

「令和5年度現場ニーズ等に対する技術支援事業」
微細銅鋳物のカラム浮選成績向上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
日鉄鋳業株式会社

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
① 日鉄鉱業株式会社 研究開発部	1
② 共同研究・業務委託先	1
2. 実施計画	2
(1) 共同スタディの内容	2
3. 実施内容	3
(1) 標本鉱物の付着量測定試験および機械式セルでの浮選試験	3
(2) AR 精鉱およびキャリア鉱石の試料調製	3
(3) AR 精鉱の機械式セルでの浮選試験	3
(4) AR 精鉱のカラムセルでの浮選試験	3
(5) 浮選成績予測モデルの検討	3
(6) アルケロス鉱山プラントシミュレーションによる収益試算	3
4. 標本鉱物の付着量測定試験および機械式セルでの浮選試験	4
(1) 目的	4
(2) 試料	4
(3) 試験方法	4
(4) 試験結果	4
5. AR 精鉱およびキャリア鉱石の試料調製	5
(1) 目的	5
(2) 試料	5
(3) 試験方法	5
(4) 試験結果	5
6. AR 精鉱の機械式セルでの浮選試験	6
(1) 目的	6
(2) 試料	6
(3) 試験方法	6
(4) 試験結果	7
7. AR 精鉱のカラムセルでの浮選試験	8
(1) 目的	8
(2) 試料	8
(3) 試験方法	8
(4) 試験結果	9
8. 浮選成績予測モデルの検討	10
(1) 目的	10
(2) 試験結果	10

9. アルケロス鉱山プラントシミュレーションによる収益試算	11
(1) 目的	11
(2) 試験方法	11
(3) 試験結果	12
10. 総括	13
(1) 標本鉱物の付着量測定試験および機械式セルでの浮選試験	13
(2) AR 精鉱およびキャリア鉱石の試料調製	13
(3) AR 精鉱の機械式セルでの浮選試験	13
(4) AR 精鉱のカラムセルでの浮選試験	13
(5) 浮選成績予測モデルの検討	13
(6) アルケロス鉱山プラントシミュレーションによる収益試算	13
11. 参考文献	14

図表一覧

図 1	試験フロー図	7
図 2	シミュレーションに使用した浮選回路	11
表 1	試験条件	6
表 2	運転条件一覧	8
表 3	カラム試験条件	9
表 4	シミュレーション用設定鉱物	11

1. 共同スタディの概要

(1) 共同スタディの目的

対象となる二次磨鉱後のカラム浮選工程における微細銅鉱物の浮選成績向上につながる有望策を見出す。

(2) 共同スタディの概要

日鉄鉱業株式会社は、チリ国の首都サンチアゴ市の北約 400 km、チリ第IV州セレナ市の北東約 35 km（南緯 29° 46'15"、西経 70° 54'40"）に位置する地区を対象に、アルケロス鉱山開発プロジェクトを進めている。本プロジェクトの対象鉱区から採掘される銅鉱石は、粒径 10 μm 以下の微細銅鉱物を多く含有する特徴を持つ。したがって、プラント設計での一次磨鉱粒度が $D_{80} = 70 \mu\text{m}$ 、二次磨鉱粒度が $D_{80} = 20 \mu\text{m}$ と微粒域に設計されている。さらに、銅品位確保の観点から、二次磨鉱後の鉱石はカラム浮選工程で精選する設計となっており、銅鉱物の浮選速度の低下が懸念される。そこで、二次磨鉱粒度 $D_{80} = 20 \mu\text{m}$ 微粒銅鉱石のカラム浮選工程での浮選成績向上を目的に、AR 精鉱を使用したカラム浮選試験を実施し、浮選成績向上策による銅実収率および品位の向上を目指す。

(3) 実施場所

① 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 共同研究・業務委託先

a) 国立大学法人 北海道大学

工学研究院 環境循環システム部門 資源循環工学分野

北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目

2. 実施計画

(1) 共同スタディの内容

アルケロス鉱山開発プロジェクトのプラント設計では、二次磨鉱粒度 $D_{80} = 20 \mu\text{m}$ 微粒銅鉱石のカラム浮選を検討しており、銅鉱物の浮選速度の低下が懸念される。そこで、アルケロスプロジェクトのカラム浮選工程での成績向上を目的に、AR 精鉱を使用したカラム浮選試験を実施し、ラボ試験におけるプラント成績の再現と、浮選成績向上策として着目した凝集浮選による成績向上の確認を行う。

