

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 補足説明資料

2021年12月16日

経済産業省資源エネルギー庁資源・燃料部鉱物資源課

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構

1. 事業の概要

事業の目的	<p>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、その処理量には制限がある。</p> <p>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。</p>						
類 型	複数課題プログラム / 研究開発課題（プロジェクト） / 研究開発資金制度						
実施期間	2017 年度～2020 年度 （4年間）	会計区分	一般会計 / エネルギー対策特別会計				
評価時期	事前評価：2016年度、終了時評価：2021年度						
実施形態	国 → JOGMEC（委託） → DOWAエコシステム（委託），早稲田大学・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 資源開発部技術課 神谷太郎（課長（当時））						
執行額 （百万円）	2017FY	2018FY	2019FY	2020FY		総執行額	総予算額
	85	90	75	61		311	350

2. 本事業の政策的位置づけ／背景について

- 我が国は鉍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鉍石（精鉍）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。鉍物資源の安定供給確保の観点から、鉍石（精鉍）以外の原料を安定的に確保することも重要であり、非鉄製錬所においてもスクラップ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。
- 一方、スクラップ等のリサイクル原料には、鉍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。
- そのため、製錬所において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することにより、我が国の鉍物資源の安定供給確保に資するものである。

3. 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术・システムの開発が必要である。
- 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、廃電子基板の受入れ量には制約がある。そのため、前処理段階で廃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。

4. 国内外の類似・競合する研究開発等の状況

	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	比較①
	【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) JX金属(株)		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。	比較②
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。	比較③

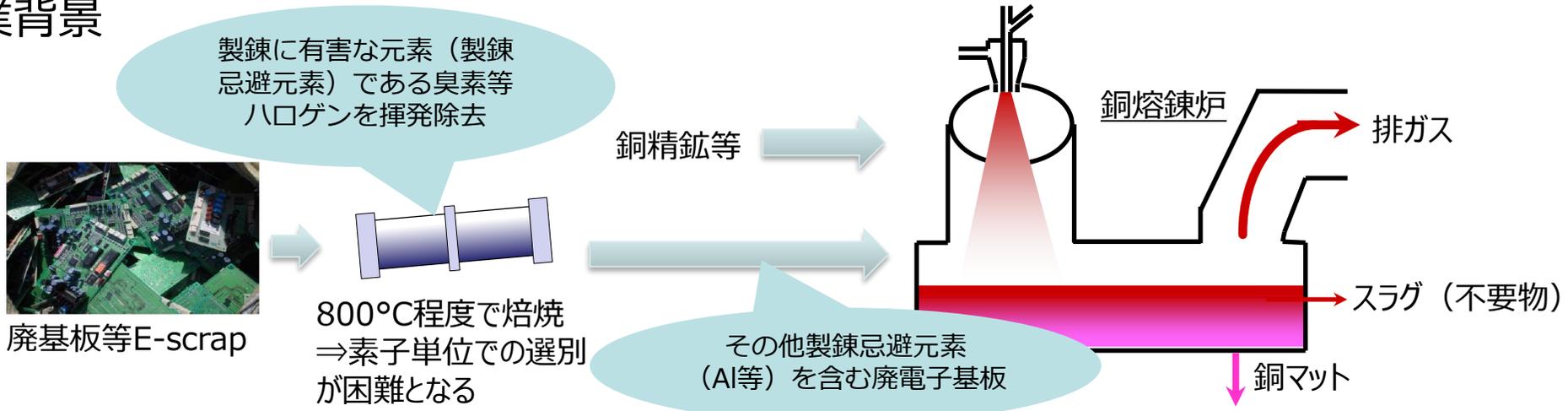
比較①：上記研究開発では、様々なリサイクル原料（廃二次電池、廃家電レアアース磁石等）を処理対象としているところ、当研究開発では、対象とするリサイクル原料を廃電子基板に絞り、前処理技術から炉の操業の改善に至るまで総合的に検討。また、特定の製錬所のためではない汎用性のあるシステムの開発を目標として取り組んだ。

比較②：当研究開発では、現在の廃電子基板リサイクルの前処理では除去されていないアルミニウム等の製錬忌避元素を含む、はんだ付けされた素子類が分別可能なプロセスを検討した。

比較③：当研究開発では、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。これは、日本の製錬・リサイクル事業者における、リサイクル原料の安定調達にも寄与する。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。

(1) 事業背景

【現状】

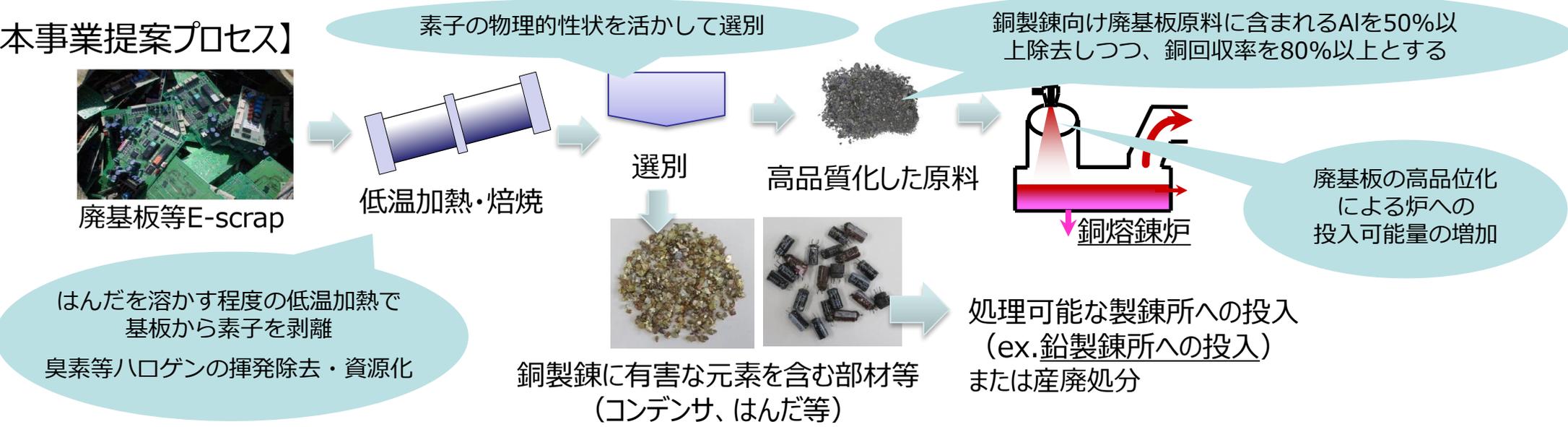


課題：
廃基板等を銅製錬所で処理する場合、アルミニウム等の製錬忌避元素も含めて炉に投入されるため、その処理量は熱バランスのみならず製錬忌避元素によっても制約される。

