

採鉱技術を中心とした世界の鉱山技術動向

金属資源技術グループ 企画調査チーム

はじめに

独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構では、国際会議への参加や海外駐在員による非鉄金属に関する情報収集を通して、資源開発における技術課題の現状の把握・対応策の検討を目的とした動向調査を行っている。ここでは、採鉱技術についてここ数年の動向について取りまとめた。

近年の世界の資源開発の大きな変化としては、まず BRICs 諸国を中心とした経済発展に伴う金属消費量の増大に関連した生産量の増大及びそれに伴う鉱体の深部化、鉱石品位の低下、ペナルティー元素（As、Hg 等）の不純物の増加が挙げられる。

チリ等の既に開発中の斑岩銅鉱床では、銅品位が 1 ~ 2 % と銅品位の高い二次富化帯が終掘に向かっており、二次富化帯の下部の 0.5 ~ 1 % と銅品位が低い初生鉱化帯へと採掘深度が深部化している。CODELCO（チリ銅公社：Corporacion Nacional del Cobre de Chile）の Chuquicamata 鉱山では、1915 年から露天採掘が開始され、以来 90 年にわたって採掘が続けられた結果、現在のピット深さは 850m に達しており、2013 年には深さ 1,100m となり、露天採掘による深部採掘では採算性が著しく低下することが予想され、2013 年にはパネルケービングによる坑内採掘開始予定である。このほか CODELCO では、Sur-Sur 鉱山（2013 年坑内採掘開始予定）、MM A. Hales 鉱山（Mansa Mina Alejandro Hales、2015 年坑内採掘開始予定）、Don Luis 鉱山（2026 年坑内採掘開始予定）で坑内採掘を開始する予定であり、現在の 1 日当りの坑内掘粗鉱生産量は 21 万 t 程度であるが、2017 年には 35 万 t まで増加する見通しである。

このような露天採掘から坑内採掘への移行は、これまでに Palabora（南ア）、Northparkes（豪）、Kidd Creek（カナダ）で行われている。今後、Bingham Canyon（米）、Grasberg（インドネシア）、Venetia（南ア）、Argyle、Mount Keith、Telfer（豪）等の各鉱山で露天採掘から坑内採掘に切替えを計画中または進行中である。Rio Tinto 社が操業する銅鉱山では、2014 年に露天採掘が終了し、坑内採掘へ完全移行する見込みである。

CODELCO によれば、銅品位が 1930 年代には 2 % を若干下回る程度であったものが、1980 年代には約 0.8 % まで低下し、20 世紀末には約 0.7 % まで低下している。採掘対象が低品位の初生硫化鉱（黄銅鉱）まで

拡大していることから、こういった低品位鉱の処理方法として、バイオリーチングプロセスの確立も急務となっている。

亜鉛については、現在、亜鉛の生産は硫化鉱からのものが 95 % を占めており、これまで亜鉛酸化鉱の処理は困難であるとされてきたが、亜鉛の SX-EW（溶媒抽出・電解採取）生産技術が確立され、2003 年にはナミビアの Skorpion 鉱山の亜鉛酸化鉱からの SX-EW による亜鉛生産が開始されている。今後、世界の亜鉛酸化鉱からの亜鉛生産量が増加することが見込まれている。

2 つめの世界の鉱物資源開発の大きな変化としては、大量生産による鉱山の競争力強化のための低コスト化が挙げられる。これは、“Mass Mining Technology” と呼ばれているが、“Mass Mine” とは坑内採掘の場合 10,000t/日以上粗鉱生産能力を有するもの、露天採掘の場合 30,000t/日以上粗鉱生産能力を有するものを指している（Brown, 2004）。今や世界の主要なベースメタル鉱床及び金鉱床の多くが“Mass Mine”によって採掘されている。

坑内で鉱石を大量に採掘するには、ケービング法が広く用いられている。ケービング法の一つであるブロック・ケービング（パネル・ケービング）技術は、これまでチリ・CODELCO の El Teniente 4-south を除いて、一般的には、軟岩盤への適用に制限されていたが、非鉄メジャーは豪州クイーンズランド大学の JKMR（Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre）で主催している国際ケービング研究（ICS: International Caving Study）に参加し、硬岩盤へのケービング適用可能性研究を行っている。

低コスト・大量採掘法の研究・成果の交流の場としては、「MassMin」会議がある。これは、大規模坑内採掘に関する経験や技術開発課題を共有するために発足したもので、1981 年にデンバー（米）、1992 年にヨハネスブルグ（南ア）、2000 年にブリスベン（豪）、2004 年にはサンティアゴ（チリ）で開催されている。「MassMin」会議は、技術・操業上の課題を話し合い、異なる採掘方法及びそのバリエーション、主要な新技術の導入で得られた専門知識を共有する最大の公開討論の場となっている。サンティアゴで開催された MassMin2004 では、採掘深度の増加、硬岩や大量な岩石の採掘、品位の低下、といった坑内大規模採掘に関する諸問題について、世界中の生産現場、研究機関から 117 件の講演が発表された。具体的テーマには、大

規模採掘における地盤特性、大規模採掘法の基礎及び実際、鉱山設計の基礎及び応用、重力流 (gravity flow)、地力学、鉱石運搬システム設計、補強、発破、引抜き管理、ケーピング伝播と陥没、岩石の前提条件、露天掘から坑内掘への転換、操業上の問題点、大規模採掘における自動化、地震と山はね、ケーピングに伴う坑内突風等が挙げられた。

2005年9月には、サンティアゴで CODELCO 主催の技術革新会議 (Technological Innovation Conference) が開催され、同社の技術革新に関する5つのセッション、すなわち、世界企業における技術革新モデル、CODELCO の技術革新の取組み、坑内採掘技術、バイオ湿式製錬技術、情報・通信技術、が設けられ、講演が行われた。

1. 採掘量・採掘深度の変化

1.1 露天掘鉱山

図1は、20世紀の初頭からの、その時点において世界最大規模の露天掘鉱山に関する1日当り粗鉱生産量の実績、及び今後予想される粗鉱生産量をコンパイルしたものである (Brown, 2004)。著名な Bingham Canyon 鉱山と Chuquicamata 鉱山を除いて、全期間にわたって操業している露天掘鉱山はない。データは、各種の公開あるいは未公開の出典から引用されており、ある場合には月当りのトン数、ある場合には年間当りのトン数で表現されているが、ここでは1日当りの平均トン数に換算してある。

図1は、世界最大級の露天掘鉱山の生産量が、過去100年間にわたり増加し続けていることを示しており、今後の10年間にわたっても増加し続けることが予測される。この生産量の増加は、機械化の増進及びブラスト・ホール・ドリル、ショベル、ローダー、トラックなどの設備の能力の増大に負うところが極めて大きい (Karzulovic, 2004)。地盤力学的観点から見て、同様のそしておそらくより重要な傾向は、図2に示すように、露天掘鉱山の採掘深度が時代と共に増加していることである。大半のデータが入手可能であるチリの Chuquicamata 鉱山では、1970年における採掘深度は開発前の地表下280mであったが、今日では約850mであり、今後10年間で1,100mに達する見込みである (Karzulovic, 2004)。

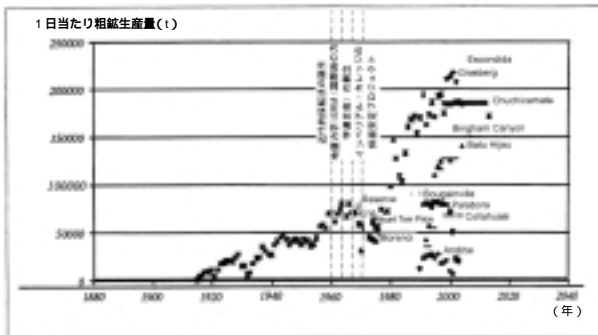


図1 大規模露天掘鉱山における1日当り粗鉱生産量の進展 (Brown, 2004)

図1と図2に示されるように、地盤力学の発展とその露天掘鉱山の斜面工学への適用に関して、いくつかの歴史的な出来事がある。1970年代以降の粗鉱生産量とピットの深さの増加は、当時特に注目されるようになった斜面安定に関する研究と時期的に一致する。最も代表的なものは、1960年代後半にロンドンのインペリアル・カレッジの Evert Hoek 教授が手がけたプロジェクトであり、それは影響力のある著書、「Rock Slope Project (岩盤斜面工学)」(Hoek and Bray, 1974) に報告されている。そして Canadian Pit Slope Project が1972年に開始され、その結果は1976年と1977年に出版された Pit Slope Manual に報告されている。

