

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の研究開発 事後評価の概要

平成26年3月27日

資源エネルギー庁

資源・燃料部鉱物資源課

目 次

1. プロジェクトの概要
2. 目的・政策的位置付け

テーマA 微粉精鉱の焙焼技術開発(亜鉛製錬)

- A-3. 目標
- A-4. 成果、目標の達成度
- A-5. 事業化、波及効果
- A-6. 研究開発マネジメント・体制等

テーマB 煙灰中の銅・砒素の分離技術開発と砒素の安定貯蔵方法の検討(銅製錬)

- B-3. 目標
- B-4. 成果、目標の達成度
- B-5. 事業化、波及効果
- B-6. 研究開発マネジメント・体制等

7. 評価
8. 提言及び提言に対する対処方針

1. プロジェクトの概要

概 要

テーマA. 微粉精鉱の焙焼技術開発(亜鉛製錬)

近年、亜鉛鉱山では鉱物粒子の微細な鉱石の採掘が進められており、微細鉱物を効率的に分離することで精鉱の品位を高めている。湿式亜鉛製錬での焙焼炉では、精鉱の粒度が極端に小さくなると、流動層の均一性が保たれず、様々なトラブルが発生しており、焙焼炉が障害を起こすと、操業を一時停止してメンテナンスを行わなければならない、操業のロスになるばかりでなく、焙焼炉の再立ち上げに相当の電力エネルギーを要する。本テーマでは、微細な亜鉛精鉱を対象とした酸化焙焼において、操業トラブルによる電力エネルギーの消費を防止し、精鉱の酸化を均質に進め、焙焼炉の操業を安定化させるための技術の確立を目指す。

テーマB. 煙灰中の銅・砒素の分離技術開発と砒素の安定貯蔵方法の検討(銅製錬)

銅の乾式製錬において、溶鉱炉で発生する煙灰は、銅等の有価物に加え、砒素を高濃度で含有する。通常、煙灰は銅を回収するために炉に再投入されるが、砒素品位の高い精鉱を供用し、炉内の砒素濃度が高くなると銅に砒素が混入し品質を損ねるため、それ以上の煙灰投入ができず、煙灰を廃棄物として処分せねばならないことが考えられる。また高砒素精鉱を供用し、銅の生産量を維持しようとするれば精鉱の供用量は増大するため、製錬エネルギーは増大することとなる。本テーマでは、煙灰中の砒素を最適な条件で銅と分離し、分離された砒素は結晶性スコロダイト化する技術を確認する。分離された銅は炉に繰返すことを想定するが、この時の繰返し量は、これまでの煙灰量と比べ大幅に減少すると考えられ、前述した製錬エネルギーの増大を抑制できる効果があると考えられる。また、結晶性スコロダイトが長期間安定性を保つような環境条件の解明も試みる。

実施期間

平成21年度～平成24年度（4年間）

予算総額

8.8億円

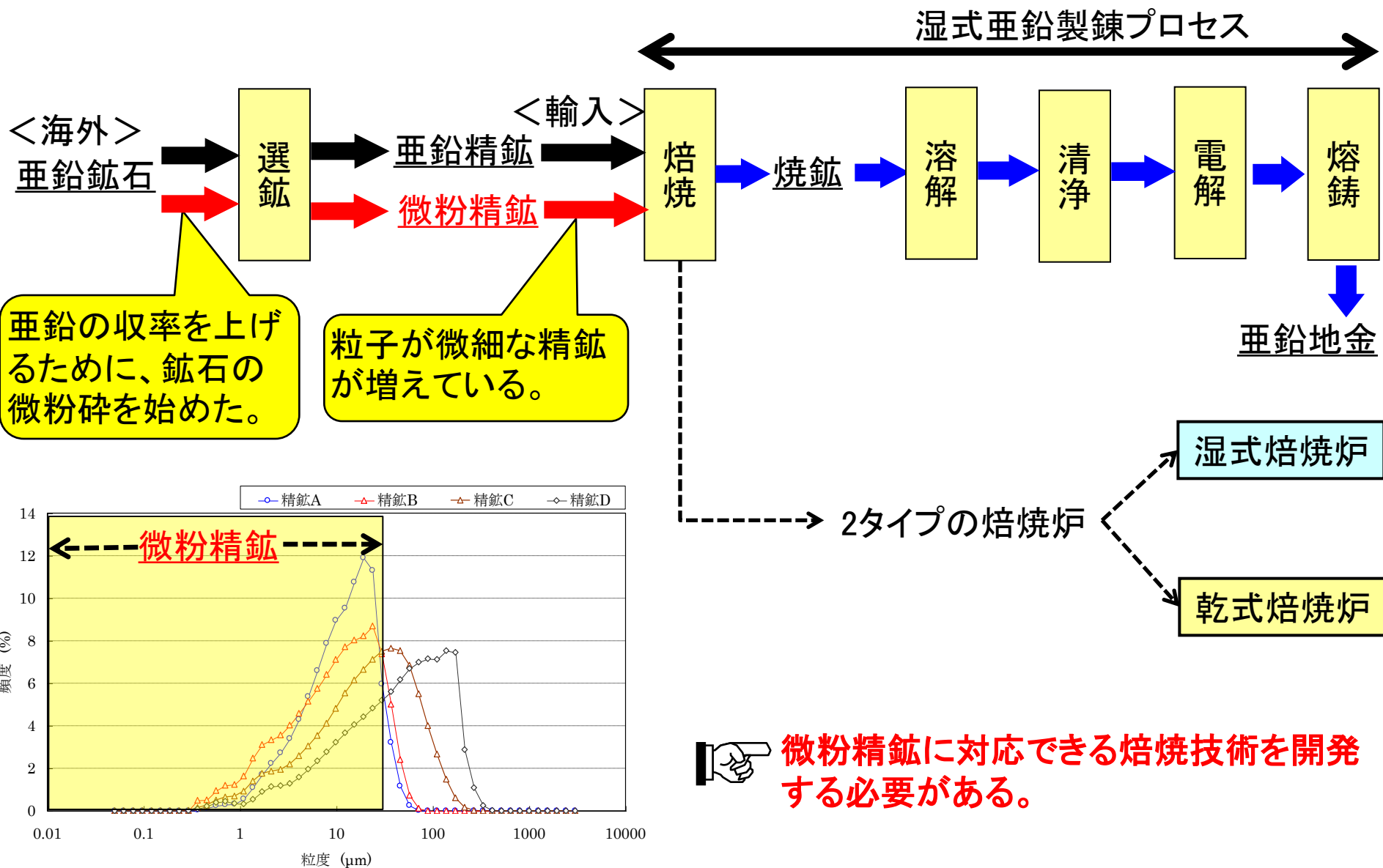
(平成21年度:0.9億円 平成22年度:2億円 平成23年度:3.1億円 平成24年度:2.8億円)

