

超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発
技術評価結果報告書（終了時評価）

平成30年2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ている「超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発事業」は、主な原料としてリサイクル原料から銅製錬を行う際に問題となる不動態化を防止することで電力使用量の大幅な低減を図ることを目的とし、製錬前処理による粗銅品位の向上や適切な電解精製技術の開発によって不動態化を防止し、アノード銅品位が低い場合でも電解精製法を可能とする技術の開発のため、平成２５年度から２８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超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発事業終了時評価検討会（座長：山口 勉功 早稲田大学理工学術院 教授）における検討の結果とりまとめられた、「超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発事業技術評価結果報告書」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：小林 直人 早稲田大学研究戦略センター副所長・研究院副研究院長 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。

平成３０年２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	小林 直人	早稲田大学研究戦略センター副所長・研究院副研究院長 教授
	大島 まり	東京大学大学院情報学環教授 東京大学生産技術研究所教授
	亀井 信一	株式会社三菱総合研究所研究理事
	齊藤 栄子	三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社 政策研究事業本部主任研究員
	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
	津川 若子	東京農工大学大学院工学研究院准教授
	西尾 好司	株式会社富士通総研経済研究所上席主任研究員
	浜田 恵美子	日本ガイシ株式会社 取締役
	森 俊介	東京理科大学工学部経営工学科教授

(敬称略、座長除き五十音順)

超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発

終了時評価検討会

委員名簿

座長	山口 勉功	早稲田大学理工学術院教授
	高崎 康志	秋田大学大学院国際資源学研究科准教授
	高島 由布子	株式会社三菱総合研究所主席研究員
	高津 明郎	一般財団法人メタル経済研究所主任研究員

(敬称略、座長除き五十音順)

超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発

技術評価に係る省内関係者

【終了時評価時】

(平成29年度)

資源エネルギー庁 資源・燃料部 鉱物資源課長 大東 道郎

大臣官房参事官（イノベーション推進担当）

産業技術環境局 研究開発課 技術評価室長 竹上 嗣郎

【事前評価時】（事業初年度予算要求時）

資源エネルギー庁 資源・燃料部 鉱物資源課長 安永 裕幸

産業技術環境局 産業技術政策課 技術評価室長 岡本 繁樹

超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発

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（平成30年2月28日）

- ・技術評価結果報告書（終了時評価）について

◆「超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発」評価検討会

第1回評価検討会（平成29年12月25日）

- ・事業の概要について
- ・評価の進め方について

第2回評価検討会（平成30年2月2日）

- ・技術評価結果報告書（終了時評価）について

【事前評価】

◆産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会（平成24年6月8日）

- ・技術評価書（事前評価）について

目 次

はじめに

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

超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発 終了時評価検討会 委員名簿

超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発 技術評価に係る省内関係者

超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発 終了時評価の審議経過

目次

	ページ
I. 研究開発課題（プロジェクト）概要	1
1. 事業アウトカム	2
2. 研究開発内容及び事業アウトプット	2
3. 当省（国）が実施することの必要性	7
4. 事業アウトカム達成に至までのロードマップ	7
5. 研究開発の実施・金地面と体制等	8
6. 費用対効果	11
II. 外部有識者（評価検討会等）の評価	
1. 事業アウトカムの妥当性	13
2. 研究開発内容及び事業アウトプットの妥当性	14
3. 当省（国）が実施することの必要性の妥当性	16
4. 事業アウトカム達成に至までのロードマップの妥当性	17
5. 研究開発の実施・金地面と体制等の妥当性	18
6. 費用対効果の妥当性	18
7. 総合評価	19
8. 今後の研究開発の方向等に関する提言	20
III. 評点法による評点結果	22
IV. 産業構造審議会評価ワーキンググループの所見及び同所見を踏まえた改善点等	23

**超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発
技術評価結果報告書（終了時評価）**

プロジェクト名	超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発
行政事業レビューとの関係	平成２９年度行政事業レビューシート 0309
上位施策名	・「資源確保戦略」（平成 24 年 6 月 27 日公表） ・「エネルギー基本計画」（平成 26 年 4 月 11 日閣議決定）
担当課室	資源エネルギー庁資源・燃料部鉱物資源課

プロジェクトの目的・概要

銅製錬業は、銅の電解工程において高い電力量を必要とするエネルギー多消費型産業であることから、今後、エネルギー源のシフトにより電力料金が引き上げられた場合は、国内での操業の維持が困難となり得ることが想定される。また、銅製錬の原料事情は、新興国での需要拡大による鉱石の低品位化や不純物の増加、リサイクル材の処理量増加により、不純物の供用量が増加傾向にある。現時点では問題は顕在化していないが、今後もこの傾向が続き、不純物の供用量が増え続ければ、電解工程において、不純物がアノード表面を覆い、銅の溶出が停止する（不動態化）などの問題が顕著となり、現状の電解精製法では対応が困難になる可能性がある。このため、プロジェクトの目的としては、鉱石の低品位化・不純物の増加やリサイクル材の処理量の増加により、将来予想される粗銅の低品位化や不純物の増加に対応しつつ、電解工程における電解精製法の適用可能範囲の把握・拡大等を図り、電力を中心とする生産コストの低減に繋がるプロセスを開発することで、電解工程での電力使用量の大幅な低減を図る。

現状では、粗銅の低品位化・高不純物化が進展している例として、リサイクル原料を利用する銅製錬が挙げられる。リサイクル原料を利用する銅製錬では、通常の銅精鉱を原料とした場合に比べて粗銅中に不純物が多く、銅品位が低くなる。このため、銅精鉱を原料とした粗銅で実施されている電解精製法による電気銅回収を行おうとすると、不動態化などの影響により、電解精製法による電気銅回収が難しい。そのため、現状では電解採取法で電気銅を回収しているが、電力原単位が電解精製法に比べて 8 倍程度高くなる。そこで、本技術開発では、低品位粗銅の例として、リサイクル原料を利用する銅製錬をモデルケースとして取り上げ、前処理による粗銅品位の向上、適切な電解精製技術の開発によって不動態化を防止し、アノード銅品位が低く、不純物が多い場合でも電解精製法を可能とするための技術開発を行い、上記の将来の粗銅の低品位化・高不純物化傾向に対応する技術を獲得する。

予算額等（委託）

（単位：百万円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	終了時評価時期	事業実施主体
平成 25 年度	平成 28 年度	—	平成 29 年度	JOGMEC
H26FY 執行額	H27FY 執行額	H28FY 執行額	総執行額	総予算額
191 百万円	231 百万円	173 百万円	713 百万円	744 百万円

I. 研究開発課題（プロジェクト）概要

1. 事業アウトカム

事業アウトカム指標		
【アウトカム指標】 リサイクル銅製錬の電解工程における電力使用量を低減させ、CO₂ 排出量を平成 28 年度までに 9,422 t-CO₂/年削減する。 【アウトカム指標設定の根拠】 低品位・高不純物粗銅を扱っている例として、リサイクル原料を利用する銅製錬においては、通常の銅精鉱を原料とした場合に比べて銅品位（80%前後）が低く、不純物が多いため、電解精製法では不動態化などの影響により電気銅回収が難しい。そのため、電解採取法で電気銅を回収しているが、電力原単位が電解精製法に比べて 8 倍程度高くなる。そこで、アノード銅品位が低く、不純物を多く含む場合でも電解精製法を可能とするための技術開発を行う。 電解採取法による電気銅回収の場合、電力原単位は 2,200 kWh/t-Cu 程度であるが、電解精製法では 300 kWh/t-Cu 程度である。従って、リサイクル原料を利用する銅製錬に電解精製法を適用することにより、1,900 kWh/t-Cu の電力使用量削減が可能となる。モデルケースとしてリサイクル原料による銅生産を 9,000 t/年とすると、電力使用量の削減は 1,900 kWh/t-Cu × 9,000 t/年 = 17,100 × 10³ kWh/年となり、CO₂ 排出削減係数を 0.000551 t-CO₂/kWh として、9,422 t-CO₂/年の削減効果がある。		
指標目標値		
事業開始時（25年度）	計画：リサイクル銅製錬における CO ₂ 削減量 8,360 t-CO ₂ /年	実績：なし
終了時評価時（28年度）	計画：リサイクル銅製錬の電解工程における電力使用量を低減させ、CO ₂ 排出量を平成 28 年度までに 9,422t-CO ₂ /年削減する	実績：リサイクル原料を利用する銅製錬において、電力使用量 1,900kWh/t-Cu、CO ₂ 排出量 9,422t-CO ₂ /年を削減できる電解精製法を適用するプロセスを開発。
事業目標達成時	銅のリサイクル製錬で生産される Cu 品位 80%前後の低品位銅アノードに適用可能な電解精製プロセスを開発し、CO ₂ 排出量を削減する。	

2. 研究開発内容及び事業アウトプット

（1）研究開発内容

銅製錬事業においては、銅精鉱中の銅品位の低下や不純物の増加、廃電子基板をはじめとするリサイクル原料の増加に伴い、銅アノード中の不純物が増加する傾向がある。この傾向が続くと、銅アノードの電解精製時に不純物がアノードを覆い、「不動態化」と呼ばれる現象が生じる恐れが高まり、電解が停止してしまう。現状でも、リサイクル原料を主体とした銅製錬においては、通常の銅