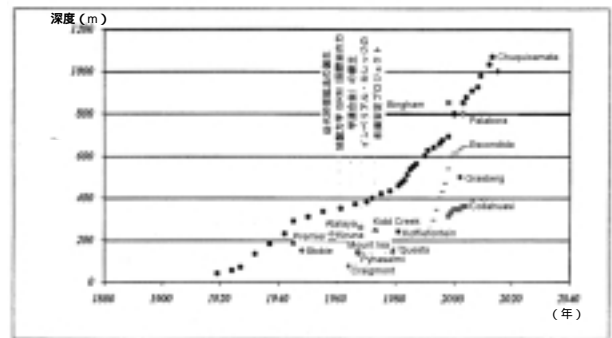


図2 大規模露天掘鉱山における深さの進展 (Brown, 2004)

1.2 坑内掘鉱山

図3は、その時点において世界最大規模の坑内掘鉱山のいくつかについて、1日当り粗鉱生産量をコンパイルしたものである。図3にプロットされたデータは、図1に示した露天掘鉱山についてと同様の方法により集めたものである。図3では、世界最大の坑内掘鉱山である El Teniente 鉱山が突出している。同鉱山では、現在1日当り約10万tの粗鉱を生産しており、さらに大幅な生産増を計画している。この鉱山の生産量は1940年までの最初の30年間に着実に増加し、その後おそらく第2次世界大戦のため、生産量増加率が低下したことが指摘される。増加率は、1960年代の半ばから再び飛躍的に上昇し、将来もこの全体的な増加傾向が続く予測となっている。

El Teniente 鉱山の生産量は Climax, El Salvador, Miami 及び San Manuel といったブロック・ケーピング法やパネル・ケーピング法で採掘している鉱山と同程度であったが、過去数回わずかに超えられたこともあった。

他の採鉱法により達成された最大の生産量は、スウェーデンのサブレベル・ケーピング法採掘の鉄鉱石鉱山によるものである。無充填採掘法による最大の鉱山においても、1日当り粗鉱生産量はケーピング法による鉱山の生産量よりも常に少ない。無充填採掘法による鉱山の現時点での最大の粗鉱生産量は、知られている限りでは Olympic Dam 鉱山の1日当り約25千tであって、近い将来、34千tに増加する計画である。一般論として、ストーピング法による鉱山の採鉱コストは、ケーピング法の2倍ないし3倍になると見られる。

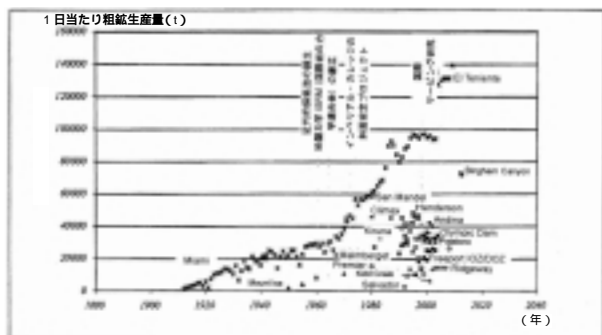


図3 大規模坑内掘鉱山における1日当たり粗鉱生産量の進展 (Brown, 2004)

図4は、大規模採掘法を用いる、選定された坑内掘鉱山における最大採掘深度の進展を示している。ここでも、El Teniente 鉱山に関し、最も整備されたデータセットが入手できた。図4は明らかに、採掘深度が増加していることを示している。そしてその増加率は時代とともに増大している。ここで定義されているような大規模採掘法を用いる鉱山の深さは、最もよく知られている南アフリカの深部採掘の金鉱山のような、平板状の鉱体を探鉱する鉱山ほどには深くない。しかしながら、これらの鉱山の深さは、いまや歴史的にみて相当なものとなっている。ブロック・ケーピング法を採用している Palabora 鉱山 (南アフリカ) のアンダーカット・レベルは地表下 1,200m であり (Calder et al., 2000)、Grasberg 鉱山 (インドネシア) の Deep Ore Zone も同程度の深さとなっている。Bingham Canyon 鉱山や Chuquibambilla 鉱山のように、フィージビリティあるいは計画の段階にあるブロック・ケーピング法及びパネル・ケーピング法による鉱山は、より深くなるであろう。深さ 1,000m 以上でのサブレベル・ケーピング法による採鉱が Kiruna 鉱山 (スウェーデン)、Perseverance 鉱山 (西豪州) 及び Ridgeway 鉱山 (豪州 New South Wales 州) において実施中、又は計画中である。大規模採掘法のうち無充填採掘法で最も深い鉱山は、知られている限りでは、加・オンタリオ州 Timmis にある Kidd Creek 鉱山であり、深さは約 2,000m であるが、今後約 10 年の間に 2,990m に達する計画である。別の無充填採掘鉱山としては、豪州 Mount Isa の Enterprise 鉱山が、地表面からの深さ 1,900m である。

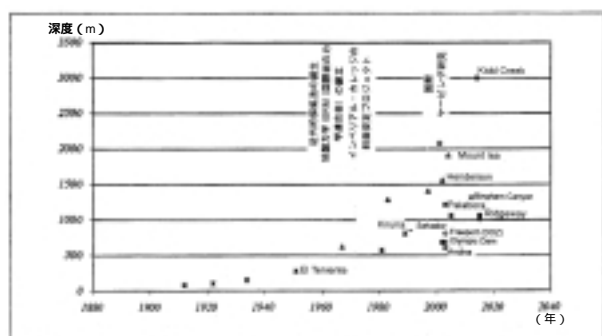


図4 大規模坑内掘鉱山における深さの進展 (Brown, 2004)

近代的なブロック・ケーピング法による採鉱の先駆となったのは 19 世紀末の、米国ミシガン州の Menominee Range における鉄鉱石鉱山である (Peele, 1941)。元来の Pewabic 法の改良型は、すぐにミシガン州の他の鉄鉱石鉱山で、また 20 世紀の初頭からは米国西部の銅鉱山でも開発された。完全なブロック・ケーピング法に発展するまでに、当初多くの鉱山は、例えばシュリンケージ法とケーピング法などを用いた後に、初期の切羽の間にある鉱柱を採取するという組合せた方法を採用した (Peele, 1941)。

1920 年代から 1930 年代までに、ブロック・ケーピング法は巨大で脆弱な鉱体を開発するために多くの鉱山で用いられるようになった。この期間に、この方法は、例えば加・ケベック州の King 鉱山 (アスベスト)、米国コロラド州の Climax 鉱山 (モリブデン)、チリの複数の銅鉱山に導入された (Peele, 1941)。初期のブロック・ケーピング法は手作業、運搬用の切上りを有するグリズリ及びスラッシャー法による積込みを用いた。適切な地盤工学的その他の条件の下で、1960 年代後半から LHD (Lode Haul Dump) 車両を用いる機械化された積込み法の導入によって、ブロック・ケーピング法を用いた鉱山の生産性は格段に向上した。機械化されたパネル・ケーピング法は、Henderson 鉱山が 1976 年に生産を開始したときに用いられ、1982 年には El Teniente 鉱山に導入された。

Peele (1941) は、サブレベル・ケーピング法 (SLC) は、20 世紀の初期にトップ・スライシング法の論理的な発展として Lake Superior Iron Range に導入されたと指摘している。それはまた同時期に、米国の数か所の鉱山でも用いられた。SLC はおそらく、1957 年からスウェーデンの Kiruna 鉄鉱石鉱山において初めて大規模に用いられた (Gustafsson, 1981)。このことは近代的な SLC 採鉱の発展の始まりをしるすものである。この方法は 1960 年代に、豪州、カナダ及び中国に導入された。

