

選鉱技術の開発動向～IMPC2016参加報告～

JOGMEC 金属資源技術部
生産技術課

今野 広祐

はじめに

2016年9月11日～15日、カナダ・QC州にて開催された「International Mineral Processing Congress (IMPC) 2016」に参加し、世界各国の鉱山技術動向の調査を行った。

IMPCは1952年にロンドンで第1回目が開催されて以降、2年に1度開催される世界最大規模の選鉱に関するカンファレンスであり、大学等の研究機関による研究成果発表のほか、鉱山会社による操業改善事例や鉱山関連企業による新規開発装置の講演等を通じ、参加者にとってネットワーク構築、最近技術の動向把握およびビジネスマッチングの場となっている。

2016年は、カナダ、米国、チリ、ペルー、中国を初めとした60か国以上の資源国から1,000人以上の技術者や大学関係者が参加し、粉碎、物理選別、選鉱、鉱山操業改善等に関する600以上もの講演のほか、企業によるブース出展や学生によるポスターセッションも催された。

本稿では、講演内容および配布資料等に基づき、鉱山関連企業が開発した選鉱技術の鉱山への導入例を中心に紹介する。

1. ソーティング技術

硬質非鉄金属鉱石のセンサー式物理選別プロジェクトの開発および半移動式選別処理プロセス (Sensor-Based Sorting Project Development and Semi-Mobile Processing for Hard Rock Metal Ore)

TOMRA Sorting Solutions: Dr. Christopher Robben, Sabine Noelte

Boliden Mines Technology: Karl-Erik Ranman

Outotec: Mikko Petteri Rantamaki

1-1. 背景および目的

センサー技術に基づく物理選別 (Sensor-Based Sorting: SBS) は鉱業の様々な分野でスタンダードになりつつある。低品位の非鉄金属鉱石においても、鉄鉱石や石炭と同様にSBSは選鉱プラントへ給鉱する

鉱石の品位を向上させ、鉱石の輸送コストや粉碎に要するコストを削減しうるポテンシャルを持つ。しかしながら、鉄鉱石等と比較すると非鉄金属鉱石は一般的に低品位であるため鉱石のサンプリング誤差が大きいこと、また、鉱石が鉱床中に不均一に存在することが、SBSを実操業規模へ適応する上で大きな課題となっていた。

こうした課題に対して、半移動式の物理選別装置 (Semi-Mobile Sorter: SEMOS) は実際の操業現場に設置でき、現地で採掘された鉱石を数万t規模で処理できることから、実験室での試験結果をパイロット規模で確認および調整することが可能となった。

本稿では、低品位鉱石へのSBS導入プロジェクトの手順およびスウェーデンのBoliden鉱山におけるSEMOS導入試験結果を紹介する。

1-2. SBS導入プロジェクトの手順

● 机上調査

この調査の目的は、プロジェクトの早い段階でSBS導入のコストとメリットを明らかにすることである。具体的には、以下のような手順である。

➤ Project Definition

SBS導入を通じて達成すべきプロジェクト全体の目的を明確化し、その達成に必要な条件をHSE、企業戦略、法務・経営および技術等のすべての面から検討する。

➤ Lot Characterization

ボーリングコア等の比較的少量のサンプルから鉱床の品位分布や鉱石の単体分離性、目的鉱物に付随する脈石鉱物 (回収対象ではない不要な石) 等に関して調査する。この調査結果は、前述のProject Definitionで定めた条件を満足する必要がある、満たさない場合は条件を修正するか、プロジェクトを中断するしかない。

➤ Technical Feasibility Study

これは「rock-by-rock testing」として知られており、選別対象の鉱石がSBSにどの程度親和性があるかを調査する手法としてTOMRA社によって開

おことわり：本レポートの内容は、必ずしも独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構としての見解を示すものではありません。正確な情報をお届けするよう最大限の努力を行ってはおりますが、本レポートの内容に誤りがある可能性もあります。本レポートに基づきとられた行動の帰結につき、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構及びレポート執筆者は何らの責めを負いかねます。なお、本資料の図表類等を引用等する場合には、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構資料からの引用であることを明示していただきますようお願い申し上げます。

