

令和4年度現場ニーズ等に対する技術支援事業

銅鉦山の尾鉦の資源化とヒ素除去への利用検討

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・金属鉦物資源機構  
日鉄鉦業株式会社



## 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
2.	共同スタディの内容	2
(1)	共同スタディの目的	2
(2)	PFS 製造の概要	2
①	PFS の概要	2
②	同時酸化法の概要	2
3.	銅浮選尾鉱の磁選	3
(1)	ラボ試験	3
①	目的	3
②	浮選尾鉱試料のキャラクタリゼーション	3
③	ラボ磁選試験手順	5
④	ラボ試験結果	6
(2)	パイロット試験	8
①	目的	8
②	試験手順	8
③	試験結果	9
(3)	分級試験	11
①	目的	11
②	供試試料	11
③	使用装置 (スラリースクリーナー) 概要	11
④	試験手順	11
⑤	試験結果	12
(4)	磁選に係るコスト試算	15
①	想定処理フロー	15
②	試算結果	15
4.	PFS 製造試験	16
(1)	ラボ試験 (磁選マグネタイトを用いた試験)	16
①	経緯・目的	16
②	ラボ試験概要	16
③	ラボ試験結果	16
④	ラボ試験まとめ	17
(2)	PFS 製造に関わるコスト試算	17
5.	総括	19

図表一覧

写真 1	GAP および磁石位置	9
図 1	篩分けによる粒度分布	3
図 2	各篩下の積算 T-Fe 品位	3
図 3	DavisTube 試験結果 (品位・実収率)	4
図 4	DavisTube 試験結果 (歩留まり・実収率)	5
図 5	磁選試験フロー (#1 および#2)	6
図 6	磁選試験フロー (#3～#7)	6
図 7	ラボ磁選試験まとめ	7
図 8	試験フロー概略	8
図 9	粒度分布	10
図 10	粒度分布測定結果	14
図 11	ラボ試験 試験手順	16
表 1	Davis Tube 試験結果	4
表 2	SALA 製小型磁選機諸元	5
表 3	磁選試験条件一覧	6
表 4	T-Fe およびマグネタイト品位分析	9
表 5	パイロット試験産物粒度分布	10
表 6	精鉱粒度別品位	11
表 7	分級試験条件一覧	12
表 8	産物重量測定結果	12
表 9	各試験条件における給鉱処理速度、および目的産物の生産速度	13
表 10	鉄・マグネタイト品位および密度測定結果	13
表 11	分級試験結果まとめ	14
表 12	各処理フローでの作業時間および生産量	15
表 13	コスト試算結果比較	15
表 14	原料分析値	16
表 15	ラボ試験 ろ過効率	16
表 16	ラボ試験 物質収支 (鉄成分)	17
表 17	コスト試算 マグネタイト単価	17
表 18	PFS 1t 製造あたりの費用比 (市販マグネタイトの製造費を 100 とする)	18

## 1. 共同スタディの概要

### (1) 共同スタディの目的

銅鉱山から発生する尾鉱からマグネタイト精鉱を回収し、ヒ素除去剤（ポリ硫酸第二鉄）の原料としての利用を検討する。

### (2) 共同スタディの概要

銅鉱山における銅鉱石の採掘の際、選鉱によって生じた尾鉱は廃滓ダムへと送られるが、鉱山の長期的な操業（廃滓ダムの延命）や環境保全の観点から、廃棄物量の削減や尾鉱の有効活用が望まれる。また、銅製錬所においては、銅精鉱由来のヒ素が含まれる酸排水が生じ、これらを安定な形態で除去することが求められている。

これら 2 つの課題解決に向けて本テーマ「銅鉱山の尾鉱の資源化とヒ素除去への利用検討」を提案する。

銅鉱石の尾鉱は、銅鉱物を回収するための破碎・磨鉱を経て単体分離されており、それぞれ単一の鉱物からなる混合粉の状態となっている。このため、尾鉱に含まれる有価鉱物を回収する場合には追加的な破碎・磨鉱のコストをかけずに選別することが可能と考えられる。通常廃棄される尾鉱から有価鉱物を回収できれば、有価鉱物売却による収益改善や、廃棄物削減による鉱山の操業費削減に寄与できるという意義がある。

有価鉱物の 1 つとして、マグネタイトが挙げられる。マグネタイトは磁力選鉱によって選別可能であり、単体分離されている尾鉱からのマグネタイト回収は通常のマグネタイト採掘よりも安価に実施できると考えられる。このようにして得られたマグネタイト精鉱はポリ硫酸第二鉄（以下、PFS）の原料として使用することが期待される。

PFS は排水処理に使用される、鉄と硫酸からなる無機凝集剤であり、日本国内では主に硫酸第一鉄を原料として製造され、下水や工場排水の汚水の沈降分離や COD・BOD 除去、汚泥脱水などに使用されている。また、銅製錬所から排出される廃酸には、銅鉱石に含まれていたヒ素が多く溶出しており、PFS はこれらのヒ素を鉄との化合物として処理するための鉄源として使用することができる。

マグネタイトを PFS 製造の原料として考えた場合、天然のマグネタイト精鉱が候補に挙げられるが、その価格は PFS のコストに大きく影響する。そこで、銅鉱石由来の尾鉱を磁選して得られたマグネタイト精鉱を使用することができれば、PFS の製造コストを抑えることができる可能性がある。また、鉱山由来の原料を用いて PFS が製造できれば、銅鉱山に併設する製錬所等の廃酸・排水処理に利用することができる。

近年、弊社ではマグネタイトを原料に高温高圧条件下で、現在行われている製造方法より、さらに効率的な PFS 製造技術を開発している。今回、銅鉱山の尾鉱を磁選して得られるマグネタイト精鉱を用いて本技術を利用した PFS 製造を行い、尾鉱の活用について検討を行う。

## 2. 共同スタディの内容

### (1) 共同スタディの目的

チリ国所在の銅鉱山の浮選尾鉱中に 8 wt.%～10 wt.%程度含まれるマグネタイトを、弊社開発の製法で PFS の原料として再資源化することができるか検証する。

### (2) PFS 製造の概要

#### ① PFS の概要

PFS (ポリ硫酸第二鉄 : Poly-Ferric Sulfate) は鉄と硫酸の化合物からなる鉄系の凝集剤であり、赤褐色の液体である。化学式は $[\text{Fe}_2(\text{OH})_n(\text{SO}_4)_{3-n/2}]_m$ で表される ( $0 < n \leq 2$ ,  $m$  は自然数)。PFS は一般的に三価の鉄イオン ( $\text{Fe}^{3+}$ ) を 11 wt.%以上含み、原料に含まれる  $\text{Fe}^{2+}$ は製造工程ですべて  $\text{Fe}^{3+}$ に酸化される (以降、本報告書では特別な指定がない限り “wt.%” を “%” として示す)。

#### ② 同時酸化法の概要

マグネタイトを原料とした PFS の製造工程は主に下記の 3 つに分けられる。

- ・マグネタイトを高温高圧下で硫酸に溶解させる溶解工程
- ・溶解液から不純物や未溶解の残渣を取り除くろ過工程
- ・マグネタイトに含まれている  $\text{Fe}^{2+}$ を  $\text{Fe}^{3+}$ に酸化する酸化工程