無充填採掘法とサブレベル・無充填採掘法は、特に幅が狭く平板状の鉱体において長い間実施されてきた。Peele (1941) は、サブレベル・ストーピング法は 1902 年頃にミシガン州の鉄鉱石鉱山で開発されたと指摘している。この採掘法は、カナダ及び米国の鉱染状の銅鉱体に用いられていたが、現在ではザンビアで、そして 1930 年代には豪州の Mount Isa 鉱山で用いられたこともある。LHD 車両の導入、穿孔・発破技術の進歩及び鉱山地盤力学の進歩により、1960 年代後半から 1970 年代にかけて、サブレベル・無充填採掘法とプラストホール・ストーピング法が適用され、鉱山の設計と生産量の増加に変化をもたらされた。多くの主要な金属鉱山地帯では、これらの発展により、適切な地盤工学的条件において、カット・アンド・フィル採掘法からこれらの採掘法への転換をもたらした。

ケーピング法によらない大規模坑内採鉱法の適用例は、豪州クイーンズランド州北西部にある Mount Isa

鉱山である。銀・鉛・亜鉛鉱石の坑内採掘は1932年に、銅鉱石の採掘は1943年に開始された。1963年までは、サブレベル・無充填採掘法が坑内採掘生産量の95%を占めていた。1963年から、二つの新しい採掘法が導入された。幅の狭い銀・鉛・亜鉛のRacecourse鉱体における機械化されたカット・アンド・フィル採掘法と500銅鉱体の南部におけるサブレベル・ケーピング法である(Davies, 1967)。1960年代後半から、大規模に機械化された、遅延充填によるサブレベル・無充填採掘法が、銀・鉛・亜鉛鉱体と銅鉱体の大部分に導入された。銀・鉛・亜鉛(今では、より単純に鉛として知られている)鉱体においてカット・アンド・フィル採掘法で掘り残された部分については、1991年からベンチ・アンド・フィル法に切り換えられた(Villaescusa, 1996)。開発を成功させ、これらの種々の採掘法を実施するには、地盤力学的インプットが最も重要であるということが、広く報告され認識されている。

2. 採掘技術における最近の課題

ここでは、鉱体の深部化、鉱石中銅品位の低下、不純物の増加、亜鉛酸化鉱石の処理、大量生産への移行、自動採掘システム、連続採掘法についてまとめた。なお、「3-6.連続採掘法」については、本誌2006年1月号p.173~181「国際会議報告-コデルコ社技術革新会議」にもまとめられているので参照されたい。

2.1. 鉱体の深部化 - 露天掘から坑内掘へ -

これまで、露天採掘から坑内採掘への移行は、Palabora(南ア)、Northparkes(豪)、Kidd Creek(加)で既に行われている。今後、Bingham Canyon(米)、Radomiro Tomic、Mansa Mina(以上、チリ)、Grasberg(インドネシア)、Venetia(南ア)、Argyle、Mount Keith、Telfer(以上、豪)等の鉱山で露天採掘から坑内採掘に切替えを計画中または進行中である。

Rio Tinto社が権益を保有する銅鉱山では、2004年に露天掘生産が85%を占めているが、2014年に露天採掘が全て終了し坑内採掘へ完全移行する見込み。

CODELCOが操業する鉱山では、銅品位1~2%と比較的品位の高い二次富化帯が終掘に向かっており、二次富化帯の下部の0.5~1%と銅品位の低い初生鉱化帯へと採掘対象が深部化してきている。(図5)



図5 斑岩銅鉱床の模式図 (Morales, 2005)

CODELCOにおける露天掘から坑内掘へ移行が予定されている鉱山は、Chuquicamata 鉱山(2013年パネルケーピングによる坑内採掘開始予定)、Sur-Sur 鉱山(2013年坑内採掘開始予定)、MM A. Hales 鉱山(Mansa Mina Alejandro Hales, 2015年坑内採掘開始予定)、Don Luis 鉱山(2026年坑内採掘開始予定)がある。

坑内採掘が増加している理由として、Rio Tinto社では、以下の2点を挙げている(Morgan, 2005)。

露天採掘では剥土比が上昇し、ズリが増加する鉱体の深部化に伴い、露天掘りでは剥土比が高くなってしまふ。鉱床はますます深部化し、ズリも増えていくことにより、運搬に係るエネルギーコストが上昇する。

鉱山の環境に対する影響を最小にする

坑内採掘は、視覚的インパクトが小さく、ズリの発生量が少ない。特に鉱山周辺で住民が生活しているところでは重要な要素である。

2.2. 鉱石中銅品位の低下、不純物の増加

鉱業は、採掘環境が日々複雑化する資源産業であると認識されている。その例として、鉱石品位の低下、採掘の深部化による諸課題の発生(例:坑内採掘では採掘対象の硬岩盤化、露天採掘ではピットの傾斜管理、運搬距離の増加)に対応する必要が生じている。CODELCOが操業する鉱山では、鉱石中の銅品位が1976年に1.7%以上あったが、2004年には0.94%まで低下、逆に鉱石中のAs、Bi等の不純物が増加する傾向にある(図6)。

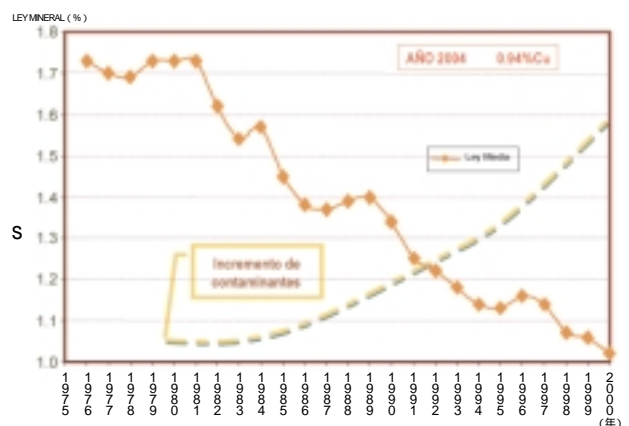


図6 CODELCOの鉱石品位の推移 (Morales, 2005)

2.3. 亜鉛酸化鉱石の処理

現在、亜鉛の生産は硫化鉱石からが95%を占めており、酸化鉱石からの亜鉛生産は年間28万tにしか過ぎない。これまで酸化鉱石の処理は困難であったが、近年、亜鉛のSX-EW生産技術が確立された。2003年にはナミビアのSkorpion 鉱山からのSX-EWによる亜鉛

生産が開始され、現在は年間 15 万 t を生産するレベルまで達している。酸化亜鉛による亜鉛生産量は、今後年間 55 万 t 程度まで増加するポテンシャルがある (Boni, 2005)。亜鉛酸化亜鉛のメリットは以下のとおり。

- 品位が比較的高い
- 地表に露頭がある
- 採掘コストが低い
- 探査が容易

亜鉛酸化亜鉛床は、Supergene deposit (浅成亜鉛床) と Hypogene deposit (深成亜鉛床) の 2 つに大別される。Supergene deposit は、風化に伴い生成したもので、Skorpion (ナミビア)、Angouran (イラン)、蘭坪 (中国)、Accha (ペルー)、Mae Sod (タイ) 等の亜鉛鉱山が知られている。Hypogene deposit は、熱水作用に伴い生成した亜鉛床で、Vazante (ブラジル)、Kabwe (ナミビア)、Beltana (豪州) 等の亜鉛鉱山が知られている。

亜鉛の硫化物としては、閃亜鉛鉱 (ZnS) が主体となっているが、酸化物としては smithsonite (菱亜鉛鉱: $ZnCO_3$)、hydrozincite (亜鉛華: $Zn_5(OH)(CO_3)_4$)、hemimorphite (異極亜鉛: $Zn_4(OH)Si_2O_7 \cdot H_2O$) 等がある。



図 7 世界の主要非硫化亜鉛亜鉛床位置図 (Boni, 2005)

2.4. 大量生産への移行

坑内で鉱石を大量に採掘する場合、ケービング法が広く用いられているが、最初のブロック・ケービング法による亜鉛鉱山は、1900 年代初頭の米国ミシガン州の Pewabic 亜鉛鉱山であったとされている (Peele, 1927)。チリにおけるブロック・ケービング亜鉛鉱山の全体コストは、1986 年の 7US\$/t から 2002 年には 4 US\$/t まで低減できるようになった (Fuentes, 2004)。

ブロック・ケービング技術は、これまで El Teniente 4-south を除いて、一般的には、軟岩盤への適用に制限されていたが、Rio Tinto、CODELCO、BHP Billiton 等の非鉄メジャーは、クイーンズランド大学 (豪) が主催する国際ケービング研究 (International Caving Study: ICS) に参加し、硬岩盤へのケービング適用可能性、深部ケービング技術 (地下 2,000m まで) 等の研究を行っている。

