

令和4年度現場ニーズ等に対する技術支援事業

カラムセルにおける微細銅鋳物の浮選挙動解析

成果報告書
(公開版)

令和5年3月10日

独立行政法人 エネルギー・金属鋳物資源機構

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
① 試料調製	2
② カラム浮選試験	2
3. 実施内容	2
(1) 標本鉱物の凝集試験	2
(2) カラム浮選試験における磨鉱粒度の影響検証	2
(3) カラム浮選試験における凝集促進条件による浮選成績向上の検討	2
(4) 浮選成績向上案の検証	2
4. 標本鉱物の凝集試験	3
(1) 目的	3
(2) 鉱石試料	3
(3) 試験方法	3
(4) 試験結果	3
5. カラム浮選試験における磨鉱粒度の影響検証	4
(1) 目的	4
(2) 鉱石試料	4
(3) 試験方法	4
① 磨鉱試験	4
② カラム浮選試験	4
(4) 試験結果	5
6. カラム浮選試験における凝集促進条件による浮選成績向上の検討	6
(1) 目的	6
(2) 鉱石試料	6
(3) 試験方法	6
① 磨鉱試験	6
② カラム浮選試験	6
(4) 試験結果	7
7. 浮選成績向上案の検証	8
(1) 目的	8
(2) 鉱石試料	8

①	プラント成績シミュレーションのための鉱石試料	8
②	HPGR 破砕供試鉱石	8
(3)	試験方法	8
①	プラント成績シミュレーション	8
②	HPGR 破砕	9
(4)	試験結果	10
①	プラント成績シミュレーション結果	10
②	HPGR 破砕試験結果	10
8.	総括	11
(1)	標本鉱物の凝集試験	11
(2)	カラム浮選試験における磨鉱粒度の影響検証	11
(3)	カラム浮選試験における凝集促進条件による浮選成績向上の検討	11
(4)	浮選成績向上案の検証	11

図表一覧

図 1	浮選成績シミュレーションに使用した浮選回路	9
表 1	カラム運転の基本条件一覧	4
表 2	カラム浮選試験設定条件一覧	4
表 3	運転条件一覧	6
表 4	カラム試験設定条件一覧	7
表 5	浮選成績シミュレーション用設定鉱物	9

1. 共同スタディの概要

(1) 共同スタディの目的

二次磨鉱後の微粒銅鉱石を対象に、カラムセルによる浮選挙動を解析するとともに、実操業時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

日鉄鉱業株式会社が進めるチリ国アルケロス鉱山開発プロジェクトでは、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”）に位置する地区を開発対象としている。本プロジェクトにおける対象鉱石は、10 μm 以下の微細銅鉱物を多く含有しており、銅鉱物の単体分離度を担保するためにボールミルによる磨鉱粒度の設定値も微粒となっている。さらに、精選の前工程である二次磨鉱の磨鉱粒度は $P_{80} = 20 \mu\text{m}$ と、他の一般的な銅鉱山と比較して非常に微粒に設定されており、浮選機もカラムセルを選択しているため、銅鉱物の浮遊性や浮選速度の低下が懸念される。そこで、二次磨鉱に供した微粒銅鉱石を対象としたカラムセルによる浮選試験を実施し、微細銅鉱物のカラムセルでの浮選挙動を解析するとともに、実収率・品位向上に有効な方策を見出す。

(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

b) 日本アイリッヒ株式会社 成田事業所

千葉県成田市吉岡 1210

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における二次磨鉱処理後の設定粒度は、 $P_{80} = 20 \mu\text{m}$ と非常に細かい。また次段の精選工程ではカラムセルを選定しており、品位向上は望めるものの銅鉱物の浮遊性や浮選速度の低下が懸念される。そこで、二次磨鉱粒度 $P_{80} = 20 \mu\text{m}$ 条件におけるカラムセルでの浮選成績の確認と、浮選成績向上策として、凝集浮選、キャリア浮選、磨鉱前処理（HPGR 破碎による単体分離度の向上）などの各手法における浮選結果を解析し、微細銅鉱物の実収率・品位向上効果について評価する。具体的には、以下に示す試験を実施する。

