

「令和5年度現場ニーズ等に対する技術支援事業」  
微細気泡導入による銅浮選中の貴金属元素の回収改善検討に  
関する共同スタディ

成果報告書  
(公開版)

令和6年3月8日  
日鉄鉱業株式会社

## 目次

1. 共同スタディの概要	1
(1) 共同スタディの目的	1
(2) 共同スタディの概要	1
(3) 実施場所	1
2. 実施計画	2
(1) 共同スタディの内容	2
(2) 成果の利用や波及などに関する具体的なイメージ	2
3. 実施内容	2
4. 微細気泡発生装置の改良	3
(1) 目的	3
(2) 微細気泡発生装置の仕様	3
(3) 微細気泡導入について	3
5. 微細気泡径測定	4
(1) 目的	4
(2) 使用機器、試験方法および試験条件	4
① 測定条件・方法	4
② 測定結果	4
6. カラムフィード評価	5
(1) 目的	5
(2) サンプルング方法	5
(3) 浮遊性確認のためのラボ精選試験	5
7. ラボカラム浮選試験	6
(1) 目的	6
(2) 使用サンプルおよび薬剤	6
① 鉍石サンプル	6
② 使用試薬	6
(3) 試験条件	6
① カラム試験機およびその他の使用装置・器材とセッティング	6
(4) 試験運転条件	6
(5) 試験結果	7
8. ラボカラム浮選試験産物の MLA	8
(1) 目的	8
(2) 測定サンプル	8
(3) 測定および解析条件	8
(4) 解析結果	8
9. 総括	9
(1) 微細気泡発生装置の改良	9

(2)	微細気泡径測定 .....	9
(3)	カラムフィード評価 .....	9
(4)	ラボカラム浮選試験 .....	9
(5)	ラボカラム浮選試験産物の MLA .....	9

表一覧

表 1	ラボカラム浮選試験機の詳細と基本運転条件 .....	6
表 2	ラボカラム浮選試験サンプリング条件 .....	7

## 1. 共同スタディの概要

### (1) 共同スタディの目的

チリ国にて操業中の銅浮選プラントにおける貴金属元素の実収率改善に向けた方策について、ラボレベルの微細気泡吹き込み条件の最適化検討および実プラントでの実証試験を行なう。

### (2) 共同スタディの概要

日鉄鉱業が60%出資するチリ国の連結子会社であるアタカマ・コーザン鉱山（チリ国第3州、コピアポ市）においては、IOCG型の銅鉱山を操業しており、鉱石鉱物としては黄銅鉱が主体となるが、金および銀も伴う。金および銀については、黄銅鉱とともに副次的に浮選回収しているが、それらの実収率は、黄銅鉱よりも低く推移しており、改善の余地があると考えられる。

令和3年度および4年度の現場ニーズに対する技術支援事業に係る共同スタディ「銅浮選プラントにおける貴金属元素の回収改善検討」において、精選工程での捕収剤の添加やパルプpHの最適化、微細気泡の導入について貴金属元素回収の効果をラボ浮選試験によって調査し、プロセスシミュレータによるプラントの効果計算の結果、貴金属元素の回収率の向上が見られた。特にラボ精選試験より、微細気泡の導入において、既存の給気方法に比べ、精鉱銅品位を保ちつつ貴金属元素の回収率の向上が見られた。

本年度は、引き続きラボ精選試験での微細気泡導入条件の最適化を行ない、その結果を元に実プラントへの適用のための設計から始めて実証試験を目指し、商業ベースでの貴金属元素の回収率改善に繋げていく。

### (3) 実施場所

日鉄鉱業株式会社 研究開発部（東京都西多摩郡日の出町平井 8-1）

## 2. 実施計画

### (1) 共同スタディの内容

アタカマ・コーザン鉱山の浮選プラントにおける微細気泡の導入による貴金属元素（金及び銀）の回収改善策として、本年度は以下の検討を行う。

#### 微細気泡導入方法の改善

ミリバブルとマイクロバブルを併用して給気する際に必須となる独立した微細気泡導入経路であるが、昨年度検討では運転中にパルプの循環が停止した。そこで、微細気泡の導入方法に改善を施し、安定した試験運転を目指す。

