

メタ研通信

2023 年 1 月号 (No. 5)

I. 2023 年 1-3 月第三四半期の非鉄金属市場動向とトピックス

(当該期のショートアプローチの紹介)

II. 寄稿

1. 金属と著名人 銀と物理学者ニュートン

伊藤忠鉱物資源開発株式会社 五味 篤

2. 非鉄企業現場の日常 鉱山での日常生活について

Compania Minera Santa Luisa S.A. 村上 龍介

III. 主任研究員レポート紹介

1. 欧州、特にドイツに学ぶ再生可能エネルギー発電の普及送電線網の整備

諏訪 政市 主任研究員

2. 米国、EUの需要鉱物政策の動向と日本の課題

松田 大 主任研究員

IV. 非鉄金属の基礎知識

2. 3. 2 非鉄金属資源の採掘 (技術)

*おことわり:

web に掲載されるレポート等の内容は、必ずしも日本メタル経済研究所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、レポート等の内容に誤りのある可能性もあります。レポート等に基づきとられた行動の帰結につき、日本メタル経済研究所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

I. 2022 年 10-12 月第三四半期の非鉄金属市場動向とトピックス

7月より新たに皆様と情報を共有している「メタ研ショートアプローチ」の10月後半～12月の発行分は、下表のとおり LME、ベースメタル、レアメタル、SDGs、自動車、中国、カナダ、電線関係の12件になりました。

メタ研の Web 会員サイトに閲覧コーナーを設けておりますので、会員の方はぜひご覧ください。今後も引き続きショートアプローチコーナーに掲載した記事の表題はメタ研通信でお伝えしますのでご確認ください。

10月26日から12月21日までのショートアプローチ

No	タイトル等		カテゴリー
18	使用済鉛蓄電池輸出に関連する環境問題の顛末		ベースメタル
	2022年10月20日	国内リサイクルが主体だった自動車用鉛蓄電池については2006年頃から韓国に高値で輸出されたが、韓国内での不適切処理による環境問題が発生し最終的に法律改正で流出を止めることとなった。本件を題材にリサイクル資源の在り方について考察する。	
19	資源メジャー2022年上期決算まとめ～暗転前夜の高配当		LME
	2022年10月4日	LMEにおいて、本年3月8日のニッケル取引無効化に関し、現在いくつかの訴訟を抱えるとともに英国金融当局の調査を受けている。本件について、筆者の感想を述べることとする。	
20	DR コンゴの鉱業とコバルト資源が抱える問題		レアメタル
	2022年11月11日	コバルトの世界生産量の7割を占める DR コンゴにおいては、長らく中国との密接な関係が続いてきたが、2019年新たな政権が樹立してからその関係に変化が起きている。これまでのコバルトを巡る動きを振り返るとともに、今後の見通しについて考察する。	
21	電気自動車と材料 -Part 1 LCA-		自動車
	2022年11月17日	電気自動車（EV）については現在低炭素化の要として各国で普及が推進されているが、一方でいくつかの課題を抱えており、本当にEV一択で良いのか、個々の課題について整理を行う。Part 1としてLCAについて記述する。	
22	高圧海底ケーブル市場に新規参入者(2)		電線
	2022年11月24日	高圧海底ケーブル市場に関して、前回の新規参入者に続いて大手及び中堅のHV・EHVケーブルメーカーが世界各地で工場の新設・増強プロジェクトを進めている状況を紹介する。	

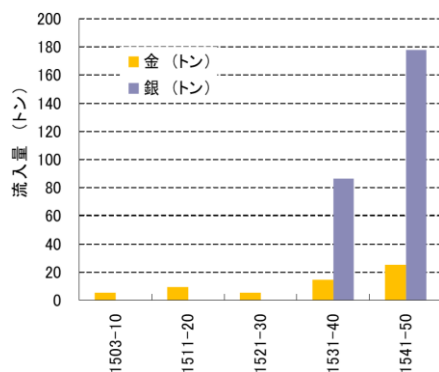
23	LME とロシア産メタル		LME
	2022年12月1日	LME はアルコア等から求められていたロシア産地金の取引制限を行わないとの方針を11月に示した。その背景・経過とともに、取引所の役割について確認する。	
24	2022年6月に公表されたカナダの重要鉱物政策		カナダ
	2022年12月6日	資源国であるカナダにおいて、本年6月、「安全保障」が追加される形で新たな重要鉱物政策が公表された。本レポートでは政策の概要とそれを踏まえた具体的な動きや米国・EU等との違いについて解説する。	
25	LME のニッケル問題、法廷での審理へ（その2）		LME
	2022年12月13日	3月のニッケル価格高騰を受けたLMEにおけるニッケル取引の停止・無効という措置に対する米国ファンド等からの訴訟に関して、11月28日にLME側から自身の立場を説明する書面が裁判所に提出された。本レポートではその内容と問題点につき整理する。	
26	Befesa 社：電炉ダストリサイクルのグローバルトップ		ベースメタル
	2022年12月15日	亜鉛製錬リサイクルにおいて電炉ダストから得られる粗酸化亜鉛は重要な原料である。カーボンニュートラルを目指して電炉鋼の生産比率が上がっている中で、電炉ダストリサイクルのグローバルトップ企業であるBefesa社を紹介する。	
27	中国、アルミニウム、その周辺（2）		中国
	2022年12月19日	2000年代に入ってからアルミ新地金生産国の変化（中国の急拡大、湾岸諸国の参入）、それに伴う日本の輸入元の変化と電力多消費産業であるアルミ分野でのCNに関する動きについて報告する。	
28	責任ある調達に関して Part-I		SDGs
	2022年12月21日	責任ある調達に関連して、2022年10月18日から3日間、Responsible Business Alliance (RBA)/Responsible Minerals Initiative (RMI)の年次会議がカリフォルニアで開催された。本レポートでは会議でのポイントとなる講演等、最新の国際的な動きについて紹介する。	
29	責任ある調達に関して Part-II		SDGs
	2022年12月21日	Part1のレポートを踏まえ、改めて「責任ある調達」の枠組みの整理と今後の方向性について考察する。	

II. 寄稿

1. 金属と著名人 — 第2話 銀と物理学者ニュートン —

伊藤忠鉱物資源開発株式会社 五味 篤

古来より金、銀は権力を象徴するか宗教的な装飾品として利用されてきたが、貨幣経済の発達とともに貨幣材料としての需要が高まっていった。しかし、金が自然金として元素の形で産出するのに比べて、銀は限定的に自然銀が存在するものの、大部分は硫化物などの化合物として産出するので、製錬工程が必要であった。そのため、エジプトやメソポタミアなどの遺跡から発見される銀製品は金製品に比べて非常に少ない。紀元前 3500 年頃のエジプトのメネスの法典によれば、金銀比価 (Gold Silver Ratio) は金 1 に対して銀 2.5 であったという。欧州ではギリシャ時代から銀が常に不足し、イスラム世界から銀を輸入していたため、9 世紀の金銀比価はイスラム世界と同様な 1:6.5 であった。



図版 1 新大陸からスペインに流入した金銀量
出典: 「南米ポトシ銀山」中公新書 1543.

しかし新大陸の発見によって1520年代にはメキシコから大量の銀が宗主国スペインに流入、さらに1545年にボリビアでポトシ銀山が発見されると、16世紀には先住民の強制労働制度(ミタ制度)によって大量の銀が採掘され、スペインに流入した(図版1)。それらの銀が軍事や貿易の決済通貨として欧州に広がった結果、15世紀には1:11.5前後であったものが、17世紀後半から19世紀初頭にかけては1:15が中心となった。さらにスペインがメキシコのアカプルコとフィリピンのマニラを結ぶマニラ・ガレオン貿易

(1565~1815年)を設定、中国の絹、陶磁器などが銀で購入され欧州にもたらされたことで、新大陸の銀がアジアにも流入した。これに石見銀山産の銀も加わり、銀による世界経済の一体化が進んだ。

英国ではローマの金貨を模して国内産の銀で造られた銀貨が流通していた程度であったが、8世紀にイングランド七王国時代のマーシア王国のオフア帝(注-1)は初めてペニー銀貨



写真1 マーシア王国オフア帝が作った1ペニーウエイト硬貨 1.28g York Coins 提供

を製造した(写真1)。当時の貨幣は、ローマ法王への上納として納入されたことや、国王が貧民に施しをする洗足式に小額面の洗足銭が必要だった関係で、王立造幣局の局長はキリスト教聖職者から選定された。王立造幣局が単独の機関になったのは886年からで、1279年からロンドン塔に移設された(図版2)。14世紀からは銀貨



図版2 ロンドン塔にあった王立造幣局
The Royal Mint Museum 提供



図版3 アイザック・ニュートン
(1642-1727年) The Royal Mint Museum 提供

はスターリング・シルバー(銀 92.5%、主に銅 7.5%の合金)を用いるようになった。

アイザック・ニュートン^(注-2)(図版3)はケンブリッジ大学在職を継続しながら、1696年から王立造幣局監事、さらに1699年から亡くなる1727年まで長官として造幣局を管理した。ニュートンの偉業に対して英国王が高給ながら冗職としての造幣局管理職を与えたため、ルーカス教授職を1701年まで兼務した。しかし、ニュートンが造幣局で行った仕事は、冗職とは程遠い、また学究活動ともまったく違う世界の、銀貨の大改鑄と通貨偽造犯の摘発であった。

ロンドン塔にあった王立造幣局の作業員が、ハンマーで打刻し手作業で製造(図版4)した銀貨は、重量も形も均一性に欠けていたため、1690年代には流通の過程で切り取られて隠匿されて、所定の重量を満たしていなかった(写真2)。1695年には流通していた銀貨の約10パーセントが

