

「令和 5 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リーチング助剤としての利用検討
共同スタディ

成果報告書
(公開版)

令和 6 年 3 月 8 日
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. 実施計画	2
(1) 共同スタディの目的	2
(2) 共同スタディの内容	2
① 選鉱フローの改善	2
② マグネタイト精鉱の PFS 原料としての評価.....	2
③ PFS 添加条件での銅リーチング試験	3
3. 選鉱フローの改善	4
(1) 分級および精選試験	4
① 目的	4
② 試験条件	4
③ 試験結果	5
④ コスト試算	7
4. マグネタイト精鉱の PFS 原料としての評価.....	8
(1) ラボ試験.....	8
① 目的	8
② ラボ試験概要.....	8
③ ラボ試験結果.....	9
④ ラボ試験まとめ	10
(2) PFS 製造に関わるコスト試算	10
① 試算結果.....	10
(3) 精鉱の評価	11
5. PFS 添加条件での銅リーチング試験	12
(1) 供試鉱石の調製.....	12
① 目的	12
② コンポジット試料の分析	12
(2) ボトルリーチング試験.....	12
① 目的	12
② 試験手順	12
(3) カラムリーチング試験.....	13
① 目的	13
② 試験条件	13
③ 試験手順	13
6. 総括	15

図表一覧

図 1 試験フロー概略.....	4
図 2 磁選機およびフィードタンク概観.....	5
図 3 磁選機.....	5
図 4 品位-実収率.....	6
図 5 ラボ試験 試験手順.....	8
表 1 T-Fe 品位分析結果および重量.....	6
表 2 コスト試算結果比較.....	7
表 3 原料分析値.....	8
表 4 ラボ試験 ろ過効率.....	9
表 5 ラボ試験 鉄成分回収率.....	9
表 6 コスト試算 マグネタイト単価.....	10
表 7 PFS 1t 製造あたりの費用比.....	11
表 8 市販マグネタイトと比較した精選マグネタイトの特徴.....	11
表 9 全岩分析結果.....	12
表 10 初期溶液条件.....	13
表 11 試験条件.....	13
表 12 酸養生時添加剤条件.....	14

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、PFS 原料としての評価を行うとともに、PFS の銅リーチング助剤としての利用可能性を検討する。

(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。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紛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・磨鉱のコストを抑えて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。

IOCG 型の鉱床はマグネタイトを含んでいる。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 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。銅製錬所においては、日本国内では小坂製錬所および佐賀関製錬所にて排水・廃酸処理のために使用されている。チリにおける PFS 製造においては、天然のマグネタイト精鉱が使用されているが、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。

PFS の利用量が増えればマグネタイト精鉱の需要が増える。今回、PFS の用途開発の一つとして、銅リーチングにおける利用を検討した。硫化銅鉱石のリーチングにおいて、 Fe^{3+} が共存すると銅の浸出が促進される例がある。PFS は高濃度の Fe^{3+} が溶解した酸性溶液であり、ヒープへの鉄イオン供給が容易である。また、前述したように鉱山由来の原料を用いて PFS を製造すれば、周囲のリーチング工場への供給が容易であり銅製錬工程内での資源の有効活用が可能である。

令和 3 年度から 2 年間実施した共同スタディでは、銅鉱山尾鉱の選鉱試験と PFS 製造の実機試験を実施した。選鉱試験では、鉄品位約 12% の尾鉱を磁選することで鉄品位が約 40% のマグネタイト精鉱が得られ、さらに分級を行うことで鉄品位が約 55% に向上することが明らかになった。PFS 製造試験では、より効率的な PFS 製造技術の実機化のため、20m³ スケールで試験を実施し、製造効率が上昇する条件を明らかにした。また、尾鉱由来のマグネタイト精鉱を用いた PFS 製造コストを試算したところ、尾鉱利用時の経済性、PFS 製造後の溶解残渣低減等の観点から、マグネタイト精鉱の鉄品位は鉄品位 60~65% まで向上させることが望ましいことが分かった。そこで、精鉱に含まれる 20 μm 以下の微粒な非鉄鉱物を取り除く必要があることが課題として挙げられた。