① 試料調製

カラム浮選試験用試料として、模擬銅鉱石試料を入手し、試料の元素分析、結晶相分析、MLA による鉱物組成分析を実施する。各種分析を行った後に、アルケロス鉱石の銅鉱物含有割合を模擬した鉱物組成に調合し、磨鉱粒度調製のための湿式磨鉱試験を実施する。また実鉱石試料が入手できた場合は、鉱物の単体分離度向上効果を有する HPGR 破碎機を用いて磨鉱前に破碎を行い、カラム浮選試験における単体分離度向上による浮選成績への影響を評価する。

② カラム浮選試験

上記の試料を用いて、ラボカラムセルによるカラム浮選試験を実施し、浮選挙動の解析を行う。以下に示す各条件を検討し、浮選成績を評価する。

- a) 二次磨鉱粒度（目標値）
 - ・ $P_{80} = 10, 20, 60 \mu\text{m}$
- b) 凝集浮選
 - ・ 捕収剤添加
 - ・ パルプ濃度
- c) キャリア浮選
 - ・ キャリア粒子添加

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) 標本鉱物の凝集試験
- (2) カラム浮選試験における磨鉱粒度の影響検証
- (3) カラム浮選試験における凝集促進条件による浮選成績向上の検討
- (4) 浮選成績向上案の検証

次項以降で、それぞれの試験結果について説明していく。

4. 標本鉍物の凝集試験

(1) 目的

アルケロス鉍石は、微細銅鉍物を多く含有している。したがって、微細銅鉍物の浮選成績を向上させる方法として凝集現象に着目し、凝集に影響を与える条件としてパルプ濃度の増加、攪拌強度の低下、疎水度（調整条件として捕収剤の添加量を選定）の増加に着目し、黄銅鉍の標本試料を用いた各条件の凝集試験を実施、粒度の変化について検討した。

(2) 鉍石試料

粒度分布の異なる黄銅鉍の標本試料 A および B を使用した。

(3) 試験方法

攪拌強度、パルプ濃度、捕収剤添加量の各条件における凝集径を測定するために、凝集試験を実施した。

(4) 試験結果

凝集試験結果より、微粒子の凝集を促進する条件として、捕収剤添加量の増加、パルプ濃度の増加、試料中の粗粒子割合の増加の 3 条件が有効であることが示された。

5. カラム浮選試験における磨鉱粒度の影響検証

(1) 目的

アルケロスプラント設計値磨鉱粒度 $P_{80} = 20 \mu\text{m}$ でのカラム浮選成績の確認、磨鉱粒度条件および凝集現象がカラム浮選成績に与える影響の検証を目的に、磨鉱粒度の異なる模擬銅精鉱試料 A を使用したカラム浮選試験を実施した。

(2) 鉱石試料

模擬銅精鉱試料 A をカラム試験に供した。

(3) 試験方法

① 磨鉱試験

模擬銅精鉱試料 A を目標粒度の $P_{80} = 10、20、60 \mu\text{m}$ に調製するために、縦型媒体攪拌式粉碎機（タワーミル）を使用した湿式磨鉱試験を日本アイリッヒ社に外注し、 $P_{80} = 6.5、21、58 \mu\text{m}$ の試料を作製した。

② カラム浮選試験

表 1 に示す運転条件のもと、所定の Feed 供給流量となるように Feed 供給ポンプのダイヤル値を設定し、カラム浮選試験を開始し、Conc・Tail・Feed 産物のサンプリングを行った。サンプリング後、表 2 に示すような Feed 供給流量に順次変更し、順次浮選試験・サンプリングを行った。