賈金となって、公正な取引に支障をきたしていたとされる。



図版4 ロンドン塔の王立造幣局内での硬貨製造作業
1809年 The Royal Mint Museum 提供



写真2 切り取られた1664年製1シリング硬貨

それを是正するために、大蔵大臣チャールス・モンタギュー^(注-3)は、同年に大改鑄の議会承認を得て改鑄作業を開始した。その2箇月後に造幣局監事に就任したニュートンは、正確な重量と高い打刻精度の銀貨製造を目的として、改鑄工程の作業能率を調査した。試算したところ、このままでは9年掛かることが予想されたため、溶融炉を増設し、圧延機8台とプレス機5台を新調した。さらに各溶融炉の石炭消費量や、銀の溶融室から製造ラインに載せるまでに必要な人員・馬力を算出した。ニュートンの試算に従って硬貨製造の速度が決められ、最終的には1分間に50から55回程度のリズムで打刻作業を数時間連続で行なうことが最も能率的ということとなった。当初は1週間に1万5000ポンドを製造するのも難しいと考えられていたが、次第に5万ポンド製造できるようになり、1696年夏には6日で10万ポンドの貨幣が製造できるようになった。1698年半ばには市場から回収された古銀貨がほぼすべて新銀貨(写真3)になり、総額6,840,719ポンドの大改鑄事業は終了し、1699年



写真3 大改鑄による 1698 年製シリング
「ウィリアム III 世」硬貨
出典 coinscatalog.net

には増設したすべての機械を処分した。翌年には流通する通貨はほとんどが正常となり、政府と国民の不安は収まった。後にモンタギューはニュートンがいなければ大改鑄はうまくいかなかっただろうと述べたとされる。

また、ニュートンは監事職には司法権があることから、貨幣の偽造や毀損の摘発を徹底的に行った。特に組織的な連続通貨偽造犯であるウィリアム・チャロナー^(注-4)について、完全な証拠調査に専念して多くの陳述を取った。この結果、法廷でチャロナーは大逆罪を適用され 1699 年に絞首刑に処された。ニュートンが造幣局長官に在職している間、ロンドンで投

獄したのは 100 人以上で、その結果、偽金造りが激減したといわれる。

通貨の安定を目的に、1717 年に英国政府はニュートンの助言により 1 ギニー金貨を銀 21 シリング、すなわち金銀比価を 1:15.21 に設定した。このニュートンの金銀比価は経済のうえでもあたかも彼の宇宙体系の法則のごとく安定して推移し、その後 1816 年に英国が正式に金本位制に移行するきっかけとなった。1870 年代には世界各国も金本位制へと移行していった。その後、製錬副産物としての銀産出が増加したため、銀建値はその需要減とともに価値を減じた。金銀比価は 1870 年ごろまで 1:15.5 が中心であったのが、その後 1870 年代には 18.4、1890 年代には 35.0、1910 年代には 53.7 と変化し、1940 年には 97.3 となった。1967 年に一時は 15.7、1980 年には 米国の石油王ハント兄弟による銀買占め価格操作で 18.4 となったが、最近の金銀比価は 1:75~85 程度で推移している。

注-1) Offa, King of Mercia : 720-796

注-2) Isaac Newton : 1642-1727

「ニュートンの三大業績」とされる「万有引力の法則」「微分積分法」「光のスペクトル分析」の発見者として著名である。1687 年にはニュートン力学体系の解説書「プリンキピア（自然哲学の数学的原理・「Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica」）を刊行し、物体の動きは数学によって厳密に記述できることを明らかにした。

注-3) Charles Edward Montagu : 1662-1722

注-4) William Chaloner : 1650-1699

参考文献

青木康征(2000) : 「南米ボトシ銀山」中公新書 1543.

岩崎重三(1934) : 「銀」. 内田老鶴圃. pp.3-89.

島尾永康(1994) : 岩波新書評伝選「ニュートン」, 岩波書店.

トマス・レヴェンソン、寺西のぶ子(訳)(2012) : 「ニュートンと贋金づくり」. 株式会社白揚社.

フィルップ・スティール、赤尾秀子(訳)(2008) : 「アイザック・ニュートン」. BL 出版.

渡邊萬次郎(1936) : 「銀」. 工政會出版部. pp.327-402.

2. 非鉄金属企業の日常

ーペルー共和国リマ市ノワンサラ鉱山での日常生活についてー

Compania Minera Santa Luisa S.A. 村上 龍介

1. リマの気候

「夏のリマは最高」とは、駐在員の間でよく聞く話である。燦々と照りつける太陽、青く澄み切った空、日陰に入れば適度に涼しく、食べ物は美味しい。間違いなく、海外駐在するなら最高の場所である（筆者はペルー以外駐在したことはないが）。

「冬のリマは最低」とも、つい口にしてしまう話である。毎日どんよりと曇った空、ジメジメと湿った空気、身体の芯から感じる寒さ、食べ物も美味しく感じられない。あまり駐在先としてお勧めできない場所である。

長く駐在していると忘れがちだが、リマの気候はなかなか不思議である。冒頭に書いた通



夏の海岸沿いの公園

休日には公園の芝生に寝転がって日差しを浴びる市民を多く見かける。

り夏と冬の変化が激しい。しかも夏も冬もパタリと切り替わるように訪れる。ある日、朝起きてカーテンを開けると澄み切った青空が広がっている。その瞬間から「夏」である。また次の日に起きると空がどんよりと雲に覆われている。その日はまた一日「冬」である。スペイン語にも「春」「秋」という単語はあるのだが、リマに住んでみるとピンとこないのが正直なところである。

もう一つ、リマは一年を通じてほとんど雨が降らない。台風も来ないし、もちろん

雪もない。ついでに花粉症もない（これは天気ではないが）。地球の裏側だから当然と言えば当然かも知れないが、四季折々、多種多様な天気のある日本とはずいぶん違うものだと思う。

2. リマの街

ペルーと言えばマチュピチュやナスカの地上絵など古代文明のイメージが強く、首都リマについて日本で知られているとは言い難い。テレビに映るのは地方ばかりのため生活レベルが低いと誤解されがちだが、実際に住んでみるとなかなか都会である。

筆者が初めてリマの地を踏んだのは 2005 年、かれこれ 17 年前のことだが、その頃から既に都会であった。マクドナルドやケンタッキーといった大手ファーストフードは当然のように進出していたし、スターバックスが中南米で最も早く進出したのはリマである（隣国チリより 1 週間だけ早い）。さらにその後も急速に経済発展を遂げており、市内には大規模な



2023年1月3日の携帯電話画面
まだ日本では普及しているとは言い難い 5G。
リマでは普通に 5G の電波を拾えるようだ。

ショッピングモールが複数建設され、ZARA や H&M と
いったファストファッションなら当たり前のように
手に入る。クレジットカードのタッチ決済はほぼ
100%普及しており、メルカド（市場）や街角の売り
子さんに対してさえ QR コード決済が可能である。

私ごとながら筆者は九州のド田舎出身。徒歩数分
スタバがあり、コンビニがあり、大規模なショッピング
モールにも歩いて行けるリマの生活はとても快適で
ある。たまに郷里の母が「大変な生活をしている」と心
配してくれるが、夜の 8 時以降は開いている店

すらなく、どこに行くにも車が必要な郷里とくらべるとずっと暮らしやすいと常々思っ
ている。

もちろん言葉が通じない、治安が良いとは言えない、渋滞が酷い等々、不便はある。しか
しそうは言っても、リマは十分に都会で、それなりに楽しく暮らしていける街ではないかと思
う毎日だ。

3. リマの食

リマの食事は美味しい。住んでいるので鼻目に見てしまいがちだが、「南米レストランベ
スト 50」等のランキングでもだいたい 1 位をリマのレストランが獲得し、さらに 50 のうち
10 くらいをリマが占めているところを見ると、それなりに客観性がある話だろう。

美味しさの理由はいくらでも思いつく。一つは食材が多種多様なこと。ジャガイモやトマ
ト、唐辛子、カボチャ等は原産地なだけあって品種が多く味も形も様々。それに大根や白菜、はて
は里芋や長ネギまで、移民が持ち込んで定着した野菜が多数ある。加えて漁業が盛んで



家庭で出される普通のロモサルタード
ホカホカの白ご飯と食べるのもアジア的。できればツユダクでどん
ぶりにしていただきたい。

海産物は何でもあり、鶏肉・豚肉・牛肉の宗
教的な制限もない。食材の豊かさは美味しさ
に直結しているだろう。

それに多種多様な人口構成も理由の一つだ。
ペルー国民はインディヘナ（先住民系）とメ
スティソ（白人と先住民の混血）、日系や中華系、
アフリカ系など様々なルーツを持つ人々で構成
され、それぞれが独自の食文化を持っている。
それに加えて、それらが混じり合っ て「フュー
ジョン」と呼ばれる新たな食文化が生まれてい
る。

「ロモサルタード」という料理がある。ペ
ルーにおける家庭料理の代表格だが、ポテト

フライとタマネギ、トマト、そして短冊状に切った牛肉を一緒に炒めて作る。この料理、実は調味料に醤油を使っている。元は 19 世紀に中華系移民が作り出した料理らしいのだが、今となってはペルーにおいて子供が好きな料理第一位だ。家庭料理に当たり前のように醤油が使われていることは、ペルーの食文化がとても豊かであることの一端を示していると思う。