実施者

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構

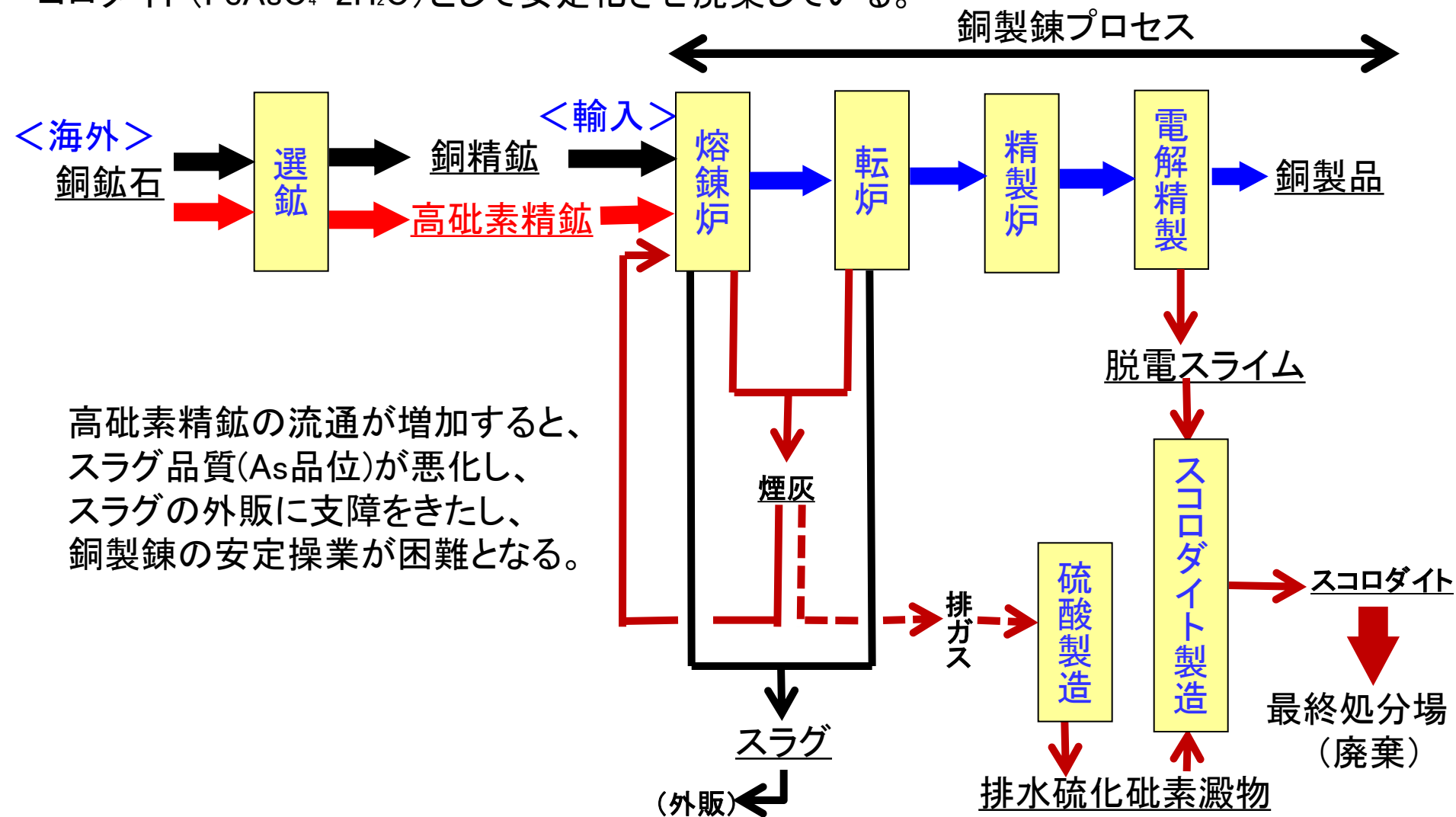
1. プロジェクトの概要(1) テーマA

微粉鋇(平均粒径:10 μ 前後)の供用が増加すると、焙焼工程において操業異常が顕著なっている。最悪は、流動が停止し、数日間の焙焼操業停止も見られた。



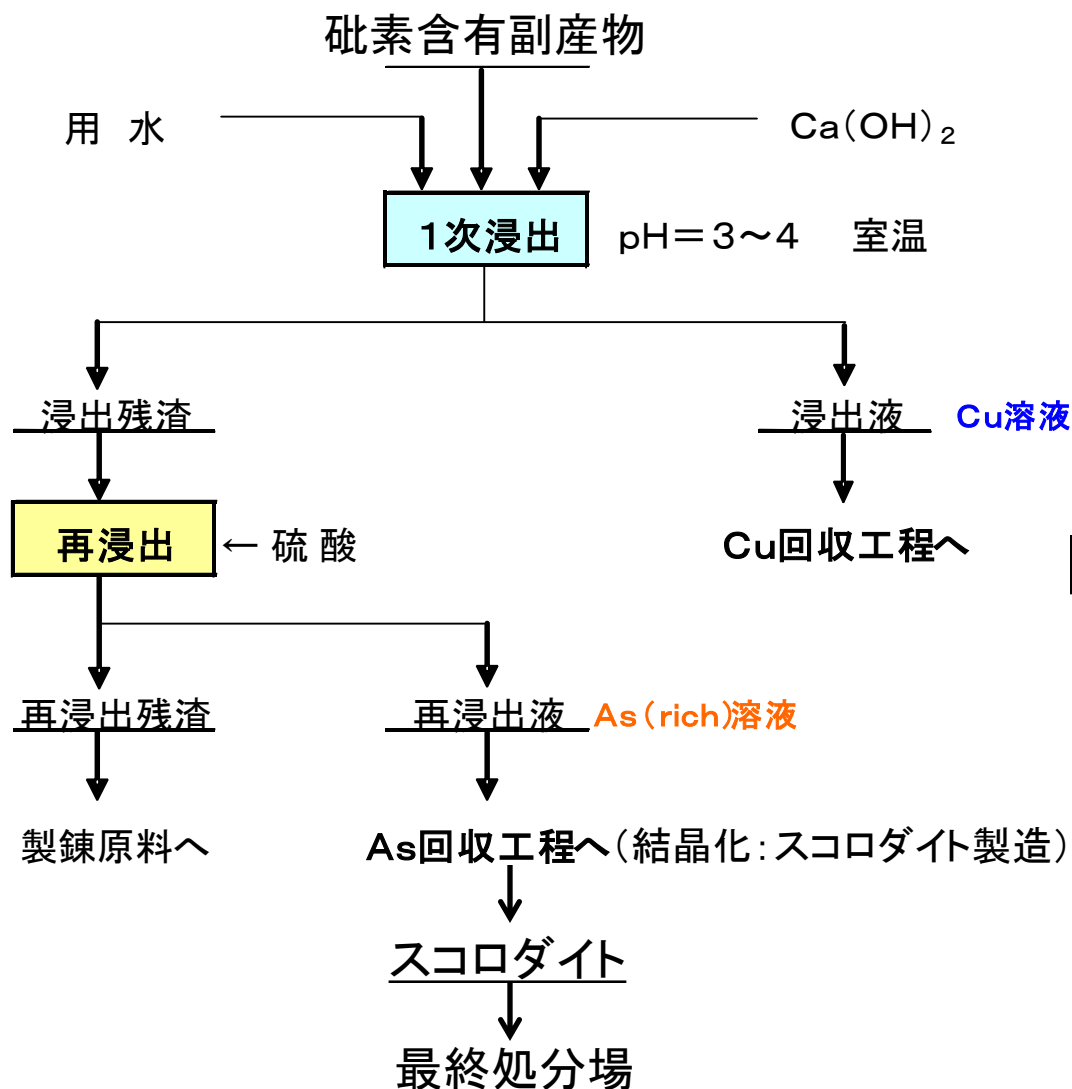
1. プロジェクトの概要(2) テーマB

通常精鉱の場合、精鉱中の砒素は主にスラグへ移行し、系外に出す(スラグの外販)ことによって、製錬のバランスを保っている。一部の製錬所では、中間生成物中の砒素を結晶性スコロダイト($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)として安定化させ廃棄している。