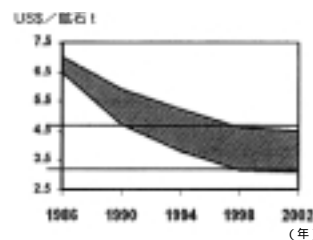


図 8 チリのブロック・ケービング亜鉛鉱山、全体コストの推移 (Fuentes, 2004)

2.5. 自動採掘システム (Auto Mine System)

- El Teniente 亜鉛鉱山 Pipa Norte 亜鉛床における例 -

CODELCO の El Teniente 亜鉛鉱山では、生産プロセスの自動化を進めており、その一環として、Pipa Norte 亜鉛床と Diablo Regimiento 亜鉛床の LHD の車両の自動化を行っている。大規模亜鉛鉱山開発への適用において、監視、計測装置及び自動化は、魅力的な技術的選択である。ブロック・ケービングなどの採鉱法は、安定した生産状態において大量の物質が移動するものであり、自動化された操業を適切に立証するものとなる。採鉱作業における高度の自動化は、円滑で合理化した採鉱プロセス及び操業に最も良く適用される。次の課題は、例えば 2 次破碎のように、プロセスの障害あるいは不連続性を克服することである。

自動化されたシステムに明白に期待される成果は、設備利用の高度化と操業単価の低減である。この目標を達成するためには、いくつかの最適化の段階を経なければならない。

選定された可動機械設備技術の現実の性能は、支援機能、インフラストラクチャー、ユーザーインターフェース及びユーザーの理解に依存する。状況に適した技術の最適化は、亜鉛鉱山のフィージビリティスタディにおいて益々重要な段階となっている。

与えられた状況において、様々に程度の異なる自動化の、技術的及び経済的の双方の観点からの入念な評価が自動化を行うにあたって優先されなければならない。Pipa Norte ブロック・ケービング亜鉛鉱山のための自動化を評価するにあたって、Sandvic Tamrock 社と El Teniente 亜鉛鉱山がとったアプローチは、与えられたプロセスと条件、自動化への適合性の再検討、及びシステムのリスクと臨界点の評価を含んでいた。そして、AutoMine™ を用いた実際の自動化のフィージビリティスタディが、全体的な経済性と選定された選択肢についての収益率について行われ、次に提案された自動化システムについての詳細な分析が行われた。

Pipa Norte 亜鉛床と Diablo Regimiento 亜鉛床は、プレ・アンダー・カットによるパネル・ケービング法によって、それぞれ 10,000 t/日及び 28,000 t/日を採掘しようとするものである。Pipa Norte 亜鉛床と Diablo Regimiento 亜鉛床のために計画されたプレ・アンダー・カットによるパネル・ケービングの操業においては、破碎された岩石はドロワー・ポイントを通して生産坑道上に自然落下する。穿孔発破あるいはその他の 2 次破

砕法によって、ドロウ・ポイントを塞ぐオーバーサイズの巨礫は破碎される。Pipa Norte 鉱床では、3台の Toro 0010C LHD が完全に自動化されており、それぞれの公称積載能力は 17.5 t である。

2 6. 連続採掘法 (Continuous Mining Process)

坑内採掘の増加に伴い採掘コストが上昇する傾向があり、坑内採掘を行う際の経済性を確保するため、CODELCO は坑内採掘鉱法の技術開発 5 年計画を 1999 年に開始し、技術革新のためのアライアンス、基礎研究、機器メーカーとの共同開発等を実施している。坑内採掘では、低コストで高い競争力を持つ坑内掘り鉱山操業を実現するために、連続採掘法といった大規模連続採掘技術の開発に取り組んでいる。

岩石破碎事前準備 (図 9) : ブロック・ケーシング実施に際して、採掘前の岩盤に水圧破碎等により事前に割れ目を形成し、技術的・経済的により効率の良い採掘を可能にする。

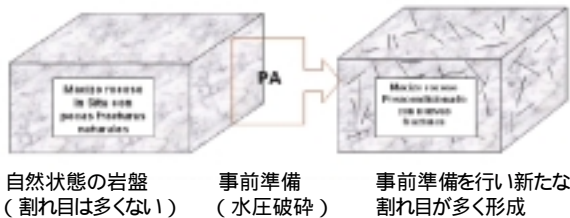


図 9 岩石事前破碎の概念図 (Geister and Baez, 2005)

本方法は、これまでに、Salvador 事業所、Andina 事業所 (2 回)、El Teniente 事業所で計 4 回の試験を実施している (47,000 m³、15,000t)。この結果、落下が良好、多くの割れ目が形成、新鉱画設定の準備が容易、鉱石塊のぶら下がり・いつきが減少する等、生産性の向上とコストの低減が達成できることを確認した (図 10)。

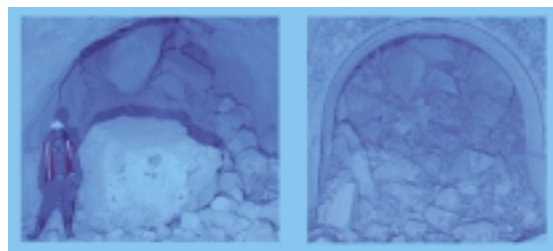


図 10 岩層の事前準備 (鉱石引き抜き口での碎鉱状態、Geister and Baez, 2005)

二次碎鉱 (小割り) 機 : 鉱井のいつき除去機かつ大型鉱石塊の小割り機の役目を担う。破碎効率の向上と作業における危険率が低下することにより、二次碎鉱工程の改善が期待できる。

坑内準連続採掘法 (図 11) : 低型破碎機の導入により破碎効率が向上、さらに主要運搬路にベルト・コンベアの設置が可能である。低型破碎機 (+ベルト・コンベア) は坑内に設置しやすく、低エネルギー消費、大破碎の能力があり、移動が容易で適応性が大きい利点がある。

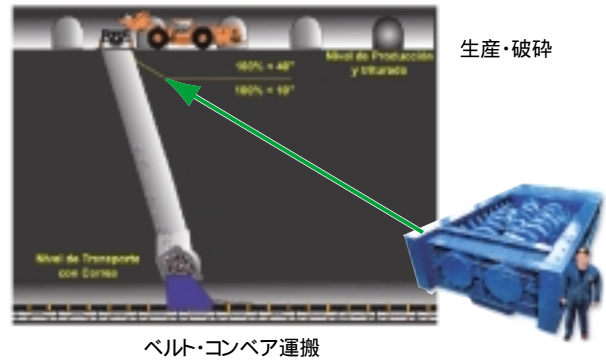


図 11 坑内準連続採掘法の概念図 (Geister and Baez, 2005)

連続採掘法 : 24 時間連続操業式採掘法であり、高度に機械化・自動化した方法

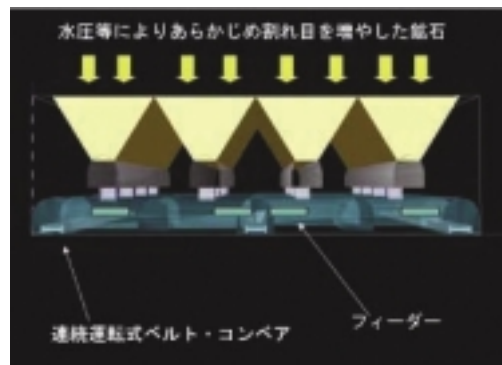


図 12 連続採掘法の概念図 (Geister and Baez, 2005)

連続鉱石引き抜き・運搬機 : 連続採掘法の実施のために、連続引抜機的设计・テストを行い、低コストのプロトタイプ式連続ベルト・コンベアの開発を行う。

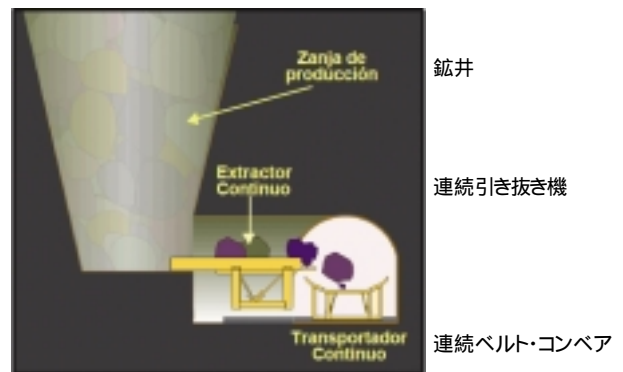


図 13 連続鉱石引き抜き・運搬機概念図 (Geister and Baez, 2005)