同時酸化法は、原料の溶解時に酸化剤 (酸化剤 A とする) を使用することで溶解と  $\text{Fe}^{2+}$ の酸化を同時に行う方法である。同法で PFS を製造できれば、3 つの工程を 2 つに省略することができ、製造設備の簡略化、製造時間の短縮および安価な酸化剤利用による低コスト化が期待される。

### 3. 銅浮選尾鉱の磁選

#### (1) ラボ試験

##### ① 目的

浮選尾鉱試料に対し各種キャラクタリゼーション試験およびラボでの磁選試験を実施し、パイロット試験のフローを決定するためのデータを取得する。

##### ② 浮選尾鉱試料のキャラクタリゼーション

##### a) 鉄品位分析

化学分析および VSM による磁化測定の結果、T-Fe12.4%、磁鉄鉱品位 8.3%であった。

数式 1 マグネタイト品位の計算式

$$\text{Mgt(wt.\%)} = \text{試料の飽和磁化値} / \text{マグネタイトの飽和磁化理論値} \times 100$$

(マグネタイト飽和磁化理論値 : 92 emu/g)

##### b) 粒度分布

篩（目開き : 180 μm、106 μm、75 μm、53 μm、38 μm、20 μm）を用いてふるい分け、粒度分布測定を行った。ふるい分けた試料はそれぞれ鉄品位を分析し、粒群ごとの鉄の分布を確認した。図 1 には浮選尾鉱の粒度分布を、図 2 には粒度ごとの鉄品位を図示する。尾鉱試料の粒度は P<sub>80</sub> = 194 μm であり、鉄は細粒な粒子に濃集していることが明らかとなった。

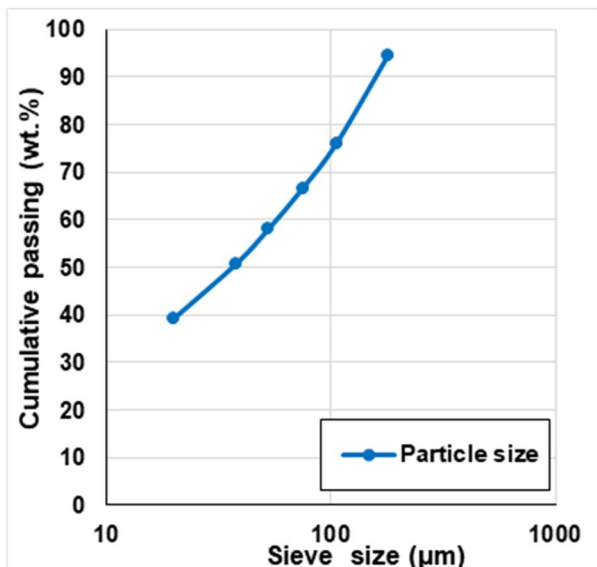


図 1 篩分けによる粒度分布

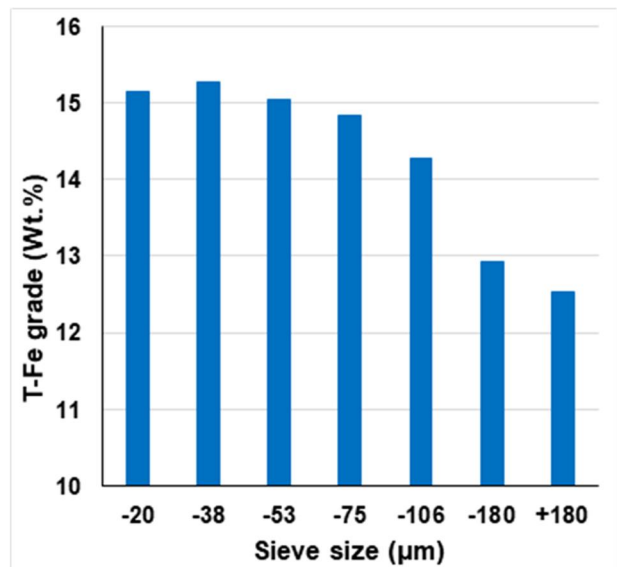


図 2 各篩下の積算 T-Fe 品位

##### c) 鉱物組成

Mineral Liberation Analyzer (MLA) により鉱物組成分析を行ったところ、マグネタイト品位は 8.2%となり、VSM による測定結果と良く一致した。

d) Davis Tube 試験

Davis tube を用いて試験を実施した。浮選尾鉱試料に対して、それぞれ 600 G、800 G、1200 G、4000 G の磁界強度を与え、着磁物と非着磁物に分離した。試験産物は乾燥後、秤量および飽和磁化測定を行い評価した。試験結果を表 1 に、試験結果から計算された品位・実収率および歩留まり・実収率グラフをそれぞれ図 3 および図 4 に示す。

800 G までは磁界強度の低下とともにマグネタイトの品位は上昇し、実収率は低下する傾向が見られた。ただし 600 G まで低下させた場合には精鉱の品位は上がらず、実収率のみが低下する結果となった。この結果から、磁選精鉱のマグネタイト品位は最高でも 65%（鉄品位 50%程度）に留まり、この時の鉄実収率は 50%程度となることが予想される。

表 1 Davis Tube 試験結果

磁界強度(G)	着磁側		非着磁側		歩留まり(%)	Fe 実収率(%)
	重量(g)	Mgt(%)	重量(g)	Mgt(%)		
600	0.07	62.0	19.4	8.1	0.4	2.7
800	1.27	65.2	17.9	4.0	6.6	53.9
1200	2.32	53.6	17.2	1.9	11.9	78.9
4000	2.8	45.8	16.3	1.6	14.7	83.3

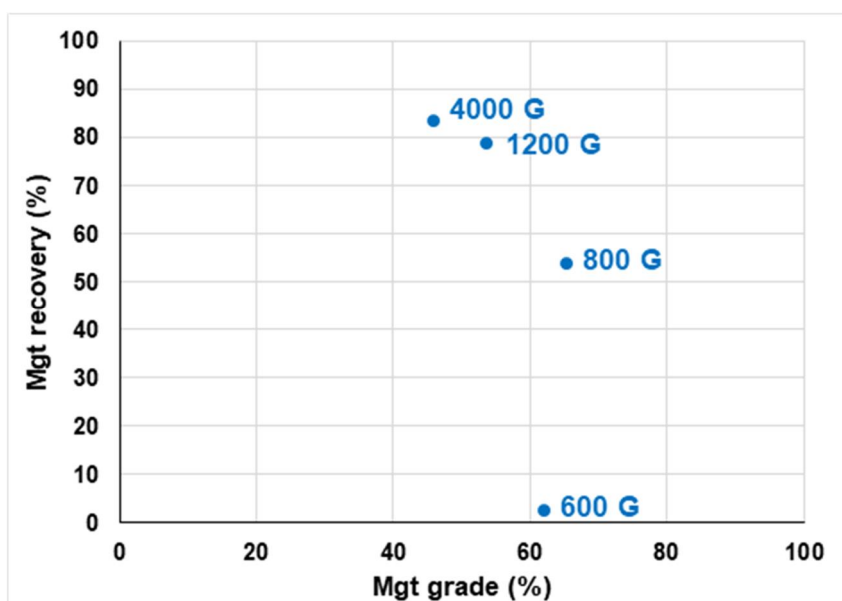


図 3 DavisTube 試験結果 (品位・実収率)