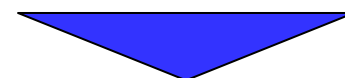


1. プロジェクトの概要(3) テーマB

砒素対策として、砒素含有中間産物のAsとCuを分離し、分離した砒素浸出液からスコロダイトを製造する対応が始まっていた。



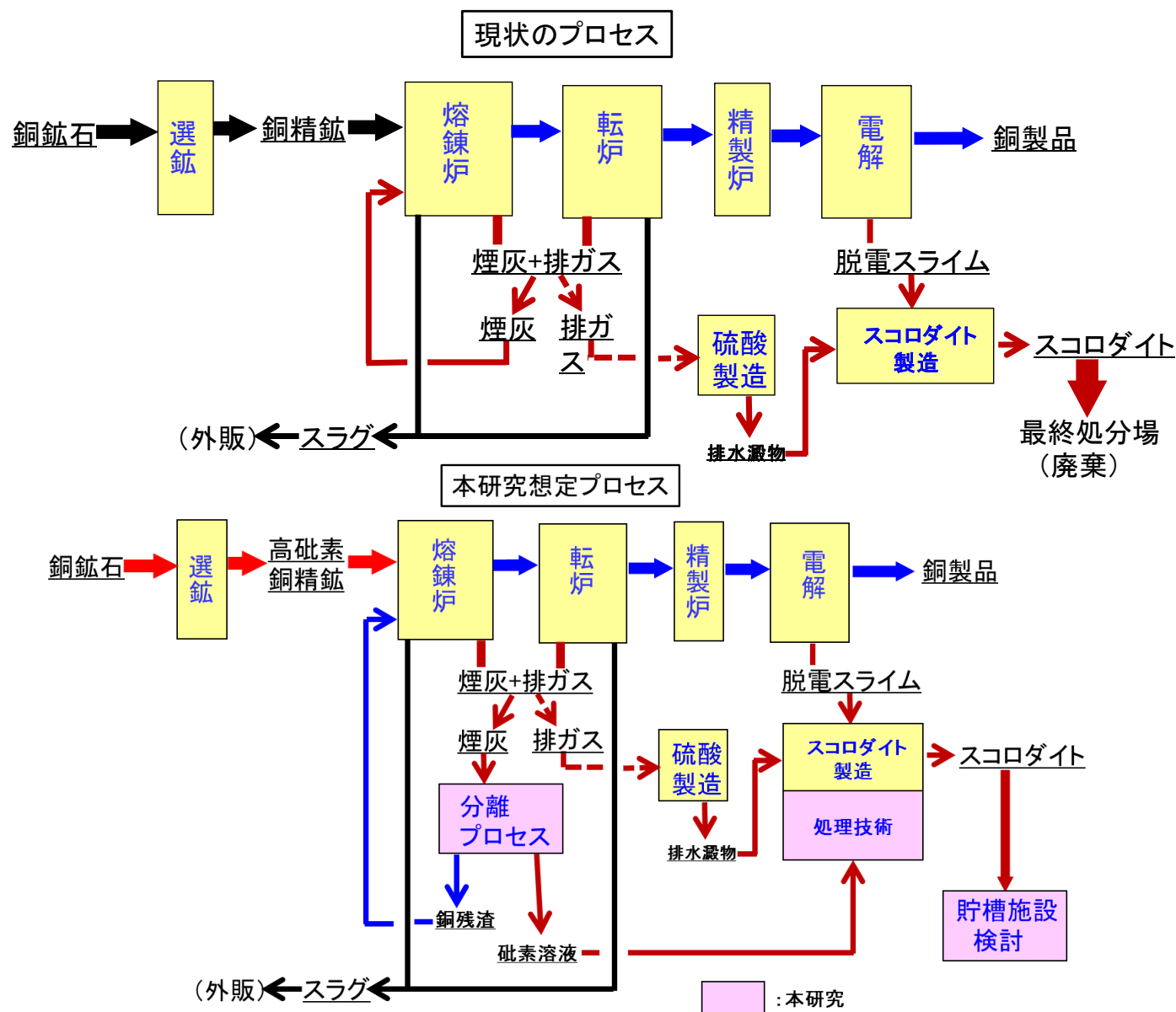
本方法は、一部の中間産物に対してのみ実施されており、高砒素原料の供用に対する銅製錬の問題を、解決するまでには至っていない。



本方法をベースに、煙灰に対応できる技術を開発する必要がある。

1. プロジェクトの概要(4)テーマB

煙灰中の砒素と銅を溶解・浸出の上、銅を効率的に回収し、砒素を分離・濃縮して結晶性スコロダイトに固定すること(煙灰処理技術の開発)及び結晶性スコロダイトの安定貯蔵方法を確立する

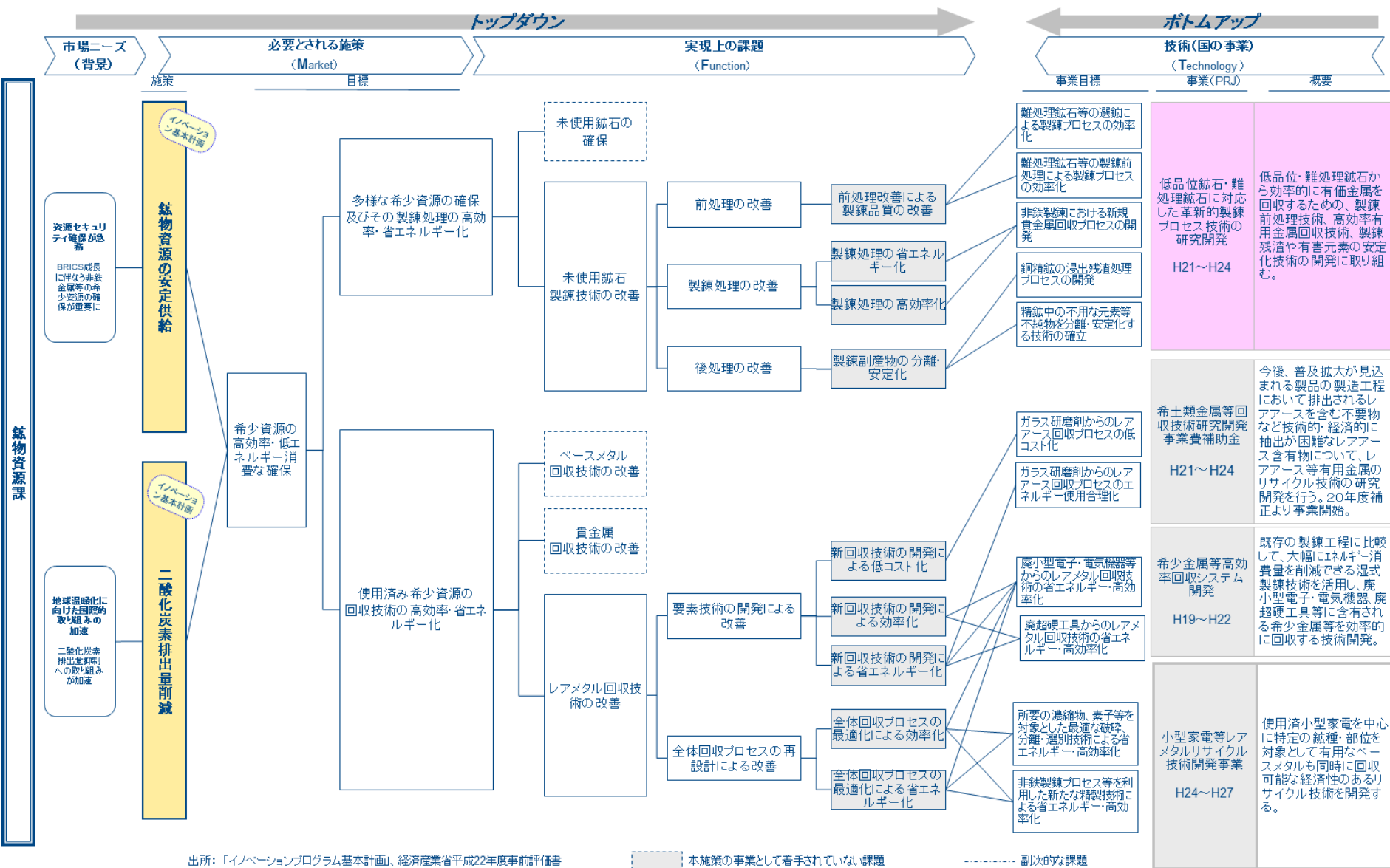


2. プロジェクトの目的・政策的位置付け(1)

- ①BRICs諸国を中心とした経済発展に伴う非鉄金属需要の増加に伴い金属鉱石の生産量が大きく増加した結果、鉱石の低品位化・難処理化が進んだ。
- ②その結果、不要な元素(砒素)の含有量が高い鉱石、極めて細かく粉砕されるため、ハンドリングが難しい極微細精鉱などが生産されるようになり、今後世界の鉱石マーケットでは、こうした低品位鉱石、難処理鉱石の流通が増えると想定される。
- ③非鉄製錬原料のほぼ全量を海外から鉱石(精鉱)として輸入している我が国としては、我が国が保有する高度な製錬技術を積極的に活かすことにより、低品位鉱石や難処理鉱石を効率的に処理できる技術を保有することが、原料調達における他国に対する競争力となり、鉱物資源の安定供給確保の重要なポイントである。
- ④また、低品位・難処理鉱石を扱うことで、エネルギー消費原単位の大幅な上昇が予測されることから、これら鉱石の処理に必要な省エネルギー型の製錬プロセスの開発を行う必要がある。
- ⑤さらに、技術施策体系として、平成21年にとりまとめられた「イノベーション基本計画」において「鉱物資源の安定供給」と「二酸化炭素排出量削減」に資する技術開発と位置付けられている。

2. プロジェクトの目的・政策的位置付け(2)

8



「インベージョンプログラム基本計画」 技術体系(ロジックツリー)

テーマA

微粉精鉍の焙焼技術開発（亜鉛製錬）

A-3. 目標(全体目標)

