

## VII. 非鉄金属の基礎知識

### 2.3.3. 非鉄金属資源の選鉱

このコーナーでは、これまで総論、資源概要、採掘関係について照会してきたが、選鉱関係については6号と7号に分けて掲載する。6号では技術関係の概要から尾鉱処理を紹介する。

#### 2.3. 非鉄金属資源の開発

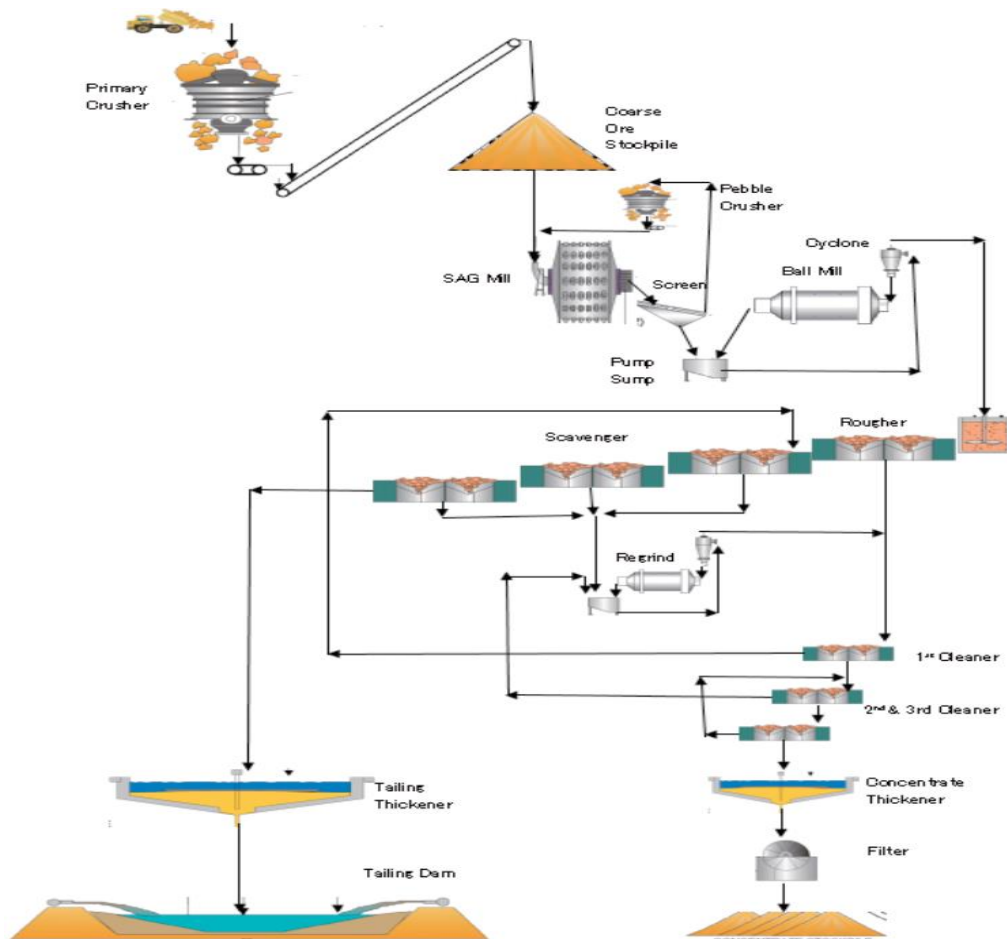
##### 2.3.3. 非鉄金属資源の選鉱

###### (1) 選鉱の概要

選鉱とは、採掘された鉱石（粗鉱）を有用鉱物と不用鉱物（脈石）に分ける工程であり、2種以上の有用鉱物がある場合は互いに分離して、鉱石の品位を高め製錬に適するようにする。銅鉱山の銅とモリブデンの分離、複雑鉱の銅、亜鉛、鉛の分離などが挙げられる。

