに参画する13機関の知的財産に関する戦略や出願を補佐することを目的としており、既に複数件の特許出願に関して、出願補佐を実施頂いている。



INPITの知的財産プロデューサ派遣事業

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

3. 研究開発成果 (2) 成果の最終目標の達成可能性

◆ 成果の最終目標の達成可能性

研究開発項目	最終目標 (2022年度末)	現状の進捗状況	達成度
① 廃製品自動選別技術開発	廃製品 (破壊・変形を伴うものを含む) を、 処理速度0.5秒/製品・個以内 に、非破壊で個体認識・資源価値判定し、資源価値別に選別するとともに、廃製品を構成する主なモジュールに解体・選別する自動選別システムにおいて、従来の人手による解体・選別プロセスの10倍以上の処理速度を実現するベンチスケールシステムを完成させる。(2021年度末)	中間目標を予定通り達成見込みであり、後年度から項目①②を統合した一貫統合システムのベンチスケールシステムを構築する。 【課題】システム全体の情報管理や各装置の小改良等 【見通し】計画通りに実現できる見込み。	○
② 廃部品自動選別技術開発	廃製品を構成する主なモジュールから分散・複雑系廃部品を単体分離・選別するベンチスケール自動選別システムにおいて、 廃部品(メモリ、コンデンサ等の各電子素子) を分離効率80%以上の選別する基本性能の発現と、製錬原料化要件を満たす各種選別産物の回収を実現する。さらに、 研究開発項目①及び②を連動させて一貫制御する、ベンチスケールシステムを完成させる。 (2021年度末)	同上	○
③ 高効率製錬技術開発	(1) 鋳型分離	イオン半径が近接する希土類元素を対象に、 相互分離係数 5 を有する分離試薬 を開発する。	○
	(2) 溶融塩分離	2種以上の希土類元素を(単体または鉄等との合金として) 純度80%以上で各々同時に連続的に直接回収する技術 を実現するとともに、プロセス適用時のコストを1/2以下(従来比)にする見通しを立てる。	○

◎ 大きく上回って達成、○ 達成見込み、△ 一部未達、× 未達

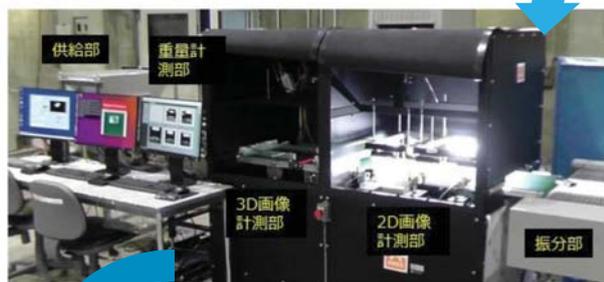
3. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

◆ プロジェクトとしての達成状況と成果の意義

研究開発項目① 廃製品自動選別

- ・ 資源価値DBの構築
- ・ 評価等に基づく製品ソーティング

◆ 製品ソータ試験用モジュール



解体・元素分析に基づく資源価値評価

筐体破壊



基板が分離

◆ モジュールソータ基本システム



後段の部品選別へ

- ・ モジュール (基板、電池、筐体等) に自動選別

研究開発項目② 廃部品自動選別

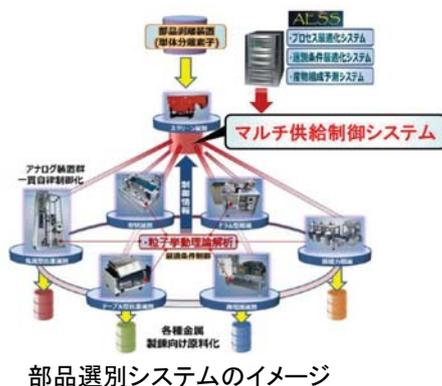
要素技術開発を確立し、それらを統合したシステムの開発に着手



(要素技術開発例)

- ・基板構造DB
- ・部品・素子基礎DBの構築
- ・基板剥離技術の構築
- ・選別装置自動制御技術 等

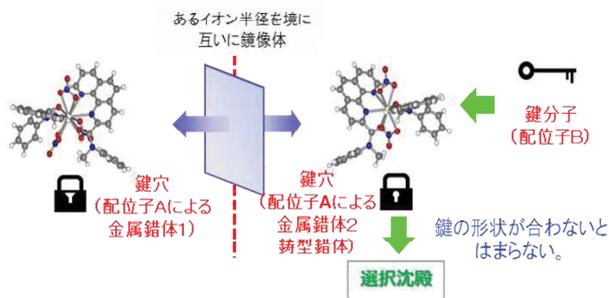
各種電子素子群を各選別装置間で自在に供給(搬送)可能なコンパクトな搬送システムの制御法を開発



部品選別システムのイメージ

研究開発項目③-1 高効率製錬技術開発(鑄型分離技術を利用した希土類元素の高精密金属イオンサイズ認識分離)

- (1) 配位子Aを用い、あるイオン半径を境に性質が異なる(鏡像体の関係、化学組成が異なる等)金属錯体(分子鑄型)を生成させる
- (2) 配位子Bを用い、一方の錯体のみを選択的に沈殿させる



鑄型分離技術の概要

【検討内容】

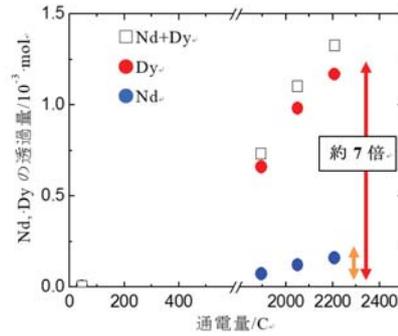
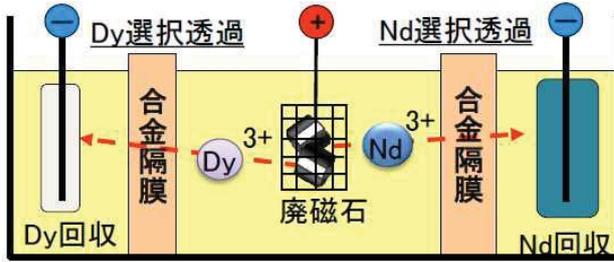
1. 分離メカニズム解明
 - ・鍵と鍵穴の関係(鑄型錯体-鍵分子間の相互作用)
 - ・反応過程の追跡(溶液中錯体構造の解析)
 - ・境界を生み出す配位子構造(鑄型錯体における配位子構造)
 - ・理論の検証 >>> 多種の配位子の使用→配位子合成及び最適合成ルート探索
2. 重希土類元素の検討(H30~)
3. 従来法への展開
 - ・溶媒抽出法、吸着分離法への展開(鑄型分離配位子構造を抽出剤、吸着剤へ適用)

【研究成果】

- Pr/Nd間に構造変化境界を有する配位子Aと配位子B(鍵分子)により、Pr/Ndの分離係数2.75条件最適化を行うことで今年度中に目標(分離係数3)を達成見込み
- 軽希土類元素に対する鑄型分離に用いる配位子の設計法をほぼ確立
- 重希土類Tb/Dy間で錯体構造が変化する配位子の開発に成功
- 鑄型分離配位子構造を有する分離剤が溶媒抽出法及び吸着分離法へ適用可能なことを実証

3. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

研究開発項目③-2 高効率製錬技術開発(溶融塩を利用した濃縮系少量材料のリサイクル技術)



【課題】

- 耐久性向上
- 分離性の向上
- 複数の合金隔膜制御および連続電解に向けた技術展開

【成果】

- 耐久性の向上
- 分離性の向上
- Dy/Nd=7 ⇒ 88%(目標達成)
- Nd/Dy=3 ⇒ 75%(追加的開発)

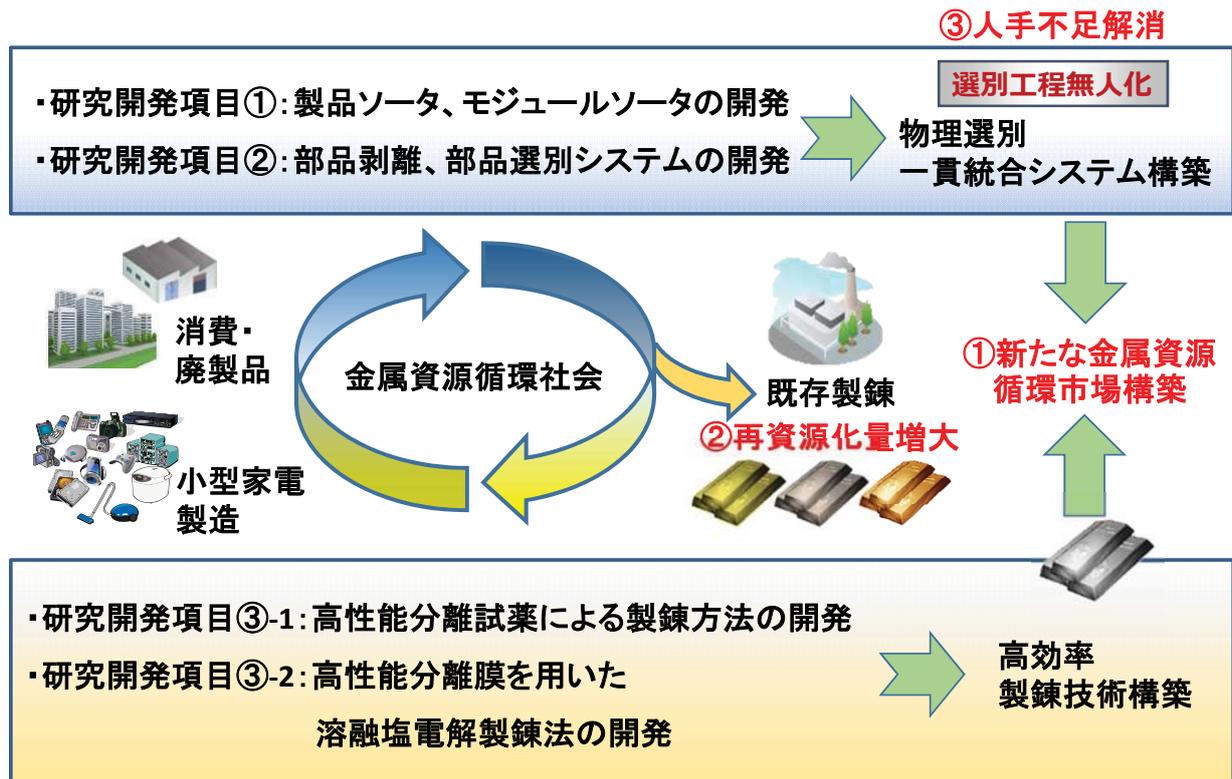
通電量と透過したNd, Dyの物質量の関係



- 複数の合金隔膜制御および連続電解に向けた技術展開
- ガラスセルを用いた試験運転⇒ 条件出し完了
- アルミナセルを用いた追試⇒ セル試作中

3. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

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



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

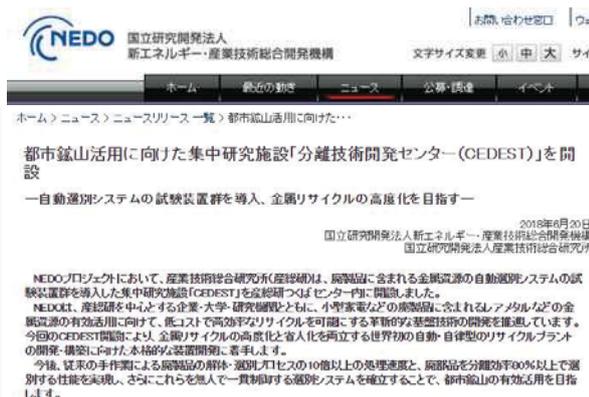
	2017年度	2018年度	2019年度	計
論文（国際誌）	0	3	6	9
総説・解説	1	4	0	5
国際学会発表	3	8	2	13
国内学会発表	7	11	(3)*	21
政府間会合	0	2	0	2
講演・講座	10	15	0	25
新聞・テレビ・web等の報道	6	52	0	58
受賞実績	(1)**	0	0	1
特許・プログラム登録	0	3	4	7