目標・指標	設定理由・根拠等
(1) 焙焼炉への微粉鋇供用比率100%体制の確立。微粉精鋇供用が原因となる操業停止による電力エネルギーの増大を防止する。 (2) ボイラートラブルの低減	(1) 含Zn鋇石中の不純物品位は高く、原料となるZn精鋇は微粒化する傾向にある。原料が微粒化する傾向は不可避であるため、これに対応できる焙焼技術を有する必要がある。 (2) 微粉鋇比率が上昇するとボイラーからキャリーオーバーする焼鋇が増加する。キャリーオーバー焼鋇の増加に伴い、ボイラーダストの付着増加による蒸気回収効率の低下、ダスト除去作業の作業負荷増加が発生する。 そのため、微粉鋇比率100%に対応できるようにボイラーを改善する必要がある。

A-3. 目標(個別要素技術目標)

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
(1) 焙焼炉流動不良とボイラーの現状把握	・ 微粉鋇比率上昇に伴うオーバーフロー焼鋇の粒度変化や、ボイラーダスト付着率等の特性値を把握する。 ・ 各年度の改善による効果を確認する。	・ 微粉鋇が焙焼炉やボイラーへ及ぼす影響を把握できていないため。 ・ 微粉鋇比率の供用上限を調査し、改善箇所を選定するため。
(2) 乾式焙焼炉での微粉精鋇の造粒品の効果検証	・ 微粉鋇を造粒し、段階的に微粉鋇比率を上昇させ（100%まで）、焙焼炉へ供用し、焙焼炉への影響を把握する。	造粒した微粉鋇を供用した場合の焙焼炉への影響を把握できていないため。
(3) 乾式焙焼での精鋇の均一混合によるPb、Cuキャパアップ	・ 精鋇の均一混合により、品位のバラツキを小さくする。 (目標: <0.246 → <0.1) ・ Pb+Cuの品位の制限を緩和する。 (目標: <2.8 → <3.0)	湿式給鋇方式の供用制限との差を小さくし、使用できる原料の幅を広げるため。
(4) 湿式焙焼炉での造粒鋇供用技術の確立	湿式焙焼炉における微粉鋇比率100%供用技術を確立する。	キャリアオーバー焼鋇を低減するため。
(5) 焙焼炉流動不良メカニズムの解明	焙焼炉内の粒子の粗粒化メカニズムを解明する。	焼鋇粗粒化及び流動不良を防ぐ対策を立案するため。
(6) ボイラーシミュレーション	ボイラー内のガス流や温度分布から、ダストの付着しやすい箇所を特定する。	最適なボイラー改造方法を提案するため。
(7) ボイラー改造	・ 第1、第2蒸発管内の温度を低減する。 ・ ダスト付着率を低減する。	微粉鋇比率100%時のダスト付着増加に対応するため。
(8) ボイラーダスト付着メカニズムの解明	ボイラーダストの付着メカニズムを解明する。	ダスト付着抑制の対策を立案するため。

A-4. 成果、目標の達成度(全体成果)

(1) 焙焼炉への微粉鋳供用比率100%体制の確立し、微粉精鋳供用が原因となる操業停止による電力エネルギーの増大を防止する目標に対し、以下の成果を得た。

ア) 乾式焙焼炉について、微粉精鋳を事前造粒することにより、微粉鋳比率100%供用を達成した。

イ) 湿式焙焼炉について、ボイラーの改造及び精鋳の事前造粒により、微粉鋳比率100%供用を達成した。また、不純物であるPb+Cuの供用上限を4.0%まで拡大した。更に、微粉精鋳が焙焼に及ぼすメカニズムを解明した。

ウ) 操業停止を防止したことにより、約4,400MWH/年の省エネルギーを達成した。

(2) ボイラートラブルを低減させる目標に対し、以下の成果を得た。

ア) 内部の蒸発管の構造を改造したことにより、内部に付着するダスト量を低減させ、ボイラートラブルをゼロとした。

イ) 排ガスの熱回収効率上昇により、省エネルギー効果を得た。

ウ) ボイラー内部のダストの付着メカニズムを解明した。

A-4. 成果、目標の達成度(個別要素技術成果)

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
(1) 焙焼炉流動不良とボイラーの現状把握	・ 微粉鋳比率上昇に伴うオーバーフロー焼鋳の粒度変化や、ボイラーダスト付着率等の特性値を把握する。 ・ 各年度の改善による効果を確認する。	微粉鋳比率上昇に伴うオーバーフロー焼鋳の特性値およびボイラーダストの付着率を把握（焼鋳粒度、組成、形態、比重、ボイラー温度等）した。	達成
(2) 乾式焙焼炉での微粉精鋳の造粒品の効果検証	微粉鋳を造粒し、段階的に微粉鋳比率を上昇させ（100%まで）、焙焼炉へ供用し、焙焼炉への影響を把握する。	造粒鋳供用により微粉鋳比率100%を達成した。	達成
(3) 乾式焙焼での精鋳の均一混合によるPb、Cuキャパアップ	・ 精鋳の均一混合により、品位のバラツキを小さくする。 （目標：<0.246 → <0.1） ・ Pb+Cuの品位の制限緩和 （目標：<2.8 → <3.0）	・ 均一混合により品位のバラツキを改善した。 （0.246→0.116） ・ 制限緩和の検証はできず、適正な造粒品の状態や焙焼温度の確認が重要と確認した。	達成
(4) 湿式焙焼炉での造粒鋳供用技術の確立	湿式焙焼炉における微粉鋳比率100%供用技術を確立する。	・ 造粒鋳供用技術を確立した。 ・ 微粉鋳比率100%試験未実施（事業終了後、100%を達成した）	達成
(5) 焙焼炉流動不良メカニズムの解明	焙焼炉内の粒子の粗粒化メカニズムを解明する。	Pbがバインダーとなり粗粒化を助長することを確認した。	達成
(6) ボイラーシミュレーション	ボイラー内のガス流や温度分布から、ダストの付着しやすい箇所を特定する。	ボイラー内部でガスの偏流が発生しており、現状の蒸発管の向きでは、熱回収（ボイラーの温度低減）は非効率であることを確認した。	達成
(7) ボイラー改造	・ 第一、第二蒸発管内の温度を低減する。 ・ ダスト付着率を低減する。	ボイラー改造により第一、第二蒸発管温度が著しく低下し、ダスト付着率は低減した。	達成
(8) ボイラーダスト付着メカニズムの解明	ボイラーダストの付着メカニズムを解明する。	以下を確認した。 ・ スプリングハンマーによる短周期での除去が効果的である。 ・ スラリー液中の硫酸亜鉛濃度の低減が効果的である。 ・ ダスト中のCuは硫酸塩の生成を助長する。	達成

A-5. 事業化、波及効果

事業化について

- (1) 本事業で実施した実証試験において、造粒設備の導入及びボイラー改造は、実操業設備に対して付加又は改造を実施したものである。したがって、事業化という意味では、今回の開発元となった亜鉛製錬所では、導入又は改造した設備によって、亜鉛製錬プロセスを稼働させており、既に実用化された。
- (2) 国内の湿式亜鉛製錬所から生産される亜鉛製品は、約470千t/年(亜鉛換算)であり、その内、本事業に供した製錬所は約150千t/年である。残りの各製錬所においては(約320千t/年)、今後の買鉱状況にもよるが、仮に微粉精鉱を中心とした製錬を実施する場合は、本事業にて開発した技術を導入することにより、安定した操業の継続が可能と考えられる。

波及効果について

(1) 資源の安定供給

微粉鉱の輸入に制限を加えることなく100%供用出来る技術を国内亜鉛製錬に波及させることにより、我が国の資源安定供給につながられることが期待される。

(2) 省エネルギー

操業停止によるエネルギー上昇を潜在的に抑制したと考えることができる。その効果を国内の湿式亜鉛製錬に波及させた場合、省エネルギーが期待できる。省エネルギー: 13,800Mwh/年

(3) 微粉精鉱供用量増加による熔錬費(TC)収入の増加

開発元となった製錬所における微粉精鉱の増加可能量は、概ね57,000t/年となった。

TC収入増加額: 7.9億円/年 ⇒ 113Gwh/年の省エネ効果相当

(4) ボイラー改造による省エネルギー

ボイラー内の温度が低減したことから、蒸気の発生量は改善される。

国内亜鉛製錬へ波及すると、重油換算で260kL/年の省エネ効果相当

開発の進捗と資金配分

実施項目／年度	H21	H22	H23	H24
資金(百万円)	34	89	200	189
(1) 焙焼炉流動不良とボイラーの現状把握				
(2) 乾式焙焼炉での造粒品の効果検証				
(3) 乾式焙焼炉での均一混合によるPb、Cuキャパアップ				
(4) 湿式焙焼炉での造粒鉬供用技術の確立				
(5) 焙焼炉流動不良メカニズムの解明				
(6) ボイラーシミュレーション				
(7) ボイラー改造				
(8) ボイラーダスト付着メカニズムの解明				