4. ワンサラ鉱山での生活について

筆者が所属するサンタルイサ社 (Compania Minera Santa Luisa S.A.) は、リマから車で約 6 時間の位置にあるアンデス山中でワンサラ鉱山を操業している。

鉱山の標高はだいたい海拔 4,000m、富士山より高い。空気は薄く、酸素濃度は海拔 0m の 6 割強にしかない。大気圧も低く、水は 90 度弱で沸騰する。現在はコロナ対策の関係で駐在員が現場に常駐している訳ではないが、多くの技術系社員は赴任期間の約半分をこの高地で過ごすことになる。

ここまでリマの生活を快適だ、食べ物が美味しいと散々書いてきたが、この鉱山生活は快適とは言い難い。空気の薄さはいかんともしがたく、コロナ禍でお世話になった人もいるだろうパルスオキシメーター (血中酸素濃度計) を使うと軽く坂道を上がっただけで数値が 90 を割ってしまう (コロナ患者なら救急車レベル!)。眠りも浅く、夜中に目覚めてしまうことも珍しくない。個人差も大きいですが、どんなに慣れてもやっぱり大変、というのが標高 4,000m の世界である。

これはワンサラ鉱山に限らず、もっと言えばペルーにも限らず世界中の鉱山に共通するが、



2023 年 1 月 5 日のワンサラメシ
ワンサラの章だけ「メシ」と片仮名にしているのは NHK へのアピールである。

宿舎はドライ、飲酒禁止だ。そのため軽く一杯あおって寝る、ということもできない (高地での飲酒は悪酔いしそうだが)。インターネットの速度向上でずいぶん改善されつつあるが、どうしても鉱山の間は仕事以外にやることがない、という生活になってしまう。

「いまの山のメシは美味いか？」現役も、OB も、ワンサラ駐在経験のある人間と会うと必ず盛り上がる話題である。山における唯一の楽しみはメシ、だけどこれが難しいのだ。高地では沸点が低いのでお米の炊き具合がよくなく、味の沁みも浅い。食材も

リマから一週間分をまとめて運ぶので鮮度が落ちるし、種類も少ない。料理人にとっても高地は大変な悪条件であり、なかなか美味しいメシにはありつけない。

コロナ禍前はたまに來客があると、どんなメシが出るかととても気になっていた。その日に

限って当たりで、「ワンサラのメシって美味しいですね」と言われると、普段の苦勞が軽んじられているようでちょっとモヤモヤした。しかし逆に、その日に限ってとんでもなく不味いメシが出たりすると、それはそれですごく恥ずかしかった。「お母さんやめてよ！」の気分である。

ちなみに現在、駐在員の間でいまのワンサラのメシは近年稀にみるほど美味しいと評判である。きっとこれを読んでいる方がワンサラに来て美味しいメシが出てくるに違いない。地球の裏側ではあるが、是非、試食しに来て欲しいものである。

5. サントルイサ社の紹介

最後に、筆者が所属するサントルイサ社について紹介したい。サントルイサ社は三井金属が権益ベースで 81.7%、議決権ベースで 100%の権益を保有し、ペルーで2つの鉱山を操業する現地法人である。現在、日本から派遣された駐在員 10 名を含む従業員 330 名が所属し、リマの商業地区であるサインイシドロに本社を置く。また、同じ本社には新たな鉱山を探す探鉱専門の組織である三井金属鉱業（株）ペルー支社（駐在員 1 名を含む従業員 8 名）が同居している。



鉱石から不純物を除去する選鉱工程で操業状況を確認するスタッフ



鉱石を運ぶための重機とその前でポーズをとるオペレーター

サントルイサ社は 1964 年、東京オリンピックと同じ年に設立され、1968 年にワンサラ鉱山を開山した。ワンサラ鉱山の調査開始時は満足な道路すらなく、リマから四輪駆動車と馬を使って 2 日かけて現地入りしたと聞く。また鉱山の建設に際しても物資輸送が大きな障壁となり、自ら道路等インフラを整備しながらの開発であった。さらに開山後も、ペルーにおける軍事政権の台頭と国有化政策、ハイパーインフレによる国家経済破綻、極左ゲリラの活動とテロリズムの蔓延、社会争議の激化と、様々な問題に悩まされつつ、その都度、日本からの駐在員、現地ペルー人社員の努力でなんとか克服し、操業を継続してきた。2006 年にはパルカ鉱山を開山し、これまで 54 年間の長きに亘って日本へ非鉄金属資源を供給し続けている。



環境モニタリングのための採水風景

鉱山業は周辺環境や地域コミュニティに与える影響が一般に大きい事業である。また、ペルーにおいては特に鉱山業に期待されている社会的責任が大きい。サントルイサ社は長きにわたってインフラの建設、教育や医療の無償提供、地域産業活性化策などにより地元を支援し、また同時に地元からは労働力の提供を受け、共存共栄を果たしてきた。ペルーに根付き、地元にも根付き、長く操業を継続していることは、グローバル企業の一つの成功例ではないかと自負している。

昨今、鉱山業には地球温暖化やエネルギー問題など、ローカルだけにとどまらない社会的責任が求められつつある。また同様に、2022年5月に親会社である三井金属鉱業（株）は企業としての存在意義として「探索精神と多様な技術の融合で、地球を笑顔にする。」というパーパスを定めている。これらが求めることは同じであり、我々が事業を継続していくためには、ローカルだけにとどまらず、より広く社会的責任を果たしていく必要がある。グローバルに働く三井金属の社員として、同時にローカルに活動するサントルイサ社の社員として、長期的かつ広い視野で、このペルーにて鉱山事業を継続していければと考える次第だ。る次第だ。

以上

III. 主任研究員レポート紹介

1. 欧州、特にドイツに学ぶ再生可能エネルギー発電の普及と送電網の整備 (諏訪 政市 主任研究員)

2021年8月、IPCCが公表した報告書は「地球温暖化が手に負えなくなる状況に近づいている。気温上昇の加速による熱波、干ばつ、豪雨の発生が頻発化しており、温室効果ガス

(GHG)削減等の対策が遅れば遅れるほど影響が増大する」とした。

何故か2021年7月は、世界中で異常気象による自然災害が頻発した。トルコ南西部の地中海やエーゲ海地方を中心とした180ヶ所以上の山火事、イタリア南部シチリア島やサルデーニャ島での100ヶ所以上の大規模火災、米国やカナダの記録的な熱波、米国カルフォルニア州北部のサクラメント近郊の山火事、ドイツとベルギーを襲った豪雨による洪水などが挙げられる。日本も例に漏れず、台風10号の接近に伴い熱海市伊豆山地区で発生した土石流は記憶に新しい。

再生可能エネルギー（再エネ）の普及を、先頭に立って推進してきた欧州、特にドイツには学ぶことが多く、ドイツの成功事例であれ、失敗事例であれ、参考にしていれば、COP26の会期中に、先進国の一つである日本は、活発であった脱炭素議論で後手に回り、2019年のCOP25に続き、またしても「化石賞」を受賞しなくてもすんだであろう。化石賞は気候変動に取り組む世界130ヶ国、1,500超のNGOで組織されるClimate Action Network- International (CAN)が、COP開催中の国際交渉の中で「温暖化対策に消極的だった国」に授与する極めて不名誉な賞である。

ドイツの地球温暖化及びエネルギー問題対策の基本方針は「エネルギー消費を可能な限り抑制し、化石燃料に代わるエネルギー源として巨大な事故リスクがある原子力ではなく、再エネを普及、拡大していく」というものであった。ドイツは電力消費を削減する「節電」を「大きな電源の一つ」として認識し、「2020年までに電力消費量を10%削減する」と具体的に数字を掲げて節電の実現を目指した。ドイツ政府は自らに大きな目標を課したが、目標を国民へ「周知徹底」することに加えて、国民の「理解」と「高い環境意識」があつてこそ実現が可能となる。

2022年3月末の気象庁の報道発表は「日本付近の大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度は、年々増加を続けており、2021年も陸上、洋上及び上空の観測の全てにおいて観測史上最高を更新した」というものであった。CO₂排出量削減が一向に進展しない中で、国民ひとり一人が地球温暖化を意識し、可能な限りの地球温暖化対策を実践することが大事ではないだろうか。太陽光パネル付き省エネ型戸建て住宅や燃料電池自動車等の高額な商品を購入することは誰にでもできる訳ではないが、「LEDへの切り替え」、「待機電力の節約」、「廃棄食品の削減」や「家庭ごみ分別の徹底」などは誰にでもできる。

2022年7月7日に開催された定例のメタ研成果報告会では、欧州諸国、特にドイツにおける地球温暖化対策を紹介するに止めた。環境先進国を知り、日本の現実と比較してもらいたいと考えたからだ。

ここでは、日本の再エネ発電の普及と送電網の整備の現状について列挙する。

○陸上風力発電

近年、ドイツでも住民や動物保護団体等による設置反対運動で地方自治体の建設許可が停滞しているが、反対運動がない地域の風車のリパワリングを積極的に実施している。高性能の風車に置き換えることによって設置数を大幅に削減し、環境への影響を軽減している。一方、日本では、環境破壊をせずに風車を設置できる場所が少なく、大型風車を運搬できる道路も少ない。日本も、ドイツ各州が風車設置に規則を設けたように、多くの自治体が再エネ発電所建設に規制を設けたため、今までのようにはプロジェクトは進捗しない。

○洋上風力発電（OWF）

日本で、OWF 建設が進まない理由は、そもそも着床式 OWF 建設適地が少ないことである。

OWF の基本設計に必要な「風況調査」、「海底地盤調査」、「気象海象調査」、「環境影響調査」、「漁業実態調査」等を開発事業者を実施させてきたことが、開発を大きく遅らせ、最初の大型着床式 OWF プロジェクト入札後のごたごたの原因にもなった。

