

IV. 非鉄金属の基礎知識

2.3.3. 非鉄金属資源の選鉱

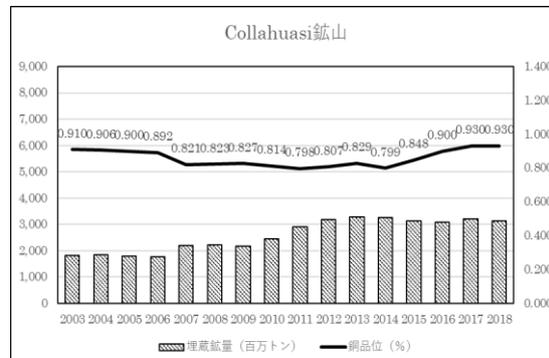
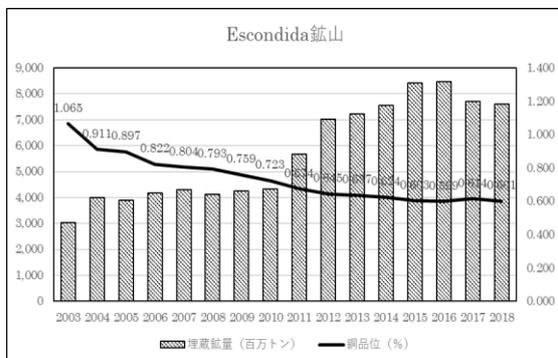
前回は技術関係の概要から尾鉱処理を紹介したが、7号では選鉱が当時抱える問題について掲載する。

(3) 選鉱技術の課題

① 鉱石の変化への対応

各鉱山で扱う鉱石の構成は異なる。さらに同じ鉱山であっても採掘箇所や深度により鉱石の構成は変化する。同じ銅鉱山であっても、地表近くの孔雀石（理論銅含有率 57.5%）などの酸化銅鉱主体の酸化鉱帯（SX-EW 溶媒抽出で電気銅を生産）、輝銅鉱（理論銅含有量 79.9%）や斑銅鉱（理論銅含有量 63.3%）などの二次富化帯、黄銅鉱（理論銅含有量 34.6%）など中心の初生黄銅鉱帯など鉱石の構成は変化する。鉱石の変化に応じて粉碎の程度、pH の調整、試薬の添加量の増減などを選鉱操業は変化させる必要があり、現在ではオンライン分析機など活用して、変動の方向性から選鉱条件をコントロールする計装技術が重要となっている。

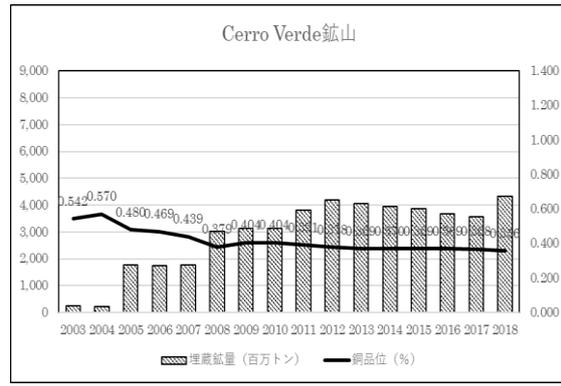
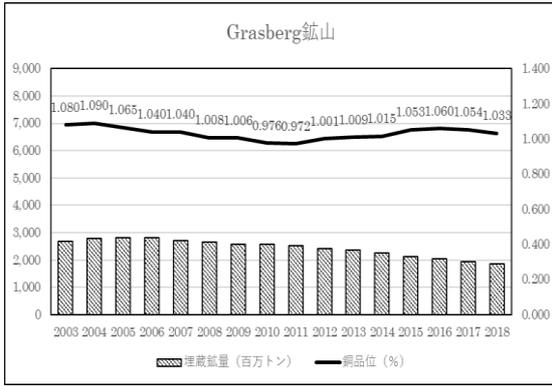
銅鉱山では一般に深部に向かうほど、初生鉱が増え、粗鉱品位、精鉱品位共に下がる傾向にある。キャッシュフローの観点からも、高品位の部分から優先的に採掘を進めるのが常套手段であることも品位低下の一因である。図 2-3-3-12～2-3-3-19 に主要銅鉱山の埋蔵鉱量と銅品位の推移を示す。データは、各社のアニュアルレポートをベースとしており、埋蔵鉱量（Ore Reserves）は確定鉱石埋蔵量（Proved Ore Reserves）と推定鉱石埋蔵量（Probable Ore Reserves）の合計としている。