令和 4 年度の共同スタディ「カラムセルにおける微細銅鉱物の浮選挙動解析」において、模擬銅精鉱試料を使用した凝集促進条件におけるカラム浮選挙動の確認を行った。検討の結果、以下に示す課題が挙げられたため、本共同スタディではそれぞれ課題を解決すべく、検討を行う。

①対象鉱石

試験に使用した鉱石は、模擬銅精鉱試料であり、アルケロス実鉱石は使用されていない。

②ラボカラム浮選条件

検討に使用しているラボカラム浮選機は、キャビテーションによる給気方式を採用しており、実機のカラム浮選機と比較して、カラム塔底のバルブ循環量がカラム下降流に対して極端に多い。したがって、ラボ機と実機とで気泡と粒子との衝突確率が異なる可能性がある。

③浮選予測モデル

標本鉱物の凝集試験の結果、凝集促進条件により、粒子の凝集現象が確認された。一方で、各条件と凝集径および浮選挙動との関係については明確化されていない。また、ラボ機械式セル浮選での浮選予測モデルから、ラボカラムセル浮選での浮選予測モデルへの展開についても未検討である。

①に関しては、チリのアルケロス鉱山よりアルケロス精鉱を入手し、実鉱石を対象としたラボ機械式、カラムセルでの浮選試験を実施し、浮選試験結果と標本鉱物に対する浮選予測モデルの予測結果との比較を行うことで、実鉱石に対する浮選予測モデルの構築について検討する。

②に関しては、現在採用しているキャビテーション方式の給気機構から、多孔質管方式に変更することで、塔底でのバルブ循環量の影響を排除した系でカラム浮選試験を実施する。また、アルケロス精鉱に対して、捕収剤添加量、パルプ濃度、キャリア粒子添加条件などの凝集促進条件についての最適化や、その他の条件としてマイクロバブル給気などの検証を行う。

③に関しては、標本鉱物を使用した凝集試験およびラボ機械式セルでの浮選試験を実施し、凝集モデルと浮選速度モデルを統合した浮選予測モデルを構築する。これにより、ある粒度分布を有する試料の浮選系内での凝集後の粒度分布を予測し、凝集粒度分布から浮選速度を算出することで、浮選挙動の予測につなげる。さらに、ラボ機械式セルに対応した浮選予測モデルからラボカラムセル浮選に適用するモデルへと展開するために、フロスゾーンでの実収率、回収速度も考慮に入れ、モデルを構築する。

3. 実施内容

本共同スタディにおいて実施した項目について以下に示す。

- (1) 標本鉱物の付着量測定試験および機械式セルでの浮選試験
- (2) AR 精鉱およびキャリア鉱石の試料調製
- (3) AR 精鉱の機械式セルでの浮選試験
- (4) AR 精鉱のカラムセルでの浮選試験
- (5) 浮選成績予測モデルの検討
- (6) アルケロス鉱山プラントシミュレーションによる収益試算

次項以降で、それぞれの結果について記す。

4. 標本鉍物の付着量測定試験および機械式セルでの浮選試験

(1) 目的

アルケロス鉍石は、粒径 10 μm 以下の微細銅鉍物を多く含有している。浮選確率論における浮選セル内の気泡と粒子の衝突確率は、粒子径 (D_p) と気泡径 (D_b) を用いて下式のように示される^{Ref 1}。

$$P_c = C \left(\frac{D_p}{D_b} \right)^n \quad \text{式 1}$$

ここで、Cおよびnは定数である。上式のように、粒子径が小さくなるほど気泡と粒子が衝突する確率は低下し、結果として浮選速度が低下する。そこで、粒子径の低下による衝突確率の低下への対策として、微粒子の凝集現象に着目し、見かけの粒子径の増大による衝突確率の向上および浮選速度の増大を目的に検討を行った。本章では、凝集促進条件のキャリア粒子の添加条件に着目し、キャリア添加条件における浮選成績の予測モデルの構築を目的に、黄銅鉍の標本鉍物を対象にした微粒子のキャリア粒子への付着量の測定試験、機械式セルでのバッチ式浮選試験を実施した。

(2) 試料

供試試料として、 $D_{50} = 3.7 \mu\text{m}$ の微粒子と $D_{50} = 106 \mu\text{m}$ のキャリア粒子の2種類に調製した黄銅鉍の標本鉍物を使用した。

(3) 試験方法

キャリア粒子への微粒子の付着量を測定するために、湿式ふるい分け試験を実施した。また、単一系および混合系での浮選試験を実施し、付着率モデルを反映した浮選成績予測モデルの検討を行った。