また、政府が明確な OWF 建設計画を立てなかったため、日本から洋上風車メーカーが消滅した。今後、OWF 事業を進めるにしても、洋上風車の調達に難儀することが必至である。欧米の洋上風車メーカーは日本の OWF 建設計画が見えないこと、1 件の OWF プロジェクトの規模があまりにも小さいことに嫌気を差して、日本国内での工場建設計画を取りやめたという。

世界は、既に浮体式 OWF 建設の段階に入っているが、日本は、海洋エネルギー資源に恵まれているにも拘わらず、浮体式OWF の開発も海洋エネルギー発電の開発も進んでいない。

○太陽光発電

2012年7月から FIT 制度が始まったことにより、多くの企業や自治体が太陽光発電所の建設に走り、太陽光発電事業は全国各地に急激に広まった。しかし、せっかく発電した電力を送電できないという、電力会社による「出力制御」が頻発するようになった。出力制御は、九州、中国、四国、東北に拡大し、更に全国に広がろうとしている。

かつて、太陽光パネルの世界トップシェアを保持していた京セラが、2017年にパネル生産を中止して以降、パナソニック、三菱電機、出光興産が、2021年10月までに次々と国内生産を取り止めた。そのため太陽発電事業者の多くは中国製パネルを調達せざるを得ない状態になり、足元では、パネルの価格高騰と納期遅延が、用地不足に加えた「三重苦」になっているという。

メガソーラーは「里山」を消滅させ、地滑りや土砂崩れの原因を作ってきたため、全国的にメガソーラー建設を規制する動きが広がっており、市町村レベルでは 10 年近く前から地域制限や面積、出力制限等をする条例が作られ始めた。現在では由布市、真庭市、高崎市、富士宮市等に、都道府県レベルでは、岡山県、山梨県、兵庫県、和歌山県に 165 の条例ができています。

太陽光パネルは屋外設置のため、経年劣化は避けられず、その寿命は一般的に 20～30 年と言われている。使用済みパネルは「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」（廃掃法）に基づいて産業廃棄物として処分しなければならない。

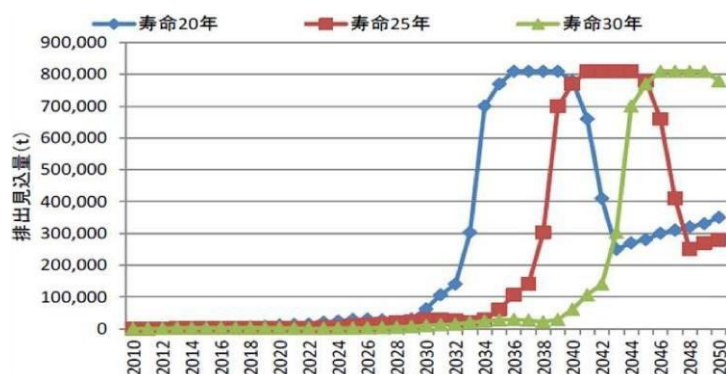


図 1 使用済み太陽光パネル排出量の推移 (2010～2050 年見込み)

(出典：Recycle Tech Japan 資料)

パネルが寿命を迎える 2030～2040 年頃になると、大量のパネルが廃棄される (図 1)。環境省の試算によると、使用済みパネル排出量は、その製品寿命を 25 年と仮定した場合で、2020 年には約 2,800t、2030 年には約 28,800t、2039 年には 775,000t となり、枚数にすると約 3,875 万枚

にもなる。果たして、このような大量の廃パネルのリサイクル処理ができるのだろうか。

○木質バイオマス発電

大型施設を含め多くのバイオマス発電計画が発表され、FIT 制度前に発電能力が 231 万 kW であったものが、2016 年 3 月末には、認定された合計発電能力は 600 万 kW を超え、更に 1 年間で駆け込み申請が急増し、2018 年 3 月末までに 420 超の案件が認定され、合計発電能力は 1,473 万 kW となった。これは、政府の 2015 年の長期エネルギー需給見通しの 2030 年度末目標値 602～728 万 kW を大きく上回ったが、このようなことが起きてもいいのだろうか。

因みに、2018 年の一般木材等・バイオマス液体燃料の容量ベースの FIT 認定の内訳は、燃料にパーム油等を含むものが 23%、パーム油等を含まないものが 77%であるが、パーム油等を含まないもののうち、PKS を含むものが 54%を占めている。言い換えれば、認定された発電事業者の 65%が何らかの形で輸入燃料を使用することになる。

日本の木材生産額は、1971 年に 9,891 億円あったものが、2015 年には、2,183 億円まで減少しており、林業に従事する人々の高齢化が進み、年々減少している中で、生産量を増やすことは難しい。また、林業が盛んではない地域では採算が取り難く、伐材を刈り取って運搬する事業は成り立たないとも考えられる。そして、主燃料である木質ペレットの輸入量は 2012 年からの 7 年間で 10 倍超に増加し、バイオマス発電燃料の自給率は 60%から 8%

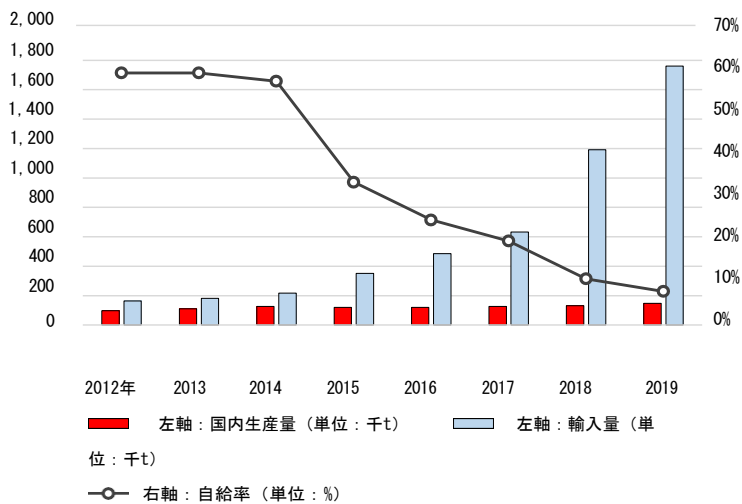


図 2 木質ペレットの国内生産量と輸入量の推移 (2012~2019 年)
(出典：林野庁資料)

に低下した (図 2)。

国産の木質ペレットの価格は、輸入品の 2~3 倍と言われ、発電コストの約 70%は燃料が占めるバイオマス発電事業で、生き残るためには輸入燃料を利用せざるを得ないが、FIT 制度では、家庭や企業が電力価格の一部を負担しており、FIT 資金が国内の山林でなく、木質ペレットや PKS、パーム油を日本に輸出している海外企業に流れていることになる。

一方で、2021 年 1 月に、「森林バイオマス発電はクライメートニュートラル (カーボンニュートラル) ではない」と認めた EU の報告書が発表された。木質バイオマス発電用燃料の生産国であり輸出国である国々は、燃料を生産するために森林を伐採したり、緑の山野をパーム椰子畑に開墾したりすることができなくなる可能性が出てきた。

○送電網の整備

再エネの普及に向けた課題や方策を議論する中で、必ず、その「発電量の変動への対応」や「送電網の増強の必要性」に言及される。

広域機関は 2021 年に地域間送電網の増強案を纏め、OWF が 45GW 導入される場合の投資額を最大 4 兆 8,000 億円と見積もった。送電網増強には多額の費用が必要であることは言うまでもないが、電力中央研究所は「再エネの導入拡大は極めて重要なことだが、原子力等の既存電源に加えて水素や GHG 回収・貯留等の技術を組み合わせて、地域間送電網増強に掛ける費用の最小化を目指すべき」としている。日本の将来的な電力需要の減少を考慮すれば、送電網の増強に過剰な投資をするのは得策ではない。このまま突き進めば、送電網増強工事が完了する頃には水素発電技術や GHG 回収・貯留技術が実用化され、「地産地消」が進み、蓋を開けてみたら利用率が極めて低調な地域間送電網になりかねない。結果的には、そのツケが国民に回されることになる。

因みに 2019 年度の地域間送電網の利用実績は 874 億 kWh で、日本の総発電量 (約 1 兆 kWh) の 8.5%に止まっているという。

政府は電力会社と 2021 年春までに計画を策定して具体的な場所や規模を詰めるとしていたものの、未だにイメージだけで明確な計画は提示されていない。送電網増強計画が最終決定されたとしても、運用開始までは 10 年以上は掛かる。再エネ拡大の支援には、とても間に合わない。

2. 米国、EU の重要鉱物政策の動向と日本の課題

(松田 大 主任研究員)

米国はトランプ前大統領就任以降重要鉱物政策に力を入れており、「対中国」と「莫大な資金投入」が特徴的である。バイデン大統領に代わってからも政策は引き継がれている。大半の政策が大統領命令のためトップダウンとなっているが、関係組織との連携により横断的な政策ともなっている。

米国での重要鉱物の定義は(1)米国の経済および国家安全保障に不可欠であること、(2)サプライチェーンが「破壊されやすい」状態にあること、(3)製品の製造に不可欠な機能を果たしており、その機能がなければ経済や国家安全保障に重大な影響を及ぼすこと、(4)国家非常事態において、米国の軍事、産業、および民生に必要な物資を供給するために必要であること、(5)そのような必要性を満たすのに十分な量が、米国国内で発見されていない、または生産されていないことの5点となっており、国家安全保障がキーワードになっている。