表 1 カラム運転の基本条件一覧

条件	単位	設定値
起泡剤（MIBC）添加量	[ppm]	30
捕収剤（AP3477）添加量	[g/t]	50
Feed 供給流量	[L/h]	所定値
塔底循環流量	[L/h]	5.0（固定）
Tail 抜き出し流量	[L/h]	自動 ^{*1}
パルプレベル（LS 値） ^{*2}	[cm]	21（65）
Air フロー	[L/min]	2.0
洗浄水量 ^{*3}	[mL/min]	0

※1 Feed 供給流量 : 12.4 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のパルプ水面までの高さ
LS 値 : レベルセンサーからのパルプ水面までの高さ

※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

表 2 カラム浮選試験設定条件一覧

検討条件		滞留時間 [min]	Feed 供給流量 [L/h]	Feed 固体流量 [kg/h]
磨鉱粒度 P_{80}	6.5 μm	85	4.08	0.31
		60	5.78	0.44
		30	11.6	0.89
		15	23.1	1.77
	21 μm	85	4.08	0.31

		60	5.78	0.44
		30	11.6	0.89
		15	23.1	1.77
	58 μm	85	4.08	0.31
		60	5.78	0.44
		30	11.6	0.89
		15	23.1	1.77

サンプリング後の産物は、産物重量を測定の後、化学分析および MLA 分析に供し、滞留時間ごとの Cu 実収率を算出した。各条件の実験値に対して、下式^{*1}に示す浮選速度式を最小二乗法によりフィッティングし、浮選速度定数 k および最大実収率 R_{max} の評価を実施した。

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

ここで、 R_{max} ：最大実収率 [%]、 k ：浮選速度定数 [min^{-1}]、 τ ：滞留時間 [min]を示す。また、MLA の結果から、表面露出率 100%粒子の粒度区分ごとの実収率を算出し、上式のフィッティングにより浮選速度定数 k および最大実収率 R_{max} を求め、下式^{*2}から算出した衝突確率のみを考慮した理論浮選速度定数と比較した。

$$k_i = n_b \times V_s \times P \quad \text{式 2}$$

(4) 試験結果

カラム試験の結果、ラボカラム浮選機の運転条件を設定することで、プラントの Cu 実収率を再現し得ることが確認できた。磨鉱粒度が $P_{80} = 58, 21, 6.5 \mu\text{m}$ と小さくなるほど、Cu 実収率、浮選速度ともに低下していく傾向が見られた。表面露出率 100%粒子の粒度区分ごとの浮選速度定数は、磨鉱粒度が小さいほど小さく、また衝突確率のみを考慮した理論浮選速度定数と比較して、大幅に小さい値であることが示された。この要因としては、表面酸化による付着確率の低下やフロス層での実収率の影響が考えられる。

6. カラム浮選試験における凝集促進条件による浮選成績向上の検討

(1) 目的

微粒子のカラム浮選成績向上を目的とし、目標磨鉱粒度 $P_{80} = 20 \mu\text{m}$ で試料調製した模擬銅精鉱試料 B に対して、凝集促進条件として、捕収剤添加量（疎水度）・パルプ濃度・粗粒子の添加（キャリア粒子の添加）の 3 条件におけるカラム浮選試験を実施した。

(2) 鉱石試料

模擬銅精鉱試料 B をカラム浮選試験に使用した。また、キャリア粒子として、5 章で用いた $P_{80} = 58 \mu\text{m}$ の模擬銅精鉱試料 A を使用した。

(3) 試験方法

① 磨鉱試験

模擬銅精鉱試料 B を、目標磨鉱粒度 $P_{80} = 20 \mu\text{m}$ に調製するために、縦型媒体攪拌式粉砕機（タワーミル）を使用した湿式磨鉱試験を、日本アイリッヒ社に外注した。

② カラム浮選試験

表 3 に示す運転条件のもとカラム浮選試験を実施した。また、凝集促進条件として、捕収剤添加量 200、350、500、1,000 g/t、パルプ濃度条件 10、20%、キャリア粒子添加条件 0.04、0.17 kg/L の計 8 条件を選定し、検討を行った（表 4）。

