

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（低温焙焼等によるリサイクル
製錬原料の高品質化技術の開発）

終了時評価
技術評価報告書

2022 年 3 月

産業構造審議会産業技術環境分科会

研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ

はじめに

研究開発の評価は、研究開発活動の効率化・活性化、優れた成果の獲得や社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすために、極めて重要な活動であり、このため、経済産業省では、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成28年12月21日、内閣総理大臣決定）等に沿った適切な評価を実施すべく「経済産業省技術評価指針」（平成29年5月改正）を定め、これに基づいて研究開発の評価を実施している。

経済産業省において実施した「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（低温焙焼等によるリサイクル製錬原料の高品質化技術の開発）」は、国内の非鉄製錬所において廃電子基板等のリサイクル原料の利用拡大を促進することを目的に、製錬に悪影響を及ぼす製錬忌避元素を前処理により分離する技術を開発するため、2017年度から2020年度まで実施したものである。

今般、省外の有識者からなる高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業（低温焙焼等によるリサイクル製錬原料の高品質化技術の開発）終了時評価検討会（座長：芝田 隼次 関西大学名誉教授）における検討の結果とりまとめられた、「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（低温焙焼等によるリサイクル製錬原料の高品質化技術の開発）技術評価報告書（終了時評価）」の原案について、産業構造審議会 産業技術環境分科会 研究開発・イノベーション小委員会 評価ワーキンググループ（座長：鈴木 潤 政策研究大学院大学教授）において審議し、了承された。

本書は、これらの評価結果を取りまとめたものである。

2022年3月

産業構造審議会 産業技術環境分科会
研究開発・イノベーション小委員会 評価ワーキンググループ

産業構造審議会 産業技術環境分科会
研究開発・イノベーション小委員会
評価ワーキンググループ 委員名簿

座長	鈴木 潤	政策研究大学院大学 教授
	秋澤 淳	東京農工大学大学院 生物システム応用科学府長・教授
	亀井 信一	株式会社三菱総合研究所 研究理事
	斉藤 栄子	With 未来考研究所 代表
	高橋 真木子	金沢工業大学大学院 イノベーションマネジメント研究科教授
	竹山 春子	早稲田大学理工学術院先進理工学部 生命医科学科 教授
	西尾 好司	文教大学情報学部情報社会学科 准教授
	浜田 恵美子	日本ガイシ株式会社 取締役

(敬称略、座長除き五十音順)

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
(低温焙焼等によるリサイクル製錬原料の高品質化技術の開発)
終了時評価検討会 委員名簿

座長 芝田 隼次 関西大学 名誉教授

坂井 敏彦 日本鉱業協会 理事

技術部長兼環境保安部長

桜井 文隆 一般社団法人日本メタル経済研究所

主任研究員

中島 謙一 国立研究開発法人国立環境研究所

資源循環領域 国際資源持続性研究室

主幹研究員

(敬称略、座長除き五十音順)

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
(低温焙焼等によるリサイクル製錬原料の高品質化技術の開発)
技術評価に係る省内関係者

【終了時評価時】

(2021 年度)

資源エネルギー庁 資源・燃料部 鉱物資源課長 小林 和昭 (事業担当課長)

産業技術環境局 研究開発課 技術評価室長 金地 隆志

(事業初年度予算要求時)

(2016 年度)

資源エネルギー庁 資源・燃料部 鉱物資源課長 萩原 崇弘 (事業担当課長)

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
(低温焙焼等によるリサイクル製錬原料の高品質化技術の開発)
終了時評価の審議経過

【終了時評価】

◆産業構造審議会 産業技術環境分科会 研究開発・イノベーション小委員会 評価ワーキンググループ (2022 年 3 月 1 日)

- ・技術評価報告書 (終了時評価) 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 (低温焙焼等によるリサイクル製錬原料の高品質化技術の開発) 終了時評価検討会

第 1 回評価検討会 (2021 年 12 月 16 日)

- ・評価の進め方について
- ・事業の概要について

第 2 回評価検討会 (2022 年 2 月 8 日～2 月 14 日) (書面審議)

- ・技術評価報告書 (終了時評価) について

【事前評価】

(事業費の総額が 10 億円未満の事業のため、事前評価の対象外)

目次

第1章 事業の概要

1. 本事業の政策的位置付け/背景	9
2. 当省（国）が実施することの必要性	9
3. 国内外の類似・競合する研究開発等の状況	9
4. 研究開発の内容	11
5. 研究開発の実施・マネジメント体制等	43
6. 事業アウトプット	46
7. 事業アウトカム	48
8. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ	50
9. 費用対効果	51

第2章 評価

1. 当省（国）が実施することの必要性	53
2. 研究開発内容及び事業アウトプットの妥当性	54
3. 研究開発の実施・マネジメント体制等の妥当性	56
4. 事業アウトカムの妥当性	57
5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップの妥当性	58
6. 費用対効果の妥当性	59
7. 総合評価	60
8. 今後の研究開発の方向等に関する提言	62

第3章 評点法による評点結果

63

第4章 評価ワーキンググループの所見

65

第1章 事業の概要

(事業の目的等)

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（低温焙焼等によるリサイクル製錬原料の高品質化技術の開発）						
上位施策名	エネルギー基本計画（平成 30 年 7 月）						
担当課室	資源エネルギー庁 資源・燃料部 鉱物資源課						
事業の目的	我が国の銅製錬所は主に海外から輸入した銅精鉱を処理して銅地金を生産しているが、近年、リサイクル原料の処理量が増加傾向にある。しかし、リサイクル原料は銅精鉱とは異なり、溶錬工程における銅とスラグ（不要物）の分離を阻害する、あるいは電解工程に悪影響を及ぼす不純物（以下、「製錬忌避元素」という）を多く含むことなどから、その処理量の増加には制限がある。 そのため、本研究開発では、主要なリサイクル原料の一つであり多様な製錬忌避元素を含む廃電子基板を対象として、炉に投入前の不純物等分離（以下、「前処理」という）技術の開発やリサイクル原料投入時の炉の操業対策を検討し、銅製錬におけるリサイクル原料比率のさらなる向上（ひいては資源自給率向上）を図るとともに、国内銅製錬事業者の競争力強化を目指す。						
類 型	複数課題プログラム / 研究開発課題（プロジェクト） / 研究資金制度						
実施時期	2017 年度～2020 年度（4 年間）		会計区分	一般会計 / エネルギー対策会計			
評価時期	事前評価：対象外、終了時評価：2021 年度						
実施形態	国 → JOGMEC（委託） → DOWA エコシステム株式会社（委託），学校法人早稲田大学・国立大学法人東北大学（共同研究）						
プロジェクトリーダー	独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC） 資源開発部 技術課 神谷太郎（課長（当時））						
執行額 （百万円）	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度		総執行額	総予算額
	85	90	75	61		311	350

1. 本事業の政策的位置付け/背景

我が国は鉱物資源の多くを海外からの輸入に依存し、国内製錬所において輸入鉱石（精鉱）を高度に処理することにより高品質な地金を生産している。金属鉱物資源の安定供給確保の観点から、鉱石（精鉱）以外の安定的な原料確保も重要であり、非鉄製錬所においても廃電子基板等のリサイクル原料を活用しているが、今後は更なるリサイクル原料の利用拡大を促進することが必要である。また、リサイクル原料は一般に鉱石よりもカーボンフットプリントが小さいため、リサイクル原料をより多く利用することが出来ればCO2排出量削減対策にも資することとなる。

一方、廃電子基板等のリサイクル原料には、鉱石に含まれない成分も多く含まれており、その中には製錬忌避元素もあることから、リサイクル原料を多く確保するだけでは、製錬プロセスにおいて投入されるリサイクル原料比率を向上させることは出来ない。リサイクル原料の利用拡大を促進するためには、適切な前処理により製錬忌避元素を分離するとともに、製錬プロセスの高度化を図ることが求められる。

本事業は、製錬所におけるリサイクル原料比率の向上を図ることにより我が国の非鉄金属の自給率の向上を図るとともに、国内非鉄製錬業の競争力強化に貢献し、もって我が国の鉱物資源の安定供給確保に資するものである。

2. 当省（国）が実施することの必要性

海外から輸入した精鉱を製錬することにより地金を生産する我が国にとって、国内製錬所におけるリサイクル原料比率の向上を図ることは、鉱物資源の安定供給の確保の観点から極めて重要である。製錬所におけるリサイクル原料比率の向上を図るため、廃電子基板から非鉄金属を効率的に回収するための革新技術・システムの開発が必要であるが、現在、廃電子基板は銅製錬プロセスに投入され、銅や貴金属等の有用金属を回収しているものの、熱バランスに加え、廃電子基板中に含まれる製錬忌避元素がプラントの操業に影響を及ぼすため、廃電子基板の受け入れ量には制約がある。そのため、前処理段階で廃電子基板中の忌避成分の適切な分離・除去が求められるが、そのコストや効率性、分離性等に関し技術的課題がある。

そのため、技術開発が期待されるが、製錬プロセスに投入する前に廃電子基板を適切に処理し、忌避成分を分離・除去するには、現状の技術ではコストがかかるため、短期的な利益を追求する民間企業のみでは、高度な金属リサイクル技術の研究開発を促進するインセンティブが期待できない。したがって、国が研究開発を主導し、産学官連携のもとで高度な技術課題の解決に取り組む必要がある。なお、資源循環の観点からも、リサイクル原料比率の向上が必須である。

3. 国内外の類似・競合する研究開発等の状況

国内外の類似・競合する研究開発等の状況を「表1 類似・競合する研究開発等」に示す。

リサイクル原料の前処理技術に関する研究開発は、日本国内の複数の機関で行われているが、その対象は廃二次電池、廃家電レアアース磁石、超硬工具など多岐にわたるものの、そうしたリサイクル原料に含まれる製錬忌避元素が製錬プロセスに及ぼす影響まで一貫した研究を行っている事例はない。他方、本研究開発では、対象とするリサイクル原料を廃電子基板に絞った上で、前処理技術から銅製錬の操業の改善に至るまで総合的に検討し、特定の製錬所のためではない汎用性のあるシステムの開発を目標として取り組んだ。

また、現在の国内の操業事例を見ると、リサイクル原料の投入による炉の負荷を軽減するために、前処理工程に焙焼設備を導入し、ハロゲンや有機物を除去している。しかしながら、はんだ付けされている素子類の分別は行われておらず、そうした素子類に含有するアルミニウムをはじめとする製錬忌避元素は、そのまま炉に投入されている。そのため、本研究開発では、廃電子基板リサイクルの前処理において、現在は除去されていないアルミニウムをはじめとする製錬忌避元素を分離・除去するためのプロセスを検討した。

なお、調査した範囲において、海外で類似の研究（素子類の剥離による廃電子基板の選別プロセスに関する研究）は確認されなかったが、原料調達の観点では、今夏、タイにおいてリサイクル原料を対象とする小型製錬炉の操業が開始された事例がある。現在はパイロットスケールでの操業だが、今後スケールアップが計画されており、将来的にはリサイクル原料の地域の集荷拠点として影響力をもつ可能性がある。こうした事例は、日本の製錬事業者にとって、海外からの安定したリサイクル原料の調達を脅かすものである。本研究開発では、製錬・リサイクル事業者が受入しやすいようにリサイクル原料を分離・選別するプロセスを検討し、これを海外展開することでリサイクル原料の集荷拠点とすることも想定しており、近年激化するリサイクル原料の調達競争をも意識したものである。

表 1 類似・競合する研究開発等

	実施機関	プロジェクト名	事業内容
国内	【研究開発】 NEDO	希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業	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を実施。
	【研究開発】 JST	未来社会創造事業／新たな資源循環リサイクルを可能とするものづくりプロセスの革新	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」等の要素技術の研究開発に加え、それらに基づく設計体系や当該要素技術を用いたシステムの研究開発を実施。
	【操業事例】 三菱マテリアル株式会社 JX 金属株式会社		リサイクル原料の投入による炉の負荷を軽減するため、前処理工程に大規模な設備投資を実施。前処理工程では主に焙焼によってリサイクル原料中のハロゲンや有機物が除去されている。
海外	【操業事例】 タイにおけるリサイクル事業		タイにおいて、リサイクル原料を対象とした小型製錬炉が新設された。当該製錬所に技術的な新規性は無いものの、将来、周辺地域のリサイクル原料の集荷拠点となり日本の製錬事業者の安定したリサイクル原料調達を脅かす可能性がある。

4. 研究開発の内容

(1) 研究開発の全体構成

銅製錬におけるリサイクル原料としては、故銅の割合が最も多いが、次いで廃電子基板が多い。しかしながら、国内の銅製錬所の多くは銅精鉱の処理を前提とした操業を行っており、「製錬忌避元素」を多く含む廃電子基板の受入可能量には制約がある。

製錬忌避元素としては、アルミニウムや難燃剤成分（アンチモン、臭素）、ステンレス成分（クロム、ニッケルなど）、はんだ成分（スズ、ビスマスなど）などが挙げられる。また、銅精鉱には含まれない可燃性樹脂やガラス繊維なども、事前に除去することが望ましい。

このような背景から、本研究開発では研究開発項目「物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発」および「リサイクル原料の製錬挙動研究」を並行して実施した。さらに、研究開発のアウトプットの評価および軌道修正等を適時・適切に行うため、研究開発項目「廃電子基板の最適な銅製錬原料化のプロセス評価」において、研究に関わる「情報収集」「研究の進捗管理」「有識者による委員会（低温焙焼によるリサイクル製錬原料の高品質化技術の開発委員会。以下、「委員会」という。）の開催」「非鉄各社へのヒアリング」を実施した。

なお、「物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発」では、廃電子基板を対象に、低温加熱により廃電子基板から形状を維持したままの素子を剥離し、その後の物理選別によって製錬忌避元素等を可能な限り分離・除去することで、銅製錬向けリサイクル原料の高品質化を目指した。このとき、特にアルミニウムの分離・除去が重要であることから、アルミニウムを50%以上除去した上で、銅回収率を80%以上とすることを目標とした。なお、本目標設定は、本邦銅製錬事業者へのヒアリングや有識者で構成する委員会での議論を通じて、銅製錬所に求められる水準、かつ、現実的に達成可能な水準として決定された。

また、「リサイクル原料の製錬挙動研究」では、銅製錬の溶錬工程において、リサイクル原料中の製錬忌避元素がスラグへの銅の損失に与える影響等を調査し、リサイクル原料に対応した溶錬工程の操業の最適化について、平衡論と速度論の両面から検討した。

上述の研究開発について、全体構成を「表2 研究開発の全体構成」にまとめた。また、「物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発」に関わった各実施者の役割分担については、本研究開発項目において策定した「図1 策定した物理選別フローと各実施者の役割分担」上に示した。

表2 研究開発の全体構成

研究開発項目		実施者
①物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発 JOGMEC	(a) 廃電子基板の低温加熱	DOWA エコシステム株式会社 国立大学法人秋田大学
	(b) 物理選別による製錬忌避元素の低減	国立研究開発法人産業技術総合研究所 学校法人早稲田大学
	(c) 除去物等の有効利用等	国立研究開発法人産業技術総合研究所
	(d) 廃電子基板の最適な銅製錬原料化のプロセス検討	DOWA エコシステム株式会社 JOGMEC
②リサイクル原料の製錬挙動に関する平衡論的研究 JOGMEC	(a) リサイクル原料の製錬挙動に関する平衡論的研究	学校法人早稲田大学
	(b) リサイクル原料の製錬挙動に関する速度論的研究	国立大学法人東北大学
③廃電子基板の最適な銅製錬原料化のプロセス評価 JOGMEC	・ 情報収集／進捗管理 ・ 有識者による委員会の開催 ／非鉄各社へのヒアリング	JOGMEC

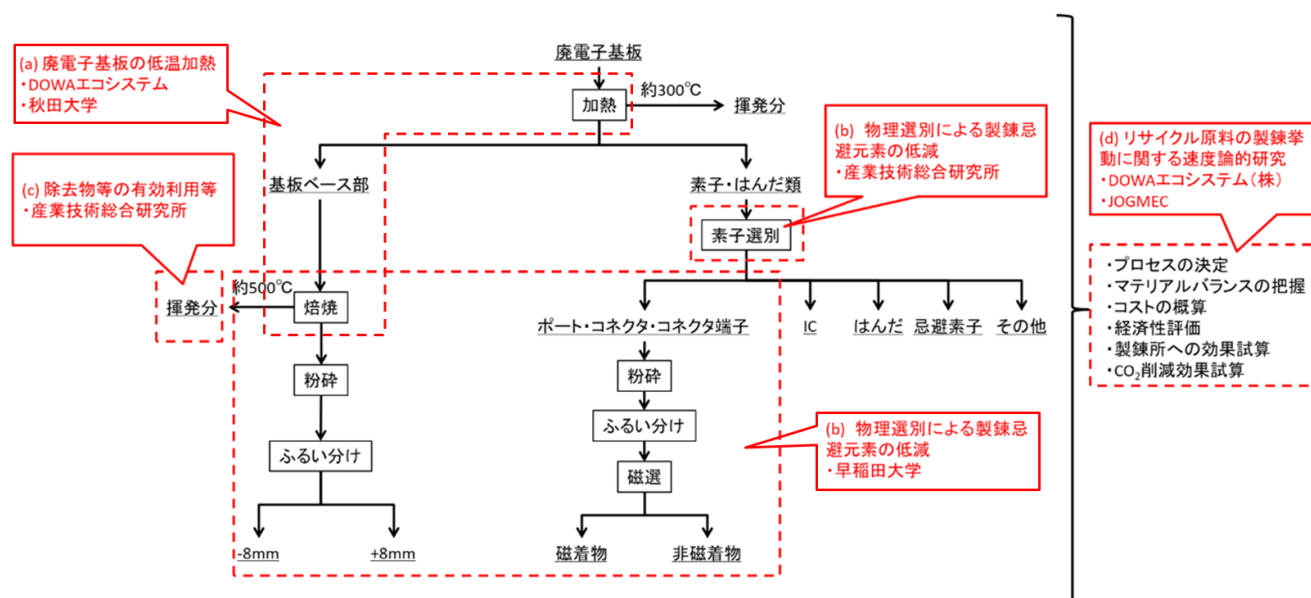


図1 策定した物理選別フローと各実施者の役割分担

(2) 各研究開発項目の内容

各研究開発項目の概要および成果を以下に示す。なお、本研究開発では、廃電子基板やその部材、銅製錬系スラグなどに対して様々な条件（機器・時間・温度・粒度・磁力等）で試験を行い、それぞれの産物に対して膨大な数の元素分析を実施したが、当評価用資料では、最終的に決定した選別フローや今後のロードマップに関係する試験の成果のみを抜粋して記載する。

① 物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発

(a) 廃電子基板の低温加熱

【概要】

物理選別による廃電子基板中の銅や貴金属の回収とアルミニウム等の製錬忌避元素を効率的に行うことを目的に、効果的と考えられた低温加熱による方法を検討した。具体的には、低温加熱によってはんだを溶かし、はんだ付けされた素子類を非破壊で基板表面から剥離する（本項において、以下、このプロセスを「本プロセス」という）ことを目的としている。素子類を非破壊で剥離することにより、各素子の特徴を利用した合理的な物理選別が可能となる。

本試験では、実用化しやすいことを考慮し、トロンメル機構を有する加熱装置を選定・利用した。試験は、まず廃電子基板の処理量数 kg/h で行い、本プロセスの有効性および最適条件を把握した。さらに、廃電子基板の処理量数十 kg/h にスケールアップした試験を実施し、本プロセスの実用性について確認を行った。

当初は特定のデスクトップパソコンに使われていた廃電子基板のみを試験対象としていたが、製錬原料として廃電子基板を安定的に確保するためには多様な原料を取り扱うことが必要であることから、テレビ等家電由来の廃電子基板（以下、「廃家電基板」という）も対象とした。

上記試験の熱源には、廃熱風又は燃烧炉の予熱空気（以下、「加熱空気」という）を想定したが、今後の事業展開を考慮し、発展的なテーマとして廃蒸気を二次過熱した過熱水蒸気の利用についても基礎的な検討を行った。なお、過熱水蒸気は加熱空気に比べて熱容量が大きいいため、廃電子基板の基板ベース部と素子・はんだ類の分離時間を短縮出来ることが見込まれた。