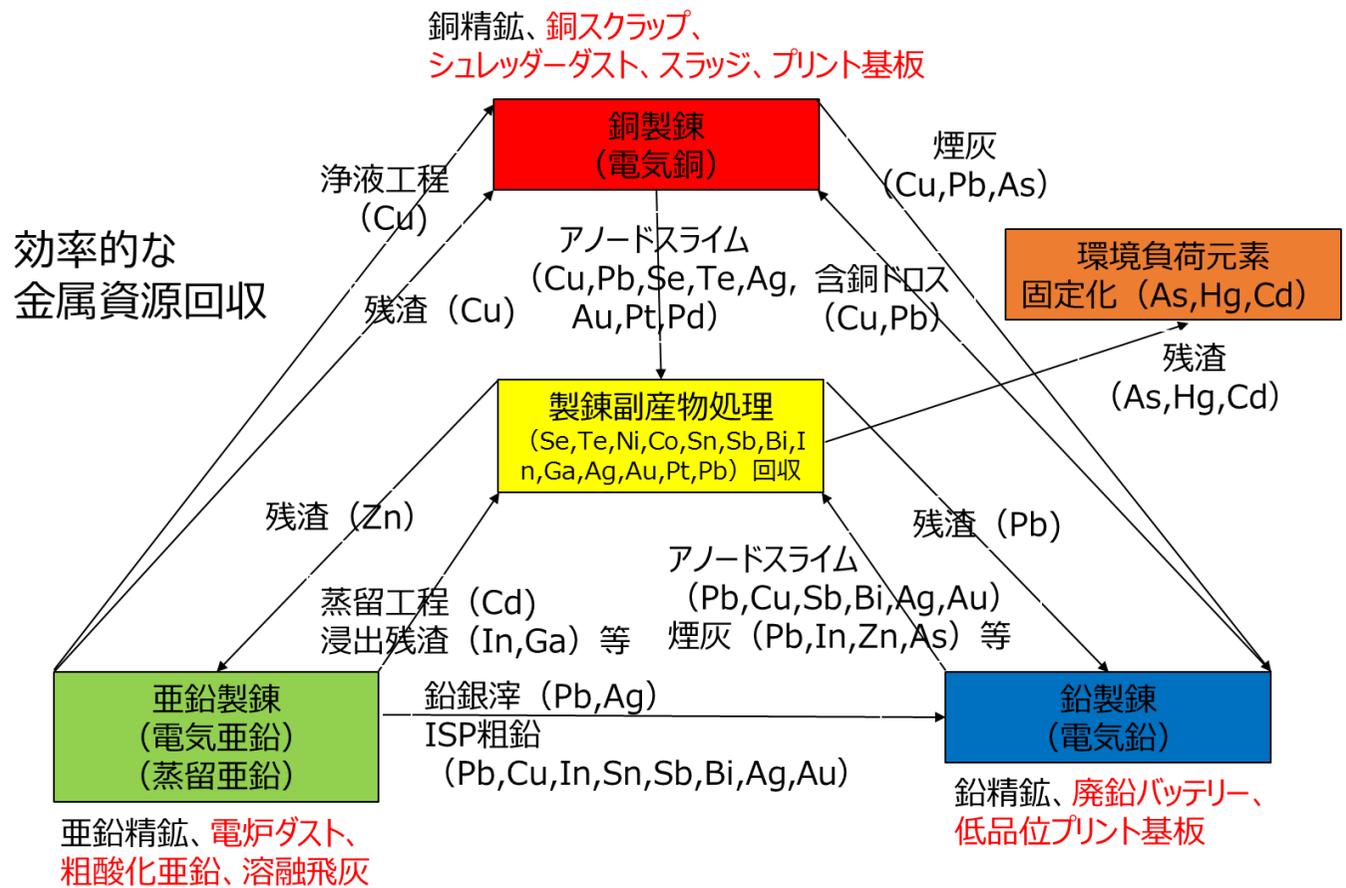
⇒ リサイクル原料比率を高めるには、有価物のロスを抑制しつつ製錬忌避元素を除去するための前処理プロセスが重要。本事業では、「低温加熱」により廃基板から形状を維持したままの素子を剥離することで、効果的な前処理プロセスの構築を図った。

(目標：銅製錬向け廃基板原料に含まれるAlを50%以上除去しつつ、銅回収率を80%以上とする)

【本事業提案プロセス】



(2) 国内製錬所における金属資源回収



プロセス	回収元素	
	銅製錬	目的物
銅製錬	副産物	Au, Ag, PGM, Ni, Co, Se, Te
	目的物	Pb
鉛製錬	副産物	Cu, Au, Ag, PGM, Bi, Sn, Sb, In
	目的物	Zn
亜鉛製錬	副産物	Cd, In, Ge, Ga, (Ni, Co, Cu, Mn)

出典：東北大学 柴田教授講演資料
 (赤字は製錬ネットワーク外部から受け入れている二次原料)