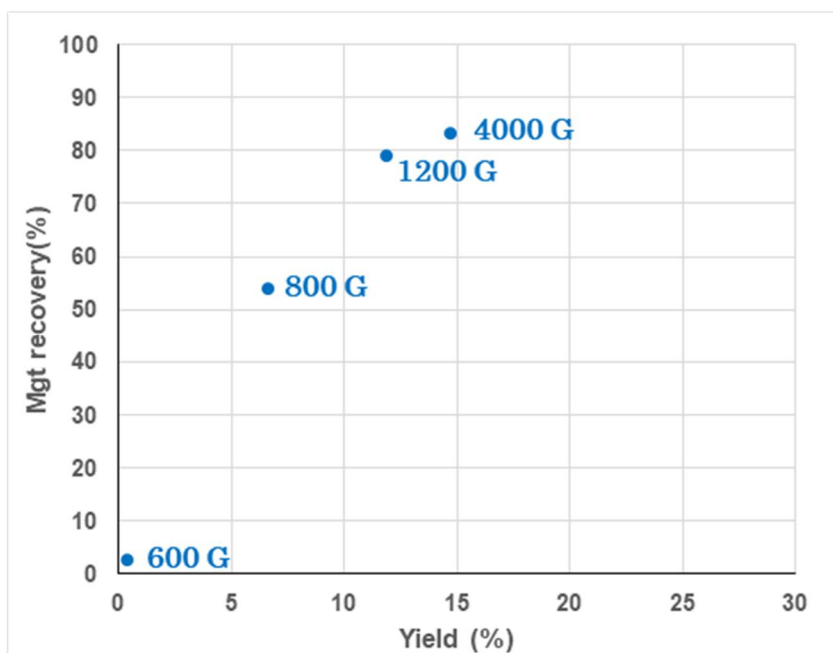


図 4 DavisTube 試験結果 (歩留まり・実収率)

### ③ ラボ磁選試験手順

#### a) 磁選機

ラボ試験は SALA 製小型磁選機を用いて実施された。磁選機の諸元を表 2 に記す。ガウスメーターを用いてドラム表面の磁界強度を測定したところ、磁界強度は最大で 1000 G であることがわかった。以下、本稿では、ガウスメーターにより実測した最大の磁界強度を磁選試験時の磁界強度とする。

表 2 SALA 製小型磁選機諸元

磁気ドラム	直径 200 mm×幅 100 mm
磁極数	3 極
磁気ドラム回転速度	23 rpm
パルプ給鉱量	2.0 L/min
精鉱洗浄水量	2.5 L/min

#### b) 試験条件

当初パイロット試験では粗選 + 精選 (複数段) ± 分級のフローを想定していた。そこで、粗選 + 精選 (3 段) + 分級のフローでラボ試験を実施し、磁選のみで得られた鉄精鉱の品位および精鉱の分級による品位向上について検証を行った (#1 および #2)。

その後、パイロット試験で精選を実施するにあたって必要となる攪拌槽の手配が難航したことから、パイロット試験は粗選 + 分級 (国内) のフローで実施することとなり、その予察としては粗選 + 分級のフローにてラボ試験を実施した (#3~#7)。各試験間でパルプ濃度および磁選機の磁界強度を変化させている。試験条件一覧を表 3 に、試験のフロー図を図 5 および図 6 に示す。

試験産物は 80°C~90°C に設定した乾燥機で乾燥後、秤量し記録した。回収した各産物に対して、鉄品位の分析を実施した。また、中間産物の重量および品位を計算により求めた。

試験結果の評価については、浮選尾鉱の供給量 (固形分 240 t/h) に対して PFS 原料とし

て必要となる精鉱の量（製造 1 回あたり 7t）がわずかであるため、本検討では実収率よりも精鉱品位を重視した。

表 3 磁選試験条件一覧

試験	粗選		精選①		精選②		精選③		分級 ( $\mu\text{m}$ )
	磁界 強度(G)	パルプ 濃度(%)	磁界 強度(G)	パルプ 濃度(%)	磁界 強度(G)	パルプ 濃度(%)	磁界 強度(G)	パルプ 濃度(%)	
#1	1000	7	1000	2~3	1000	2~3	1000	2~3	38,53,75
#2	1000	35	1000	20	750	20	590	20	38,53,75
#3	1000	35	-	-	-	-	-	-	75
#4	1000	20	-	-	-	-	-	-	75
#5	1000	10	-	-	-	-	-	-	75
#6	750	20	-	-	-	-	-	-	75
#7	750	10	-	-	-	-	-	-	75

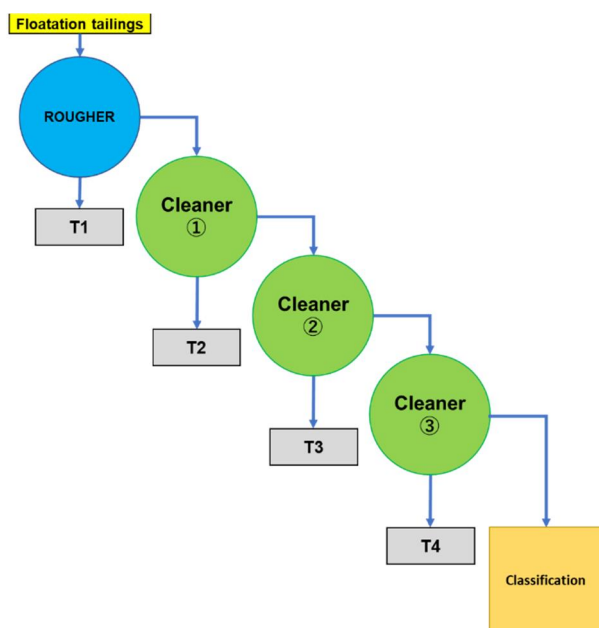


図 5 磁選試験フロー（#1 および#2）

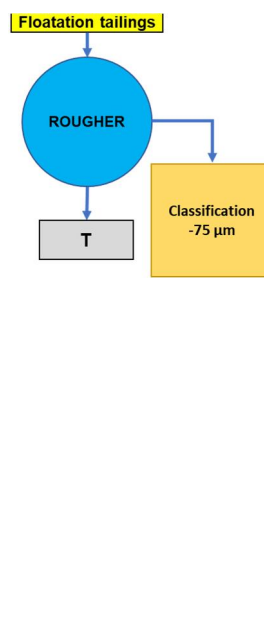


図 6 磁選試験フロー（#3~#7）

#### ④ ラボ試験結果

ラボ試験の結果を図 7 にまとめる。目標の品位（T-Fe 60%~65%）の精鉱を得るには粗選+精選+分級のフローを経る必要があり、その際の精鉱歩留まりは 7%程度となることが明らかになった。また、磁界強度やパルプ濃度を低下させることによる品位向上の効果は限定的であることもわかった。