【成果】

- ・ 素子類を基板に接着しているはんだの融点付近である 220～280℃の範囲で加熱温度を変化させ、最適温度を精査した結果、260℃以上で十分に素子類やはんだ類などを基板から剥離できることを確認した。このことから、廃電子基板全体がはんだ融点以上の環境である必要性が示唆された。
- ・ 加熱温度 260℃・トロンメル回転数 15rpm の条件下で加熱試験を実施した結果、10 分の加熱時間では素子・はんだ類の剥離が不十分であり、20 分程度は必要であることが分かった。
- ・ 加熱温度 260℃・加熱時間 20 分・トロンメル回転数 15rpm の条件下で、基板投入数を 1 枚から 3 枚に増やした試験（廃電子基板の処理量数 kg/h）を行った結果、当該条件は複数枚の基板に対しても有効であることを確認した。
- ・ 廃電子基板の処理量を数十 kg/h にしても加熱試験が実施可能な加熱装置を設計した。

- ・ スケールアップした加熱装置を用いて試験を行った結果、加熱温度 280℃・滞留時間 20 分・回転数 15rpm の条件下で、基板ベース部と素子・はんだ類の分離が十分に可能であることを確認した。



図2 加熱装置の外観（上）とスケールアップ試験で基板から剥離された素子類（下）



図3 試験後の加熱装置内部（スケールアップ試験）

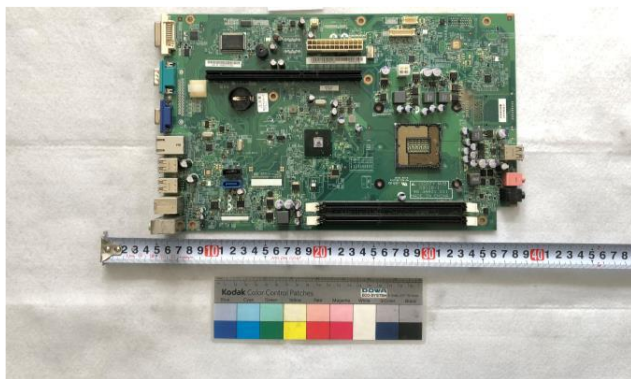


図4 加熱前の基板



図5 加熱後の基板および剥離した素子類

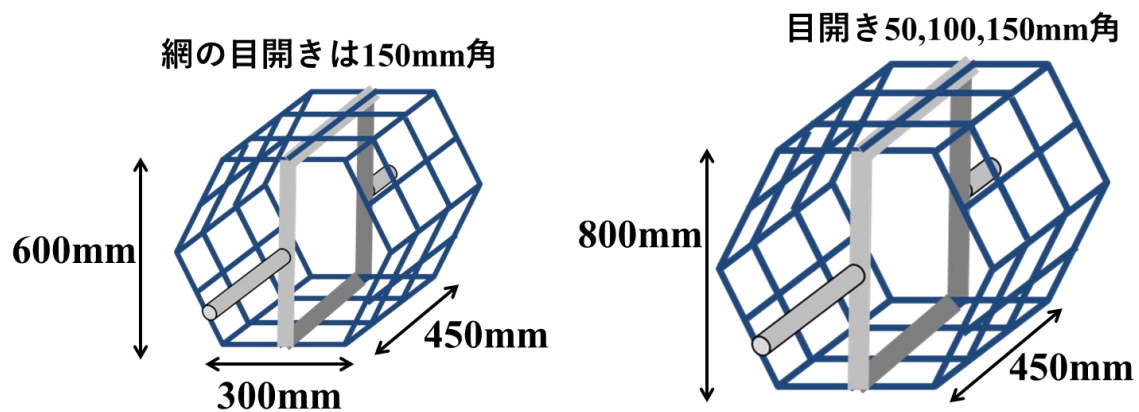


図6 トロンメルのスケールアップ前のサイズ（左）とスケールアップ後のサイズ（右）

- ・ デスクトップパソコンの廃電子基板に対する本プロセスの有効性が確認できたことから、廃家電基板に対する有効性を確認するため、まず両基板の特徴を調査した。その結果、廃家電基板には「ビデオコンポジット端子が実装されている」・「SUS 筐体のチューナー部品（アンテナ端子）が実装されている」など、廃電子基板との違いが見られた。
- ・ 廃家電基板を対象とした数十 kg/h 規模の加熱試験を実施した。加熱温度 280℃・トロンメル回転数 20rpm・1 バッチの加熱時間 15 分の条件下で試験した結果、廃家電基板に対しても本プロセスが有効であることを確認した。



図7 試験前の家電由来基板



図8 試験後の家電由来基板（上）と
試験後の基板から剥離された素子類（下）

- ・ 加熱試験の熱源は加熱空気を基本とするが、多様な熱源の適用可能性を探るため、過熱水蒸気の利用可能性についても検討した。炉内温度を 300℃に設定し、加熱空気と過熱水蒸気の効果の違いを調査したところ、過熱水蒸気では 150 秒後から基板の熱分解が始まり、製錬忌避元素の一つである臭素の除去が進んだ。一方、加熱空気では 1,200 秒後から基板の熱分解が始まった。以上により、過熱水蒸気の方が短時間で臭素除去が可能であることが分かった（図9 銅張積層板を対象とした加熱空気と過熱水蒸気の脱臭素速度の違い）。
- ・ 上述のとおり、過熱水蒸気では基板からの脱臭素と部品剥離が同時にできるため、工程を削減できる可能性がある。また、熱分解速度が速く、基板の脆化も可能であることから、破碎等の後工程まで考慮した場合、エネルギー効率の向上にもつながる。さらに、過熱水蒸気を利用することで銅の酸化も抑制されることから、産物の受入自由度が高まることも期待される。

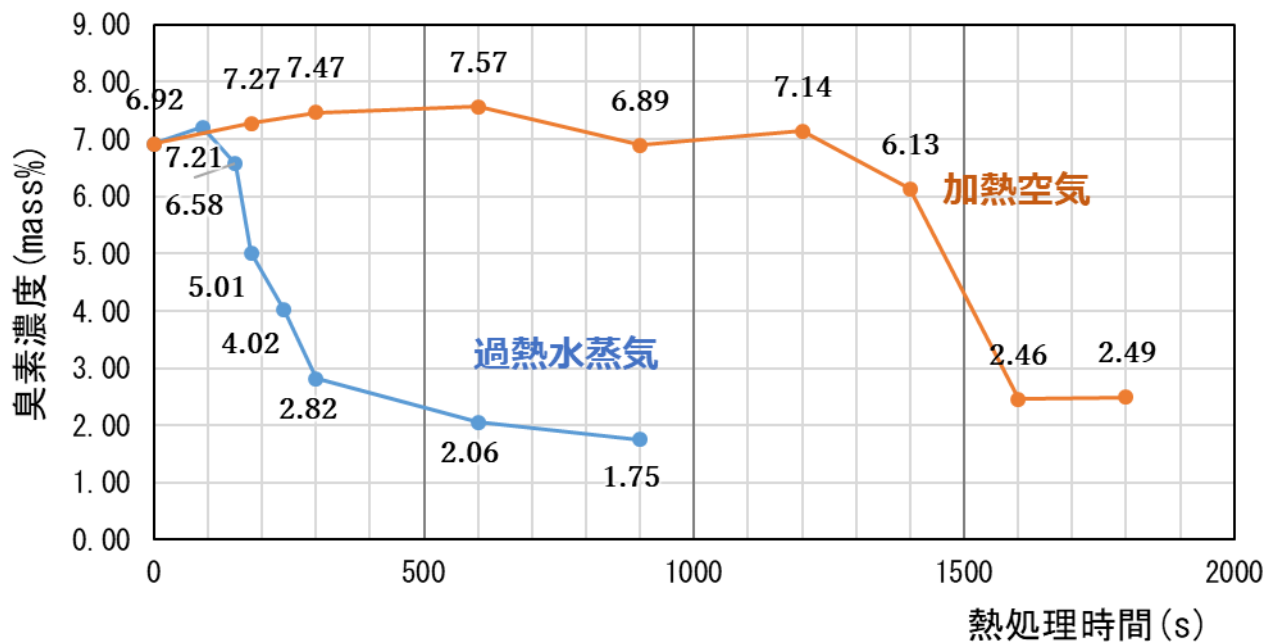


図9 銅張積層板を対象とした加熱空気と過熱水蒸気の脱臭素速度の違い

(b) 物理選別による製錬忌避元素の低減

【概要】

低温加熱後の廃電子基板について、基板ベース部から剥離された素子類を非破壊で選別することによる製錬忌避元素の低減効果を検証した。

選別した素子類の中で、有価物と製錬忌避元素の両方を多く含有するもの（以下、「中品位素子」という）については、粉碎と物理選別の組み合わせによる製錬忌避元素の低減を試みた。

基板ベース部は、銀や銅を多く含有しているものの、アルミニウムや臭素といった製錬忌避元素も多く含むため、焙焼した上で粉碎と物理選別を行うことによって製錬忌避元素の低減を試みた。

【成果】

- 基板ベース部から剥離された素子やはんだ類を対象に、IC・コネクタ・はんだ等の有価物を多く含む素子（以下、「有価素子」という）と、アルミ電解コンデンサ・CPUソケットホルダー等の製錬忌避元素を多く含む素子（以下、「忌避素子」という）の選別を行った。なお、有価素子には中品位素子を含む。
- ふるい分け・弱磁力磁選機・傾斜コンベア・気流選別機を用いることで、IC・コネクタの分離効率 96.5%、アルミ電解コンデンサの分離効率 96.1%、CPUソケットホルダーの分離効率 100%と、非常に良好な結果が得られた。
- さらに、IC・コネクタ濃縮物からICのみを濃縮するため、グリズリスクリーンを用いた形状の違いに着目した選別およびレアアースドラム磁選機を用いた磁性に着目した選別を実施し

た。その結果、8mm以上のサイズではグリズリスクリーンが、8mm以下のサイズではレアアースドラム磁選機が有効であることを確認した。

- ・ はんだの選別については、レアアースロール磁選機を用いることで良好な結果が得られることを確認した。
- ・ 上述した選別の手法が、デスクトップパソコンの廃電子基板だけでなく、廃家電基板に対しても有効であることを確認した。



図 10 弱磁力磁選機



図 11 レアアースドラム磁選機



図 12 傾斜コンベア



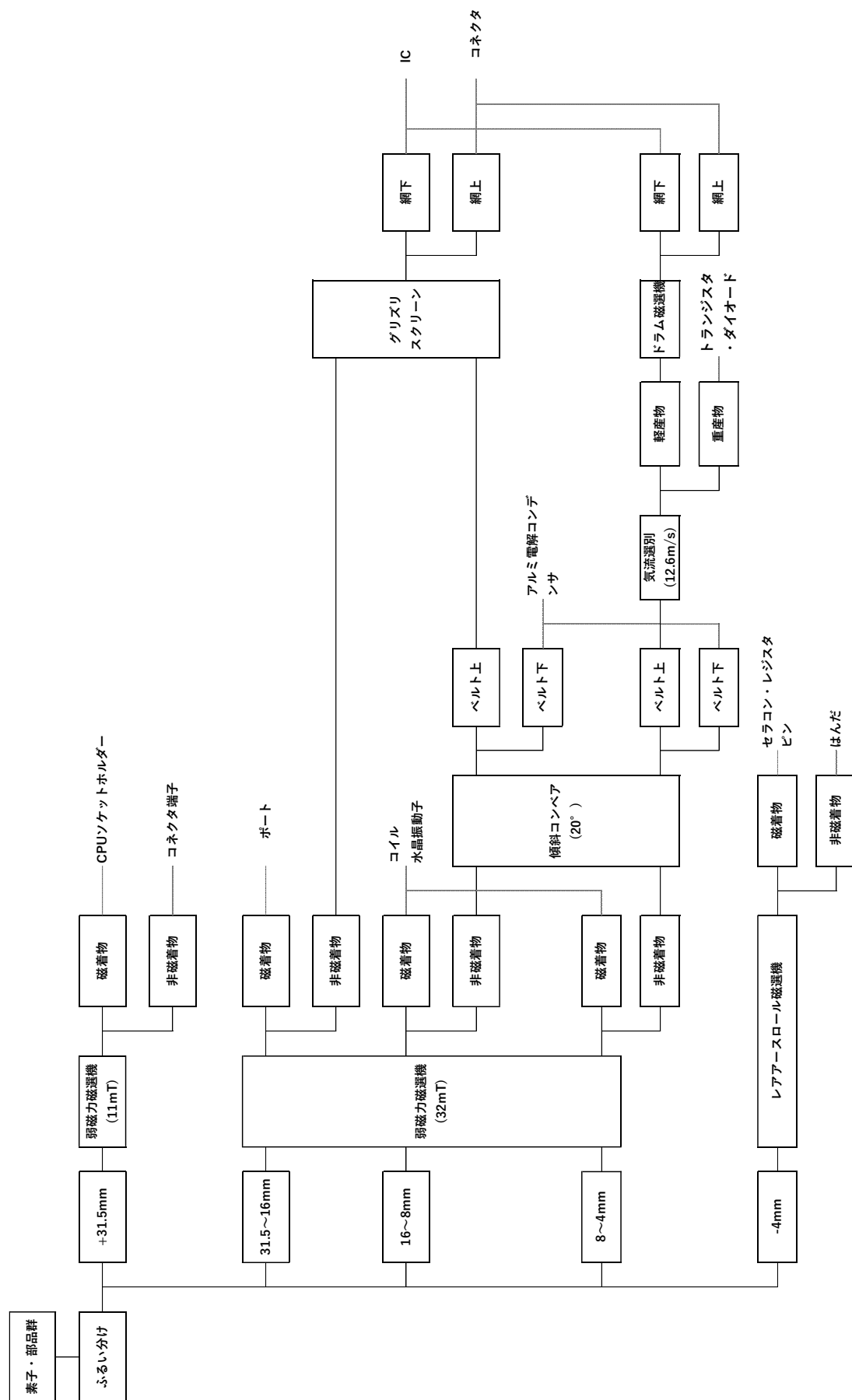
図 13 気流選別機



図 14 レアアースロール磁選機

表 3 基板ベース部から剥離した素子類の粒度および想定される選別方法

サイズ (mm)	有価素子	忌避素子	その他、主な素子	想定される選別方法
+31.5		CPUソケット ホルダー	コネクタ端子 CPUソケット	弱磁力磁選機
16-31.5	IC、 コネクタ		ポート	弱磁力磁選機
8-16		アルミ電解 コンデンサ	コイル、ポート	弱磁力磁選機、傾斜コンベア
4-8			トランジスタ・ダイオード、 コイル、水晶振動子	弱磁力磁選機、 傾斜コンベア、 気流選別機
2-4	はんだ		セラコン、レジスタ、ピン、 プラ片・基板くず	レアアースドラム磁選機、 または レアアースロール磁選機
1-2				
-1				



- ・ 中品位素子には、コネクタ・コネクタ端子・ポートなどが該当する。これらについて、まずは有価物と忌避元素を単体分離するため、電気パルス粉碎を実施した。その結果、コネクタ・コネクタ端子については320回、ポートについては1,280回の印加回数において、良好な単体分離度を示すことを確認した。
- ・ 電気パルスによって単体分離後の中品位素子を対象に、ふるい分けや高磁場磁選を実施した。一種類の目開きによるふるい分けでは、目開き8mmの結果が最も良好であったものの、分離効率は30～50%程度に留まった。また、高磁場磁選のみでは60～70%程度の分離効率を示した。さらに、ふるい分けと高磁場磁選を組み合わせた条件（以下、「高磁場磁選総合産物」という）では80%程度の分離効率を示した。
- ・ 上述のとおり、「高磁場磁選総合産物＞高磁場磁選のみ＞ふるい分けのみ」の順で良好な分離効率を示したが、操業コスト等も考慮した上でフローを選択する必要がある。なお、ふるい分けのみで単体分離後の中品位素子の選別を実施する場合は、複数の目開きを組み合わせる必要がある。

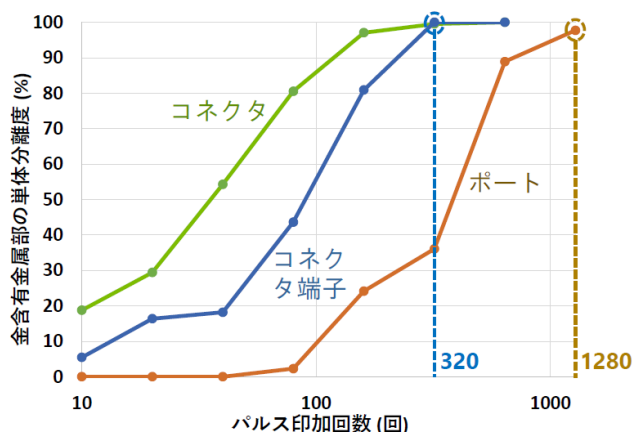


図 1 6 電気パルスの印加回数と中品位素子の単体分離度の推移

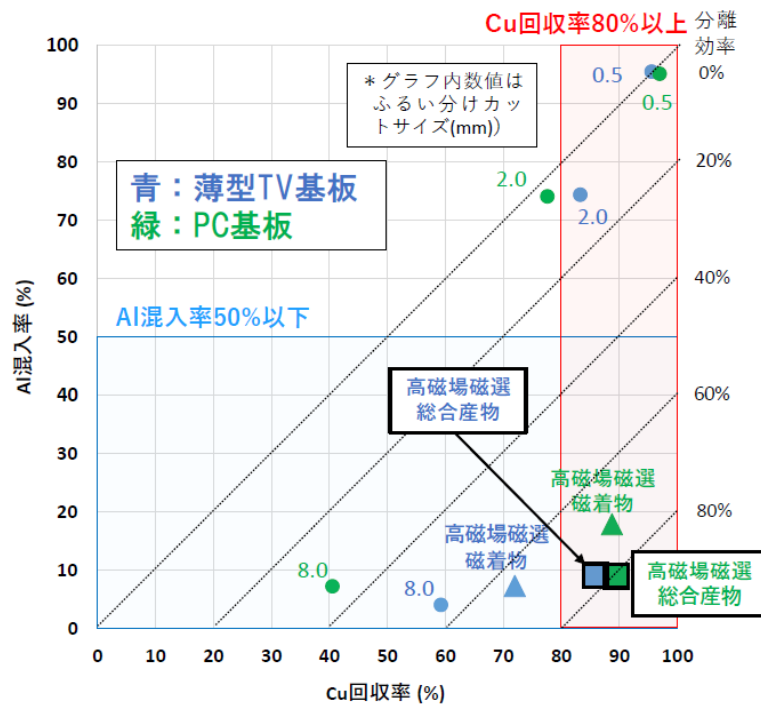


図 17 単体分離後の中品位素子を対象とした物理選別の結果

- ・ 低温加熱によって素子類を取り除いた基板ベースを対象に、主に基板中の銅線箔とアルミニウムを含有するガラス繊維の分離を目的とした焙焼試験を実施した。焙焼温度は 300～650℃の範囲で変化させ、臭素の除去率および銅とアルミニウムの分離効率について調査した。
- ・ 450～500℃の焙焼条件において、臭素の除去率および銅とアルミニウムの分離効率ともに良好な結果を示し、特に 500℃の焙焼条件においては臭素除去率 90%以上という結果が得られた。
- ・ ハンマークラッシャなどの強い衝撃が伴う粉碎方法では、基板中のガラス繊維が綿状に膨れ上がり、その後の選別が困難になる。そこで基板中のガラス繊維が綿状に膨らむことを防ぐため、焙焼後の基板を二軸破碎機（BITEK）で一次粉碎した後、衝撃粉碎機（マキノ式粉碎機）によって二次粉碎を実施した。また、マキノ式粉碎機については、衝撃板や固定板の有無によって綿状化をより抑えられる条件を調査した。その結果、衝撃板なし・固定板ありの条件が最適であることを確認した。
- ・ 粉碎後の基板を対象にふるい分けを実施し、銅とアルミニウムの分離効率が最大となるふるい分け時間を調査した。その結果、ふるい分け時間 20 分が最適条件であることを確認した。
- ・ デスクトップパソコンの廃電子基板・廃家電基板ともに「500℃焙焼→二段階粉碎→ふるい分け 20 分」の条件で、銅とアルミニウムに係る最大の分離効率を示すことを確認した。

