豊羽選鉱場における浮選分離の推移について*

白 井 凱 也**

Changes in Flotation Practice at Toyoha Concentrator

Yoshiya USUI

1. 結 言

豊羽鉱山は昭和27年1月に石山選鉱場において 6,000 t/月の規模で操業を再開し、その後逐次拡張を重ねて、昭和42年4月には 35,000 t/月の処理となった。

一方、石山選鉱場は出鉱坑口の本山地区より約 30 km のところにあり、この間をトラックにて粗鉱運搬を行うという制約があった。このため昭和41年に増産計画を立案するに当り、選鉱工場のあり方について詳細な検討を行った結果、本山地区に新選鉱場を建設することが経済的かつ効率的であるとの結論に達した。

本山新選鉱場は昭和42年7月に建設に着手し、昭和44年4月より 45,000 t/月の規模で操業を開始し、同時に石山選鉱場は廃止した。

その後、本山選鉱場は昭和46年に 60,000 t/月の処理能力まで増強された^{1),2)}。

この間、一貫して豊羽鉱石の特性を考慮した浮選分離の向上について幾多の改善が積み重ねられてきた。

豊羽鉱山の鉱石は鉱床の生成に起因する鉱石の易酸化性のために各鉱物が幅広い浮遊性をもっていること、および銀の含有率が高く、この分離成績が収益に影響することなどが浮選分離を複雑困難にしている。

本報では、石山選鉱場時代の末期から現在に至る間にこれらの課題に対処するために行ってきた浮選分離の諸改善の推移について触れてみたい。

2. 豊羽鉱山の地質、鉱床および鉱物

2.1 地質・鉱床

豊羽鉱山付近の地質は新第三紀中新世の地層から成り、泥岩および礫岩を主とする本山層とこれをおおって変朽安山岩を主とする長門層が発達している。

現在稼行中の本山鉱床群は、この本山層の礫岩、黒色泥岩および長門層の安山岩、同質凝灰岩類を主要な母岩とし、その裂かを充填した浅熱水性裂か充填型鉱床で、現在東西約 3 km、南北約 2 km、深度 300 m までが開発されている。

2.2 鉱 物

主要鉱石鉱物は、方鉛鉱、閃亜鉛鉱、および黄鉄鉱であり、少量の黄銅鉱、菱マンガン鉱、自然銀、輝銀鉱、磁鉄鉱および赤鉄鉱などを伴う。

母岩は安山岩、泥岩、凝灰岩などであり、絹雲母化、緑泥石化、珪化、粘土化作用を受けている。脈石は石英、緑泥石、方解石、絹雲母などである。

粗鉱の主成分分析値は第1表のとおりで、これをもとに主要鉱物の組成を求めると、黄鉄鉱15.3%、閃亜鉛鉱10.1%、方鉛鉱2.8%である。

鉱石は一般に結晶質で、小さい晶洞空隙が多い。閃亜鉛鉱は Fe 2%程度のものが多いが、Fe 12%程度のものまであり組成に広い幅がある。また閃亜鉛鉱の一部分は黄鉄鉱および石英と非常に細かく結合している。方鉛鉱は主に閃亜鉛鉱と共生しており、一部には両者が非常に

第1表 粗鉱の主成分分析値

Au	Ag	Pb	Zn	Fe	Mn	Cu	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
g/t 0.3	94	% 2.39	6.77	10.96	0.93	0.03	11.84	52.65	8.45	0.42	1.19

* 昭和53年6月13日本会第60回例会において発表

** 豊羽鉱山(株)選鉱課長
昭和53年4月21日受理

細かく結合しているものがある。黄鉄鉱は微晶の集合体をなし、結晶の発達不完全であるために酸化し易い特色がある。銀鉱物の大半は輝銀鉱および自然銀であるが、その他輝銅銀鉱、銀黄鉄鉱およびAs系、Sb系の銀鉱物も存在する³⁾。また黄鉄鉱および脈石鉱物中に超微粒で含有されている銀分がある。