米国の最新の重要鉱物政策は2021年6月に公表した100日レビューである。重要鉱物では(1)新たな持続可能性基準の開発と育成、(2)二次・非従来型資源からの回収とリサイクルを含む、持続可能な国内生産の拡大、(3)DPA(国防生産法)とその他のプログラムの展開、(4)生産拡大のための業界関係者の招集、(5)持続可能な生産と熟練労働力を支援するための研究開発の推進、(6)備蓄の強化、(7)同盟国・パートナーとの協力とサプライチェーンの透明性強化を挙げており、電気自動車を含む大容量バッテリーでは(1)国産大容量電池を使用した最終製品の需要の喚起、(2)先進電池の主要鉱物の責任ある調達強化、(3)電池材料、セル、パックの持続可能な国内生産の推進、(4)電池市場における競争力を維持するために必要な人材と技術革新への投資を挙げている。

米国は100日レビュー後、莫大な資金を投入し、法整備の改正、外交と精力的に活動している。

EUは2011年から重要鉱物の政策に取り組んでおり、3年毎に見直しをしている。重要鉱物を「経済的重要性が高く、供給リスクが高い」と定義しており、2020年に最新の政策を公表している。中国についても米国程強い表現ではないが触れられている。

EUは政策としてアクションプランを公表しており、米国の100日レビューに近い。2050年までにデジタルで気候変動に左右されない経済を実現することで「世界での影響力を高める」とし、「サプライチェーンの強靭性を高めることはグリーンエネルギーへの移行とエネルギー安全保障を両立させる上で重要である」と明記している。内容として、(1)強靭性のあるバリューチェーンを開発する、(2)重要な原材料の一次原料への依存度を低減する、(3)EU内での原材料の国内調達と加工を強化する、(4)供給を多様化し、国際貿易の歪みを取り除くとしている。

EUも米国同様法整備の改正や外交活動を展開している。ERMA(欧州原材料同盟)を作り、重要鉱物確保のため精力的に活動している。


日本の重要鉱物は経済安全保障に該当し、「鉱物資源の安定供給の確保」が目的となっている。政策は「レアメタルの安定確保」に重点が置かれており、2010年の中国の日本へのレアアース禁輸措置が影響している。日本の資源政策 5 本柱として、海外資源確保の推進、リサイクルの推進、省資源・代替材料の開発、備蓄、海洋資源開発となっている。

2050年カーボンニュートラル実現に向けて経済産業省はグリーン成長戦略を掲げており、大量の非鉄金属が必要となる。世界でも同様の動きとなっており、重要鉱物の争奪戦となりつつある。資源国の資源ナショナリズム、中国の市場寡占化と時刻優遇政策により資源確保は困難な状況である。日本は2010年の尖閣諸島問題による中国のレアアース禁輸措置により供給途絶リスクが顕在化した。

日本は先述したように鉱物資源の安定供給の確保を目的とした政策を展開しており、総合資源エネルギー調査会報告書と新国際資源戦略で、①資源外交・国際協力、②人材育成、③権益確保のさらなる取り組み、④国産資源開発の推進、⑤製錬工程やメタル・リサイクルの強化、

⑥サプライチェーンの強靱化、⑦レアメタル備蓄の拡充、⑧省資源化・代替資源開発を方向性として示している。直近では経済産業省に戦略物資・エネルギーサプライチェーン対策本部設置、経済安全保障推進法制定、米国が主導する鉱物安全保障パートナーシップ参加と法整備の策定や外交も展開している。

米国、EU、日本は重要鉱物リストをそれぞれ作成している。各国が供給リスク、経済脆弱性を独自に評価し採用している。評価基準は異なるものの、今後成長するであろう再生可能エネルギーや電気自動車で使用されるレアアース、PGM、Li、Coを含め、多くの鉱物が3カ国で重複しており、重要であるということが共通認識であることがわかる(図1)。これら重要鉱物への日本の積極的な関与とさらなる進展を願う。

		 As Sn Zn									
	P(リン酸塩)	Al	Li	Co	Ga	Sb	Ba	Mn	Ni	Se	
	P(リン鉱石)	Sc	In	V	Mg	Nb	C(天然)	Cs	Cr	Re	
	C(原料炭)		Be	Bi	F	Ge	PGM	Te	Rb	Mo	
	天然ゴム		Ta	Ti	W	Hf	REE	Zr		Tl	
											
			B	Si	Sr						

米国はPGMとREEは個々に採用、EUはHREE,LREEで採用しているがまとめている

図1 米国、EU、日本の重要鉱物リスト

VII. 非鉄金属の基礎知識

2.3.2. 非鉄金属資源の採掘（技術）

前回は第2章資源編のうち非鉄金属資源の開発までの流れを紹介したが、今回は同じ第2章のうち非鉄金属資源の採掘について一部紹介する。

2.3.2. 非鉄金属資源の採掘（技術）

(1) 採鉱法の概要

採鉱法は、露天掘り（Open Pit Mining）と坑内掘り（Under Ground Mining）に二分されるが、鉱山開発において採鉱法を決めるにあたって最初に検討されるべき要素は以下の通りである。

- (ア) 鉱体の空間的特徴（形、深さなど）
- (イ) 地質的、水理学的条件（母岩、排水、鉱物組成）
- (ウ) 岩盤力学的特徴（鉱石と土砂の特徴、岩盤強度指数など）
- (エ) 経済状況（鉱量品位、生産量、鉱山ライフなど）
- (オ) 技術的要素（採取率、ズリ混入率など）
- (カ) 環境課題（物理的、社会的影響など）

表 2-3-2-1 採掘法の分類

位置	分類	小分類	方法	対象
地表	機械的		露天掘り(Open pit)	金属、非金属
			石切り(Quarrying)	非金属
			オープンキャスト	石炭、非金属
			掘削(Auger)採掘	石炭
	水力	砂鉱床	高圧水採掘(Hydraulicking)	金属、非金属
			浚渫(Dredging)	金属、非金属
坑内	溶解		ボアホール採掘	非金属
			リーチング	金属
		無支保	ルーム&ピラー	石炭、非金属
			ストープ&ピラー	石炭、非金属
	支保		シュリンケージ	金属、非金属
			サブレベル・ストーピング	金属、非金属
			カット&フィル・ストーピング	金属
			スタル（横木）・ストーピング	金属
		ケービング	ロングウォール・ストーピング	石炭
			サブレベル・ケービング	金属
	ブロック・ケービング	金属		

(2) 露天掘り (Open Pit Mining)

露天掘りは、表土・被覆地層を剝土し、鉱体を採掘・運搬する方法であり、金属鉱山では、“Open Pit Mining” と呼ばれる、階段式にベンチを作って、すり鉢状にピットを掘り下げる方法が代表的である。露天掘り鉱山に用いられる機械は、坑内専用機械と違い坑道の大きさなどの制限を受けないために、大型化が可能であり生産性を向上させやすい。また、土木工事と兼用できることも利点である。近年は無人トラック輸送などの導入など、さらなるコスト削減策が実証されつつある。

地表に近い部分の採掘には有利な露天掘りであるが、対象鉱体が深部に達すると、採掘する鉱石に対して除去すべき土砂の量が増える（剝土比の増加）と同時に鉱石の運搬距離も増加する。

また、露天掘りの場合には、景観への影響、再生（覆土、植栽）の必要性、坑外におけるズリ堆積場の確保なども考慮する必要である。

世界の銅鉱山の生産量ベスト 20 を見ると、坑内掘り鉱山は 3 鉱山だけで残りは露天掘り鉱山である。（表 2-3-2-2 参照）

しかしながら、長年にわたる採掘によって、採掘箇所は次第に深部化しており、当初露天掘りからスタートして、深部に達した時点で坑内掘りに移行する鉱山も増えている。チリの Chuquicamata 鉱山は、1915 年開山の歴史ある露天掘り鉱山であるが、2019 年に露天掘りの採掘を終了し坑内掘りに移行する。インドネシアの Grasberg 鉱山、モンゴルの Oyu Tolgoi 鉱山も露天掘りから坑内掘りへの移行を進めている。