この課題解決のため、尾鉱の精選・分級試験を実施した。併せて PFS を使用したリーチング試験を実施し、尾鉱の活用について検討を行った。

2. 実施計画

(1) 共同スタディの目的

銅鉱山から発生する尾鉱から磁選によりマグネタイト精鉱を回収し、PFSの原料としての評価を行うとともに、PFSの銅リーチング助剤としての利用を検討する。

(2) 共同スタディの内容

令和3年度から4年度にかけて、本共同スタディの枠組みにて実施した銅浮選尾鉱の磁選パイロット試験においてT-Fe品位40%程度のマグネタイト精鉱が得られ、さらに分級を行うことで鉄品位が約55%に向上することが明らかになった。しかし、目標である鉄品位60~65%まで品位を向上させるためには精鉱に含まれる20 μm 以下の微粒な非鉄鉱物を取り除く必要があることが課題であった。そこで、令和5年度は上記のマグネタイト精鉱を再度磁選し、鉄品位60%以上のマグネタイト精鉱を作製する。また、得られたマグネタイト精鉱を使用してラボスケールのPFS製造試験を行い、原料の溶解性や残渣のろ過性からマグネタイト精鉱のPFS原料としての評価を行う。

また、銅鉱山の浮選尾鉱の発生量に対しPFSの需要・販売量が小規模であるため、尾鉱の有効利用拡大の観点からPFSの拡販が望まれている。その新たな用途として、銅リーチング助剤として活用が考えられる。PFSは Fe^{3+} を含み、それは酸化剤として硫化銅鉱物の硫酸による浸出を促進することが知られおり、PFSは硫化銅鉱物のリーチング助剤として活用できる可能性がある。そこで、PFSを用いて二次硫化銅鉱物のリーチング試験を実施し、PFSによる銅浸出促進効果を明らかにする。

① 選鉱フローの改善

令和4年度の銅鉱山の浮選尾鉱の磁選パイロット試験は、粗選のみのフローで実施され、得られたマグネタイト精鉱のT-Fe品位は約40%に留まった。そこで、令和4年度のパイロット試験で得られたマグネタイト精鉱の品位向上を目的として、分級および精選試験をパイロットスケールで実施する。さらに、同フローでPFS原料を生産した場合のコスト試算を行い、市販原料に対するコスト優位性を評価する。

② マグネタイト精鉱のPFS原料としての評価

上記選鉱試験で得られたマグネタイト精鉱を原料としてラボスケールのPFS製造試験を行い、原料の溶解性や残渣のろ過性からPFS原料としての評価を行う。

a) 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（ Fe^{3+} ）を11 wt.%以上含み、原料に含まれる Fe^{2+} は製造工程ですべて 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）。

b) 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压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 Fe^{2+} を 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 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 PFS 添加条件での銅リーチング試験

PFS の新たな用途として、銅リーチング助剤への活用が考えられる。二次硫化銅鉱を含む銅鉱石のリーチング試験を実施し、PFS を助剤として添加した場合の二次硫化銅の浸出促進効果を検証する。

a) 供試銅鉱石の調製

二次硫化銅鉱物を含む銅鉱石を採取し、リーチング試験に使用する銅鉱石を調達する。

b) ボトルリーチング試験

リーチングにおいて、PFS の添加が銅の浸出速度および ORP へ及ぼす影響を確認するためのボトルリーチング試験を実施する。初期溶液中に PFS を添加することで浸出液の ORP および浸出挙動がどのように変化するかを記録する。比較のため、PFS 添加条件と Fe^{3+} 濃度が同じになるよう、初期溶液中に硫酸第二鉄を添加した条件での試験も実施する。

c) カラムリーチング試験

上記ボトルリーチング試験に引き続き、より実操業のヒープに近いカラムリーチング試験を実施し、PFS の添加による銅の浸出挙動への影響を調査する。さらに、 Fe^{3+} の添加方法として、PFS と硫酸第二鉄に違いが見られるかを調査する。