(4) 試験結果

キャリア粒子の最適添加率を予測し得る浮選成績予測モデルを構築した。

5. AR 精鉱およびキャリア鉱石の試料調製

(1) 目的

本章以降の凝集試験および浮選試験で使用するために、AR 精鉱とキャリア鉱石の試料調製を実施した。

(2) 試料

D_{80} 粒径 $23.9 \mu\text{m}$ の AR 精鉱とキャリア鉱石を対象とした。

(3) 試験方法

AR 精鉱は縮分し、各種試験用に調製した。キャリア鉱石は、気流式分級機（日鉄鉱業社製 エルボージェット PURO、以下 EJ）にて微粒分をカットすることとした。

(4) 試験結果

キャリア鉱石は、EJ 分級試験により微粒分をカットし、 D_{80} 粒径 $84.4 \mu\text{m}$ に調製した。

6. AR 精鉱の機械式セルでの浮選試験

(1) 目的

凝集促進条件である捕収剤添加量、パルプ濃度、キャリア粒子添加条件において、凝集試験および機械式セルを用いたバッチ式浮選試験を実施した。

(2) 試料

第5章にて試料調製した AR 精鉱およびキャリア粒子としてキャリア鉱石を使用した。

(3) 試験方法

以下に示す条件で、凝集試験および浮選試験を実施した。また、下式を最小二乗法によりフィッティングすることで、浮選速度定数 k を評価した。

表 1 試験条件

検討条件	試験 No.	捕収剤 ^{※1} 添加量 [g/t]	パルプ濃度 [wt%]	キャリア 添加割合 ^{※2} [-]
Blank	PCT2023-1	0	6.7	0
捕収剤添加量	PCT2023-3	100		
	PCT2023-7	2000		
	PCT2023-8	4000		
パルプ濃度	PCT2023-17	100	8.0	
	PCT2023-18		10	
	PCT2023-19		15	
キャリア添加	PCT2023-20		8.0	0.20
	PCT2023-21	10	0.52	
	PCT2023-22	15	1.4	

※1 Solvey 社製 AERO 3477 Promoter：ジチオリン酸塩

※2 AR 精鉱に対するキャリア鉱石の添加重量割合

$$R(t) = 1 - \exp(-kt) \quad \text{式 2}$$

ここで、 $R(t)$ は浮選実収率、 t は浮選時間を示す。

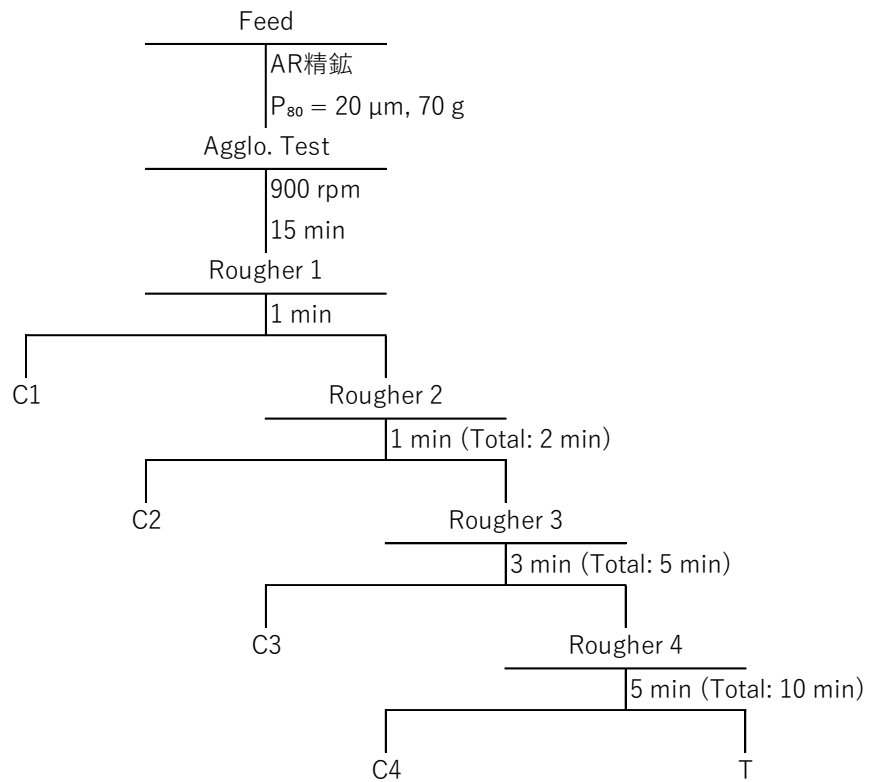


図1 試験フロー図

(4) 試験結果

捕収剤添加条件では、捕収剤添加量を増加させることで凝集径および浮選速度定数の増大が確認された。一方で、パルプ濃度条件、キャリア添加条件については、凝集径および Cu 実収率挙動にほとんど変化が見られなかった。