#### 精選工程での微細気泡導入条件の最適化

昨年度の検討で予定していた、微細気泡の導入位置の変更やミリバブルとマイクロバブルの併用条件でのラボカラム浮選試験を実施し、浮選成績への影響と最適な導入条件を明らかにする。

### (2) 成果の利用や波及などに関する具体的なイメージ

本検討の目的である、浮選プラント内における貴金属元素の実収率改善が可能となれば、生産する銅精鉱中の金および銀品位が向上し、精鉱価値が増大する。これにより鉱山経営がより安定し、我が国への銅および貴金属資源確保にも寄与できると考えられる。

## 3. 実施内容

本スタディにおいて実施した項目について下記に示す。

- ① 微細気泡発生装置の改良
- ② 微細気泡径測定
- ③ カラムフィード評価
- ④ ラボカラム浮選試験
- ⑤ ラボカラム浮選試験産物の MLA

次項以降で、それぞれの試験結果について説明する。

#### 4. 微細気泡発生装置の改良

##### (1) 目的

昨年度結果を受け、微細気泡発生装置の改良を行い、導入経路を刷新することとした。本項では、改良後の微細気泡発生装置の仕様と導入経路について説明する。

##### (2) 微細気泡発生装置の仕様

今回の試験で使用した装置は、今年度新たに株式会社安齊管鉄に依頼し設計・製作されたもので、パルプを流しセラミック部分を回転させて得られるせん断力にて気孔から微細気泡を発生させ、パルプに供給する仕組みである。

##### (3) 微細気泡導入について

昨年度まではカラム試験機のキャビテーションチューブ給気の循環ラインへの組み込みや、カラムへ直接微細気泡給気の循環ラインを設置する等の方法で給気していたが、今年度はフィードタンクとカラムの間に微細気泡給気の循環ラインを設け、微細気泡を含んだパルプをカラムへ供給する形とした。これは、微細気泡発生装置から微細気泡を発生させる際に、併せて発生してしまう粗大な気泡を除去するため、開放系での導入とした。また、フィードに予め給気することで、カラムからパルプを抜き出すことによる配管詰まりの可能性を極力低くする目的もある。

## 5. 微細気泡径測定

### (1) 目的

微細気泡発生装置を新たに製作し、微細気泡導入のための循環ラインにも変更を加えたため、微細気泡の発生および気泡径の確認のため、改めて気泡径測定を実施する。

### (2) 使用機器、試験方法および試験条件

#### ① 測定条件・方法

水槽にMIBCを添加した水を張り、ポンプを稼働させ微細気泡発生装置にエアーコントローラの表示値一定で通気し、所定時間滞留させたのち、水をサンプリングしマイクロトラックにて気泡径を測定した。

微細気泡発生装置の回転数と滞留時間を変え、測定を行なった。

#### ② 測定結果

微細気泡として観察された気泡は全て100 $\mu\text{m}$ 以下であり、微細気泡の発生が確認された。

回転数を大きくすると気泡径が小さくなり、滞留時間は一部条件にて長くすることで気泡径が小さくなることが確認された。

## 6. カラムフィード評価

### (1) 目的

カラムフィードのサンプリング方法を確立したのち、カラムフィードのキャラクタリゼーションおよび浮選性評価を行う。

### (2) サンプリング方法

パルプを採取し、吸引ろ過、天日干し、解砕を行ない、乾燥後のサンプルの水分値を測定し乾燥状況を確認した。

### (3) 浮遊性確認のためのラボ精選試験

ラボカラム浮選試験に先立ち、FW 浮選機を用いたラボ精選試験を行ない、サンプルの浮遊性の確認を行なった。

回収された精鉱及び尾鉱は、下記に示す化学分析に供し、各元素の含有割合を求めた。

- ・ Cu : 過塩素酸+硝酸+フッ酸加熱分解 - AAS 分析
- ・ Fe : 過塩素酸+硝酸+フッ酸加熱分解 - AAS 分析
- ・ S : 加熱燃焼 - H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30%水溶液 - IC
- ・ Au : 王水加熱加圧分解 - ICP-MS 分析
- ・ Ag : 王水加熱加圧分解 - ICP-MS 分析