3. 豊羽鉱石の浮選特性

3.1 鉱石の酸化性

豊羽鉱床は浅熱水性の鉱脈型鉱床で、比較的新しい時期に生成したものである。

黄鉄鉱はその生成時期が広い範囲にあると見られ、その結晶発達が不十分で不安定なものが多いと考えられて

いる。黄鉄鉱は一般に酸化され難いとされているが、当鉱山の黄鉄鉱は酸化され易く、これは上記のように結晶の不規則性によるものと考えられている。

閃亜鉛鉱は単独ではその酸化性は他鉱山産のものと同程度で小さいが、黄鉄鉱と混合した場合には亜鉛の溶出量が急速に増加する。

方鉛鉱についても黄鉄鉱との共存によって急速に酸化が促進されることが確認されている。

第1図および第2図はそれぞれ当鉱山の方鉛鉱および閃亜鉛鉱に黄鉄鉱を種々の割合で混合して放置酸化を行って非硫化物の生成度合を調べたものである⁴⁾。すなわち黄鉄鉱の共存によって両者の酸化が著しく促進されることが認められる。

このような豊羽鉱石の易酸化性は坑内水が他鉱山に比べて異常に濃厚な Zn^{++} や SO_4^{--} イオン(Zn^{++} 400 ppm, SO_4^{--} 500 ppm)を含んでいることから首肯される。

3.2 一般的浮選特性

各鉱物の一般的な浮選特性を調べた結果は第3図および第4図に示すとおりである^{4), 5)}。

これによると、方鉛鉱は大部分が浮き易いが、一部分浮き難いものがある。閃亜鉛鉱は非常に浮き易い亜鉛か

第1図 黄鉄鉱の共存による方鉛鉱の酸化促進

第2図 黄鉄鉱の共存による閃亜鉛鉱の酸化促進

第3図 鉱物別浮選速度定数の分布 (SO₂ 不使用)

第4図 鉱物別浮選速度定数の分布 (SO₂ 使用)

第5図 酸化による浮遊性の変化

ら浮き難い亜鉛まで広い幅をもって分布している。SO₂は亜鉛の抑制には非常に有効であるが、SO₂を使用してもなお非常に浮き易い亜鉛が存在する。黄鉄鉱は非常に浮き易いのが大きな特色で、一部分の黄鉄鉱は方鉛鉱よりも浮き易い場合がある。

3.3 酸化による浮遊性の変化

一般に硫化鉱物は酸化変質により浮遊し難くなるが、豊羽鉱石を自然放置により酸化させて各鉱物の浮遊性の変化を調べると第5図のようになる⁴⁾。

酸化の進行によって方鉛鉱と黄鉄鉱の浮遊性は次第に低下するが、閃亜鉛鉱は逆に浮遊性が急激に増大する傾向を示している。しかもこの浮遊性の増大はさらに酸化が進んでも低下する傾向は示さない。

したがって当鉱山の浮選原鉱にはある酸化状態のきわ

第6図 硫酸銅活性に及ぼす鉱石酸化の影響

めて浮遊し易い閃亜鉛鉱と黄鉄鉱がある程度混在して方鉛鉱との分離が困難な状態を呈していると考えられる。

3.4 酸化した鉱石に対する各種選鉱剤の効果⁴⁾

1) 硫酸銅の活性効果 (第6図)

閃亜鉛鉱に対する硫酸銅の活性効果は酸化した場合でも同様で、添加量に応じて増大する。

黄鉄鉱は酸化しない場合には硫酸銅によりきわめてよく活性化されるのに反し、酸化が進むと急激に硫酸銅の活性効果がなくなる。

2) 青化ソーダの抑制効果 (第7図)

鉱石が酸化されていない状態では青化ソーダは閃亜鉛鉱および黄鉄鉱に対して抑制効果を示すが、酸化が適度に進行した状態では逆に浮遊を助長することが認められた。すなわち、当鉱山の閃亜鉛鉱および黄鉄鉱の抑制には青化ソーダのみでは難しいことが示唆される。