7. AR 精鉱のカラムセルでの浮選試験

(1) 目的

ラボのカラム浮選試験において、アルケロスプラント設計値の再現が可能であるかについての検証と凝集促進条件である捕収剤添加量、パルプ濃度、キャリア粒子添加条件およびフロス層厚条件において、カラム浮選試験を実施することでカラム浮選成績への影響について検証した。

(2) 試料

第5章にて試料調製した AR 精鉱およびキャリア粒子としてキャリア鉱石を使用した。

(3) 試験方法

Eriez 社製コンパクトラボカラムを使用し、以下に示す運転条件に設定し、カラム試験を実施した。

表2 運転条件一覧

条件	単位	設定値
起泡剤 (MIBC) 添加量	[ppm]	15
Feed 供給流量	[L/h]	所定値
Tail 抜き出し流量	[L/h]	手動 or 自動 ^{※1}
パルプレベル (LS 値) ^{※2}	[cm]	21 (55)
Air フロー	[L/min]	0.80
洗浄水量 ^{※3}	[mL/min]	0

※1 Tail 抜き出し流量 : 7.68 L/h 以下の場合は手動、以上の場合は自動

※2 パルプレベル : カラムセル上端からパルプ面までの高さ

LS 値 : レベルセンサーからのパルプ面までの高さ

※3 洗浄水を添加した際、フロス層が消失したため、洗浄水は無添加

カラム浮選試験の試験条件を以下に示す。本共同スタディでは、カラム浮選速度の検討を行うため、Feed パルプ流量を変化させることで、滞留時間を 45、30、15、5 分と変化させ、時間ごとの Cu 実収率を検討した。

表3 カラム試験条件

検討条件	フロス層厚 [cm]	捕収剤添加量 [g/t]	パルプ濃度 [wt%]	キャリア添加割合 ^{※2} [-]	滞留時間 [min]	Feedパルプ流量 [L/h]	Feed固体流量 [kg/h]
フロス層厚	0	0	6.7 ^{※1}	0	45	5.12	0.362
	21						
	41						
捕収剤添加量	21	0	100	0	30	7.68	0.543
		100					
		2,000					
		4,000					
パルプ濃度	21	100	8.0	0.20	15	15.4	1.09
			10				
			15				
キャリア添加	21	100	8.0	0.20	5	46.1	3.26
			10	0.52			
			15	1.4			

※1 アルケロス鉱山プラント設計値の銅重量濃度（1.8wt%）と等しくなるように、パルプ濃度条件（6.73wt%、0.0707 kg/L）を算出し、基本条件とした。

※2 AR精鉱に対するキャリア鉱石の添加重量割合

サンプリング後の産物は、化学分析（Cu, Fe, S）、粒度分布測定（分散径、凝集径）、MLA 分析に供し、浮選速度解析は、以下に示す浮選速度式^{Ref.2}を最小二乗法により実験値にフィッティングし、浮選速度定数 k を評価した。

$$R = 100 * \left(\frac{k\tau}{1 + k\tau} \right) \quad \text{式 3}$$

(4) 試験結果

アルケロスプラント設計値とカラム浮選試験結果とを比較したところ、設計値と同等な実収率が得られ、ラボカラム試験においても十分再現可能であることが示された。捕収剤添加量の増加による凝集径、 k の増大が確認された。一方で、パルプ濃度条件、キャリア添加条件については、明確な凝集径の増大、 k の増大は確認されなかった。フロス層厚条件の結果から、フロス層内での粒度分布の存在、フロス層厚が厚くなるほど k が低下していく傾向を確認した。MLAによる粒径5 μm 以下の表面露出率100%斑銅鉱粒子の浮選挙動解析結果から、捕収剤添加条件を適用することで、微粒子の浮選速度の増大が確認された。一方で、キャリア粒子添加条件については、微粒子の浮選速度および実収率の増加は確認されなかった。