3. 選鉱フローの改善

(1) 分級および精選試験

① 目的

令和4年に実施された磁選パイロット試験では、得られたマグネタイト精鉱の T-Fe 品位は 40%前後に留まり、PFS 原料として利用するには品位が不足していた。このマグネタイト精鉱は、分級および精選を経ることで、T-Fe 品位 65%まで向上することがラボ試験により確認された。そこで、この精鉱に対し、パイロットスケールでの分級および精選試験を実施する。さらに、同フローで PFS 原料を生産した場合のコスト試算を行い、市販原料に対するコスト優位性を評価する。

② 試験条件

a) 供試鉱石

令和4年に施された磁選パイロット試験で得られたマグネタイト精鉱を使用した。T-Fe 品位は 41%で、粒度は $P_{80}=162\ \mu\text{m}$ 、重量は約 10 t であった。

b) 試験フロー

試験はサンティアゴの選鉱試験会社で実施された。試験のフローの概略を図1に示す。分級（オーバーフロー粒度 $P_{80}=75\ \mu\text{m}$ ）および磁選による精選を2段実施した。2段の精選をそれぞれ精選①、精選②とした。精選工程においては、フィードタンクとして使用した攪拌槽が $5\ \text{m}^3$ しかなく、給鉱の全量を格納することが出来なかったため、フィードタンクに適量のパルプを充填してから磁選機に送る半バッチ式で行った。