* 2019年7月末までの発表予定
 ** プロジェクト提案に至る成果に対して

※2019年6月18日現在

2018年6月20日
 集中研究施設（CEDEST）開設プレス発表

<掲載17誌> 掲載誌の一部



- ・環境新聞:「大木会長 動静脈「融合」へ」(2017年 9月20日)
- ・日経産業新聞「産総研、都市鉱山掘り尽くす」(2017年11月30日)
- ・NHKEテレ: 高校講座・地理「都市鉱山からレアメタル～日本の取り組み～」(2018年 7月13日)
- ・日刊産業新聞、循環経済新聞、鉄鋼新聞:「戦略的都市鉱山構築に向けた未来構想」(2018年 7月24日ほか)
- ・朝日新聞:「都市のゴミ宝にチェンジ」(2018年 8月 3日)
- ・日刊産業新聞:「2050年の静脈産業の姿と目指すべき方向性」(2019年 2月28日)

【セミナー・講座】

- ・大石哲雄: 希土類元素の直接回収を目指した磁石リサイクルプロセスの開発、SUREコンソーシアム第9回リサイクル技術セミナー講演(2017年08月)
- ・大木達也: リサイクルプラントの無人化を目指して、日本産業機械工業会 第9回 3Rリサイクルセミナー(2018年3月)(依頼講演)
- ・畑山博樹: 資源リスク定量化の動向と課題、SUREコンソーシアム第12回技術セミナー講演、(2018年7月)
- ・大木達也: 21世紀型物理選別学の構築に向けて、SUREアカデミー開講記念公開講座講演、(2018年11月)
- ・大木達也: 集合選別技術の新たな展開: SUREアカデミー開講記念公開講座講演、(2018年11月)
- ・古屋仲茂樹: 個別選別技術の新たな展開、SUREアカデミー開講記念公開講座講演、(2018年11月)
- ・林直人: 画像認識技術を応用した選別工程の自動化、SUREコンソーシアム第13回技術セミナー講演(2018年11月)
- ・上田高生: 廃製品リサイクルにおける解体・破碎工程の自動化、SUREコンソーシアム第13回技術セミナー講演(2018年11月)



図1 集中研究施設「CEDEST」の外観と同施設で開発する技術

3. 研究開発成果 (3) 成果の普及

◆ 成果の普及

2017年9月8日
主催シンポジウム(200名満席)

平成29年度 産総研 エネルギー環境シンポジウムシリーズ
近未来の資源循環社会の展望
2030年の戦略的都市鉱山構築に向けて

平成29年
9月8日(金) 参加費 会場 機械振興会館ホール(地下2階)
無料 東京都港区芝公園3-5-8

13:00-17:25(受付12:30~)
主催：国立研究開発法人 産業技術総合研究所
共催：SUREコンソーシアム、産業技術連携推進会議 環境・エネルギー部会
後援：(国)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、
(一社)産業環境管理協会、(一社)資源・素材学会、(一社)新金属協会、
(一社)日本アルミニウム協会、(一社)日本産業機械工業会、
(一社)日本粉体工業技術協会、(一社)廃棄物資源循環学会、環境資源工学会
協賛：(公社)化学工学会

開催趣旨
西近の社会情勢に鑑みれば、数年前の金属価格急騰はありましたが、資源ナショナリズムの自国、欧州のRE、CE政策など、世界では中・長期的戦略的動きが益々本格化しようとしています。海外の完全金属資源に強く依存する我が国では、今後とも戦略的な金属の供給不安を招きかねない点に変わりなく、世界に先駆けて、独自の資源循環・都市鉱山開発ビジョンを構築することが急務となっております。産業技術総合研究所では、戦略的都市鉱山研究拠点、SUREコンソーシアムの独立など、次世代資源循環に関する技術開発を官民連携で推進して参りました。本講演会では、資源循環社会構築に向けた有識者の方々に特別講演を頂くとともに、産業技術総合研究所を中心に実施して参りましたNEDOエネルギー・環境新技術先端プログラム「動静顕産業連携による循環型資源再生技術」の研究成果について発表いたします。

参加要項
定員：200名(定員になり次第締切)
参加申し込み：下記のHPからお申込みください。
URL: <https://mit.aist.go.jp/emr/index.html>
問い合わせ先：
産業技術総合研究所 環境管理研究部門 研究発表会事務局
E-mail: emr-2017tourouku-m@aist.go.jp
会場の問い合わせ先：
機械振興会館 電話03-3434-8216~7
URL: <http://www.jspmi.or.jp/kaigishitsu/index.html>

2017年(第27回)
日経地球環境技術賞
日本経済新聞社は、地球環境保全のための優れた成果(調査・研究・技術開発への果敢な取組)を、「日経地球環境技術賞」として表彰します。

2017年11月20日
リサイクル選別システムの開発・自動化に関する技術基盤の構築



本事業提案に至る技術基盤の構築に対して

3. 研究開発成果 (4) 知的財産権等の確保に向けた取組

◆ 知的財産権の確保に向けた取組

- NEDO「知財マネジメント基本方針」に準じて、開発拠点への知財集約及びデータ等の取扱いを明記した知財合意書を全参加者で締結し、知財運営委員会の設置による透明性の高い知財管理を図っている。
- また、独立行政法人工業所有権情報・研修館(INPIT)の知的財産プロデューサ派遣事業により、2019年4月から、NEDOプロジェクト専属の知財プロデューサ1名が産業技術総合研究所に半常駐。参画13機関の特許出願補佐を実施頂いている。

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

2019年6月時点

実用化の定義

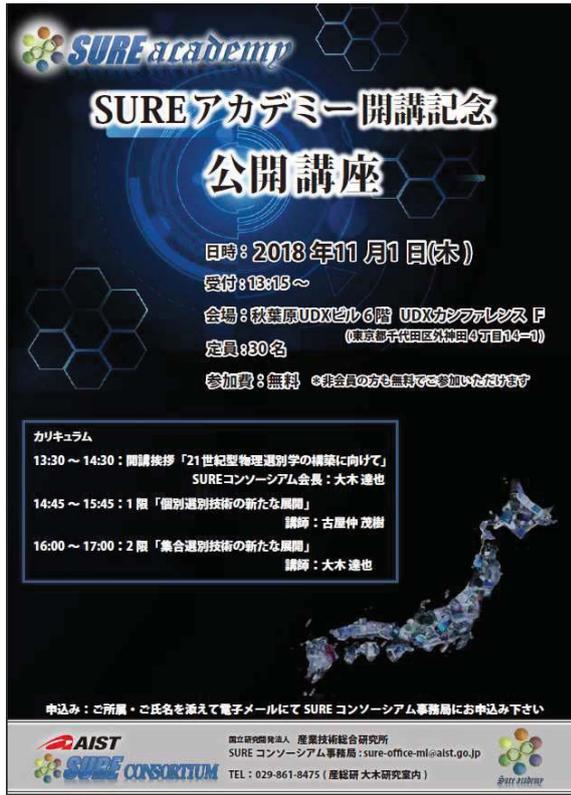
当該研究開発に係る成果(装置、システム等の基盤技術)がリサイクル事業者、関連装置開発事業者等により利用が開始されることをいう。

産総研を中心に、参画企業(リサイクラ、機械装置メーカー、製錬メーカー)と密に連携することに加え、SUREコンソーシアムでの意見交換等を通じて実用化に向けた課題等を共有し、研究開発を実施。事業終了後もSUREコンソーシアムでの意見交換を継続させるとともに、本研究開発成果に関する、共同研究、設備導入、コンサルティング等を実施することで実用化を目指す。

研究開発項目	目標
①廃製品自動選別技術開発	<p>本事業期間中にベンチスケールの試作システムを完成させ、その後2年でパイロット機をリサイクル工場内に導入する。さらに、これらの知見に基づいて、実機スケール機を設計・製作し2025年度の製品化を目指す。商用機の納入先候補として、大栄環境を検討しており、パイロット機～実機導入に向け、設置工場の検討を実施している。2023年度には、パイロット機を導入し、2024年には小規模の商業稼働を開始、2025年には佐藤鉄工の実機設計に基づく装置拡張を行い、2026年に実機スケールの商業稼働を開始する予定。</p>
②廃部品自動選別技術開発	
③高効率製錬技術開発	<p>本事業期間中に、主要希土類材料メーカーである三徳と目標値設定や分離回収条件等について協議している。また、今後、外部協力機関の化学薬品メーカーから分離剤の合成コスト低減等に関する助言を得る予定。</p> <p>事業終了後は、分離係数のさらなる向上に加え、化学薬品メーカーによる試薬の大量合成及びそれによる実操業と同様の装置を用いて三徳における分離試験を行う。そして、プロジェクト終了後5年を目処に、新規分離剤の市販及び実操業への投入を目指す。</p>
	<p>本事業期間中にプロセス適用時のコストなどを1/2以下にする見通しを立てる。</p> <p>事業終了後は、三徳において専用電気炉を順次大型化し、プロジェクト終了後3年を目処にパイロット試験機を作製、運用データを蓄積して商用1号機の導入準備を進める。並行して自動車用・エレベーター用モータなど、ターゲットの多様化、ビジネスモデルの提案などを三徳が主体となって実施する。プロジェクト終了後5年を目処に商用1号機の導入を目指す。</p>

物理選別技術の未来の指導者育成

◆波及効果(人材育成)



SURE academy
SUREアカデミー開講記念
公開講座

日時：2018年11月1日(木)
受付：13:15～
会場：秋葉原UDXビル6階 UDXカンファレンス F
(東京都千代田区外神田4丁目14-1)
定員：80名
参加費：無料 ※非会員の方も無料でご参加いただけます