発された。この手法は鉱石のサンプリング、校正および妥当性の確認の3つから構成される。鉱石のサンプリングでは、まず上記のロット中に見られた様々な鉱物タイプと品位の鉱石を採取する。校正では、それらの鉱石を30-50mmの粒径に揃えて各種センサーに供し、得られたデータを処理することで実際の品位の値と校正する。最後に、新たに採取したサンプルを校正時と同一の手順で分析し、その結果の妥当性を確認する。この一連の分析の結果から、最も効率的に目的鉱物を同定できるセンサーを選定する。

● バルク試験

この試験では5~150mmの粒径の鉱石を1~10t程度用いる。この際、サンプルの偏りをなくするため、サンプルは各ピットそれぞれから採取するか、十分な期間にわたってコンベヤーベルトから定期的に採取したサンプルを用いなければならない。採鉱段階の案件の場合は、孔径の大きなボーリングコアでも可能である。このようにして得られたサンプルは、選定したセンサーを搭載した選別機で処理量、回収率、粒径幅および選別の段数をパラメータとして変化させながら選別試験に供される。また、次のステップとして鉱石の粉碎を行い、粉碎された鉱石の粒度分布等を調べる。

● 下流プロセス試験

SBSが鉱山に導入されると、鉱山側では品位だけではなく、給鉱中の元素比、鉱物比および粒径分布においてもこれまでとは異なる組成の鉱石が生産されることになる。これは鉱山側で生産された鉱石を受け入れる選鉱等の下流側では、出発原料の性質が変化することを意味し、それによって選鉱成績等に影響がでる恐れがある。従って、SBS導入による収益性は、下流プロセスについてもバルク試験で得られたサンプルを用いて最適化の試験を行い、その結果も含めて計算されなければならない。

● フィージビリティストディ

以上により、SBS導入に関するフィージビリティストディに必要なデータがすべて揃い、既存プロセスとSBS導入時の最適プロセスが比較・評価される。

● SEMOSでのスケールアップ試験

実際の鉱山現場にSEMOSを設置することにより、処理量を数百t/日までスケールアップし、バルク試験結果および下流プロセス試験結果の妥当性を確認する。また、SEMOSでのスケールアップ試験は、鉱山のオペレーターやメンテナンスチームのSBS実機導入前の訓練にも資する。

1-3. Boliden 鉱山における SEMOS での選別試験

● SEMOSの概要

SEMOSは、選別機本体、破碎機、スクリーン、コ

ンプレッサーおよびホイールローダー、ベルトコンベヤー、コントロールルーム等から構成される。選別機本体は12m級の一般的な貨物コンテナを改造した構造となっており、コンテナ上部からベルトコンベヤーで給鉱され、下部から選別されたSorter ProductとWasteが排出される。Boliden 鉱山では、センサーにはX線透過(XRT)型を用いた。

● 試験手順

本試験では、Boliden 鉱山で産出される火山性塊状硫化物タイプの鉱石を用いた。試験期間中、図1のとおり合計で3万tの鉱石をスクリーンで振り分けるところ、全体の20%に相当する6,000tがSBS用(15-50mmおよび50-150mm)として、残りの80%が150mm以上の粗粒または15mm以下の細粒として回収された。この2種類の粒度の鉱石をそれぞれSBSで選別し、Sorter ProductとWasteの分析を行った。

本試験の前に実施したバルク試験結果から、処理量を細粒で50t/h、粗粒で200t/hとし全重量の35%がWasteとして除去可能であることが示唆されたため、本試験でもWaste除去率の目標値を35%とした。