精鉱を原料とした場合に比べて銅品位が低く、不純物を多く含むため、電解精製法では不動態化などの影響により電気銅回収が難しく、電解採取法で電気銅を回収している。そこで、低銅品位・高不純物含有粗銅を対象として、粗銅から精製アノードを作る技術開発をするとともに、アノードの銅品位が低く、不純物が多い場合でも電解精製法を可能とするための技術開発を行った。

また、不動態化の一因となる原料中の不純物の影響に関する基礎研究や不純物の低減に関する基礎研究を行った。

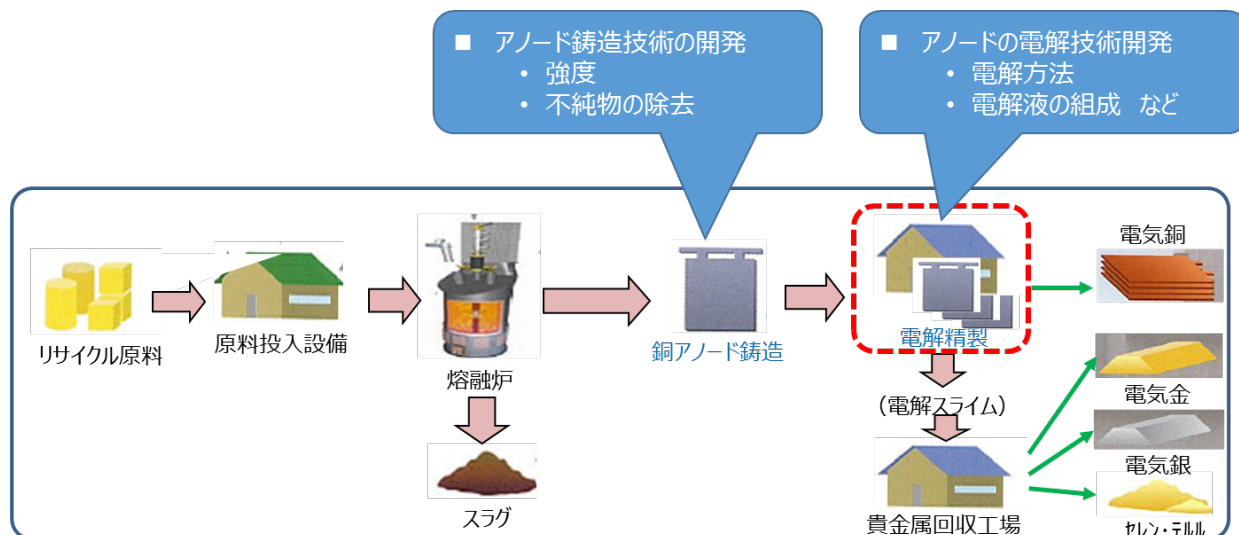


図1 技術開発概念図

技術開発は、(i) アノード casting 技術の開発及び電解精製技術の開発、(ii) 高濃度不純物を含有した銅アノードの電解精製に向けた基礎研究に分けて実施した。

(i) アノード casting 技術の開発及び電解精製技術の開発

①低品位粗銅のアノード casting 技術の開発

電解精製で使用するアノードは一般的に300～400kg/枚の重量物であり、これを電解槽に懸垂させるために、モールド上部をハンガータイプにして、自重に耐えうる強度にしている。しかしながら、80-90%純度の粗銅では、電解槽に懸垂させた実績がなく、ハンガー部分の割れや折れ曲がり懸念される。また胴体部分の強度（曲げ、衝撃に耐えうる強度）も要求される。これらを定量的に把握し、かつ組成・組織のコントロールにより、実用規模でのアノード casting 技術を検討した。また、低品位粗銅の電解精製を行うと、アノードの表面をSb濃縮相やPb化合物等が覆い、容易に不動態化するため、乾式法による低品位粗銅の精製についても併せて検討を行った。

低品位粗銅アノードはCu相以外にCu-Ni-Sb-Sn-As相、Cu₂S相、Ag相、Pb相から構成され、不純物相占有率が22%と高く、不純物相がネットワークを形成していた。引張試験の結果、破断時の伸び率が10%を大きく下回り、実用規模に耐えうる力学特性を満たしていなかった。

基礎研究の結果、力学特性および不動態化防止の観点から、低品位粗銅からSbやPbを除去する必要がある事がわかり、乾式法による粗銅精製に取り組んだ。硝酸ソーダを用いた酸化精製する事でSbおよびPb品位を1%以下にすることができ、酸化精製後に還元して得られた酸化精製-還元アノードは、Cu-Ni-Sb-Sn-As相が消失し、不純物相占有率が3%に低減し、不純物相のネットワークを途切

れさせる事ができた。結果、実用規模に耐えうる力学特性を有し、不動態化防止にも効果が見られた。

しかし、硝酸ソーダを用いた酸化精製では、スラグへの Cu ロスが 12.2%と高く、コストが高いため、別の精製方法を検討した。Sb は炭酸ソーダを用いた酸化精製により除去し、Pb は $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ フラックスを用いた酸化精製または真空精製により除去した後、還元し鑄造する事で、酸化精製による脱 Pb ではスラグへの Cu ロスが 3.5%、真空精製による脱 Pb では Cu ロスが 0.6%まで低減し、コストも削減した。

さらに粗銅の酸化精製により発生するスラグへ分配した Cu の回収を検討した結果、脱 Sb スラグに含有する Cu の 91%を銅電解液として回収し、脱 Pb スラグに含有する Cu の 95%を酸化精製による脱 Pb 工程に戻して回収する事できる事となった。

②低品位アノードの電解精製技術の開発

低品位アノードを用いた電解精製では、電解中にアノード表面に不純物の皮膜が付着し、銅の溶出が阻害されるという問題がある。これが進行すると、アノード表面と皮膜の間の銅イオンが拡散することができなくなり、不動態化が発生し銅の溶解が停止する。

電解精製を構成する要素は、アノード、カソード、電解槽、電解液、電流の5点である。この全てを研究要素として、不動態化を抑制する技術を検討した。

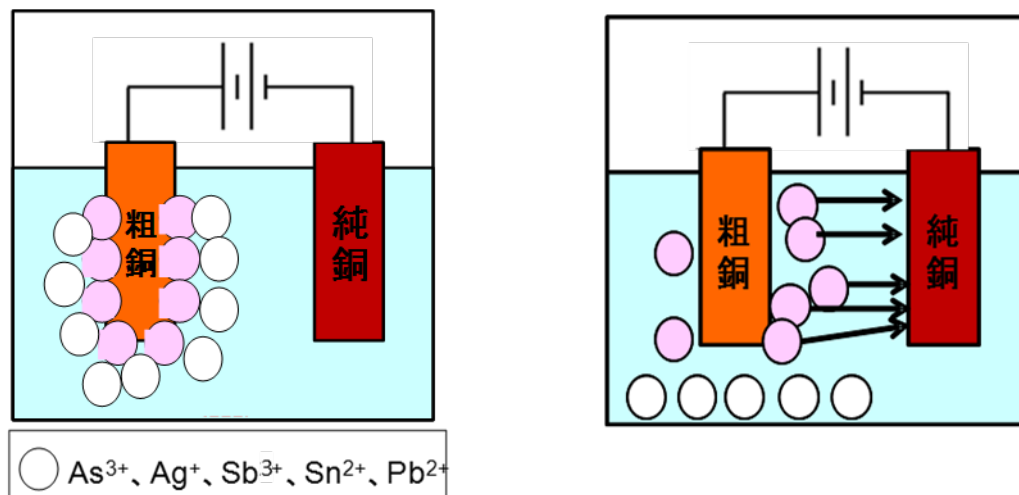


図2 不動態化概念図

不動態化までの時間は精製をしない低品位粗銅をアノードとして用いたときには24時間であったが、酸化精製アノードでは90時間以上、酸化精製+還元アノードは168時間以上を達成した。また、アノード組成以外には、電解液中の Ni 濃度の低下、液温の上昇、給液流量の上昇、アノードへの電解液の吹付などが不動態化抑制に効果があった。

また、バスケットアノードを用いた電解も実施したが、不動態化までの時間を44時間まで向上させたものの、スライム層形成によるアノード片同士の接触不良が発生し、電圧が高くなるという結果になった。

以上より、最適な結果としては、 $\text{Sb}<1\%$ 、 $\text{Pb}<1\%$ （好ましくは0.2%）とした酸化還元粗銅アノードを用いて、そのアノードに液流速5m/sで電解液を吹き付け、その他電解条件を調整する事により、114時間の電解では、電解電力原単位 $<300\text{ kWh/t-Cu}$ で、LMEグレードの電気銅を得ることができた。

また、168 時間では、Se を除き LME グレードの電気銅が得られた。

③経済性評価の実施及び全体プロセスの確立

①および②の結果をもとに、モデルケースを設定し、全体プロセスを検討した。

アノードの鑄造については、まず Sb は炭酸ソーダを用いた酸化精製により除去し、Pb は $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ フラックスを用いた酸化精製または真空精製により除去したのち、還元し鑄造する。鉛の除去方法について、酸化精製と真空精製の経済性を比較した。

精製時の銅の回収率は、①酸化精製による脱 Pb プロセスで 94.6%、②真空精製による脱 Pb プロセスで 94.8%と大きな差はない。電気銅の生産量を 9,500 t/年、電力単価を 13 円/kWh とした場合、現行の電解採取プロセスと比較し、①で 82 百万円/年、②で 113 百万円/年のコスト削減となるが、②では設備投資額が大きく、投資回収に要する期間は、①10.4 年、②12.2 年となった。