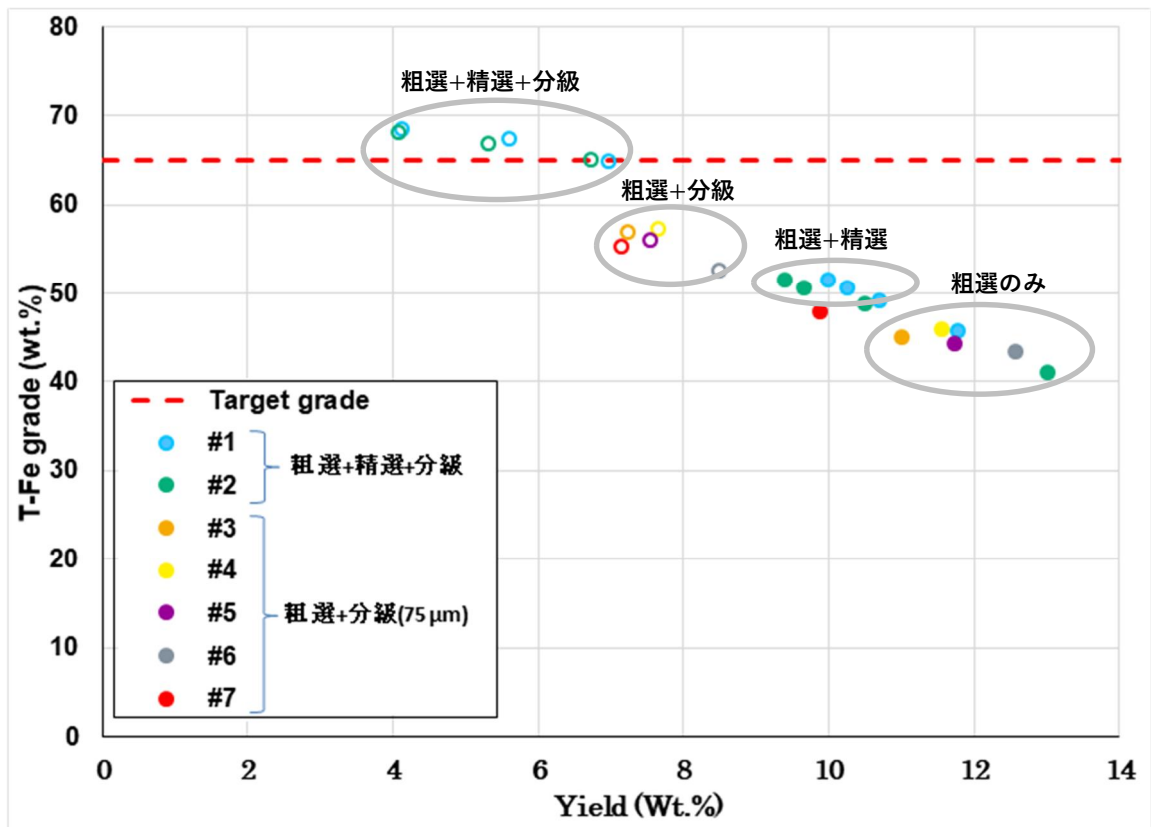


図 7 ラボ磁選試験まとめ  
 ※白抜きは分級後の値を示している。

## (2) パイロット試験

### ① 目的

パイロットスケールの磁選試験を実施し、PFS 製造試験に供すべく精鉱を調製するとともに、磁選に係るコストを試算するためのデータを取得する。

### ② 試験手順

#### a) 処理フロー

試験フローの概略を図 8 に示す。パイロット試験に先立ち実施されたラボ磁選試験では、粗選 1 段+精選 3 段+分級 (-75  $\mu\text{m}$ ) のフローで鉄品位 65% の鉄精鉱が得られることが確認されたが、粗選精鉱を貯める攪拌槽および分級装置の手配が難航したことから、現地での試験は粗選 1 段のみのフローでの実施となった。浮選尾鉱は尾鉱タンクから抜き出し、希釈コンテナにてパルプ濃度 25% 程度まで希釈した後、ポンプで約 500 L/min の流量で磁選機に供給された。精鉱はコンテナに設置したフレコンで回収され、尾鉱はポンプで尾鉱シクナーに送られた。

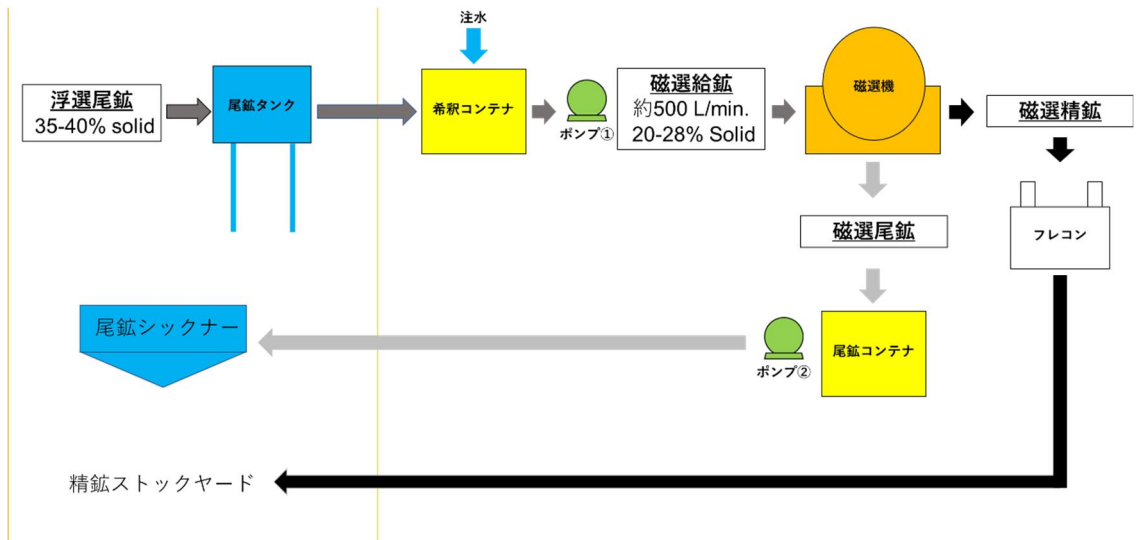


図 8 試験フロー概略

#### b) 磁選機仕様・運転条件

磁選機の仕様および運転条件を以下に記す。

- 磁選機 Eriez CDA 48" x 16"
- ドラム径 48 インチ (122 cm)、ドラム幅 16 インチ (40.6 cm)
- 磁界強度 750 G
- ドラム回転数 40-50 rpm
- GAP および磁石位置 写真 1 の通り (GAP は最大に設定)
- 給鉱量 500 L/min~550 L/min