表 3 運転条件一覧

条件	単位	設定値
起泡剤（MIBC）添加量	[ppm]	30
捕収剤（AP3477）添加量	[g/t]	350
Feed 供給流量	[L/h]	所定値
塔底循環流量	[L/h]	5.0（固定）
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]	18（57）
Air フロー	[L/min]	2.0
洗浄水量 ^{※3}	[mL/min]	0

※1 Feed 供給流量 : 11.3 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のパルプ水面までの高さ
LS 値 : レベルセンサーからのパルプ水面までの高さ

※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

表4 カラム試験設定条件一覧

検討条件		滞留時間 [min]	Feed 供給流量 [L/h]	Feed 固体流量 [kg/h]
捕収剤 添加量	200 g/t	45	7.52	0.49
		30	11.3	0.74
		15	22.6	1.47
		5	67.7	4.42
	350 g/t	45	7.52	0.49
		30	11.3	0.74
		15	22.6	1.47
		5	67.7	4.42
	500 g/t	45	7.52	0.49
		30	11.3	0.74
		15	22.6	1.47
		5	67.7	4.42
	1,000 g/t	45	7.52	0.49
		30	11.3	0.74
		15	22.6	1.47
		5	67.7	4.42
パルプ濃度	10%	45	7.52	0.81
		30	11.3	1.22
		15	22.6	2.44
		5	67.7	7.31
	20%	45	7.52	1.77
		30	11.3	2.65
		15	22.6	5.31
		5	67.7	15.9
キャリア 粒子添加	0.04 kg/L	45	7.52	0.81
		30	11.3	1.22
		15	22.6	2.44
		5	67.7	7.31
	0.17 kg/L	45	7.52	1.77
		30	11.3	2.65
		15	22.6	5.31
		5	67.7	15.9

また、5章(3)②と同様に、浮選速度定数 k および最大実収率 R_{max} の評価、MLA分析による粒度区分、表面露出率区分ごとの浮選速度定数 k および最大実収率 R_{max} の評価を行った。

(4) 試験結果

凝集促進条件によるカラム浮選試験の結果、各条件で凝集径の増大が確認され、Cu 実収率の向上が示された。MLAの結果より、各凝集促進条件によって、粒径 $5\mu\text{m}$ 以下の粒子の実収率が増加する傾向が示され、微粒子の浮選成績が向上することが示唆された。

7. 浮選成績向上案の検証

(1) 目的

凝集促進条件の捕収剤添加条件とキャリア粒子添加条件において、該当するアルケロスプラントのカラム浮選工程に適用した場合の最終精鉱品位および実収率を評価するために、HSC シミュレータを使用したシミュレーションを実施した。また、上述以外の凝集促進条件として、HPGR 破碎による表面露出率の向上に着目し、アルケロス実鉱石への HPGR 破碎の有効性および表面露出率向上による浮選成績への影響についても検証した。

(2) 鉱石試料

① プラント成績シミュレーションのための鉱石試料

浮遊性の異なるアルケロス実鉱石 A、B、C に対して、浮選成績のシミュレーションを実施した。

② HPGR 破碎供試鉱石

アルケロス実鉱石 H を HPGR 破碎試験に使用した。

(3) 試験方法

① プラント成績シミュレーション

HSC Chemistry 10 (Metso:Outotec 社製) を使用し、アルケロスプラントでの浮選成績シミュレーションを実施した。シミュレーションに使用した浮選回路および設定鉱物とその組成を以下の図 1 および表 5 に示す。各鉱石で共通した代表銅鉱物 Bn、脈石成分 Cal および Qtz を仮定し、それぞれ構成鉱物とした。また、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) の実収率を算出した。それぞれの浮選時間 vs 実収率の結果に対して、式 3 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。

$$R(t) = \frac{m_f(1 - \exp(-k_f t)) + m_s(1 - \exp(-k_s t)) + m_n * 0}{m_f + m_s + m_n = 1} \quad \text{式 3}$$