表 1 経済性評価（現行プロセスとの比較）

		1. 酸化精製による脱Pbプロセス	2. 真空精製による脱Pbプロセス	特記
ランニング コスト	電解電力費	△235 百万円/年	△235 百万円/年	電力単価を13円/kWhと設定
	その他電力費	△41 百万円/年	△28 百万円/年	銅粉浸出工程削減分
	物品費	+225 百万円/年	+184 百万円/年	鑄造工程の薬剤費増
	その他変動費	△31 百万円/年	△35 百万円/年	蒸気、酸素、分析、輸送等
計	計	△82 百万円/年	△113百万円/年	電気銅生産量 9,500t/年と設定
設備投資		849百万円	1,380百万円	酸化精製設備など
投資回収		10.4 年	12.2 年	

(ii) 高濃度不純物を含有した銅アノードの電解精製に向けた基礎研究

補完する基礎研究として以下を実施した。

①高濃度不純物含有銅アノードの電解特性の調査

不純物である Au、Ag などの貴金属、ならびにリサイクルで原料に混入する可能性が高い Pb、Sb などの成分を考慮し、それぞれの元素が不動態化に与える影響を調査し、以下の知見を得ることができた。

- ・ Ag 単独で不動態化する。
- ・ Ag が含まれている場合は不動態化しやすい。
- ・ Pb 単独 (<4%) または Sb 単独 (<4%) では不動態化しない。
- ・ Ag+Pb 及び Ag+Sb の組み合わせは不動態化する。
- ・ Ag+Pb+Sb は不動態化する。

②高濃度不純物含有銅アノードの力学特性ならびに鑄造条件の調査

高濃度不純物含有銅アノードの力学特性として、最大応力が 90 から 115MPa 程度であるが、純銅の最大応力が約 180MPa であり、純銅より強度が低く、加工性が著しく悪い。特に、Cu-Ni-Sb 相が存在する場合は強度への悪影響は小さいが加工性を著しく低下する。また、Cu-Ni-Sb 相+Pb 相が存在する場合は強度への悪影響が非常に大きい。したがって、高濃度不純物含有銅アノードを銅の電解精製においてアノードとして用いるためには、懸垂を行う必要性もあるという点からも、鑄造条件

において精製を行うことで不純物を除去し、最大応力も高くする必要がある。

以上より、鑄造条件において、乾式法による不純物除去を実施した。銅に、不純物としてアンチモン、銀、ニッケル、鉛、錫を加えた合金に対して、 $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O-FeO}$ 系フラックスを用いて酸化精錬を行うことで、銅損失を抑え、銀を除く不純物を適正濃度まで除去することができることが示された。

(iii) その他

近年銅精鉱中に増加傾向があるヒ素について、製錬前に低減するための基礎研究を実施した。

(2) 事業アウトプット

事業アウトプット指標		
実施する研究テーマ数として4テーマをアウトプット指標として設定した。 研究テーマの設定に当たっては、銅のリサイクル製錬で生産される Cu 品位 80%前後の低品位銅アノードに適用可能な電解精製プロセスの開発を検討したうえで、必要な個別技術開発要素を抽出した。 (1) アノード鑄造技術の開発及び電解精製技術の開発 ①低品位粗銅のアノード鑄造技術の開発 ②低品位アノードの電解精製技術の開発 (2) 高濃度不純物を含有した銅アノードの電解精製に向けた基礎研究 ①高濃度不純物含有銅アノードの電解特性の調査 ②高濃度不純物含有銅アノードの力学特性ならびに鑄造条件の調査		
指標目標値（計画及び実績）		
事業開始時（25 年度）	計画：5 テーマ	実績：5 テーマ
終了時評価時（28 年度）	計画：4 テーマを実施し、不動態化発生までの時間168時間以上とする。	実績：4 テーマを実施、不動態化発生までの時間168時間を達成した。 なお、事業開始時には「新アノード技術の開発」をテーマとしていたが、効果が限定的であったため、平成 27 年度に開発を中止した。

< 共通指標実績 >

論文発表数	学会発表件数
1	19

<国民との科学・技術対話の実施などコミュニケーション活動>

JOGMECが実施している成果報告会において、事業実施状況を報告した。

- ・平成27年6月9日 平成27年度第1回 JOGMEC 金属資源セミナー
- ・平成29年8月29日 平成29年度第4回 JOGMEC 金属資源セミナー

また、各研究機関による学会などでの研究内容の発表、各事業者による論文発表やシンポジウム等での本研究成果を含む学術講演などを行っている。

- ・平成28年11月13～16日 Copper 2016

3. 当省(国)が実施することの必要性

銅製錬業は、銅の電解工程において高い電力量を必要とするエネルギー多消費型産業であることから、今後、エネルギー源のシフトにより電力価格が引き上げられた場合は、操業の維持が困難となり得ることが想定され、結果として、我が国銅製錬業の空洞化が大きく懸念される。

また、銅製錬の原料事情は、新興国での需要拡大による鉱石の低品位化の進展とリサイクル材の処理量増加等により、不純物の供用量が増加傾向にある。

このような背景の中、鉱石の低品位化に対応しつつ、リサイクル銅の利用を促進し、さらに、電解工程における電力を中心とする生産コストの低減が喫緊の課題である。一方で、前述のとおり、リサイクル原料を利用する銅製錬においては、銅精鉱を原料とした場合に比べて銅品位が低く、また化学的には不動態化の影響により通常の銅精錬で用いられている電解プロセスよりも多量の電力が必要となるため、低電力な電解精製法を利用することを可能とするための技術開発を行い、省エネに寄与する。低品位銅アノードにおいても電解精製が可能なプロセスを開発し、電解工程での電力使用量の大幅な低減を図ることは、わが国の銅製錬業界の競争力強化に重要である。

4. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ

本事業においては、事業最終年度における電力消費量の大幅削減（現状の2,200kW/t-Cu から80%削減）をアウトカムとして設定し、平成25年度から平成28年度の4年にわたり、年度毎に前述した4つのテーマを検討した。最終年度の平成28年度において、電力消費量の大幅削減（現状の2,200kW/t-Cu から80%削減）の目標を達成する成果を上げ、銅のリサイクル製錬で生産されるCu品位80%前後の低品位銅アノードに適用可能な電解精製プロセスの要素技術を確立することが出来た。これらの成果は、リサイクル原料を使用する銅製錬所への導入が見込まれる。

また、本プロジェクトにおいては、アノード強度や不動態化のメカニズム、不動態化抑制に関して、大学で基礎的な研究を行なった。近年、鉱山産の銅精鉱に関して、銅品位の低下や不純物が増加傾向にあり、銅の電解精製を行なっている銅精鉱を原料とする銅製錬の場合であっても、今後アノードの強度低下や不動態化の傾向が現れ、電力使用量が増加する可能性がある。したがって、大学など研究機関を通じた技術指導などにより、リサイクル原料に限らず、銅製錬全般において本プロジェクトで得られた知見が普及していくものと考えられる。

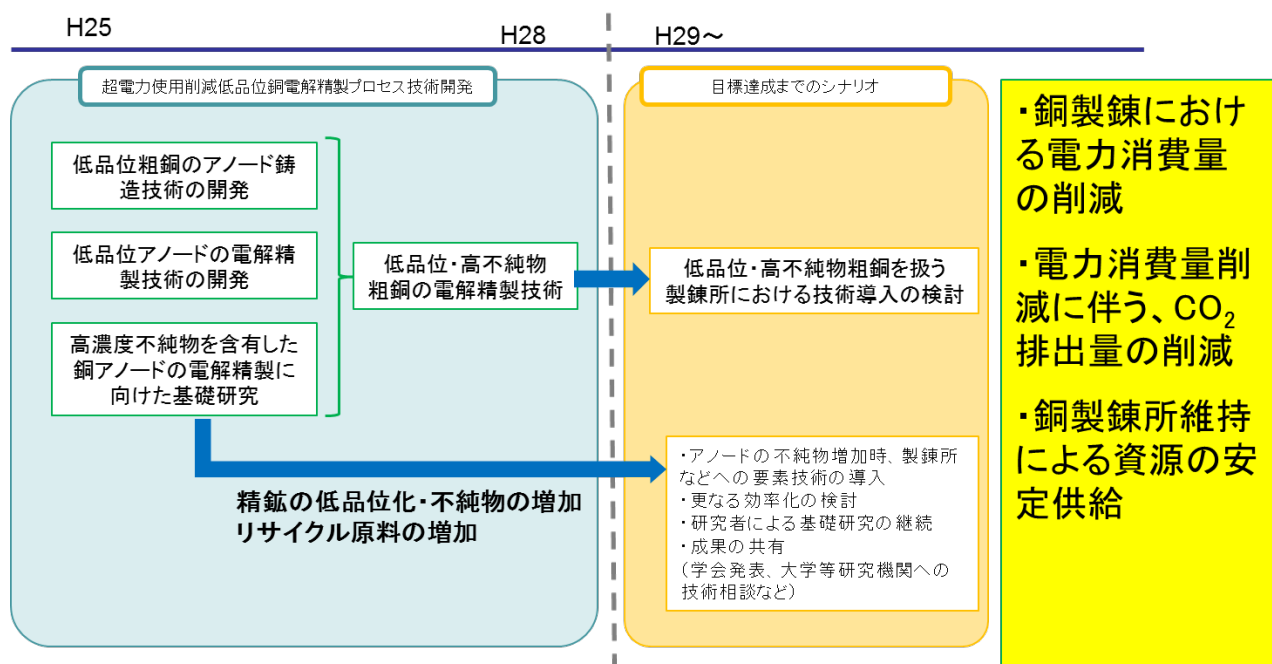


図3 ロードマップ

5. 研究開発の実施・マネジメント体制等

1) 研究開発計画

研究開発計画の策定にあたっては、2. 研究開発内容及び事業アウトプット（1）研究開発内容で示したとおり、アウトカム達成のために全体の電解精製プロセスを低品位粗銅のアノード鑄造技術、低品位アノードの電解精製技術の開発等の個別技術に分けて、要素技術の開発を行うこととし、最終的に個別要素技術を組み合わせてプロセスの評価を行った。