※GAP とは磁選機の底からドラムまでの高さを指す。GAP を広げることで、品位の上昇および実収率の低下が見込まれる。



写真 1 GAP および磁石位置

c) サンプリング

試験産物として、精鉱 150kg および給鉱・尾鉱各 20kg をサンプリングした。精鉱は乾燥後にストックヤードから分取し、給鉱および尾鉱は運転中のパルプを直接容器で採取した。パルプとして採取された給鉱および尾鉱は、現地のラボにて加圧脱水および乾燥後に当社研究開発センターへ輸送した。

d) 試料調製および分析

輸送した試料は当社研究開発センターにて解砕および縮分後、鉄および飽和磁化測定によるマグネタイトの品位分析に加えて、篩分けによる粒度分布測定およびピクノメーター法による真比重測定に供した。各種分析条件は、(1)②と同様である。

③ 試験結果

a) 品位分析結果

鉄およびマグネタイト品位の測定結果を表 4 に示す。比較としてラボ試験 (#3) 産物の品位を示す。給鉱および尾鉱の品位はラボ試験結果との乖離が見られた。

表 4 T-Fe およびマグネタイト品位分析

	パイロット試験		ラボ試験 (#3)
	T-Fe	マグネタイト	T-Fe
Feed	19.7%	14.3%	11.7%
Conc.	41.7%	46.8%	45.0%
Tail	13.9%	6.2%	7.57%

b) 粒度分布測定結果

各試験産物について篩分け試験による粒度分布測定を実施した。結果を表 5 および図 9 に示す。図 9 には比較のため、ラボ試験給鉱試料およびラボ試験精鉱 (#3) の粒度を示す。パイロット試験では、ラボと比較してやや粗い精鉱が得られた。

表 5 パイロット試験産物粒度分布

粒径 ( $\mu\text{m}$ )	給鉱		精鉱		尾鉱	
	重量(g)	積算重量(%)	重量(g)	積算重量(%)	重量(g)	積算重量(%)
+250	2.8	100	9.6	100	14.2	100
-250+180	5.9	97	8.7	91	9.4	86
-180+106	12.7	91	16.3	83	13.6	76
-106+75	9.7	79	12.4	68	8.2	63
-75+53	9.1	69	12.8	56	7.1	55
-53+38	8.0	60	12.1	44	6.1	48
-38+20	12.2	52	13.8	33	8.5	41
-20	39.5	40	21.1	20	32.9	33

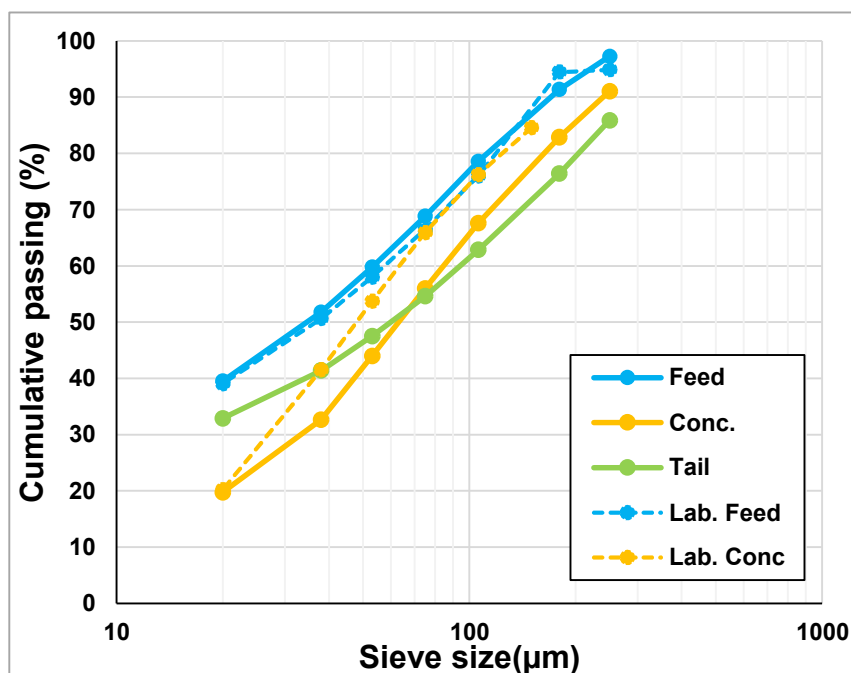


図 9 粒度分布

c) 粒度別品位 (精鉱)

精鉱の粒度ごとの T-Fe 品位およびマグネタイト品位を表 6 に示す。精鉱は-53  $\mu\text{m}$  や-75  $\mu\text{m}$  に分級することで、T-Fe 品位 55%前後の産物が得られる。さらなる品位向上には精選工程を加える必要がある。

表 6 精鉱粒度別品位

粒径 ( $\mu\text{m}$ )	T-Fe			マグネタイト (VSM)		
	品位(%)	積算品位(%)	分布(%)	品位(%)	積算品位(%)	分布(%)
+250	16.5	42.1	3.5	10.8	50.0	1.9
-250+180	16.6	44.6	3.2	15.0	53.8	2.4
-180+106	28.0	47.4	10.1	24.7	57.7	7.5
-106+75	37.8	51.8	10.4	46.9	65.1	10.9
-75+53	51.7	54.7	14.7	65.0	68.9	15.6
-53+38	57.1	55.5	15.4	73.3	69.9	16.6
-38+20	59.8	54.9	18.4	77.7	68.8	20.1
-20	51.7	51.7	24.3	62.9	62.9	24.9

### (3) 分級試験

#### ① 目的

パイロット試験で調製したマグネタイト精鉱の品位向上およびアコージャパン株式会社の分級機であるスラリースクリーナー性能評価を行う。

#### ② 供試試料

パイロット試験で調製したマグネタイト精鉱を使用した。マグネタイト精鉱の各種分析結果については、(2)③を参照されたい。

#### ③ 使用装置 (スラリースクリーナー) 概要

スラリースクリーナーは湿式の連続式分級機であり、パイロット試験で使用した磁選機と同時に使用できる処理速度を持つことから、実際に PFS 用マグネタイトの商業生産を行う際の分級機の候補となりうるものである。スラリースクリーナーの諸元を以下に記す。

- スラリースクリーナー SS170-500K
- 概略外形寸法 :  $\phi 350 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$
- スクリーン寸法 :  $\phi 170 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 2 \text{ 枚}$

#### ④ 試験手順

##### a) スラリースクリーナー運転条件

分級試験では表 7 に示す 4 つの条件で運転を行った。

表 7 分級試験条件一覧

Test No.	目開き ( $\mu\text{m}$ )	回転数 (rpm)	傾き ( $^{\circ}$ )	固体濃度 (wt%)	試験時間	スラリー重量 (kg)	処理速度 (kg/min)
1	48	300	5	20	13分10秒	157	11.9
2	48	300	5	20	1分23秒	154	111.6
3-1	48	300	5	20	22分24秒	320	14.3
3-2	11	300-360	8	20	136分55秒	259	1.9

## b) 産物回収

試験終了後、産物スラリーの重量を測定した。また、スクリーン上に残った試料は分けて回収を行った。試験終了翌日にはスラリーの上澄み水を抜き取り、残りを当社研究開発センター宛てに送付した。受領した産物（網残試料含む）は、上澄み水の抜き取りもしくはろ過により脱水した後に、110 $^{\circ}\text{C}$ の乾燥機で乾燥させ、固体重量を測定した。