- 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元素を最大限回収するよう努めている。

5-1. 研究開発の全体構成

(3) 研究開発項目

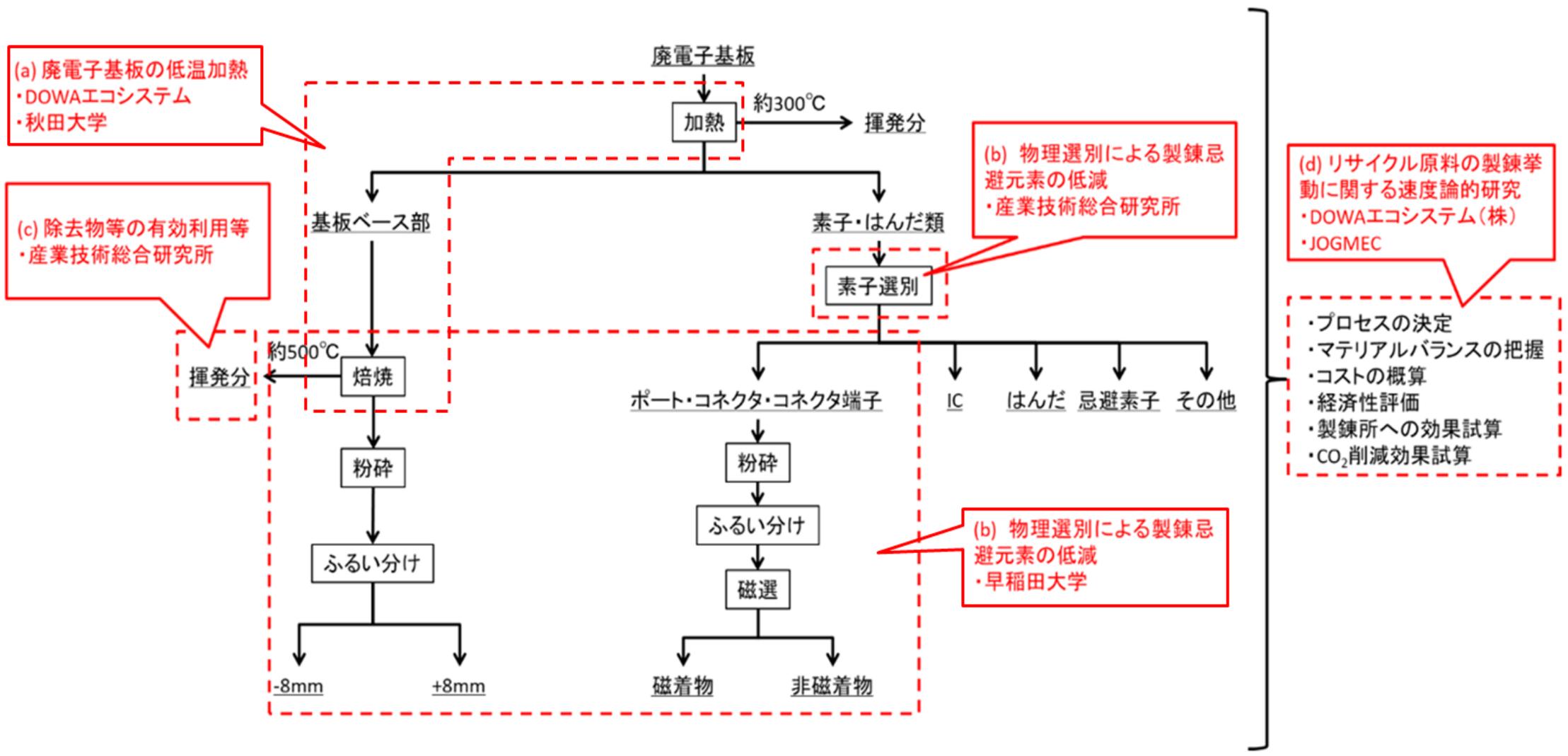
「廃電子基板を対象とした非破壊による素子の分離」並びに「分離した基板ベース部及び素子からの有価物の回収」を効果的・効率的に行うことをテーマに、そのために必要な要素技術の開発に取り組み、その組み合わせによって処理フローを構築した。

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)	<ul style="list-style-type: none"> ・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

5-2. 各研究開発項目の内容

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

【物理選別フローと各実施者の役割分担】

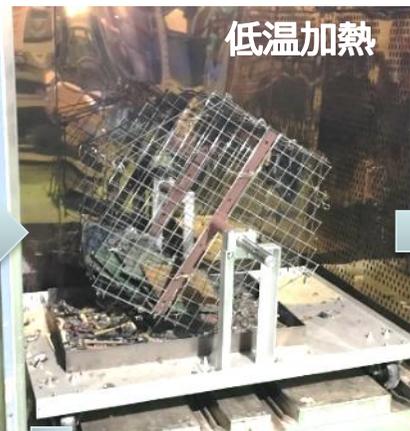


研究開発項目1 物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発

【各要素技術の概要（研究開発項目1-(a)~(c)について）】

家電リサイクルプラントから調達した廃PC基板、薄型TV基板

熱風による低温加熱下で、回転式選別機により素子を剥離・分離。さらに、より高温環境下で基板ベース部を焙焼。



研究開発項目1-(a)
素子剥離や、その後の物理選別がしやすい最適な加熱・焙焼温度の検証【DOWA】

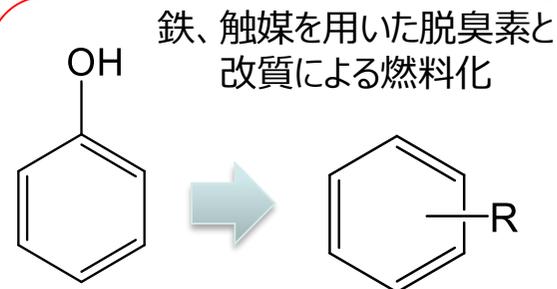
基礎的研究として、熱風の代わりに「過熱水蒸気」を利用した場合の素子の剥離性や臭素の揮発性を検証【秋田大】

研究開発項目1-(c)
基板から液体燃料を得るための最適な熱分解温度の把握、液体燃焼に残留する臭素を除去するための鉄粉・触媒の効果の把握【産総研】

剥離した各種素子

焙焼後基板

揮発成分



研究開発項目1-(b)