カリキュラム
13:30～14:30：開講挨拶「21世紀型物理選別学の構築に向けて」
SUREコンソーシアム会長：大木 達也
14:45～15:45：1 限「個別選別技術の新たな展開」
講師：古藤 伸 茂樹
16:00～17:00：2 限「集合選別技術の新たな展開」
講師：大木 達也

申込み：ご所属・ご氏名を添えて電子メールにて SURE コンソーシアム事務局にお申込み下さい

AIST 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
SURE コンソーシアム事務局：sure-office-mi@aist.go.jp
SURE CONSORTIUM TEL：029-861-8475 (産総研 大木研究室内)



物理選別技術の将来の日本の指導者育成を目的とした「SUREアカデミー」を開講

2018年11月 開講記念公開講座として、NEDOプロの開発概念をベースとした未来志向の技術展開を講義

SUREアカデミー設立主旨

物理選別技術は、将来の都市鉱山開発を担うキーテクノロジーであるが、その背景となる学問体系は50年以上ほとんど進歩していない。現状の選別理論は原理を説明しているに過ぎず、実際の選別を予測できないため、実験的な検証による試行錯誤が余儀なくされている。このため、世界的にみても、不完全な装置制御下での選別、未熟な分析手法、誤った評価基準が定着しており、高度な都市鉱山開発の実現を阻んでいる。このような従来の学問体系の不備は、これまで「経験」により補ってきたが、現在、研究機関、教育機関、民間企業のいずれにおいても、これらの経験を持つ人材が消失しかけている。(中略)

我が国のリサイクル技術高度化の一環として、若手～中堅の国研研究者(主任研究員相当)、大学教員(准教授相当)及び企業の技術マネージャやその候補者を対象に、将来の日本の指導者育成を目的とした「SUREアカデミー」を開講致します。

参考資料 1 分科会議事録

研究評価委員会

「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」(中間評価) 分科会 議事録

日 時：2019年7月3日(水) 9:30~17:05

場 所：WTC コンファレンスセンター Room B
(世界貿易センタービル 3階)

出席者(敬称略、順不同)

<分科会委員>

分科会長 大和田 秀二 早稲田大学 理工学術院 創造理工学研究科 地球・環境資源理工学専攻
教授
分科会長代理 松野 泰也 千葉大学大学院 工学研究院 都市環境システムコース 学部コース長
教授
委員 柴田 浩幸 東北大学 多元物質科学研究所 材料分離プロセス研究分野 教授
委員 柴山 敦 秋田大学大学院 国際資源学研究科 資源開発環境学専攻 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 製造部 部長
委員 松八重 一代 東北大学大学院 環境科学研究科 先進社会環境学専攻 教授

<推進部署>

田中 秀明 NEDO 環境部 部長
阿部 正道(PM) NEDO 環境部 主任研究員
藤江 潤二 NEDO 環境部 主査
山田 裕臣 NEDO 環境部 主査
山根 淳史 NEDO 環境部 主任

<実施者>

大木 達也(PL) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 エネルギー環境領域・環境管理研究部門
総括研究主幹
古屋仲 茂樹 国立研究開発法人産業技術総合研究所 エネルギー環境領域・環境管理研究部門
資源選別プロセス研究グループ グループ長
成田 弘一 国立研究開発法人産業技術総合研究所 エネルギー環境領域・環境管理研究部門
資源精製化学研究グループ グループ長
大石 哲雄 国立研究開発法人産業技術総合研究所 エネルギー環境領域・環境管理研究部門
主任研究員
山田 宏志 佐藤鉄工株式会社 環境 エネルギー部 部長
浦出 陽子 株式会社リーテム サステナビリティ・ソリューション部 部長
矢板 毅 日本原子力研究開発機構 物質科学研究センター 副センター長
田畑 奨太 DOWAエコシステム株式会社 環境技術研究所 所長
室田 忠俊 株式会社三徳 開発部 開発部長

<評価事務局>

梅田 到 NEDO 評価部 部長

塩入 さやか NEDO 評価部 主査

福永 稔 NEDO 評価部 主査

議事次第

(公開セッション)

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明
 - 5.1 事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメント
 - 5.2 研究開発成果、成果の実用化に向けた取組及び見通し
 - 5.3 質疑応答

(非公開セッション)

6. プロジェクトの詳細説明
 - 6.1 研究開発項目①廃製品自動選別技術開発
 - 6.2 研究開発項目②廃部品自動選別技術開発
 - 6.3 研究開発項目③-1 高効率製錬技術開発 (高精密金属イオンサイズ認識分離技術)
 - 6.4 研究開発項目③-2 高効率製錬技術開発 (濃縮系少量材料の高効率製錬リサイクル技術)
7. 全体を通しての質疑

(公開セッション)

8. まとめ・講評
9. 今後の予定
10. 閉会

議事内容

(公開セッション)

1. 開会、分資料の確認
 - ・開会宣言 (評価事務局)
 - ・配布資料確認 (評価事務局)
2. 分科会の設置について
 - ・研究評価委員会分科会の設置について、資料1に基づき評価事務局より説明。
 - ・出席者の紹介 (評価事務局、推進部署)
3. 分科会の公開について
 - 評価事務局より資料2及び3に基づき説明し、議題6.「プロジェクトの詳細説明」及び、議題7.「全体を通しての質疑」を非公開とした。
4. 評価の実施方法について
 - 評価の手順を評価事務局より資料4-1～4-5に基づき説明した。
5. プロジェクトの概要説明
 - 5.1 事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメント

推進部署より資料5に基づき説明が行われた。

5.2 研究開発成果、成果の実用化に向けた取組及び見通し
引き続き、推進部署より資料5に基づき説明が行われた。

5.3 質疑応答

推進部署からの5.1および5.2の説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

【大和田分科会長】 それでは、議論に入りたいと思いますが、技術の詳細については議題6で行いますので、ここでは主に本事業の位置づけ、必要性、マネジメントについて議論したいと思っております。

それでは、ただいまの説明につきまして、どうぞご質問、ご意見等をお願いいたします。

【柴田委員】 ご説明ありがとうございます。東北大学の柴田です。研究開発マネジメントのアウトカム目標のところで、最終的に年間1,000億円相当の金属資源を新たに資源化するというのですが、今のご説明だと、この1,000億円の内容は議題6になってしまうのかもしれませんが、ばらばらになった部品を資源と位置づけて、それを1,000億円で誰かが引き取ってくれるという理解でよろしいのでしょうか。

【阿部PM】 この1,000億円のはじき方ですが、現在、海外に輸出されているミックスメタルが一定量ありまして、それが日本国内で再資源化されていない。それが再資源化されたらこれぐらいの新たな市場を得られるだろうという試算ですので、そういう観点で出した数字ということです。

【柴田委員】 そうしますと、この事業で実際に出てくるであろう部品が個別にあるわけですよね。そういうのをもし積み上げたらという試算をされているわけではないということになるのでしょうか。そこがもうミックスメタルというご説明ですか。

【阿部PM】 そういった試算もやっています。例えば、小型家電に限定して、現状の小型家電の回収量に由来とれていない有用金属まで回収できたらどれぐらいになるかといった試算もありますが、本日はその数字は出していません。

【大和田分科会長】 その関連質問ですが、基本的にできたからといって売れるわけではないのです。そのあたりのライフサイクルシミュレーション的な、いわゆるサプライチェーンをどうやって築いていくか、そのあたりのお考えがあれば伺いたいのですが。

【大木PL】 アウトプットとして表明できるようなものは検討中で、まだないのですが、一つは、我々が保証として欲しいと思っているのは、これは後半のところでもお話することになるかもしれませんが、まず選別技術について、今までは、レアメタルをとる、例えばタンタルコンデンサをとるとかいうと、タンタルコンデンサ専用ラインをつくってしまうのです。そうすると、タンタルの値段が高いときはそれを動かしますが、安くなると動かさなくなる。磁石もそうです。そのように、今までやっていたレアメタルなどは新しいラインを設けることによってコストをかけて回収するというようなのですが、今我々が考えているのは、どうせ人手はかかからない、電気代しかかかからないので、ターゲットからとれるものはとりあえず全部回収しておきましょうと。その回収されたものについて、今、DOWA エコシステムさんにご協力いただいて、製錬の受け取り条件がどういうものになるのかというのを調べたいと思っております。つまり、逆有償ということはないので、幾らかはわからないが、製錬が受け取ってくれるのだということで資源化の保証を担保しようとしています。つまり、その受け入れ条件をクリアするような産物として回収するということ。

もう一つは、これはどこから切り出せばいいのかというのは難しいのですが、我々の技術が将来的に展開していくには、情報をどうやって流通させるかとか、物をどうやって集めてくるかとか、あるいはロジスティクスの観点、コストの観点からなるべく移動距離を少なくするにはどうしたらいいかとか、そういうことは一応シナリオのようなものを描いておりまして、技術が孤立しないように、社会に

導入したときにどういうシステムを組めば合理的に回るであろうというようなシナリオの検証は、まだそれほど大々的にはやっていないのですが、この技術を導入する保証として検討を進めているところです。

【大和田分科会長】 わかりました。

基本的にこの事業が成立したとき、恐らく全国規模でやることになると思いますが、そのときの全体の、昨今の流れから言うと、CO2削減にどうつながるのかということと、コスト削減にどうつながるのかという2点はある程度シミュレーションをしっかりとやっておいたほうがよろしいかと思います。

そのほかはいかがでしょうか。

【筒井委員】 ご説明ありがとうございました。

私の質問ですが、非常に長い期間のプロジェクトになるのですが、その間に回収する製品の価値はどんどん落ちていくと思うのです。家電製品で言いますと、例えば回収したもののモーターは従来は巻線銅だったのですが、どんどんアルミ化が進んでいるとか、プラスチックの比率が非常に大きくなっているとかありまして、スマホとかそういう製品についてはライフサイクルが短いので、そういう傾向、要するに回収物の価値がなくなっていくような傾向は、家電製品よりももっと早いのではないかという気がするのですが、その辺の評価はされているのでしょうか。

【大木 PL】 先ほどご紹介しましたが、製品データベースをつくっておりまして、製品の中に入っている金属価値がどのように変動していくのかというのを見てみますと、例えばスマートフォンは10年前に出始めたころに比べたらかなり金の量が減っているとか、確かに価値は落ちているのです。ただ、ある意味下げどまりかなというところまでは来ておりまして、回収するものの総価値は上がりませんので、我々が強いてできるとすると、今まで銅製錬に持って行ってしまっただけで回収されなかったレアメタルを分けて回収することによって、その分も価値として認めていただくということは一つあると思います。

もう一つは、このプロジェクトの目標ではありますが、リサイクルプラントを極力無人化していく。今、我々は、このプロジェクトの中では選別工程だけは無人化しようと、つまり手選別、手解体を一掃しようということですが、将来的にはもっと前後の工程も省人化していこうということで、コスト削減で競争力をつけていくしかないのかなと考えているところです。