乾燥後の産物は、次項の各種分析用に縮分を行った。網残試料は、重量測定のみ別で行った後、網上産物と混合して縮分した。

## c) 各種分析

縮分した産物試料に対して、鉄およびマグネタイトの品位分析に加えて、篩分けによる粒度分布測定およびピクノメーター法による真比重測定を実施した。各種分析条件は、(1)②と同様である。

## ⑤ 試験結果

## a) 乾燥重量測定結果

各試験の産物重量の測定結果と、そこから計算で求めたスラリーの固体濃度を表 8 に示す。また、試験時間と産物回収量より時間当たりの給鉱処理速度と産物生産速度について計算した結果を表 9 に示す。

表 8 産物重量測定結果

Test No.	産物名	スラリー重量 (kg)	乾燥重量 (kg)	固体濃度 (%)
1	+48 $\mu\text{m}$	25	19.4	77.6
	-48 $\mu\text{m}$	132	10.9	8.3
	合計	157	30.3	19.2
2	+48 $\mu\text{m}$	77	25.3 (網残 1.5*)	32.9
	-48 $\mu\text{m}$	77	6.0	7.8
	合計	154	31.2	20.3
3	+48 $\mu\text{m}$	58	44.1 (網残 3.6*)	76.0
	-48+11 $\mu\text{m}$	23	13.6 (網残 1.1*)	59.1
	-11 $\mu\text{m}$	239	6.5	2.7
	合計	320	64.1	20.0

\*網残試料重量は内数



表 9 各試験条件における給鉱処理速度、および目的産物の生産速度

Test No.	目的産物名	給鉱処理速度		産物生産速度		歩留まり (%)
		(kg/min)	(kg/h)	(kg/min)	(kg/h)	
1	-48 μm	2.3	138	0.82	49	35.9
2	-48 μm	22.6	1350	4.3	258	19.0
3-2	-48+11 μm	0.15	8.8	0.10	6.0	67.8

b) 品位・密度測定結果

鉄とマグネタイトの品位分析結果、および密度測定結果を表 10 に示す。No.3 の+48 μm の試料については、乾燥重量のみを測定し計算に必要な鉄・マグネタイト品位は No.1 の値を用いた。

表 10 鉄・マグネタイト品位および密度測定結果

Test No.	産物名	重量分布 (%)	T-Fe (%)	Fe分布(%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	Mgt.濃度 (%)
1	+48 μm	64.1	33.1	52.0	3.46	38.1
	-48 μm	35.9	54.7	48.0	4.25	69.4
	合計	100	40.8	100	---	49.4
2	+48 μm	81.0	38.1	74.2	3.61	46.1
	-48 μm	19.0	56.2	25.8	4.29	70.4
	合計	100	41.5	100	---	50.8
3	+48 μm	68.7	33.1 <sup>(1)</sup>	57.2 <sup>(2)</sup>	---	38.1 <sup>(1)</sup>
	-48+11 μm	21.2	58.4	31.2 <sup>(2)</sup>	4.42	75.5
	-11 μm	10.1	45.8	11.6 <sup>(2)</sup>	3.88	54.5
	合計	100	54.3	100	---	47.7 <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> No.1 +48 μm の数値

<sup>(2)</sup> (1)の値を利用して計算

c) 粒度分布測定結果

粒度分布の測定結果を図 10 に示す。

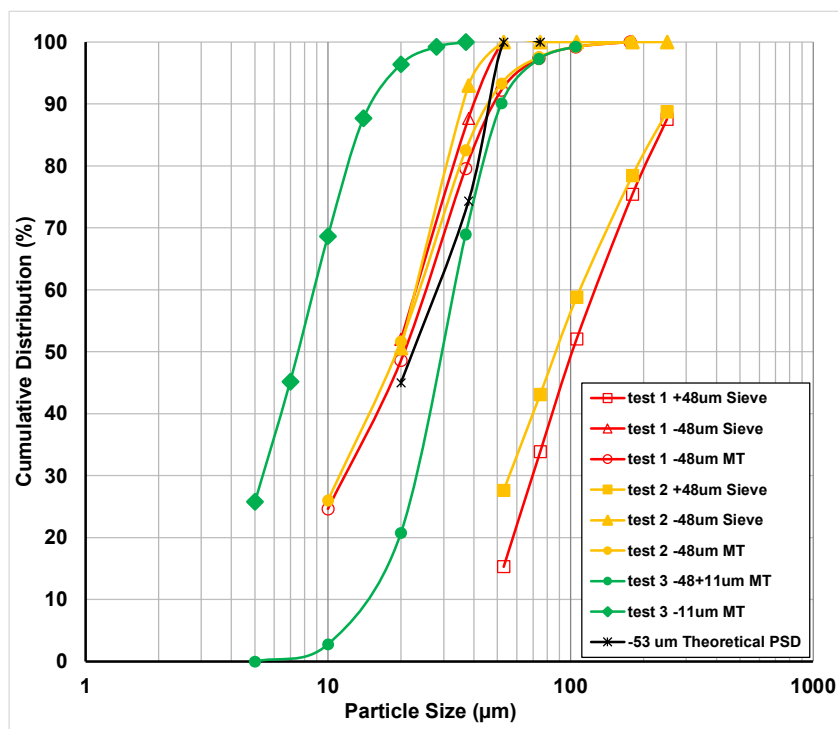


図 10 粒度分布測定結果

d) 試験結果まとめ

目的産物に関する数値をまとめると、表 11 のようになる。Test No.1 と No.2 の結果より、目開き 48  $\mu\text{m}$  のスクリーンを使用することで、鉄品位約 55%の産物が得られ、給鉱流量を 1350 kg/h まで増加させても鉄品位の低下は見られないことがわかった。また、産物粒度に関しても給鉱流量による差は見られなかった。給鉱流量の増大によって歩留まりは低下したが、産物の生産速度としては約 5 倍 (49→258 kg/h) に向上した。

また、No.3 の結果より、-48  $\mu\text{m}$  の試料をさらに 11  $\mu\text{m}$  のスクリーンで処理することで、約 58%まで品位を上げることができ、この時の産物流量は 6.0 kg/h であった。従って、11  $\mu\text{m}$  スクリーンによる微粒子の除去は、鉄品位向上には役立つものの、処理量を減少させてしまうことがわかった。

表 11 分級試験結果まとめ

Test No.	目的産物名	給鉱処理速度 (kg/h)	産物生産速度 (kg/h)	歩留まり (%)	T-Fe (%)
1	-48 $\mu\text{m}$	138	49	35.9	54.7
2	-48 $\mu\text{m}$	1350	258	19.0	56.2
3-2	-48+11 $\mu\text{m}$	8.8	6.0	21.2*	58.4