破碎→粉砕→分離（分級）→選別→脱水が一般的な工程である。

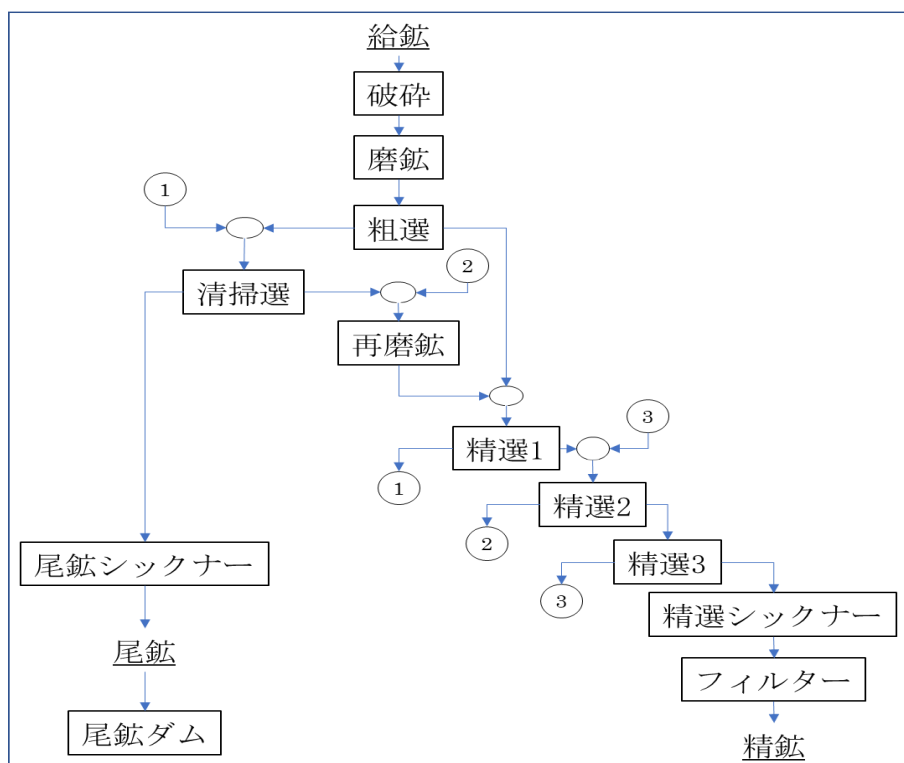
図 2-3-3-1 に選鉱の代表的フローシートを表す。



(出典) JOGMEC 2012 金属資源レポート「最新選鉱技術事情」

図 2-3-3-1 選鉱の代表的フローシート

図 2-3-3-2 に上記フローシートをブロック図で表す。



(出典) JOGMEC 2012 金属資源レポート「最新選鉱技術事情」を MERIJ 修正

図 2-3-3-2 選鉱ブロック図

選鉱の参考書としては、海外版であるが” Mineral Processing Technology” が良く用いられており、現在 2015 年発行の第 8 版が最新であるが、2006 年発行の第 7 版の和訳版が JOGMEC から配布されている。2013 年に JOGMEC の金属資源レポートに掲載された中村威一氏による「最新選鉱技術事情」は現場経験を踏まえた実践的で極めて示唆に富んだ内容の報告書である。

## (2) 選鉱方法

以下に選鉱の各工程を示す。

### ① 破碎工程

鉱山で採掘された鉱石を一次クラッシャーで粗割し、コンベアを用いてストックパイルまで運搬する。一次破碎機としては露天掘りなど大規模な採掘ではジャイレトリークラッ

シャー（Gyratory Crusher）が用いられることが多い。Gyratoryは旋回と言う意味で、旋回運動によりスリコギのようにして鉱石を破碎する工程である。



（出典）METSO Web page、SANDVIC Web page

図 2-3-3-3 Gyratory Crusher

図 2-3-3-4 Jaw Crusher

一次破碎機としては、ジョー・クラッシャーが用いられることもあるが、処理量大きい場合には、エネルギー効率、生産性などの優位性も含めてジャイレトリーが用いられることが多い。ジャイレトリーの欠点は設置スペース（特に高さ）が大きくなる点と粘着性の鉱石に対しては、いつきが生じやすい点である。

## ② 磨鉱工程

磨鉱工程は、もっともエネルギー消費の大きい工程であり、鉱石を実用的なサイズよりも細かくすべきではない。

磨鉱機は、ドラム回転式ミルと媒体式攪拌ミルに分類される。ドラム回転式ミルは比較的粗い粒子の磨鉱に使用され、5～250mmの大きさの粒子が40～300 $\mu$ mまで破碎される。ドラム式回転ミルには、ミル内の粉碎媒体により、ロッドミル（Rod mills）、ボールミル（Ball mills）、自生粉碎ミル（Autogeneous mills）などがある。

ロッドミルは、ロッドに挟まれることにより粉碎されるために、選択的に粗粒を粉碎し、比較的狭い粒度の産物が得られ大粒子やスライムは少ない。ボールミルに使用されるボールは単位重量あたりの表面積がロッドと比べて大きいために微粉碎の最終段階に適している。工程順としては、ロッドミル→ボールミルとなる。