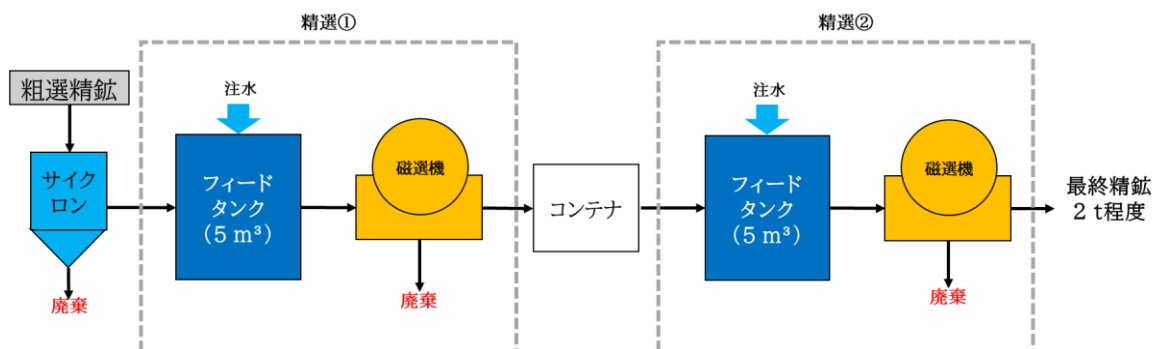


図1 試験フロー概略



図 2 磁選機およびフィードタンク概観

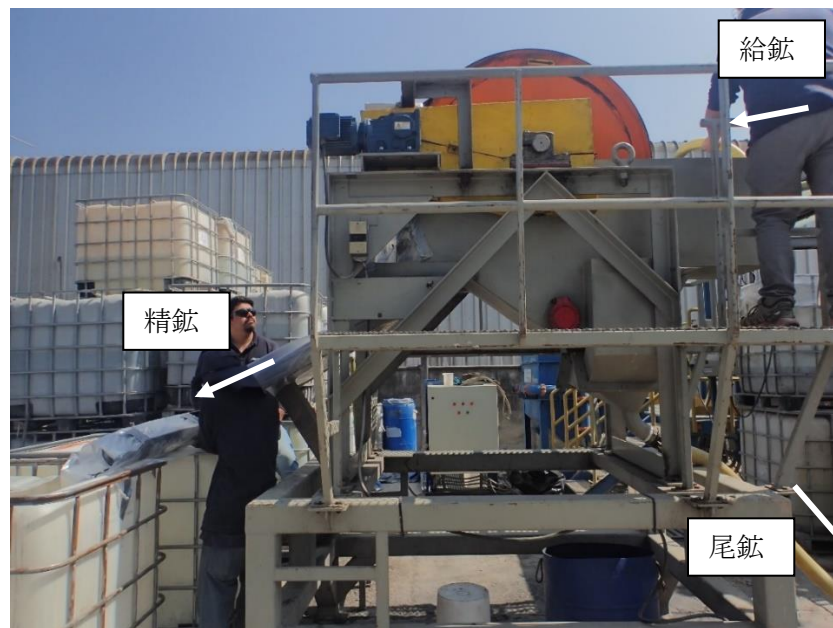


図 3 磁選機

③ 試験結果

a) T-Fe 品位分析

各試験産物に対して、T-Fe 品位を測定した。測定結果を重量とともに表 1 に示す。重量については、選鉱試験会社の記録によるものである。図 4 に品位・実収率のグラフを示す。ここでは、各工程における精鉱の重量および T-Fe 品位から実収率を算出した。

サンプリングにおける代表性の問題により、分級にオーバー/アンダーフローともに給鉱よりも品位が高い点や、精選①の精鉱と精選②の給鉱の品位に差がみられる点において矛盾が生じている。精選②における給鉱および尾鉱品位や、同条件でのラボ試験の結果を鑑みるに、最終精鉱の品位測定値が下振れしている可能性も考えられる。

表 1 T-Fe 品位分析結果および重量

工程	産物	バッチ	バッチ		合計	
			重量(kg)	T-Fe 品位(%)	重量(kg)	T-Fe 品位(%)
分級	給鉱	-	10,200	37.6	10,200	37.6
	オーバーフロー	-	3,882	45.8	3,882	45.8
	アンダーフロー	-	6,305	39.3	6,305	39.3
精選①	給鉱	1	1,421	46.1	3,682	47.3
		2	1,488	46.2		
		3	773	51.6		
	精鉱	1	923	56.5	2,605 (70.7%)	57.1
		2	1,080	55.4		
		3	602	61.2		
	尾鉱	1	499	17.7	1,078 (29.3%)	17.0
		2	408	16.8		
		3	171	15.6		
精選②	給鉱	1	893	54.9	2,548	54.0
		2	1,073	53.0		
		3	582	54.3		
	精鉱	1	715	57.4	2,088 (81.9%)	57.6
		2	915	57.4		
		3	457	58.2		
	尾鉱	1	178	25.9	461 (18.1%)	23.1
		2	158	19.6		
		3	125	23.5		

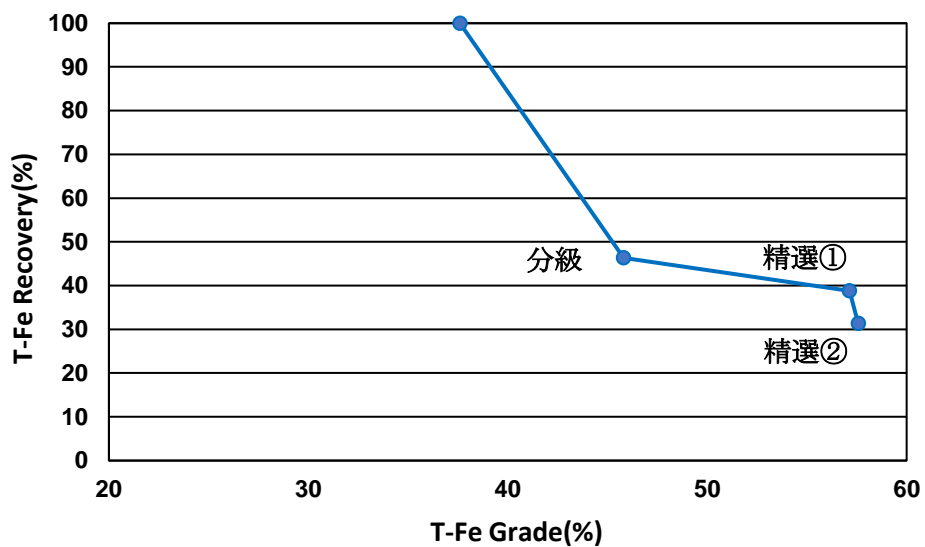


図 4 品位・実収率

④ コスト試算

a) 前提条件

チリで流通している市販のマグネタイト精鉱（T-Fe 67%）は約 380 US\$/t（輸送費込み）である。今回の試験で得られたマグネタイト精鉱の T-Fe 品位は 57.6%であり、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 T-Fe 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 1000 t には 670 t の鉄が含まれることになり、これは本試験で得られたマグネタイト精鉱 1163 t に相当する。今回の試験と同様のフローでマグネタイト精鉱を年間 1163 t 生産した場合の、1.163 t（市販品 1 t に相当）当たりのマグネタイト精鉱の生産に係るコストを試算し比較した。操業年数は 5 年とした。