(出典) BHP Billiton、Anglo America plc アニュアルレポート 2008-2018, S&P Global

図 2-3-3-12 Escondida

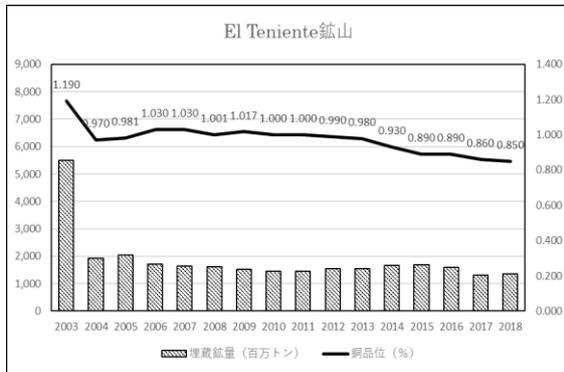
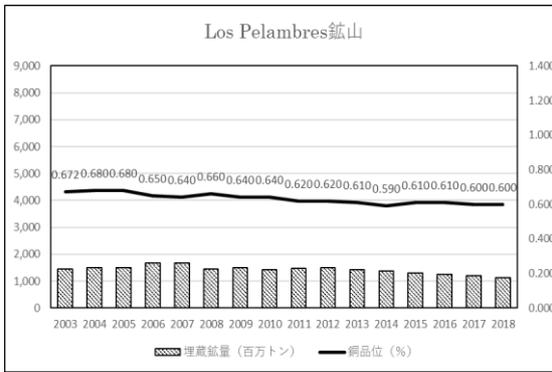
図 2-3-3-13 Collahuasi



(出典) Freeport-McMoran Inc. アニュアルレポート 2008-2018, S&P Global

図 2-3-3-14 Grasberg

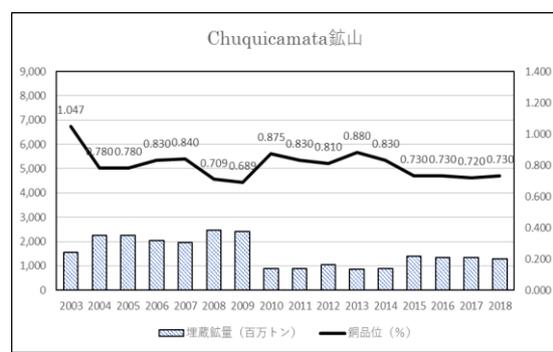
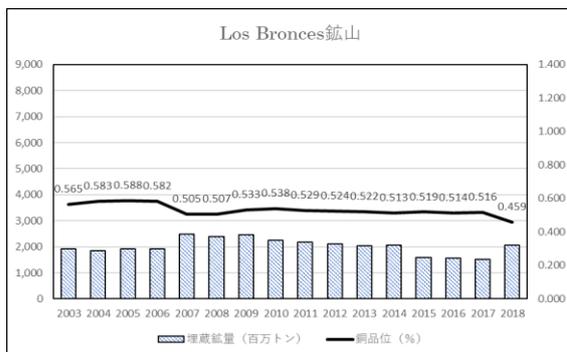
図 2-3-3-15 Cerro Verde



(出典) Antofagasta Plc. Codelco アニュアルレポート 2008-2018, S&P Global

図 2-3-3-16 Los Pelambres

図 2-3-3-17 El Teniente UG



(出典) Anglo America Plc. Codelco アニュアルレポート 2008-2018, S&P Global

図 2-3-3-18 Los Bronces

図 2-3-3-19 Chuquicamata UG

鉱山によっては、埋蔵鉱量と銅品位が急激に変わる年がある。例えば、図の2-3-3-12のEscondida 鉱山は、2010年から2012年にかけて、銅品位が大きく落ちているが、埋蔵鉱量が大幅に増えている。これは採掘対象銅品位（カットオフ品位：（注）参照）を下げて採掘対象鉱量（埋蔵鉱量）を増やしたと推定される。