近年は自生粉碎（AG：Autogeneous Grinding）と半自生粉碎（SAG：Semi-Autogeneous Grinding）が利用されてきた。AGミルは粉碎媒体として鉱石自体を利用するドラム回転式

ミルである。SAG ミルは、粉碎媒体に鉱石自身にボール（鋼球）を加えた半自生式ミルであり、ボールミルと比較するとドラム径が大きく、ボール投入量を減らしている。SAG ミルは、運転コストが安く、粘性のある鉱石も処理できる利点があり、最近の大規模鉱山で広く採用されている。現在は多くの場合、SAG ミルを一次破砕機として、ボールミルを2次破砕機として使用している。SAG ミル、ボールミル、ペブルクラッシャー、サイクロンを組み合わせた磨鉱工程を図 2-3-3-7 に示す。

SAG のメーカーは、基本的には Metso Minerals、Outotec Oyj、FLSmidth Minerals の3社であるが、Metso Minerals と Outotec Oyj は 2020 年に合併する予定であり、選鉱機械メーカーの寡占化が進む見込みである。

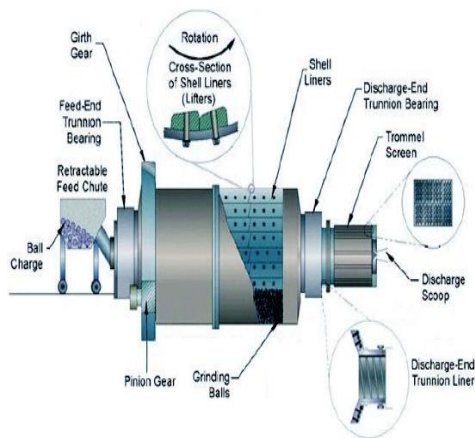


図 2-3-3-5 ボールミル

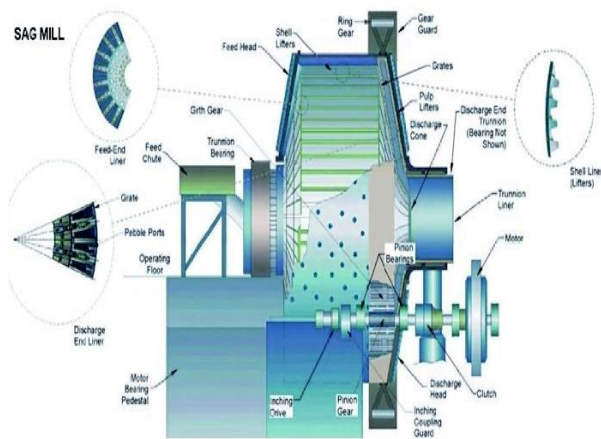
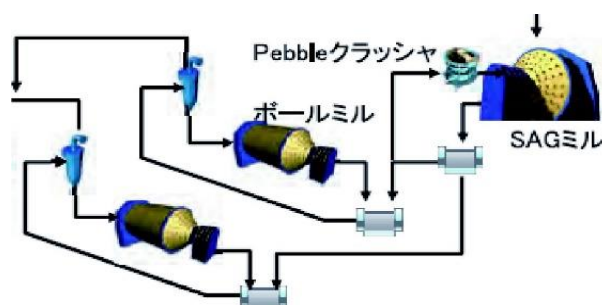


図 2-3-4-6 SAG ミル

(出典) JOGMEC 2012 金属資源レポート「最新選鉱技術事情」



(出典) JOGMEC 2012 金属資源レポート「最新選鉱技術事情」

図 2-3-3-7 磨鉱工程例

磨鉱工程で二次あるいは三次の破碎工程として、SAG ミルに代わり High Pressure Grinding Roll (HPGR) が採用されることがある。図 2-3-3-8、写真 2-3-3-1 に HPGR の模式図と写真を示す。