浮選精鉱の銅品位は、ラボカラム浮選試験の目標値に達しており、銅実収率も高く、ラボカラム浮選試験サンプルとして使用できることを確認した。

## 7. ラボカラム浮選試験

### (1) 目的

微細気泡給気時の安定した運転を達成した上で、実プラントに準拠した精鉱銅品位の範囲において、ミリバブルのみの給気条件と微細気泡との併用給気条件がそれぞれ金の実収率に及ぼす影響を評価する。

### (2) 使用サンプルおよび薬剤

#### ① 鉱石サンプル

アタカマ浮選プラントで2023年2月初旬から6月頭にかけてサンプリングされたカラムフィードを、本試験のサンプルとして使用した。

#### ② 使用試薬

使用した試薬について以下に示す。

- 起泡剤 : 4-メチル-2-ペンタノール (MIBC), 東京化成工業株式会社
- pH調整剤 : 水酸化カルシウム (Ca(OH)<sub>2</sub>), 関東化学株式会社

### (3) 試験条件

#### ① カラム試験機およびその他の使用装置・器材とセッティング

表1にラボカラム浮選試験機の諸元と基本運転条件を示す。微細気泡導入に関する試験条件は、給気量は一定のまま、セラミックの回転数と、コンディショニングタンクのパルプの滞留時間を変更した。

表1 ラボカラム浮選試験機の詳細と基本運転条件

浮選機	コンパクトラボカラム, Eriez 直径: 51.5 mm (2 inch) 高さ: 2000 mm 容積: 5.38 L (カラム部分のみ)
ポーラススパージャー (多孔質管)	HDPE Lab Column Sparger, Eriez
Air 流量	ポーラススパージャー 0.5 L/min
パルプレベル	レベルセンサー設定値 ポーラススパージャーのみ : 55 ポーラススパージャー + 微細気泡併用 : 50
フロス洗浄水	3条件

### (4) 試験運転条件

本試験では、表2に示す条件で運転を行い、サンプリングを実施した。各洗浄水量につき、2~5回サンプリングしている。

表2 ラボカラム浮選試験サンプリング条件

RUN#	給気条件	MB conditioning 滞留時間	Rinse
1	PS+ MB (高回転数)	短	3条件
2	PS+ MB (高回転数)	長	1条件
3	PS+ MB (低回転数)	長	3条件
4	PS+ MB (低回転数)	短	3条件
5	PS	-	2条件

※ PS:ポーラススパージャー、MB:微細気泡

(5) 試験結果

浮選産物の解析の結果、ポーラススパージャーから発生するミリバブルと併用して微細気泡を導入することにより、ミリバブルのみの場合と比べて銅の実収率が増加しており、これは微細気泡の併用により選択的な銅の回収が行われていると考えられる。また、微細気泡併用給気の高回転数条件においては、金の実収率も増加する一方で精鉱銅品位は低下しており、微細気泡導入によって副次的に巻き込みが発生しているものの、その上で金は選択的に回収されているものと考えられる。

## 8. ラボカラム浮選試験産物の MLA

### (1) 目的

ラボカラム浮選試験産物の MLA 測定により、精鉱中の鉱物粒子の存在形態や粒度等を観察し、各条件の浮選試験（実収率、品位等）の結果と併せて、浮選条件による各形態の鉱物粒子の浮選挙動への影響の調査を試みた。