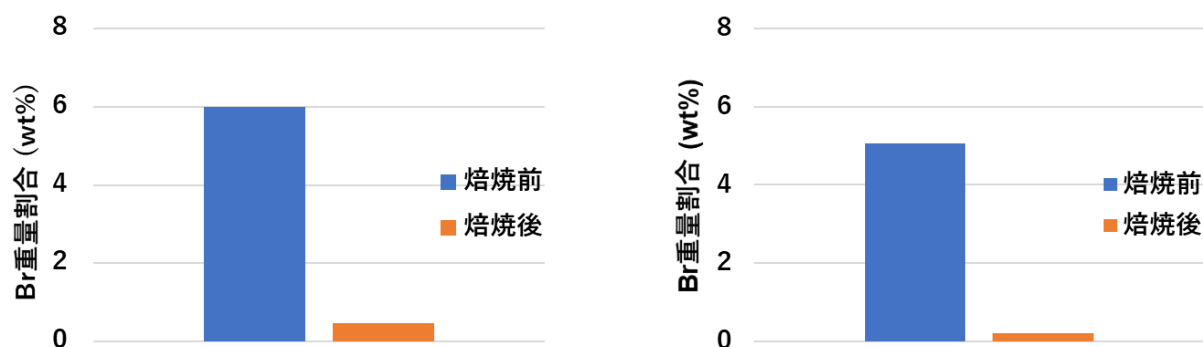


図 18 焙焼前後における臭素含有率の変化（左：デスクトップパソコンの基板、右：廃家電基板）

表 4 最大の分離効率を示した基板ベース部の焙焼・二段階粉碎・ふるい分けの結果

	ふるいの 目開き mm	Cu 回収率 %	Al 除去率 %	Cu- Al 分離効率 %	Br 除去率 %
デスクトップパソコンの 基板	8.0	86.8	47.5	34.2	92.4
廃家電基板	4.0	81.2	56.3	37.6	96.0

(c) 除去物等の有効利用等

【概要】

低温加熱によって素子類を取り除いた基板ベースを更に加熱して熱分解し、揮発成分をエネルギー資源として利用する可能性を検討した。家電から回収された廃電子基板には臭素系難燃剤が多く含まれているため、基板の熱分解生成物には臭素化合物が多く含まれている。そのため、鉄を脱臭素触媒あるいは臭素の捕集剤として利用し、液体生成物（以下、「オイル」という）を通常のボイラー用燃料として利用することを目的に、臭素濃度を 1,000ppm 以下にすることができる適切な反応条件を調査した。

【成果】

- 基板の熱分解時の臭素等の挙動を確認するため、最初は基板を模したエポキシ板（EP 板）を用いて予察試験を行い、次にデスクトップパソコンの基板ベース部（PC 基板）を使用して試験を行った。
- PC 基板を 400℃から 600℃の温度範囲で 60 分間熱分解し、生成したオイルに含まれる有機臭素および臭化水素の濃度を測定したところ、オイル中に含まれる有機臭素濃度は反応温度が高くなるに従って低下した。他方、オイル中の臭化水素濃度は、反応温度が高くなるに従って上昇した。

- ・ 熱分解時に鉄粉を添加すると、有機臭素濃度、臭化水素濃度は共に低下したことから、鉄粉の添加が有機臭素の分解や臭化水素の低減に有効であると判断された。ただし、反応温度が高くなるに従って臭化水素の捕集力は低下した。
- ・ PC基板のみを熱分解して生成したオイルを水で洗浄しても、臭化水素濃度はあまり減少しなかった。一方、鉄粉を添加して熱分解した場合、生成したオイルを上と同重量の水で洗浄したところ、臭化水素濃度は1回の洗浄で大幅に減少した。
- ・ 以上により、熱分解時の鉄粉の添加および水洗浄によって、オイル中の臭素濃度を目標値以下にすることができ、通常のボイラー用燃料として利用できる可能性が示唆された。

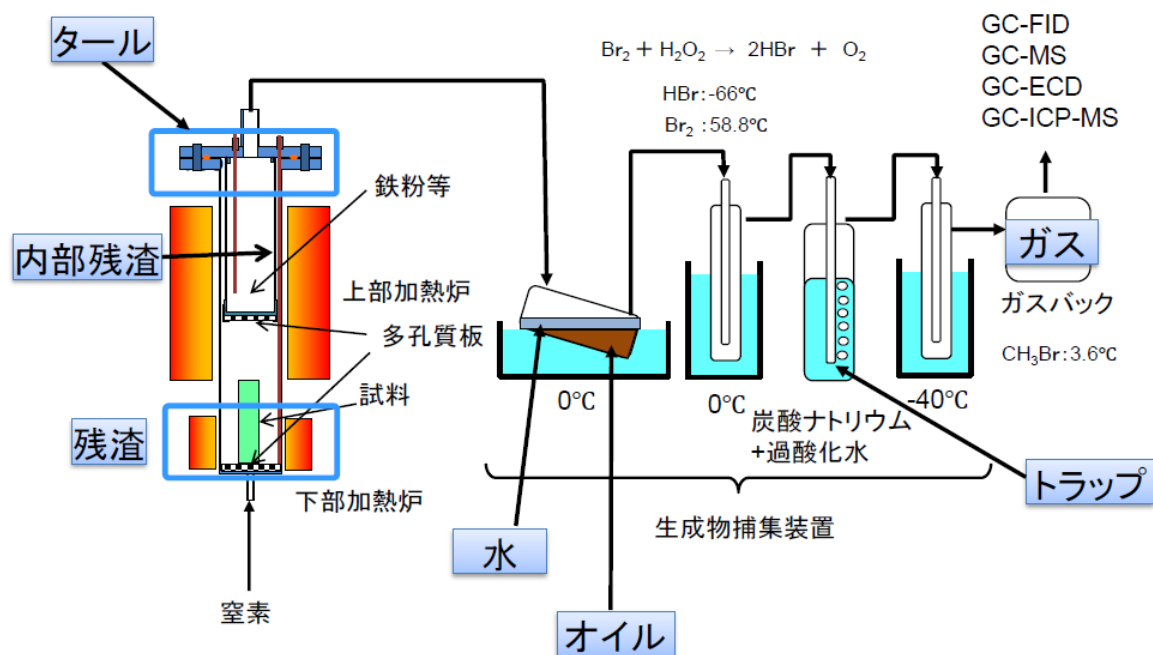


図 19 試験で使用した熱分解反応装置

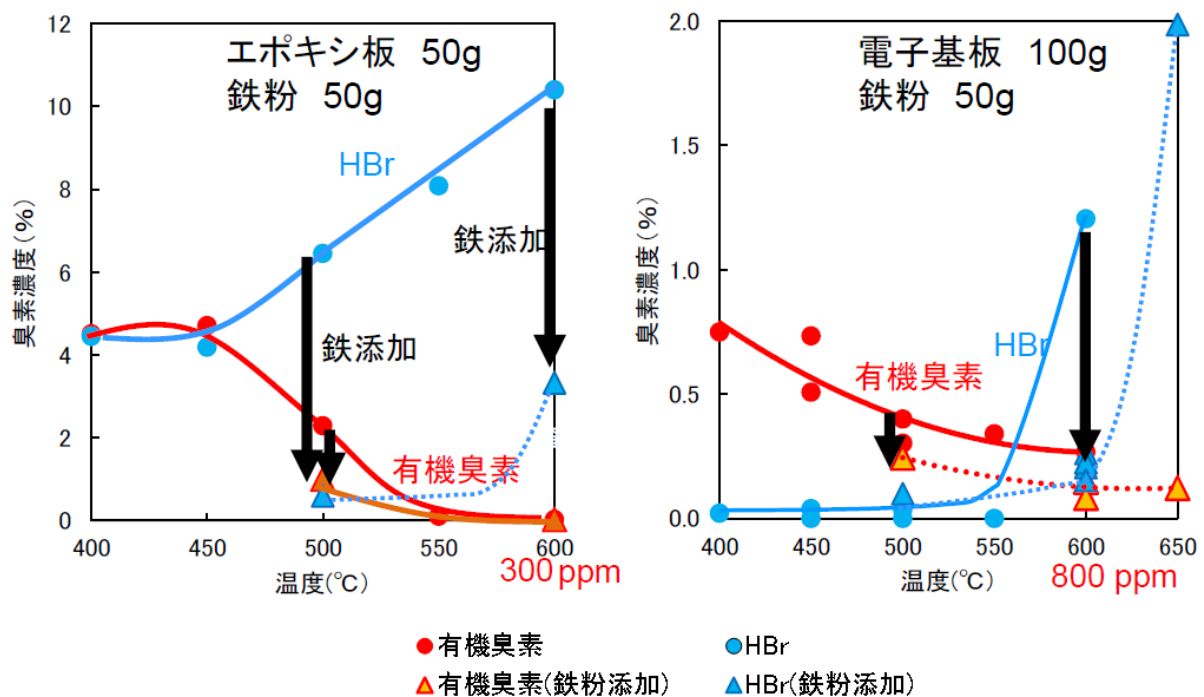


図 20 オイル中の有機臭素および HBr に対する反応温度および鉄粉の影響

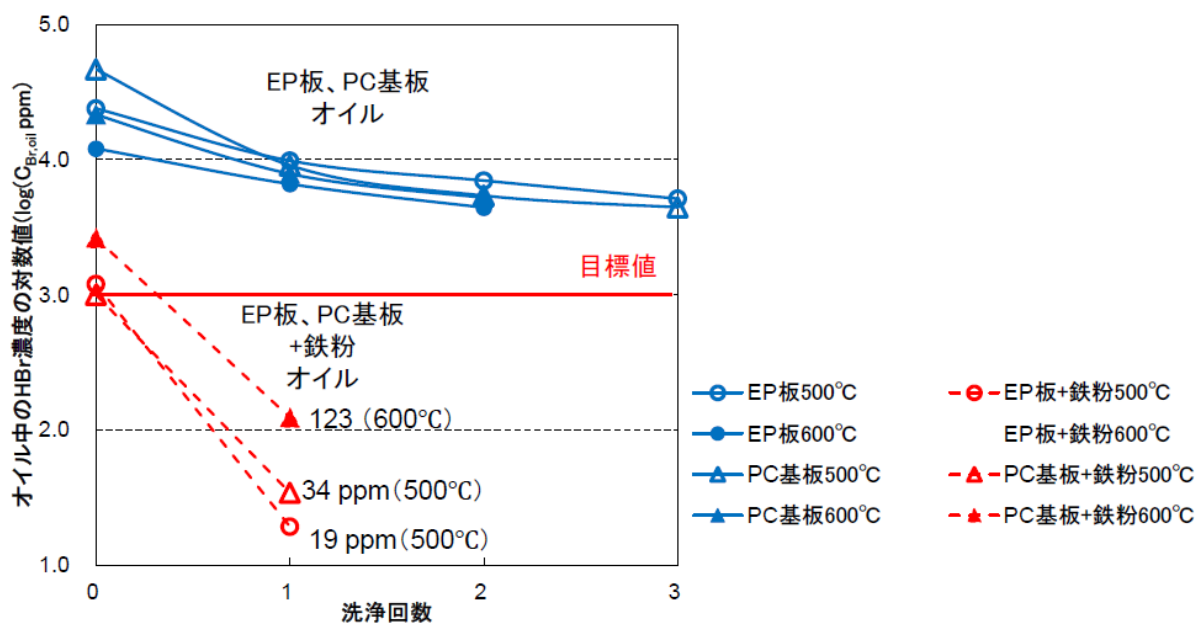


図 21 オイル中の HBr に対する鉄粉および水洗浄の効果

(d) 廃電子基板の最適な銅製錬原料化のプロセス検討

【概要】

(a)～(c)で得られた成果に基づき、廃電子基板を高品質な銅製錬原料にするための最適な選別フロー（本項において、「確立した選別フロー」という）を作成した。さらに、確立した選別フローは工程数などがやや過剰であることから、そのマテリアルバランスに基づき、必要な工程の

取捨選択や回収物の分配の調整（どの産物を銅製錬向け原料にするかなど）を行った。その後、その結果得られた複数の選別パターンを対象に経済性評価を行った。

また、最も経済性の高かった選別パターンについては、選別によって得られた産物（以下、「選別処理後の基板」という）を製錬所に供給するメリットも試算した。

さらに、選別処理後の基板を原料とした場合、どの程度の CO₂ 削減効果が得られるかについての試算も行った。

【成果】

- ・ デスクトップパソコンの廃電子基板の選別による銅・貴金属の濃縮および忌避元素の除去を想定し、確立した選別フローにおけるマテリアルバランスを作成した。
- ・ 確立した選別フローを対象に、年間 10 万 t 規模の選別処理にかかるコスト試算を行った。処理に要する電力は約 1,450kw と見積もられたことから、電力単価を 14 円/kWh、選別にかかる作業量を 1 日 16 時間操業（計 12 人が作業に従事）と仮定した場合、選別処理の原単価は約 1,690 円/t と算定された。
- ・ 上述したマテリアルバランスに基づき、合理的と判断された 2 つの選別パターンを抽出して、経済性評価の比較を行った。1 つは製錬忌避元素がやや多く残るものの、銅製錬所への銅・貴金属の分配を最大限行う「鉛製錬非活用パターン」で、素子選別工程の一部が不要であり、プロセスを簡素化できる利点がある。もう 1 つは「鉛製錬活用パターン」で、銅製錬所に分配する部材中の製錬忌避元素を最大限除去しつつ、鉛製錬所を活用することで有価物の回収率も十分に確保できるが、回収物の種類が多く、鉛製錬非活用パターンに比べてプロセスが複雑化する。なお、いずれの選別パターンにおいても、本研究開発の銅製錬所向け原料の目標値である銅 80%以上回収およびアルミ 50%以上除去を満たすような回収物の分配とした。
- ・ なお、国内の銅、鉛、亜鉛製錬所は、それぞれの特徴を生かしたネットワークを構築し、各製錬所で発生する廃棄物中の有価物を最大限回収するよう努めている。鉛製錬活用パターンは、こうした既存のネットワークを活用することで、有価物の回収率を維持しつつ（銅製錬所で回収できない有価物も一部回収し）、銅製錬所向け原料からの一層の製錬忌避元素除去を目指したものである。
- ・ 各選別パターンで得られた回収物は、銅製錬所、鉛製錬所に供給されるものと、はんだ（Sn リサイクル原料）、高 Al 含有原料、ステンレス（SUS）、スクラップに分別される。焙焼工程における油化回収物（オイル）は、ボイラー燃料としての再利用を想定した。上記のいずれの供給先にも適さない回収物は、廃棄処分（その他）とした。
- ・ 各選別パターンの選別プラントにかかる経済性は、「選別プラントの営業利益＝選別処理後の原料価値－生基板の価値－各種コスト」という計算式で試算し、選別プラントの営業利益が正の場合は選別プロセスに経済性があると判断した。なお、生基板の価値とは選別処理を行う前の基板原料の価値、各種コストは選別プラントにおける選別コストと発生する残渣の処理コストである。
- ・ 経済性評価の結果、選別プラントの営業利益は、原料 1t あたり、鉛製錬非活用パターンでは 3,976 円、鉛製錬活用パターンでは 11,037 円となった。つまり、いずれのパターンでも経済性があるが、鉛製錬活用パターンの方が、経済的に有利になることが認められた。以上の

結果から、リサイクル原料を処理する際は鉛製錬所の活用を念頭に入れた積極的な忌避元素の分離を行うことが、有価物回収の観点だけではなく経済的にも望ましいと評価された。

- ・ 選別プラントの設備導入にかかる費用の見込みと投資回収期間についての試算も行った。年間 10 万 t 規模の選別プラントの建設に必要な費用は、およそ 40 億円と見込まれた。これは、同規模のリサイクル原料や廃棄物を扱う工場の建設事例や、導入する設備価格の概算等から試算したものである。すなわち、年間 10 万 t でフル操業した場合の投資回収期間は、鉛製錬非活用パターンでは約 10 年、鉛製錬活用パターンでは約 4 年となる。