剥離した素子を選別するための手法・条件の検討【産総研】

個別の部材、素子をさらに破碎・選別する手法と条件の検討【早大】

5-2. 各研究開発項目の内容

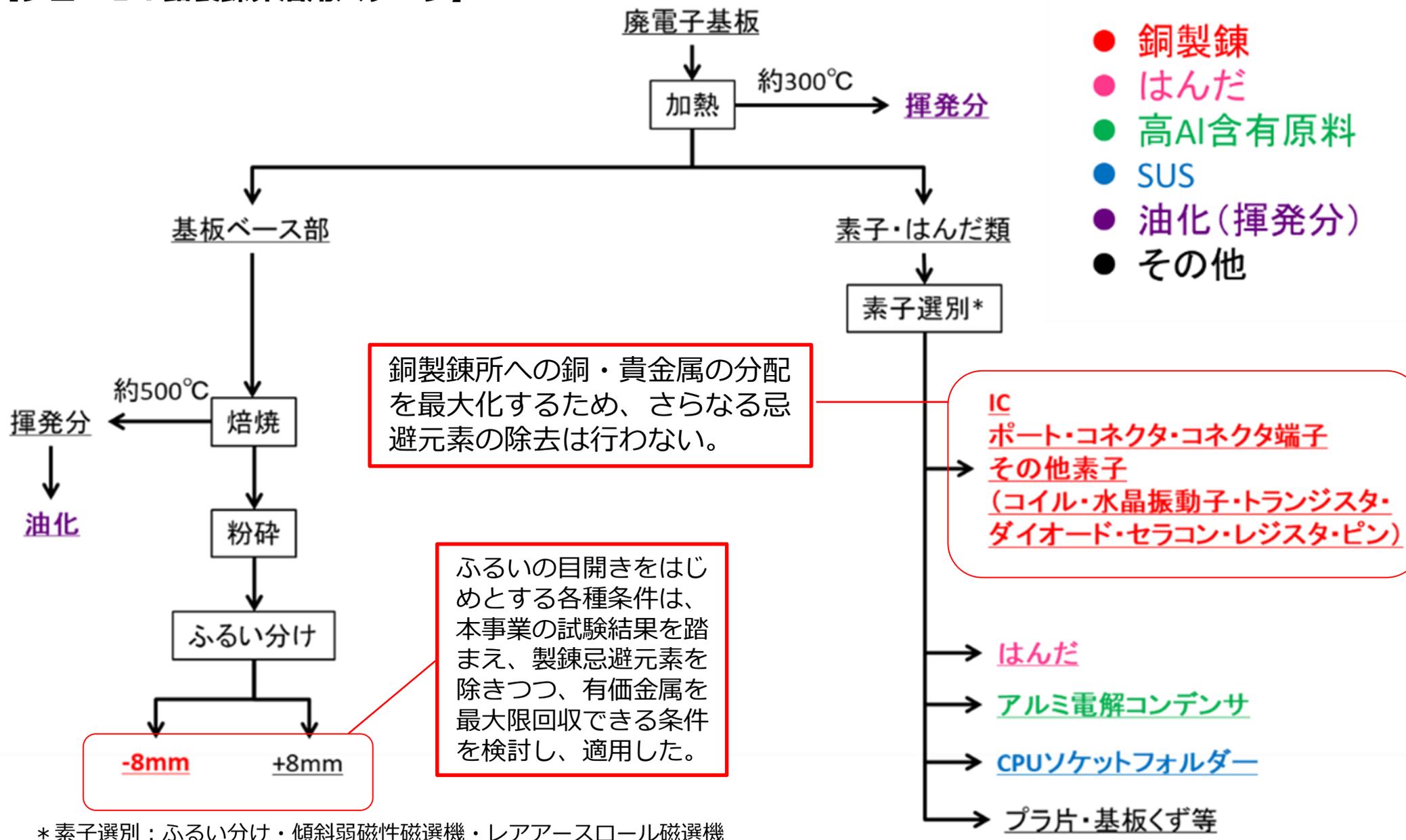
研究開発項目1 物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発

【各要素技術の概要（研究開発項目1-(b)について）】



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

【フロー1：鉛製錬非活用パターン】

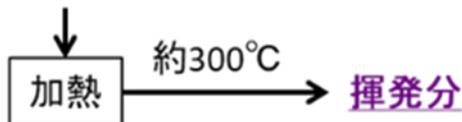


研究開発項目1 物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発

【フロー2：鉛製錬活用パターン】

銅製錬原料の高品質化のため、積極的に忌避元素除去を行う
 ※「鉛製錬原料」にロスした銅分は鉛製錬所で残渣として回収され、最終的には銅原料となる。

廃電子基板

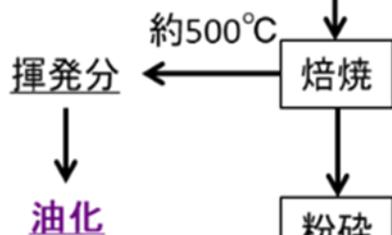


- 銅製錬
- 鉛製錬
- はんだ
- 高Al含有原料
- SUS
- 油化(揮発分)
- その他

基板ベース部

素子・はんだ類

素子選別*



粉碎

ふるい分け

-8mm +8mm

ポート

コネクタ

電気パルス

電気パルス

ふるい分け

ふるい分け

-0.5mm 0.5~8mm -2mm +2mm +8mm

IC
 その他素子+4mm
 (コイル・水晶振動子・
 トランジスタ・ダイオード)

コネクタ端子
 その他素子-4mm
 (セラコン・レジスタ・ピン)