● 試験結果

得られた試験結果を表1に示す。どちらの粒度においても、目標としていた35%のWaste除去率を達成するとともに、金属の回収率は93%以上と良好な結果が得られた。従って、SEMOSでの試験結果から、Boliden 鉱山の鉱石はSBSを適用できる可能性があることを示唆している。今後、実機導入のためにはSBSに振り分けられる鉱石量を増やすような発破パターンや一次破碎機の粉碎サイズの調整を行う必要があると考えられる。

2. 浮遊選鉱技術

ポーフィリー型銅鉱山尾鉱からの有価金属回収(Recovery of Values from a Porphyry Copper Tailing Stream)

Eriez Flotation Division: M. Mankosa, J. Kohmuench, L. Christodoulou

2-1. 背景

浮遊選鉱プロセスにおいて、目的とする鉱物の回収率は鉱石の粒径に非常に強く依存し、鉱物の種類や試薬にも依るが数十~200 μ m程度の範囲において効率的な回収率を有することが知られている(Gaudin et al. 1931)。200 μ mを超える粗い粒子の場合は、目的の鉱物が脈石と完全に分離できておらず粒子表面に露出している割合が小さいことに加え、気泡に付着しても浮遊選鉱槽内の激しい攪拌のせん断力により気泡からの離脱が起こることが低回収率の原因と考えられている。

通常、こうした粗粒は浮遊選鉱工程で回収しうる

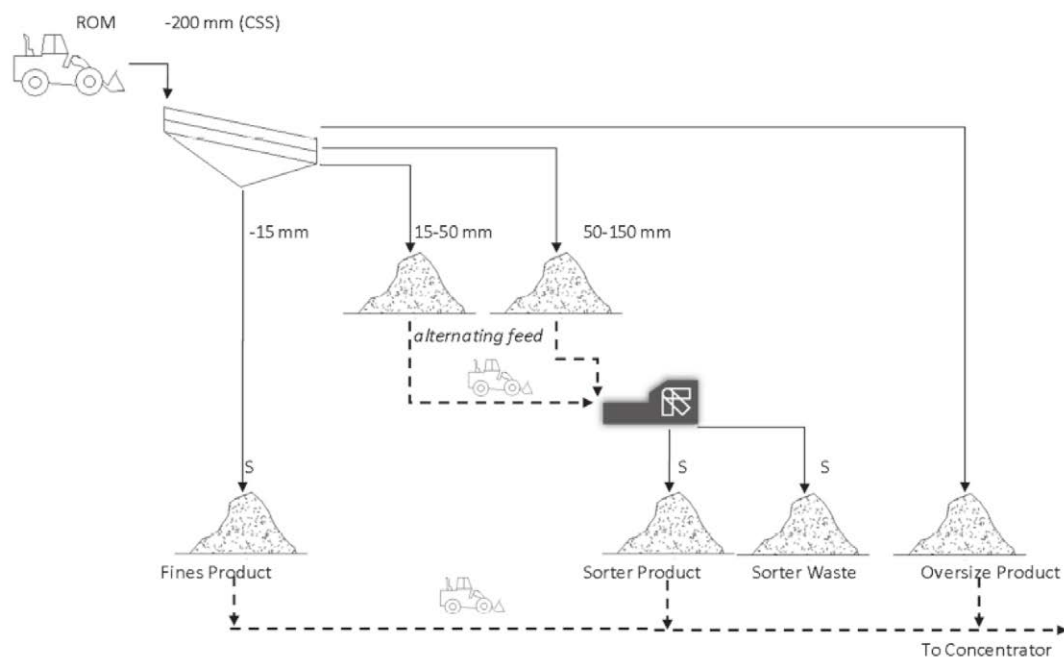


図1 SEMOS試験のフローシート
(出典：IMPC2016論文集より引用)