【柴山委員】 貴重なお話をありがとうございます。わかりやすく聞かせていただきました。

私、柴山からも幾つか質問させていただきたくて、最初の柴田先生の質問にも関係するのですが、今回、自律型のリサイクルプラント、大きな選別能力を持つプラントになるかと思うのです。この開発が進んだ後の社会実装とかアウトカムに近い姿だと思うのですが、産総研さんとか今回の事業体の中で使おうとされているのか、それともリサイクラーさんとか家電メーカーさんも含めたプラントさんに使ってもらうための装置として実用化を進めていこうとされているのか、要は事業実体をどのような構想で描かれているのかということをもっと聞かせていただきたい。中間ですから今の段階でいいと思うのですが、お願いいたします。

【大木 PL】 PL というか実施者を代表して申し上げますと、実施者側でできることとすると、一つは技術開発をしてそういう装置を世の中に送り出すということで、そのために開発者として佐藤鉄工さんに入ってくださいとあります。開発して一番最初に使うプレイヤーとしては、我々の中では大栄環境さんやリーテムさんのようなところを想定しておりますが、これはもともと広く普及することを目指すものだと思っていますので、そういったところで実績をつくっていった暁には、さまざまなリサイクラーさんに導入していただく。あるいは、今回はサンプルとして小家電4品目ということでやっていますが、当然将来は拡張して行って、さまざまなリサイクル対象についても無人化ができる、あるいは高度な金属回収ができるようなシステムに応用していく、その一つの突破口として考えておりますので、我々プレイヤーの中で抱え込むつもりはなく、ただ、少なくとも我々プレイヤーの中では実用化の

プランを持たなければいけないという意味で進めているところであります。

【柴山委員】 よくわかります。

そうすると、例えばプラントとかにかかるとか全体の費用も抑えなければいけない。センシングもいろいろなものをユニットで使ったりして高いプラントになるとちょっとどうかなというのもあるので。いずれはそういった評価もされるということになるのですか。

【大木 PL】 はい。これはまだ開発段階ですので、実際にどれだけかかるかというのを積み上げていく。しかも、我々が認識できるのはコストですが、ビジネスとなると当然もうけを上乗せして販売するのが実売価になりますので、実際の販売が幾らになるかというのを今の段階で推定するのはなかなか難しいのですが、欧州製のこういったプラントを丸々提供するようなシステムは、私が知る限り、7億とか10億とか、あるいはその後もメンテナンス費用として定期的に支払い続けるようなシステムだと聞いております。一応当初の漠とした目標ですが、7億の半分ぐらい、3億5,000万ぐらいでこのシステムができれば非常に競争力のあるものになりますし、こういった情報を国産の企業がグリップすることによって次の開発もしやすくなるような環境をつくれるのではないかとということで、最終的には佐藤鉄工さんとかとも相談しなければいけません、どのぐらいの販売額になるかというのは断言できませんが、目標としては欧州製よりも安くということ掲げてやっているところです。

【柴山委員】 今、大木リーダーから説明があつて、いろいろな製品に使えるようにという話もありましたが、今のスマホとかの対象ではなくて、ここに掲げられている2035年の売上予測なんかが出てくると、そのころにはもっと小型のものとか腕時計型のウェアラブルとかがいっぱい出てくると思うのです。将来はそういったものにも応用できるプラントを想定して、この5年の段階では限りがあるかもしれませんが、そういったことも一応考えたプラント設計をしていくということですか。

【大木 PL】 まさにそうでした、発表の中でも申し上げたように、誤解がないようにと思うのですが、今サンプルとしてターゲットとしている4品目だけにしか使えない装置をつくらせているわけではなくて、あくまでもこれをサンプルとして広く応用できるような装置の概念あるいは自動化のアルゴリズムを構築しているという認識ですので、将来、我々だけではないかもしれませんが、これに追従してくださるような企業さんが現れるとか、あるいは大学、さまざまな研究機関がこういったことを今後展開していくことによって、さまざまなターゲットとかさまざまな目的のリサイクルプラント、我々としては21世紀型のとりたいと思っているのですが、物理選別技術開発を国内で促進することによって展開を図ると同時に、本当はSUREアカデミーのところでも申し上げたかたのですが、世界が日本をまねするような技術開発を、ぜひ、ここで養っていきたいと思っているところです。

【柴山委員】 最後に一つだけ。この質問は次の議題6の技術に近いのかもしれませんが、サブテーマというのですか、研究項目①と②は製品であったり部品であったりということで、バルク体を主に見ておられるところがあると思うのですが、③は元素であったりイオンであったりということで、非常に小さなものを相手にされている。その間に、例えば溶かすとか、製錬の工程になるのですが、1クッションあると思うのです。そこは特に扱われない形になるのですか。

【大石主任研究員】 物によりますが、例えば熔融塩電解では、物理選別で磁石の形で回収できればそのまま投入できます。もちろん磁石にも種々のコーティングがあるので、物によって剥離工程などは必要です。ただ、テーマ①、②からどういうものが出てくるかは現状わかりませんので、今後検討していく予定です。

【大和田分科会長】 そのほかにかがでしょうか。

【松八重委員】 ご説明ありがとうございます。

廃製品の自動選別において参照される資源価値データベースというものがよくわからなかったのですが、グラフを拝見しますと、ほぼ金だよねというところが見えてきてしまうと思うのです。例えば先

ほどおっしゃられましたタンタルとか将来的に調達が懸念されるようなものは、必ずしも価格としてそんなに大きなものを占めないと思うのですが、それでもターゲットにするというのは多分そういうことだと思うのです。意識としてはわかっているのですが、そういった資源価値データベースは何を参照するかによってターゲットは変わってくると思うのです。現状では資源価値データベースというのは、何か商用のデータベースとか国際マーケットの資源価格といったものを参照しておられるのでしょうか。

それから、もしかしたらそれに関連するのかもしれないのですが、再委託で行われております環境影響の算定を可能にした成果というのがどのように反映されているのか。もしかしたらこのあたりに今の資源価値データベースのあたりに反映されるのかなと考えているのですが、現状ではそれがどこに反映されているのか、再委託として既に動いていらっやと思うのですが、どのように反映されているのかということについてお伺いさせていただければと思います。

【大木 PL】 資源価値データベースについては後ほど担当の古屋仲から解説していただきますが、基本的には、今、私のところではリサーチ研究と呼んでいるのですが、トランスフォーマブル選別システムというところで最後の製錬原料化が決まってきます。その原料化をするときに、まずどういう組成のものであれば売れるかということと、それが入り口に対してどのぐらい出てくるのか、あるいは日本国の人口に対してどれだけ小家電が排出されるのか、どのぐらいの拠点数があったときにどのぐらい移動距離があるのかというシナリオを立てるためのベースとなる、言い方が不正確かもしれませんが、ソフトウェアをつくっている段階です。先生がおっしゃったような個別のデータを入れ込んで評価をするというのは、実は後年度に行うことになっております。ですので、今この段階でつくっているソフトウェアの情報は具体的にはリンクしていない状況です。ただ、我々が後期にこれを完成させて実用化するまでの段階では、そのオペレーションは、そのつくったソフトウェアで評価した結果を反映した形でハードウェア技術を社会導入していこうというプランになっておりますので、今の段階での反映というのは残念ながらなくて、あるいはでき上がったものがどの程度の完成度かによって、例えばLCA評価も当然変わってくると思いますし、回収金属の割合も変わってくると思いますので、それがわかった段階でそういう評価をできるようなシステムの開発を進めているという段階です。

【古屋仲グループ長】 資源価値データベースの件ですが、これは製品を手解体して基板を取り出した後、金属部品、大型の部品等を含めて全ての部位の重量を計測して元素分析するものです。元素の価格で表現しますと金が大半を占めてしまうのですが、重要なのは製品が含有する全ての金属元素の重量を押さえているということです。どの製品を何台処理したらこの元素が重量でこれくらい集まっているはずだというような判断ができるものにしたということです。ですので、価格というのはあくまで一つの指標と考えています。ただ、価格につきましても、データベースの運用上は、今回は2012年度の資源価格が高騰した時期の元素価格をベースにまとめていますが、その辺はユーザさんが自由にその時々の元素価格を反映できて、リアルタイムの情報で評価できるようなデータベースを今つくっているとお考えいただければと思います。

【松八重委員】 ありがとうございます。

もう一点、SURE アカデミーは非常にすばらしい取り組みだと思ひまして、人材育成も含めて社会への導入促進を行うというのは非常に重要なことだと思っております。この運営なのですが、これはNEDOプロとして取り組んでおられるのでしょうか。これは否定的な意味ではなくて、むしろそういったものを含んでいるということはすごくすばらしいことだと思っております、技術開発だけでこれだけできましたというや、単に論文発表をすとか新聞に載るといったことだけではなくて、アウトリーチ、実際にそれが導入される先の人たちにあらかじめ技術の進展について情報をシェアするというような取り組みをプロジェクト期間中に行っているのはすばらしいと思うのですが、こういった運営

についてはどのようにNEDO プロの予算内といたしますか、そういったところで取り組んでおられるのかということをお教えいただけますか。

【大木 PL】 SURE アカデミーについては、残念ながらNEDO プロの予算は使っておりません。SURE コンソーシアムというコンソーシアムの中の予算で運営しております。ただ、そもそもこのSURE コンソーシアムでビジョンを構築し、こういった技術が必要だろうということを養って、実はこの産学メンバーもSURE コンソーシアムの会員の皆さんとやって今回のNEDO プロの公募に対して提案させていただいたという経緯がありまして、まさにこのNEDO プロで検討しているような装置開発目線の研究を今後発展させていくためにはどういった視点から考えたらいいかとか、従来の教科書ではここは載っていませんでしたが、こういうことをこのようなアプローチで解決することが将来必要ですということを、我々NEDOの参画機関のプレイヤーだけではなくて、多くの皆様にご理解いただいて考え方の普及を図っていくことによって、先ほど委員の先生からご指摘がありましたとおり、このプレイヤーに閉じるのではなくて、将来日本のこういった技術の発展に寄与することの突破口という位置づけになればと思っています。

【松八重委員】 ありがとうございます。

これは産総研ではなくてNEDOのマネジメント側に向けてかもしれませんが、SURE コンソーシアムでやっていますというのではなくて、むしろNEDO プロの中でこういったものを進めるべきではないかと思しますので、ぜひ、その点についてはマネジメントのほうから、これからほかのプロジェクトも含めてご検討いただければと思います。

【阿部 PM】 ありがとうございます。

まさにおっしゃるとおりでして、NEDO プロジェクト自身、広報活動も含めて広く知っていただくような活動は当然やっていくべきだと考えておまして、NEDO はNEDOのマネジメントの中でもそういったことをやっていく所存ではございます。