はんだ
 アルミ電解コンデンサ
 CPUソケットフォルダー

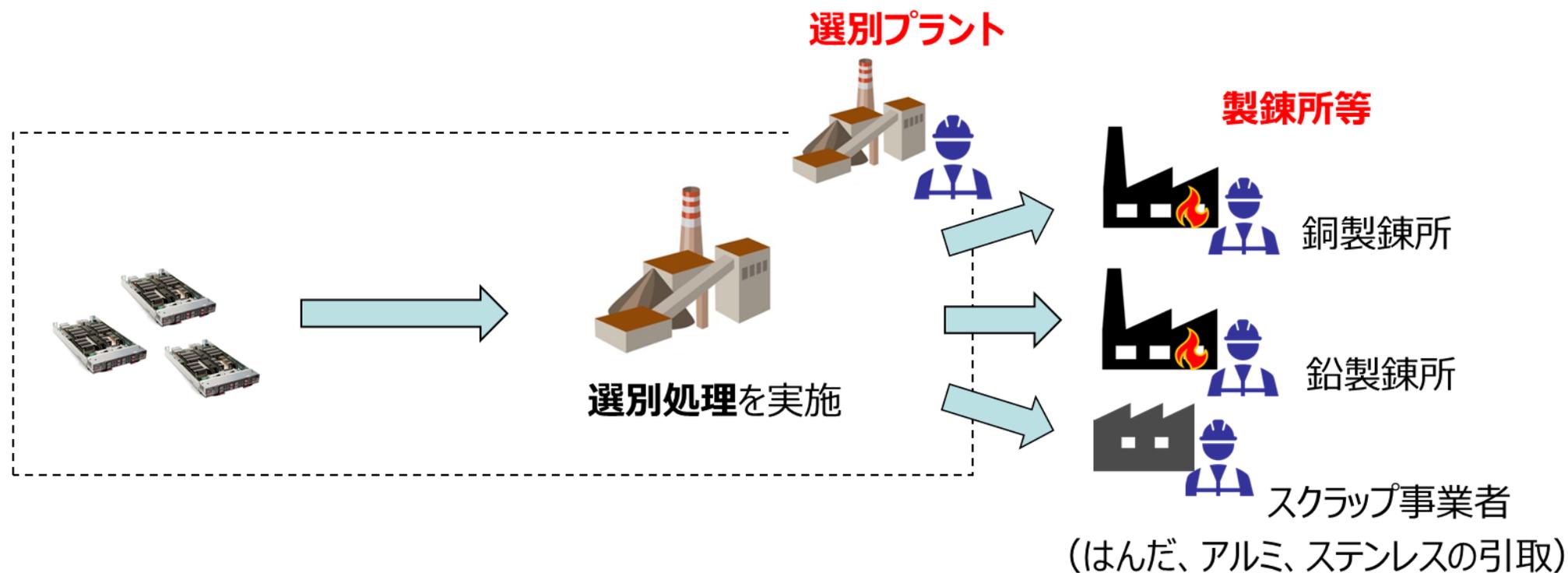
プラ片・基板くず等

ふるいの目開きをはじめとする各種条件は、本事業の試験結果を踏まえ、製錬忌避元素を除きつつ、有価金属を最大限回収できる条件を検討し、適用した。

* 素子選別：ふるい分け・傾斜弱磁性磁選機・レアアースロール磁選機・グリズリスクリーン・気流選別、ドラム磁選機

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

【選別プラント導入のイメージ】



選別プラントで廃基板を一元処理。得られた産物は、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、廃基板中の有価物を回収しやすくなる。

5-2. 各研究開発項目の内容

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

【各パターンのマテリアルバランス】 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%以上除去をクリア

		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

鉛製錬非活用パターン

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

鉛製錬を活用することで忌避元素の含有割合低下

鉛製錬活用パターン

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

製錬所のリサイクルネットワークで回収

		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

5-2. 各研究開発項目の内容

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

【経済性評価の方法】

$$\text{選別プラントの営業利益} = \text{選別処理後の原料価値} - \text{生基板の価値} - \text{各種コスト}$$

営業利益 > 0
 であれば、選別プロセスを導入することに経済的なメリットがある。

	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 選別処理の付加価値*	-	選別プラントの工程コスト
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)

【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	<u>3,976</u> > 0
鉛製錬活用パターン	250,838			<u>11,037</u> > 0

➤ いずれのパターンにおいても選別プラントの導入は経済的にメリットがある。
 ➤ 鉛製錬所の活用により、経済的に有利に働く。⇒ 積極的に忌避元素を分離する価値がある。

5-2. 各研究開発項目の内容

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

【銅製錬所における廃電子基板処理量の試算】

(試算の前提条件)

- ▶ 処理能力1,000t/日の自熔炉で既存原料を800t/日処理し、残りの処理能力で廃電子基板を処理。
- ▶ スラグ組成が $Fe/SiO_2=1.2$, Al_2O_3 5wt%となるように珪石を添加。
- ▶ 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ハロゲン等の除去を目的に焙焼した基板を限界量*投入した場合、③選別後の基板を②と同量投入した場合、④選別後の基板を限界量*投入した場合の4条件で、1日当たりの処理量などを比較

*限界量：スラグ組成（ Fe/SiO_2 ：1.2・ Al_2O_3 品位：5%）を保ったまま投入可能な基板原料の上限值

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

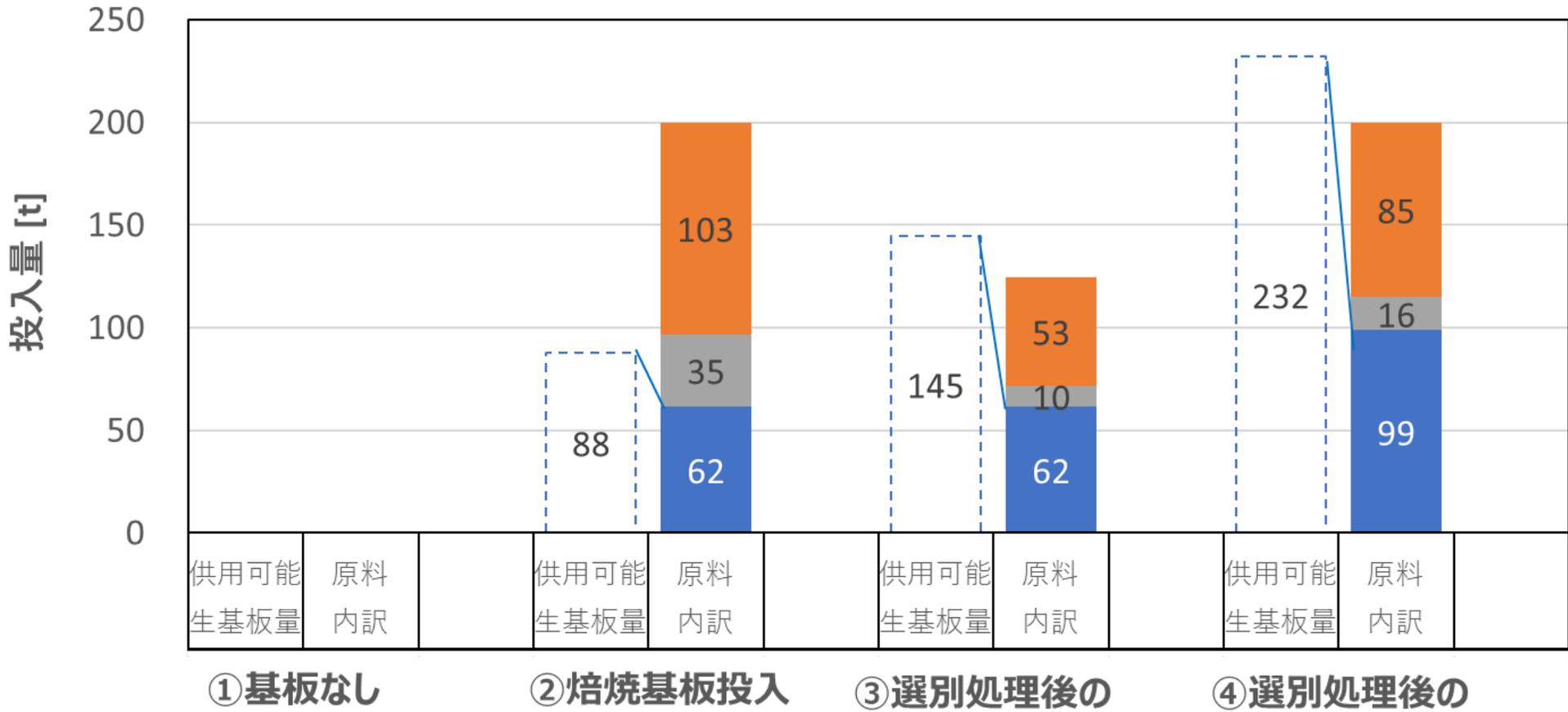
**生基板を焙焼処理したもの（現行の製錬プロセスでは、生基板を製錬原料として投入する前に焙焼処理するのが一般的）