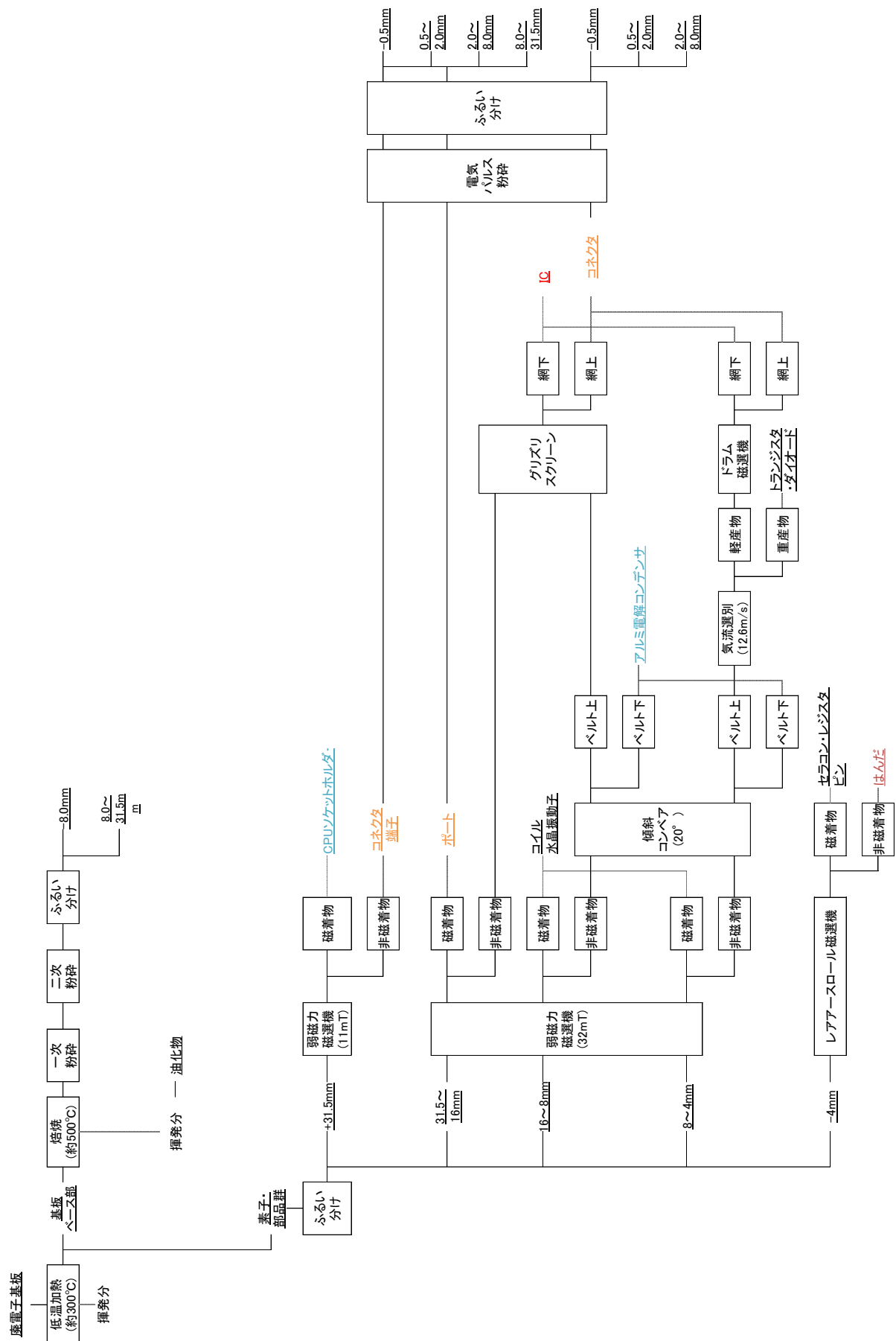


図 2 2 確立した選別フロー

表5 マテリアルバランス

重量			品位										分配															
wt%			Au	Ag	Pd	Cu	Al	Sn	Pb	Cr	Ni	Sb	Br	Si	その他合計	Au	Ag	Pd	Cu	Al	Sn	Pb	Cr	Ni	Sb	Br	Si	
金素基板	100.0%	0.0052	0.0571	0.0002	18.2	4.2	2.2	0.1	0.5	0.4	0.6	3.8	3.9	66.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	基板ベーズ部	40.9%	0.0001	0.0037	0.0000	25.0	3.2	1.6	0.3	0.0	0.0	5.2	8.5	56.3	100.0	0.0	67.0	17.1	56.2	30.9	23.1	72.5	0.0	0.0	0.0	0.0	56.0	
	500℃焼成分	12.2%	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.3	0.0	85.7	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	46.0	
	焼後基板ベーズ部	28.7%	0.0001	0.1335	0.0001	35.6	4.5	2.3	0.4	0.0	0.0	13.0	12.0	43.8	100.0	0.4	67.0	17.1	56.2	30.9	23.1	72.5	0.0	0.0	0.0	0.0	10.1	
	-8mm	21.5%	0.0001	0.1607	0.0002	43.5	3.9	2.6	0.2	0.0	0.0	0.0	1.6	10.4	37.6	100.0	0.4	60.4	15.4	51.4	20.2	25.1	36.3	0.0	0.0	0.0	9.1	
素子・はんだ面	+8mm	7.2%	0.0001	0.0523	0.0001	12.2	6.2	1.3	0.7	0.0	0.0	0.0	6.6	17.0	62.2	100.0	0.0	6.6	1.7	4.8	10.7	4.0	36.3	0.0	0.0	0.0	0.9	
	4-8mm	57.5%	0.0001	0.0328	0.0003	13.5	5.0	2.8	0.1	0.9	0.7	1.1	2.9	0.7	71.6	100.0	99.6	33.0	82.9	43.8	69.1	70.9	27.5	100.0	100.0	44.0	38.7	
	-4mm	3.7%	0.0001	0.2244	0.0043	1.6	0.7	37.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	57.9	100.0	0.1	14.9	51.0	0.1	0.4	61.2	3.1	0.2	27.9	0.5	0.0	0.1	
	セラミックコンデンサ	0.7%	0.0001	0.5315	0.0045	1.1	0.1	20.1	0.3	0.1	15.0	0.0	0.0	0.6	1.5	0.1	6.1	12.9	0.1	0.0	0.6	1.5	0.1	27.3	0.0	0.0	0.0	
	レジスタ	0.1%	0.0025	3.0466	0.0797	1.1	20.2	2.5	1.2	0.5	1.4	0.0	0.0	1.3	98.7	100.0	0.1	64	38.1	0.0	0.0	0.6	1.0	0.1	0.4	0.0	0.0	
はんだ	ヒン	0.6%	0.0000	0.1000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	はんだ	1.4%	0.0000	0.1000	0.0000	0.7	0.0	98.6	0.1	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.3	100.0	0.0	2.4	0.0	0.1	0.0	60.4	0.7	0.0	0.2	0.5	0.0	
	ブラ片・基板ぐす等	0.9%	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	4-8mm	4.5%	0.0183	0.0623	0.0001	7.2	18.5	0.4	0.1	0.1	0.4	0.2	0.5	8.7	63.7	100.0	15.9	4.9	2.8	1.8	20.1	0.8	4.3	0.5	5.3	1.6	0.7	7.0
	コイル	0.2%	0.0001	0.0009	0.0000	20.1	1.2	0.1	0.0	0.2	1.8	0.0	0.0	1.6	75.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.1	1.1	0.0	0.0	0.1
トランジスタ・ダイオード	水晶振動子	0.2%	0.0191	0.0000	0.0000	12.9	11.0	0.3	0.3	0.3	5.6	0.0	0.0	6.3	63.1	100.0	0.8	0.7	0.0	0.2	0.6	0.0	0.5	0.1	3.4	0.0	0.0	0.3
	アルミ電解コンデンサ	1.8%	0.0006	0.0000	0.0000	0.2	42.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.1	74.6	100.0	7.9	1.3	1.7	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	
	IC	0.2%	0.1808	0.3214	0.0018	3.3	2.7	2.0	0.7	0.0	0.1	2.1	6.2	4.0	68.4	100.0	5.5	0.7	0.0	5.0	2.9	1.0	0.0	0.0	1.5	18.9	8.9	3.9
	コネクタ	0.4%	0.0052	0.0071	0.0000	16.7	2.2	0.4	0.0	0.0	0.1	2.1	6.2	4.0	68.4	100.0	0.4	0.0	0.0	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	1.4	0.7	0.3
	-0.5mm	0.0%	0.0179	0.0031	0.0000	33.9	2.1	1.2	0.0	0.0	0.3	0.8	2.1	2.7	56.9	100.0	1.1	0.2	0.0	0.6	0.2	0.2	0.0	0.0	0.2	0.4	0.2	0.0
IC	0.5-2.0mm	2.5%	0.0041	0.0072	0.0000	24.5	2.3	0.4	0.0	0.0	0.1	4.3	3.3	65.1	100.0	2.3	0.2	0.3	0.0	3.4	1.4	0.5	0.0	0.0	0.8	0.9	2.9	1.5
	+2.0mm	2.6%	0.0047	0.0036	0.0000	7.0	2.1	0.3	0.0	0.0	0.1	4.3	8.5	4.8	73.0	100.0	2.0	0.2	0.3	1.0	1.3	0.3	0.0	0.0	0.5	18.5	5.9	2.3
	IC	0.4%	0.1808	0.3214	0.0018	3.3	2.7	2.0	0.7	0.0	0.1	0.0	0.0	16.1	74.6	100.0	13.9	2.3	3.0	0.1	0.3	0.4	2.0	0.0	0.1	0.0	0.0	1.1
	ブラ片・基板ぐす等	1.1%	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	16-31.5mm	27.7%	0.0119	0.0206	0.0002	19.7	2.0	0.5	0.1	0.3	0.3	1.6	4.4	4.0	67.1	100.0	83.2	10.0	26.1	30.0	13.5	6.7	13.7	17.9	24.9	70.9	32.0	22.2
ポート	ポート	9.5%	0.0016	0.0004	0.0004	30.4	2.1	0.6	0.0	1.0	0.6	1.2	3.8	4.3	56.0	100.0	2.9	0.7	15.8	15.8	4.8	2.5	6.7	17.9	150.9	18.6	9.3	7.2
	-0.5mm	0.4%	0.0086	0.0188	0.0018	27.6	2.4	2.5	0.0	1.5	1.2	0.5	1.7	4.4	58.2	100.0	0.7	0.1	3.2	0.6								

表6 選別工程の電力

基板ベース部/素子・はんだ類の分離に関する工程	132 kW
基板ベース部の破碎・選別に関する工程 計	642.5 kW
一次破碎機	165 kW
二次粉碎機	165 kW
ふるい機	112.5 kW
搬送・供給装置 他	200 kW
素子・はんだ類の選別に関する工程	678 kW
ふるい機	113 kW
磁力選別機①	15 kW
磁力選別機②	15 kW
気流選別機 他	135 kW
粉碎機・ふるい機	100 kW
搬送・供給装置 他	300 kW
合計	1452 kW

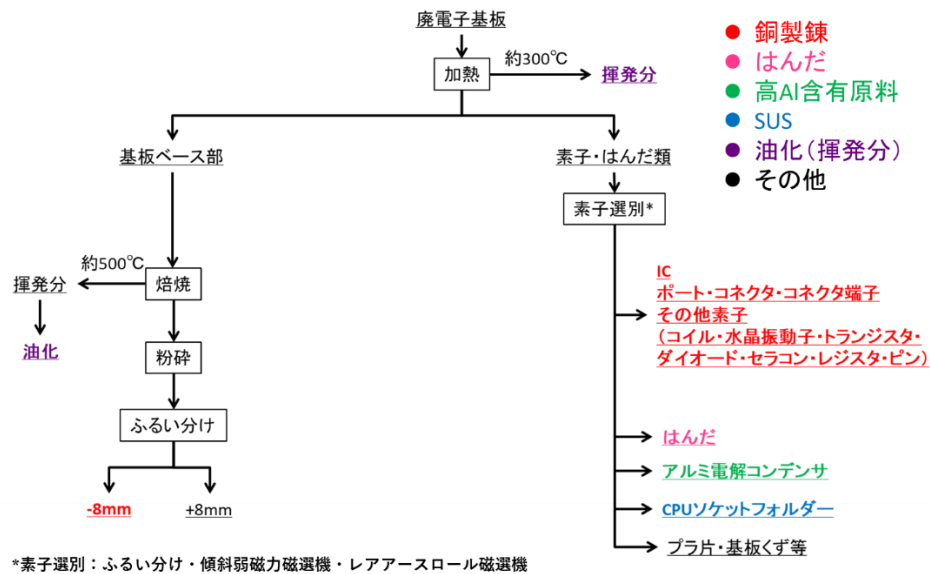


図2-3 鉛製鍊非活用パターン

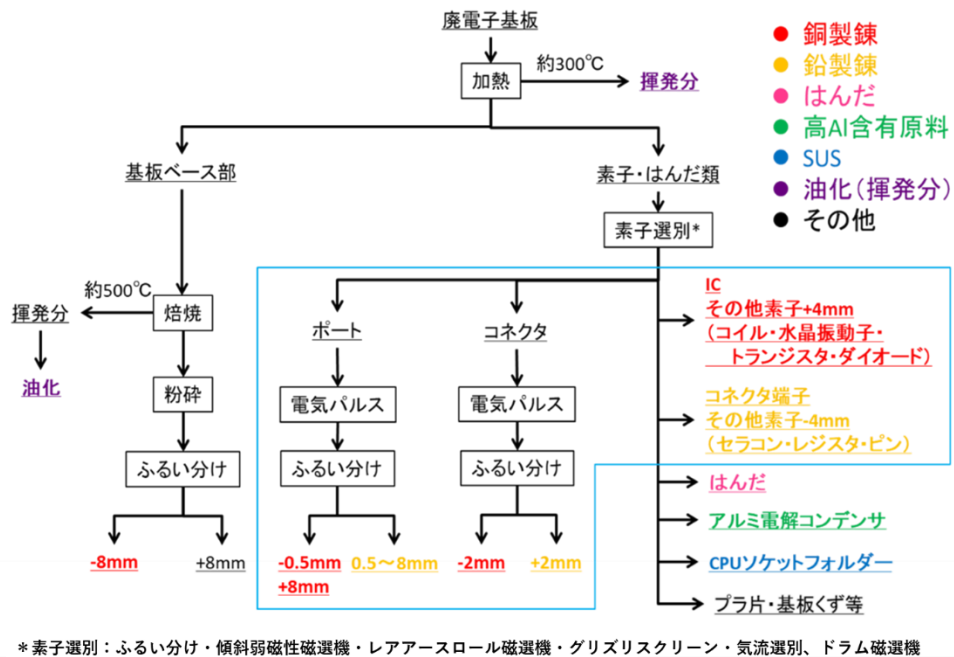


図2-4 鉛製鍊活用パターン

表7 鉛製錬非活用パターンおよび鉛製錬活用パターンのマテリアルバランス

		Au (g/t)	Ag (g/t)	Pd (g/t)	Cu (%)	Al (%)	Sn (%)	Pb (%)	Cr (%)	Ni (%)	Sb (%)	Br (%)
生基板 1,000 kg	品位	52	571	2	18.2	4.2	2.2	0.1	0.5	0.4	0.6	3.8
	分配率 %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

銅製錬 658 kg	品位	79	790	4	26.2	2.6	1.2	0.1	0.2	0.5	0.9	2.6
	分配率 %	99.4	91.0	98.3	95.0	41.0	35.3	63.1	20.1	83.2	99.1	45.8
鉛製錬 0 kg	品位	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	分配率 %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

銅製錬 426 kg	品位	108	1,036	2	34.2	2.8	1.6	0.2	0.2	0.3	0.0	1.1
	分配率 %	88.0	77.2	34.7	80.0	28.9	30.1	49.4	17.2	39.4	2.0	11.9
鉛製錬 232 kg	品位	26	339	7	11.7	2.2	0.5	0.1	0.1	0.7	2.5	5.6
	分配率 %	11.5	13.8	63.6	15.0	12.1	5.2	13.7	2.9	43.9	97.1	34.0

		Au (g/t)	Ag (g/t)	Pd (g/t)	Cu (%)	Al (%)	Sn (%)	Pb (%)	Cr (%)	Ni (%)	Sb (%)	Br (%)
はんだ 14 kg	品位	0	1,000	0	0.7	0.0	98.6	0.1	0.0	0.1	0.2	0.0
	分配率 %	0.0	2.4	0.0	0.1	0.0	60.4	0.7	0.0	0.2	0.5	0.0
高Al含有原料 47 kg	品位	6	0	0	0.2	42.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	分配率 %	0.5	0.0	0.0	0.1	48.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SUS 30 kg	品位	0	3	0	0.5	0.0	0.0	0.0	14.2	2.1	0.1	0.0
	分配率 %	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	79.9	16.6	0.5	0.0
油化(揮発分) 140 kg	品位	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.7
	分配率 %	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	54.0
その他 112 kg	品位	0	338	0	7.9	4.0	0.8	0.5	0.0	0.0	0.0	0.1
	分配率 %	0.0	6.6	1.7	4.8	10.7	4.0	36.3	0.0	0.0	0.0	0.2

共通項目	はんだ 14 kg	品位	0	1,000	0	0.7	0.0	98.6	0.1	0.0	0.1	0.2	0.0
	分配率 %	0.0	2.4	0.0	0.1	0.0	60.4	0.7	0.0	0.2	0.5	0.0	
高Al含有原料 47 kg	品位	6	0	0	0.2	42.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	分配率 %	0.5	0.0	0.0	0.1	48.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
SUS 30 kg	品位	0	3	0	0.5	0.0	0.0	0.0	14.2	2.1	0.1	0.0	
	分配率 %	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	79.9	16.6	0.5	0.0	
油化(揮発分) 140 kg	品位	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.7	
	分配率 %	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	54.0	
その他 112 kg	品位	0	338	0	7.9	4.0	0.8	0.5	0.0	0.0	0.0	0.1	
	分配率 %	0.0	6.6	1.7	4.8	10.7	4.0	36.3	0.0	0.0	0.0	0.2	

表8 経済性評価の方法

	選別処理後の原料価値	生基板の価値	各種コスト
銅製錬	有価物の含有量(Au・Ag・Pd・Cu)×製錬実収率×金属建値 － R/C	－	選別プラントの 工程コスト
	選別処理の付加価値*		
鉛製錬	有価物の含有量(Au)×製錬実収率×金属建値 － R/C	－	
	－ 忌避元素含有量 (Sb・Sn) × ペナルティ単価		
油化・ その他	－	－	残渣処理コスト**

*選別処理の付加価値 = 忌避元素除去によって低減された製錬所における潜在的被害額
= 忌避元素(Al・Br・Sb・Ni・Cr)の除去量 × 潜在被害単価

** 油化・その他の部材は逆有償になると考え計上

(はんだ・SUS・高Al含有原料は有償で売却可能とみられるが、量が少ないため0円とした)

表9 経済性評価の結果

	選別処理後の原料価値 【円/生基板-t】	生基板の価値 【円/生基板-t】	各種コスト 【円/生基板-t】	選別プラントの 営業利益 【円/生基板-t】
鉛製錬非活用 パターン	243,776	234,411	5,390	3,976
鉛製錬活用 パターン	250,838			11,037

- ・ 日量処理能力 1,000t の自熔炉において、既存原料を 1 日 800t、廃電子基板を 1 日 200t 処理する場合を想定し、銅製錬所において選別処理後の基板を投入するメリット（1 日当たり）を試算した。この際、銅製錬における一般的なスラグ組成（Fe/SiO₂ が 1.2、Al₂O₃ 品位が 5%）となるように、珪石および黄鉄鉱の添加量を調整した。
- ・ 試算は、①基板を入れなかった場合（既存原料 800t のみを処理した場合）、②既往の操業条件で焙焼した基板を限界量投入した場合、③選別処理後の基板を②と同量投入した場合、④選別処理後の基板を限界量投入した場合の 4 条件について実施した。なお、②と④における限界量とは、前提条件であるスラグ組成（Fe/SiO₂ : 1.2・Al₂O₃ 品位 : 5%）を保ったまま、200t の容量に投入可能な基板原料の上限値を表している。
- ・ ②と④の試算結果を比較したところ、選別処理後の基板を原料とすることで「珪石・黄鉄鉱の投入量が減少」「基板原料の投入可能量が 1.6 倍に増加」「スラグ発生量が約 6%減少」「営業利益が 2.4 倍向上」という結果になった。
- ・ 以上のとおり、廃電子基板を本研究開発で確立したプロセスによって選別することは、リサイクル原料の受入側である製錬所に大きな利益をもたらす。

表 10 廃電子基板処理量試算の前提条件（各投入原料の組成）

	Cu	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Au
既存原料*	25%	26%	18%	2.8%	4.0g/t
スラグ	0.8%	37%	31%	5.0%	0.050g/t
珪石	-	-	100%	-	-
黄鉄鉱	-	47%	-	-	-
生基板	18%	6.4%	8.3%	7.9%	52g/t
焙焼基板**	26%	9.2%	12%	11%	75g/t
選別処理後の基板***	34%	5.7%	16%	5.3%	108g/t

*既存原料の品位は銅精鉱・珪石・故銅等を含んだ値

**生基板を焙焼処理したもの（現行の製錬プロセスでは、生基板を製錬原料として投入する前に焙焼処理するのが一般的）

***鉛製錬活用パターンの銅製錬原料の組成を適用

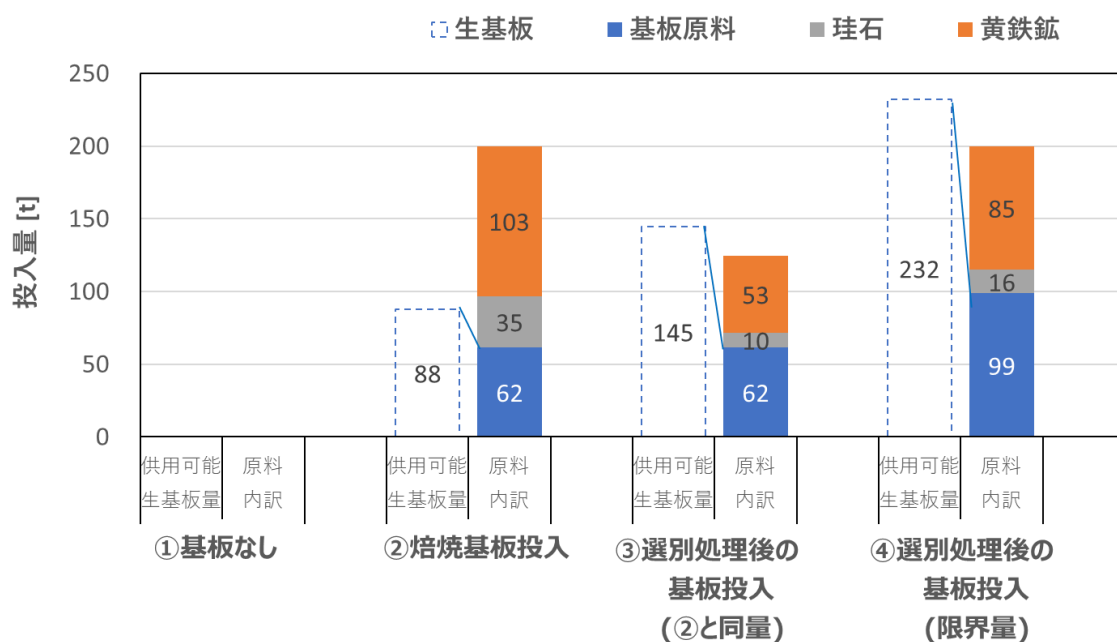


図 2 5 製錬所において選別処理後の基板を投入するメリット (原料投入量)

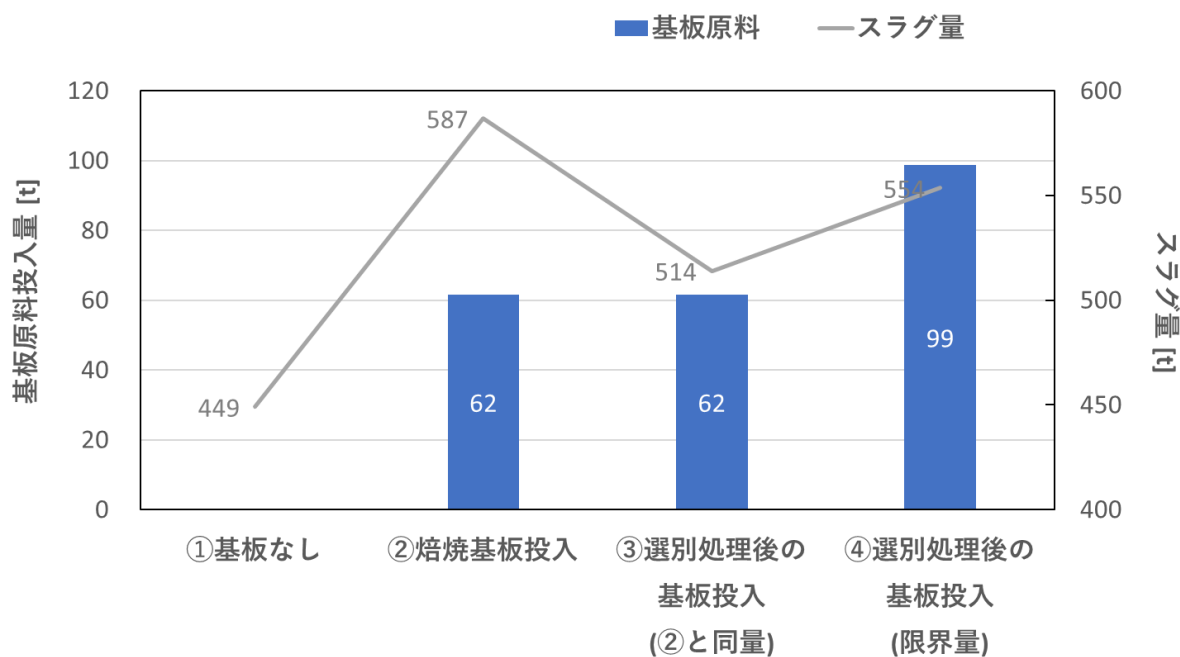


図 2 6 製錬所において選別処理後の基板を投入するメリット (スラグ発生量)