【大和田分科会長】 ありがとうございます。後半は大変いい議論ができたと思います。実は私もその点は質問しようと思っておりましたが、ぜひ、よろしく願いいたします。

そのほかはいかがでしょうか。

【松野分科会長代理】 1点だけ、今ここで質問していいのか、後ほどの技術のところでも質問していいのか迷う次第ですが、一応シェアということで。

先日産総研つくばを見学させていただきました。本日もご説明をありがとうございます。

先日は、製品の自動判別と選別を見せていただきました。その際、お時間がなかったのか、高効率製錬の見学はなかったのですが、今回、高効率製錬のほうは大変画期的な技術をご説明いただきまして、大変興味深く拝見させていただきました。

ターゲットなのですが、実用化を鑑みて三徳さんもいらっしゃるということで、ネオジムとディスプロシウムとの分離に注力されるのか、それとももう少し幅広く元素をやられるのか、そのスタンスを教えてくださいたいのですが。

【成田グループ長】 おっしゃるとおりで、ネオジムとディスプロシウムが磁石の主要成分ですので中心になると思いますが、それ以外に、③-1の高効率製錬ではプラセオジムとネオジム、あとディスプロシウムとテルビウム、これらの割合が変わっているのが混ざっていると、なかなかサイクルしにくくなりますので、これはかなりチャレンジングなのですが、そういう隣り合ったネオジムとプラセオジム、ディスプロシウムとテルビウム、その相互分離も狙っております。ネオジムとディスプロシウムの分離はもちろん必要と考えています。

【松野分科会長代理】 その場合、事業相手はどこになるのでしょうか。お答えできる範囲で。

【成田グループ長】 事業先には、希土類の製造業者で今関連いただいているところを中心に考えておりま

す。

【大和田分科会長】 そのほかにかがでしよう。

今のことと関連もあるのですが、この事業は当初は小型家電が対象で、その中のレアメタルが一つのターゲットになっていたと思うのですが、今お話をいろいろ伺っていくと、例えば物理選別のところでは、基本的には小型家電だけではない、全ての廃棄物に対して、全てとは言いませんが、ある程度の製品となって出てくる廃棄物に対してはかなり有効なプロセス開発が行われていると思うのです。そこもそうですし、今のご質問についてもそうですが、今開発されていらっしゃるそれぞれの技術が、今後小型家電とかレアメタルの範疇を超えてどの程度の広がりを持っていくと、それぞれの担当の中で思っているかを伺いたいと思います。

【古屋仲グループ長】 研究開発項目①のソータ関連の装置ですが、詳しくはこの後の非公開セッションでご説明しますが、基本的には画像認識の精度を高めて、いろいろなものを分類して、さらにデータベースと連携しながら特性に応じた選別を行うというようなシステムです。ディープラーニングが最近非常に盛んになっていますが、基本的な分類能力は非常に高いものがありますので、今回の4品目に限らず、小型家電の対象範囲をどこまで広げるかというのはこれからの検討課題ですが、まだまだ余裕はあると思っています。

もう一つは、素材の選別に関しても、プラスチックとかアルミといったものも画像認識でできる部分はかなりあるのではないかと。例えばももとの製品の外観を保っているような状態で粗選別をしてしまうと、現状の選別工程の一部分に選別機単体として入れるというのは検討の余地があると考えております。そういったことで、広がりという面ではまだ十分余地はあるのではないかと思います。このプロジェクトの範疇外になるかもしれませんが、そのような用途も視野に入れながら開発しているという状況であります。

【大木 PL】 研究開発項目②はバルク選別のところですが、①のソータは割と最近の技術、特に機械学習ソータは本当にごく最近急に発展してきた技術ですが、②は既に相当な装置が世界中で動いているわけです。私の希望的な考えではありますが、もしそういったものを全て自律制御、コンピュータ制御にできるようになったときに効率化が図れるということであれば、ありとあらゆる選別工程に対してこの概念を導入し得るのではないかと、極端に言えば天然鉱山の制御もコンピュータ制御しようということに発展し得るのではないかと考えております。いい比喻かどうか分かりませんが、ガソリンエンジン車みたいなものは50年前から走っているわけですが、今走っているガソリンエンジンは相当コンピュータ制御で効率化が図られております。同じようなことが物理選別でもできるのではないかなと。そうしたときに、生産性の改善とか、できれば現場の効率が上がるだけでなく、そういう技術が日本のエンジニアリング企業によって育まれていって、一つの大きなビジネスとして発展するということも踏まえて拡張できたらおもしろいと思っていますし、少しずついろいろなところで情報を使ったら何ができるかということを考えているような傾向がありますので、ぜひ、このタイミングで、世界に先駆けて日本がさまざまな選別装置の自律制御、自動制御をできるような技術ベースをつくりたいということで、今のところは将来的にはさまざまな選別にターゲットを拡張できると考えているところです。

【成田グループ長】 ③-1の精密相互分離は、今回はすごく基礎的なところなのですが、希土類元素の相互分離は各元素の中でも最難関のもので、何とかこの原理を押さえ、しっかりとした理論を構築することで、ほかの金属、特に価数が同じでイオンサイズが近くて分離が難しいというものがありますので、その辺にこの原理を適用できるように拡張したいと考えています。この後お話ししますが、いかに分離するイオンサイズの境界を動かすかといった研究もこのテーマの中でやっていますので、将来的には対応可能な金属をふやしていきたいと考えています。

【大石主任研究員】 ③-2 に関しましては、熔融塩中で分離能を持たせることがこの研究の核となります。

今回のプロジェクトの中では、前半は希土類のみを対象としています。後半ではほかの元素への展開もメインの課題の一つとして挙げています。例えば高融点金属など、熔融塩の得意とする元素群への展開は今後詳細に検討していく予定です。

【大和田分科会長】 ありがとうございます。

前半の物理選別のところは皆さんも把握しやすいと思います。私の見解で言うと、大木さんもよくご存じのように、現状のプロセスで言うと、破碎機とか選別機とか高効率のものをしっかりつけている日本企業は残念ながら産業としては持っていないというのが一番の弱点だと思うわけです。それは欧米で持っているかという、米は抜いておいて、ヨーロッパではかなり大きなメーカーが出てきている。ただし、彼らも狙っていることはほぼ同じようなことなのです。ただ、それをどう日本で先駆けてやっていくか。コンセプト自体はみんながそうやりたいというものを描いていらっしゃると思いますが、その具体化ができていないというのが世界的な現状だと思っていて、それをいかにいち早くこの NEDO プロで確立していくかが非常に重要だと思いますので、ぜひ、いい成果を期待したいと思います。

それから、後半のほうでは、詳細は議題 6 でやりますが、手法開発の部分、もしかするとその中から出てくる手法が今後の製錬技術を変革する可能性すらあるのではないかと期待しているのですが、そのあたりはいかがですか。

【大石主任研究員】 大分先の話にはなりますが、そのような期待も持っております。熔融塩電解に高度な分離能を持たせることは難しく、従来技術で希土類磁石を処理しても希土類のミクスチャーとしてしか回収できません。そのため多段の工程を経て分離して、きれいになった状態でようやく熔融塩電解で回収している。本プロジェクトの手法では、これを単一工程で達成することを狙っています。これがさらに他の元素にも展開できるとなると、製錬分野への展開、あるいは例えば超硬工具などの他の元素のリサイクルを大幅に省力化する、そういった事を心の中では大いに期待して研究開発しております。

【成田グループ長】 分離剤の開発についてお話ししますと、ほとんどの技術が 1960 年代から 1970 年代に確立されていて、マイナーチェンジはあるにしても、そのときのチャンピオンの分離剤が現在も使われているというのが現状ですので、何とか半世紀ぶりにすごいものをつくりたいという気持ちで取り組んでおります。

【大和田分科会長】 ありがとうございます。

もちろん現在も日本の製錬技術は世界に誇るべきようなプロセス、システムを持っていて、製錬技術自体も小さな改善はどんどん行われてきていますが、そろそろ抜本的な改善が起こってもいいころかなと思っております。そういう意味ではこの技術開発に非常に期待したいと思います。

そのほかに何かありますでしょうか。

では、もう少し、あと 2 つほど質問させてください。

まず一つは、大体リユースとかリサイクルの概念というのは、通常リユースと考えると、部品をそのまま使っていくまじょうとか、製品のメンテナンスは当然そうですが、リサイクルというのは基本的には元素のサイクルと言ってもいいかもしれません。ただ、その中間的な概念が今まではなかったような気がするのです。それは何かというと、素材としての機能を生かす循環というものを新たな概念として展開していくのはどうだろうかと思っています。例えば今の場合には磁石の中のそれぞれの元素を元素ごとに分けるというのがあります。これは難しい技術であることはよくわかっていますが、例えば磁石そのものを磁石素材としてどうリユースしていくか。「素材としてのリユース」という言い方をしているかどうかわかりません。まだこういう言葉はないと思いますが、いろいろな意味で素材

というのは基本的に単一の元素でできているわけではないので、複合化した素材の機能をそのまま生かすような資源循環というものが少し考えられるのかなと最近少し思っているのですが、その点はいかがでしょう。

時間がないので、もう一つ最後に聞きます。これは採択審査委員会のところでも、それからワークショップのところでも非常に議題になりましたが、なぜこれをやるのかというと、基本的には動静脈産業の一体化をしたいという最終目標があると思います。先ほどエコデザインの話も出ましたが、こういったプロセスが開発されたときに動脈側にどうフィードバックしていくのか、そのあたりの計画というかお考えをお聞きしたいと思います。

この2点です。

【大木 PL】 最初の点については、実は我々、前の NEDO プロで一つ、残念ながら商業稼働が継続しているかどうかは微妙なところですが、実用化事例がありまして、蛍光体の蛍光ランプをリサイクルするという技術開発を行いました。管径 38mm 蛍光灯の蛍光体のレアアースをレアアースとして戻すのではなく、実は私のほうの関西センターの調査で、使えなくなった蛍光ランプというのは蛍光体が劣化しているのではなくて汚れているのです。これをきれいに洗って、しかも色の調整がしやすいように RGB をある程度の比率で回収するという……

【大和田分科会長】 済みません、難しい質問をしておいて申しわけないのですが、あと 2 分弱なので、よろしく願います。

【大木 PL】 わかりました。

ということで、蛍光材料として使えるということに取り組んだことがあります。

今回なかなかターゲットとしてできていないのは、基本的にさまざまなメタルに対して対応できるということで、メタルごとに機能の度合いとか材料の回し方が違うので、どうしても個別案件になってしまうのです。今回の NEDO プロジェクトの中ではまず製錬に回そうということですが、先生がおっしゃったようなもう少し内側の循環というのは、当然これから順次考えていくべきだと思っております。それはコンソーシアムの中でもやっているということです。

後半は何でしたっけ。

【大和田分科会長】 動静脈産業のフィードバック。

【大木 PL】 これは我々もコンソーシアムの中でこれまでいろいろ議論してまいりましたが、結局動脈から情報をいただくのがなかなか難しかったというのは、情報がリサイクラーさんに入ってもなかなか高度化に直結しない、見える形にならないというのがあって、どちらが先かわからない、ニワトリと卵の話になってしまったのですが、我々としては、情報さえあればこれだけ低コスト化ができる、これだけ高度化できるというのを静脈産業から見せることによって動機を促そうというのがあります。