***鉛製錬活用パターンの銅製錬原料の組成を適用

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

原料投入量

生基板 基板原料 珪石 黄鉄鉱



選別後の基板を投入するメリット (②と④の比較)

- 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

5-2. 各研究開発項目の内容

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

【CO2排出量の試算】

試算の前提条件

- 自溶炉に投入する原料のうち8割を既存原料※、残りの処理能力で基板を処理
- 電気銅45万t/年を生産する銅製錬所（自溶炉をベースとする）を想定

※既存原料：銅精鉱・珪石・故銅等を含んだ原料とみなす

CO2削減効果：製錬所のみ

	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

選別処理後の基板を原料とした場合、年間4.2万tのCO₂削減が見込まれる。
⇒ 焙焼基板を投入した場合の約8%のCO₂削減に相当

5-2. 各研究開発項目の内容

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

選別プラントでのCO₂排出量

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

鉱山でのCO₂排出量

	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

鉱山～製錬所でのCO₂削減効果：鉱山～製錬所

	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>

選別処理後の基板を原料とした場合、年間5.6万tのCO₂削減が見込まれる。
⇒ 焙焼基板を投入した場合の約6%のCO₂削減に相当

5-2. 各研究開発項目の内容

研究開発項目2 リサイクル原料の製錬挙動研究

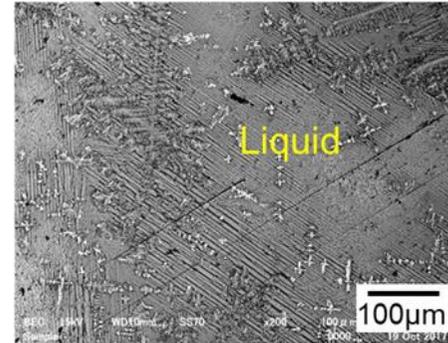
【製錬忌避元素の増加に対応するための銅製錬所における操業指針まとめ】

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際の悪影響や操業改善の指針について、基礎試験の結果などを踏まえて検討した。

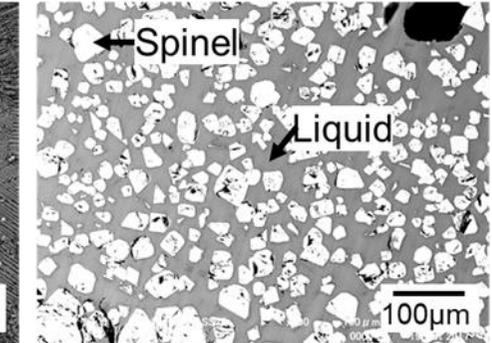
【試験結果の例】

(写真) 模擬原料により生成したスラグ ▶
るつぼ試験により、スラグ中のアルミナ濃度が高くなるとスピネル(固体)が析出し、スラグの粘性が上昇することを確認。

3mass%Al₂O₃



9mass%Al₂O₃



忌避元素	主な悪影響	操業指針
Al	スラグ粘性の上昇によるマットとスラグの分離性悪化 スラグ成分調整のためフラックス使用量増加 スラグ量増加による生産能力の低下 スラグ量増加によるスラグ処分費用の増加	Al ₂ O ₃ 濃度とFe/SiO ₂ を制御 攪拌等によるスラグ中への均一溶解 スラグ中の固体Al ₂ O ₃ の残留を抑制
Br	設備の腐食	前処理による揮発分離
Sb	電解工程におけるアノードの不動態化	酸素分圧を高める CaO/SiO ₂ 、FeO _x -CaO系スラグを生成
Ni	電解工程における電流効率の低下	攪拌等によるスラグ中への溶解促進
Cr	スラグ粘度の上昇によるマットとスラグの分離性悪化	酸素分圧を抑える
Mg	スラグ粘度の上昇によるマットとスラグの分離性悪化	耐火物のスラグコーティング促進

5-2. 各研究開発項目の内容

研究開発項目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】

- ▶ 国内外の関連技術の調査およびプロジェクトの進捗管理を実施
- ▶ 「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」を組成し、年2回委員会を開催
- ▶ 非鉄各社へのヒアリングの実施

【「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」委員名簿】（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

5-2. 各研究開発項目の内容

研究開発項目3 廃電子基板の最適な銅製錬原料化のプロセス評価

(2) 有識者による委員会開催

- ・学識経験者や銅製錬事業者などの有識者による委員会に研究結果を報告し、意見聴取や議論を行うことで、最適な廃基板の製錬前処理プロセスを取りまとめる。毎年度2回実施（中間成果報告および年度成果報告）。
 - 「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」という当事業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%は損しているため、さらに回収率を向上させることが望ましい。（R1年度第2回池田委員）
 - 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、今後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っていくのかは予測できないため、おそらく鉛バッテリーを処理するだけでは、鉛製錬設備は持て余してしまう。鉛バッテリーだけでなく、様々な金属の二次原料を積極的に処理することは国内の製錬設備として、収益の面でも良い方向と考える。（R2年度第2回柴田委員）

(3) 非鉄製錬企業各社ヒアリング

- ・非鉄製錬会社5社に本プロジェクト成果を提示し、以下についてヒアリングを実施
 - 廃基板等リサイクル原料の処理に係る現状（各社それぞれ）
 - 高品質化した基板の調達メリットについて（有価金属の含有度合い、調達コスト次第）
 - 構築した前処理プロセスで得られる高品質基板への要望（Al除去を評価、Sb、Pb等他元素も極力少ない方がよりよい）
 - 経済性評価の妥当性について（考え方について違和感ない）

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／非鉄各社へのヒアリング		委員会	委員会		ヒアリング	委員会	委員会			委員会	委員会		ヒアリング	委員会	委員会	