開発の体制

	氏 名	所 属
委員長	前田 正史	国立大学法人東京大学生産技術研究所 教授
委員	大藏 隆彦	国立大学法人東京大学生産技術研究所 特任教授
委員	中村 崇	国立大学法人東北大学多元物質科学研究所 教授
委員	星 幸弘	日本鉱業協会 理事

経済産業省

補助金

JOGMEC

低品位難処理鉱石製錬技術開発委員会
委員長：東京大学 前田正史 教授

亜鉛部会

銅部会

< 亜鉛製錬 >

「微粉精鉱の焙焼技術開発」

三井金属鉱業(株)

委託研究

東京大学

委託研究

愛媛大学

< 銅製錬 >

「煙灰中の銅・砒素の分離技術開発と砒素の安定貯蔵方法の検討」

DOWAメタルマイン(株)

委託研究

産業技術総合研究所

共同研究

宮崎大学

共同研究

	氏 名	所 属
部会長	大藏 隆彦	国立大学法人東京大学生産技術研究所 特任教授
委員	鈴木 浩二	秋田製錬(株) 常務取締役 製造 1 部長
委員	高須 登美男	九州工業大学大学院工学研究院 准教授
委員	拝生 憲治	日本鉱業協会 技術部 部長代理
委員	森田 英治	東邦亜鉛(株) 技術開発本部 技術部 課長
委員	山口 勉功	国立大学法人岩手大学工学部マテリアル工学科 教授

テーマB

煙灰中の銅・砒素の分離技術開発と砒素の
安定貯蔵方法の検討(銅製錬)

B-3. 目標(全体目標)

目標・指標	設定理由・根拠等
(1) 熔錬炉煙灰中の銅と砒素を効率良く分離し、砒素は安定的な結晶性スコロダイトへと転換する技術を開発する。鉱石の低品位化に伴う銅トンあたりのエネルギー原単位の増大を50%以上抑制する。	(1) 今後、銅精鉱の低品位化に伴い、煙灰発生量の増加、煙灰繰返し量の増加、それによる一次処理可能な鉱石量の減少、かつ、あるいは繰り返せない煙灰の滞留が進み、銅製錬における一次回収銅量の低下、回収コスト、回収エネルギーコストの増加が予想されるため。
(2) 結晶性スコロダイトが、長期間大気曝露後でも環境省告示第13号法(以下「13号法」)による砒素の溶出基準(0.3mg/L未満)を満足することを検証する。	(2) 物性として特別管理廃棄物に該当せず、砒素の長期安定貯蔵に適した溶出安定性を有する物質であることの根拠となるため。
(3) 結晶性スコロダイトの物性・溶出メカニズムを解明し、その長期安定性の学術的根拠となる知見を得る。	(3) 結晶性スコロダイトの長期安定性を、プラントで生成された試料を用い、実証規模で貯蔵試験(4ヵ年)を行うことで実際に確認し、かつ過酷条件曝露後の溶出特性、物性試験、調査を通じての学術的知見から担保するため。
(4) 結晶性スコロダイトの長期貯蔵に適した条件の調査と、貯蔵施設の概念設計を完成させる。	(4) 製錬プロセスより砒素を結晶性スコロダイトに分離固定しても、それを安定的に大量かつ長期間貯蔵できる、その物性に応じた大規模貯蔵施設が本邦に存在しないため。

B-3. 目標(個別要素技術目標)(1)

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
(1) 熔錬炉系煙灰中の銅と砒素の高効率分離技術	a) 銅の回収率 ・ 一次浸出液銅回収率 $\geq 70\%$ b) 一次浸出液の液質 ・ 一次浸出液銅濃度 $\geq 30\text{g/L}$ ・ 一次浸出液砒素濃度 $\leq 1\text{g/L}$ c) エネルギーコスト上昇分の低減率： $> 50\%$	易溶性銅の大半を処理初期に砒素と分離し銅溶液として回収することで、SX/EW法にて銅の早期回収を可能にしエネルギーコストを削減するため。
(2) 熔錬炉系煙灰中の砒素の分離、硫化固定技術	a) 薬剤原単価：60万円/As-トン以下（煙灰から、銅溶液回収、スコロダイト生成までの総薬剤コスト。以下同じ） b) 硫化砒素への銅ロスの極小化。通常法銅品位の半減（ $\leq 10\%$ ）	国内銅製錬にて実用処理実績のある、硫化砒素に一旦固定することで、現有製造方法にて結晶性スコロダイトへの転換が可能となるため。
(3) 転炉煙灰の処理技術	・ 易溶性転炉煙灰を対象とした、銅の液中への分離技術を開発する。 ・ 砒素の液中への分離技術 プロセス初期において転炉煙灰が含有する砒素の70%以上を回収する技術を開発する。 ・ 難溶性転炉煙灰の処理技術 難溶性転炉煙灰を浸出可能にする技術を開発する。	煙灰には熔錬炉煙灰の他に転炉煙灰があり、砒素と銅が相当量濃縮しているため、その取り扱いにも支障が生じており、熔錬炉煙灰と同様にその処理方法の確立が必要とされているため。
(4) 煙灰の砒素浸出液から結晶性スコロダイトを直接生成する技術	1) 直接法 不純物が少ない精製された結晶化元液を得る方法を確立する。 2) 短縮法 1) で確立した方法をベースとし、工程数の削減を図り、簡便なフローに改善する。 3) 脱電同時処理法（脱電法） 2) で確立した短縮法における液質調整剤に脱電スライムを適用した、脱電スライムと煙灰の同時処理法を開発する。	1) 使用薬剤（NaSH）が高価になる硫化砒素回収を経ずに、砒素浸出液から結晶性スコロダイトを直接生成する技術を開発し、全体フローの効率化および低コスト化を可能にするため。 2) 直接法の工程数を削減することで、更なるフローの効率化、低コストが図られるため。 3) 脱電スライムは、煙灰と同様に砒素を相当量含有して一次発生する中間産物であり、その取り扱いにも支障が生じており、その処理方法の確立が求められているため。

B-3. 目標(個別要素技術目標)(2)

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
(5) 複数製錬所煙灰の組成解析及び銅と砒素の分離の再現試験	煙灰の組成、煙灰中の銅の形状を把握し、銅の分離挙動に関し、学術的アプローチから再現性・原料依存性を確認する。	煙灰の性状は、製錬所毎に異なるため、各煙灰の組成分析、対応した処理条件、再現性の確認が必要であるため
(6) 結晶性スコロダイト生成時における不純物の挙動調査	直接法において、砒素浸出液への随伴が避けられない代表的な不純物元素が、結晶性スコロダイトの生成、形状及び溶出特性に与える影響を解析する。	結晶化元液には、銅、モリブデン、アンチモン、ビスマス等が随伴しやすい。 これらの元素が随伴した条件で生成された結晶性スコロダイトの形状、性状、砒素溶出挙動に与える影響を確認する必要があるため。
(7) 結晶性スコロダイト長期安定性	1) 事業期間4年間の実証規模の貯蔵試験を通じて、13号法での砒素溶出値が基準値の0.3mg/lを下回って推移する。 2) TCLP溶出試験の砒素溶出値が基準値の5mg/lを下回って推移する。	1) 商業規模のプラントで生成された結晶性スコロダイトの実物をもってその特性変化を事業期間の4年間モニタリングすることにより、長期安定性を実証するため。 2) 主要国で標準的に採用されている同法の溶出評価方法で、無害廃棄物に該当する溶出安定性であることを確認し、海外でも適用可能な物性、プロセスであることを確認するため。
(8) 結晶性スコロダイトの物性・溶出メカニズムの解明	1) 過酷、加速試験後でも13号法溶出基準を満足する。 2) 結晶構造と、溶出安定性との関連を解明する。 3) 生成条件、組成、形状が異なる結晶性スコロダイトでの溶出安定性を確認する。	1) 結晶性スコロダイトの長期安定性を、過酷条件試験結果より帰納的に推定するため。 2) スコロダイトの溶出安定性と、その結晶構造に深い相関関係が推認され、その検証が必要と認められるため。 3) 異なる条件で生成されたスコロダイトの溶出安定性を、結晶構造等の物性面から検証することにより、学術的に結晶性スコロダイトの長期安定性を裏付けるため。
9) 結晶性スコロダイトの安定貯蔵施設の概念設計	1) 長期貯蔵に伴うリスクを抽出する。 2) リスクに対応した、貯蔵条件・貯蔵方法の検討を行う。 3) 大規模(20万m ³)貯蔵施設の立地条件を地質学的、土木工学的に検討する。 4) コスト、工期等を検討し、貯蔵施設の概念設計を行う。	本邦において、結晶性スコロダイトを大規模に貯蔵可能な場所、施設は存在せず、又具体的な設計検討も行われていない。上検討においては、確認された結晶性スコロダイトの物性、貯蔵場所の地質、作業環境、貯蔵容量、環境リスクを詳細に検討することが必要であるため。