第7図 NaCN の抑制に及ぼす鉱石酸化の影響

第8図 酸化した鉱石に対する SO₂ の効果

3) SO₂ の効果 (第8図)

閃亜鉛鉱は酸化により著しく浮遊し易くなるが、SO₂ はこれを非常によく抑制する。黄鉄鉱は反対に SO₂ により浮遊が助長される。また方鉛鉱は SO₂ によりほとんど影響を受けないが、過剰に使用すると若干抑制される。

これより鉛-亜鉛分離には SO₂ がきわめて有効であることが示唆される。

3.5 一次スライムの浮選特性⁶⁾

水洗スライムには粘土分が少なからず含まれており、また鉱石自体が酸化され易い性質のため、とくにこの一次スライムの浮選性に特異性が見られ、浮選全般に及ぼす影響は無視できない。

一次スライムを単独に浮選した場合、通常のソーダ灰あるいは青化ソーダでは鉛-亜鉛分離が不十分で、SO₂ を使用した場合にのみ分離性が向上する。(第9図)

4. 豊羽鉱石の摩鉱特性

各鉱物間のほぼ単体分離する粒度は第2表のとおりである。

すなわち鉛と脈石は粗摩鉱で十分であるのに対し、亜

第9図 一次スライムに対する SO₂ の効果

第2表 各鉱物間の単体分離粒度

鉱物の組合せ	単体分離粒度
PbS — Gangue	70 mesh
ZnS — Gangue	145
FeS ₂ — Gangue	100
PbS — ZnS	350
ZnS — FeS ₂	145

鉛と硫化鉄は脈石とより細かく結合している。また鉛と亜鉛の結合は緻密であり、その分離には細摩鉱を必要とする。

5. 浮選分離方式の変せん

5.1 石山選鉱場時代の浮選系統 (第10図)

1) フラッシュ浮選方式 (S.32~S.40.9)

豊羽鉱山の摩鉱・浮選系統はいままでに述べてきた摩鉱特性^{7),8)}、および浮選特性を具象化したものである。

すなわち鉛の大部分は浮遊し易いが、亜鉛の大部分は浮遊し難く、一部分は浮遊し易い。硫化鉄については浮遊し易いものから浮遊し難いものまで幅をもって分布している。

また鉛と脈石は単体分離が容易で粗摩鉱で十分であるのに対し、亜鉛と硫化鉄はより細摩鉱を必要とする。したがって鉛に対しては過摩鉱防止と早期回収のために粗摩鉱(-200 mesh 40%)でフラッシュ浮選を行って大部分の鉛を回収し、その後再摩鉱(-200 mesh 50%)を行って残りの鉛を回収し、亜鉛と硫化鉄の分離にはその後細摩鉱を強化する方式をとった。

スライムはこれをサイクロンで分級後、粗粒部はフラッシュ浮選へ、微粒部は第2バルク浮選 (Zn-Sp バルク浮選)で混合処理することとした。

なお、亜鉛精鉱は全量 NaCN を用いて脱 Pb 浮選を行い Pb ≤ 0.8% としていたが、これについては後で触れる。

第10図 石山選鉱場時代の系統図

2) トップ細摩鉱方式 (S. 40.10~S. 41.8)

豊羽鉱石中に含まれる Ag の品位は高く、Ag の収入に占める割合は大きい。したがって Ag の問題を抜きにして Pb-Zn-Sp の分離を考えることはできない。

フラッシュ浮選時代の現場データを検討してみると、Ag については浮選トップ粒度を鉛粗選給鉱粒度 (-200 mesh 50%) にした方が Ag の鉛精鉱中への採取率は向上することがわかった^{9), 10)}。その結果、フラッシュ浮選方式を中止して細摩鉱を行ったのち浮選を行うことにした。浮選も従来の鉛中心の粗選をもう少し拡大して一部の浮遊し易い硫化鉄をもだき込んだバULK浮選とした。