この他、将来の課題としては、坑道の連続開発、支保の補強と坑道建設、補給業務関連プロジェクトの推進等が挙げられる。

3. 各機関における研究開発の動向

ここでは、豪州クイーンズランド大学、CODELCO、Rio Tinto 社、Phelps Dodge 社の採掘法についての研究開発動向についてまとめた。CODELCO、Rio Tinto 社、Phelps Dodge 社における研究開発動向は CODELCO が 2005 年に開催した技術革新会議からの情報で、本誌 2006 年 1 月号 pp.173 ~ 181 「 - 国際会議報告 - コデルコ社技術革新会議」にもその内容がまとめられている。

3 1. JKMRC (豪州クイーンズランド大学)

豪州クイーンズランド大学の JKMRC (Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre) では、鉱業が直面している技術的問題を解決するため、鉱山会社や鉱山機器メーカーと共同で鉱業に関する各種の研究プロジェクトを実施している。

(1) 第 1 期国際ケーピング研究 (International Caving Study: ICS-I, 1997 ~ 2000 年)

坑内で鉱石を大量に採掘するには、ケーピング法が広く用いられている。ブロック・ケーピング技術は、1980 ~ 90 年代に、強固かつ亀裂の少ない岩盤に対する適用に関心が高まっていたが、1982 年に始まった CODELCO の El Teniente 4-south を除いて、一般的には、軟岩盤への適用に制限されていた。現在、共同研究の進展により、これまでの軟岩盤で得られた経験が、硬くて亀裂の少ない岩盤へ適用可能かどうか議論されている。

国際ケーピング研究 (International Caving Study: ICS) は、1997 年から 2004 年にわたり行われ、第 1 期は、1997 ~ 2000 年に Rio Tinto、Northparkes、CODELCO、PT Freeport Indonesia、NORANDA、Newcrest、TVX Gold、BHP、De Beers の計 9 企業の参加を得て実施された。この期間に硬岩盤へのケーピング適用可能性研究が行われ、破断化、亀裂シミュレーション、アンダーカット技術、リスク解析を盛り込んだ “Block Caving Geomechanics” という報告書がまとめられた。

(2) 第 2 期国際ケーピング研究 (International Caving Study: ICS-II, 2001 ~ 2004 年)

続く第 2 期の 2001 ~ 2004 年には、CODELCO、Rio Tinto、Sandvik、Northparkes、Newcrest、LKAB、WMC Resources、Anglo American、De Beers の 9 社の参加により実施された。この期間は、ケーピング技術プロセスとして、ブロック、パネル、サブレベルの各ケーピング方法における重力フロー、鉱石引抜調整、水圧破碎による事前破碎、露天採掘から坑内採掘への

移行、ブロック・ケーピングによる破断化データベースの研究が行われた。その結果、重力フローのメカニズム解明やシミュレーション、鉱石引抜法、硬岩盤に対する事前破碎 (水圧破碎) 法、露天採掘から坑内採掘への移行におけるジオ・テクニカル解析等に関するガイドラインが作成された。

この国際的なケーピング研究のメリットは、6 年間にわたる世界的なケーピング研究の経験が生かせること、ケーピング技術に関心を有する企業間協調が可能であること、データや経験の交換が可能であること等である。

1997 ~ 2004 年に実用化された事例としては、以下のものが挙げられている。

硬岩盤へのケーピング適用: Palabora (南ア) Esmeralda, NorthParkes L1 (豪)

ブロック高さ 400m 以上の成功: Palabora (南ア) NorthParkes L1 (豪)

他にもプレ・アンダーカット法や事前破碎が多くの鉱山で実用化されている。しかし、まだ硬岩盤におけるケーピング率や破断化には解決すべき課題 (粒状物質の重力挙動) が残されていることは認識しなければならない。

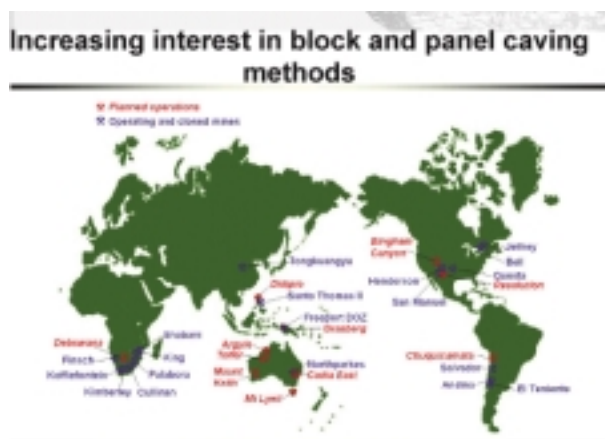


図 14 世界のブロック・ケーピング及びパネル・ケーピング鉱山 (Chitombo, 2005)

Flores et al. (2004) は、第 2 期国際ケーピング研究 (ICS-II) の成果を次のようにまとめている。

いくつかの鉱山では、露天採掘から坑内ケーピング採掘への中長期的な移行を計画しているが、第 2 期国際ケーピング研究 (ICS-II) には、露天採掘から坑内ケーピング採掘法への移行に関する実用的かつ地盤工学的な指針を作成する課題が加えられた。この課題遂行の一環として、露天採掘から坑内ケーピング採掘法への移行を既に行ったか、あるいは移行を計画している鉱山からデータを収集し、基準となり得る研究を実施した。さらに関連データの提供が可能なおの他の鉱山 (露天及び坑内) からデータも収集した。収集したデータは、広範囲な技術文献調査によって補足された。データ収集を最適化するように計画・実施された

この研究には次の要素が含まれている。

- 調査の設計：データ収集を容易にするために、Excel C による表計算シートを作成しこの研究に含まれる鉱山に電子メールで送信された。
- 鉱山訪問：表 1 に掲載の 17 鉱山を訪問し、関連情報を収集した。
- 追加データ収集：広範囲な技術文献調査を実施し、追加された 88 鉱山から補足データを収集した。
- データ処理：収集したデータを分析し、ヒストグラムを作成し、可能な場合には、ケーピング法による坑内採鉱において、現状の実体と傾向を示す相関図を作成した。十分なデータがある場合には、選定されたパラメーターの相対度数が計算された。データが限定されている場合には、パラメーターの相対的重要性が評価された。
- ベンチマーク報告：この研究から得られたデータ、結論及び提言は、ICS-II のスポンサーに提出された最終報告書の中で紹介された。

表1 ICS- で訪問した鉱山 (Flores et al., 2004)

国名	鉱山名	採鉱法
豪州	Cadia Hill	露天掘
	Mount Keith	露天掘(坑内掘への移行を検討中)
	Northparkes	露天掘からBCによる坑内掘に移行した鉱山
	Ridgeway	SLCによる坑内掘
カナダ	Kidd Creek	露天掘からSOPによる坑内掘に移行した鉱山
チリ	Andina	露天掘とBC/PCによる坑内掘
	Chuquicamata	露天掘(PCIによる坑内掘への移行を検討中)
	El Teniente	PCIによる坑内掘
	Salvador	PCIによる坑内掘
インドネシア	Grasberg	露天掘
	Grasberg DOZ	PCIによる坑内掘
南アフリカ	Finsch	露天掘からSOPによる坑内掘に移行した鉱山
	Koffiefontein	露天掘からSOP/SLC/PCによる坑内掘に移行した鉱山
	Palabora	露天掘からPCによる坑内掘に移行中の鉱山
スウェーデン	Kiruna	露天掘からSLCによる坑内掘に移行した鉱山
米国	Bingham Canyon	露天掘(PCIによる坑内掘への移行を検討中)
	Henderson	PCIによる坑内掘

SLC:サブレベル・ケーピング, SOP:サブレベル・無充填採掘
BC:ブロック・ケーピング, PC:パネル・ケーピング

(3) マス・マイニング技術 (Mass Mining Technology : MMT, 2005 ~ 2008 年)

従来、ポーフィリー銅(金)鉱床や鉱染型金鉱床を有する鉱山は、“Bulk Mine” と称されてきたが、近年その規模が更に拡大し、“Bulk Mine” のなかでも採掘の規模を規定する用語として“Mass Mine” という用語が使用されるようになった。