もう一つ、コンソーシアムの中で情報連携タスクフォースというのを立ち上げて、どうやったらどこから情報を得られるかというのを模索しているところですが、現実の導入はなかなか難しく、例えば、今度マイクロプラスチック憲章とかいろいろありますが、そういう世界的な動向の中から動静脈の連携が促されるというのも一つの方法かなと思っております。

【大和田分科会長】 ありがとうございます。

恐らくいろいろな概念が新たにつくれると思いますので、ぜひ、その点に留意していただければと思います。

では、委員の皆様、ありがとうございました。ほかにもご意見、ご質問はあろうかと思われませんが、予定の時間が参りましたので、次の議題に移りたいと思います。

(非公開セッション)

6. プロジェクトの詳細説明

省略

7. 全体を通しての質疑

省略

(公開セッション)

8. まとめ・講評

【大和田分科会長】 それでは、ほぼ最後の議題になりますが、議題8「まとめ・講評」ということであります。

松八重委員から一言ずつお願いしたいと思います。

【松八重委員】 本日は、長時間にわたりいろいろご発表いただき、ありがとうございます。こういった都市鉱山の活用というお話はよく聞く話ですし、自分自身もそういったところに近いところで仕事をしておりますが、技術的なところでの下支えといいますか、日本というか、もしかしたら世界かもしれませんが、技術の第一線のお話を伺えたことは私としても非常に勉強になりましたし、皆様のご尽力に感謝したいと思っております。

その上で、技術者としての矜持といいますか皆様の強い思いを感じつつ、私自身は社会科学を背景としておりますので、技術のイノベーションは非常に重要ではありますが、社会的な意味でのイノベーションというのもこういった技術を導入する上ではますます重要なのだろうといったところは非常に感じる次第です。

先ほど大木さんのところでもコメントさせていただきましたが、つくる側の方たちともう少し密な意見交換といいますか、情報共有といいますか、そういったものがあればこの手の話はもっとうまく進むのではないかという思いは非常に強く、技術開発を否定するわけでは全然ないのですが、自然鉱石と違って人工物ですので、作り込んでいるところには既に情報があるはずで、ですので、そういったところについてはもう少しうまく、SURE コンソーシアムとかはもしかしたら既にそういうことをやっておられるのかもしれないですが、お互いの情報共有と、これはもしかしたら技術と対話するだけではなくて、官側で、例えば回収した資源を活用するところで働きかけをすることで、そこに戻すのだから情報を提供しろとか、3年たったら CAD の図面を公開しろ、公開しろとまでは言わないですが、コンソーシアムの中で共有しろとか、そういった働きかけはこういったお話をするには重要なかなと感じた次第です。NEDO のプロジェクトとしてそこまではというところだと思うのですが、そのような働きかけを、今度は NEDO さん、管理側の話として、ぜひ、進めていただければというところで

あとは、評価の話がこれから進むと思うのです。私自身はむしろそちらに感心があるのですが、二酸化炭素の排出でこんなところを見ていると仕方がないだろうなというところもありますので、リスクとか、あるいは価格の話は確かに重要な指標ではあると思うのですが、つくったところと将来的に排出される際の需要の関係などというのはなかなかわかりづらいところもありますので、そう考えたときに、上工程で今後懸念されるリスクみたいなものは早めにデータとしてきちんと整備しておいて、どこをメインのターゲットとして回収を強めるべきなのかというような議論がないと、ただやみくもに分ける、そのために技術開発に専念しろというのは余りにも無茶振りだなといったところがあります。これは産総研で技術開発をしておられる皆様方へのコメントというよりは、むしろ管理側の話であったり、自分自身の仕事に関する反省といいますか、今後の指針を感じた次第であります。

以上です。

【筒井委員】 本日は一日ありがとうございました。

2つ申し上げたいのですが、一つは、私は長いこと家電リサイクルにかかわっておりまして、親会社から、AIを取り入れろとか、古屋仲さんのお話にもありましたeファクトリーはどうだとか、そういうことをしょっちゅう言われるわけです。ですが、正直なところ、そういうことが余り取り入れられておりません。家電リサイクルというのはメーカーが義務としてやっておりまして、我々はBグループに所属しておりますので、5社集まって、例えばいろいろなデータベースをつくって本来もっと効率的なリサイクルができるはずなのですが、正直なところでできていないです。なので、本日は、メーカーでもない皆さんがこうやってデータベースづくりに果敢に挑戦されて、そういうものを共用化しようとしているのには非常に感心しました。敬意を表したいと思います。

もう一つは、物理選別のところでトランスフォーマブル選別システムとか、あるいは後半は製錬のお話があったのですが、あれは多品種小ロットの考え方だと思うのです。実は動脈のほうでは10年以上前から多品種小ロットというのは言われておりまして、そういう生産方式を取り入れているわけです。昔は量産といいますとコンベアを引いて何台も同じものをつくっていたのですが、もうそんなやり方はメーカーはやっていなくて、セル方式といいますと多品種小ロットで効率よくやるということを動脈側では取り入れているのです。実はこれもリサイクル側では全然できていなくて、本日お話を聞いて、そうだな、こういうことをもっとリサイクル側は取り入れていかないとけないかなとつくづく感じたということで、本日は勉強になることが多かったです。どうもありがとうございました。

【柴山委員】 それでは、私からも一言、講評というのですか、コメントさせていただきます。

まず、今回の大きなテーマである資源循環システムは、私自身も一研究者といいますか、その一翼といますか、担当している者として、やるべきことはイメージがあっても、この分野を網羅的に研究していくというのは現実的にはなかなか手が出せないのです。どこまで解決すべきかというイメージがそれぞれあります。ただ、その部分を、今回4グループで、大木プロジェクトリーダーの牽引のもとにマテリアルの技術開発を進めておられたり、ソフト、ハードにかかわらず研究を進めておられる点には敬意を表したいと思います。

本日聞かせていただいた中間評価としては、順調に進んでいるのかなど。それぞれの目標もステージゲートに沿った形で進めておられるようですし、コメントとして後でつけさせていただきますが、改めて見ると、今後への期待も持っているということも含めてこれからも研究を進めていただきたいと思います。最終的にはこういった開発プロジェクトは社会に実装化されての価値だと思いますし、役割を果たすべきプロジェクトだったという評価になると思いますので、社会へのインパクトとか波及効果、可能であれば経済性の評価とか将来展望、将来構想もしっかり描いてこの後の研究を進めていただきたいと思っております。

私は技術的なスタンスで見ているので、この分野なり世界を革新できるようなものを生み出していただければと思っています。そういった面では、今後の期待とともに、ぜひ、頑張ってくださいというエールを送って言葉としては閉じたいと思います。

もし研究上での課題なんかがあれば、今はコンソーシアムの一員ではないにしても、いろいろところで研究を進めている方がおられると思いますので、たまにはそういった方を頼ったりして、ぜひ、日本が目指すべき資源循環システム、しかも高効率な世界を描くためにどうすればいいかという大きな旗印のもとに進んでいただければと思っています。

以上です。

【柴田委員】 本日はどうもありがとうございました。個々の技術は非常にユニークなものを開発されていて、今後が楽しみだなと思って聞かせていただきました。

一言コメントを述べさせていただきますと、リサイクルの絵を描くとぐるっと丸い絵を描いて回り

ますというように描かれるのですが、本日ご指摘のように、動脈と静脈があって、実はその中の個々のテーマというか項目はつながっていないというのが皆さんの共通認識かと思います。その中でも、本日の物理選別の部分は、回収されたものが部品になるというところで、そこがつながり始めた。そして、最後に静脈と動脈をつなげるのは製錬の部分ですので、先ほど資源戦略的なお話もありましたが、その部分コストをいかに抑えた形で、かつ日本国内でどう実現できるのかというところが、リサイクルというものの一番重要なところであり、かなめではないかなと思っておりますので、ぜひ、その部分で実用化に向けてさらに研究が発展することを非常に期待しております。

以上でございます。

【松野分科会長代理】 本日はお疲れさまです。

本事業は、国が進めなければいけないことを、NEDOさんがスポンサーとなって、産総研さんがリーダーとして進められている大変すばらしいことであるのは疑いもないことだと思います。

先ほど申し上げたかったことは、前半の分別と解体と分離の話はもう待たなしの話で、目の前に装置があって非常に成果が見えやすい。だからいつも大木さんと古屋仲さんが注目されているところがあると思うのですが、後半の製錬の話は、私自身も製錬をやっている身として、非常に難しいテーマで、非常にリスクも高い中頑張られているということで、私としては個人的に成田さん、大石さんが進められていることは強く応援したいと思っております。

【大和田分科会長】 それでは、最後になりますが、一言申し上げたいと思います。

個々の技術は、これまで何となくざっと理解はしていましたが、具体的なお話を聞いて非常に重要な技術開発だと改めて感じたというのが一つであります。

ただ、個々のコメントの中でも少し触れてきましたが、この開発技術は家電とかレアメタルだけに限ったものではないと考えていて、より対象を広げることを考えたときに、これはこの期間の中でやるべきということではありませんが、この期間の中で、近い将来、より対象を広げた場合にどんな分野の方々の協力、サポートが必要なのか、あるいは協働することが必要なのかということのを少し考えながら、後半はプロジェクトを実施していただきたい。恐らく次のフェーズがあると思っておりますので。

もう一つは、松八重先生もコメントしておられましたし、筒井さんも感想を述べておられましたが、動脈産業とどうタイアップしていくのかというのはやはり一つのキーなのです。大木さんが説明されたように、これは間違いなく、静脈産業のこういったシステムがきちんとしていなければ動脈産業は目も向けていないというのが現状なわけです。いろいろな動脈産業側のリサイクル部隊は、我々の意見、こういったプロジェクトにも非常に同調してくれるのですが、デザイン側は果たしてそれをどう思っているかということ、ほとんど180度違うところを向いてしまっているわけです。だから、このプロジェクトがそれを打破するきっかけになると私は考えております。

ただ、その中で一つ懸念なのは、基本的には動脈産業側が全てCAD図面を持っているわけです。そうすると、個々の製品を逆工場的なプロセスをつくって自動化が行われていくといったときに、果たしてこのプロジェクトの位置づけをどう考えるか。どう考えるかというのは、もちろん否定的なわけではなくて、このプロジェクトはこのプロジェクトで非常に重要なのですが、個々にやって競争するのではなく、お互いに共同して、メーカー側は自分のメーカーでつくったものしかできないわけですが、果たしてそういう状況でいいのかどうかということです。そういう意味では、お互いの協力が非常に重要ななと思っております。

それから、最初に申し上げたように、より対象を広げるというのは、残念ながら今はレアメタルの需要が低くなってきてしまって価格も落ち込んでいるという状況の中で、このプロジェクトの位置づけは何なのかと考えたときに、されどレアメタルなわけです。私はいろいろなところでその話をしてい