表1 SEMOS試験結果

Pilot test	Size range mm	Capacity t/h	Fraction	Weight %	S %	Cu %	Pb %	Zn %	Ag g/t
	15-50	50	ROM Feed	100	6.53	0.27	0.10	2.52	23.78
	15-50	50	Product	65.0	9.48	0.40	0.15	3.80	35.50
	15-50	50	Waste	35.0	1.06	0.03	0.01	0.15	2.00
	15-50	50	Recovery	-	94%	96%	95%	98%	97%
	50-150	200	ROM Feed	100	9.56	0.40	0.23	5.33	57.77
	50-150	200	Product	65.0	14.00	0.59	0.34	8.04	82.90
	50-150	200	Waste	35.0	1.30	0.05	0.03	0.29	11.10
	50-150	200	Recovery	-	95%	96%	96%	98%	93%

(出典：IMPC2016論文集より引用)

サイズになるまでサイクロンによって分級されて磨鉱工程に繰り返されるが、一部はサイクロンを短絡して浮遊選鉱工程に混入し、回収されことなく尾鉱に流れてしまう。

2-2. 目的・課題

上記のとおり、浮遊選鉱プロセスにおいて $200\mu\text{m}$ を超えるような粗粒の鉱石の回収率向上を目的としてEriez Flotation Division社によって開発されたHydroFloat™を銅鉱山の尾鉱（選鉱で有用鉱物を回収したあとの残渣）に適用し、その効果を検証する。

2-3. HydroFloat™の原理および特徴

HydroFloat™は、図2に示すとおり、下部が円錐状に絞られている流動層型の槽である。本装置の上部から固液比40-80%程度のスラリー（鉱石と水の懸濁物）

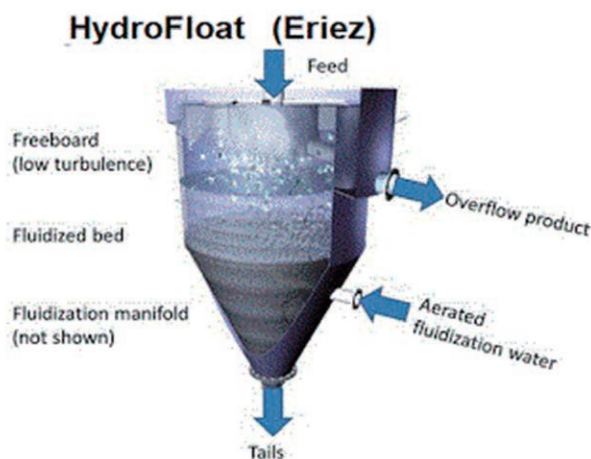


図2 HydroFloat™の概観
(出典：IMPC2016論文集より引用)

を投入し、装置下部に積った鉱石層から気泡を含んだ水を下から噴き上げるように注入することにより、流動化した鉱石層を通過する気泡が粒子表面に一部露出している目的鉱物に付着して粒子ごと上層に浮遊させる機構となっている。本装置は、通常の浮遊選鉱槽と比べて大きなせん断力は発生せず、また、気泡からの粗粒の離脱の一因となるフロス層（浮遊選鉱槽上部の気泡からなる層）も存在しないため、通常では低い回収率となる目的鉱物が一部しか露出していない粗粒を高効率で回収できる。気泡に付着しない脈石は装置下部の円錐部分で脱水されたのち排出される。

2-4. サンプル調整および実験方法

南米のとある銅鉱山から入手した最終尾鉱を、同社製の向流式分級装置（CrossFlow™）で粗粒と細粒に分離する。表2が示す通り、本実験のFeedとなる粗粒はUnder Flowとして回収され、重量比、平均銅品位、および銅の分配率はそれぞれ、22.8%、

0.239%、59.3%となっている。この粗粒をさらに篩い分けした粒径別の品位を表3に示す。粗粒中の150 μ m以下の粒子について銅の品位が平均より低くなっていることから、この粒度については浮遊選鉱で効率的に回収できていることが示唆される一方、425 μ m以上の粗粒においては銅品位が0.3%以上と高くなっていることがわかる。この粗粒をHydroFloat™に投入し、流動層が安定した状態で回収される粗粒について分析した。