2) 研究開発実施者の実施体制

本技術開発は、平成25年に経済産業省が公募を実施し、厳正かつ公平な審査を経て、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）が採択され、経済産業省は同機構と委託契約を締結した。

JOGMECは以下に示すような類似事業の実施実績があり、研究開発実施者として適格であると判断された。

<事業実績1>

事業名：エネルギー使用合理化希少金属等高効率回収システム開発

事業概要：廃小型電子・電気機器からエネルギー負荷を抑えた効率的な破碎・物理選別によりレアメタル濃集物を得ると共に、レアメタル濃集物から化学的手法により効率的にレアメタルを回収する技術を開発する。また、廃超硬工具については、現状のタングステンリサイクルフローよりコストや環境負荷の低減が図れる効率的な化学的リサイクルフローを確立する。

実施年度：平成19～22年度

発注者：経済産業省資源エネルギー庁鉱物資源課

<事業実績2>

事業名：希土類金属等回収技術研究開発事業

事業概要：産業廃棄物として処分されている廃研磨材より不純物を効率的に除去し、低コストで研磨材を再生することによりレアアースをリサイクルする技術を開発する。また、再生蛍光体としてリサイクルされている廃蛍光体をあらゆる用途へのリサイクルが可能となる様、廃蛍光体から各レアアース元素を分離・抽出する技術を開発する。

実施年度：平成21年度～平成24年度

発注者：経済産業省資源エネルギー庁鉱物資源課

<事業実績3>

事業名：エネルギー使用合理化低品位鉱石・難処理鉱石に対応した革新的製錬プロセス技術開発

事業概要：近年、銅製錬や亜鉛製錬に供給される精鉱が、低品位化・微細化してきており、それらを使用することにより製錬所でトラブルが発生している。そのため銅製錬プロセス系内の煙灰から不純物（砒素）を分離し、安定なスコロダイトを生成する技術を開発すると共に、微細化した亜鉛精鉱を100%供用しても酸化焙焼が均質に進み安定操業が可能となる技術を開発する。

実施年度：平成21年度～平成24年度

発注者：経済産業省資源エネルギー庁鉱物資源課

<事業実績4>

事業名：リサイクル優先レアメタル回収技術開発

事業概要：経済産業省・環境省の合同会合にて選定された使用済小型家電製品等からのリサイクル優先5鉱種のうち、 tantalum及びcobaltについて、製錬事業者等が市中の使用済小型家電製品等から当該鉱種を回収するための技術開発及び効率的経済的に再資源化するための実証事業を行い、持続的な循環型社会の形成を目指すとともに我が国のレアメタル資源確保に資することを目的として本事業を実施した。分離・回収した部位・部品から有価金属に戻す技術が未確立であったため、本事業による技術開発において、レアメタルを含む部品を細かく破碎することなく分離・剥離・回収する技術や、回収後にレアメタル濃縮物を得るための酸化焙焼・乾留、物理選別等による元素濃集技術など、レアメタル原料として回収する経済性のあるリサイクル技術の開発を実施した。具体的には、廃小型家電等からの tantalum回収またはcobalt回収技術の開発を実施し、プロセスを確立した。

実施年度：平成24～27年度

発注者：経済産業省資源エネルギー庁鉱物資源課

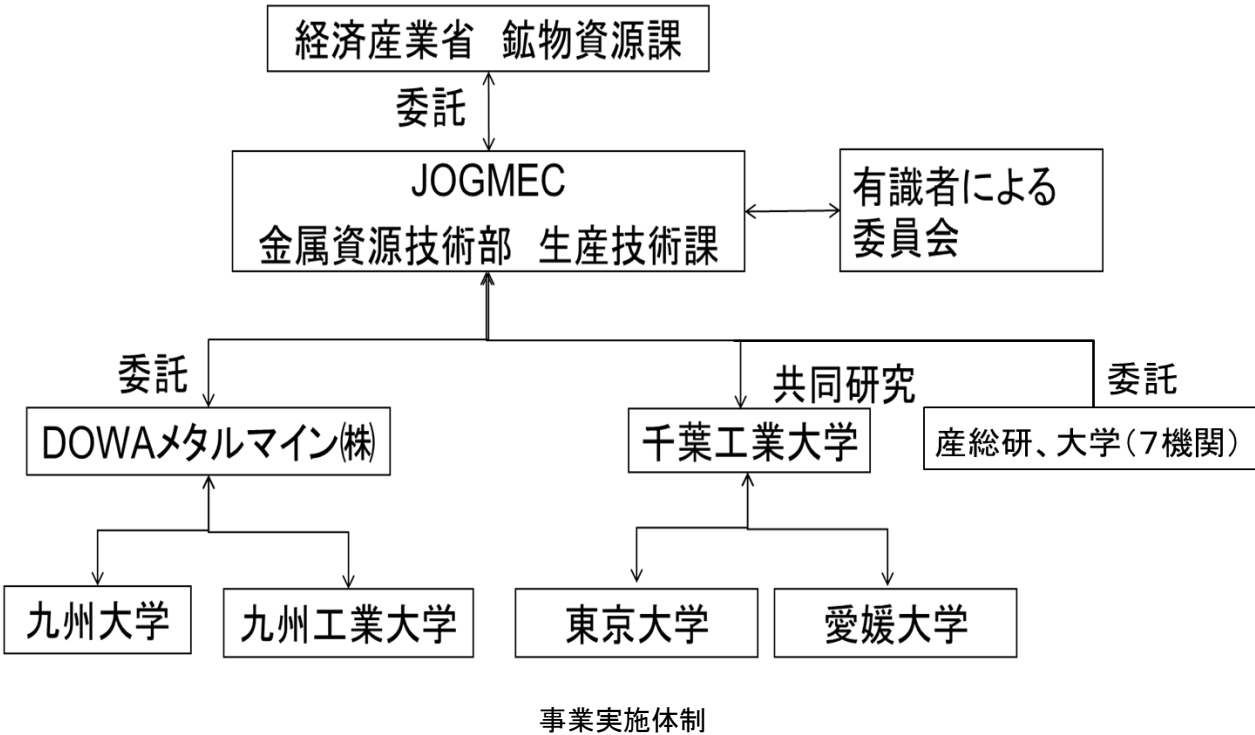
JOGMECは、「超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発」及び「高濃度不純物を含む銅アノードの電解精製に向けた基礎研究」の2つのテーマについて公募を実施し、同機構内

での厳正かつ公平な審査を経て、前者はDOWAメタルマイン株式会社が、後者は千葉工業大学が採択された。同社においては非鉄製錬所を所有し、電解精製プロセス技術の開発を積極的に行っている企業である。また同大学においては本基礎研究に必要な設備を有し、さらに電解精製プロセス技術開発に関する知見を有している。

「超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発」については、DOWAメタルマイン株式会社が、「アノード不動態化挙動に関する基礎研究」、「低品位アノードからの電解精製技術に関する基礎研究」の2つの技術開発について、それぞれ九州大学、九州工業大学に再委託を行った。

「高濃度不純物を含有した銅アノードの電解精製に向けた基礎研究」については、千葉工業大学が、「金属間化合物の作製および溶解挙動の調査」、「電解浴組成および溶液温度の不動態化挙動への影響」について東京大学、愛媛大学に再委託を行った。

以上のように、銅電解精製プロセス技術開発に実績を有するJOGMECのもと、銅電解精製プロセス事業を実施している企業と銅電解精製プロセス研究に実績を有する研究機関が事業に参画し、産官学が連携した事業実施体制を構築した。



3）資金配分

本事業における平成25年度から28年度の資金の流れの推移を下表に示す。各技術開発課題の進捗は順調であったことから、資金配分は適当であったと考えられる。

	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	合計
DOWAメタルマイ ン株式会社	107 百万円	180 百万円	145 百万円	80 百万円	512 百万円

うち九州大学	5 百万円	5 百万円	5 百万円	5 百万円	20 百万円
うち九州工業大学	5 百万円	5 百万円	5 百万円	5 百万円	20 百万円
千葉工業大学	10 百万円	10 百万円	15 百万円	15 百万円	50 百万円
うち東京大学	4 百万円	4 百万円	5 百万円	2 百万円	15 百万円
うち愛媛大学	—	—	—	3 百万円	3 百万円
産業技術総合研究所			8 百万円	8 百万円	16 百万円
産業技術総合研究所			8 百万円	8 百万円	16 百万円
産業技術総合研究所			7 百万円	8 百万円	15 百万円
東北大学			8 百万円	8 百万円	16 百万円
東北大学			8 百万円	7 百万円	15 百万円
早稲田大学			8 百万円	8 百万円	16 百万円
京都大学			8 百万円	8 百万円	16 百万円
芝浦工業大学			6 百万円	8 百万円	14 百万円
秋田大学			4 百万円	6 百万円	10 百万円
東京大学			4 百万円	8 百万円	12 百万円