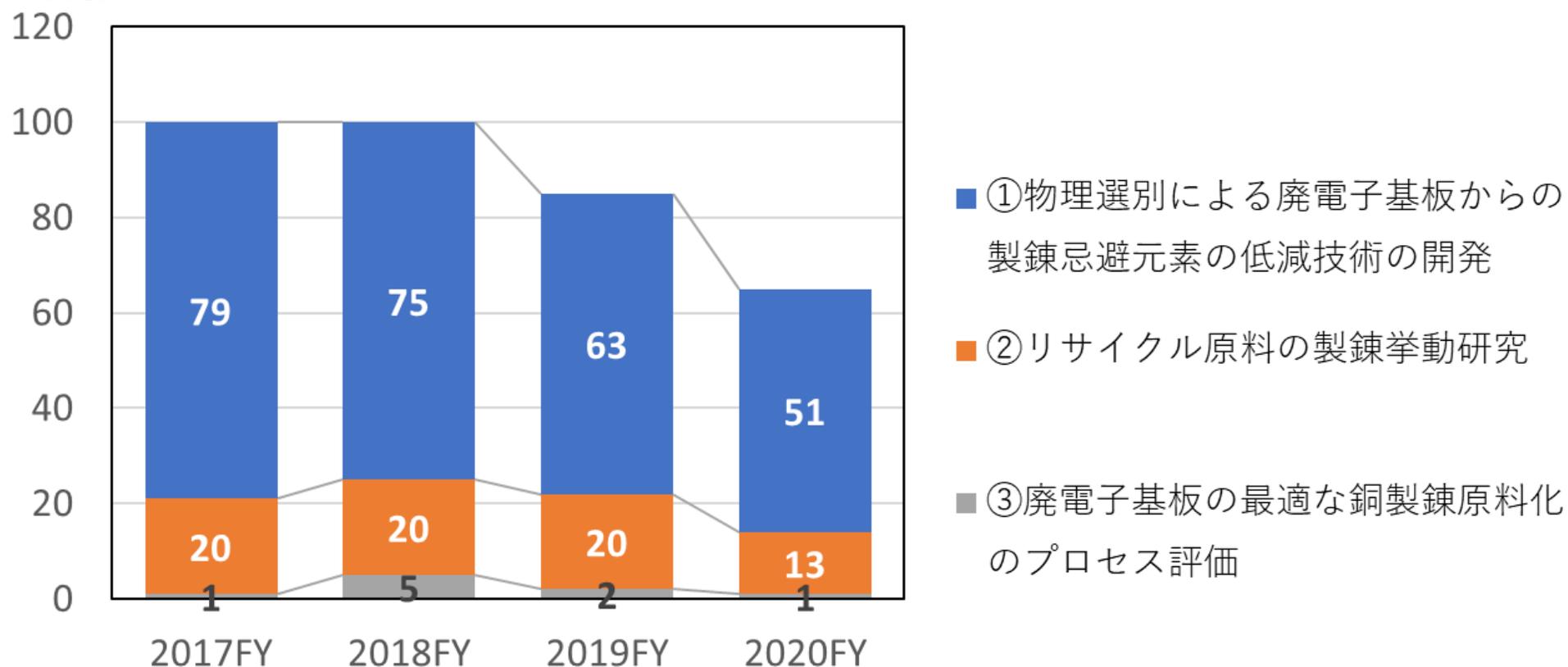
終了時評価

(単位：百万円)

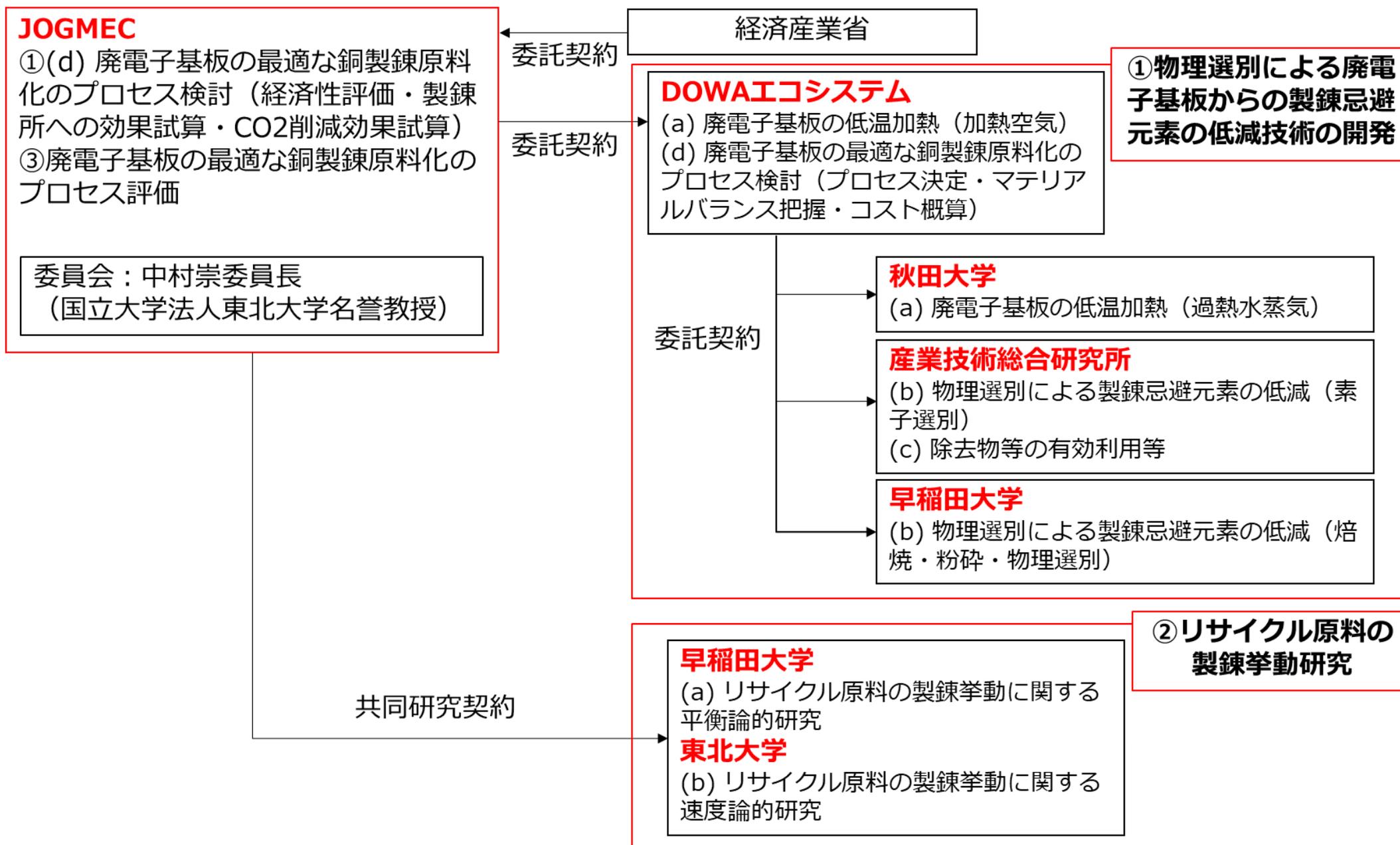
研究開発項目	2017FY	2018FY	2019FY	2020FY	合計
①物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発	79	75	63	51	268
②リサイクル原料の製錬挙動研究	20	20	20	13	73
③廃電子基板の最適な銅製錬原料化のプロセス評価	1	5	2	1	9
計	100	100	85	65	350