b) 試算結果

T-Fe 量換算 670 kg の精鉱を生産するのに係る価格を試算して、市販のマグネタイト原料と価格を比較することとした。試算の結果を表 2 に示す。試算の結果、市販のマグネタイト精鉱（380 US\$/t）と比較して半額以下で生産できることが明らかとなった。さらに、試算で採用した機器類よりも小型の装置（コストブックに記載されていないパイロット試験機程度のサイズ）を採用することで、さらにコストを下げられる可能性もある。

ただし、市販のマグネタイト精鉱と比較して品位が低いため、PFS の製造において発生する残渣の量が増加すると予想される。この残渣の処理に係るコストについても勘案する必要がある。

表 2 コスト試算結果比較

	生産コスト(US\$/670 kgFe)
減価償却費	117
操業費	63
計	180

4. マグネタイト精鉱の PFS 原料としての評価

(1) ラボ試験

① 目的

令和 4 年度の PFS 製造ラボ試験では、尾鉱由来の原料は、鉄品位が高いほど PFS をろ過した際のろ過残渣が少なくなり、製品の回収率が向上することがわかった。一方、粗選と分級を行う処理では、鉄品位向上のため粗粒子を取り除くことで、原料全体の細粒子(粒径 20 μm 以下)の含有割合が高くなり、これらの粒子がろ紙を目詰まりさせることで製品のろ過性が悪くなった。粗選と分級に加えて精選を行う処理であれば、精選により、ろ紙を目詰まりさせる粒子径の非鉄粒子が除去され、鉄品位が高くろ過性もよい原料が得られる可能性がある。今回、先述した精選試験により、選鉱フローを改善して得られた精鉱を用いてラボ試験を行い、精鉱の PFS 原料としての品質を評価する。

② ラボ試験概要

ラボ試験では磁選マグネタイトを用いた場合の原料の溶解性、残渣発生量、残渣性状を確認することを主な目的とする。

a) 原料投入量

原料の分析値を表 3 に示す。比較のため、令和 4 年度に実施した試験で使用した原料を併せて示す。

表 3 原料分析値

実施年度	R4 年度			R5 年度
マグネタイト原料	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
選鉱処理	—	粗選	粗選 +分級 (スラリースクリーナー)	粗選 +分級 (サイクロン) +精選 2 回
T-Fe (%)	66.8	42.1	54.7	57.1
水分 (%)	3.3	0	0	0
粒径 D ₅₀ (μm)	32.1 ⁽¹⁾	63.0 ⁽¹⁾	20.7 ⁽¹⁾	28.0 ⁽¹⁾

⁽¹⁾ふるい分け試験から算出

b) 試験手順

図 5 にラボ試験の試験手順を示す。

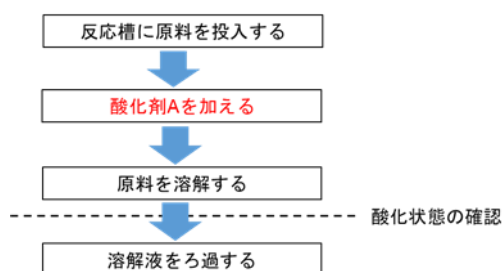


図 5 ラボ試験 試験手順

③ ラボ試験結果

a) 製造効率

反応溶液を 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 4 に各試験のろ過時間、ろ過残渣量を示す。比較のため、令和 4 年度のラボ試験結果を併せて示す。

表 4 ラボ試験 ろ過効率

実施年度	R4 年度			R5 年度
	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
ろ過時間(sec/g)	2.3	1.9	7.8	1.7
ろ過残渣率(dry) (%)	4.3	14.3	8.3	7.0