4) 知財の取り扱い

JOGMECからDOWAメタルマイン株式会社に対する委託契約においてバイドール条項を盛り込み、技術開発の成果を、実際に銅電解精製プロセス事業を行っている企業が活用できるようにした。

6. 費用対効果

モデルケースとして酸化精製法を用い、銅生産量を 9,500 t/年とした場合、CO₂ 排出削減量は以下の通り見込まれる。

- ・ 現状の電力原単位：2,200 kWh/t-Cu
- ・ 技術開発後の電力原単位：300 kWh/t-Cu
→単位当たり省エネ量：1,900 kWh/t-Cu
- ・ モデルケースにおける Cu 生産量：9,500 t/年
→省エネ量（電力）＝単位当たり省エネ量×Cu 生産量
＝1,900 kWh/t-Cu×9,500t/年
＝18,050×10³ kWh/年
- ・ 排出係数：0.000587 t-CO₂/kWh ※
→CO₂削減量＝18,050×10³ kWh/年×0.000587 t-CO₂/kWh＝10,595 t-CO₂/年

※平成27年度の電気事業別排出係数の代替値（H28.12.27公表）

また、モデルケースを設定して、本事業の経済性を評価した。モデルケースでは、全量リサイクル原料による銅生産で、9,500 t/年の銅生産量と電力単価を 13 円/kWh を仮定した。

電解採取から電解精製に変更することで、上述のように省エネ量は $18,050 \times 10^3$ kWh/年が見込まれ、電力費の削減は

$$\rightarrow \text{電力費削減量} = 18,050 \times 10^3 \text{ kWh/年} \times 13 \text{ 円/kWh} = 235 \text{ 百万円/年}$$

となる。また、電解採取において粗銅を溶解するために必要としていた電力費削減（△41 百万円/年）やその他変動費削減（△31 百万円/年）も見込まれる。

一方、技術開発を行ったプロセスでは、粗銅の精製などに要する薬剤費が現状のプロセスより増加する（+225 百万円/年）。

従って、トータルでは

$$\rightarrow \text{ランニングコスト削減費} = \Delta 235 \text{ 百万円/年} + \Delta 41 \text{ 百万円/年} + \Delta 31 \text{ 百万円/年} + 225 \text{ 百万円/年}$$

$$= \Delta 82 \text{ 百万円/年}$$

のランニングコスト削減が見込まれる。

本技術開発成果の導入に当たっては、粗銅の精製設備や電解設備の改造などが必要であり、これに係る設備投資費用は 849 百万円と見込まれ、

$$\rightarrow \text{投資回収期間} = 849 \text{ 百万円} \div \Delta 82 \text{ 百万円/年} = 10.4 \text{ 年}$$

となる。

Ⅱ. 外部有識者（評価検討会等）の評価

1. 事業アウトカムの妥当性

将来的に銅製錬における原材料中の不純物が増加した場合のリスクに備えた議論をすることは肝要であり、電解精製時に顕在化しうるリスクを明確化し、その対応策を検証のうえ対応策を研究したことは、将来における日本の銅産業にとって意味深いものであると考えられる。また、消費エネルギーの大きな電解採取法に対して電解精製法は消費エネルギーが少なく、電力価格の高い我が国においては電力やCO₂の削減を図るとともに、リサイクル原料主体の銅製錬の国際競争力を高めるうえでも重要である。

一方で、本事業の意義を念頭に置いた場合、アウトカム指標が「リサイクル銅製錬におけるCO₂削減」で適切であったのかは疑念がある。また、国内におけるリサイクル原料主体の銅製錬の規模は鉱石主体に比べると小さいため、国内におけるリサイクル原料主体の銅製錬の規模を広げるためにも、海外から国内にリサイクル原料を持ってくる仕組みを積極的に作る必要があるが、技術的には海外の製錬所においても可能であるため成果の公表に際しては考慮する必要がある。さらに、事業アウトカムの効果が具現化される時期の想定に対する議論も必要である。

【肯定的所見】

- ・（A委員）消費エネルギーの大きな電解採取法に対して電解精製法はエネルギー消費が少なくすむ。

実操業規模で低品位銅を不動態化させずに電解精製を行える技術開発ができたことは、今後の銅電解の技術開発において有用な知見が得られている。これにより、プロセス全体のエネルギー消費が削減され、CO₂排出削減係数を削減できることから本事業は妥当である。

- ・（B委員）本事業自体が「現状では顕在化していないが、今後生じるかもしれない課題」への対応であり、現段階で本アウトカム実現時の国際競争力や社会課題解決可能性について評価することは困難。

当初定めた目標値に対しては十分達成しており、評価すべき。

- ・（C委員）これまで国内銅スマルターは、不純物品位の低い精鉱の製錬で発展してきたが、近年、銅精鉱中の不純物品位は上昇し、各スマルターは対応に苦慮している。加えて、環境保全を目的とした資源循環型社会の形成は日本にとっても重要な課題であり、この側面では、スマルターにはスクラップ処理が課されている。

将来的に、スクラップ処理量の増加や精鉱中不純物増加が国内の銅産業に如何なるインパクトを与え得るかについては、想定される潜在リスクを抽出し、リスクの顕在化を防止するか、あるいは顕在化時の対応を議論しておくことは肝要である。

以上の背景を踏まえると、今回の事業アウトカムは、潜在しうるリスクの一つとして、精製アノード中の不純物品位上昇時の問題点として、電解精製時に顕在化しうるリスクを明確にし、当該リスク顕在化時の対応策を検証し、その結果から回答を引き出したことは、将来における日本の銅産業にとって意味深いものであると考えられる。

今回の検証結果は、銅精製工程における省エネを導くだけでなく、省資源の副次効果もあり、資源循環型社会形成の一助となるものと思われる。

- ・（D委員）銅の電解採取は銅生産量に対する消費電力が大きく、電力価格の高い我が国においては電解採取から、消費電力が小さい電解精製に変更し、電力やCO₂の削減を図ると共に、リサイクル原料主体の銅製錬の国際競争力を高めることが重要である。本事業は、電解採取から電解

精製に変更することによる CO2 削減量という数値目標を立てており、事業アウトカム指標は明確である。

本事業で開発された技術のアウトカムが実現した場合、リサイクル原料主体の銅製錬において目標値を上回る大幅な CO2 の削減が可能であり、事業アウトカム指標が達成されることになる。また、プロセスの低コスト化も可能になる。さらに、本事業のアウトカムは銅精鉱の不純物の増加に伴う銅低品位化に対応可能な情報も有している。以上のことから、本事業のアウトカムはリサイクル主体の銅製錬と鉱石主体の銅製錬のいずれにも有益であり、我が国の銅製錬の国際競争力に資する。よって、事業アウトカムは妥当と判断できる。

【問題あり・要改善とする所見】

- ・（A 委員）本事業の成果は高不純物含有粗銅であっても適切な液流があれば実操業規模でも不動態化を回避できることを見出している。技術的には海外の製錬所においても可能であると考えられ、成果の公表に際しては考慮する必要がある。
- ・（B 委員）本事業の意義を念頭に置くと、主たるアウトカム指標が「リサイクル銅精錬における CO2 削減」が適切であったのか懸念あり。（どちらかと言えば不純物増加に対応可能な銅精錬技術の確立が主題ではないか。事業目的は妥当としても、アウトカム指標との相関に懸念。）
- ・（C 委員）今回の事業アウトカムの効果が具現化される時期の想定に対する議論が必要である。
- ・（D 委員）我が国の銅製錬におけるリサイクル原料主体の銅製錬の規模は、銅鉱石を主体とする銅製錬に比べて銅の生産量が小さく、現在の国内における本技術の市場規模は小さい。国際特許などを取得し、海外でも応用することも考えられるが、技術の海外流失にも繋がるので注意が必要である。国内におけるリサイクル原料主体の銅製錬の規模を広げていくためにも、さらに海外から国内にリサイクル原料を持ってくる仕組みや流れを積極的につくる必要がある。

2. 研究開発内容及び事業アウトプットの妥当性

リサイクル原料を主体とした銅製錬では製造される低品位銅は、不動態化により電解精製が困難となるほど多量の不純物を含んでおり、この低品位銅を実操業規模で不動態化せずに電解精製を行ったことは、電力コストを削減することで、リサイクル原料を主体とした銅製錬の収益性・国際競争力の強化に資するものである。また、国内銅製錬事業者の扱うアノードは、現在は不純物品位が低く、将来の不純物品位の上昇リスクを想定していないため、不純物品位が上昇することで発生する不動態化を回避するための方法を見出すことで、本リスクの顕在化を回避する手法の方向性を明確にした。

一方で、銅製錬で発生する不動態化現象は、不純物品位のみでなく、そのほかのパラメータも大きく影響する場合があります。実操業規模の試験との条件に差異があることから、より詳細な検討を行うなど、複合的な要因について言及が必要だと思われる。また、セレンが LME グレードを満たしていないが、サンプリングなどの分析方法が適切であったか検証するとともに、アノード製造や電解液吹き付け工程において今後も研究を進めていく必要がある。さらに、将来の銅原料中の不純物品位の上昇を前提とする場合、実際にどの程度の品位・組成・量になるかが分からない現段階でプロセス確立や経済性評価を行っても、不安定要素が多すぎるのではないかと懸念される。