B-4. 成果、目標の達成度(全体成果)

- (1) 熔錬炉煙灰中の銅と砒素を効率良く分離し、砒素は安定的な結晶性スコロダイトへと転換する技術を開発し、鉱石の低品位化に伴う銅トンあたりのエネルギー原単位の増大を50%以上抑制する目標に対し、以下を達成した。
- ア) 熔錬炉煙灰中の銅と砒素を効率良く分離し、砒素は安定的な結晶性スコロダイトへと転換する技術を開発実証した。
 - イ) 鉱石の低品位化に伴う銅トンあたりのエネルギー原単位の増大を、試算上70%抑制することを確認した。煙灰から銅を溶液に回収し、砒素を結晶性スコロダイトに固定するまでの薬剤原単価は、硫化法との比較において約80%削減された。
- (2) 結晶性スコロダイトが、長期間大気曝露後でも、13号法による砒素の溶出基準(0.3mg/L未満)を満足することを検証した。
- (3) 結晶性スコロダイトの物性・溶出メカニズムを解明し、その長期安定性の学術的根拠となる以下の具体的知見を得た。
- ア) 恒温曝露試験、冷熱衝撃試験の結果、結晶構造、溶出特性いずれも有意の変化が認められず、砒素溶出値にも影響が無いことが確認された。
 - イ) 異なる温度における結晶性スコロダイトの溶出挙動のpH依存性を解析し、自然環境で通常想定される温度、pH領域において、砒素の溶出基準を満足することが確認された。
 - ウ) TEM観察により、結晶性スコロダイトは、一粒子が全体として単結晶構造を持ち、又銅、モリブデン等の不純物が元液から混入した場合も、結晶形状、粒径に変化は認められるが、溶出特性には有意な差がなく安定であることが確認された。
 - エ) 結晶化元液に随伴しやすいビスマス、アンチモンを混在させた溶液から結晶性スコロダイトの生成試験を行い、各々反応初期段階で砒酸ビスマス、砒酸アンチモンを形成して、結晶内部に取り込まれる事が推認された。溶出特性に影響が大きい表面近傍の構造に影響を及ぼす事は示唆されなかったが、これら元素は多量に結晶性スコロダイトに取り込まれた場合、結晶の成長を阻害し、多数の微粒子を発生させることが確認されたことから、元液への混入は極力避けることが望ましいことが判明した。
- (4) 結晶性スコロダイトの長期貯蔵に伴うリスクを抽出し、対応して求められる貯蔵地の条件、貯蔵施設の設計技術指針を確立し、概念設計を完成させた。

B-4. 成果、目標の達成度(個別要素技術成果)(1)

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
(1) 熔錬炉系煙灰中の銅と砒素の高効率分離技術	a) 銅の回収率 ・ 一次浸出液銅回収率 $\geq 70\%$ b) 一次浸出液の液質 ・ 一次浸出液銅濃度 $\geq 30\text{g/L}$ ・ 一次浸出液砒素濃度 $\leq 1\text{g/L}$ c) エネルギーコスト上昇分の低減率： $>50\%$	全ての数値目標を達成した。	達成
(2) 熔錬炉系煙灰中の砒素の分離、硫化固定技術	a) 薬剤原単価：60万円/As-トン以下（煙灰から、銅溶液回収、スコロダイト生成までの総薬剤コスト。以下同じ） b) 硫化砒素への銅ロスの極小化。通常法銅品位の半減（ $\leq 10\%$ ）	硫化実証試験で生成された硫化砒素の砒素品位は0.5%であり、使用硫化剤は反応量論値の1.2倍以下で、全ての数値目標を達成した。	達成
(3) 転炉煙灰の処理技術	・ 易溶性転炉煙灰を対象とした、銅の液中への分離技術を開発する。 ・ 砒素の液中への分離技術 プロセス初期において転炉煙灰が含有する砒素の70%以上を回収する技術を開発する。 ・ 難溶性転炉煙灰の処理技術 難溶性転炉煙灰を浸出可能にする技術を開発する。	転炉煙灰と熔錬炉煙灰との配合処理法、転炉煙灰への鉄源添加法を考案・試験し、パルプ生成段階でスラリー化が可能な転炉煙灰については、1) 銅の一次浸出法、2) 砒素の一次浸出法のいずれもが、基礎試験において数値目標を達成した。	達成
(4) 煙灰の砒素浸出液から結晶性スコロダイトを直接生成する技術	1) 直接法 不純物が少ない精製された結晶化元液を得る方法を確認する。 2) 短縮法 1) で確立した方法をベースとし、工程数の削減を図り、簡便なフローに改善する。 3) 脱電同時処理法（脱電法） 2) で確立した短縮法における液質調整剤に脱電スライムを適用した、脱電スライムと煙灰の同時処理法を開発する。	1) 直接法により浸出した砒素を結晶性スコロダイトに固定する実証試験に成功し、その結晶性スコロダイトの溶出特性は、目標の溶出値を全て満たした。 2) 短縮法により浸出した砒素を結晶性スコロダイトに固定する実証試験に成功し、その結晶性スコロダイトの溶出特性は、目標の溶出値を全て満たし、工程数削減、薬剤原単位の削減も目標以上に達成した。 3) 脱電同時処理法により浸出した砒素を結晶性スコロダイトに固定する実証試験に成功し、その結晶性スコロダイトの溶出特性は、目標の溶出値を全て満たした。	達成

B-4. 成果、目標の達成度(個別要素技術成果)(2)

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
(5) 複数製錬所煙灰の組成解析及び銅と砒素の分離の再現試験	煙灰の組成、煙灰中の銅の形状を把握し、銅の分離挙動に関し、学術的アプローチから再現性・原料依存性を確認する。	国内4製錬所から6種の煙灰試料を収集し、その組成・形状を分析把握し、これに応じた処理条件を検討、確立を行った。	達成
(6) 結晶性スコロダイト生成時における不純物の挙動調査	直接法において、砒素浸出液への随伴が避けられない代表的な不純物元素が、結晶性スコロダイトの生成、形状及び溶出特性に与える影響を解析する。	銅、モリブデンについては、溶出特性に影響が無い事が確認され、アンチモン、ビスマスについては反応初期に結晶中心部に大半が取り込まれ、結晶表面近傍には存在しないことが確認され、溶出挙動に直接の影響がないことが示唆されたが、粒子が微細化する傾向が観察され、結晶化元液への混入は極力排除することが望ましいと推定された。	達成
(7) 結晶性スコロダイト長期安定性	1) 事業期間4年間の実証規模の貯蔵試験を通じて、13号法での砒素溶出値が基準値の0.3mg/lを下回って推移する。 2) TCLP溶出試験の砒素溶出値が基準値の5mg/lを下回って推移する。	1) 期間中、全てのサンプルが全ての試験において砒素溶出値<0.1mg/lを示した。 2) 期間中、全てのサンプルが全ての試験において砒素溶出値≤0.2mg/lを示した。	達成
(8) 結晶性スコロダイトの物性・溶出メカニズムの解明	1) 過酷、加速試験後でも13号法溶出基準を満足する。 2) 結晶構造と、溶出安定性との関連を解明する。 3) 生成条件、組成、形状が異なる結晶性スコロダイトでの溶出安定性を確認する。	1) 溶出基準を満足した。 2) スコロダイト粒子が単結晶で欠陥がないことを確認した。 3) 銅を含有する結晶性スコロダイトの砒素溶出特性に悪化変化がないことを確認した。	達成
9) 結晶性スコロダイトの安定貯蔵施設の概念設計	1) 長期貯蔵に伴うリスクを抽出する。 2) リスクに対応した、貯蔵条件・貯蔵方法の検討を行う。 3) 大規模(20万m ³)貯蔵施設の立地条件を地質学的、土木工学的に検討する。 4) コスト、工期等を検討し、貯蔵施設の概念設計を行う。	1) リスク分析を完了した。 2) 立地、構造条件の検討を完了した。 3) 立地条件の検討を完了した。 4) 概念設計を完了した。	達成