本研究は、Rio Tinto、CODELCO、BHP Billiton、BHP Billiton (Nickel West)、Inco、Xstrata Queensland、Newcrest、De Beers、Sandvik Mining and Construction、LKAB、Orica Australia の計 11 社の参加を得て、豪州クイーンズランド大学の JKMRC において、国際ケーピング研究 (ICS) に引き続いて、2005 年から開始され 2008 年まで実施される予定である本研究では、マス・マイニング技術の進展に伴う連続的な深部ケーピング技術の要望が存在するため、今後 15 年間のケーピング技術における挑戦課題の変化として、以下の項目を掲げている。

- 深部ケーピング (地下 2km までの鉱体)
- 大規模露天採掘から大規模坑内採掘への転換
- 意欲的な鉱業を取り巻く環境
- 経済性を確保するための高い操業効率の要求 (連続採掘法等)
- 安全と環境対策の高いレベルでの維持
- 具体的な研究分野は、重力流 (物理モデル、フローシミュレーション、大規模重力フローテスト)、ケーピングのメカニズム (ケーブ (陥没) の開始と亀裂の伝達、沈降)、ブロック・ケーピング法における破砕化プロセス等である。

3.2. CODELCO

(1) 坑内採掘の状況

CODELCO は現在、Chuquicamata、Radomiro Tomic、Salvador、Andina、El Teniente の 5 鉱山を操業中であり、年間銅生産量は約 160 万 t (銅純分量) となっている。このうち Salvador、Andina、El Teniente の 3 鉱山はブロック・ケーピング法またはパネル・ケーピング法による坑内採掘を行っており (Andina は露天採掘と坑内採掘とを併用) 坑内採掘による銅生産量は、年間約 57 万 t に達している。ケーピング法による採掘の開始時期は、El Teniente 鉱山が 1930 年代後半、Salvador 鉱山が 1959 年、Andina 鉱山が 1970 年である (Chacon et al., 2004)。

表 2 に CODELCO の坑内掘鉱山 (今後の開発予定を含む) の概要を示す。現在、同社が確保する坑内採掘対象の埋蔵鉱量は、98 億 8 百万 t (平均銅品位 0.81 %) と膨大なものとなっている。将来開発される新規坑内採掘プロジェクトとしては、Chuquicamata 鉱山の坑内採掘プロジェクト (2013 年)、Sur-Sur 鉱山坑内採掘プロジェクト (2013 年)、MM A. Hales 鉱山の坑内採掘プロジェクト (2015 年)、El Teniente 鉱山の採掘レベル開発 (2016 年) が挙げられる。

表2 CODELCOの坑内掘鉱山の概要（今後の開発予定を含む、Geister and Baez, 2005）

事業所名	鉱山	採掘開始年	埋蔵鉱量 (百万t)	銅品位 (%)	含銅量 (百万t)
Codelco Norte	Chuquicamata	2013	1,276	0.82	10.50
	MM A. Hales	2015	339	0.91	3.08
Salvador	Indio Muerto	1959	87	0.58	0.50
Andina	Rio Blanco	1970	1,461	0.70	10.19
	Sur-Sur	2013	1,091	0.70	7.60
El Teniente	Don Luis	2026	1,298	0.77	9.96
	El Teniente	1905	4,256	0.89	37.88
合計			9,808	0.81	79.71

図 15 に CODELCO の坑内掘粗鉱生産量の推移を示す。現在の坑内掘粗鉱生産量は 21 万 t/日程度であるが、新規坑内採掘プロジェクトからの生産量が増加し、2017 年には坑内掘粗鉱生産量が 35 万 t/日まで増加する見通しである。また、採掘深度の深部化に伴い、一次硫化鉱物の割合が増加していくものと予想される。

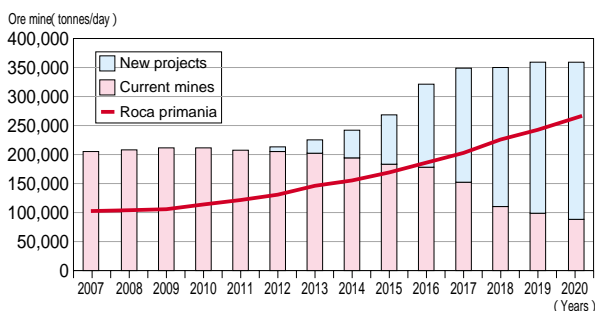


図 15 CODELCO 坑内掘粗鉱生産量の予測（Geister and Baez, 2005）

(2) CODELCO の技術革新モデル

1980～90年代においてCODELCOは、鉱業における競争力強化策として、操業規模の拡大、外注化、業務管理の改善で対応してきた。しかし、2000年代に入り鉱業を巡る環境が変化し、同社の新たな競争力強化戦略として、今後の持続可能な開発や銅の需要増大（中国等の影響）を前提に、株主を利する価値、技術革新に基づく低コストのプロジェクト開発を必要としている。このため、同社は、世界中の企業、研究機関と様々な形で共同事業方式を採用している。一例として、CODELCOのビジネスの中核ではない技術を共同出願・共同開発するアライアンス方式、鉱業向け最先端技術革新を求めため政府系研究グループや大学（CSIRO（豪）、BRGM（仏）、豪州の大学（複数）、カリフォルニア大学、ベルリン大学等）と形成するコンソーシアム方式、ハイリスクで多額な投資を要する事業を複数の企業（BHP Billiton（英国）、日鉱金属（株）（日本））と提携して行い、総合的な解決策を生むことが出来る補完的コア技術を持ち寄るための多企業共同方式等を実施している。これら共同研究で取り組んだ技術分野は、採鉱技術として、坑内採掘：International Caving Study（ICS）、露天採掘：大規

模、傾斜、機械類：プロトタイプ（原型）、バイオ湿式製錬として Biosigma（日鉱金属（株）との共同研究）、ACL（Alliance Copper Ltd.：BHP Billiton社との共同研究）、自動化・ロボット化の、採鉱工程、選鉱場、製錬所への導入である。

今後の取り組み目標は、新技術を埋蔵鉱量中の不採算鉱石に適用して採掘可能にすること、工業所有権の創出、革新を進めるための社内組織（科学と技術の対話）の形成である。さらには、専門家集団を形成するために地質工学、輸送工学、電子工学、素材科学等の広い範囲をカバーすること、資源に関連する問題に対し世界レベルの科学的インパクトを持った研究者集団を招聘することである。

3.3. Rio Tinto 社

Rio Tinto 社の銅生産シェアは、2004年に露天採掘分が約 76 万 t、坑内採掘分が約 13 万 t であったが、今後露天採掘分が減少していくのに対し、坑内採掘分が徐々に増加していく見込みである。2014年には、同社における銅の露天採掘が終了する予定であり、大転換期を迎えることとなる。

同社では、坑内採掘でブロック・ケーピング法（BC）を積極的に採用しており、すでに Palabora 鉱山（南ア）では、1996年にプロジェクトが開始され、2005年に 3 万 t/日の坑内採掘フル操業へ移行している。Northparkes 鉱山（豪）では Lift 1 で BC が完了し、Lift 2 での BC による採掘を開始した。E48 鉱体についてはプレ F/S を実施中である。また、Grasberg 鉱山（インドネシア）の DOZ 鉱床では現在 BC により 4 万 t/日以上採掘しており、Kucing Liar 鉱床でも BC により 6 万 t/日採掘するポテンシャルがあるとされている。Argyle 鉱山（豪）、Resolution 鉱山（米）、Bingham Canyon 鉱山（米）でも BC による採掘の F/S またはプレ F/S を実施している。

さらに同社では、現在、ケーピング研究（国際ケーピング研究：豪州）、地震波トモグラフィ（ポーランド）、沈降メカニズム（コロロンビア大学）等の各分野において外部の研究機関と共同研究を実施している。各研究テーマは、ブロック・ケーピングのフロー、破断化予測、ケーピング・メカニズム、沈降現象、岩石特性、鉱山操業の自動化等であり、将来的には、坑内貯鉱場からの連続積み込み、坑内破碎、ケーピングした鉱石の坑内リーチング、二次破碎機の自動化等に取り組む予定である。