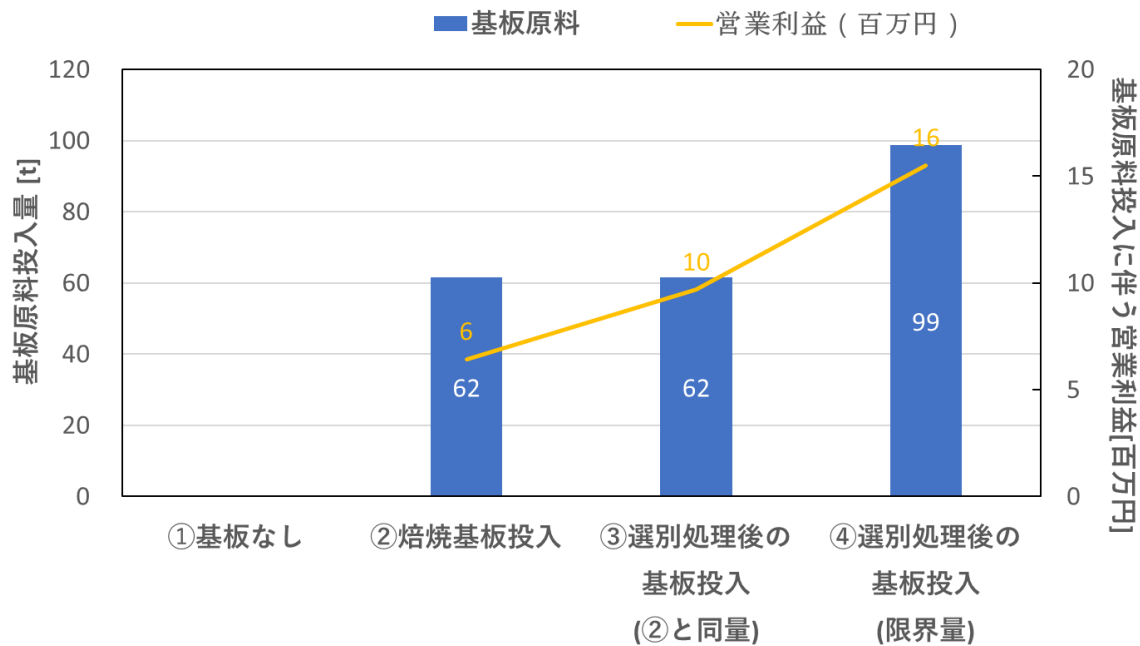


図 2-7 製錬所において選別処理後の基板を投入するメリット（営業利益）

- ・ 選別処理後の基板を原料とした場合の CO2 削減効果についても試算した。ここでは、粗銅、電気銅をそれぞれ年間 45 万 t 生産する自溶炉法による銅製錬所において、投入原料のうち 8 割を既存原料、残りの容量で基板を処理することを前提条件とした。その上で、一般的に行われている焙焼基板を原料とした場合と、本研究開発で確立した選別処理後の基板を原料とした場合との比較を行った。
- ・ 製錬所のみ CO2 削減効果を試算した結果、選別処理後の基板を原料とした場合は年間 4.2 万 t の CO2 削減が見込まれることが分かった。これは、焙焼基板を投入した場合の約 8% の CO2 削減に相当する。
- ・ 続いて、選別プラントや鉱山から排出される CO2 も考慮し、電気銅生産のサプライチェーン全体で評価することとした。試算の結果、選別プラントから排出される CO2 は年間 1.4 万 t、鉱山における CO2 排出量削減効果は年間 2.7 万 t となった。鉱山での排出量削減効果は、銅精鉱の一部をリサイクル原料で代替することに伴うものである。
- ・ 以上の結果を集計したところ、選別処理後の基板を原料とした場合、サプライチェーン全体で年間 5.6 万 t の CO2 削減が見込まれることが分かった。これは、同じ前提条件で焙焼基板を投入した場合との比較で、約 6% の CO2 削減に相当する。
- ・ 以上のとおり、選別処理後の基板を投入することは、CO2 排出量削減の観点でもメリットがあることが明らかとなった。

表 1 1 CO2 排出量の試算結果（製錬所）

	全原料に占める 基板の割合 %	銅生産量 Cu-t ／原料処理量-t	製錬所におけるCO ₂ 排出量	
			CO ₂ -kg/Cu-kg	CO ₂ -万t/年
焙焼基板	6.2	0.21	1.19	53.7
選別処理後の基板	9.9	0.23	1.10	49.5

表 1 2 CO2 排出量の試算結果（選別プラント）

炉に投入可能な選別処理後の基板	19.4 万t/年
選別処理前の生基板の量	46 万t/年
選別プラントで排出するCO ₂ 量	1.4 CO ₂ -万t/年

表 1 3 CO2 排出量試算結果（鉱山）

	リサイクル原料由来の 銅量 Cu-万t/年	鉱山でのCO ₂ 排出量	
		CO ₂ -kg/Cu-kg	CO ₂ -万t/年
焙焼基板	3.3	0.85	35.4
選別処理後の基板	6.5		32.7

表 1 4 CO2 排出量試算結果（全体）

	製錬所での CO ₂ 排出量	基板前処理工程 でのCO ₂ 排出量	鉱山での CO ₂ 排出量	合計CO ₂ 排出量
焙焼基板	53.7	No Data	35.4	<u>89.1</u>
選別処理後の基板	49.5	1.4	32.7	<u>83.5</u>

② リサイクル原料の製錬挙動研究

廃電子基板などのリサイクル原料中にはアルミニウムが多く含まれるため、リサイクル原料の処理量増加に伴い、銅のマット溶錬におけるスラグ中のアルミナ濃度が増加する。その結果、固体のマグネタイト（スピネル）生成が促進され、スラグの粘性が増すため、マットとスラグの分離性が悪化し、スラグへの銅損失が増える等の問題が生じる。また、廃電子基板に含まれるガラス素材中のマグネシウムやリサイクル原料に含まれるステンレス中のクロムなども、銅製錬に悪影響を及ぼすことが知られている。

本研究開発項目では、製錬忌避元素を含むリサイクル原料を銅製錬炉に投入した場合の製錬忌避元素の挙動について、平衡論および反応速度論の両面から検討し、製錬忌避元素の増加に対応した銅製錬操業のための指針を示すこととした。

(a) リサイクル原料の製錬挙動に関する平衡論的研究

【概要】

本研究では、銅製錬系スラグとして一般的な FeOx-SiO_2 系のスラグを対象に、様々な温度・酸素分圧条件下において Al_2O_3 濃度もしくは MgO 濃度を变化させ、スラグの液相線に係る挙動を確認した。また、酸素分圧を固定した条件下において、 $\text{FeOx-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系および $\text{FeOx-SiO}_2\text{-MgO}$ 系の状態図における液相線の温度依存性について調査し、加えて温度を固定した条件下において、 $\text{FeOx-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系の状態図における MgO 濃度および酸素分圧の影響を確認した。さらに、 FeOx-SiO_2 系のスラグにおける Cr_2O_3 の影響を調べるため、温度を固定した条件下で濃度および酸素分圧を変化させ、スラグの液相線に係る挙動を確認した。

なお、銅製錬の電解工程においてアンチモンが多量に存在すると、アノードの不動態化の原因となるなどの悪影響を及ぼすことが知られていることから、アンチモン除去能の高いスラグの組成を明らかにするため、温度を固定した条件下で酸素分圧と塩基度 Q ($Q = (\text{mass}\%\text{CaO}) / \{(\text{mass}\%\text{CaO}) + (\text{mass}\%\text{SiO}_2)\}$) を変化させることによって、 FeOx-CaO-SiO_2 系スラグと溶銅中のアンチモンの分配も測定した。

以上の試験結果などにに基づき、平衡論的観点から製錬忌避元素の増加に対応した銅製錬操作のための指針を示した。

【成果】

試験結果などに基づいて提案された、製錬忌避元素の増加に対応した銅製錬の操作指針は以下のとおり。

- ・ Al_2O_3 は FeOx-SiO_2 に 10mass%以上溶解することが可能だが、一般には粘性の関係で 5mass% Al_2O_3 以下が望ましい。 Al_2O_3 含有スラグの液相線に及ぼす p_{O_2} の影響は大きく、 p_{O_2} の増加に伴いスピネルを形成し易くなる。 Al_2O_3 含有スラグでは Fe/SiO_2 を厳格に制御する必要がある。温度の影響も大きく、温度低下はスピネル固相の生成を引き起こす。このことから、 Al_2O_3 濃度、 Fe/SiO_2 、温度管理を厳格に行う必要がある。
- ・ Cr_2O_3 が 0.1mass%以上含まれるとスラグにスピネル固相が析出する。液相線の酸素分圧の依存性は小さいが、 $\log p_{\text{O}_2} = -7.5$ で急激にスピネルが析出し易くなる。 Cr_2O_3 の Cu マット溶錬スラグへの溶解度は極めて小さく、厳格な濃度管理が必要である。
- ・ MgO が 2mass%以上含まれるとスラグにオリビン固相が析出する。5mass% Al_2O_3 が共存すると、 $>3\text{mass}\%$ でオリビンが析出する。スラグ液相線に対する p_{O_2} の影響はスピネル側で大きく、オリビン側で小さい。温度の影響は大きく、温度低下はスピネル固相の生成を引き起こす。このことから、 MgO は厳格な濃度管理が必要である。
- ・ アンチモンは、酸素分圧の増加に伴いスラグ相に分配されやすくなる。温度依存性は測定できなかったが、 $\text{Sb} + 3/4\text{O}_2(\text{g}) = \text{SbO}_{1.5}$ の反応の平衡定数 K の温度依存性により、アンチモンは、温度が低い方ほどスラグに分配されやすい。塩基度 Q が大きな FeOx-CaO 系では、アンチモンは FeOx-SiO_2 系スラグよりもスラグ相に分配されやすくなるものの、分配は 1 より小さく、実際にはスラグには分配され難いことが分かった。つまりアンチモンは、製錬原料として供する前の前処理段階で除去することが望ましいことが明らかとなった。

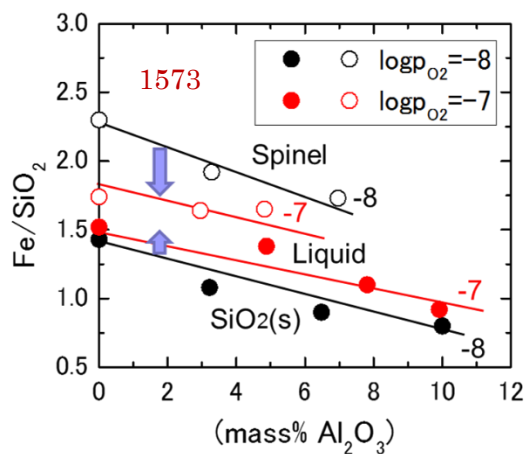


図 2 8 FeOx-SiO₂ 系の液相線に及ぼす Al₂O₃ 濃度と酸素分圧の影響

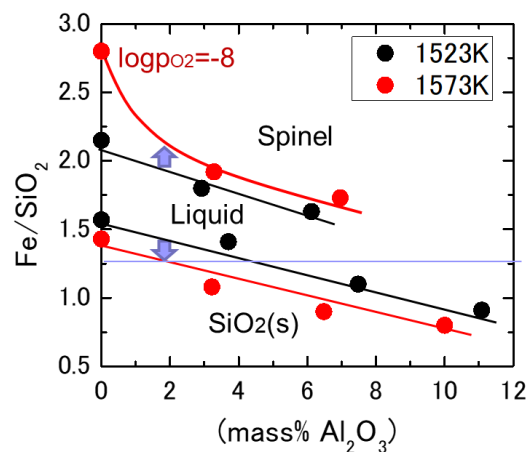


図 2 9 FeOx-SiO₂-Al₂O₃ 系の液相線の温度依存性

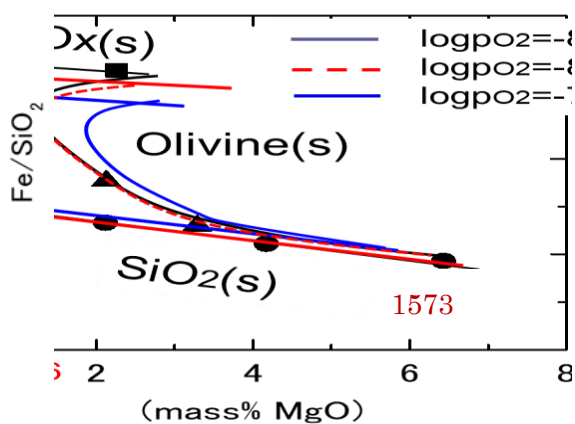


図 3 0 FeOx-SiO₂ 系の液相線に及ぼす MgO 濃度と酸素分圧の影響

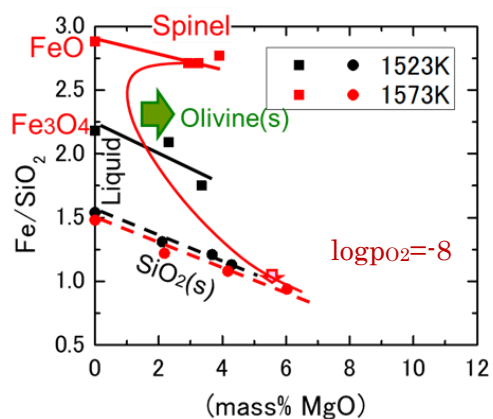


図 3 1 FeOx-SiO₂-MgO 系の液相線の温度依存性

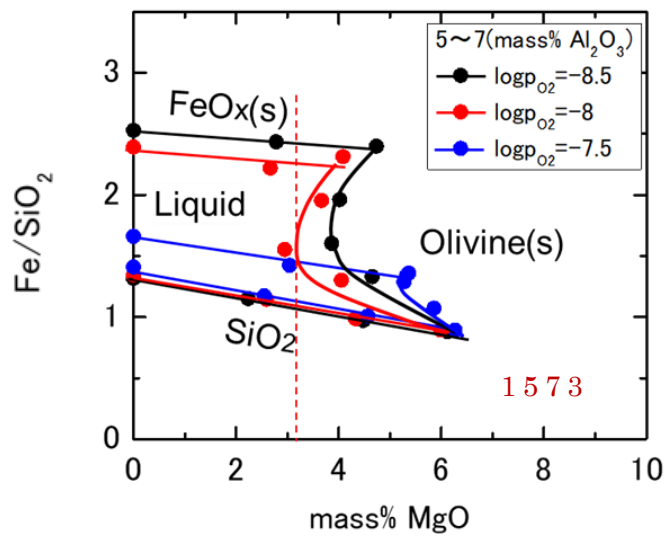


図 3 2 FeOx-SiO₂-Al₂O₃ 系の液相線に及ぼす MgO 濃度と酸素分圧の影響

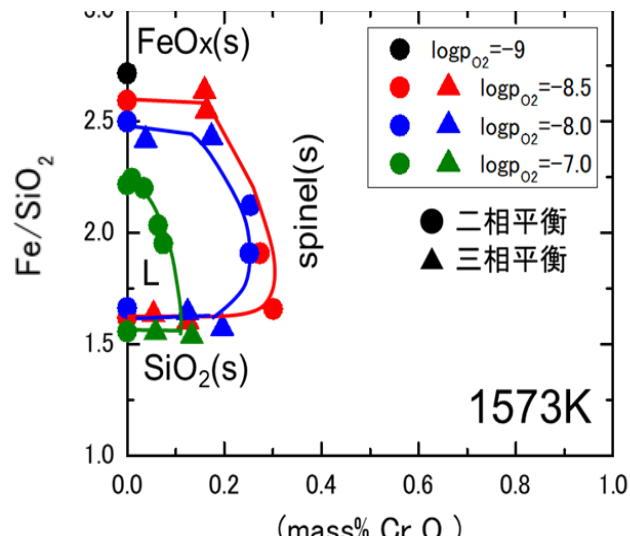


図 3 3 FeOx-SiO₂ 系の液相線に及ぼす Cr₂O₃ 濃度と酸素分圧の影響

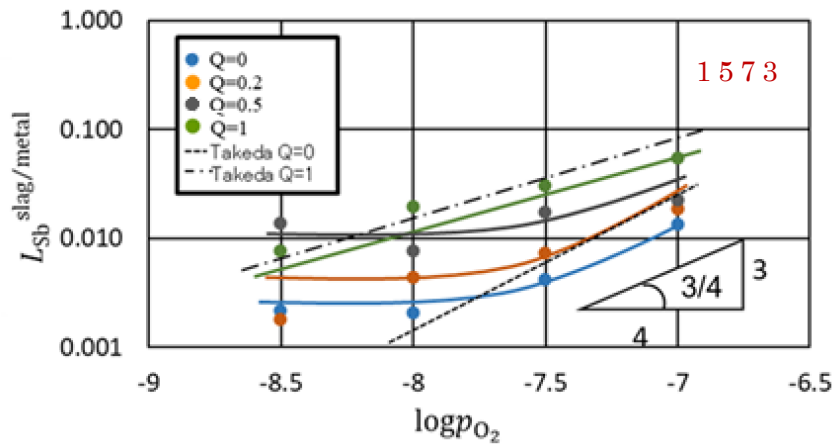


図 3 4 FeOx-CaO-SiO₂ 系スラグと溶銅の Sb の分配と酸素分圧の関係

(b) リサイクル原料の製錬挙動に関する速度論的研究

【概要】

マットとスラグは比重差によって分離するため、分離には一定の時間を要する。したがって、リサイクル原料に対応した銅製錬操業の改善には、相平衡に達するまでの動的な挙動の解析も欠かせない。

本研究では、銅製錬系スラグ中におけるマグネタイト等のスピネル析出挙動とスラグ中への Al₂O₃ 混入の関係を調査した。また、不純物としては Al₂O₃ に限らず、MgO や NiO のスピネル析出に対する速度論的な影響も調査した。加えて、ファイアライト (Fe₂SiO₄) スラグを構成する SiO₂ 濃度 (飽和条件下) の影響も調査した。

さらに、銅製錬系ファイアライトスラグと金属アルミニウム間の反応に関して動的な反応挙動を調査した。これは、銅製錬スラグに金属アルミニウム部材が混入した際の金属アルミニウムの残存状態や時間的な変化 (Al₂O₃ への変化等) の把握を目的としている。

上記の研究を反応速度論的な観点から実施することで、銅製錬炉へのアルミニウム等の不純物混入がスピネル析出に及ぼす速度論的な影響を整理し、それを元に銅製錬操業における不純物対策の具体的提案を行うことを最終目的とした。

【成果】

試験結果などに基づいて提案された、製錬忌避元素の増大による銅溶錬スラグのスピネル析出问题への対策は以下のとおり。

- ・ Al₂O₃ : スラグ中に Al₂O₃ が混入する場合は、攪拌等で即座にスラグ中に均一溶解させることが必要である。スラグ中に均一溶解すれば、速度論的には Al₂O₃ がスピネル成長におよぼす影響は顕著にならないものの、スラグ中に固体 Al₂O₃ (セラミック部材等) が大量に残留する状況は避けることが必要である。なお、固体 Al₂O₃ が残留すると、スラグとの界面で酸化反応を伴わずに Hercynite (FeAl₂O₄) スピネルが短時間で成長し、スラグの酸化により生成した Fe(III) とスピネル中の Al(III) が置換することでスピネル型酸化鉄 (Maghemite, Magnetite) へと変化する。
- ・ MgO : MgO が溶解したスラグでは、著しくスピネル成長が促進される。これは根本的にスラグ中の MgO 濃度を低く保つことが必要であることを示唆しているが、溶錬炉のマグネシア系耐火物からの MgO のスラグへの溶解は避けられない。そのため、炉体冷却による耐火物のスラグコーティングが重要であり、過度の MgO のスラグへの溶解を避ける必要がある。
- ・ SiO₂ : スラグの SiO₂ 濃度が比較的高い場合は、スラグが高粘度化することでスピネル結晶の成長は抑制される。しかしながら、スピネル成長は抑制されたとしても、スラグの高粘度化によるスラグ中のマット懸垂等の重大な問題が発生する可能性が高い。
- ・ NiO : スラグ中に NiO が混入する場合は、NiO によるスラグの酸化が瞬時に進行し、微細な針状結晶 (Fe₇Si₁₀O₁₀) と Ni-Fe 合金が生成する。酸化ニッケルが数 mass% 溶解したスラグのガス酸化では、スピネル成長への影響はほとんど確認されず、影響が大きい固体 Al₂O₃ の混入や MgO の溶解の方を注意する必要がある。
- ・ 金属 Ni : スラグ中に金属 Ni 部材が混入した場合、金属 Ni の酸化は遅いため安定的に長時間残留すると考えられる。そのため、可能な限り空気酸化を促進するとともに、生成した酸化ニ