\*No.3-1 の全給鉱量を 100 とする

#### (4) 磁選に係るコスト試算

市販しているマグネタイト（以下、市販マグネタイトとする、T-Fe 67%）を 1000 t 用いて PFS を製造するとする。コストを比較するには精鉱の重量ではなく、精鉱に含まれる鉄重量当たりの価格を比べる必要がある。市販のマグネタイト精鉱は 1000 t に 670 t の鉄が含まれることになる。そこで鉄換算で年間 670 t に相当するマグネタイト精鉱を生産する処理フローを仮定し、鉄換算で 670 kg（市販マグネタイト 1 t に相当）のマグネタイト精鉱の生産に係るコストを試算した。操業年数は 5 年とした。

##### ① 想定処理フロー

マグネタイト精鉱の生産フローとして、(i)粗選のみ、(ii)粗選+分級、(iii)粗選+分級+精選の 3 つを設定し、それぞれでコストを試算した。粗選および分級による歩留まり・精鉱品位は、パイロット試験およびアコージャパンでの分級試験の結果に基づく。ここで、粗選における歩留まりは、12.1%の値を採用した。また、分級後の精選試験は未実施であるため、ラボ試験の結果から歩留まり 90%、精鉱品位 60%と仮定した。

表 12 各処理フローでの操業時間および生産量

	固体処理量 (t/h)	歩留まり (%)	操業時間 (h/y)	精鉱生産量 (t/y)	精鉱品位 (T-Fe %)	T-Fe 換算 生産量(t/y)
(i)粗選のみ	9.2	12.1	1440	1595	42	670
(ii)粗選+分級	12.7	2.42	3960	1218	55	670
(iii)粗選+分級+精選	12.9	2.18	3960	1117	60	670

##### ② 試算結果

今回試算した(i)、(ii)および(iii)のフローでは、精鉱品位はいずれも 60%以下となる。市販マグネタイトは 1 t あたり 670 kg の鉄が含まれる。ここでは、鉄量換算 670 kg の精鉱を生産するのに係る価格を試算して、比較することとした。その際の各フローにおける精鉱の重量は、表 12 の通りである。試算の結果を表 13 に示す。

いずれのフローにおいても市販マグネタイト（380 US\$/t）と比較してコストの優位性が認められた。ただし(ii)および(iii)のフローではスクリーンの耐久性にコストが大きく左右される。ここでは 72 時間ごとにスクリーンを交換すると仮定しているが、スクリーンの交換が 1 週間（168 時間）に一度であった場合は、約 20 US\$のコストダウンとなる。

表 13 コスト試算結果比較

	(i)粗選のみ(US\$)	(ii)粗選+分級(US\$)	(iii)粗選+分級+精選 (US\$)
減価償却費	29.7	60.0	77.4
機器類操業費	4.9	53.0	61.0
労務費	9.7	26.6	26.6
輸送費	31.9	24.4	22.3
計	<b>76.2</b>	<b>163.9</b>	<b>187.3</b>

#### 4. PFS 製造試験

##### (1) ラボ試験（磁選マグネタイトを用いた試験）

###### ① 経緯・目的

ラボスケール（～20 L）で磁選マグネタイトを用いた PFS 製造試験を実施し、磁選マグネタイトの特長（原料の溶解性、残渣発生量、残渣性状）を確認する。

###### ② ラボ試験概要

###### a) 原料分析値

ラボ試験では市販マグネタイトと、尾鉱由来のマグネタイトを用いた。尾鉱由来のマグネタイトは磁選パイロット試験（3(2)参照）で得られた尾鉱を粗選して得られたマグネタイト精鉱（粗選マグネタイト）と分級試験（3(3)参照）で得られた粗選精鉱を分級（-48 $\mu$ m）したマグネタイト精鉱（分級マグネタイト）の2種類を用いた。各原料の分析値を表 14 に示す。

表 14 原料分析値

	市販マグネタイト	粗選マグネタイト	分級マグネタイト
T-Fe (%)	67	42	55
粒径 D <sub>50</sub> ( $\mu$ m)	32.1 <sup>(1)</sup>	63.0 <sup>(2)</sup>	20.7 <sup>(1)</sup>

①ふるい分け試験から算出 ②レーザー式粒度分布測定から算出

###### b) 試験手順

図 11 に PFS 製造試験の試験手順を示す。

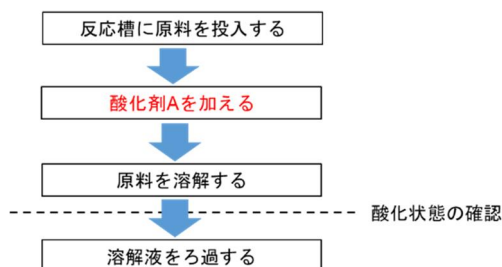


図 11 ラボ試験 試験手順

###### ③ ラボ試験結果

###### a) 製造効率

ろ過後の溶解液を 500 ml 分取し、ブフナー漏斗を用いて吸引ろ過を行った。ろ過残渣は水で洗浄し、その重量を計測した。ろ過した反応溶液全量に対するろ過残渣(dry)の重量の割合をろ過残渣回収率として計算した。表 15 に各試験のろ過時間、ろ過残渣回収率を示す。

表 15 ラボ試験 ろ過効率

PFS 原料	市販マグネタイト	粗選マグネタイト	分級マグネタイト
ろ過時間(sec/g)	2.3	1.9	8.3
ろ過残渣回収率(dry) (%)	4.3	14.3	8.3

粗選マグネタイトを用いた試験では市販マグネタイトを用いた試験よりもろ過時間が短い結果となった。ろ過残渣には 1 mm 程度の砂粒が見られ、これらの粗粒子がろ過助剤の役割を果たしたと考えられる。

一方、分級マグネタイトを用いた試験では市販マグネタイトを用いた試験よりもろ過時間が約 4 倍長くなった。分級マグネタイトは分級によって 48 μm 以上の粗粒子が取り除かれており、細粒子がろ紙を目詰まりさせたことがろ過長時間化の原因と考えられる。

#### b) 尾鉱由来のマグネタイト原料の溶解性

尾鉱由来のマグネタイト原料の溶解性を比較するため、原料に含まれる鉄成分とサンプルに含まれる鉄成分の比較を行った。原料の T-Fe 濃度がすべてマグネタイト由来であると仮定すると、純粋なマグネタイトの鉄濃度の理論値 (T-Fe 72.4%) から、投入した原料中に含まれる鉄成分の量が計算できる。また、サンプルの T-Fe 濃度とろ過試験のろ液量から、ろ液として回収された鉄成分の値が計算できる。これらの値から、溶液に分配された鉄成分の割合、つまり鉄成分回収率を算出した。これらの計算結果を表 16 に示す。

表 16 ラボ試験 物質収支 (鉄成分)

PFS 原料	市販マグネタイト	粗選マグネタイト	分級マグネタイト
鉄成分回収率(%)	86.0	83.7	86.4

表 16 より、粗選マグネタイトの鉄成分回収率がやや低いものの、各原料の鉄回収率は同様の値となった。従って、市販マグネタイト、粗選マグネタイト、分級マグネタイトの溶解性には大きな差がなく、尾鉱由来のマグネタイトを用いた PFS 製造が可能であることが示唆された。