3) 硫化浮選の挿入 (S. 41.8~S. 44.3)

鉛の採取率を上げるために、第1バULK浮選で逸損する鉛を回収する目的で硫化浮選 (一種の第1バULK清掃選) を挿入し、精鉱は亜鉛・硫化鉄分離浮選~脱 Pb 浮選系統送りとした。

この結果、亜鉛浮選系へ逃げる鉛の量が減少したので昭和41年には亜鉛浮選精鉱からの脱 Pb は中止した。

5.3 本山選鉱場の浮選系統

1) 本山選鉱場の基本系統

本山選鉱場を設計するに当って、選鉱プロセスの骨子は概ね石山選鉱場のそれに準じた¹⁾。

第11図 本山選鉱場摩・浮選系統図 (I)
(操業開始時 S. 44.4)

摩鉱はロッドミルとボールミルの2段摩鉱、浮選系統は前述の第10図(c)を骨子とした。ただし浮選機は石山選鉱場の No. 24 FW, No. 21 FW から No. 48 WN, No. 24 FW の組合せに変わった。

本山選鉱場の操業開始時の系統図は第11図に示すとおりである。

2) 硫化浮選→第1バULK清掃選の変更 (S. 44.9)

第1バULK浮選のあとに設けられていた硫化浮選を第1バULK清掃選とし、その精鉱を第1バULK精鉱と一緒に鉛分離浮選で処理するように変更した。

3) フラッシュ浮選方式の復活 (S. 44.11) (第12図)

本山選鉱場に移設後、逐次処理鉱量を増加させていったが、これに伴い分級効率が低下する傾向が見受けられた。これに対処し、Pb を早期に回収し Pb 採取率を上げるためにフラッシュ浮選方式を復活させた¹¹⁾。

この結果、浮選成績の向上は認められたが、一方鉛および硫化精鉱の粗粒化による沈殿の問題が生じたこともあり、その後昭和45年5月に本方式は中止した。

その際に、フラッシュ浮選尾鉱の分級用に挿入していたサイクロンを1次摩鉱回路の機械分級機と組合わせて2段分級を行うようにした。その結果、摩鉱、浮選はより安定した。

4) 脱 Pb 浮選の廃止¹²⁾ (S. 48.10~S. 53.3)

鉛の浮遊性に幅があり、Pb-Zn 分離がシャープに行えないことから、どうしても亜鉛精鉱へ鉛が逸損し、亜鉛精鉱中の Pb 品位が上昇する。このため、石山選鉱場時代の昭和31年より製錬側の要請もあり、亜鉛精鉱から

第12図 本山選鉱場摩・浮選系統図 (II)
(フラッシュ浮選方式 S. 44.11)

第3表 浮選機および再磨鉱ミルの配置（本山選鉱場）

主 な 変 更	区 分 工 程 名 機 種	スライム系	Pb・Sp・(Zn) 系			(Pb)・Zn・Sp 系					Sp 系	浮選機台数計	フローシート
			第1バルク浮選	同 清 掃	左 選 鉛 分 離 選	硫化浮選	亜鉛浮選	第2バルク浮選	脱 亜 鉛 選	脱鉛浮選	硫化浮選		
本 山 選 鉱 場 操 業 開 始 時 (S.44.4)	No. 48 WN	10	12		6	12	12	16	32	—	6	106	第11図
	No. 24 FW	—	—		14	—	8	6	18	16	—	62	
	No. 21 FW	8	—		—	—	—	—	—	—	—	8	
	B.M.	0.9 mφ			1.8 mφ			2.1 mφ	1.5 mφ			(計176区)	
フ ラ ッ シ ュ 浮 選 (S.44.11)	No. 48 WN		20	12	8		20	22	32	—	10	124	第12図
	No. 24 FW		—	—	26		16	6	18	8	—	74	
	No. 21 FW		—	—	—		—	—	8	—	—	8	
	B.M.				1.5 mφ			2.1 mφ	1.8 mφ			(計206区)	
脱 鉛 浮 選 廃 止 スライム単独処理中止 (S.48.10)	No. 48 WN		30	20	—		20	34	20		—	124	第13図に準ず
	No. 24 FW		—	—	50		16	6	26		12	110	
	No. 21 FW		—	—	—		—	—	8		—	8	
	B.M.				1.8 mφ, 1.5 mφ			2.1 mφ	1.2 mφ, 0.9 mφ			(計242区)	
現 在 (S.53.3)	No. 48 WN		30	20	—		20	34	20		—	124	第13図
	No. 24 FW		—	—	50		16	6	24		10	106	
	No. 21 FW		—	—	—		—	—	8		—	8	
	B.M.				1.8 mφ, 1.5 mφ			2.1 mφ	1.2 mφ, 0.9 mφ			(計238区)	