（注）カットオフ品位

埋蔵鉱量とは、元々経済的に採掘可能な鉱量であり、銅鉱山であれば、銅の価格や鉱山の操業費用が変動すれば、採掘対象鉱量も変化する。例えばある銅価格で、銅品位が0.5%以上あれば経済的に採算が合う場合には銅の品位が0.5%以上の鉱体を採掘対象とし、0.5%未満の部分はズリとして処理する。銅の価格が大幅に上昇すれば、例えば銅品位0.4%の石も採掘しても採算が取れるために、ズリではなく鉱石になり、採掘対象鉱量が増え、鉱山ライフが伸びる。この採掘対象を決める品位をカットオフ品位と言う。ただし、例えば金を含む銅鉱山であれば、銅と金の含有価値の総和で対象鉱量が決まる。

埋蔵鉱量と品位は、銅価格などの経済的な要素によっても変化するが、露天掘り鉱山では深部に向かうほど、一般に銅品位の低下が見られる。

上記6 鉱山ではEl Teniente 鉱山だけが坑内掘り（UG: Under Ground）であるが、Los Bronces 鉱山と Chuquicamata 鉱山は露天掘りから坑内掘りに移行する計画である。採掘法の移行に伴い、採掘対象鉱量と品位が変化する可能性もある。

ペルーの Antamina 鉱山は銅鉛亜鉛の複雑鉱の鉱山であり、埋蔵鉱量も銅鉱体と銅亜鉛鉱体と分けて管理されている。銅精鉱と亜鉛精鉱はそれぞれ分離されて、同じ1本の精鉱パイプラインで交互に港近くの脱水場に輸送されている。図2-3-3-20と図2-3-4-21にAntaminaの銅鉱体、銅亜鉛鉱体の確定埋蔵鉱量と品位を示す。採掘品位はどちらも下落傾向にある。

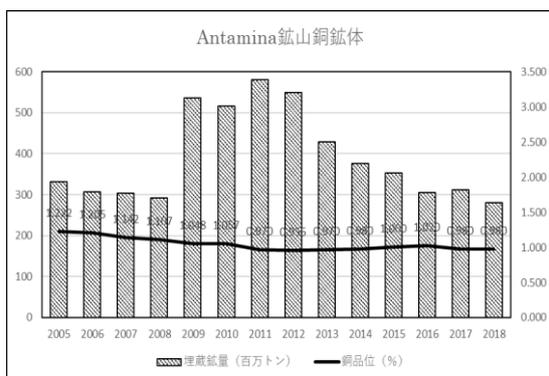


図 2-3-3-20 銅鉱体

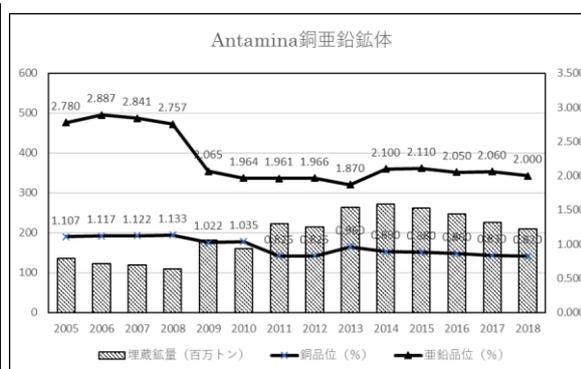


図 2-3-3-21 銅亜鉛鉱体

（出典）Rio Tinto アニュアルレポート 2008-2018

鉱物の組成からみても粗鉱の銅品位低下は、銅精鉱中の銅品位の低下と鉄と硫黄の増加を伴う場合が多い。鉄の増加はスラグ発生量の増加を、硫黄の増加は硫酸の発生量増加を生じさせる。スラグ、硫酸共に外販先の確保が課題となる。選鉱過程での課題としては黄銅鉱と似た挙動を示す黄鉄鉱を浮選工程で除去できれば銅精鉱の鉄、硫黄の削減に繋げることが可能となる。

② 消費エネルギー

鉱山で電力消費が多いのは選鉱工程であり、特に粉碎工程の電力消費が多い。S&P の推定では、Escondida 鉱山の山元コストの内、選鉱の電力コストが約 20%を占めている。過剰粉碎を避けることが重要であり、磨鉱工程で SAG ミルに代わって HPGR を採用する傾向も電力消費削減の方策の一つである。

BHP Billiton PLC は、チリの Escondida 鉱山と Spence 鉱山の操業に用いる電力について、2020 年代半ばまでに再生可能エネルギーに全面的に切り替えることを目指している。