ツケルを攪拌等により速やかにスラグ中へ溶解させることが必要である。なお、金属 Ni 近傍のスラグは還元効果によりスピネル生成が若干抑制されるが、還元効果はごく近傍のみで大規模溶錬ではスピネル生成に対して影響はほぼ無いと推測される。

- ・ 金属 Al : 溶融スラグ中に金属 Al 部材が混入すると、金属 Al と溶融スラグの界面で酸化物 (Al_2O_3) や Fe-Al 合金が複雑に入り組んだ酸化被膜層が形成される。また、酸化被膜層の最外殻 (スラグとの界面) は薄い金属 Fe 層が覆うため、溶融スラグ中で金属 Al (内部は Al-Fe 合金化) が安定的に長時間残留することとなる。そのため、スラグの強攪拌により金属 Al を分断したり、強制的な空気酸化によりアルミナ (Al_2O_3) にしてスラグ中に均一溶解させたりすることが必要である。

表 1 5 製錬回避元素の増加に対応するための銅製錬所における操業指針まとめ

忌避元素	視点	スラグへの影響				制御方法
		状況	溶解度	p _{O2} の影響	温度	
Al ₂ O ₃	平衡論		10mass%以上 一般には粘性の関係で 5mass%の操業	大きい スピネル析出 Fe/SiO ₂ の制御必要 at logP _{O2} =-1	大きい > 1573K	濃度とFe/SiO ₂ の制御
	速度論	固体Al ₂ O ₃ とスラグ界面でスピ ネル成長が顕著			at 1573K	攪拌等でスラグ中に均一溶解させる スラグ中に固体Al ₂ O ₃ を大量に残留 させない
金属Al	速度論	還元生成したFeと合金化 金属Alと熔融スラグ間の反応 阻害	反応は遅い	at Ar雰囲気	at 1573K	反応速度は遅く平衡までは到達せず
	平衡論		> 2mass%でオリビン 5mass%Al ₂ O ₃ では > 3mass%でオリビン	スピネルで大きく、 オリビンは小さい	大きい > 1573K	MgO濃度の低減(< 3mass%) 酸素分圧の低下
MgO	速度論	スラグ中にMgOは均一溶解 スラグ中で著しくスピネル生成 が促進	溶解性 MgO > Al ₂ O ₃	at logP _{O2} =-1	at 1573K	スラグの低MgO化が必要 耐火材のスラグコーティングが重要
Cr ₂ O ₃	平衡論		> 0.1mass%でスピネル	小さい スピネル析出 at logP _{O2} =-1	— at 1573K	Cr ₂ O ₃ 濃度の低減(≤ 0.1mass%) 酸素分圧の低下
SiO ₂	速度論	高SiO ₂ 組成では高粘度化する スピネル成長は抑制				
Sb	平衡論		—	logP _{O2} >-7が望ましい	Sb + 3/4O ₂ (g) = SbO _{1.5} K ₁₄₇₃ = 2.1×10 ⁶ K ₁₅₇₃ = 4.1×10 ⁵ 低温有利	酸素分圧を高くする(logP _{O2} >-8) CaO/SiO ₂ 、FeOx-CaO系スラグを用 いる
NiO	速度論	NiOによるスラグの酸化を瞬時 に進行 ガス酸化ではスピネル成長の 影響は小さい 金属Niの酸化は遅い 金属Ni近傍スラグは還元により スピネル生成を抑制		at logP _{O2} =-1	at 1573K	固体Al ₂ O ₃ やMgOの溶解により注意 が必要
金属Ni	速度論		反応は遅い	at logP _{O2} =-1	at 1573K	還元効果は金属Niの近傍のみ 大規模溶錬では大きな影響なし

③ 廃電子基板の最適な銅製錬原料化のプロセス評価

【概要】

国内外の関連技術を調査すると同時に、プロジェクトが滞りなく進むよう進捗管理を行った。また、研究開発のアウトプットの評価および軌道修正を適切に行うため、学識経験者や銅製錬事業者などの有識者による委員会（表 1 6）を年 2 回開催した。さらに、非鉄製錬会社 5 社へのヒアリングも適宜実施し、研究成果の妥当性や業界のニーズ等について確認を行った。

【成果】

- ・ 関連技術の調査では、欧州において実施されている焙焼を伴わない廃電子基板処理の事例に着目し、当該事例の多くで用いられている粉碎機や選別プロセスの開発者であるスイスの Recycling World (RW) 社を訪問した。その際、粉碎機の機構等について情報収集するとともに、本プロジェクトで扱う廃電子基板の処理試験を実施してもらい、RW 社プロセスによる廃電子基板中の銅-アルミニウム選別効果について把握を行った。
- ・ RW 社粉碎機の外見は円筒型であり、内部には円筒の中心を軸とした攪拌機が付いている。周囲の外壁はギザギザの粉碎機能を持つ構造となっているため微粉碎が可能となる。廃電子基板の処理試験では、基板中の銅やアルミニウム分は単体として分離するが、過粉碎によりアルミニウム分の多い軽産物側に銅が混入してしまうことが分かった。
- ・ 有識者による委員会で得られた意見を以下に抜粋する。
 - 「アルミニウムについては 50%以上除去したうえで、銅の回収率を 80%以上とする」という当プロジェクトの目標を達成していることは評価できる。他方、銅回収率は 80 数%であり、10 数%はロスしているため、さらに回収率を向上させることが望ましい。
 - 鉛製錬活用パターンを物理選別側から定量的に示されており大変興味深い。今後の非鉄製錬の在り方について、鉛製錬の事業所設備の利用を考えると、電気自動車等が増えてきた場合、鉛バッテリーがどれだけリサイクルで回るのかは予測できない。おそらく鉛バッテリーを処理するだけでは鉛製錬設備を持て余してしまう。鉛製錬所において鉛バッテリーだけでなく様々な金属のリサイクル原料を積極的に処理することは、国内製錬設備の有効利用のみならず収益の面でも良い方向と考える。
- ・ また、非鉄製錬会社 5 社へのヒアリングでは、製錬所における廃電子基板等のリサイクル原料の処理に係る現状を把握すると共に、選別処理後の基板の調達メリットおよび品質への要望を確認した。さらに、当プロジェクトで実施した経済性評価の妥当性について意見を伺い、5 社共に当該評価に違和感がない旨の回答を得た。

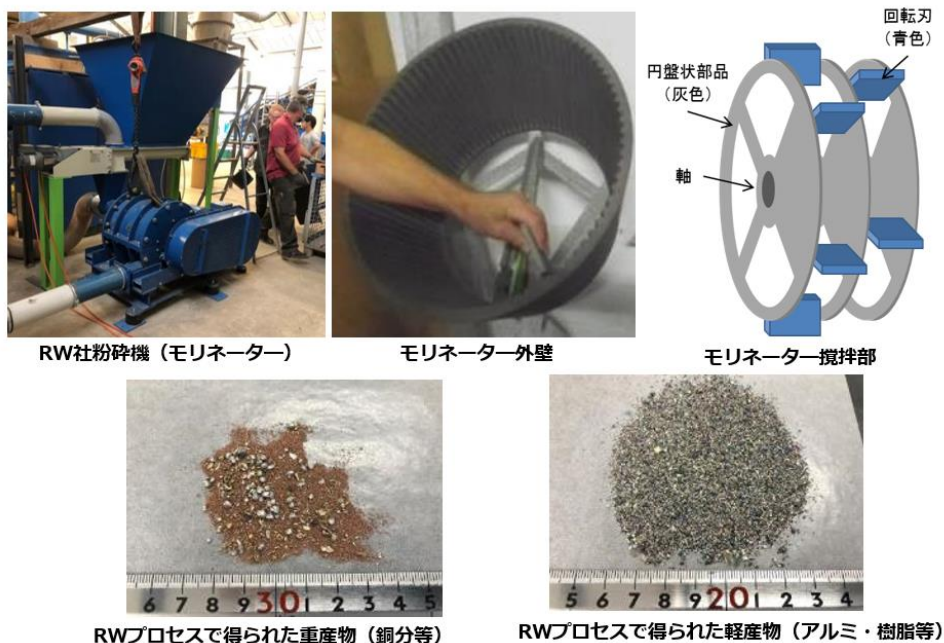


図 3 5 RW 社粉碎機・粉碎産物

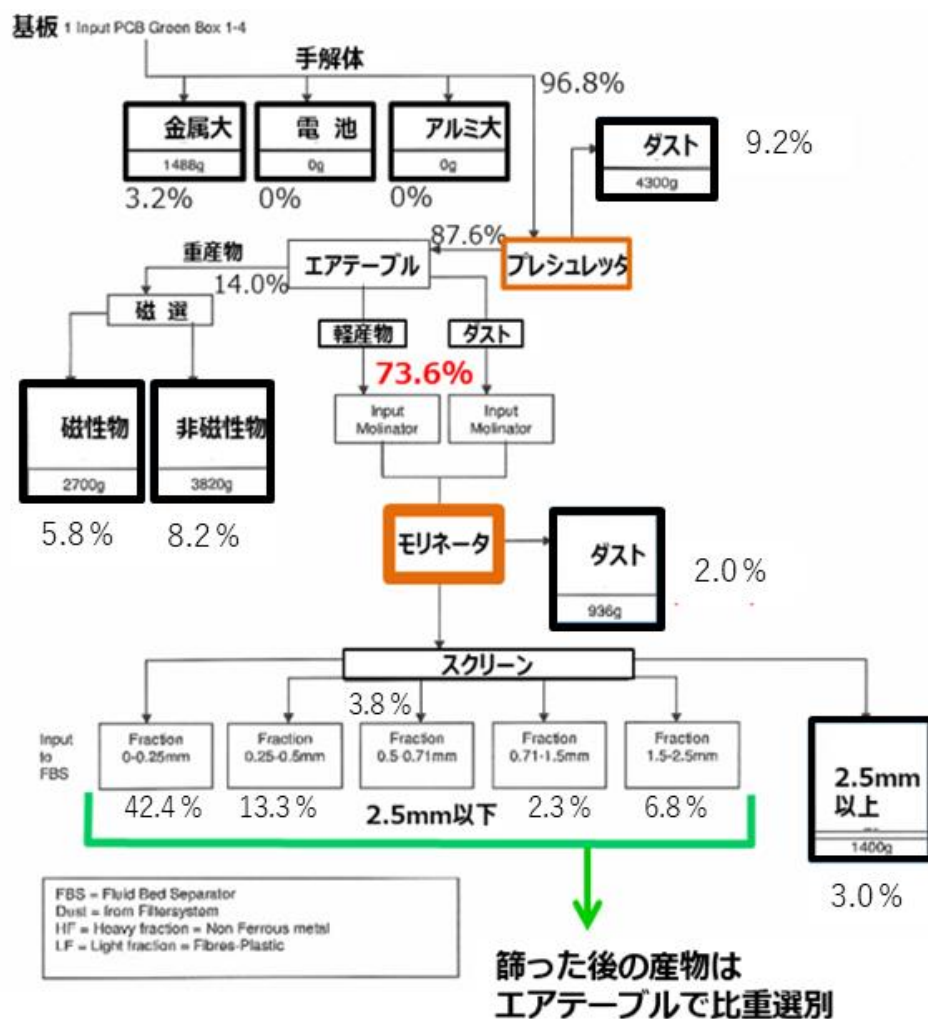


図 3 6 RW 社の選別プロセス

表 1 6 低温焙焼によるリサイクル製錬原料の高品質化技術の開発委員会名簿（2020 年現在）

	氏名 (敬称略)	所属
委員長	中村 崇	国立大学法人東北大学 名誉教授
委員	池田 亮	JX 金属製錬株式会社 佐賀関製錬所 リサイクル部長
	金田 章	三菱マテリアル株式会社 金属事業カンパニー 製錬事業部 製錬部 副部長
	高崎 康志	国立大学法人秋田大学大学院 国際資源学研究科 准教授
	高津 明郎	住友金属鉱山株式会社 技術本部 技術企画部 担当課長
	広吉 直樹	国立大学法人北海道大学大学院 工学研究院 教授
	峰 義博	三井金属鉱業株式会社 金属事業本部 技術部 部長
	竹内 信登	東邦亜鉛株式会社 技術・開発本部 技術部 部長
	山中 義則	DOWA メタルマイン株式会社 製錬部 部長

5. 研究開発の実施・マネジメント体制等

(1) 研究開発計画

研究開発計画を以下に示す。なお、研究開発項目「①物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発」については、以下のとおり当初計画を変更した。

初年度は、未処理の廃電子基板を対象に、500～700℃で焙焼を行う方法と焙焼を行わずに基板から素子類を剥離する方法の検討を行っていたが、二年度目以降、300℃程度で低温加熱することにより、基板銅箔部の過度な酸化を促すことなく、形状を留めたままの素子類を効率よく剥離出来ることが判明したため、計画の一部を見直し、フローの最初の工程として低温加熱を検討することとした。なお、300℃程度の加熱では、基板ベース部に含まれるハロゲン等の除去が出来ないことから、低温加熱後に基板ベース部のみを対象とした焙焼を行うこととして検討を進めた。

表 17 研究開発計画

研究開発項目	2017FY			2018FY				2019FY				2020FY				2021FY
	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	
①物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発																
(a) 廃電子基板の低温加熱																
低温加熱試験の実施：加熱空気				触覚試験				小規模試験				中規模試験				
低温加熱試験の実施：過熱水蒸気												小規模試験				
(b) 物理選別による製錬忌避元素の低減																
素子選別	部品剥離方法の検討			素子選別の触覚試験				素子選別方法の確立				プロセスの原料多様性調査				
焙焼・粉碎・物理選別	触覚試験			基板ベース部等の物理選別方法検討				基板ベース部等の物理選別方法確立				プロセスの原料多様性調査				
(c) 除去物等の有効利用等	触覚試験			模擬基板での検討				実基板での検討				プロセスの確立				
(d) 廃電子基板の最適な銅製錬原料化のプロセス検討				最適フローの検討				フローの確立				経済性等の評価				
②リサイクル原料の製錬挙動研究																
(a) リサイクル原料の製錬挙動に関する平衡論的研究	アルミナの影響調査							アルミナ以外の忌避元素の影響調査				操業指針の提示				
(b) リサイクル原料の製錬挙動に関する速度論的研究	アルミナの影響調査							アルミナ以外の忌避元素の影響調査				操業指針の提示				
③廃電子基板の最適な銅製錬原料化のプロセス評価																
情報収集／進捗確認	情報収集／進捗確認															
有識者による委員会の開催／非鉄各社へのヒヤリング		委員会	委員会		ヒヤリング	委員会	委員会			委員会	委員会		ヒヤリング	委員会	委員会	

終了時評価

(2) 資金配分

資金配分を以下に示す。当プロジェクトの主題は研究開発項目「①物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発」であり、本研究開発項目への資金配分が厚くなっている。なお、全ての研究開発項目は、国からの委託費にて事業が遂行された。

(単位：百万円)

研究開発項目	2017FY	2018FY	2019FY	2020FY	合計
①物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発	79	75	63	51	268
②リサイクル原料の製錬挙動研究	20	20	20	13	73
③廃電子基板の最適な銅製錬原料化のプロセス評価	1	5	2	1	9
計	100	100	85	65	350

(百万円)

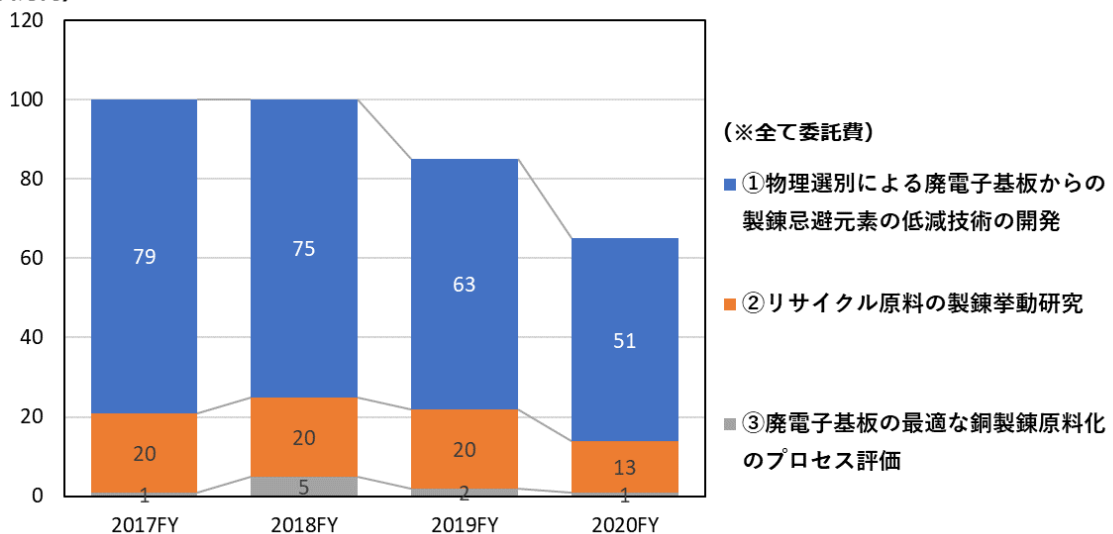


図 37 各年度の資金配分

（３）研究開発の実施・マネジメント体制

2020 年現在の研究開発の実施・マネジメント体制図を以下に示す。JOGMEC がプロジェクト全体の進捗管理や取りまとめを担当したが、研究開発項目「①物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発」については、DOWA エコシステム株式会社が中心となって検討が進められた。

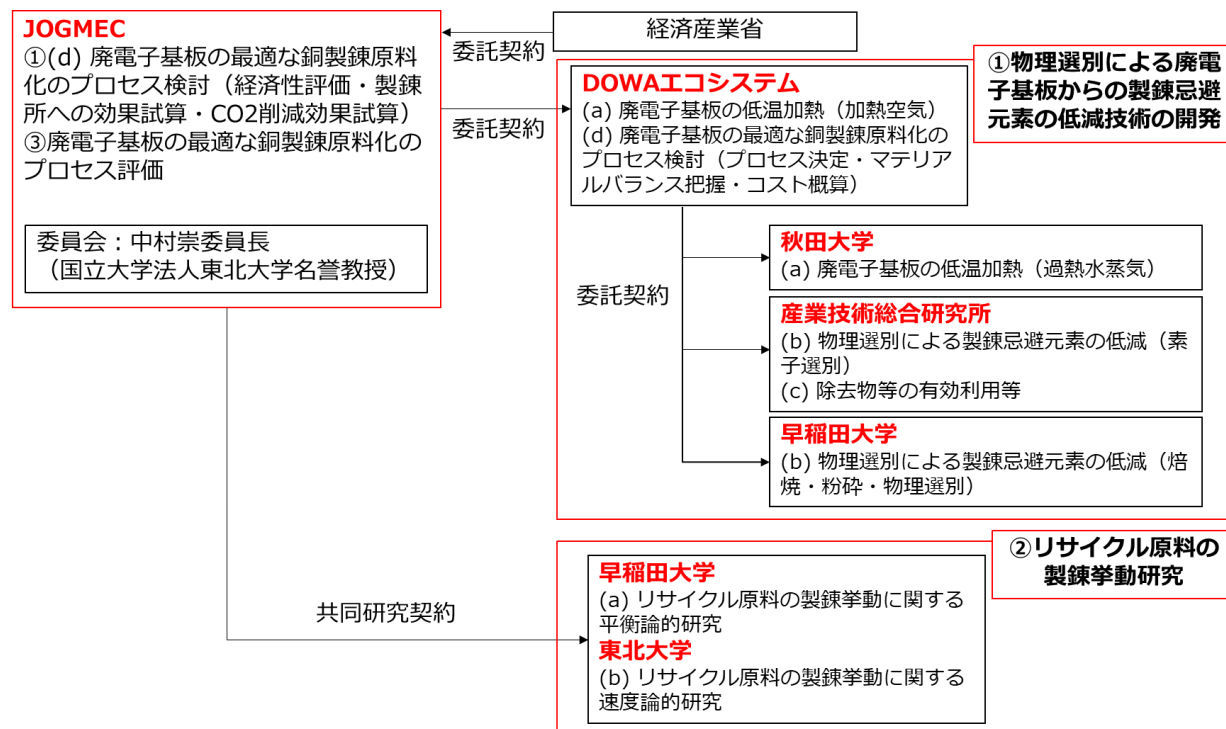


図 3 8 研究開発の実施・マネジメント体制図（2020 年現在）

（４）知財や研究開発データの取扱い

事業実施者間で知的財産権の取扱いに係る合意書の作成および知財運営委員会を設置し、適正な管理のもと事業が行われた。

また、事業で得られた成果については、積極的に学会や論文による発表を行い、特許も出願した。

表 1 8 成果公表・特許出願等に係る実績

年度	論文数	国内 特許出願	国外 特許出願	PCT 出願	国際標準への 寄与	プロトタイプ の作成
2017 年	—	—	—	—	—	—
2018 年	1 件	—	—	—	—	—
2019 年	2 件	—	—	—	—	—
2020 年	1 件	2 件	—	—	—	—
2021 年	—	1 件	—	—	—	—
合計	4 件	3 件	—	—	—	—