【肯定的所見】

- ・（Ａ委員）本事業で対象としたリサイクル原料から製造される低品位銅は、これまで不動態化させずに電解精製することは非常に困難であるほど多量の不純物を含んでいる。この低品位銅を実操業規模で不動態化させずに電解精製を行えたことは、今後の銅電解の技術開発において有用な知見が得られている。さらに、不動態化の要因となる元素について各種研究も行われており、さらなる発展が期待される。
- ・（Ｂ委員）本事業が「今後銅精錬原料の質が低下した場合の対応」を念頭に置いていることを踏まえると、特に『高濃度不純物を含有した～基礎研究』については今後の対応を検討する上でのベースとなる有益な情報が得られていると評価。
個別要素技術の目標値はすべて達成している点は高く評価。
- ・（Ｃ委員）ほとんどの国内銅スメルターの取り扱う精製アノードの不純物品位は１％未満であり、不純物品位上昇のリスクを想定していない。このような状況下、スクラップ由来の精製アノード（不純物品位の高い）を取り扱う企業を選定し、不純物品位上昇時のリスクとして、不動態化が発生した場合のエネルギーロス进行想定し、この現象発生を回避するための検証方法を見出したことで、本リスクの顕在化を回避する手法の方向性を明確にした。
- ・（Ｄ委員）現在、リサイクル原料を主体とした銅製錬では電解採取が採用されており、電力コストの低い電解精製が進んでいない。本事業は、リサイクル原料を主体とした銅製錬の収益性、国際競争力の強化であり、技術的優位性および経済優位性のある研究開発の内容である。
事業アウトプットの目標値として設定された不動態化までの時間 168 時間以上は達成されている。さらに知財の取り扱いへの対応、論文や学会発表なども実施されていると判断できる。

【問題あり・要改善とする所見】

- ・（Ａ委員）各不純物元素の影響を調査した試験は、基本的な情報を明確にしている点は評価できる。
しかし、実操業規模で行った試験との試験条件、例えば液流などに差異があることからより詳細な検討が必要である。
- ・（Ｂ委員）本事業が「今後銅精錬原料の質が低下した場合の対応」を前提とする場合、どの程度の品位・組成・量の原料が入ってくるか明確にはわかっていない現段階でプロセスの確立・経済性評価を行っても不確定要素が多すぎるのではないか。
- ・（Ｃ委員）今回の検証では、不純物品位と不動態化との一義的な関係についてであるが、銅電解精製で発生する不動態化現象は、アノード中の不純物品位のみでなく、その他の電解パラメータも大きく影響する場合がある。
不純物品位以外の原因あるいは複合的な原因についての言及が必要であると思われる。
- ・（Ｄ委員）114 時間では LME グレードの電気銅が得られているが、アウトプットの目標値である 168 時間ではセレンが LME グレードを満足させていない。セレンにおいても LME グレードを達成するために、アノード製造における酸化精製や電解における電解液吹き付けにおいて、今後も研究開発を進めていく必要がある。

3. 当省（国）が実施することの必要性

本事業の対象である銅は我が国の製造業にとって不可欠な金属であり、資源ナショナリズムが台頭してきている現在において、リサイクル原料を主体とした銅製錬で電解精製を行う技術開発は重要であるが、技術的課題が難しく、また、現在は顕在化していない問題への対応であるため実操業規模での試験を伴う本技術開発においては民間企業単独で実施するインセンティブが低く、国がプロジェクトを実施する意義は大きい。

一方で、事業アウトカムの省エネルギーに加えて環境保全との関連性をより強く打ち出すことや、リサイクル原料の増加による不純物増加の時間軸と本技術開発・成果の社会実装の時間軸を合わせて考えて「今やらなければならない理由」を明示することで、より妥当性の説得力が増したのではないかと。

【肯定的所見】

- ・（A委員）本事業では実操業規模での電解精製に成功している。実操業サイズの電解では、電解液の流れやアノードスライムの挙動など実験室サイズでは再現できない重要な知見が得られる。実操業サイズで試験を行うためにはその付帯設備も含めた費用も多額となるため、本事業による実施は極めて妥当である。
- ・（B委員）資源セキュリティ、銅精錬産業の国際競争力強化の両方の観点から有益。
現段階で顕在化していない社会課題への対応については、民間企業単独での技術開発インセンティブは薄く、国による関与は必須。
- ・（C委員）事業アウトカムの妥当性記載の内容に加えて、今回の事業アウトカムが「省エネルギー」というフレームワーク内での取り組みであったことから、必要性はあったと考えられる。
- ・（D委員）本事業で対象とした銅は、高付加価値や高機能を有する自動車や小型家電に不可欠な金属であり、我が国の強みである自動車、電気・電子・通信機器などの産業における製品製造と国際競争力の維持・強化を考えるうえで重要である。

資源国の資源ナショナリズムの考え方が台頭してきている現在において、鉱石に頼らないリサイクル原料主体とした銅製錬で電解精製を行う技術開発は重要であるが、技術的課題の難しさと市場原理の観点から民間企業のみでは十分な研究開発が実施し難いため、国としてプロジェクトを実施する意義は大きい。また、本成果は、現在は潜在化していて問題になっていないが、今後の顕在化が予想される鉱石の不純物が増加した場合の銅製錬プロセスにも有益な情報を与えるため、前述のリサイクル製錬の意義に加え、国としてプロジェクトを実施する意義は大きい。

【問題あり・要改善とする所見】

- ・（B委員）銅精錬原料への不純物増加の時間軸と、本技術開発・成果の社会実装の時間軸を合わせて考え、「今やらなければならない理由」を明示できればより妥当性の説得力が増したのでは。
- ・（C委員）省エネルギーに加えて、環境保全との関連性をより一層強く打ち出すことが、今回の事業アウトカムにより一層大きな妥当性を付与するものであると思われる。

また、今回抽出されたリスクの顕在化の見通しについて、より具体的な見解があると良かった。

4. 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

知的財産についてはバイドール条項において銅製錬事業者が活用できるようにしており、さらには学会発表等において広く周知を行うなど、成果実装にむけた継続検討を可能にしているなど妥当である。また、本事業を導入するにあたっては、鉱石の不純物増加や既存の電解精製における高電流密度化による不動態化にも関連づけて考える必要がある。

一方で、将来の課題が顕在化するまで本成果を維持するため、戦略的に研究継続・ノウハウを蓄積する仕組みが必要ではないか。また、研究成果を導入するためには、小型家電リサイクル法の国民への浸透などリサイクル原料の回収率向上が不可欠である。

【肯定的所見】

- ・（A委員）本事業による知見が銅電解精製プロセス事業を行っている企業が活用できるようにしているなど妥当である。
- ・（B委員）知財はバイドール条項にて銅精錬事業者が自由に活動できるようにし、さらには19回もの学会発表等にて委託先以外も含めた関係者に対し、成果実装に向けた継続検討を可能にしている。
目標値は十分に達成。
- ・（C委員）委員会での報告内容から察して、今回のロードマップは各マイルストーンでの進捗確認がされていたように思われ、また、ロードマップに従ってのアウトプットがされているので妥当であったと考えられる。
- ・（D委員）本事業のアウトカムの達成時期は、国際的な経済状況による銅の価格や国内の電気料金に左右され易く、明確化は困難である。しかしながら、世界における自動車のEV化による銅需要の増加と銅価の上昇、EUにおける資源効率などの考え方により銅製錬におけるリサイクル率を上げる必要が求められれば、アウトカムの達成時期は早まる可能性がある。本事業で開発された要素技術を製錬企業へ導入するためには、鉱石の不純物増加や、既存の銅の電解精製における高電流密度化による不動態化にも関連づけて考えていく必要がある。

【問題あり・要改善とする所見】

- ・（B委員）来たるべき社会課題への対応策ならば、社会課題が顕在化するまでに本成果を維持しておく仕組みが必要。国費を投じている以上、論文で成果を広く共有して不特定多数による研究継続を期待するだけでなく戦略的に確実に研究継続・ノウハウを蓄積する仕組みが必要なのは。
これから顕在化する課題への対応であり、将来的に今回設定した目標値とは全く異なる課題が出てくる可能性も高い。今回の目標値を十分に達成したからといって、社会実装は直結しないことに留意が必要。（そのための研究維持、柔軟なブラッシュアップ開発が必要）
- ・（C委員）今回の事業アウトカムが完了した時点で、ロードマップの妥当性を評価することに意味があるのかは難しいところである。
また、ロードマップに従ったアクションに対してのチェック、リアクションがあったかは明確ではないので、その観点からの評価は難しい。
- ・（D委員）本事業で開発された要素技術を製錬企業へ導入するためには、小型家電リサイクル法の

国民への浸透による小型家電などの国内リサイクル原料の回収率の向上が不可欠である。また海外から国内にリサイクル原料を移動しやすくする政策も必要となろう。

5. 研究開発の実施・マネジメント体制等の妥当性

本事業の実施体制には、銅製錬分野で実績のある国内企業や湿式製錬の分野での専門的知見を有する学識経験者が参加している。また、報告内容からも、実施計画・マネジメントが妥当であると判断できる。

一方で、事業終了後の事業アウトカム達成を考慮すると、今後リサイクル比率を上げようとしている事業者や不動態化の問題が顕在化している事業者も加えた実施体制を検討するなど、受託者以外の事業者を巻き込む戦略も必要である。