精選マグネタイトを用いた試験では残渣量が 7.0 %と、昨年度の試験結果と比較して多くなったが、ろ過時間が 1.7 sec/g と最も短い結果となった。ろ過性にはろ液の濃度と、原料の粒径の違いが大きく影響していると考えられる。精選マグネタイトは分級マグネタイトよりもろ過性が良く、選鉱プロセスの改善によってろ過不良の原因となった微粒子が取り除かれたことが示唆された。

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 5 に示す。

表 5 ラボ試験 鉄成分回収率

実施年度		R4 年度			R5 年度
マグネタイト原料		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
鉄成分回収率	%	86.0	83.7	86.4	82.1

表 5 より、尾鉱由来のマグネタイト（粗選マグネタイト・分級マグネタイト・精選マグネタイト）を比較すると、精選マグネタイトを用いた試験では、他の原料と比較して鉄成分回収率がやや低いが、大きな差異がない結果となった。

市販マグネタイトと尾鉱由来のマグネタイトを比較すると、尾鉱由来のマグネタイトの方がやや鉄成分回収率が低い傾向にあり、尾鉱由来の原料は市販の原料よりもやや溶解性が悪いことが示唆される。尾鉱由来のマグネタイトにはパイライト、雲母類、角閃石なども含まれており、これらの鉱物は硫酸に溶解しない場合がある。しかし、これらの鉱物に含まれる鉄分も T-Fe として分析されるため、マグネタイト由来の T-Fe は分析値よりも低い可能性がある。従って、今回の試験では尾鉱由来の原料中のマグネタイト含有率が T-Fe から考えるより低く、市販マグネタイトと比較して投入されるマグネタイト由来の鉄量が少ないことで鉄成分の回収率が低い結果となったことが考えられる。

④ ラボ試験まとめ

ラボ試験より、尾鉱由来のマグネタイト精鉱の溶解性には、選鉱プロセスによって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）によって溶解速度やろ過性に違いが生じる。今回検討した精選品は、精選を行うことで細粒な不純物が水と共に精鉱から取り除かれ、PFS 製造においては溶解性がやや悪いが、ろ過性がよい原料であった。

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

① 試算結果

3(1)④コスト試算の結果に基づき、市販マグネタイトと尾鉱由来の精選マグネタイトを用いた PFS 製造のコストを比較した。各原料の鉄品位と単価を表 6 に示す。

表 6 コスト試算 マグネタイト単価

	市販マグネタイト	精選マグネタイト
T-Fe (%)	67	57
単価 (US\$/T-Fe 670kg)	380	180

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。

産廃量の算出方法を以下に示す。実機試験の結果より、市販マグネタイトを用いた試験では投入したマグネタイト原料のうち約 10%が固体としてろ過残渣に分配されている。この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、フィルタープレスのろ過残渣は約 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、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 7 PFS 1t 製造あたりの費用比

マグネタイト原料	市販マグネタイト	精選マグネタイト
原材料費	95	79
産廃費	5	14
合計（製造費）	100	93
コスト削減率	-	-7%

表 7 より、マグネタイト単価の違いから、原材料費は精選マグネタイトの方が安価である。しかし、精選マグネタイトは市販マグネタイトよりも鉄品位が低く、PFS 製造時の産廃量が多いため、産廃費が市販マグネタイトよりも高くなる。これらを総合すると、市販マグネタイトと比較し、精選マグネタイトを用いた場合では製造費として 7%安価に PFS を製造できる結果となった。

(3) 精鉱の評価

ラボ試験の結果および、コスト試算結果を踏まえると、市販マグネタイトと比較した精選品の特徴は表 8 の通りである。

表 8 市販マグネタイトと比較した精選マグネタイトの特徴

	精選マグネタイト
溶解性	やや悪い
残渣量	2.7 倍増加
ろ過性	ろか時間が 0.7 倍に短縮
コスト	7%削減

表 8 より、ろ過性、コストは市販マグネタイトよりも改善した。製造溶解性については、市販マグネタイトに劣るものの 80%以上の鉄が溶解しており、また、試験条件の見直しによって改善する可能性があることから、PFS 原料としての使用に問題はないと考えられる。残渣量についても、原料の鉄品位が市販マグネタイトと比較して低いことで残渣量は多くなるが、ろ過性やコストへの影響は小さく、PFS 原料化においては大きな問題ではないと考えられる。