ここで、 m_f は浮選速度が速い成分の分布率、 m_s は浮選速度が遅い成分の分布率、 m_n は浮上しない成分の分布率、 k_f は浮選速度が速い成分の浮選速度定数、 k_s は浮選速度が遅い成分の浮選速度定数をそれぞれ示す。また、凝集促進条件として、捕収剤添加量 350 g/t、1,000 g/t、キャリア粒子添加量 0.17 kg/L 条件を選定した。成績向上の評価方法については、Cleaner 4 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 に、6 章で求めた各条件での Rmax および k の値をそれぞれ適用し、シミュレーションを実施し、最終精鉱品位および実収率を比較することで評価した。

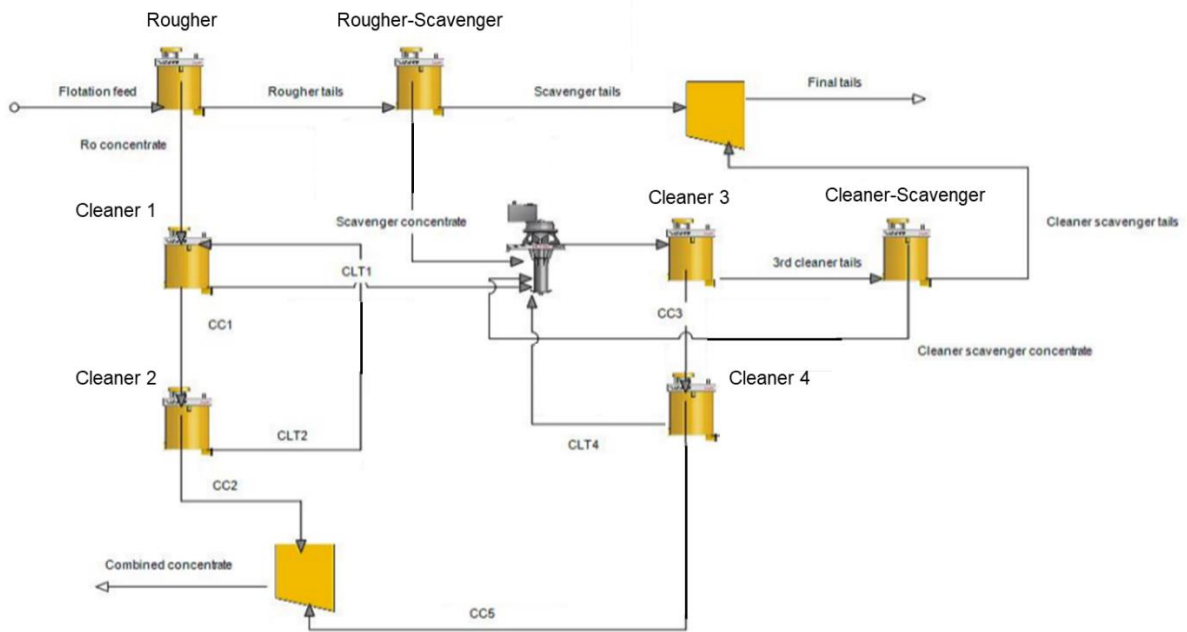


図1 浮選成績シミュレーションに使用した浮選回路

表5 浮選成績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

② HPGR 破碎

JOGMEC 殿より無償貸与いただいた HPGR 小型試験機を使用し、比破碎力 5 N/mm^2 に設定し、全量-1.7 mm となるように実鉱石 H の破碎試験を実施した。HPGR 破碎後の試料（HPGR 破碎試料）および比較としてジョークラッシャーで全量-1.7 mm となるように破碎した試料（JAW 破碎試料）を MLA 分析に供し、各試料の表面露出率の評価を行った。