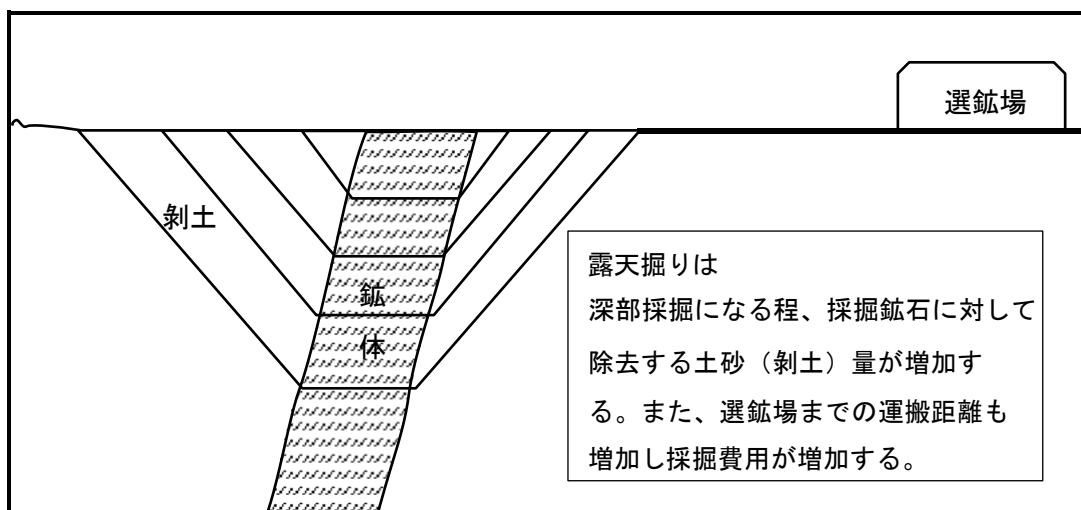
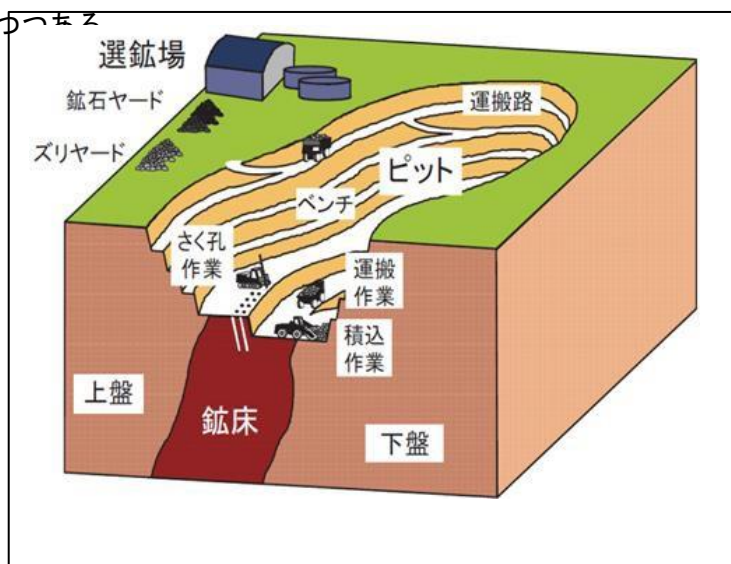


図 2-3-2-2 剝土量
(出典)MERIJ 作成

露天掘りで使用される主な機械としては、火薬を込めて発破行うための孔を穿孔する穿孔機、鉱石や土砂を運搬する運搬機（トラック）、鉱石や土砂を積込、積込み機がある。他にも、道路補修用のグレーダー、粉塵を抑えるための散水車、大塊の小割用の破碎機、トラックのタイヤ交換機など補助的な機械が用いられる。



図 2-3-2-3 露天鉱山機械
(出典) Komatsu Mining Corp. Web サイト

表 2-3-2-2 世界の生産量上位 20 銅鉱山の採鉱法(2018 年)

鉱山名	国	採掘方法 OP: Open Pit UG: Under Ground	生産量 (銅量千トン/年)	累計世界 シェア(%)
1. Escondida	Chile	OP	1,235	6.1
2. Collahuasi	Chile	OP	559	8.9
3. Grasberg	Indonesia	OP(UG)	557	11.7
4. KGHM Polska Miedz	Poland	UG	502	14.1
5. Cerro Verde	Chile	OP	476	16.5
6. El Teniente	Chile	UG	465	18.8
7. Antamina	Peru	OP	446	21.0
8. Morenci	USA	OP	431	23.1

9. Buenavista	Mexico	OP	414	25.2
10. Las Bambas	Peru	OP	385	27.1
11. Los Bronces	Chile	OP	370	29.0
12. Los Pelambres	Chile	OP	356	30.8
13. Polar Division	Russia	UG/OP	353	32.5
14. Radomiro Tomic	Chile	OP	333	34.2
15. Chuquibambilla	Chile	OP/UG	321	35.8
16. Kansanshi	Zambia	OP (UG)	252	37.0
17. Trident-Sentinel	Zambia	OP	224	38.1
18. Mt Isa Copper	Australia	UG	218	39.2
19. Toromocho	Peru	OP	208	40.2
20. Antapaccay	Peru	OP	205	41.3

(注) OP : Open Pit、UG : Under Ground の略

(出典) S&P Global Market Intelligence

(3) 坑内掘り (Under Ground Mining) 鉱

体が地表深くに存在する場合、坑内掘り工法が採用される。ただ、鉱体が賦存する深さによっては開発コストが高くなり、ある程度の品位がなければ採算が取れないので、前記のような FS での評価が重要になってくる。

坑内掘り工法は無支保採掘、支保採掘とケービングに分類される。金属鉱山で主に採用される工法以下の通り。

① 無支保採掘

・ ルーム&ピラー採掘

古くからある、水平に近い鉱体に対して用いられる採掘法であり、鉱床の一部を採掘しないでピラー（鉱柱）として掘り残し、このピラーによって天盤を支持しながら鉱石を採掘する。

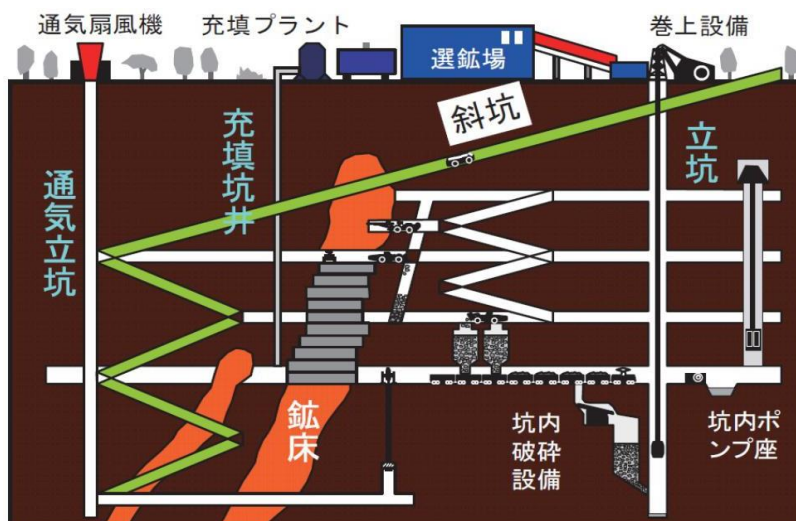


図 2-3-2-4 坑内掘り模式図

(出典) JOGMEC 鉱山開発概論 2010 年

石炭、岩塩などの非金属鉱床の採掘にも採用されている。ピラーとルームの寸法は、天盤の安定性、地圧の大きさなどによって決められる。採掘コストは比較的安いだが、残すピラーの比率により採掘実収率が問題となるために、比較的低位の鉱床の採掘に適している。ルーム&ピラー採掘法を採用している世界的な鉱山としては、ポーランドのKGHMが操業するPotska Miedz銅鉱山がある。Potska Miedz銅鉱山は、2018年実績で世界第4位の銅生産量を誇り、山元には銅製錬所もあり、ポーランドが欧州最大の銅地金生産国となっている。

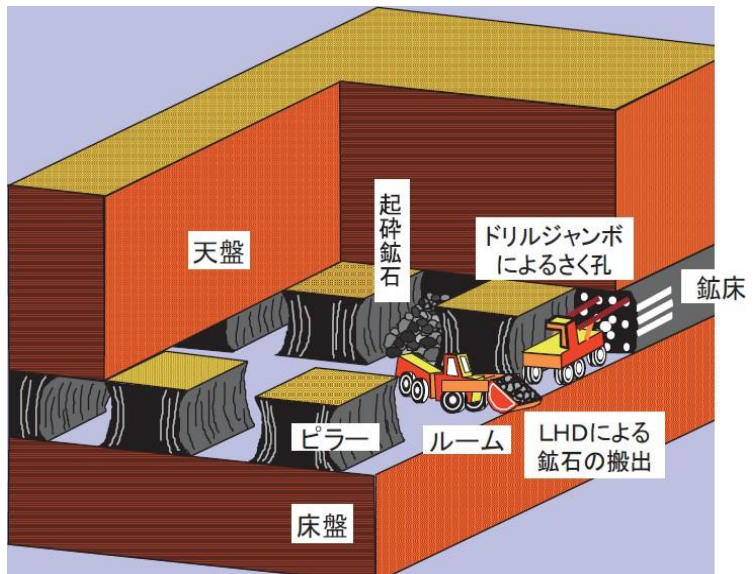


図 2-3-2-5 坑内掘り模式図

(出典) JOGMEC 鉱山開発概論 2010 年

・サブレベル・ストーピング

サブレベル・ストーピング法は、鉱床の中に大規模な空洞を生じさせる急傾斜な鉱床に適した採掘法である。穿孔と発破は鉱体の中の中段で実施される。サブレベル・ストーピングには3種類のバリエーションがある。放射線（リング状）穿孔、平行穿孔とVCR（Vertical Crater Retreat）法。いずれの方法も起砕された鉱石を重力により鉱体の最下底レベルに落として、運搬坑道に抽出される。そのために重力が利用できる鉱体の傾斜（急傾斜）が必要である。母岩が脆いと土砂が崩れでズリ混入率が上がる。母岩、特に上盤がある程度強固である必要がある。生産性が高く採掘コストが比較的安い反面、出鉱までの開坑作業に要する経費と時間が多大である。鉱体が不規則な場合はズリ混入率が上がる可能性がある。作業者は中段で作業するために、比較的安全な場所での作業が可能である