### (2) 測定サンプル

今回 MLA 測定に供したサンプルはラボカラム浮選試験で実施した条件のうち、金実収率が低いものから高いものまで含まれるよう選択した。

また、MLA 測定用樹脂片は、真空自転公転ミキサ（あわとり練太郎；株式会社シンキー製）を用いて、底面法にて作製した。

### (3) 測定および解析条件

MLA 測定モードは、樹脂片の底面全域を測定する時間と負荷を考慮し、全体的な粒子測定については XBSE モードを、金鉱物粒子の測定については指定した輝度の粒子のみを測定することが可能な SPL モードを用いた。

### (4) 解析結果

浮選精鉱中の粒子径は、ポーラススパージャーのみの給気条件に比べ、微細気泡併用給気条件においてより細くなっており、これは微細気泡の併用給気により微細粒子の回収が促進したと考えられる。

chalcopyrite のみの粒子径についても、微細気泡の併用給気により細くなっており、前項の浮選結果の解析でみられた微細気泡併用給気条件での銅実収率の増加は、微細気泡によって微細な chalcopyrite 粒子が選択的に回収されたことによると推察される。

また、微細気泡併用給気の高回転数条件にて、electrum 単体粒子や単体ではないものの主に electrum で構成されている微細な粒子が、他の条件と比べて多く回収されており、こちらも浮選結果と併せて、微細気泡によって微細な electrum 粒子の回収が促進され、金実収率の向上に繋がったと考えられる。

## 9. 総括

チリ国にて操業中の銅浮選プラントにおける貴金属元素の実収率改善を目的とし、ラボレベルの微細気泡吹き込み条件の最適化検討を行なった。各章の総括を以下に示す。

### (1) 微細気泡発生装置の改良

- 昨年度の問題を受け、改良を施した微細気泡発生装置の製作を株式会社安斉管鉄に依頼し、新型の微細気泡発生装置が製作された。
- 微細気泡導入のための循環ラインを開放系にし、予めフィードパルプに導入することで、配管の閉塞などが避けられるような形とした。

### (2) 微細気泡径測定

- 微細気泡として観察された気泡は全て 100 $\mu\text{m}$  以下であり、微細気泡の発生が確認された。
- 回転数については高回転数で、滞留時間については一部条件では長時間で気泡径は小さくなった。

### (3) カラムフィード評価

- 浮選精鉱の銅品位は、ラボカラム浮選試験の目標値に達しており、銅実収率もラボカラム浮選試験サンプルとして使用できる範囲であることを確認した。

### (4) ラボカラム浮選試験

- 微細気泡併用の有無による浮選挙動への影響をみるべく、ラボカラム浮選試験を行なったところ、目標の精鉱銅品位の範囲でサンプリングすることが出来た。
- ポーラススパージャーから発生するミリバブルと併用して微細気泡を導入することにより、ミリバブルのみの場合と比べて銅の実収率が増加し、微細気泡の併用により選択的な銅の回収が行われていると考えられる。
- 微細気泡併用給気の高回転数条件において、金の実収率も増加する一方で精鉱銅品位は低下しており、微細気泡導入によって副次的に巻き込みが発生しているものの、その上で金は選択的に回収されているものと考えられる。

### (5) ラボカラム浮選試験産物の MLA

- 微細気泡の導入により、浮選精鉱中の *chalcopyrite* 粒子は細かくなっており、浮選の結果と併せて、微細な *chalcopyrite* 粒子の回収が促進され、銅実収率の向上に繋がったと考えられる。
- 微細気泡併用給気の高回転数条件にて、*electrum* 単体粒子や単体ではないものの主に *electrum* で構成されている微細な粒子が、他の条件と比べて多く回収されており、こちらも浮選結果と併せて、微細気泡によって微細な *electrum* 粒子の回収が促進され、金実収率の向上に繋がったと考えられる。

以上