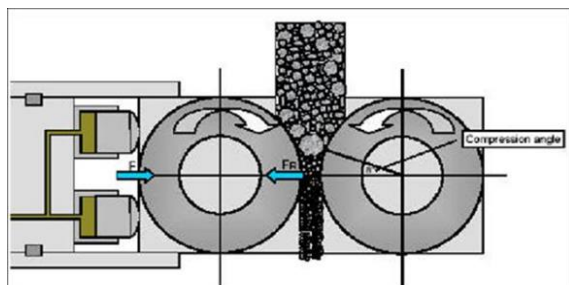


図 2-3-3-8 HPGR 模式図



写真 2-3-3-1 HPGR

(出典) 資源大学講義資料

HPGR は、供給された鉱石を二つのロールで圧砕する機構でセメント業界などでは長く用いられてきたが、近年は固い鉱石に対しても用いられるようになってきた。銅鉱山ではセロベルデ（ペルー）、シエラゴルダ（チリ）でも採用された。セロベルデ鉱山では 2006 年に、二次破碎にコーンクラッシャー 4 台、三次破碎（磨鉱）に HPGR 4 台、磨鉱工程にボールミル 4 台を使用する工程を採用し、その後の拡張工事で、更に増強を実施した。

SAG ミルは、1 台当たりの処理量が大いため大型の銅鉱山でも 1 台で操業することが多い。そのために SAG ミルが故障あるいはメンテナンス停止した場合には、選鉱工程全体が休止状態になる。HPGR の場合は並列に複数設置が可能であり、全体の工程を止めずに、修理などを行える。また、エネルギー効率の点で HPGR は SAG ミルよりもかなり優位性が、浮選給鉱のサイズも安定している。

### ③ 分級工程

分級とは、粉体を粒子径・密度・形状などによって区別する操作をいい、篩分け、乾式分級、湿式分級がある。鉱山では、湿式分級で遠心力を利用する液体サイクロンが設置面積も少なく、設備費が安いので使用されることが多い。液体サイクロンは、懸濁液に分散している固体粒子を、遠心力を利用して沈降分離する分級機である。図 2-3-3-9～2-3-3-10 にサイクロン分級機の構造を示す。

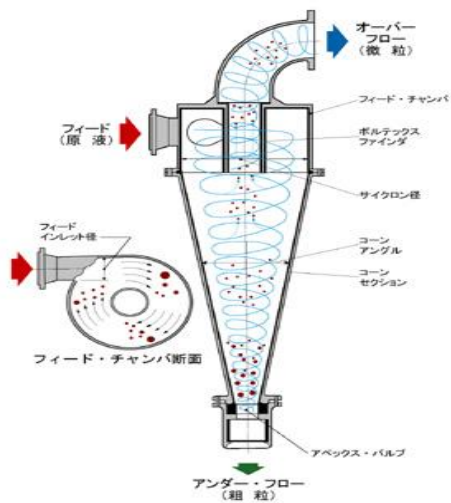


図 2-3-3-9 サイクロン

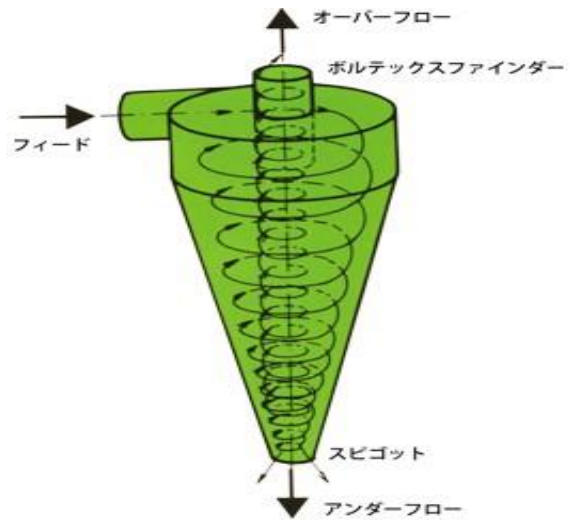
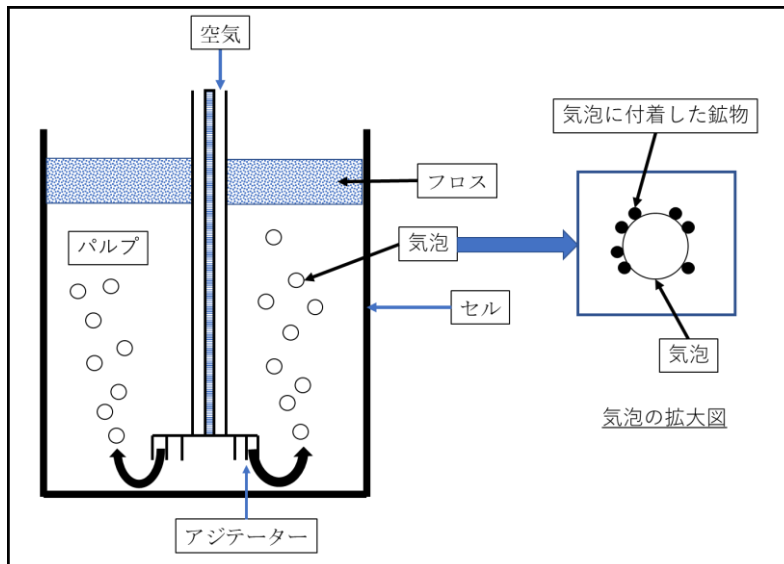