サブレベル・ストーピングを採用した鉱山としては、豪州のMt. Isa 鉱山、日本の神岡鉱山などがある

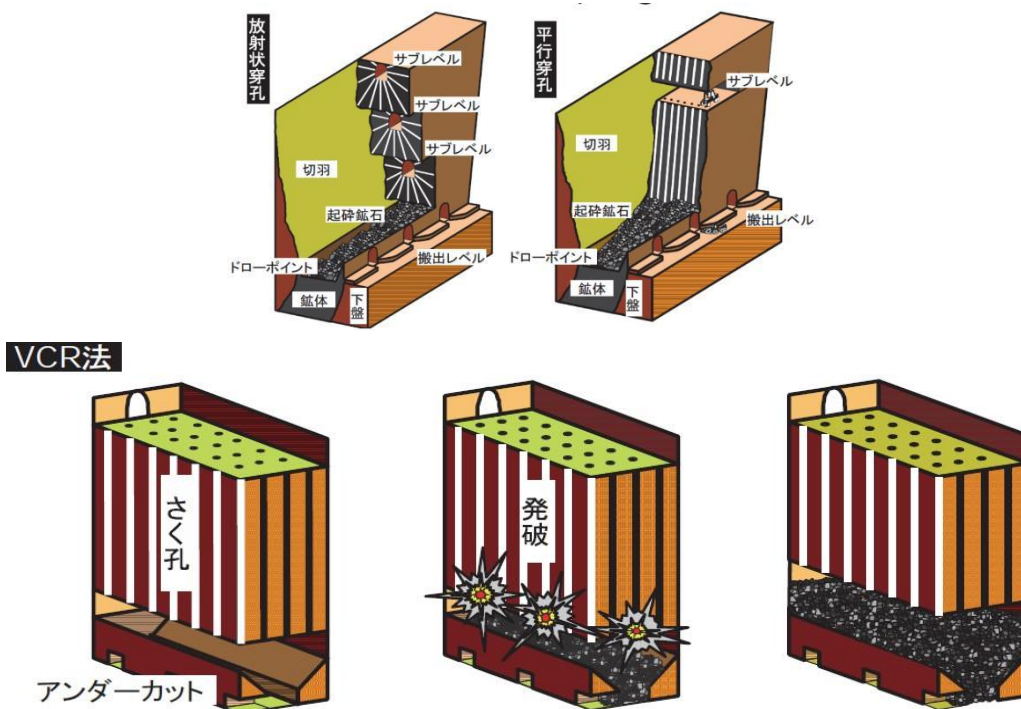


図 2-3-2-6 サブレベル・ストーピング比較
(出典) JOGMEC 鉱山開発概論 2010 年

② 支保採掘

・カット&フィル採掘

カット (Cut) は採掘を表し、フィル

(Fill) は充填 (埋め戻し) を表す。採掘した直後に充填を実施することから Cut & Fill と呼ばれる。通常は下部から順次上向きに採掘、充填を繰り返すが、人口天盤を作りながら、下向きに採掘を進める場合もある。充填物としては開坑で発生するズリ、坑外から土砂を搬入あるいは選鉱排滓を流体輸送するなどがある。採掘毎に鉱床の分布、品位を確認できるために、鉱床の形が不規則な場合に適している。採掘の準備作業の負担 (時間、経

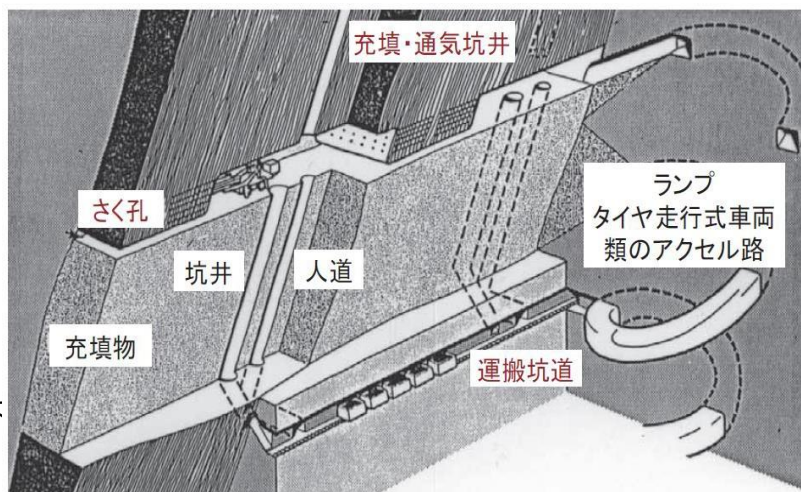


図 2-3-2-7 機械化された Cut & Fill

(出典) JOGMEC 鉱山開発概論 2010 年

費) は比較的軽い。鉱床を確認しながら採掘するために、採掘実収率は比較的高く、ズリ混入

率も抑え安い。生産性に関しては、比較的採掘コストは高くなる。上下盤の母岩は多少軟弱でも適用可能である。作業は絶えず新しい天盤の下で作業するために、保安面の監視に注意が必要である。充填期間中は採掘が停止するために、いくつかの切羽を組み合わせ、採掘と充填のサイクルを回す必要がある。



上向き Cut & Fill

下向き Cut & Fill

図 2-3-2-8 Cut & Fill 比較

(出典) JOGMEC 鉱山開発概論 2010 年

上向き Cut & Fill 採用の鉱山としては、神岡鉱山、Huanzala 鉱山（ペルー）があり、下向き Cut & Fill 採用の鉱山としては、Lucky Friday 鉱山（U.S.A）、花岡鉱山などがある。

③ ケービング採掘

・サブレベル・ケービング

ケービングは陥没を意味し、サブレベル・ケービングは、サブレベル（中段）を使い陥没を起こしながら採掘する採掘法であり、大規模、急峻な鉱体に用いられる坑内掘り採掘法である。上盤側” hanging wall” は崩落させるので設備は下盤側” footwall” に設置される。図 2-3-

2-9 にサブレベル・ケービングの概念図を示す。

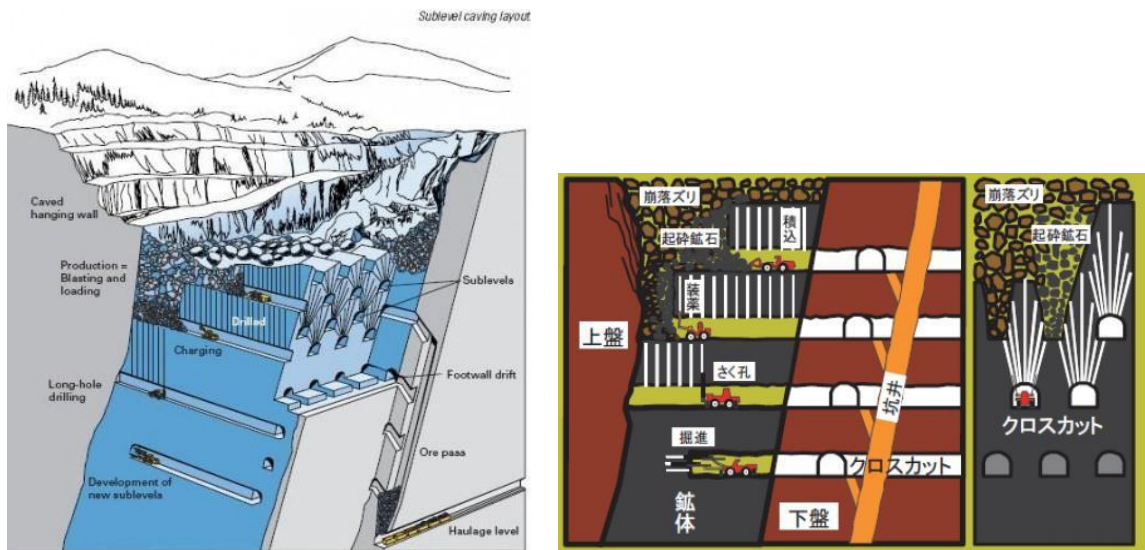


図 2-3-2-9 サブレベル・ケービング

(出典) Queens Mine Design Wiki、JOGMEC 鉱山開発概論 2010 年

採掘は鉱体上部から始まり、サブレベルを開坑し、リング状の長孔穿孔を実施。上盤よりから順次発破を実施して、鉱石を抽出しながら後退していく。鉱石抽出後は上盤側の母岩（土砂）が崩落して空隙を埋めていく。この作業を各サブレベルで繰り返して採掘を進める。

上部の鉱体から下部に移って行く。各レベルで坑道開坑→長孔穿孔→発破→鉱石抽出→土砂自然充填のサイクルを繰り返すことになる。サブレベル・ケービングは地表の沈下をもたらず採掘法である。

サブレベル・ケービングを採用している主な鉱山は Kiruna 鉄鉱山（Sweden）である。

・ブロック・ケービング

ブロック・ケービングは大規模鉱体の鉱石を効率良く採掘できる採掘法であり、近年この方式を採用する大規模鉱山が増えてきている。図の 2-3-2-10 にNorth Parkes のブロック・ケービング採掘準備手順を示す。