(*全て国からの委託費)

(百万円)



【研究開発の実施・マネジメント体制図】（2020年現在）



6-4. 知財や研究開発データの取扱い

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を実施

知財戦略：

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。

※特許出願しているのは以下の3件

- ・ 臭素系難燃剤を含む樹脂の熱分解における脱臭素化方法（特開2020-125421）
- ・ 臭化水素を含むプラスチック分解油の脱臭素化方法（特願2020-133057）
- ・ 部品剥離ユニット及び破碎装置（特願2021-188641）

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。

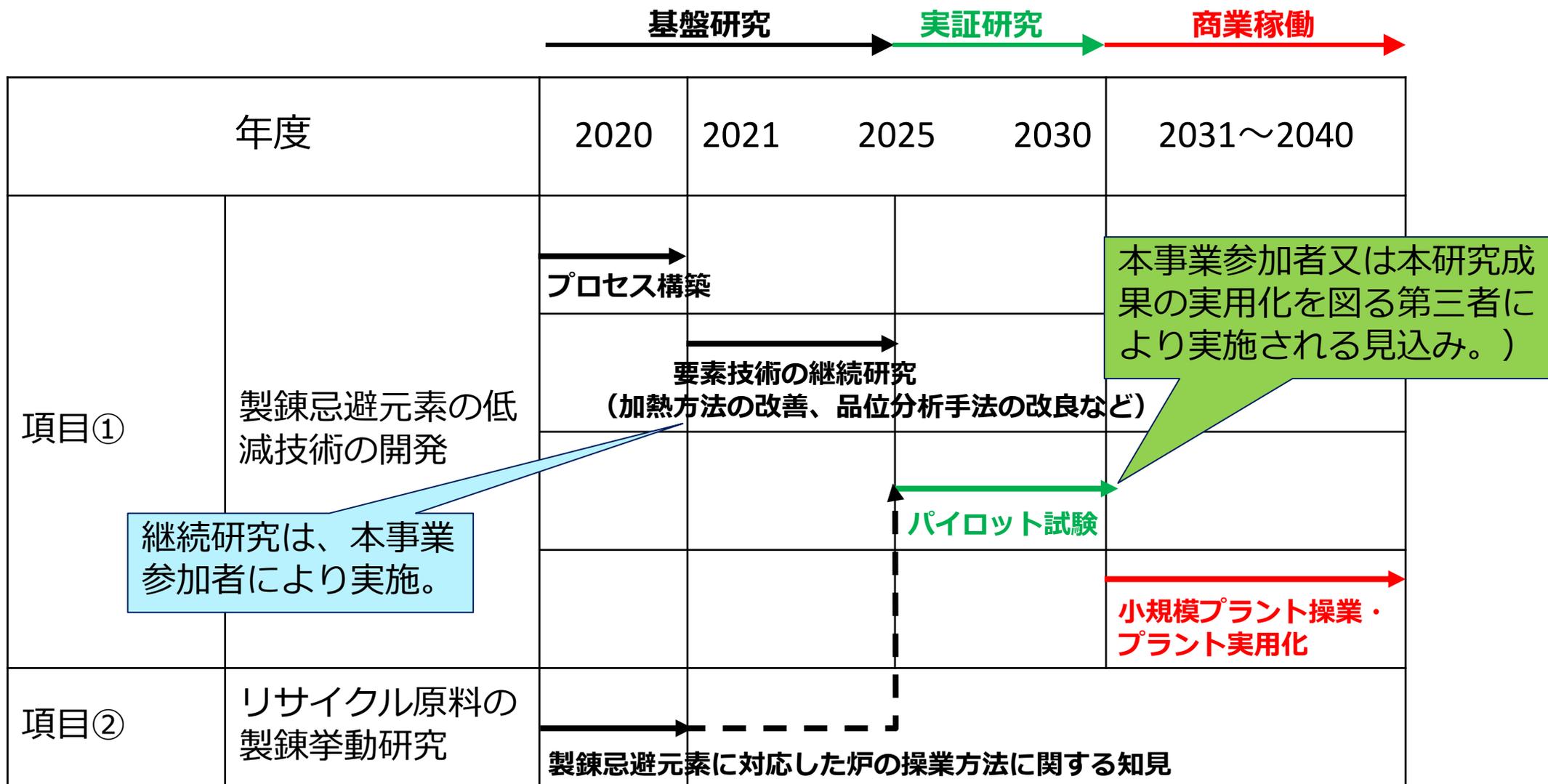
研究開発項目	最終目標(2020年)	成果・意義	達成状況	未達成の原因分析
① 物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発				
(a) 廃電子基板の低温加熱	アルミニウムを50%以上除去した上で、銅を80%以上回収することができるフローを確立する。	アルミニウムを50%以上除去した上で、銅を80%以上回収できるフローを確立した。 これは、銅製錬所におけるリサイクル原料比率の向上を可能にする成果である。	達成	—
(b) 物理選別による製錬忌避元素の低減				
(c) 除去物等の有効利用等	基板ベース部から得られる揮発成分をエネルギー資源として利用するため、生成物の臭素濃度を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	—

年度	論文数 (査読付き)	国内特許出願	国外特許出願	PCT出願	国際標準への寄与	プロトタイプの実成
2017年度	—	—	—	—	—	—
2018年度	1件	—	—	—	—	—
2019年度	2件	—	—	—	—	—
2020年度	1件	2件	—	—	—	—
2021年度	—	1件	—	—	—	—
合計	4件	3件	—	—	—	—

8. 事業アウトカム

【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
<p>2030～ 2040年度</p>	<p>選別プラントの 実用化</p>	<p>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。</p> <p>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、有望な要素技術を新たに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。</p> <p>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。</p>



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※	<ul style="list-style-type: none"> 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（P15記載）×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（P31記載）とすると、5年で回収可能な利益の水準

※ これは選別プラントで得られる利益の試算である。選別プロセスを適用することによって、製錬所では製錬忌避元素の低減により約1.6倍の廃基板原料受入が可能になるだけでなく、受入原料の品位も向上する。つまり、同じ処理能力を持つ製錬プラントでより多くの銅・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れば、全体として8億円以上の経済的効果となる。