③ 選鉱用水の確保

ペルー南部からチリにかけて多くの鉱山が存在するが、砂漠地帯もあり用水の確保が重要な問題となる。鉱山で使用する用水を海水の淡水化によって賄う、あるいは淡水化した海水をバーターで鉱山下流の農業地区などに提供する動きが広がりつつある。また、インドネシアの Batu Hijau 鉱山では、海水浮遊選鉱を実施している。

2015 年に商業生産を開始したシエラゴルダ銅鉱山では、海洋から取水して 140Km のパイプラインで山元まで送水した海水をそのまま浮遊選鉱に使用している。モリブデン浮選用水などのために、山元にある淡水化プラントで海水から得た純水を用いている。今後のチリの新規鉱山では用水の確保は極めて難しく、海水利用が必須である。

また、尾鉱堆積場の上澄水をポンプアップして、選鉱用水などに使用する Zero Discharge の適用もされてきている。

④ 尾鉱の管理

廃滓堆積場の管理は、鉱山操業中も閉山後もオーナーの責任となる大きな課題である。廃滓ダムの設計自体は土木技術者の役割であるが、廃滓 (Tailing) のサンドとスラリーの分離は選鉱工程で生じ、サンドがダムの堰として使用されることも多く、サンドのスラリーの発生量を試算するのは選鉱技術者の役割となる。

近年でもカナダ (銅鉱山)、ブラジル (鉄鉱石鉱山) などで廃滓堆積ダムの決壊事故があり、従業員の生命、地域の環境に対して大きな社会問題となっている。

[近年の廃滓ダム決壊の例]

2014年8月、カナダ Imperial Metals 所有の Mount Polley 銅・金鉱山の廃滓堆積場の決壊事故では10百万m³の水と4.5百万m³のスラリーが流出したとされている。

2015年11月、ブラジル Samarco 社 (Vale と BHP Billiton が株主) の Mariana の鉄鉱山の廃滓堆積場の決壊事故では、43.7百万m³の廃滓が流出、約200家屋が破壊され、死者は19名に達した。

2019年1月、ブラジル Vale 所有の Brumadinho 鉄鉱山の廃滓堆積場の決壊事故で12百万m³の廃滓を流出させ、2019年11月現在で死者256名、行方不明者14名に達する大惨事となった。この尾鉱堆積場の決壊事故を契機として、世界の資源メジャーや日本の非鉄鉱山会社などで構成する International Council on Mining & Metals (ICMM) では、尾鉱堆積場の安全基準を見直す動きが出てきている。

⑤ 選鉱技術者の育成

世界は資源で覇権を握ろうとする動きがあり、中国のレアメタル資源の囲い込み、欧米の資源メジャーの合併、買収による資源の寡占化が進む中、資源を持たない日本は、海外から安い資源を購入し加工する立場から、自ら海外の鉱山開発に関与せざるを得ない立場に変わりつつある。関与の仕方としては、直接鉱山経営をするだけでなく、融資やマイナー投資もあるが、案件の適切な評価ができなくてはならない。評価をする上でも、鉱山の主な販売物である精鉱を製造する立場の選鉱技術者の役割は極めて大きい。

選鉱技術は、破碎、粉碎、分離（浮遊選鉱）、分級、凝縮、沈降、脱水など物理学、化学、計装など多岐にわたる知識と現場経験の必要な技術と言える。残念ながら日本国内では2001年に三井金属の神岡鉱山が閉山し、2006年には日鉱金属（現 JX 金属）の豊羽鉱山が操業休止し、日本国内には石灰石山を除くと、菱刈金鉱山しかフル操業の鉱山はない。菱刈鉱山では金鉱石をそのまま東予工場へ搬出しており、選鉱工程は持たない状態であり、選鉱技術者が現場経験を積める場が国内にほとんど存在しない。また大学の工学部においても資源と言う名称のある学科はほとんどなく、選鉱専門の講座、授業も極めて限られている。海外の投資先鉱山を研修の場として利用するなどして、現場経験を積むと同時に海外で外国人技術者やコンサルタントと協業する、あるいはマネージメントする技術を学ぶ必要がある。

一方選鉱技術は実鉱山の現場だけではなく、都市鉱山と言われる金属のリサイクル分野でも、その前処理工程で選鉱の分離技術は非常に有効である。