B-5. 事業化、波及効果

事業化について

(1) 今日、日本の銅製錬所は、約500万トンの精鉱を輸入し、160万トンの銅地金を生産しているが、その銅精鉱中の砒素品位は0.08～0.12%に達し、10年前の約2.5倍に上昇しており、銅製錬業界だけで年間4,000ないし6,000トンの砒素が発生している。

(2) この砒素は、一部は中間生成物に随伴して系内を循環し、余剰分の大半は最終的に副産物であるスラグに固定され、系外に排出されている。結果として、スラグに含有される砒素品位は上昇しており、またスラグのかなりの量は輸出されていることから、国内外におけるスラグの含有量規制が強化されれば、銅製錬事業そのものが瞬時に成立しなくなるリスクを抱えている。

(3) 開発された煙灰中の砒素の分離技術を実用化することによって、砒素を結晶性スコロダイトとして処理することが可能となる。また、大規模な結晶性スコロダイト貯蔵施設が設置されれば、国内銅製錬所から発生する砒素を最終的に結晶性スコロダイトとして貯蔵する受け皿となり、事業化(事業の拡大)が見込まれる。

波及効果について

(1) 資源の安定供給

高砒素精鉱は、鉱山側へのペナルティとなることから、本技術により高砒素精鉱を幅広く処理することが可能となり、より低い価格での資源調達及び安定供給を実現することが可能となる。また、砒素を分離し安定した化合物として貯蔵できる技術を国内銅製錬へ波及させることにより、我が国の資源安定供給につなげられることが期待される。この場合、貯蔵施設としての国内での立地条件等をさらに検討し、効率的な貯蔵施設を設置することが必要である。

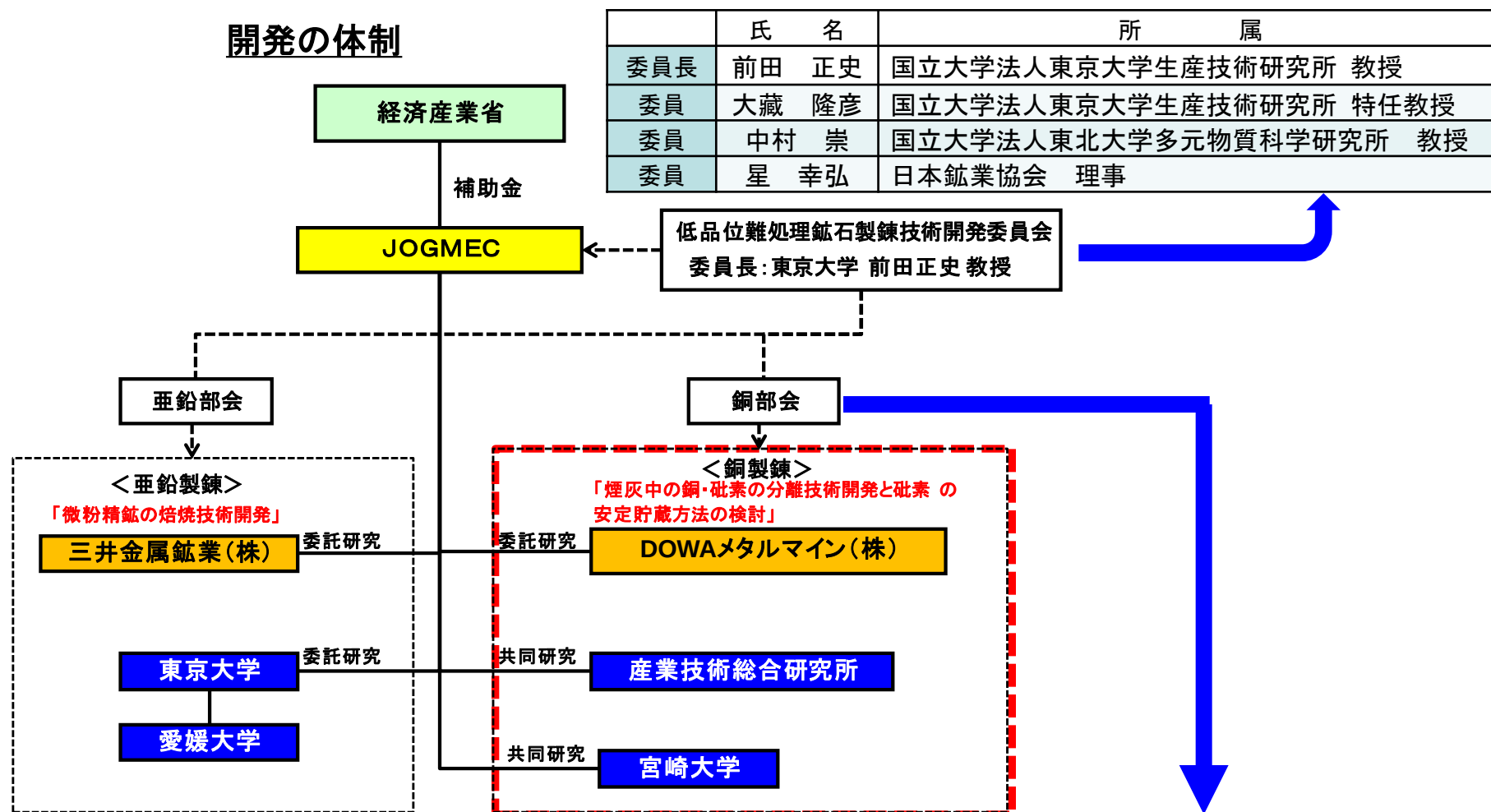
(2) 省エネルギー

本技術によって、増大する製錬エネルギーが抑制される規模は、国内銅製錬において、概ね1.2PJ/年と考えられる。

開発の進捗と資金配分

実施項目／年度	H21	H22	H23	H24
資金(百万円)	47	98	106	83
ア) 結晶性スコロダイトの安定貯蔵方法の検討				
(1) 結晶性スコロダイトの長期貯蔵モニタリング				
(2) 結晶性スコロダイトの物性・溶出メカニズムの研究				
(3) 結晶性スコロダイトの大規模貯蔵施設の概念設計				
イ) 煙灰処理法の開発				
(4) 煙灰処理法の開発(基礎試験)				
(5) 煙灰処理法の開発(実証試験)				

開発の体制



	氏 名	所 属
委員長	前田 正史	国立大学法人東京大学生産技術研究所 教授
委員	大藏 隆彦	国立大学法人東京大学生産技術研究所 特任教授
委員	中村 崇	国立大学法人東北大学多元物質科学研究所 教授
委員	星 幸弘	日本鉱業協会 理事

	氏 名	所 属
部会長	中村 崇	国立大学法人東北大学多元物質科学研究所 教授
委員	清谷 謙二	三菱マテリアル(株) 銅事業カンパニー製錬部 部長補佐
委員	近藤 康裕	住友金属鉱山(株) 金属事業本部事業室 技術担当課長
委員	中澤 廣	国立大学法人岩手大学 工学部 教授
委員	中村 建作	JX日鉱日石金属(株) 金属事業本部 総括室 主任技師
委員	拝生 憲治	日本鉱業協会 技術部 部長代理

7. 評価

7-1. 評価検討会(テーマA、B共通)

評価検討会名称

「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の研究開発」評価検討会

評価検討会委員

委員長

藤田 豊久

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 教授

委員

織山 純

一般社団法人新金属協会 専務理事

香取 義重

前株式会社三菱総合研究所科学技術部門統括室
コンセプト・プロデューサ

村上 進亮

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 准教授

山下 智司

千葉工業大学工学研究科機械サイエンス専攻 教授

7-2. 総合評価(コメント)

テーマA. 微粉精鉱の焙焼技術開発(亜鉛製錬)

○注目を集めるレアメタルとは違い、生活基盤材料として重要である亜鉛は枯渇資源とされている。とりわけ湿式亜鉛製錬所にとって、微粉鉱の処理する際に焙焼炉操業条件を確立することは重要なテーマである。設定された目的に対して十分な成果を得て、既に事業化の見通しも立っていると言え、今後の普及展開に期待したい。