2-5. 実験結果

試験結果を以下の表4に示す。最終尾鉱（表4でいうPlant Feed）を分級して得られた粗粒に対して、HydroFloat™を用いたところ、得られる粗粒産物の重量比、銅品位および銅の分配率は最終尾鉱の値を100%とするとそれぞれ3.3%、1.008%と35.8%となった。分級での粗粒側への銅の分配率が表2から59.3%とあるので、HydroFloat™による粗粒からの銅の回収率は60%程度（35.8%÷59.3%）と思われる。

表2 最終尾鉱中の粗粒（Underflow）および細粒（Overflow）の品位分析

	Grade (%)			Distribution (%)		
	Feed	Overflow	Underflow	Feed	Overflow	Underflow
Mass	--	--	--	100.0	77.2	22.8
Cu	0.092	0.048	0.239	100.0	40.7	59.3
Mo	0.010	0.009	0.016	100.0	64.3	35.7
Fe	4.17	4.25	3.88	100.0	78.7	21.3
S	1.66	1.68	1.59	100.0	78.2	21.8

（出典：IMPC2016論文集より引用）

表3 粗粒（Underflow）の粒度別の品位分析

Size (Microns)	Mass (%)	Assays (%)			
		Cu	Fe	S	Mo
+425	18.9	0.306	2.5	0.6	0.015
425 x 300	27.7	0.268	2.5	0.6	0.015
300 x 150	49.3	0.168	3.1	1.0	0.016
-150	4.1	0.109	23.0	15.6	0.014
Overall	100	0.219	3.6	1.4	0.015

（出典：IMPC2016論文集より引用）

表4 HydroFloat™ 試験結果

Stream I.D.	Mass (%)	Grade (%)			Distribution (%)		
		Cu	S	Mo	Cu	S	Mo
Plant Feed	100	0.092	1.7	0.010	100.0	100.0	100.0
Coarse Product	3.3	1.008	9.3	0.045	35.8	18.3	14.9

（出典：IMPC2016論文集より引用）

3. 操業改善

Red Dog 鉱山における微小硫化鉱物の回収率改善 (Improving Fine Sulfide Mineral Recovery at the Red Dog Operation)

Teck Alaska Incorporated: B. Lacouture and B. Wilson

Teck Metals Limited: J. Oliver

Ausmetec Pty Ltd: B. Lumsden

3-1. 背景

Red Dog 鉱山は1989年に開山した米国・AK州にある世界最大規模の亜鉛・鉛・銀鉱山であり、その鉱床は地質学的に堆積岩内亜鉛-鉛鉱床に分類される。主たる鉱物は存在順に石英、閃亜鉛鉱、硫化鉄、重晶石、方鉛鉱であり、開山から現在に至るまでの平均鉛品位はZn:20.5%、Pb:5.6%、Ag:97g/tである。

同鉱山においては、採掘された鉱石は重量の80%が粒径75 μ m以下 (P80:75 μ m) になるまで湿式粉碎され、スラリーは以下に示す浮遊選鉱プロセスに供される。浮遊選鉱プロセスは大きく分けて以下の3工程に分けられる。

➤ Pre-Flotation 工程

スラリーに試薬を投入せずに空気を吹き込み、気泡に付着して浮いてくる不純物の有機炭素や硫黄を除去する。

➤ Pb Flotation 工程

Pre-Flotation 工程から供されたスラリーに捕収剤と呼ばれる試薬を投入し、Pb 鉱物を泡に吸着させてPb 精鉱として回収する工程。この際、Zn 鉱物は抑制剤と呼ばれる試薬で泡に付着しないよう表面処理されるため、この工程では回収されずに次の工程に供される。