6. 事業アウトプット

(1) 研究開発目標

研究開発項目	最終目標(2020 年)	設定理由
① 物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発		
(a) 廃電子基板の低温加熱	アルミニウムを 50%以上除去した上で、銅を 80%以上回収することができるフローを確立する。	製錬忌避元素除去率の向上と有価物回収率の向上は相反する課題であり、現実的なバランスの設定が重要である。 本研究では、製錬忌避元素の中でも比較的含有量が多いアルミニウムを除去率の目標設定の対象とした上で、経済合理性と実現性を考慮した目標を設定した。
(b) 物理選別による製錬忌避元素の低減		
(c) 除去物等の有効利用等	基板ベース部から得られる揮発成分をエネルギー資源として利用するため、生成物の臭素濃度を 1,000ppm 以下にする。	通常のボイラー用燃料として利用可能な水準とするため、臭素濃度を 1,000ppm 以下と設定した。
(d) 廃電子基板の最適な銅製錬原料化のプロセス検討	最適なプロセスを選定し、経済性評価を行う。	プロセスを社会実装するため、プロセスの経済性評価を行うこととした。
② リサイクル原料の製錬挙動研究		
(a) リサイクル原料の製錬挙動に関する平衡論的研究	リサイクル原料由来の製錬忌避元素の増加に対応した銅製錬の操業指針を提示する。	前処理により製錬忌避元素を完全に除去することが現実的ではないことから、製錬忌避元素の許容量や制御方法について評価することにより、リサイクル原料の比率を高める必要があると判断したため。
(b) リサイクル原料の製錬挙動に関する速度論的研究		
③ 廃電子基板の最適な銅製錬原料化のプロセス評価	本研究開発の事業計画、事業結果に対して客観的な意見を求める。	客観的な意見を入れることにより、必要に応じて研究計画や内容の見直しを図ることが、事業の質の向上につながると判断したため。

(2) 研究開発の成果

研究開発項目	最終目標(2020年)	成果・意義	達成状況	未達の原因分析
① 物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発				
(a) 廃電子基板の低温加熱	アルミニウムを 50%以上除去した上で、銅を 80%以上回収することができるフローを確立する。	アルミニウムを 50%以上除去した上で、銅を 80%以上回収できるフローを確立した。 これは、銅製錬所におけるリサイクル原料比率の向上を可能にする成果である。	達成	—
(b) 物理選別による製錬忌避元素の低減				
(c) 除去物等の有効利用等	基板ベース部から得られる揮発成分をエネルギー資源として利用するため、生成物の臭素濃度を 1,000ppm 以下にする。	基板ベース部から鉄粉の添加および水洗浄による揮発成分由来の生成物が得られるが、当該生成物の臭素濃度を 1,000ppm 以下にすることができた。 これは、通常のボイラー用燃料として利用できる水準である。	達成	—
(d) 廃電子基板の最適な銅製錬原料化のプロセス検討	最適なプロセスを選定し、経済性評価を行う。	廃電子基板の前処理として確立した選別プロセスを導入することにより、リサイクル原料比率が高められるだけでなく、経済的に合理的な水準であることに加え、CO2 排出量の削減にも寄与することを確認した。 つまり、初期投資が許容されれば、社会実装が可能なプロセスであると評価できる。	達成	—
② リサイクル原料の製錬挙動研究				
(a) リサイクル原料の製錬挙動に関する平衡論的研究	リサイクル原料由来の製錬忌避元素の増加に対応した銅製錬の操業指針を提示する。	製錬忌避元素に対応した銅製錬の操業方法について、指針を示した。 これは、選別プロセスの確立と合わせて、リサイクル原料比率の増加に寄与する成果である。	達成	—
(b) リサイクル原料の製錬				—

挙動に関する速度論的研究				
③ 廃電子基板の最適な銅製錬原料化のプロセス評価	本研究開発の事業計画、事業結果に対して客観的な意見を求める。	有識者による委員会を年 2 回開催し、事業計画・事業結果について意見を求め、最終的に成果の総評を受けた。	達成	—

7. 事業アウトカム

(1) 事業アウトカムの内容

当事業のアウトカムは、開発した選別工程（以下、「選別プラント」という）の実用化である。具体的な実用化のイメージは下図のとおり。

集められた廃電子基板は、選別プラントで一元処理し、製錬所が受入しやすいように選別する。廃電子基板の集荷は、選別産物を処理する製錬所（単独または複数）若しくは選別プラント自らが行う。選別産物は、銅製錬所向けがメインであるが、それぞれの産物の特性に応じて適切な処理または処分を行う。この際、鉛製錬所を活用することで、銅製錬所向けの産物はより高品質化し、廃電子基板中の有価物を回収しやすくなる。

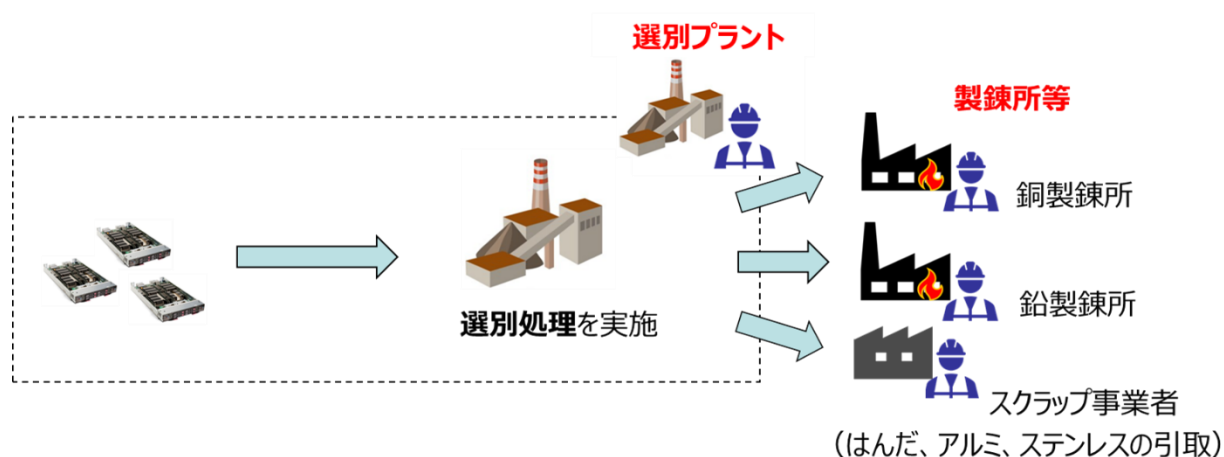


図39 選別プラント実用化のイメージ

(2) 事業アウトカム目標

アウトカム目標		目標の設定理由	目標達成の見込み
2030 ～ 2040 年度	選別プラント の実用化	本研究で開発するプロセスは経済的な観点で既存プロセスに対し優位性があること、およびリサイクル原料調達の安定化に寄与する可能性があることから、選別プラントの実用化を目標と設定した。	現在の製錬事業は、精鉱（製錬所の炉に投入される鉱石原料）の品位が低下し、鉱石原料のみでは利幅が限定されるため、今後、リサイクル原料比率の向上が期待される。しかしながら、製錬忌避元素の存在がリサイクル原料比率を高める上での制約要因の一つとなっており、これを解決するために本研究を実施した。 その結果、製錬忌避元素の相当程度を除去することが可能で、経済的にも優位性のあるプロセスを構築するとともに、有望な要素技術を見出すことができた。そのため、事業参加者は、独自に当該要素技術（素子類を基板から剥離するための加熱方法に関する技術）の研究を継続している。また、より実用性の高いプロセスとするため、事業参加者により、選別産物の品位分析を非破壊で行う研究が続けられている。今後、こうした要素技術の研究が進展することで、本研究で構築したプロセスの優位性がより高まることが期待される。 したがって、上述した要素技術の研究の成果が得られた段階で、実用化に向けた次のステージに進むことを想定している。次のステージでは、パイロットプラント試験によりスケールアップ時の課題解決を図る。パイロットプラント試験で技術的に問題がないことが確認されれば、プロセスの実用化が現実的なものとなる。なお、実用化にあたっては相応の初期投資が必要となることから（年間処理量 10 万 t 規模の選別プラントの建設費用は 40 億円と試算）、リサイクル原料調達のリスクも考慮しつつ規模の利益を追求することが求められ、例えば、各製錬事業者がグループの垣根を超えて連携するなどの取組も考えられる。

8. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ

事業アウトカム達成に至るまでのロードマップを「表19 実用化へのロードマップ」に示す。

本研究開発では、銅製錬所が受入しやすいように廃電子基板を選別することをテーマに取り組み、目標を満足する選別プロセスを完成した。しかしながら、引き続き改善すべき課題が残っていることに加えて、選別プロセスについては、技術開発により効率性を向上できる可能性も残されている。

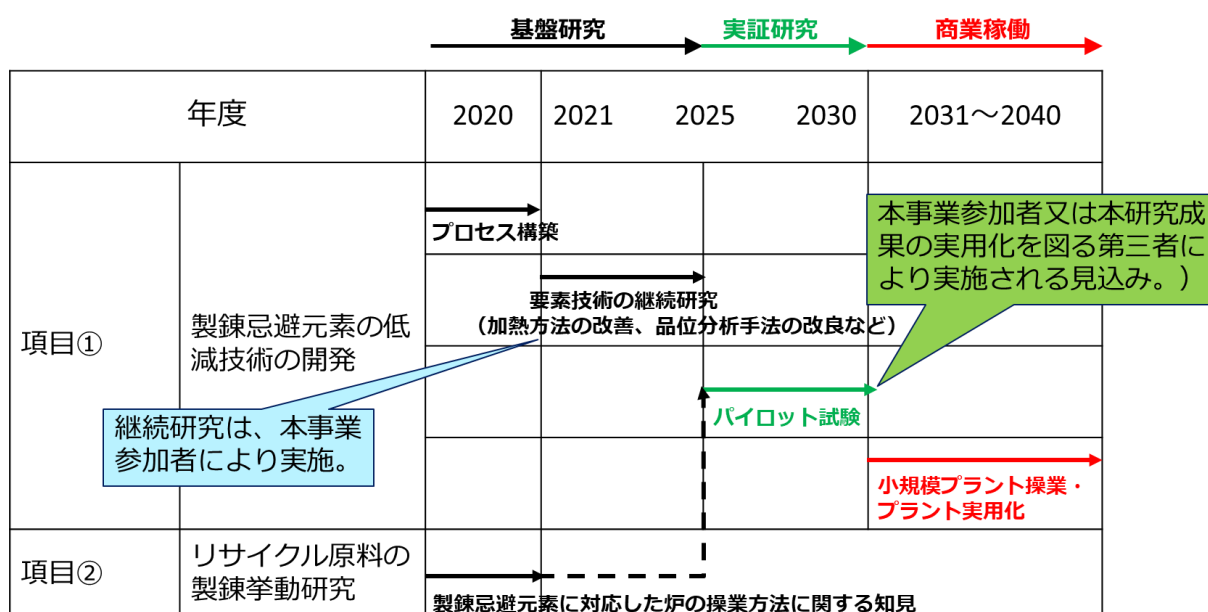
例えば、基板ベース部・中品位素子（コネクタ・コネクタ端子・ポートなど）については、分離効率をさらに向上できる可能性が残されており、検討を続けることにより選別プロセスの成績向上が期待できる。また、処理原料および選別産物の迅速かつ非破壊的な品位分析の手法が確立されれば、こうした選別プロセスがより実用化しやすくなることが期待される。これについては、2019年度から国立研究開発法人産業技術総合研究所においてディープラーニングによる基板上の素子類を対象とした画像認識システムの開発が進められている。

また、本研究開発では基礎的な研究に留まったが、過熱水蒸気を使った廃電子基板からの素子の分離・臭素の除去も有望な手段の一つである。本研究テーマについては、現在、DOWA エコシステム株式会社と国立大学法人秋田大学が共同で研究を継続している。

こうした要素技術の改善で成果が得られることができれば、次の段階としてパイロットプラント試験による技術の実証が求められる。パイロットプラント試験において、選別プロセスの有効性を商業規模で確認すると同時に、得られた産物を実際に製錬所に投入することで、選別プラントを導入した製錬所におけるメリットを評価することが出来る。製錬所に選別産物を投入する試験では、本研究開発で実施した製錬忌避元素が製錬工程に及ぼす影響調査の結果も参考になる。なお、パイロットプラント試験や実設備を利用した試験においては、製錬会社の協力が不可欠となる。

上記のとおり要素技術の継続的な研究やパイロットプラント試験で十分な成果が得られることができれば、実用化の段階となる。リサイクル原料の安定調達確保やスケールメリットの観点から、実用化の際は、各製錬事業者がグループの垣根を超えて連携するなどの取組も考えられる。

表19 実用化へのロードマップ



9. 費用対効果

当事業の費用対効果を「表20 当プロジェクトの費用対効果」に示す。開発した選別プロセスの導入による経済的効果は、年間8億円以上と試算される。この試算は、2019年に日本で処理された廃電子基板を7.5万tとして（出所：一般財団法人 日本鉱業振興会 機関誌「鉱山（2020年10月）」）、1tの廃電子基板を選別プロセスで処理したときに得られる「選別プラントの営業利益」から評価したものである。つまり、この試算で算出された経済的効果は、選別プラントで得られる利益のみを対象としている。実際には、選別プロセスを導入することによって、製錬所における廃電子基板の受入可能量は約1.6倍となるだけでなく、受入原料の品位も向上する。そのため、同じ処理能力を持つ製錬所でより多くの銅・金等を生産することが可能になることから、これを製錬所のメリットとして加味することにした場合、全体として8億円以上の経済的効果となる。

以上のことから、本プロジェクトで執行した金額の総額である3億円に対して、十分な費用対効果を得られる成果を上げたと言える。

表20 当プロジェクトの費用対効果

評価指標	金額	備考
予算執行額	約3億円	当プロジェクトで執行した総額
選別プロセス社会実装後の経済的効果	約8億円／年	2019年に日本で処理された廃電子基板（7万5千トン）が、全て本プロセスで前処理された場合を想定 - 当事業で試算した値（鉛製錬所を活用した場合）を使用 - 基板1トンあたりの処理で発生する利益1万1千円×処理量7万5千トン/年≒8億円 - プラント建設費用を40億円とすると、5年で回収可能な利益の水準

第2章 評価

本章では、評価検討会の総意としての評価結果を枠内に掲載している。なお、枠下の箇条書きは各評価検討会委員の指摘事項を参考として列記している。

1. 当省(国)が実施することの必要性

本事業はリサイクル原料の積極的な利用を促進する技術であり、気候変動等の環境問題が顕在化する中で不可欠な物質循環の閉ループ化を支援する先進的研究であると考えられ、炭酸ガスの削減や二次廃棄物抑制を含めてうまく研究が展開されていると思われる。カーボンニュートラル化には、リサイクル技術の改善による技術面での優位性確保が不可避だが、人件費・土地代等が高価な日本では処理コストがかかるため、低品位非鉄スクラップの前処理の効率化に係る技術開発は業界共通のテーマであり、産学官連携による取り組みが期待される。また、海外では環境・健康問題を伴うプロセスで今回実施した様な前処理を実施しており、技術の海外移転による日本の貢献も期待できる。本技術が社会に実装されることで物質フローの革新を支援することができる優れた事業になり得ると評価するとともに、事業を支える要素技術開発やそれを支える学問の醸成においても国が実施する事の意義を評価する。

一方、社会実装を意識する上では、主たるリサイクル原料への影響や回収効果のみではなく、副次的な発生物・回収物を含めて、実装の障壁となり得る課題の有無を未然に把握するとともに、開発途上国への技術移転の視点での検討も必要と思われる。また、当該研究は基盤研究の段階であることから、今後の実用化研究に向けては基礎技術の確立や課題対策により注力した研究内容にした方が良いと思われる。

【肯定的意見】

- (A委員) 炭酸ガスの削減や二次廃棄物抑制を含めてうまく研究が展開されている。
- (B委員) 物理選別技術開発は、コストがかかる一方業界共通のテーマであるため、産学官連携による取り組みが期待される。
- (C委員) カーボンニュートラル化にはリサイクル技術の改善による技術面での優位性確保が不可避である。低品位非鉄スクラップの前処理の効率化は人件費・土地代が高価な日本では重要である。海外では環境・健康問題を伴うプロセスで今回実施した様な前処理を実施しており、技術の海外移転による日本の貢献も期待出来る。
- (D委員) 本事業は、リサイクル原料の積極的な利用を促進する技術であり、気候変動等の環境問題が顕在化する中で不可欠な物質循環の閉ループ化を支援する先進的研究であると考えます。社会に実装されることで物質フローの革新を支援することができる優れた事業になり得ると評価します。また、事業を支える要素技術開発やそれを支える学問の醸成においても国が実施する事の意義を評価します。

【問題点・改善すべき点】

- (A委員) 当該研究は基盤研究の段階であることから、今後の実用化研究に向けては基礎技術の確立や課題対策により注力した研究内容にした方が良いと感じます。
- (B委員) 特になし。
- (C委員) 開発途上国への技術移転との視点での検討も必要と思われる。
- (D委員) 社会実装を意識する上では、主たるリサイクル原料への影響や回収効果のみではなく、副次的な発生物・回収物を含めて、実装の障壁となり得る課題の有無を未然に把握することがより好ましいように思いました。

2. 研究開発内容及び事業アウトプットの妥当性

経済性評価や環境評価を実施することで、技術導入による効果や課題を未然に把握するための有用な情報となり得ると判断するとともに、研究要素と力点も明確であると考えます。事業活動と関係する明確な計測指標を定めて目標値を設定し、その目標を達成したうえで論文発表・特許出願にも繋がった点も含め、研究内容は概ね適切と評価します。

一方、計測指標として、システム全体を通じた物質等としての抽出後の有効利用可能量については言及されていない。そのため、主たるリサイクル原料に加えて、「はんだ」「その他」等を含めてこれを把握し、実質の回収率（有効利用された物質/廃基板に含まれる物質）などを計測し、システム全体を通じた転換効果の可視化に取り組むべきと考える。それにより、社会における物質フロー革新を実現する為の課題などを未然に把握すると対策に役立てる事が可能になると考える。また、本プロセスでの最大の売りであるアルミ除去・回収の目標値（50%以上）と銅製錬所向け原料の銅回収率の目標値（80%以上）は、もう少し高い値に見直すことが望ましいと考える。なお、基盤研究としての研究目標を明確にした上で、研究成果を明示した方がよいと思われる。

【肯定的意見】

（A委員）研究内容は概ね関心の深いものであって、適切と感じます。

（B委員）特になし。

（C委員）計画時の目標は達成し、論文発表・特許出願を実施している。

（D委員）事業活動と関係する明確な計測指標を定め、目標値を設定し、達成できたことは評価します。また、経済性評価や環境評価を実施することで、技術導入による効果や課題を未然に把握するための有用な情報となり得ると判断しました。加えて、研究要素と力点も明確であったように思います。特許出願に繋がられた点も素晴らしいと判断しました。

【問題点・改善すべき点】

（A委員）基盤研究としての研究目標を明確にした上で、研究成果を明示した方がいいように感じます。

（B委員）銅製錬所向け原料の目標値である銅回収率（80%以上）は、もう少し高い値に見直すことが望ましいと考える。

（C委員）本プロセスでの最大の売りがアルミ除去・回収であるが、その目標設定が50%以上は少し低すぎる。銅についてはその他に5%程度が分布しているが、既存プロセス並み、100%に近い数字が必要である。