8. 浮選成績予測モデルの検討

(1) 目的

機械式セルでのバッチ式浮選試験、連続式のカラム浮選試験の結果から、捕収剤添加条件において凝集径と浮選速度に相関が見られた。そこで本章では、捕収剤添加条件における凝集径予測モデルの構築、凝集径予測モデルからの浮選成績予測モデルの構築を目的に検討を行った。

(2) 試験結果

D_{50} 凝集径の予測モデル、誘導時間 t_i の予測モデルを反映した機械式セルでのバッチ式浮選成績予測モデルを構築した。Froth zone での実収率 (R_f) を考慮した連続式のカラム浮選成績予測モデルを構築した。

9. アルケロス鉱山プラントシミュレーションによる収益試算

(1) 目的

捕収剤添加条件によるカラム浮選成績の向上が、アルケロスプラントの収益性に与える影響について検証した。

(2) 試験方法

アルケロスプラント成績のシミュレーションには、HSC Chemistry 10 (Metso:Outotec 社製) を使用した。以下にシミュレーションに使用した浮選回路を示す。

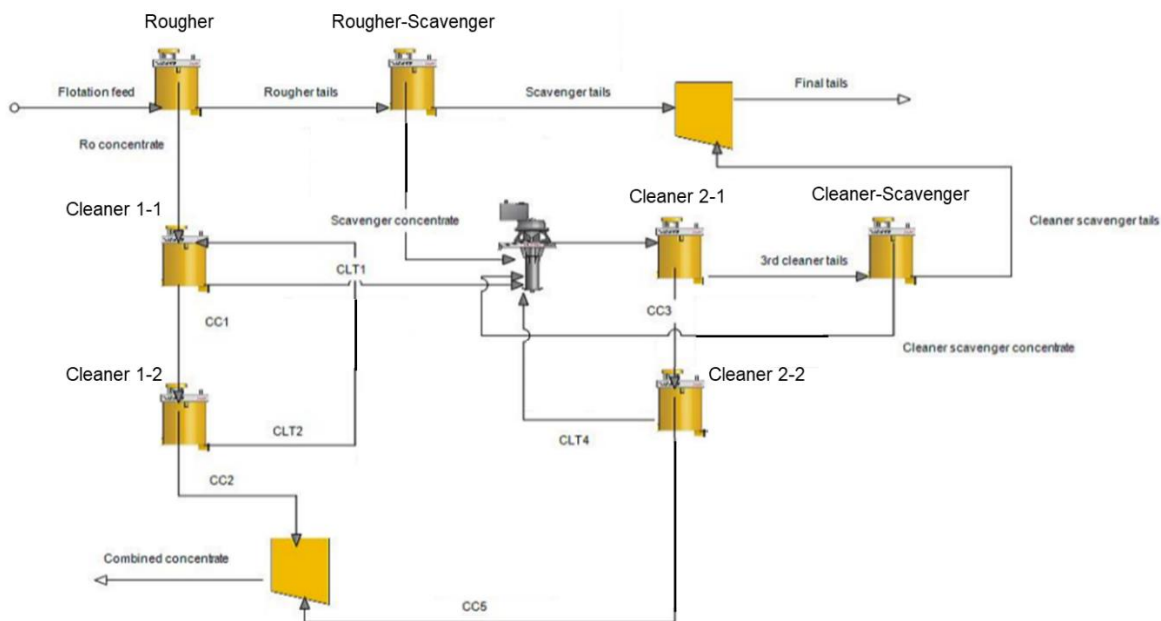


図2 シミュレーションに使用した浮選回路

各工程や最終精鉱の Cu 実収率および品位を出力させるために、代表銅鉱物 Bn、脈石成分として Cal および Qtz を仮定し、それぞれ構成鉱物とした。

表4 シミュレーション用設定鉱物

Element [wt%]	Bn	Cal	Qtz
Cu	61.4		
Fe	12.2		
S	26.4		
C		12.0	
Ca		44.7	
Mg		0.1	
Mn		0.4	
O		43.2	53.3
Si			46.7

プラント設計時は、各工程のラボでのバッチ式浮選試験を実施し、浮選時間に対する Cu 実収率、Ca 実収率、その他鉱物（全重量 - Bn 鉱物重量 - Cal 鉱物重量）の実収率を算出している。それぞれの浮選時間ごとの実収率の結果に対して、下式に示す浮選速度モデルを最小二乗法によりフィッテ

ィングし、Cu 実収率の結果から Bn、Ca 実収率から Cal、その他鉱物実収率から Qtz のそれぞれのパラメータを算出した。

$$R(t) = m_f(1 - \exp(-k_f t)) + m_s(1 - \exp(-k_s t)) + m_n * 0$$
$$m_f + m_s + m_n = 1$$
式 4