ますが。やはりレアメタルだよねというからには、本日は担当者がいらっしやらないということでしたが、各元素についての資源リスク評価、こういった元素が途絶したときにどれだけ日本の産業は被害をこうむってくるのか、これはそんなに簡単なことではないです。ただ、それは非常に重要なことだと思っていて、素人ですが、多分こういう評価は日本しかできないと思います。というのは、海外はデータベースがないですから。幸運にも日本はそういうデータベースがある程度そろっているんで、アメリカなんかやっているような、いい加減とは言いません、定性的なリスク評価ではなく、定量的なリスク評価をきちんと出して、レアメタルは実はこんなに影響があるよというようなことを明らかにするということも重要かと思えます。

以上です。

【福永主査】 ありがとうございます。

ここで推進部長及びPLから一言あればいただきたいと思えます。

【田中部長】 環境部長の田中です。

本日は、長時間にわたって中間評価に参加いただきまして、また貴重なさまざまなコメントをいただきまして、ありがとうございます。

先ほどの各委員の先生方からの全体のコメントを聞きまして、このプロジェクトの重要性を改めて認識したところでありますし、加えていろいろな期待もいただいたということでありまして、そういう意味では責任も重いということも感じているところであります。

我々としては、本日お示したように、今回の中間評価の際には目標を設定していて、その中間目標についてはおおむね達成していると思っているところでありますが、この後は最終目標に向かってしっかりと取り組んでいく必要があると思っているところであります。その際には、このプロジェクトは前半の選別と後半の製錬と、大きく分けると2つあるのですが、そこも大木PLのもと連携させながら、NEDOとしても全体がうまくいくようにしっかりマネジメントして取り組んでいきたいと考えております。

その中でも、先ほどいただいたコメントには幾つか非常に大事な点があると思っております、まず動脈と静脈の連携をもう少しやる必要があるのではないかと。これは全くそのとおりでありまして、我々もずっとそこが課題だと思っているところであります。今回のプロジェクトの中でも、そこは研究開発の4番目、来年度からやっていくところに入っているところでありまして、プロジェクトマネージャーの阿部からも申し上げましたが、そこはまだ固まっていないのです。今、関係者、経産省も含めて相談しておりますので、どういうことをやっていったらいいのかというのを、このプロジェクトで得た知見等も踏まえながらしっかり検討していきたいと考えております。

あと、社会実装しないと意味がないというご指摘もいただきましたが、それは全くそのとおりであります。NEDOとしてもこのプロジェクトをやっているというのは、今回いろいろな企業の方に参加していただいているので、一定の成果として実用化という意味ではできると思いますが、それだけにとどまっては意味がないと思っております、それがどんどん広がっていく、大木先生から世界にという部分もあるとおっしゃっていただきましたが、そういうところもにらみながらやっていく必要があると思っております。

さらに、それをなるべく早くということも大事かと思っております。これも大木先生から、パーツとしてできる場所があったらやったらいいのではないかとというご指摘もありましたが、そこは私もそうかなと思っております。できる場所があれば、全体ができなくても早めに社会実装していくということも大事かと思っておりますので、そういうところも含めながら検討したいと考えております。

あと、リサイクルを考えていくと、技術だけではできない部分があるということは我々もわかっているところでありまして、この点は、このプロジェクトと一緒にやっている経産省とも、制度面の関係

等も含めてどういう形でやるのが一番いいのかということを経営的に検討していきたいと考えております。

すみません、全てのコメントに答えていないと思いますが、いずれにいたしましても、NEDOとしては、このプロジェクトのアウトカム目標、数字は1,000億と書いていてなかなか大きな目標ですが、これに向けてしっかり取り組んでいきたいと考えております。ですので、本日出席の委員の先生方を初め関係者の皆様方におかれましては、引き続きいろいろな点からご支援、応援をいただけるとありがたいと思っております。

以上です。

【大木PL】 本日は、長い時間いろいろご指導いただきまして、ありがとうございます。

まず実施者側としては、特にハードウェア技術開発を中心にやっている、本日ご紹介したものの実用化に向けて邁進していく所存であります。

また、ご助言の多くは、これを社会に導入するときはどうするのか、動静脈の連携をどうするのかという点で、これはももとの予算が経済産業省4課合同提案ということで、非常に多面的な問題を解決することをそもそもの目的としていたり、あるいは、たまたま我々がコンソーシアムをつくって非常に融合的な取り組みをしやすい体制を背景にしているということもあります。今後はNEDOさんと共同していきながら、こういった大きな枠組みについてどうやって取り組んだらいいのかというのは、今我々がやっている枠組みの中でやり切れるかどうかは別として、継続して検討していったら、早期に世界に誇れる資源循環システム、社会システムと技術がきちんと融合した日本らしいスタイルを見せていけるような一つの突破口として、このNEDOプロの成功をお約束したいと思っております。

本日はどうもありがとうございます。

【大和田分科会長】 それでは、以上で議題8を終了したいと思います。

9. 今後の予定

10. 閉会

配布資料

- 資料1 研究評価委員会分科会の設置について
- 資料2 研究評価委員会分科会の公開について
- 資料3 研究評価委員会分科会における秘密情報の守秘と非公開資料の取り扱いについて
- 資料4-1 NEDOにおける研究評価について
- 資料4-2 評価項目・評価基準
- 資料4-3 評点法の実施について
- 資料4-4 評価コメント及び評点票
- 資料4-5 評価報告書の構成について
- 資料5 プロジェクトの概要説明資料（公開）
- 資料6 プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
- 資料7-1 事業原簿（公開）
- 資料7-2 事業原簿（非公開）
- 資料8 今後の予定

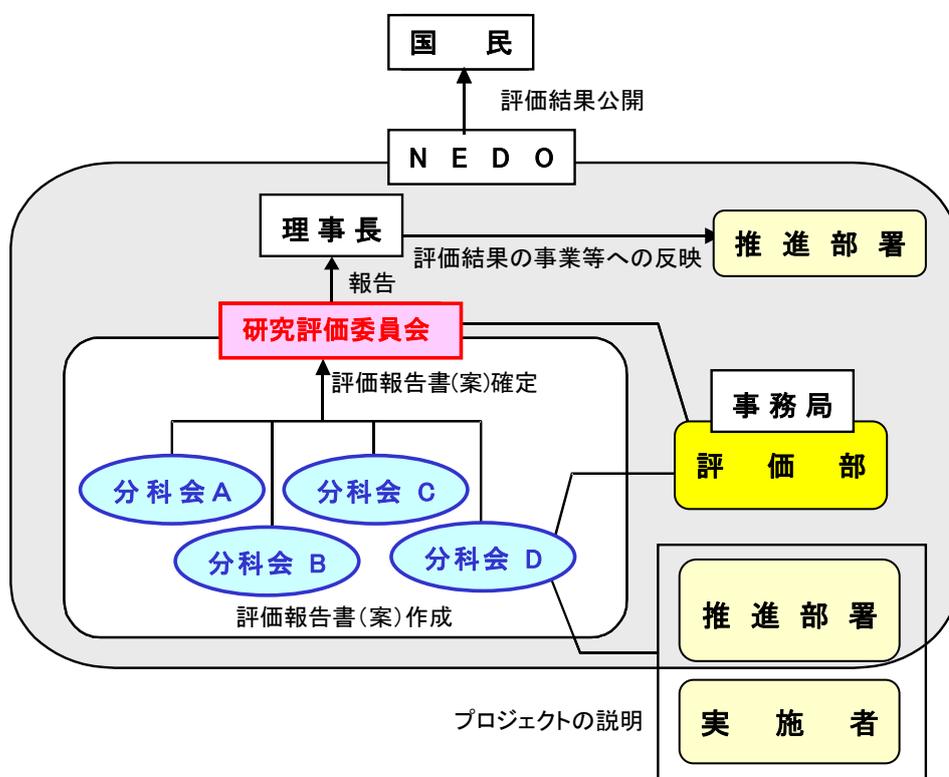
以上

参考資料 2 評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施規程」（平成 15 年 10 月制定）に基づいて実施する。

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)における研究評価では、以下のように被評価プロジェクトごとに分科会を設置し、同分科会にて研究評価を行い、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。

- 「NEDO 技術委員・技術委員会等規程」に基づき研究評価委員会を設置
- 研究評価委員会はその下に分科会を設置



1. 評価の目的

評価の目的は「技術評価実施規程」において

- 業務の高度化等の自己改革を促進する
 - 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
 - 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
- としている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画を比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

2. 評価者

技術評価実施規程に基づき、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行う。分科会委員は、以下のような観点から選定する。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題、国際標準、その他社会的ニーズ関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とする。

これらに基づき、委員を分科会委員名簿の通り選任した。

なお、本分科会の事務局については、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構評価部が担当した。

3. 評価対象

「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」を評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部署から提出された事業原簿、プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。

4. 評価方法

分科会においては、当該事業の推進部署及び実施者からのヒアリング及び実施者側等との議論を行った。それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

5. 評価項目・評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、NEDOが定める「標準的評価項目・評価基準」をもとに、当該事業の特性を踏まえ、評価事務局がカスタマイズしたものである。

評価対象プロジェクトについて、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義、実用化に向けての取組や見通し等を評価した。

「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」に係る
評価項目・評価基準

第3期中長期計画において「非連続ナショナルプロジェクトについては、実用化・事業化の見通し、獲得された知見の他の技術や用途への波及効果等の観点から多面的に評価する。」とされている。

本評価項目・基準は、非連続ナショナルプロジェクト特有の評価視点を盛り込んだものであり、評価者は当該視点(アンダーラインで示す)によってプロジェクトを重点的に評価する。

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献可能性等の観点から、事業の目的は妥当か。
- ・ 上位の施策・制度の目標達成のために寄与しているか。

(2) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされると期待される効果は、投じた研究開発費との比較において十分であるか。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 従来技術の延長線上になく難易度の高い目標となっているか。
- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標を設定しているか。
- ・ 達成度を判定できる明確な目標を設定しているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために、従来の技術とは全く異なる原理、高効率・効果的なアプローチ、プロセス等を採用しているか。
- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール及び研究開発費（研究開発項目の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術の開発は網羅されているか。
- ・ 計画における要素技術間の関係、順序は適切か。

(3) 研究開発の実施体制の妥当性

- ・ 技術力及び事業化能力を有する実施者を選定しているか。
- ・ 指揮命令系統及び責任体制は明確であり、かつ機能しているか。
- ・ 成果の実用化の戦略に基づき、実用化の担い手又はユーザーが関与する体制を構築しているか。

- ・ 目標達成及び効率的実施のために実施者間の連携が必要な場合、実施者間の連携関係は明確であり、かつ機能しているか。
- ・ 大学または公的研究機関が企業の開発を支援する体制となっている場合、その体制は企業の取組に貢献しているか。