(註) B.M.=Ball Mill 型式はすべてチューブミル

のように選鉱成績も逐次向上した。

6. 選鉱成績の推移

第15図～第17図に本山選鉱場の選鉱成績の推移を示す。

石山選鉱場時代より行ってきた諸改善の積重ねの結果、Pb-Zn 分離が漸次改善され、その結果各精鉱のかなり

第16図 選鉱採収率の推移

第17図 精鉱品質の推移

の品質改善が達成できたことが示されている。

一方、銀の採収率はこの9年間に大幅に改善された。

7. 結 言

以上、豊羽選鉱場において行ってきた浮選分離の改善についてとりまとめた。

本報では主として処理方式の変せんを通してながめてみたが、この間摩鉱・分級および試薬条件などのきめ細かい改善も積重ねてきた。

その結果、選鉱成績の向上および処理系統の簡素化などの成果が逐次達成されてきている。

今後はさらに銀の採収率の向上、各精鉱品質の改善および原価低減等について検討を加えていきたい。

参 考 文 献

- 1) 深見 進, 菅原泰造, 越智 功: 豊羽6万t/月選鉱工場の建設について, 第22回日本鉱業協会選鉱青化現場担当者会議講演集, (1972)
- 2) 深見 進: 豊羽選鉱工場, 日本鉱業会誌, Vol. 86, No. 991, (1970)
- 3) 牛沢信人: 豊羽鉱山における銀および銀鉱物の存在状態, 鉱山地質, Vol. 14, No. 65-66, (1964)
- 4) 山崎成美: 豊羽鉱山における浮選について, 第13回日本鉱業協会選鉱青化現場担当者会議講演集, (1963)
- 5) 梶原敏孝: 浮選速度より見た豊羽鉱石について, 北海道鉱山学会誌, Vol. 19, No. 3, (1964)
- 6) 山崎成美: 豊羽鉱山における一次スライム浮選について, 浮選誌, No. 20, (1963)
- 7) 梶原敏孝: 最近の摩鉱操業より見た浮選成績の改善, 第15回日本鉱業協会選鉱青化現場担当者会議講演集, (1965)
- 8) 広田元英: 動力指数による摩鉱浮選操業の検討, 北海道鉱山学会誌, Vol. 22, No. 2, (1966)
- 9) 竹内正勝: 豊羽選鉱における銀分布の統計的解析, 浮選誌, No. 28, (1966)
- 10) 梶原敏孝: 豊羽選鉱工場における摩鉱浮選の現状と銀について, 浮選誌, No. 32, (1967)
- 11) 豊羽鉱山(株)選鉱課: 豊羽選鉱工場の近況と今後の進め方, 浮選誌, No. 50, (1973)
- 12) 梶原敏孝, 林 紀夫, 越智 功: 豊羽選鉱工場における選鉱操業および坑廃水処理操業の改善, 第25回日本鉱業協会選鉱青化現場担当者会議講演集, (1975)