以上の結果から、尾鉱から得られる精選マグネタイトは PFS 原料として有用であると考えられる。今回は主にラボ試験の結果から溶解性やろ過性を検討したが、実機における原料投入や、ろ過残渣のハンドリングは実機試験で確認することが望ましい。

5. PFS 添加条件での銅リーチング試験

(1) 供試鉱石の調製

① 目的

リーチング試験用の二次硫化鉱コンポジット試料調製を目的とする。

② コンポジット試料の分析

a) コンポジット試料の作製

採取された銅鉱石を-11.2 mm まで破碎し、併せて採取された脈石試料（こちらも-11.2 mm に破碎）と混合して銅品位 1%程度に調整の上、縮分して試験試料とした。その一部は粉碎して次項の各種分析に供した。

b) コンポジット試料の全岩分析結果

表 9 に全岩分析結果を示す。目論見通り、銅品位 1%程度のコンポジット試料を作製することができた。銅の他には鉄品位が 15.6%とやや高い。

表 9 全岩分析結果

元素	Cu	Fe	S	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	SiO ₂
単位	%	%	%	%	%	%	%	%	%
分析値	1.08	15.6	0.17	9.91	2.85	0.74	8.24	4.94	39.5
元素	Mn	Zn	Pb	Cd	As	Sb	Hg	P	Cl
単位	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	mg/kg	%	%
分析値	0.11	91.2	1.4	<0.1	24.4	0.3	0.1	0.19	0.07

c) 吸水量の測定

-11.2 mm まで破碎した鉱石がどの程度の水を保持できるか評価した。その結果、鉱石重量 991.8 g に、65.7 g の水が吸水された。ここから、吸水量 66.2 g/kg の値が得られた。

(2) ボトルリーチング試験

① 目的

リーチングにおいて、PFS の添加が銅の浸出速度および ORP へ及ぼす影響を確認するためのボトルリーチング試験を実施する。初期溶液中に PFS を添加することで浸出液の ORP および浸出挙動がどのように変化するかを記録する。比較のため、PFS 添加条件と鉄濃度が同じになるよう、初期溶液中に硫酸第二鉄試薬を添加した条件での試験も実施する。さらに、この時に pH を一定に保つのに添加した硫酸の重量を記録し、鉱石の硫酸消費量を見積もる。

② 試験手順

Fe³⁺濃度が 500、1000 mg/L となる PFS 水溶液および硫酸第二鉄溶液を 2 L 調製し、-11.2

mm に調整した試料約 1 kg とともにポリボトルに投入した (表 10)。その後、プラスチック棒で攪拌しながら濃硫酸を加えて pH を 1.5 に調整し、その際に加えた濃硫酸の重量を測定した。

ポリボトルに蓋をしてポットミル回転台に乗せ 20 rpm の速さで 5 分間攪拌し、pH を 1.5 に調整した。その後、再びポリボトルをポットミル回転台に乗せ、以後定期的に pH 測定→硫酸で pH1.5 に調整を繰り返して、24 時間後までの硫酸の添加量を酸消費量とした。pH を調整する際に溶液を 10 ml 程度サンプリングし、浸出液の ORP および銅/鉄の分析を行うことで浸出挙動を評価した。

表 10 初期溶液条件

試験番号	試験条件
①	添加剤なし
②	PFS 500 mgFe/L
③	PFS 1000 mgFe/L
④	硫酸第二鉄 500 mgFe/L
⑤	硫酸第二鉄 1000 mgFe/L

(3) カラムリーチング試験

① 目的

ボトルリーチング試験に引き続き、より実操業のヒープに近いカラムリーチング試験を実施し、PFS の添加による銅の浸出挙動への影響を調査する。さらに、Fe³⁺の添加方法として、PFS と硫酸第二鉄に違いが見られるかを調査する。