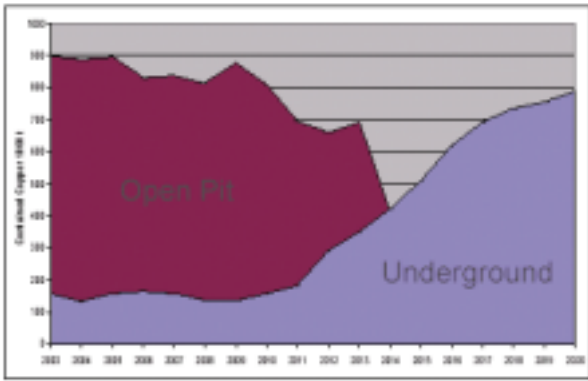


図 16 Rio Tinto 社の銅生産量に占める露天掘と坑内掘のシェアの推移 (Russell, 2005)

3.4. Phelps Dodge 社

技術開発と革新は、銅産業における競争力維持のために必要な手段であり、鉱業界は一般的に銅価の変動サイクルに応じつつ、企業毎に売上額の 0.1 ~ 1.0 % を技術開発分野に投資している。同社は、これら技術開発・革新に対し、これまで数々の鉱山 (例: Morenci, Chino, La Candelaria) 操業を通じて、大規模スケール SX-EW、自動化されたトラックによるディス・パッチシステム、リーチングによる採取率の最適化、精鉱品位の向上、巨大トラック・タイヤの技術開発、精鉱リーチング技術の開発 (2003 年) の豊富な知見を有する。

戦略的ガイドラインは、銅の抽出が最重要ポイント、基礎的調査ではなく、適用化技術に焦点を当てる、選択された分野の卓越したコア部分 (鉱物特性把握、湿式製錬、再生と改善等) を実施、プロジェクトのマネジメントの厳格化 (評価、ランキング、プロジェクトの優先付け、ステージ・ゲート・プロセス) 遂行することに最大の重点を置く、最良の経験の制度化 (継承)、戦略的なパートナーシップを組む、共同研究を推進することの 8 項目から構成される。

さらに、技術開発における戦略的計画は、毎年のデータ更新、明確なビジョンとミッションの策定、リスクの確認、リスクを取り扱うプロジェクトとプログラムの開発、優先度化、実行計画の開発 (ステージ・ゲート・プロセス)、フォローアップに着目して、作成される。特に、に関しては、具体的に 7 段階に細分化された行動と決定基盤が定められている (図 17 参照)。

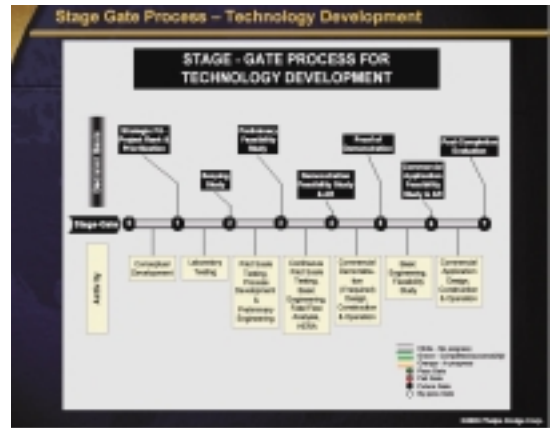


図 17 Phelps Dodge 社の技術開発におけるステージ・ゲート・プロセス (Marsden, 2005)

このステージ・ゲート・プロセスの必要性は、以下の理由で説明できる。

Hatch/Washington Institute の調査によると、新しい技術が商業ベースで成功する割合は、概念・範囲の確認 (証明) 段階で 1/300、パイロット・プラント段階で 1/30、実証化試験段階で 1/4 と言われている (成功する確率の認識が必要)。

メリットは、リスク管理が可能 (失敗例と成功例の蓄積)、最適事業への資源集中、技術開発コストのマネージが容易なことである。

PD 社としての技術開発重点分野は、採鉱、選鉱、製錬 (特に湿式製錬) である。銅生産は 1983 年に乾式製錬 100 % だったのが、2004 年には湿式製錬 (SX-EW) が 66 % を占めるに至っている。現在、適用しつつある技術として、以下のものが挙げられている。

高速度ワイヤレス通信技術 (High-speed wireless communications)

GPS ナビゲーション (Full GPS/inertial navigation)

連続採鉱プロセス (Continuous mining process)
大型機械による大規模選択的採鉱技術 (Large-scale selective mining with larger equipment)

精鉱リーチング-SX-EW (Concentrate leaching, solution extraction and electrowinning)

商業化に向けた実証段階であり、これまでの浮遊選鉱/電解製錬技術からの移行としてバグダッド鉱山で実施中

精鉱リーチング-直接 EW (Concentrate leaching and direct electrowinning)

商業化に向けた実証プラント建設中
低品位黄銅鉱堆積場のリーチング (Leaching of low-grade chalcopyrite stockpiles)

商業化に向けた実証試験テスト進行中
新 EW 技術

商業化に向けた実証試験テスト進行中
新ミル技術

高圧摩鉱技術: メリットは高い処理量、良好な

エネルギー効率、フレキシブル性が高い等、Cerro Verde ではすでに SAG ミルの代わりに本システムを導入

QemSCAN 技術による鉱物特性把握調査（商業化及び適用中）

環境修復技術（実用化）

効果的な技術開発を行うための鍵となる項目は、インフラ/環境（調査・開発能力、操業経験、技術実行能力）、資源（人、金、時間）、将来を見越す経営能力、経済状況の見極め（好機を逃さない）、長期的な将来展望の確立、シニアマネージメント、取締役会、株主の同意を得ることである。

4. コンパクト・マイニング

4.1. コンパクト・マイニングについて

現在、世界の潮流として、海外の非鉄金属メジャーは大規模な露天掘鉱山の開発に重きを置いている。コンパクト・マイニング・システムとは、我が国の鉱山技術を活用し、かつ中小鉱床を対象とした独自の採鉱システムである。情報化採鉱、自動化・無人化採鉱、細脈の効率的な採鉱システム、ペースト充填、可搬式選鉱・湿式製錬システム、環境保全技術などがコンパクト・マイニングの基幹要素技術といえる。社団法人資源・素材学会では、我が国に蓄積された中小規模鉱床開発の知識とノウハウを活用・掘り起こし、それに機械化・自動化・情報化技術を組合せ、高品位部分の優先開発、採鉱・開発の一体化、小規模一貫生産システム、環境保全、ファイナンスを柱としたグランドデザインを提案することを目的とした調査研究を実施している。粗鉱生産量は、年間数万～数十万 t を想定している（山富・安達, 2005）。調査研究項目は、以下のとおり。

細脈採掘を前提とした無人化・自動化技術、情報化技術、機械化掘削技術

切羽選別・ズリ混入抑制技術

ペースト充填技術

可搬式選鉱・湿式製錬システム

環境保全技術

コンパクト・マインのファイナンス

4.2. コンパクト・マイニングの実例

コンパクト・マイニングは、例えば小規模な鉱床が集約的に分布するような鉱床地帯への適用が想定される。チリや豪州では年間銅生産量が 3 千～5 千 t という比較的規模の小さい銅鉱山でヒーリーチングが行われており、鉱山によっては年間 1 万数千 t の銅が生産されている（山富・安達, 2005）。秋田県大館市の松峰選鉱場では、1994 年まで、周辺にあった同和鉱業（株）関連の黒鉱の鉱山から運搬される鉱石を集中させ、選鉱を行っていた。このように、亜鉛・鉛鉱山については、選鉱施設等の生産設備の集約が見られる場合がある。最近では、亜鉛・鉛鉱石の不足や金属価格の高

騰が後押しともなって、以下のようなコンパクト・マイニングに該当するとみられる例がある。

ワンサラ鉱山、パルカ鉱山（ペルー）

ワンサラ鉱山は、ペルーの首都リマから北方へ道程約 440km のアンデス山系にあり、三井金属（株）、三井物産（株）が 1968 年以降、操業している。亜鉛精鉱を年間約 58,000 t 生産しており、2004 年の地金換算量としては、亜鉛 38,800t、鉛 15,600t、銀約 40t である。パルカ鉱山は、ワンサラ鉱山の南約 40km の標高 3,800～5,000m に達するアンデス山系にあり、三井金属は 1995 年に採鉱を開始し、2006 年 3 月に本格的な操業を開始した。埋蔵量は、14 百万 t（亜鉛 11.8 %、鉛 0.7 %、銀 43g/t）と見積もられている。