#### ④ ラボ試験まとめ

ラボ試験より、市販マグネタイトと磁選原料の溶解性には大きな差がないことがわかった。ただし、原料の粒径の違いや性状の違い (片刃粒子を含む、ごく細粒の不純物を含む等) によって酸化速度やろ過性に違いが生じる。今回検討した磁選工程では、鉄品位が高くなるほど不純物量が少なくなるが、細粒子の割合が高くなるため、ろ過に負荷が生じやすくなる。

ろ過作業に対して適切な原料の鉄品位や仕込み量のバランスについては実機の作業性を考慮する必要があるため、今後は尾鉱由来の原料を用いた実機スケールの検討を行うことが望ましい。

#### (2) PFS 製造に関わるコスト試算

3(4)②の結果に基づき、市販マグネタイトと尾鉱由来のマグネタイトを用いた PFS 製造のコストを比較した。

尾鉱由来のマグネタイトについては、尾鉱を粗選して得られるマグネタイト (粗選マグネタイト)、粗選+分級して得られるマグネタイト (分級マグネタイト)、粗選+分級+精選して得られるマグネタイト (精選マグネタイト) についてコストを試算した。各原料の鉄品位と単価を表 17 に示す。

表 17 コスト試算 マグネタイト単価

PFS 原料	市販マグネタイト	粗選マグネタイト	分級マグネタイト	精選マグネタイト
T-Fe (%)	67	42	55	60
単価 (US\$/T-Fe 670kg)	380	76.2	163.9	187.3

PFS 製造コストについて、今回は原材料費と産廃処理費をコスト試算の対象とした。ラボ試験の結果から、尾鉱由来の原料を使用する場合はろ過残渣量やろ過時間が市販マグネタイトを使用する場合と異なることがわかっているため、本来であればろ過工程に係る人件費やユーティリティ費も考慮することが望ましい。しかし、今回の検討では実機スケールのろ過性の違いやろ過作業の負荷が明らかになっていないため、これらの費用は試算から除外した。

原材料費の試算にあたり、鉄成分の投入量を一定とし、同じ濃度の PFS を得るために必要な鉄、硫酸イオンの量からマグネタイト原料、硫酸、水の投入量を決定した。

ろ過残渣には未溶解のマグネタイトと原料由来の不純物（ケイ酸塩鉱物など溶解しない鉱物）が含まれる。原料由来の不純物量は、原料の鉄品位がすべてマグネタイト鉱物由来であると仮定することで原料投入量から計算することができる。尾鉱由来の原料の溶解性が市販マグネタイトと同等であったことから、等量の鉄成分を投入した場合、未溶解のマグネタイトも等量生じると考えられる。従って、尾鉱由来の原料を用いる場合は、市販マグネタイトと等量の未溶解のマグネタイトに原料由来の不純物量を足した値をろ過残渣(dry)量とした。また、フィルタープレスによるろ過残渣は約 30%~70%の PFS を含むため、実機試験の結果からろ過残渣(wet)の固体率を 40%と仮定し、残りの 60%は PFS が含まれるものとして産廃処理されるろ過残渣(wet)の量を算出した。

PFS 製造量は原料投入全量からろ過残渣(wet)量を引いた値とした。

以上の仮定から計算した PFS の製造費を表 18 に示す。市販マグネタイトを用いて PFS を 1 t 製造する場合の製造費（原材料費+産廃費）を 100 とし、その他費用はその金額に対する比で示している。

表 18 PFS 1t 製造あたりの費用比（市販マグネタイトの製造費を 100 とする）

PFS 原料	市販マグネタイト	粗選マグネタイト	分級マグネタイト	精選マグネタイト
原材料費	95	80	79	78
産廃費	5	42	17	11
合計（製造費）*	100	122	95	89
コスト削減率	-	+22%	-5%	-11%

\*人件費、ユーティリティ費などは除外

表 18 より、原材料費について、粗選マグネタイト、分級マグネタイト、精選マグネタイトを用いた場合では金額に大きな違いがないことがわかった。マグネタイト原料の単価は鉄品位が低いほど安価であるが（表 17）、鉄品位が低いほど不純物が多いことでろ過残渣が増え、その分 1 回の製造で得られる溶液量が少なくなる。このため尾鉱由来の原料では品位によらず原材料費に大きな差が生じない結果となった。

製造費について、市販マグネタイトと比較して尾鉱由来の原料を用いた場合は、粗選マグネタイトを除き原料の鉄品位が高いほどより安価である結果となった。原料の鉄品位が低いと 1 回の製造で得られる溶液量が少なくなるほか、残渣量が増え産廃費が大きくなる。粗選マグネタイトを用いる場合にはこれらに係る費用の影響が大きく、原料単価が最も低いにも関わらず製造費が高くなったと考えられる。従って、分級マグネタイト、精選マグネタイトであれば市販マグネタイトを用いた場合よりも 5~11%安価に PFS が製造できる。

ただし、分級マグネタイト、精選マグネタイトは細粒子を多く含むため、ろ過工程の負荷が大きい可能性がある。今後は実機試験によってろ過性の負荷を確認し、改めて尾鉱由来のマグネタイト原料の実製造への適用が可能であるか検討する必要がある。

## 5. 総括

銅鉱山の尾鉱由来のマグネタイトから凝集剤（PFS）を製造し、尾鉱を再資源化することを目的とし、チリ国鉱山の尾鉱の磁選試験および PFS 製造試験を行った結果、下記の成果が得られた。

### (1) 磁選ラボ試験

- 浮選尾鉱（T-Fe 12%）を粗選 + 精選（複数段） + 分級（-75 μm）のフローで処理することで、目標の品位（T-Fe 60%～65%）の精鉱を得ることができる。
- 粗選 + 分級（-75 μm）のフローでは、精鉱の品位は 55%前後に留まる。
- 浮選尾鉱の磁選においては、磁界強度やパルプ濃度を低下させることによる品位向上の効果は限定的である。

### (2) 磁選パイロット試験

- 浮選尾鉱をパイロットスケールの磁選機で粗選を行うことで、鉄品位 42%のマグネタイト精鉱が得られた。

### (3) 分級試験

- アコージャパン社製のスラリースクリーナーを用いて、パイロット試験で得られた精鉱を分級することで、鉄品位約 55%の産物が得られた。
- スラリースクリーナーのスクリーンは消耗品であり、スクリーンの耐久性がランニングコストに大きく影響する。

### (4) PFS 製造 ラボ試験

- ～20 L の圧力容器を用いて、尾鉱由来の原料を用いた PFS 製造試験を実施した。尾鉱由来の原料を用い、現行品と同等の PFS を製造できることがわかった。
- 原料の品位が高いほどろ過残渣量が少なくなり、製品の回収率が向上するが、原料品位が高まることで粒径が小さくなり、ろ過効率を低下させる。原料の品位とろ過効率のバランスについては今後実機試験を行い、検討を進める必要がある。

これらの改善方策については、今後、引き続きパイロットスケールの磁選試験を行い、粗選 + 分級 + 精選のプロセスを最適化すること、そしてより品位の高い磁選マグネタイトを用いて PFS 製造試験を行うことで検討を継続していく計画である。

以上