（D委員）本事業では、計測指標の1つとして、廃基板に含まれるCuやAlなどのリサイクル原料（特に、銅製錬・鉛製錬）への分配比を用いています。一方で、システム全体を通じた物質等としての抽出後の有効利用可能量については言及されていません。主たるリサイクル原料に加えて、「はんだ」「その他」等を含めて、これを把握し、実質の回収率（有効利用された物質/廃基板に含まれる物質）などを計測し、システム全体を通じた転換効果の可視化に取り組むことで、社会における物質フロー革新を実現する為の課題などの未然把握と対策に役立てる事が可能になると考えます。

また、環境評価と経済性評価については、内在する不確実性（例えば、設備投資やメンテ

ナンス費用、回収物の販売経路など）を踏まえて、技術導入に際して未然に対策を講じておくことが望ましい点などの可視化につながれば、より有益な情報を提供し得たようにも思います。

なお、論文発表については、各研究要素において有益な知見が得られていると思われますので、より積極的な対外発信を期待します。

3. 研究開発の実施・マネジメント体制等の妥当性

物理選別技術開発では要素技術毎に共同研究実施者の役割が分担され、進捗管理と適切な判断が行える体制になっているものと評価でき、研究実施体制は概ね適切である。また、研究開発項目の力点と資金配分についても概ね適切である。

一方、本事業ではプリント基板の各種部品・不純物の分離に主眼をおいた結果、システムが過度に複雑化している。開発途中において、実操業への応用・海外への技術提供を前提とした目標とプロセスの変更も必要だったのではないかと感じる。また、基礎研究については、もう少し明快な研究成果を得る努力を期待するとともに、実施体制（大学の研究者など）にやや偏りがあるように感じる。他の大学の研究者にも入ってもらっても良かったかもしれない。なお、研究開発計画の環境・経済性評価に関する項目は、技術・システム設計へのフィードバックや国民との対話等への活用を意識した、より積極的な目標設定が可能であったと思われる。

【肯定的意見】

- （A委員）研究実施体制は概ね適切である。いくらか体制に偏りがあるように感じます。京都大学や東京大学の研究者が入っていてもいいのではないのでしょうか。
- （B委員）物理選別技術開発では、要素技術毎に共同研究実施者の役割が分担されており、これらの連携が上手く機能し開発目標が達成できたと考える。
- （C委員）特になし。
- （D委員）開発項目①の計画変更を含めて進捗の管理と適切な判断が行える体制になっており、効率的な推進に貢献していると判断しました。また、研究開発項目の力点と資金配分についても概ね適切であると判断しました。

【問題点・改善すべき点】

- （A委員）基礎研究の部分の成果に問題があります。もう少し明快な研究成果を得る努力を期待します。
- （B委員）特になし。
- （C委員）プリント基板の各種部品・不純物の分離に主眼をおいた結果、システムが過度に複雑化している。実操業への応用・海外への技術提供を前提に、開発途中での目標とプロセスの変更も必要と思われる。
- （D委員）国民との科学・技術対話を意識して頂くことで、国民の科学・技術リテラシーの醸成の支援、更にはより良い社会や循環構造への転換に繋げることが期待できると思います。また、研究開発計画に関して、環境・経済性評価については、単なる評価に留めることなく、より積極的に、技術・システム設計へのフィードバックや国民との対話等への活用を意識した目標設定が可能であったように思われます。

4. 事業アウトカムの妥当性

より高品質な再生原料の調達を支える礎となり得る選別工程の実用化をアウトカム目標と設定した点は、社会実装を意識した妥当な目標設定であると評価する。また、カーボンフットプリント・採算性等の評価もなされている。

一方、持続可能な開発目標 (SDGs) や ESG 投資を意識した収益創出や企業マネジメントが求められる中で、実装を実現・加速していく上では、環境・社会・企業統治に対するインセンティブを付与し、より強化していく事、その為の目標設計（と達成状況の確認）が課題であると考えます。また、カーボンフットプリント・採算性等の評価がなされているものの、分離される一部製品に対する評価が未実施であることや、廃棄物が 11.2%発生し、銅ロスも 4.8%と高く、資源循環の観点からも、これを更に下げる工夫が必要であること、さらに、事業アウトカムの検討の範囲を広くとった方が望ましく、外国への発信も必要と思われることから、更なる努力を期待する。

【肯定的意見】

(A 委員) 特になし。

(B 委員) 特になし。

(C 委員) カーボンフットプリント・採算性等の評価がなされている。

(D 委員) より高品質な再生原料の調達を支える礎となり得る選別工程の実用化をアウトカム目標と設定した点は、社会実装を意識した妥当な目標設定であると判断しました。

【問題点・改善すべき点】

(A 委員) 十分とは思えないです。外国への発信が必要でしょう。また、検討の範囲を広くとった方が望ましいでしょう。さらなる努力を期待します。

(B 委員) 廃棄物が 11.2%発生し、銅ロスも 4.8%と高い。資源循環の観点からも、これを更に下げる工夫が必要である。(【ご参考】生基板年間 10 万トン規模の選別プラントの場合、10 万トン/年×18.2%Cu×▲4.8%×120 万円/tCu (Cu 建値基準) ÷ ▲10 億円/年の価値がロスすることになる。)

(C 委員) 分離される一部製品に対する評価が未実施である。

(D 委員) 一方で、持続可能な開発目標 (SDGs) や ESG 投資を意識した収益創出や企業マネジメントが求められる中で、実装を実現・加速していく上では、環境・社会・企業統治に対するインセンティブを付与し、より強化していく事、その為の目標設計（と達成状況の確認）が課題であると考えます。(例えば、環境面では CO2 の削減効果を定量化していますが、社会全体で取り組みが求められる脱炭素・カーボンニュートラル (CN) 等への貢献を意識した目標設定と技術・システム設計などが考えうると思います。)

5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップの妥当性

知財運営委員会を設置して適切な知財管理を行い、定期的に学会発表や論文作成を行うことで技術開発の進捗管理ができたと考えられ、初期計画に沿って実施された結果、特許の出願がなされていることや論文が公表されていることは評価できる。また、実用化に向けて、更なる改善が期待できる点や開発が求められる要素技術とそれらの取組実施者が意識されていると共に、成果のユーザーも明確であると評価する。

一方、事業アウトカム達成に至るまでのロードマップについて、基盤研究(～2025年)・実証研究(～30年)、そして商業稼働(プラント実用化(～2040年頃))に至るスケジュールとその設定根拠の明確化に加え、日本全体でどれくらいの処理量になるのか明示して欲しい。また、技術面の課題解決を力点としつつも、実用化の障壁や事業継続のリスクとなり得る環境・社会・企業統治の面での課題を明確にし、未然に対応策を講じることで、より魅力的な事業になると考える。なお、国の研究であるため、特許で技術を守ることが適切と言えるか検討も必要と考える。

【肯定的意見】

- (A委員) 特許の出願がなされていることは評価できる。論文などとして公表されていることも好ましいことです。さらなる努力が期待されます。
- (B委員) 知財運営委員会を設置して適切な知財管理を行い、定期的に学会発表や論文作成を行うことで技術開発の進捗管理ができたと考える。
- (C委員) 初期計画に沿って実施され、論文・特許出願の成果を得ている。
- (D委員) 実用化に向けて、更なる改善が期待できる点や開発が求められる要素技術とそれらの取組実施者が意識されていると共に、成果のユーザーも明確であると評価します。積極的な知財獲得とそれを支援する取組を評価します。

【問題点・改善とする所見】

- (A委員) 日本全体でどれくらいの処理量になるのか明示して欲しい。国の研究ですから特許で技術を守るということは適切と言えるかどうか疑問です。
- (B委員) 特になし。
- (C委員) 特になし。
- (D委員) 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップについて、基盤研究(～2025年)・実証研究(～30年)、そして商業稼働(プラント実用化(～2040年頃))に至るスケジュールとその設定根拠の明確化を期待します。また、技術面の課題解決を力点としつつも、実用化の障壁や事業継続のリスクとなり得る環境・社会・企業統治の面での課題を明確にし、未然に対応策を講じることで、より魅力的な事業になると考えます。

6. 費用対効果の妥当性

環境・健康面で負荷の小さいプリント基板の分離解体プロセスが開発できた。今後、選別プロセスが実用化されリサイクル原料の処理比率アップに寄与した場合、経済効果とともにカーボンニュートラル実現への貢献が期待される。投入された国費総額（事業予算）を上回る経済効果を創出する可能性を有しており、適切な結果と効果が得られたと考える。

一方、分離により発生する一部製品の経済的評価・処理法が未実施であることに加えて、得られた成果は国内に限定せず、海外展開する仕組みの検討も必要と思われる。もう少し短い期間で研究開発が進められたと感じられ、期間が決まっているのであればもう少し多くの内容に展開できたと考える。また、アルミ製品への金のロスが採算面で不利であると思われるが、経済面での効果のみではなく、社会的便益についても意識することで、本事業の意義をより強調できると考える。

【肯定的意見】

- （A委員）適切な結果と効果が得られたように思います。投入された国費に対する成果についてはその評価が困難です。
- （B委員）選別プロセスが実用化されリサイクル原料の処理比率アップに寄与した場合、経済効果とともにカーボンニュートラル実現への貢献が期待される。
- （C委員）環境・健康面で問題の少ないプリント基板の分離解体プロセスが開発できた。
- （D委員）投入された国費総額（事業予算）を上回る経済効果を創出する可能性を有している点を評価します。

【問題点・改善すべき点】

- （A委員）もう少し短い期間でやることができたように感じます。期間が決まっているのならもう少し多くの内容に展開できたように感じます。
- （B委員）特になし。
- （C委員）国内へ限定せず、海外展開する仕組みの検討も必要と思われる。
分離して発生する一部製品に対する経済的評価・処理法が未実施である。
アルミ製品への金のロスが採算面で不利である。
- （D委員）経済面での効果のみではなく、社会的便益についても意識することで、本事業の意義をより強調できると考えます。

7. 総合評価

この研究は半導体を含む廃電子基板からの有価物の回収に関する研究であって、長年うまく解決できていなかった課題を解決しようとしたものである。個々の分離技術ではなく前処理段階で不要物を除去する技術と解され、貴金属やレアメタルなどの回収にもつながる、今後ますます重要となってくる技術であるが、比較的容易なプロセスであり、海外展開を通じて、現地で環境・健康面での改善も期待される。また、事業活動と関係する明確な計測指標を定め、目標値を設定し、達成できたことを評価するとともに、経済性評価や環境評価を実施することで、技術導入による効果や課題を未然に把握するための有用な情報となり得ると判断する。加えて、研究要素と力点も明確であり、資金配分についても概ね適切であると判断し、研究推進に関して開発項目①の計画変更を含めて進捗の管理と適切な判断が行える体制になっており、効率的な推進に貢献していると判断するとともに、特許出願に繋がった点も評価する。概ね良い成果が得られたと考える。

一方、研究期間が長すぎたように感じられ、うまく展開すれば短期間で終わることができると思われ、更なる努力が求められる。本事業では、リサイクル原料への物質の分配率を計測指標とする一方で、システム全体を通じた物質等としての抽出後の有効利用可能量については言及されておらず、併せてプリント基板の分離には成功しているが、実用化にはプロセスが複雑であり、アルミ除去率・銅回収率は目標値を達成しているものの、分離選別によるロスの評価を明確にすることも含めて目標値の更なる向上が必要であると考え。また、システム全体を通じた転換効果の可視化に取り組むことで、社会における物質フロー革新を実現する為の課題などを未然に把握すると対策に役立てる事が可能になると考える。さらに、環境評価と経済性評価については、実用化の障壁になり得る内在する不確実性や事業継続のリスクとなり得る課題の抽出を踏まえて、技術導入に際して未然に対策を講じておくことが望ましい点などの可視化につながれば、より有益な情報を提供し得たようにも思われる。なお、成果発信に関して、国民との対話を意識すると共に、論文発表については、各研究要素において有益な知見が得られていると思われることから、より積極的な対外発信を期待する。

【肯定的意見】

- (A委員) この研究は半導体を含む廃電子基板からの有価物の回収に関する研究であって、長年うまく解決できていなかった課題を解決しようとしたものである。貴金属や特殊金属の回収が実現できているように感じます。前処理段階で不要物を除去したもので、個々の分離技術に関する研究ではない。概ねよい成果が得られたものと思います。
- (B委員) リサイクル技術開発における物理選別などの高品質化技術は、今後ますます重要となってくる。本研究開発事業で所期の目標値を達成した意義は大きい。
- (C委員) 海外では本プロセスと同様な方法でプリント基板を処理し各部品を分離しているが、環境・健康問題が発生している。本プロセスは比較的容易なプロセスで環境・健康面での改善が期待され海外展開も可能である。
- (D委員) 事業活動と関係する明確な計測指標を定め、目標値を設定し、達成できたことを評価します。また、経済性評価や環境評価を実施することで、技術導入による効果や課題を未然に把握するための有用な情報となり得ると判断しました。加えて、研究要素と力点も

明確であり、資金配分についても概ね適切であると判断しました。研究推進に関して、開発項目①の計画変更を含めて進捗の管理と適切な判断が行える体制になっており、効率的な推進に貢献していると判断しました。特許出願に繋がられた点も素晴らしいと判断しました。

【問題点・改善すべき点】

- (A 委員) 研究期間が長すぎたように感じます。うまく展開すれば短期間で終わることができると思います。さらなる努力が求められます。
- (B 委員) ロスの評価を明確にして、目標値の更なる向上が必要であると考えます。
- (C 委員) プリント基板の分離には成功しているが、実用化にはプロセスが複雑である。
アルミ除去率・銅回収率は目標値を達成しているが、更なる高みを目指す必要がある。
- (D 委員) 本事業では、リサイクル原料への物質の分配率を計測指標とする一方で、システム全体を通じた物質等としての抽出後の有効利用可能量については言及されていません。システム全体を通じた転換効果の可視化に取り組むことで、社会における物質フロー革新を実現する為の課題などの未然把握と対策に役立てる事が可能になると考えます。また、環境評価と経済性評価については、実用化の障壁になり得る内在する不確実性（例えば、設備投資やメンテナンス費用、回収物の販売経路など）や事業継続のリスクとなり得る課題の抽出を踏まえて、技術導入に際して未然に対策を講じておくことが望ましい点などの可視化につながれば、より有益な情報を提供し得たようにも思います。なお、成果発信に関して、国民との対話を意識する共に、論文発表については、各研究要素において有益な知見が得られていると思われるので、より積極的な対外発信を期待します。

8. 今後の研究開発の方向等に関する提言

提言	対処方針
過熱水蒸気の効果確認や基板の燃料化などの技術開発の継続が期待されるが、研究者の選任に偏り生じないように研究体制に留意しつつ、金銀等の希少金属の回収率や海外への技術供与の可能性にも配慮しながら進められることが重要である。また、社会実装の障壁等を未然に把握することで対策立案にも意識しつつ、研究開発にライフサイクル思想・システム思想が活用されることも期待する。	独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構を通じて、事業参加者が継続している過熱水蒸気の効果確認等に関する技術開発の進捗のフォローアップを行いつつ、金銀等の希少金属の回収率や海外への技術供与の可能性にも配慮しながら、パイロット試験の実施について検討する。 ライフサイクル思想・システム思想を活用し、社会実装の障壁等を未然に把握した上で、研究開発を実施することを検討する。たとえば、リサイクル原料を活用することにより、銅精鉱処理と比較してCO₂ 排出量の削減にも寄与するものの、(廃基板の前処理のスケールメリットや)投資回収等の経済合理性にも留意しつつ、パイロット試験の実施を検討していく。

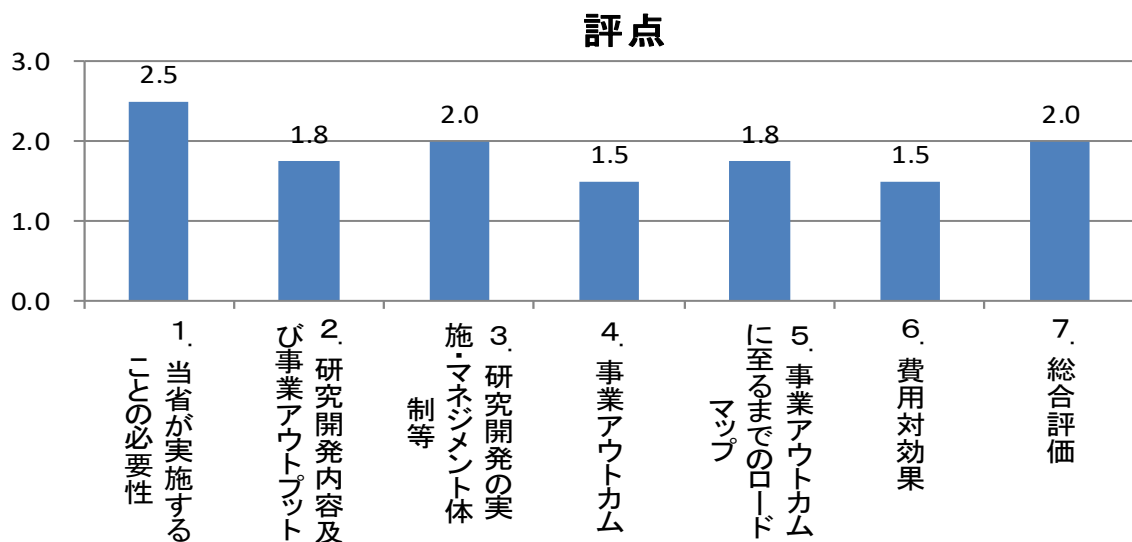
【各委員の提言】

- (A委員) 研究組織をよく考えて組織して欲しいと感じます。他にも適切な人物がおられます。同じ研究者に偏りが出ないように配慮したいところです。
- (B委員) リサイクル技術開発は、資源循環やカーボンニュートラルの観点から最も重要なテーマである。実用化のためには、更なる廃棄物ミニマム化や回収金属の回収率アップに取り組む必要がある。また、過熱水蒸気の効果確認や基板の燃料化についても技術開発の継続を期待する。
- (C委員) 加熱分離は比較容易にシステム化可能であり、海外への技術供与も選択肢と考えられる。プリント基板の処理は金銀等の希少金属の回収が最も重要な目的であり、この面への配慮が重要である。
- (D委員) 評価項目 1 にて、書かせて頂きましたが、国が実施する事の必要性は疑う余地が無いと考えています。開発対象となる技術や仕組みが、社会に実装されることで物質フローの革新を支援することができる優れた事業になり得ると評価します。また、事業を支える要素技術の開発やそれを支える学問の醸成においても国が実施する事の意義を評価します。
- 企業活動において、SDGs や ESG 投資を意識した収益創出や企業マネジメントが不可欠となりつつある中では、研究開発においても社会的な便益・意義の発信、そして、社会実装の障壁や事業継続のリスクとなり得る諸問題の未然把握と対策立案を意識することが重要になると思われます。ライフサイクル思考・システム思考は、その基礎となる考え方であり、研究開発における積極的な活用を期待します。
- 研究開発により目指す優れた技術・システムが、社会全体にとって意義のある技術・システムであるように、導き支援していく事が、国の実施する事業の 1 つの方向性であると信じています。

第 3 章 評点法による評点結果

(評点法による評点結果)

評価項目	評点	A委員	B委員	C委員	D委員
1. 当省が実施することの必要性	2.5	2	3	2	3
2. 研究開発内容及び事業アウトプット	1.8	1	2	2	2
3. 研究開発の実施・マネジメント体制等	2.0	2	3	1	2
4. 事業アウトカム	1.5	2	1	2	1
5. 事業アウトカムに至るまでのロードマップ	1.8	2	2	2	1
6. 費用対効果	1.5	1	2	1	2
7. 総合評価	2.0	2	2	2	2



【評価項目の判定基準】

評価項目 1～6 3点：極めて妥当 2点：妥当 1点：概ね妥当 0点：妥当でない	評価項目 7 総合評価（終了時評価） 3点：実施された事業は、優れていた。 2点：実施された事業は、良かった。 1点：実施された事業は、不十分なところがあった。 0点：実施された事業は、極めて不十分なところがあった。
---	---

第4章 評価ワーキンググループの所見

終了時評価（2021 年度）

所見	対処方針
リサイクル技術の成果を広めるためには、コストや CO2 の問題をクリアにしていくことが大事であり、技術的な目標だけではなく経済的な目標を設定し、取組方法や成果についても経済的な指標を前面に出すことでその成果が普及につながると考える。	本事業は、我が国の製錬所で利用するリサイクル原料の比率を向上させるため、廃電子基板の前処理（分離・選別）に係る基盤技術の確立を目標としたもの。頂いたご意見も踏まえ、成果の実用化のためには経済性・効率性の向上に加えて、廃電子基板の集荷や集約処理のあり方等にも留意して取り組んで参ります。

事前評価（2016 年度）

（事業費の総額が 10 億円未満の事業のため、事前評価の対象外）