② 試験条件

カラムリーチング試験において、酸養生時および滴下液に硫酸に加えて Fe³⁺ (PFS および硫酸第二鉄) を添加した。添加量はボトルリーチングにおける初期溶液と同等で、表 10 に示す通りである。

表 11 試験条件

カラム番号	試験条件
①	添加剤なし
②	PFS 500 mgFe/L
③	PFS 1000 mgFe/L
④	硫酸第二鉄 500 mgFe/L
⑤	硫酸第二鉄 1000 mgFe/L

③ 試験手順

a) 鉱石の酸養生

試料約 15 kg に吸水量に相当するイオン交換水 (65.2 mL/kg)、添加剤 (PFS または硫酸第二鉄) および酸消費量に相当する濃硫酸を加えて、10 分程度スコップで攪拌し馴染ませた後、24 時間養生した。

表 12 酸養生時添加剤条件

試験条件	硫酸添加量	添加剤・添加量
添加剤なし	78.4 g/kg	なし
PFS 500 mgFe/L	71.5 g/kg	PFS・3.9 g/L
PFS 1000 mgFe/L	66.2 g/kg	PFS・7.8 g/L
硫酸第二鉄 500 mgFe/L	67.9 g/kg	硫酸第二鉄・2.7 g/L
硫酸第二鉄 1000 mgFe/L	61.9 g/kg	硫酸第二鉄・5.4 g/L

b) 鉱石のカラムへの充填

カラムは直径 8cm の 1m 直管を 2 本つなげたものであり、直管 2 本に分れる。はじめに、下方のカラムの底をプラスチック製のろ過板で塞ぎ、その上に傾けた状態で少しずつ鉱石を落として投入した。3 分の 1 まで入れたところでカラムを架台のフックに固定し、最上部まで鉱石を充填した。その後、上方のカラムへも同様に充填し、ボルトとナットで所定の位置に固定した。

c) 溶液滴下

試験前半（滴下開始から 268 時間まで）は、添加剤添加条件では添加剤（PFS または硫酸第二鉄）を加えたうえで、pH 計を使用して、pH が 1.5 になるまで硫酸を加えて調製した溶液を滴下した。酸養生で浸出した銅の回収以降、浸出液の銅濃度が低く推移したため、滴下開始 268 時間以降は、滴下液の硫酸の濃度を変更した。

d) 浸出液分析

浸出液はカラム底部に設置した容器で回収し、平日に一日一回回収を行った。回収した浸出液は、重量、pH および ORP を記録し、銅および T-Fe 濃度の分析に供した。

e) 残渣分析

試験終了後、カラム中の残渣を上段と下段に分けて回収し、秤量後にそれぞれ銅、鉄および硫黄の分析に加えて、MLA による鉱物組成分析を行った。

6. 総括

銅鉱山から発生する浮選尾鉱から磁選によりマグネタイト精鉱を回収し、PFSの原料としての評価を行うとともに、PFSの銅リーチング助剤としての利用を検討した結果、下記の成果が得られた。

(1) 選鉱フローの改善

- 令和年度に実施したパイロット試験で得られたマグネタイト精鉱(T-Fe品位41%)に対して、サイクロン分級および磁選による精選を2段階行うことで、T-Fe品位が57.6%まで向上した。
- 本試験のフローでマグネタイト精鉱を生産した場合のコストを試算した結果、市販のマグネタイト原料と比較して半額以下のコストで生産できることが分かった。

(2) マグネタイト精鉱のPFS原料としての評価

- 尾鉱を精選した原料を用いてラボスケールのPFS製造試験を実施した。尾鉱由来の原料を用い、市販品を用いた製造と同等の効率でPFSを製造できることがわかった。
- 選鉱プロセスの見直しにより、PFS製造におけるろ過性が改善した。製造効率、製造コストを考慮し、尾鉱由来のマグネタイト精鉱はPFS原料として有用であることが確認できた。

(3) PFS添加条件での銅リーチング試験

- 二次硫化銅鉱のコンポジットを作製し、PFSまたは硫酸第二鉄を添加剤として添加して銅リーチング試験を行った

以上