➤ Zn Flotation 工程

活性剤と呼ばれる試薬を用いて抑制されているZn 鉱物の表面を洗浄することによって、捕収剤によりZn 鉱物表面に泡が吸着してZn 精鉱として回収される。

3-2. 目的・課題

Red Dog 鉱山では鉱物粒径が細かく、それぞれの鉱物同士を単体分離して高品位のPb 精鉱およびZn 精鉱を生産するため80%が75 μ mといった比較的細かい粒度まで鉱石を粉碎している一方、粉碎する過程において浮遊選鉱で効率的に回収できない微細な粒径の割合の増加により、Pb およびZn の回収率が低下するという課題に直面している。同鉱山では、尾鉱中に含まれるPb およびZn 鉱物の半分以上が10 μ m以下の微粒子であることが分かっている。

以上から、Red Dog 鉱山ではこれらの微細なPb お

よびZn 鉱物の回収率改善を目的として、Pb およびZn 鉱物を選択的に凝集させる磁気凝集装置 (ProFlote™) を Flotation Plant に導入して実験を行った。

3-3. ProFlote の原理および特徴

ProFlote は Autometec 社が開発した磁気凝集装置の商品名で、内部にネオジム磁石を備えた円筒状の棒のような装置である。これを図3に示すように Flotation の槽内のスラリーに浸して磁場を加えることで、強磁性の鉱物と常磁性の鉱物の一部が磁化 (磁石になる) し、互いに凝集する。一方、脈石である珪石のような鉱物は反磁性体であるため、凝集することはない。この原理により10 μ m以下のような浮遊選鉱で効率的に回収できない微小有価鉱物の見かけの粒径が増大し、気泡との接触確率が増大することで回収率が向上することである。さらに、同社が出願した特許資料 (Patent No. : US 7429331) によると、一度磁化して凝集した常磁性の鉱物の一部が磁場から離れた後に、スラリーポンプでの輸送や機械攪拌に晒されても分解することなく数時間凝集し続けることが観察されたとあり、Flotation 工程においてProFlote を設置していない後段の槽でも、それらの凝集した鉱物については回収が期待できるものと思われる。

ProFlote が適応可能とする有用鉱物は、黄銅鉱、斑銅鉱、硫鉄ニッケル鉱、閃亜鉛鉱、また金やPGM を含んだ硫化鉱石と同社 Web Site に記載があるが、後述する本装置の適応結果には磁力凝集の対象とはならない反磁性体の方鉛鉱も含まれている。金氏らの研究 (1986年) によると鉱石の磁化率は産地により鉱床学的成因が異なれば同一の鉱物であったとしても鉱物の磁化率に差が出る上に、同一の鉱床であったとしても閃亜鉛鉱のように鉄の固容する量によって磁化率

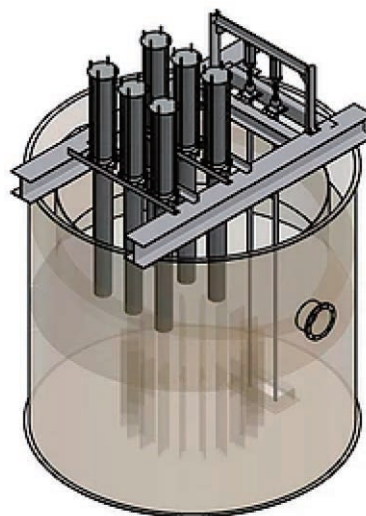


図3 ProFlote™ の概観
(出典：同社 Web Site より引用)