(4) 研究開発の進捗管理の妥当性

- ・ ステージゲート方式において次のステージに移行する毎に、技術の取捨選択や技術の融合、必要な実施体制の見直し等を柔軟に凶っているか。
- ・ 研究開発の進捗状況を常に把握し、遅れが生じた場合に適切に対応しているか。
- ・ 社会・経済の情勢変化、政策・技術の動向等を常に把握し、それらの影響を検討し、必要に応じて適切に対応しているか。

(5) 知的財産等に関する戦略の妥当性

- ・ 知的財産に関する戦略は、明確かつ妥当か。
- ・ 知的財産や研究開発データに関する取扱についてのルールを整備し、かつ適切に運用しているか。

3. 研究開発成果について

(1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

- ・ 成果は、中間目標を達成しているか。
- ・ 中間目標未達成の場合、達成できなかった原因を明らかにして、解決の方針を明確にしているか。
- ・ 成果は、競合技術と比較して優位性があるか。
- ・ 世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、汎用性等の顕著な成果があるか。
- ・ 設定された目標以外の技術成果があるか。

(2) 成果の最終目標の達成可能性

- ・ 最終目標を達成できる見通しはあるか。
- ・ 最終目標に向けて、課題とその解決の道筋は明確かつ妥当か。

(3) 成果の普及

- ・ 論文等の対外的な発表を、実用化の戦略に沿って適切に行っているか。
- ・ 成果の活用・実用化の担い手・ユーザーに向けて、成果を普及させる取組を実用化の戦略に沿って適切に行っているか。
- ・ 一般に向けて、情報を発信しているか。

(4) 知的財産権等の確保に向けた取組

- ・ 知的財産権の出願・審査請求・登録等を、実用化の戦略に沿って国内外で適切に行っているか。

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

「実用化」の考え方

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

(1) 成果の実用化に向けた戦略

- ・ 成果の実用化の戦略は、明確かつ妥当か。

(2) 成果の実用化に向けた具体的取組

- ・ 実用化に向けて、課題及びマイルストーンの検討は進んでいるか。

(3) 成果の実用化の見通し

- ・ 想定する製品・サービス等に基づき、市場・技術動向等の把握は進んでいるか。
 - ・ 顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)を期待できるか。(※)
- ※特に、当初の計画に留まらない他の技術や用途への展開、新たな市場の創造の見通し、社会的な効果等が期待できるか。

「プロジェクト」の中間評価に係る標準的評価項目・基準

※「プロジェクト」の特徴に応じて、評価基準を見直すことができる。

「実用化・事業化」の定義を「プロジェクト」毎に定める。以下に例示する。

「実用化・事業化」の考え方

当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることであり、さらに、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することをいう。

なお、「プロジェクト」が基礎的・基盤的研究開発に該当する場合は、以下のとおりとする。

- ・「実用化・事業化」を「実用化」に変更する。
- ・「4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて」は該当するものを選択する。
- ・「実用化」の定義を「プロジェクト」毎に定める。以下に例示する。

「実用化」の考え方

当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることをいう。

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) 事業の目的の妥当性

- ・内外の技術動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献可能性等の観点から、事業の目的は妥当か。
- ・上位の施策・制度の目標達成のために寄与しているか。

(2) NEDO の事業としての妥当性

- ・民間活動のみでは改善できないものであること又は公共性が高いことにより、NEDO の関与が必要とされる事業か。
- ・当該事業を実施することによりもたらされると期待される効果は、投じた研究開発費との比較において十分であるか。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標を設定しているか。
- ・達成度を判定できる明確な目標を設定しているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・目標達成のために妥当なスケジュール及び研究開発費(研究開発項目の配分を含む)となっているか。
- ・目標達成に必要な要素技術の開発は網羅されているか。
- ・計画における要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・継続または長期の「プロジェクト」の場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んで活用を図っている

か。【該当しない場合、この条項を削除】

(3) 研究開発の実施体制の妥当性

- ・技術力及び事業化能力を有する実施者を選定しているか。
- ・指揮命令系統及び責任体制は明確であり、かつ機能しているか。
- ・成果の実用化・事業化の戦略に基づき、実用化・事業化の担い手又はユーザーが関与する体制を構築しているか。
- ・目標達成及び効率的実施のために実施者間の連携が必要な場合、実施者間の連携関係は明確であり、かつ機能しているか。【該当しない場合、この条項を削除】
- ・目標達成及び効率的実施のために実施者間の競争が必要な場合、競争の仕組みがあり、かつ機能しているか。【該当しない場合、この条項を削除】
- ・大学または公的研究機関が企業の開発を支援する体制となっている場合、その体制は企業の取組に貢献しているか。【該当しない場合、この条項を削除】

(4) 研究開発の進捗管理の妥当性

- ・研究開発の進捗状況を常に把握し、遅れが生じた場合に適切に対応しているか。
- ・社会・経済の情勢変化、政策・技術の動向等を常に把握し、それらの影響を検討し、必要に応じて適切に対応しているか。

(5) 知的財産等に関する戦略の妥当性

- ・知的財産に関する戦略は、明確かつ妥当か。
- ・知的財産に関する取扱(実施者間の情報管理、秘密保持及び出願・活用ルールを含む)を整備し、かつ適切に運用しているか。
- ・国際標準化に関する事項を計画している場合、その戦略及び計画は妥当か。【該当しない場合、この条項を削除】

3. 研究開発成果について

(1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

- ・成果は、中間目標を達成しているか。
- ・中間目標未達成の場合、達成できなかった原因を明らかにして、解決の方針を明確にしているか。
- ・成果は、競合技術と比較して優位性があるか。
- ・世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、汎用性等の顕著な成果がある場合、積極的に評価する。
- ・設定された目標以外の技術成果がある場合、積極的に評価する。

(2) 成果の最終目標の達成可能性

- ・最終目標を達成できる見通しはあるか。
- ・最終目標に向けて、課題とその解決の道筋は明確かつ妥当か。

(3) 成果の普及

- ・論文等の対外的な発表を、実用化・事業化の戦略に沿って適切に行っているか。
- ・成果の活用・実用化の担い手・ユーザーに向けて、成果を普及させる取組を実用化・事業化の戦略に沿って適切に行っているか。

- ・一般に向けて、情報を発信しているか。

(4) 知的財産権等の確保に向けた取組

- ・知的財産権の出願・審査請求・登録等を、実用化・事業化の戦略に沿って国内外に適切に行っているか。
- ・国際標準化に関する事項を計画している場合、その計画は順調に進捗しているか。【該当しない場合、この条項を削除】

4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて 【基礎的・基盤的研究開発の場合を除く】

(1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

- ・成果の実用化・事業化の戦略は、明確かつ妥当か。
- ・想定する市場の規模・成長性等から、経済効果等を期待できるか。

(2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取組

- ・実用化・事業化に取り組む者について検討は進んでいるか。
- ・実用化・事業化の計画及びマイルストーンの検討は進んでいるか。

(3) 成果の実用化・事業化の見通し

- ・実用化・事業化に向けての課題とその解決方針は明確か。
- ・想定する製品・サービス等は、市場ニーズ・ユーザーニーズに合致する見通しがあるか。
- ・競合する製品・サービス等と比較して性能面・コスト面等で優位を確保する見通しはあるか。
- ・顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)を期待できる場合、積極的に評価する。

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて 【基礎的・基盤的研究開発の場合】

(1) 成果の実用化に向けた戦略

- ・成果の実用化の戦略は、明確かつ妥当か。

(2) 成果の実用化に向けた具体的取組

- ・実用化に向けて、課題及びマイルストーンの検討は進んでいるか。

(3) 成果の実用化の見通し

- ・想定する製品・サービス等に基づき、市場・技術動向等の把握は進んでいるか。
- ・顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)を期待できる場合、積極的に評価する。

【基礎的・基盤的研究開発の場合のうち、知的基盤・標準整備等を目標としている場合】

(1) 成果の実用化に向けた戦略

- ・知的基盤・標準の整備及び活用の計画は、明確かつ妥当か。

(2) 成果の実用化に向けた具体的取組

- ・知的基盤・標準を供給・維持するための体制の検討は進んでいるか。

(3) 成果の実用化の見通し

- ・整備する知的基盤・標準について、利用の見通しはあるか。
- ・顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)を期待できる場合、積極的に評価する。

参考資料 3 評価結果の反映について

「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業」（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】各研究開発で得られた成果や知見、経験等を共有するとともに、将来に渡って引き継げるような管理・運営体制の構築が望まれる。</p> <p>【2】技術開発だけで全てを解決するのではなく、もっとメーカーを巻き込んでいく仕組み作りも必要であると思われる。</p> <p>【3】各要素技術のスケール感が異なり、システムとして完成形に近いのか、そうでないのか、完成する可能性はあるのか、判断が難しい。</p> <p>【4】開発した技術をうまく生かすために、メーカーとの情報共有のあり方、インセンティブの付与、国内における資源利用効率向上を促すための方策などについての対応が望まれる。</p> <p>【5】実用化に耐え得る処理能力を想定し、プロセスのあり方を再構築すべきである。経済性や採算性の評価は技術開発の早い段階から必要と思われる。</p>	<p>【1】引き続き技術推進委員会を定期的開催し、成果や知見を共有しつつ、リサイクル関係企業のニーズや現状に鑑みたシステム構築を行う。</p> <p>【2】また、2020年度以降に実施予定の廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発において、メーカー等との連携を検討する。</p> <p>【3】2020年度以降に実施する各要素技術を統合する一貫システム開発では、より一層、実用的なスケールを見据え、商用機の納入先候補であるプロジェクト参画企業（大栄環境、三徳）等と意見交換を綿密に行う。</p> <p>【4】後年度に実施する、廃製品リサイクルの動静脈情報連携システムの開発において、情報共有のあり方等を検討するとともに、METIの「循環経済ビジョン」との連携を図る。</p> <p>【5】研究開発成果の社会導入に向けて、処理困難物等への対応や実用化に耐え得る処理能力を想定した各段のスケールアップを行うとともに、競合の技術・価格に鑑みた実用プロセスの在り方を検討する。</p>

評価のポイント	反映（対処方針）のポイント
<p>【6】 廃小型家電に関する収集可能性を可能な限り定量的に推定して、それに耐え得るプロセスの構築が望ましい。</p> <p>【7】 本事業での技術開発は小型家電のみならず各種廃製品にも適用可能であり、その可能性についても具体的な提示が望ましい。</p>	<p>【6】 リサイクル事業者（リーテム）等から情報収集を行い、廃小型家電収集の実情に鑑みたりサイクルプロセスを検討する。</p> <p>【7】 本事業対象外の小型家電も念頭に置きつつ、拡張性のあるリサイクルシステム開発を行う。</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）評価部が委員会の事務局として編集しています。

NEDO 評価部

部長 梅田 到

担当 福永 稔

* 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

ミューザ川崎セントラルタワー20F

TEL 044-520-5160 FAX 044-520-5162