パルカ鉱山は、組織上ワンサラ鉱山の付属鉱山として位置付けられ、鉱石はワンサラ鉱山まで運ばれ、選鉱などの主要な生産工程は、ワンサラ鉱山の既存設備で行われる。このことから、ワンサラ鉱山・パルカ鉱山はコンパクト・マイニングの好例であると考えられる。操業開始後、パルカ鉱山の鉱石からは年間約 31,400t の亜鉛精鉱が生産され（亜鉛地金換算約 16,000t/年）ほぼ全量が日本へ輸出される。

5. 採鉱技術の課題

1997～2004 年の 8 年間に国際ケーピング研究（ICS）により、ケーピング採鉱法に関する地盤力学が研究されてきた。取り組まれた主な課題は、次のとおりである。

岩盤の特性評価と、原位置において発生する割れ目のシミュレーション

ケーピングの可能性と破碎の評価の方法についてのレビュー、開発及び修正

アンダーカットと引抜き坑道の設計

数値モデル、大規模物理モデル及び鉱山規模でのマーカー試験を用いた破碎岩石の流れ

線形計画法及び混合整数線形計画法を用いた引抜き制御と計画システムの開発

水圧破碎法を用いた強度の高い岩盤の事前調整

露天採掘からケーピング法坑内採掘への移行についての地盤工学的指針の作成

ブロック及びパネル・ケーピング法についてのリスク評価法の開発

ケーピング法の実際と知識及び研究成果とを容易に利用できる形での照合

これらの課題のいくつかは、鉱山の現場において、また ICS の枠組み外の他の研究グループによって、すでに取り組まれつつある。有用な進歩はあったが、次世代の坑内大規模採鉱の操業に関する技術について必要とされる知識と理解を深めるためには、なすべき多くのことが残っている。しばらくの間、ICS のスポンサーは、計画の技術指導者である Gideon Chitombo 博士と協力してマス・マイニング分野での ICS の後継組

織の設立についての作業をしてきた。提案された研究分野と関連する研究項目は、表3に列挙されている。明らかに、これらの研究項目の多くは、地盤力学への方向性を有している。これらの項目についての研究は、将来の大規模坑内採掘において成功するために要求される知識と技術を開発する上で、必要不可欠であると考えられる。

表3 マス・マイニング技術に関して提案された研究分野と項目(Brown, 2004)

研究分野	研究項目
岩盤力学的特性評価	基本的な、地質学的、地盤力学的及び水文学的な岩盤のパラメーターを評価するための、地球物理学的の方法の効率的活用。
ケーピングのメカニズム	地表地盤沈下予測を含む「新しい採掘環境」のための空洞発生とその伝播に関するより適切な予測。ケーピング操業における原位置での1次破碎と2次破碎のメカニズム。空洞の発生と伝播における事前調整の影響。
ケーピング技術	限定発破のメカニズムとそれに対応する穿孔と発破の設計方針と指針。重力流と工学的研究(大規模な物理的モデルと現場研究)及び鉱山規模での流れ規則と設計指針の開発。より効率的な空洞監視システム(3D)及びオンラインの解析評価システムを含む適切な計測機器の配置設計。空気プラスト、山はね、大規模崩壊、泥流、地盤沈下を含む主要な危険性識別のためのリスク・アプローチ。事前調整が岩盤の強度低減と原位置での破碎の変化に及ぼす影響。
システム工学	より効率的な崩壊/引抜き管理方法の適用。プロセス管理と自動化の効率的な適用。
利用可能性技術	急速な水平開坑(安全性と品質)。機械的収集設備を含む効率的(そして連続的)鉱石処理システム。二次岩石破碎の機械化。
採掘利益の最適化	採鉱手順、工程管理及び採鉱率。

6. まとめ

世界最大級の露天及び坑内採掘の操業は、過去100年間にわたり持続的に成長してきた。露天掘鉱山及び坑内掘鉱山の生産量と採掘深度は将来においても成長し続けるであろう。このことは、過去40年にわたり、大規模鉱山開発の成功と成長への主要な貢献をしたことが示された工学分野である地盤力学に対し、大きな挑戦課題を提供する。多くの操業現場において効率を改善しコストを削減するためには、プロジェクト・マネジメント、材料の取り扱い、環境工学、水の供給と管理、情報通信技術、管理とシステム工学など、他の工学分野における重要な挑戦課題が残っている。しかしながら、利益の上がる大規模露天及び坑内掘鉱山の調査、設計、施工及び安全操業にとっての地盤力学の重要性を考慮するとき、それが大規模鉱山開発における基本的な工学分野であることを認識する必要がある。それ故に、業界が、地盤力学に関連する一連の研究と

次世代の鉱山地盤力学の専門家たちの教育と訓練を支援することは必要不可欠である。

(2006.8.9)

文献

Boni M., 2005, The Geology and Mineralogy of Nonsulfide Zinc Ore Deposits. Proceedings Lead & Zinc '05, Kyoto Japan, 1299-1313.

Brown E.T., 2004, Geomechanics: The critical engineering discipline for mass mining. Proceedings MassMin2004, Santiago Chile, 21-36.

Calder K., Townsend P. and Russell F., 2000, The palabora Underground Mine Project. Proceedings MassMin 2000, Brisbane, 219-225

Chacon J., Gopfert H., Ovalle A., 2004, Thirty years evolution of block caving in Chile. Proceedings MassMin2004, Santiago Chile, 387-392.

Chitombo G., 2005, International collaborative research into Underground Mass Mining Methods, Presentation file of Technological Innovation Conference 2005, Santiago Chile.

Davies, E, 1967, Mining Practice at Mount Isa Mines Limited, Australia. Trans Instn Min Metall, Sect A: Min Industry, 76: A14-40.

独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 2006, 国際会議報告 コデルコ社技術革新会議 (Technological Innovation Conference) の概要, 金属資源レポート, vol. 35, no. 5.

Flores G., Karzulovic A. and Brown E.T., 2004, Current practices and trends in cave mining. Proceedings Massmin2004, Santiago, 83-90.

Fuentes, S., 2004, Going to an Underground (UG) mining method. Proceedings MassMin2004, Santiago Chile, 633-635.

Geister F. B. and Baez F. N., 2005, Quiebres Technologicos en Codelco Minería Subterránea Continua, Presentation file of Technological Innovation Conference 2005, Santiago Chile.

Gustafsson, H E, 1981, Field test of sublevel shrinkage caving (MSTM) at LKAB Kiruna. Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines, 419-423. SME: New York.

- Hamrin, H. 1998, Choosing an Underground Mining Method; Techniques in Underground Mining, published by the SME, 45-85
- Hoek E. and Bray J. W., 1974, Rock Slope Engineering, 309p. Institution of Mining and Metallurgy: London.
- Karzulovic, A, 2004, The importance of rock slope engineering in open pit mining business optimization. Proceedings IX Symposium on Landslides, Rio de Janeiro.
- Laubscher D. H., 2001, Cave Mining The State of the Art. Underground Mining Method, 455-463.. Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc.
- Marsden J. O., 2005, Phelps Dodge's Approach to Technology Development and Innovation, Presentation file of Technological Innovation Conference 2005, Santiago Chile.
- Morales J.E.J., 2005, CODELCO Y Su Modelo de Innovacion Tecnologica, Presentation file of Technological Innovation Conference 2005, Santiago Chile.
- Morgan R., 2005, Going Underground, Mining Journal, London, January 14, 2005. 2
- Peele R., 1927, Mining Engineers 'Hand Book, 2nd Edition, John Wiley & Sons: New York. 721-727
- Peele R., 1941, Mining Engineers 'Handbook, 3rd edition. John Wiley & Sons: New York.
- Russell F., 2005, Innovation and Technology in Underground Mining the Rio Tinto Perspective, Presentation file of Technological Innovation Conference 2005, Santiago Chile.
- Villaescusa, E, 1996, Excavation design for bench stopping at Mount Isa mine, Queensland, Australia. Trans Instn Min Metall, Sect A: Min Industry, 105: A1-10.
- 山富二郎・安達毅, 2005, コンパクトマイニングシステムに関する調査研究.(財)日本鉱業協会助成 研究成果報告書, 平成 17 年度. 11-13.