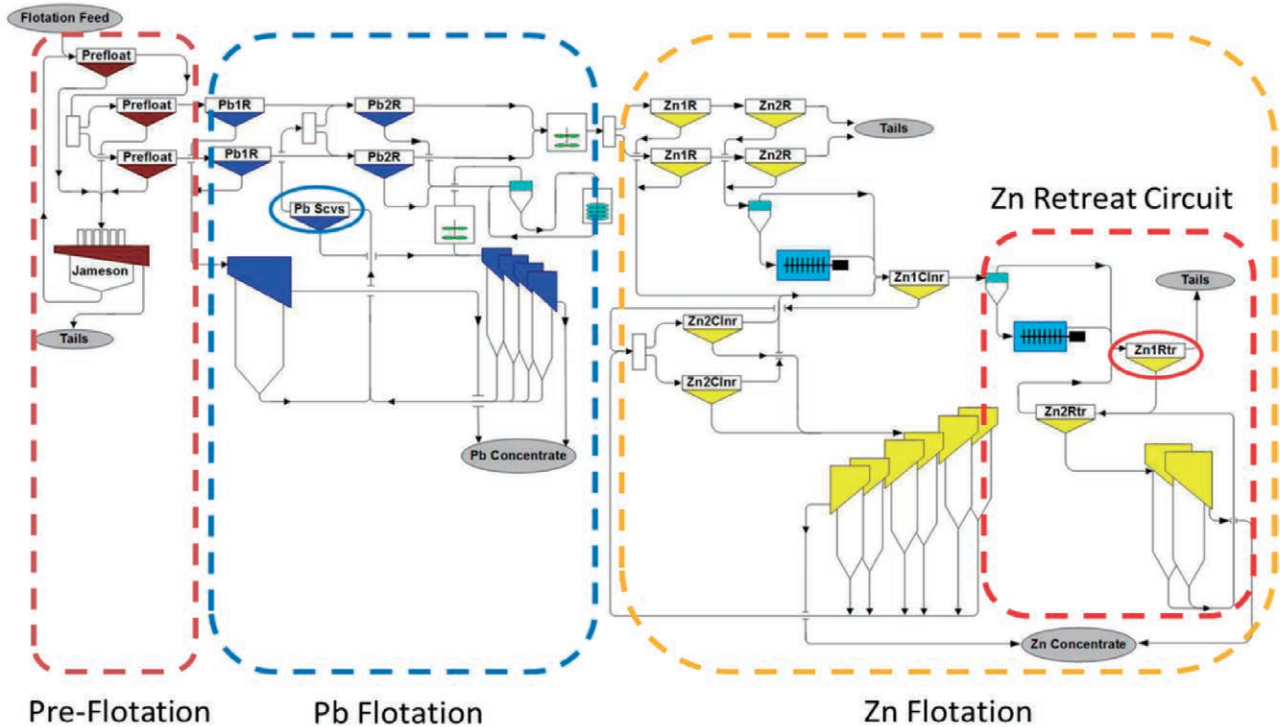


図4 Red Dog 鉱山の浮遊選鉱プロセスフロー

(出典：IMPC2016論文集より引用)

が変化することから、実際の鉱石への本装置の適応結果については純粋な鉱物の磁化率データや鉱石の目視での観察から推測されるものとは異なることがあると思われる。

3-4. 実験方法

Red Dog 鉱山において微細な鉱物が尾鉱として多く排出されていると思われる以下の2か所に本装置を設置し、それぞれに対して1日交替で装置を稼働させた場合 (ON) と稼働させない場合 (OFF) で得られる結果を統計処理 (Paired t-test) して比較した。

➤ Zn Retreat Circuit

Zn Retreat Circuitは前述のZn Flotation工程の一部に属し、図4に示すプロセスのフローシートで赤い点線で示される。この中の、Zn 1st Retreatの槽 (赤い円) に設置した。

➤ Pre-flotation and Pb Scavenger

Pre-flotation工程は比較的高い固液比で浮遊選鉱を行うため、微細な鉱石が気泡への付着ではなく、水とともに移動してフロス層 (Flotation槽上部の気泡からなる層) に巻き込まれて不純物と一緒に尾鉱として排出されてしまうことから、本装置によって凝集させてこうした巻き込みを防ぐ効果の検証のために設置した。また、それと同時に事前の試験結果から、通常反磁性体である方鉛鉱にも同鉱山では有効であることが示唆されたため、その効果も併せて確認する目的でPb Flotation中のPb Scavenger槽 (青い円) にも設置した。