図 2-3-3-10 サイクロン

(出典) Nippo Web page、ラサ商事 Web page

#### ④ 浮遊選鉱 (浮選)



浮選は、選鉱の代表的な選別方法であり、有価鉱物と不価脈石鉱物の表面特性の差を利用する物理化学的な選別方法である。浮選の原理を図 2-3-3-11 に示す。

(出典) MERIJ 作成

図 2-3-3-11 浮選の原理

攪拌機は、パルプ層での粒子と気泡の衝突を促進するための乱流を起こし、有用金属と気泡の接着で粒子がフロス層に運ばれ、有価金属が回収される。浮選は数段の浮選槽により実施される。

浮選工程で有用鉱物を選択的に回収するために、各役割の試薬が用いられる。試薬の種類としては捕収剤、気泡剤、抑制剤、活性剤、pH調整剤、分散剤、凝集剤として分類される。捕収剤は鉱物表面に付着してその疎水性（または親気性）を助長し、気泡への接着を容易にする。最も広く使われている捕収剤はゼンセートである。気泡剤は、パルプ内での気泡の生成を安定化し、適度に強固なフロス層を作る目的で添加され、浮選速度の向上に繋がっている。抑制剤は、複雑硫化鉱で、亜鉛を抑制して銅を浮遊させるなどに使用される。活性剤は特定の鉱物の捕収効果を高めるための試薬で、例えば、亜鉛を抑制して銅を回収した後、改めて亜鉛を浮遊させるために硫酸銅を添加するなど使用される。pH調整剤は、特定の鉱物、捕収剤に適切なpHを調整するために使用される。硫化鉱の浮選は通常アルカリ性溶液中で行われる。粗選系統と精選系統でpHを変化させることもある。通常アルカリに調整する試薬として石灰化ソーダ灰が使用される。石灰は安価であるが、相当量使用するために合計コストは高くなる。分散剤は、鉱石に粘土が含まれている場合に使用されることが多い。凝集剤は、シックナーで濃度を上げるために沈降速度を上げる目的で使用される。



(出典) 三井金属鉱業ワンサラ鉱山

写真 2-3-3-2 浮選槽の配置

## ⑤ 脱水工程

脱水工程は、主にシックナーとフィルターに分類される。



(出典) Outotec Web page, Pan Pacific Copper Web Page

写真 2-3-3-3 シックナー

シックナーは、沈殿により懸濁液の濃度を増加させるために用いられる。パルプは中央部分に供給され、清澄水は周囲の樋へオーバーフローし、タンクの底部全体に沈降した個体は、濃縮パルプとして中央の排泥口から引き抜かれる。放射状の回転アームに、中央の排泥口の方へ固体をかき集めるブレードが吊るされている。シックナーは、尾鉱と清澄水の分離と精鉱と清澄水の分離に使用される。また、酸性水の処理などの使われる場合はクラリファイヤーと称される。

フィルターは精鉱の脱水に使用され、オリバーフィルターなどが使用されているが、標高の高い鉱山では外気圧が低く真空ポンプによる気圧差が生じ難いことから、毛細管現象を利用したセラミックフィルターや、機械的な圧力と長い環状ろ布を用いるフィルタープレスなどが用いられる。



(出典) Outotec Web page

写真 2-3-3-4 セラミックフィルター

写真 2-3-3-5 縦型フィルタープレス

## ⑥ 尾鉱処理

鉱山からは、採鉱工程から出るズリ (Waste) と選鉱工程から出る選鉱尾鉱 (Tailing) が発生する。露天掘りの場合は大量のズリが発生し、ズリ堆積場が景観に大きな影響を与えることが多い。選鉱尾鉱は通常、ポンプを使って廃滓ダムと呼ばれる堰で固めた設備に保管される。廃滓に含まれる水は極力鉱山で再利用する、あるいは排水処理をした後に地域の排水システムに放出される。廃滓の管理は、閉山後も鉱山会社の責任であり、廃滓ダムの決壊は、周辺環境および安全面への深刻な影響を与える可能性がある。廃滓ダムからの排水管理も鉱山会社の責任となる。