○造粒と廃熱ボイラーの方向を変化させて良い成果を得ているが、費用に対して結果は単純なものであり、今後、低コストの費用での研究が望ましく、成果の発表も望まれる。また、得られた成果について同業他社との情報交換や技術移転がスムーズに運ばれることを期待したい。

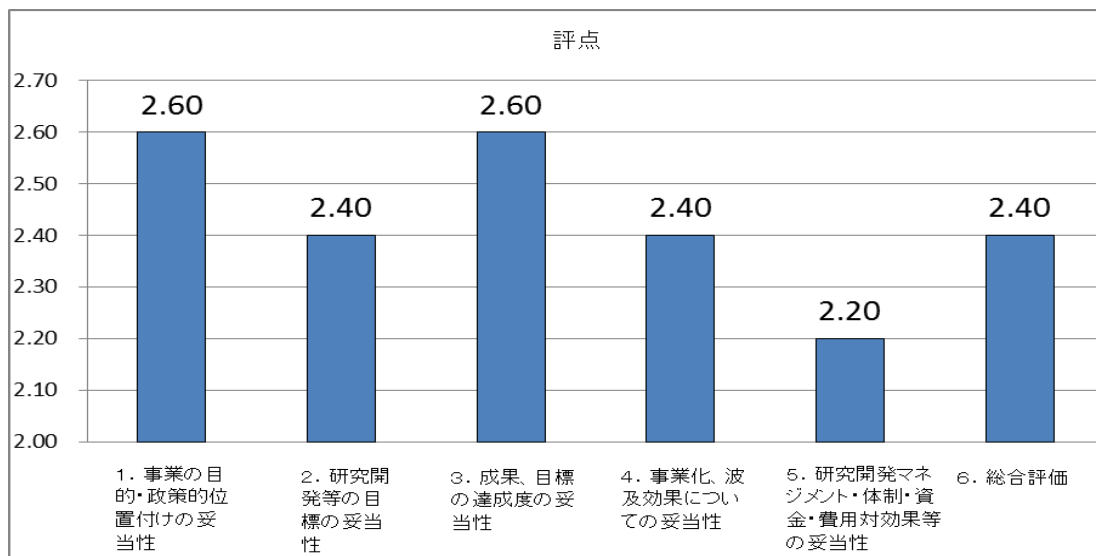
テーマB. 煙灰中の銅・砒素の分離技術開発と砒素の安定貯蔵方法の検討(銅製錬)

○今後鉱石の低品位化が進むと、それを処理する際には有害元素を含む煙灰がさらに多く発生し、より安価で安定した処理方法の開発が重要であり、特許が11編、発表が6件と社会に公表して良好な成果を得た。また、硫化砒素化を経ずに、直接に結晶性スコロダイトを生成する「直接法」を技術開発するとともに、さらに処理フローの見直しを加えて「短縮法」や「脱電法」を開発したことは評価でき、技術開発としては十分な成果を得ている。

○スコロダイトの貯蔵に対し、溶出に関する条件の明確化が必要である。また、貯蔵施設はその立地の選定等に最大の問題があるものと思われ、環境省はもちろん地方自治体の理解と連携が必要である。今回得られた技術を社会的に望ましい形で社会実装して頂きたい。

7-3. 評点結果

「経済産業省技術評価指針」に基づき、プロジェクト事後評価において、評点法による評価を実施した。



テーマA. 微粉精鉍の焙焼技術開発 (亜鉛製錬)

【評価項目の判定基準】

評価項目1.～5.

3点: 非常に重要又は非常によい

2点: 重要又はよい

1点: 概ね妥当

0点: 妥当でない

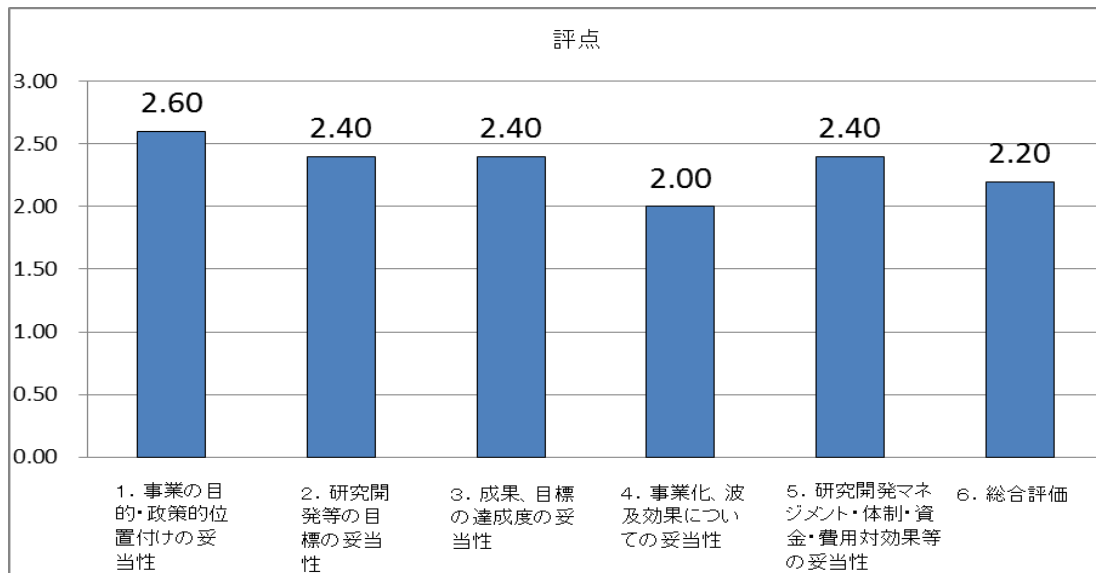
6. 総合評価

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、成果等が今一步のところがあつた。

0点: 実施された事業は、成果等が極めて不十分であつた。



テーマB. 煙灰中の銅・砒素の分離 技術開発と砒素の安定貯蔵方法の 検討(銅製錬)

8. 提言及び提言に対する対処方針

今後の研究開発の方向等に関する提言

A. 微粉精鉱の焙焼技術開発（亜鉛製錬）

○ボイラートラブルの低減として操業停止による電力エネルギー増大を防止することは重要であり、本事業では造粒と廃熱ボイラーの方向を変化させて良い成果を得ているが、費用に対して結果は単純なものであり、今後、低コストの費用での研究が望ましい。また、成果の発表が望まれる。

B. 煙灰中の銅・砒素の分離技術開発と砒素の安定貯蔵方法の検討（銅製錬）

○煙灰中の銅と砒素の分離技術開発と砒素の安定貯蔵は、銅の製錬容量を増やすことになり、目標も銅単位のエネルギー原単位抑制、スコロダイト製造からの砒素溶出基準を満たすことなどが期待される。スコロダイト化した砒素の安定貯蔵条件の検証および良好な場所選定を期待したい。

○本事業と異なるが、砒素が混入する非鉄スラグの扱いについても別途検討が必要と思われる。

提言に対する対処方針

○本事業により、今後供給の増加が見込まれる微粉精鉱に対し、最大の懸念であった焙焼工程の課題の解決が図られた。研究開発の成果は、既に実操業に適用されており、本成果が国内の亜鉛製錬所に波及できるよう成果発表を行ってきたものの、更なる普及に努力する。

○結晶性スコロダイトの貯蔵に伴うリスク分析と貯蔵条件、及び安定貯蔵施設の概念設計を行い、「コンクリート槽封入法」が最適な貯蔵方法であるとの結論を得た。今後、発生する煙灰中の砒素処理が行われることを期待する。

○今回の研究開発の対象以外で発生するスラグに混入する砒素の課題の抽出、対応について検討する。

8. 提言及び提言に対する対処方針

今後の研究開発の方向等に関する提言

< 2 テーマ共通 >

○非鉄金属製錬産業にとって、世界に伍して立ち向かうからには一社だけの対応は今後ますます難しくなるはずであり、産・官・学が連携したオールジャパン体制での取り組みが必要である。そのなかで製錬技術の伝承はもちろん、当該分野における人材育成についても国の継続的支援・補助が必要であることは言うまでもない。

提言に対する対処方針

○産・官・学それぞれの役割を今一度見つめ直し、課題に向けた取組や、体制の構築に努める。また、非鉄製錬分野の人材育成についての施策を検討する。