3-5. 実験結果

➤ Zn Retreat Circuit

表5が示す通り、装置を稼働した場合 (ON) と稼働していない場合 (OFF) では、ONの時のほうがZn Flotation工程トータルでのZn回収率およびZn品位がそれぞれ0.7%、0.2%向上することが分かった。この表におけるNo of pairsとはONの日と翌日のOFFで1ペアとし、合計で47ペア (94日間) 実験をしたことを意味する。Confidenceとは、回収率であれば各ペアでのONとOFFの回収率の差を47ペア統計処理して得られる信頼度である。Znの回収率および品位がともに高いレベルの信頼度であることから、本装置は微細な閃亜鉛鉱を凝集させる効果があったといえる。

表5 Zn 1st Retreat でのProFlote試験結果

	%Zn Rec	%Zn Grade
ON	85.2	56.2
OFF	84.5	56.0
Difference	0.7	0.2
No of pairs	47	47
Confidence	96%	95%

(出典：IMPC2016論文集より引用)

➤ Pre-flotation and Pb Scavener

ProFloteをPre-flotationとPb Scavengerに設置した場合、表6のとおりZn Flotation工程トータルのZn品位はほとんど変化が見られなかったものの、高い信頼度でZn回収率が0.8%向上し、尾鉱中のZn品位は

0.22%減少することがわかった。この理由として、発表の中では、微細な閃亜鉛鉱が凝集することによるPre-flotationでの巻き込みロスが少なくなったことよりも、Zn Flotation工程において気泡と接触する確率が向上したことによる寄与が大きいと推察されている。

表6 Pre-flotation and Pb ScavenerでのProFlote試験結果

	%Zn Rec	%Zn Grade	%Zn Final Tailings
ON	85.4	55.5	2.46
OFF	84.6	55.6	2.68
Difference	0.8	0.1	0.22
No of pairs	45	45	45
Confidence	99%	low	99%

(出典：IMPC2016論文集より引用)

3-6. 経済的効果

上記の回収率及び品位改善から見込まれる経済効果は、Zn Retreat Circuitでの試験の場合は23,420ドル/日、Pre-flotation and Pb Scavenerの場合は17,200ドル/日と計算された。この計算には、一般的な買鉱条件や輸送費、足元の金属価格等を考慮しているが、ProfloteをONにしたときのOPEXはほぼ無視できるほど小さいため考慮していない。

おわりに

本稿ではIMPC2016で発表されていた講演のうち、非鉄金属鉱山で実際に導入され始めた比較的新しい技術・装置について紹介した。ほかにも操業改善や新規技術の導入に関する試みがいくつか発表されていたが、それら中で収益性の改善に効果があると認められた技術については、今後他の鉱山でも導入の検討が進んでいくと思われる。しかしながら、鉱床的にもプロ

セス的にも全く同一の鉱山は存在しないため、新規技術・プロセスの導入に当たっては他の鉱山の成功事例をそのまま適用することは難しく、一からその鉱山独自のものとする検討が必要と思われる。

本報告が、鉱山技術に関係する方々の参考になれば幸いです。

(2016.12.22)

参考文献

- Gaudin, A.M.; Groh, J.O.; Henderson H.B. 1931. Effects of particle size on flotation. Am. Inst. Min. Metal. Eng., Tech. Publ. 414, 3-23
- Barry, L.; Robert, M. Apparatus and Process for inducing magnetism. U.S. Patent 7,429,331. Sep-30-2008.
- 日本鉱業会誌/102-1176 ('86-2)「各種硫化物の磁気的性質」金宮三、鈴木光郎、松岡功