【肯定的所見】

- ・（A委員）各実施機関は銅製錬に関する研究に取り組んできており、本事業を行うに当たって極めて妥当である。また、報告内容から実施・マネジメントが妥当であると判断できる。
- ・（B委員）本分野での実績の抱負な事業者が受託しているほか、各分野の専門的知見を有する学識経験者が参加しており、実施体制は適切ではないか。
- ・（C委員）上記に挙げられた評価項目・評価基準の詳細に関し、委員会での報告内容からは適確に評価することは難しいと考えられるが、検証結果の内容から判断して、概ね、妥当性のある開発計画が立案され、実施者は目標達成に関わる適確性を有していたと考えられる。
- ・（D委員）本事業はリサイクル原料からの電解精製を用いた銅製錬の研究開発である。その実施者と実施体制は事業終了後のアウトカム達成を容易にする国内企業であり、湿式製錬の専門家である学側を含めて的確と判断できる。また、本事業のマネジメントを行った JOGMEC は研究開発の方向と内容を熟知しており、最適なマネジメント体制で本事業は実施されている。

【問題あり・要改善とする所見】

- ・（B委員）本成果の知財は受託者が活用できることはもちろん、受託者以外の国内銅精錬事業者の巻き込み戦略があらまほしい感はある。
- ・（C委員）委員会での報告内容から判断できない評価項目は避けることが望ましい。例：国民との科学・技術対話の実施などのコミュニケーション活動、社会経済情勢等周囲の状況変化への柔軟な対応等
- ・（D委員）事業終了後における事業アウトカム達成を考慮すると、今後、原料におけるリサイクル原料の比率を上げることを考えている銅製錬企業、精鉱主体とした銅製錬であるが、高電流密度電解でアノードの不動態化が顕在化している銅製錬企業も加えた実施体制を今後検討する必要がある。

6. 費用対効果の妥当性

本事業で対象としたリサイクル原料による銅の電解精製の開発は、将来に問題が顕在化した際の生産量や銅価格も考慮する必要はあるが、その重要性・技術開発内容とアウトプット目標値を踏ま

えると、費用対効果は妥当だと思われる。

一方で、将来想定される課題のため不確定要素が多く、プロセス確立や経済性評価にあたっての各種条件が予想通りとなればいいが、リスクの顕在化の状況により妥当性のレベルが大きく変動するため評価は難しい。

【肯定的所見】

- ・（A委員）実操業規模で電解精製が行えることを見出したことは有用であり、かつ各種研究要素は今後の銅電解精製に関する研究に重要な役割を果たすと考えられることから費用対効果は極めて大きい。
- ・（B委員）当初想定した目標はいずれも達成している点は評価。
- ・（C委員）報告では、年間銅生産量約1万tに対しての効果を観ているが、現行、国内での銅産出量は140万tであり、将来において、この産出量が継続あるいは更なる増産となるのであれば、予算総額：7.44億円は、その時点での銅価格も考慮する必要はあるものの、妥当性は見いだせるものと思われる。
- ・（D委員）本事業で対象としたリサイクル原料による銅の電解精製の開発は、その重要性、技術開発の内容とアウトプットの目標値の達成度を考えた場合、本事業のアウトプットに対する費用対効果は妥当と判断できる。さらに本事業は、潜在している資源リスクや我が国の産業構造に基づいた日本経済や国際競争力に与える効果も大きく、事業アウトカムに対する費用対効果も妥当である。

【問題あり・要改善とする所見】

- ・（B委員）投資総額が大きい一方、将来想定される課題への対応であるがために不確定要素の多い中での開発となったのではないかと。特に低品位アノードの電解精製技術の開発にかかるプロセス確立、経済性評価にあたっては、この段階で各条件予想しながらの開発がそのまま使えればよいのだが、と考える。
- ・（C委員）これまでのコメントにも記載してきたが、今回のリスクの顕在化の状況によって、妥当性のレベルは大きく変動するので、評価は難しい。

7. 総合評価

今後想定される不純物品位の上昇やリサイクル原料の増加に対して、電解採取法ではなく電解精製法で製錬を可能とする技術を確立することは、将来のリスク顕在化を未然に防止するとともに、電力料金の高い我が国における国際競争力の維持にも資するものであり、今後の銅製錬の技術開発において有用な知見が得られたと考えられる。

一方で、将来想定されるリスクへの対応のため不確定要素が多く、顕在化のタイミングを念頭に置きながらメリハリをつけた目標設定をしてもよかったのではないかと。また、経済性評価にあたっては、リサイクル原料に含まれる有価金属の価値を含めたアウトカムを考える必要がある。

【肯定的所見】

- ・（A委員）低品位銅を実操業規模で不動態化させずに電解精製を行える技術開発ができたことは、今後の銅電解の技術開発において有用な知見が得られている。さらに、電解精製だけではなく

各種要素技術（鑄造など）についても得られた知見は大変有用であり、極めて効果が大きいと判断しました。

- ・（B委員）当初の目標設定に対しては十分に達成していた。

今後想定される社会課題（銅精錬原料の不純物増加）に対し、必要とされる基礎情報・技術が整備されたことは有益。

- ・（C委員）将来における銅精鉱の不純物品位の上昇や資源循環型社会形成の一旦を担うスクラップ処理量の増加が、銅産業に与える影響、具体的には、精製アノードの銅品位低下に伴う電解プロセスで発生が懸念される現象に着目し、恐らくは、国内銅スメルターが現在では予期していないリスクの顕在化を先取りした事業アウトカムを設定し、当該リスクの顕在化を未然に防止する対策を検証し、対応策を見出したことは、将来における銅スメルターにとっては有意義な情報提供となりうる。

元来、潜在リスクの抽出あるいは当該リスクへの対処は後手後手に回ることが多く、今回のようなかなり先の将来におけるリスク顕在に目を向けたことは評価できると考えられる。

- ・（D委員）電解採取を採用したリサイクル原料主体の銅製錬において、電力料金の高い我が国において国際競争力を維持するためには、電解精製に変更することが極めて重要である。本事業によるリサイクル原料の銅電解精製開発のアウトプットとアウトカムは、国内の銅製錬企業の資源確保と国内産業の国際競争力の維持を考えるうえで大きな成果である。

【問題あり・要改善とする所見】

- ・（B委員）現在では顕在化していない、将来想定される課題への対応であるがために不確定要素の多い中での開発となったのではないかと。課題顕在化タイミングを念頭に置きながら、この段階で注力すべき開発課題、達成すべき目標設定に際してはもう少しメリハリをつけてもよかったのではないかと。
- ・（C委員）今回抽出し、対応したリスク顕在化時の大きさは妥当性があると思われるが、リスク顕在化の時期についてのより深い議論が必要であると感じた。
- ・（D委員）開発された方法の経済性を検証する上では、リサイクル原料由来の貴金属、錫、アンチモン、鉛などの有価金属を含めたアウトカムを考える必要がある。

8. 今後の研究開発の方向等に関する提言

将来における社会的課題が顕在化するまで成果を維持する仕組みが必要であり、不動態化の時間延長やLMEグレードの達成などの課題も残っているようであるため、研究継続・ノウハウの蓄積をする仕組みが必要ではないかと。また、国内銅産業が抱えている問題は多岐にわたるため将来のリスク認識が弱いことから、今回のリスク顕在化の確率を何らかの形で検証すべきだったと思われる。このような中、業界全体から見た場合に、今回の事業アウトカムの必要性を感じ得ない関係者が存在しうることと認識すべきであると思われる。さらに、開発された技術の経済性を評価するうえでは、リサイクル原料に含まれる有価金属の回収を行った場合も視野に入れて考えるべきである。

【各委員の提言】

- ・（A委員）総合評価でも述べたように、各種要素技術は重要な知見が得られており、今後のさらな

る発展が望まれる。

- ・（B委員）きたるべき社会課題への対応策ならば、社会課題が顕在化するまでに本成果を維持しておく仕組みが必要。国費を投じている以上、論文で成果を広く共有して不特定多数による研究継続を期待するだけでなく戦略的に確実に研究継続・ノウハウを蓄積する仕組みが必要なのは。

- ・（C委員）今回の事業アウトカムの設定は、省エネルギーの観点からのアクションであったと理解しており、このフレームワーク内での設定という点では妥当性はあると考える。

特に、恐らくは、現行の国内銅スマルターがリスクとしての認識が弱いものに対する一連の取り組みは、リスク認識の重要性を改めて明確化させるという波及効果もあると考えられる。

一つ問題があるとすれば、今回のリスクの顕在化の確率を何らかの形で検証すべきであったと思われる点である。

なぜなら、国内銅産業が抱えている問題は多岐にわたり、関係者は目の前の問題に頭を抱えている状況である。

このような状況下、銅産業界全体から見た場合、今回の事業アウトカムの必要性を感じ得ない関係者が存在しうること認識すべきであると思われる。

ただ、目の前の問題のみにだけ目を奪われ、その対応に追われている状況下においても、将来的におけるリスクに目を向ける重要性を認識させる点においては、今回の事業アウトカムは有効であると思われる。

- ・（D委員）開発された技術のアウトカムを達成するためには、自動車のEV化へ加速、銅価格、電力価格、鉱石事情、EUにおける政策など、銅製錬を取り巻く状況によって変化するものと考えるが、銅製錬においてリサイクル原料の処理量は増加していくと予想される。電力価格の高い我が国において、ヨーロッパなどのリサイクル原料主体の銅製錬に対して競争力を維持していくためには、本事業の電解精製のための技術開発が望まれる。我が国の銅製錬企業の銅原料の多様化への対応は、資源小国の我が国にとって有益となる。