(4) 試験結果

① プラント成績シミュレーション結果

シミュレーションの結果、キャリア粒子添加量 0.17 kg/L 条件での最終精鉱 Cu 品位が、各鉱石で 3~4%程度増加する傾向が確認された。

② HPGR 破碎試験結果

JAW 破碎試料、HPGR 破碎試料中の銅鉱物の表面露出率の MLA 分析の結果、HPGR 破碎により、銅鉱物の表面露出率が増加することが示された。また、破碎産物の MLA 分析の結果から、粒度区分および表面露出率区分ごとの銅鉱物の分布率を算出し、6 章の捕収剤 350 g/t 添加条件における各区分の浮選速度式に各分布率を積算し、それぞれを加算することで、JAW 破碎試料および HPGR 破碎試料の浮選挙動を求めた。その結果、HPGR 破碎試料の方が実収率が向上することが示された。

8. 総括

微粒銅鉛石を対象に、カラムセルでの浮選挙動を解析するとともに、実操業時の浮選成績向上につながる有望策を見出す目的のもと検討を行った。以下に本共同スタディの各章ごとの総括を示す。

(1) 標本鉛物の凝集試験

- ・ 黄銅鉛の標本試料を使用し、凝集促進条件としてパルプ濃度の増加、攪拌強度の低下、捕収剤添加量（疎水度）の増加に着目し、各条件下で凝集試験を実施した。
- ・ 凝集促進条件として、捕収剤添加量の増加、パルプ濃度の増加、試料中の粗粒子割合の増加の3条件が有効であることが示された。

(2) カラム浮選試験における磨鉛粒度の影響検証

- ・ 磨鉛粒度 $P_{80} = 6.5, 21, 58 \mu\text{m}$ 試料のカラム浮選挙動を確認した。
- ・ ラボカラム浮選機の運転条件の設定により、プラントの Cu 実収率を再現し得ることが確認できた。
- ・ 磨鉛粒度が $P_{80} = 58, 21, 6.5 \mu\text{m}$ と小さくなるほど、Cu 実収率および浮選速度も低下することが示された。
- ・ 表面酸化による付着確率の低下やフロス層での実収率の影響から、実験値から算出された浮選速度定数が理論浮選速度定数よりも大幅に小さい傾向が確認された。

(3) カラム浮選試験における凝集促進条件による浮選成績向上の検討

- ・ 凝集促進条件の捕収剤添加量、パルプ濃度、キャリア粒子添加の3条件について、 $P_{80} = 20 \mu\text{m}$ 試料のカラム浮選挙動を確認した。
- ・ 各条件で粒子の凝集による凝集径の増大および Cu 実収率の増大が確認され、浮選成績の向上が示された。
- ・ 粒径 $5 \mu\text{m}$ 以下の粒子の浮選挙動からは、各条件で実収率が向上し、微粒子の浮選成績が向上することが示された。

(4) 浮選成績向上案の検証

- ・ 捕収剤添加条件とキャリア粒子添加条件を、アルケロスプラントの該当するカラム浮選工程に適用した場合の最終精鉛品位および実収率のシミュレーションの実施および、アルケロス実鉛石への HPGR 破碎の有効性および表面露出率向上による浮選成績への影響について検証した。
- ・ キャリア粒子添加条件において、最終精鉛 Cu 品位の向上が確認された。
- ・ HPGR 破碎検証の結果、HPGR 破碎による銅鉛物の表面露出率の向上が確認され、浮選挙動シミュレーションの結果からは、実収率の向上が示された。

9. 参考文献

※1 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.

※2 Hornn, V., Ito, M., Yamazawa, R., Shimada, H., Tabelin, C. B., Jeon, S., Park, I., Hiroyoshi, N., 2020. Kinetic Analysis for Agglomeration-Flotation of Finely Ground Chalcopyrite: Comparison of First Order Kinetic Model and Experimental Result, Mater. Trans. 61, 10, 1940-1948.

以上