成績向上の評価方法については、Cleaner 2-2 工程における Bn の浮選速度モデルパラメータ m_f および k_f を、捕収剤無添加条件と 100 g/t 添加条件における滞留時間 85 分時の Cu 実収率となるように設定し、最終精鉱品位および実収率を比較した。

収益試算には、アルケロス操業データおよび Cu 価格には LME price を使用し、捕収剤 100 g/t を Cleaner 2-2 工程に添加したときの年間の捕収剤添加コストの増加分と最終精鉱の Cu 実収率向上による収益増加分をそれぞれ算出し、プロジェクトの収益性について検討した。

(3) 試験結果

捕収剤 100 g/t 添加条件を適用することで、最終精鉱の Cu 品位が 0.4%、Cu 実収率が 2.1% 向上し、収益向上につながる可能性が示唆された。

10. 総括

アルケロスプロジェクトのカラム浮選工程での成績向上を目的に、AR 精鉱を使用したカラム浮選試験を実施し、ラボ試験におけるプラント成績の再現と、浮選成績向上策として着目した凝集浮選による成績向上について検証した。また、標本鉱物の凝集試験および機械式セルでの浮選試験、AR 精鉱の凝集試験および機械式セルでの浮選試験を実施し、標本鉱物を対象としたキャリア粒子添加条件における浮選成績予測モデルの構築、AR 精鉱を対象とした機械式セルでのバッチ式浮選および連続式のカラム浮選成績予測モデルをそれぞれ構築した。さらに、捕収剤 100 g/t 添加条件におけるアルケロス鉱山プラントシミュレーションによる収益試算を行った。本共同スタディの各章ごとの総括を以下に示す。

(1) 標本鉱物の付着量測定試験および機械式セルでの浮選試験

- ① 付着量測定試験により、キャリア粒子添加量と付着率の関係から付着率モデルを構築した。
- ② キャリア粒子添加率を付着率モデルに適用した浮選成績予測モデルにより、浮選試験結果を良好に再現できることが確認され、キャリア粒子添加条件における浮選成績予測モデルの構築および目標の回収率を達成するための最適なキャリア粒子添加率の予測が可能となったことが示唆された。

(2) AR 精鉱およびキャリア鉱石の試料調製

- ① 凝集試験および浮選試験で使用する AR 精鉱とキャリア鉱石を調製した。

(3) AR 精鉱の機械式セルでの浮選試験

- ① 捕収剤添加量条件により、捕収剤添加量の増加による凝集径および浮選速度定数 k の増大が確認された。
- ② パルプ濃度条件、キャリア添加条件については、凝集径の増大および Cu 実収率挙動にほとんど変化が見られなかった。

(4) AR 精鉱のカラムセルでの浮選試験

- ① アルケロスプラント設計値とカラム浮選試験結果とを比較したところ、設計値と同等な実収率が得られ、ラボカラム試験においても十分再現可能であることが示された。
- ② 捕収剤添加量の増加による凝集径、 k の増大が確認された。
- ③ パルプ濃度条件、キャリア添加条件については、明確な凝集径の増大、 k の増大は確認されなかった。
- ④ フロス層厚条件の結果から、フロス層内での粒度分布の存在、フロス層厚が厚くなるほど k が低下していく傾向を確認した。
- ⑤ MLA 分析による浮選挙動解析結果から、捕収剤添加条件を適用することで、微粒子の k の増大が確認された。一方で、キャリア粒子添加条件については、微粒子の浮選速度および実収率の増大は確認されなかった。

(5) 浮選成績予測モデルの検討

- ① D_{50} 凝集径の予測モデル、誘導時間 t_i の予測モデルを反映した機械式セルでのバッチ式浮選成績予測モデルを構築した。
- ② Froth zone での実収率 (R_f) を考慮した連続式のカラム浮選成績予測モデルを構築した。

(6) アルケロス鉱山プラントシミュレーションによる収益試算

- ① 捕収剤 100 g/t 添加条件を適用することで、最終精鉱の Cu 品位が 0.4%、Cu 実収率が 2.1%向上し、収益向上につながる可能性が示唆された。

11. 参考文献

Ref. 1 : Yoon, R.-H., 1993. Microbubble flotation. Miner. Eng. 6 (6), 619-630.

Ref. 2 : Wills, B. A., 2016. Will's Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK.

以上