開発された技術の経済性を評価するうえでは、リサイクル原料に含まれる貴金属や錫、アンチモンなどの有価金属の回収を行った場合も視野に入れて考えていただきたい。

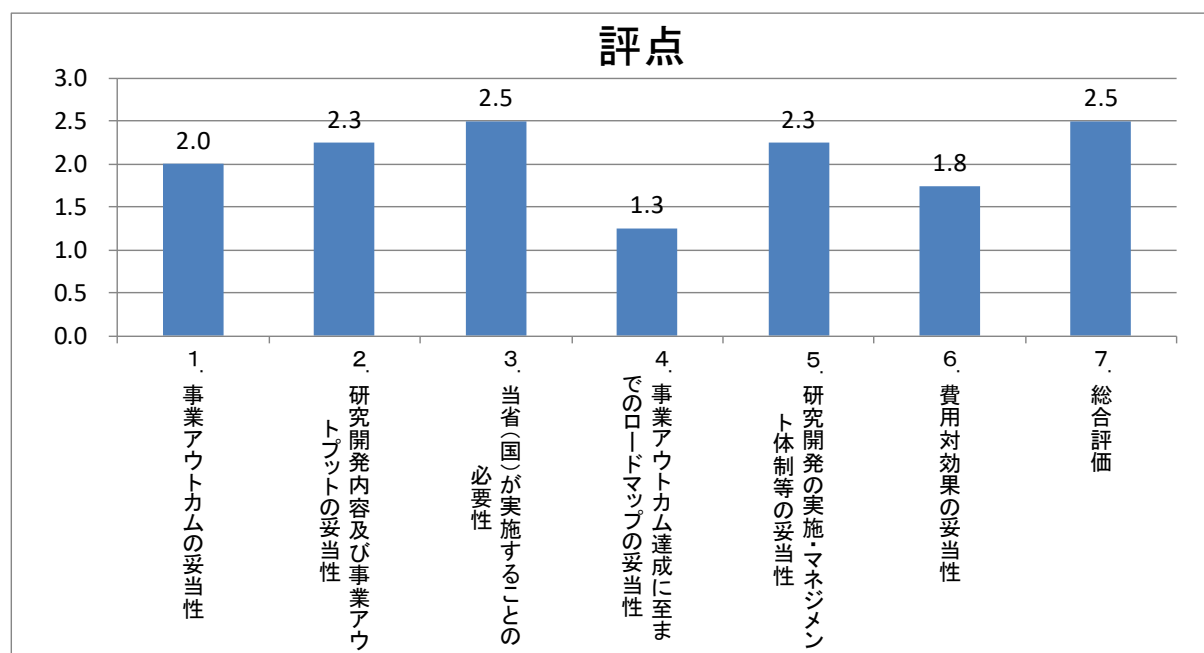
まだ、不動態化時間の延長、LME グレートの達成など課題も残っているようである。今後もリサイクル原料主体の銅製錬における銅の電解精製の開発を進めていく必要がある。

<上記提言に係る担当課室の対処方針>

本技術開発の成果については、学会発表や講演会等を通じて大学や産業界での認知度を広めていくことで、社会的課題が顕在化するまで研究継続・ノウハウの蓄積が行われるように努めてまいりたい。また、将来的なリスクについては、今後の鉱物資源の供給安定性を検討していく過程において議論をするとともに、議論の過程を通じて、非鉄金属業界全体に問題意識を共有してまいりたい。さらに、今後のリサイクル政策を進めるにあたっては、リサイクル原料に含まれる有価金属の価値や回収コストも踏まえた議論を行ってまいりたい。

Ⅲ. 評点法による評価結果

	評点	A委員	B委員	C委員	D委員
1. 事業アウトカムの妥当性	2.0	2	1	2	3
2. 研究開発内容及び事業アウトプットの妥当性	2.3	3	1	2	3
3. 当省(国)が実施することの必要性	2.5	3	2	2	3
4. 事業アウトカム達成に至までのロードマップの妥当性	1.3	2	1	1	1
5. 研究開発の実施・マネジメント体制等の妥当性	2.3	3	2	2	2
6. 費用対効果の妥当性	1.8	3	1	1	2
7. 総合評価	2.5	3	2	2	3



【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

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。

IV. 評価ワーキンググループの所見及び同所見を踏まえた改善点等

評価ワーキンググループの所見【終了時評価】

- ・電力、原料の需要・供給などの将来のリスクを見極めて、今後、更に鉱物資源の安定供給に向けた戦略をしっかりと策定していくこと。
- ・今回の反省を踏まえ、今後、新たなプロジェクトを開始する場合には、あらかじめ、アウトカム・アウトプット等の整合性、知財戦略、研究体制、人材育成等の研究プロジェクトを推進するマネジメントを十分に検討し全体的な戦略を策定するように注力すること。継続事業がある場合には、そのような視点から、見直すこと。

所見を踏まえた改善点（対処方針）等【終了時評価】

- ・鉱物資源の安定供給の確保のため、将来的なリスクも踏まえた検討を行う。
- ・新たに研究開発事業を行う際には、知財戦略や研究体制等の研究プロジェクト全体のマネジメントについて検討を行う。また、現在実施している研究開発事業においても、事業全体のマネジメントに関する検討を行う。

評価ワーキンググループの所見【事前評価】

- （コメント①）金属製錬自体は昔からやっているものであり、多少の研究開発で飛躍するようなものではない。何が新しいアイデア、何が革新的な技術なのか明確にすべき。
- （コメント②）不純物の除去と副産物の回収という内容でレアメタル、亜鉛、銅と三つのプロジェクトで予算を立てているが、それらは連動しているようにも思われるが、どうなのか。回収率をあげるとか、エネルギー効率をあげるとかの課題毎に整理した場合、もっと適切な予算配分があり得るのではないか。
- （コメント③）これらの技術を転用すると、製錬技術・基盤がない国でも製錬が出来る等、応用ができてしまうのではないか。知財の流出には留意すべき。
- （コメント④）製錬業界の持続的な発展に寄与する事業であり、支援のスキームとしては妥当だが、対象となる技術開発の内容が有効なものとなるよう関係業界と議論の上、有効な技術開発になり、支援になるよう進められることを期待。

所見を踏まえた改善点（対処方針）等【事前評価】

- （対処方針①）製錬分野では、焙焼・溶解・電解といった個々のプロセスに係る製錬技術は確立されているが、製錬は、鉱石を構成する元素や元素の集合体のパターンにより、製錬する環境条件が異なるため、プロセス技術だけでなく、システムとしてプロセスの組み合わせそのものを研究の対象とする必要がある。具体的には、
- a) 「製錬副産物からのレアメタル回収技術」については、ベースメタルの鉱石に含まれるアンチモンの回収を行う技術開発であるが、アンチモンはともに含まれる砒素と性質が類似しているため、従来の乾式製錬法では、歩留まりが悪く、湿式製錬法を採用することにより分離・回収が可能となりうるため、その手順や環境条件や最適化するための研究開発を実施す

る。

b)「超電力使用削減低品位銅電解精製プロセス技術開発」では、リサイクル原料からの銅回収では銅鉱石に比べ銅品位が低く、電解製精法では不態化等の影響により電気銅回収が難しいことから、現在、電力使用量の高い電解採取法により電気銅を回収している。このため、「不態化」を起こさないようにするために、不純物を除去する手順や環境条件を最適化する研究を実施することにより、リサイクル原料によるアノード銅品位が低い場合でも電解精製法による電気銅回収を可能とする。

等の新たな製錬プロセスを確立する。

(対処方針②) 銅・亜鉛・レアメタルといった鉱種毎に特性・性質が異なるため、個別の製錬技術・プロセスも鉱種毎に異なる。このため、仮に異なる鉱種に共通の回収率・エネルギー効率向上といった目標を掲げたとしても、実際の研究開発は、鉱種毎の研究開発とならざるを得ず、今回の予算配分は妥当と考える。

(対処方針③) 本研究開発事業は「委託」により実施を想定しているが、国が知的財産権を取得することになるため、委託者との委託契約等において開発成果の移転に当たっての制約を設けることや、開発成果に係る特許戦略等について検討を行う。

(対処方針④) レアメタルは価格の変動や需給の変動が大きいことから、レアメタル鉱山の開発は、短期的には進みにくい場合がある。このような場合、ベースメタルの鉱石に含まれるレアメタルを回収することにより、自給率の改善を図ることが選択肢の一つとなる。

「アンチモン」は、難燃助剤として使用されており、樹脂類に一般的に添加され、自動車、電気電子機器、家具類等に添加される重要な鉱物であるが、資源開発プロジェクトが非常に少ない状況にある。こうしたことから、銅鉱石中のアンチモンを回収することが必要である。技術開発の内容については、これまでも関係事業者と議論を積み重ねて決定しており、有効な技術開発となるものと考えられる。

製錬産業は、海外資源開発への投資を行い、引き取った鉱石を製錬する機能を持つほか、リサイクルによって、スクラップ原料を製錬する機能を持ち、我が国の資源の安定供給のための4つの柱（海外資源開発・リサイクル・使用削減・備蓄）のうち、2つを担い、資源政策上の究極目標である資源自給率の改善に直接影響を及ぼすことから、我が国の資源政策上極めて重要なプレイヤーである。

製錬産業は、高い電力量を要するエネルギー多消費型産業であり、将来、エネルギー源の変更から、電力料金の上昇が予想され、電解工程等での省電力化を進める必要があり、この分野での研究開発を遂行する必要がある。

技術開発の内容については、これまでも関係事業者と議論を積み重ねて決定しており、有効な技術開発となるものと考えられる。