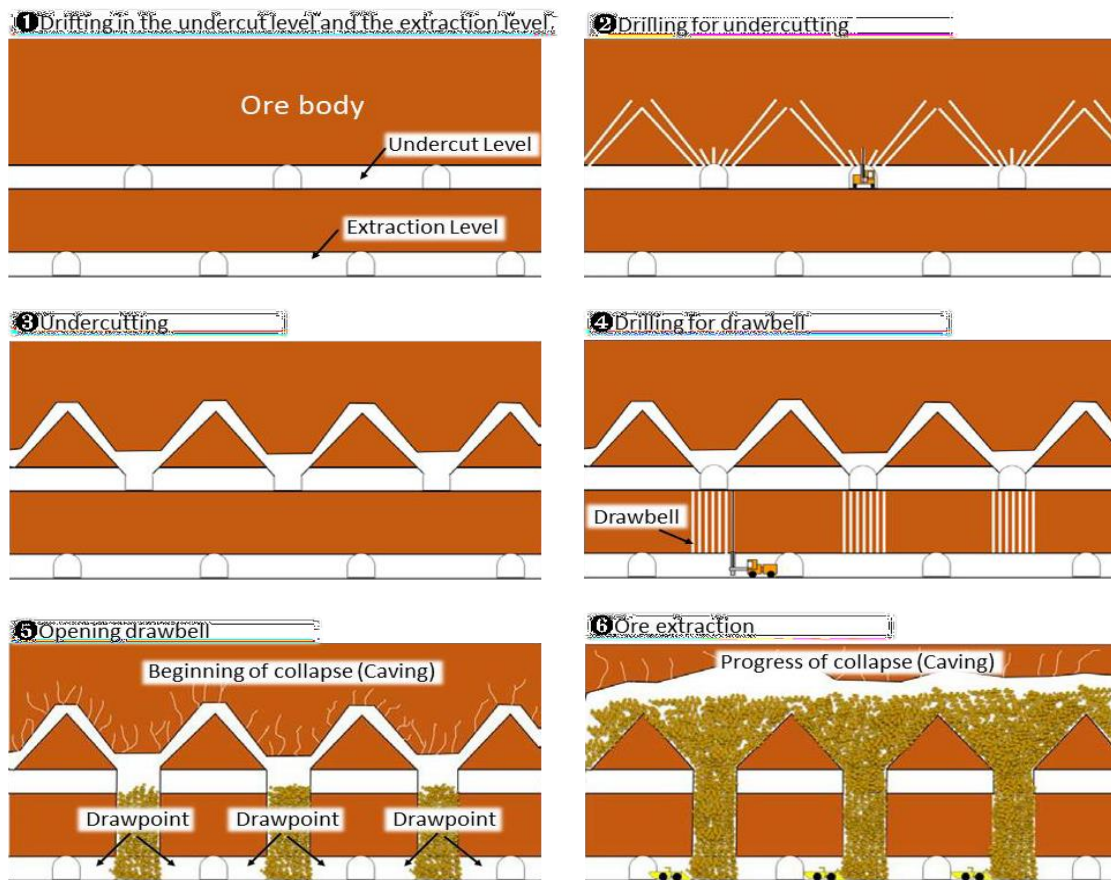


図 2-3-2-10 North Parkes のブロック・ケービング

(出典) 住友金属鉱山株式会社 ニュースリリース

- ① 鉱体の下部にアンダーカット（下透かし）坑道を開削。アンダーカットレベルよりも下部レベルに鉱石を抽出する坑道を開削する。
- ② アンダーカット坑道から発破用の穿孔を実施する。
- ③ 発破によりアンダーカットレベルより上に崩落させるための空間を生じさせる。
- ④ 抽出坑道からアンダーカットレベルにスロット（立坑）用の穿孔を実施する。
- ⑤ 発破により鉱石抽出用の立坑を掘削し引く抜き、崩落開始を誘導する。
- ⑥ 鉱石を抽出することにより崩落した鉱石の上部に新たな空間を生じさせて、次の崩落を誘発させる。

図の 2-3-2-11 と 2-3-2-12 にブロック・ケーシングの概念図を示す。

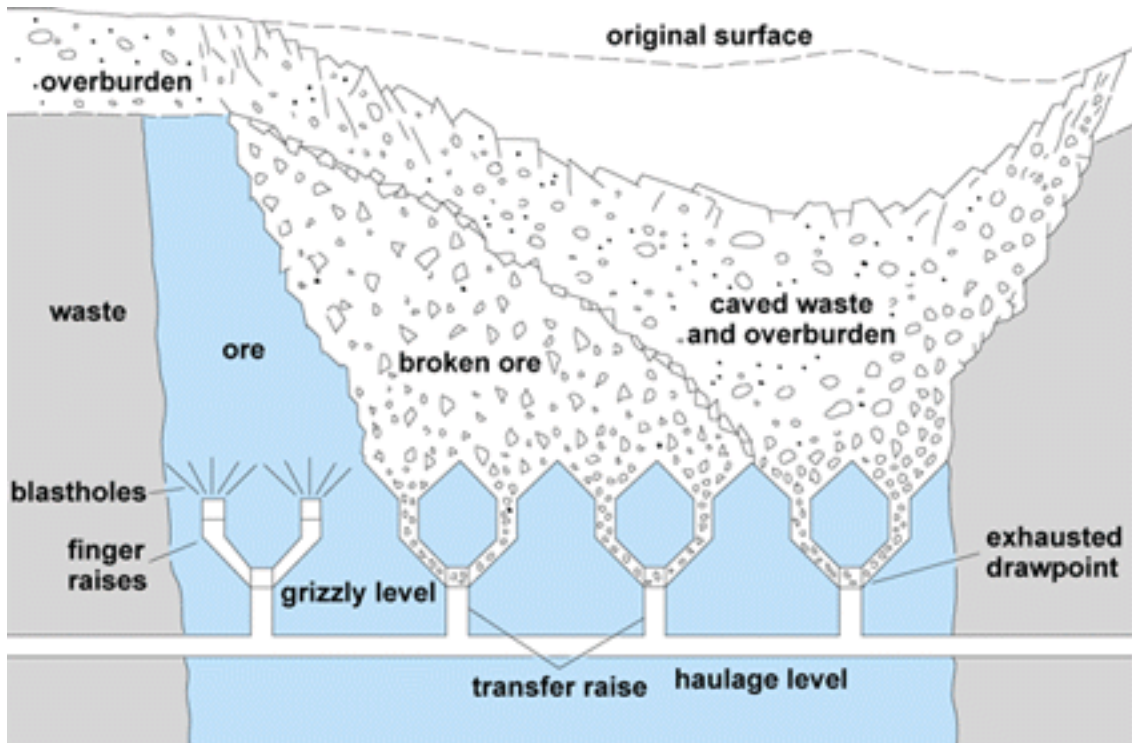


図 2-3-2-11 ブロック・ケーシング

(出典) Newtrax Technologies Inc. Web site

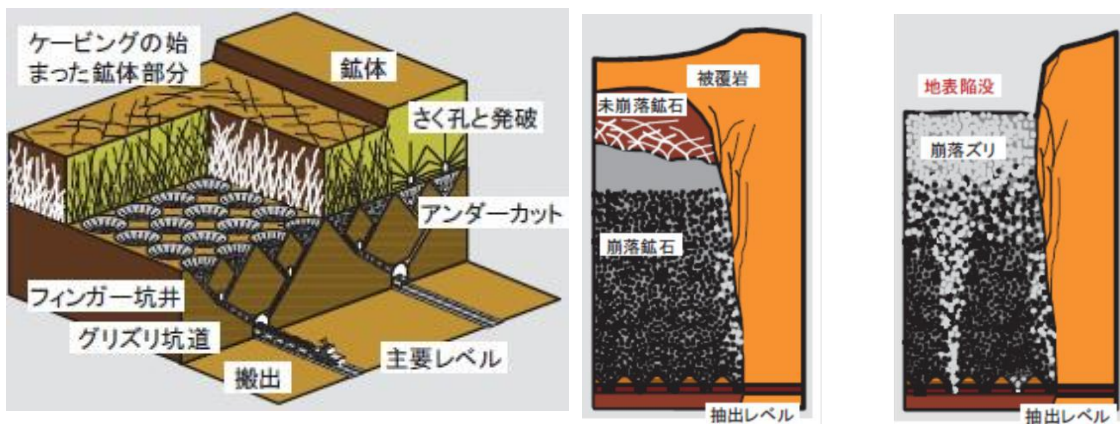


図 2-3-2-12 ブロック・ケーシング

(出典) JOGMEC 鉱山開発概論 2010 年

ブロック・ケーシング採掘法は、サブレベル・ケーシング法と同様にケーシング（陥没）を利用する採掘法であるが、ブロック・ケーシング採掘法は、鉱石の抽出レベルが鉱体の下部に準備されるために、他の採掘法に比べて生産開始までの準備期間に時間を要し、初期投資が高く

なる。ただ、大きな利点としては、初期投資が高いものの、自然崩落を利用するために、爆薬による破碎の必要がないために、操業コストは他の採鉱法よりも極めて小さいことである。鉱石を抽出する坑道は一定であり長期にわたって使用されるために、十分な補強が必要とされるが、運搬の合理化投資はしやすい。ブロック・ケービング採掘法は、技術的には難しいが、採掘技術の向上によって、大規模な採掘法が目立ってきている。反対にデメリットとしては、サブレベル・ケービングと同様に地表の沈下を生じさせる採掘法であり、地表付近への影響はあらかじめ考慮しておく必要がある点が挙げられる。また、自然崩落の制御が結構難しく、途中で崩落が止まった場合には、大規模な空間が出来てしまい、その対応が大変であることが挙げられる。

ブロック・ケービングが適用されている主な鉱山は Northparkes（豪州）、El Teniente（チリ）、Palabora（南アフリカ）などがある。また、前記の坑内掘りに移行するチリの Chuquicamata 鉱山、モンゴルの Oyu Tolgoi 鉱山は、いずれもブロック・ケービング採掘法を採用している。

④ 採鉱法の検討

前述の通り、大規模露天掘りから坑内掘りへの移行が進む中で、低コスト・大量採掘法の研究・成果の交流の場として「MassMin」会議があり、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年デンバー（米国）で開催されてから南アフリカ、豪州、チリなどの鉱業国で開催され、2020年は第8回会議がサンティアゴで開催される予定となっている。

坑内掘りの採掘コストは、鉱体の形、生産量、岩盤の状況などにより大きく変化するため採掘法毎の操業費用を比較することは難しいが、“Introductory Mining Engineering”に掲載された数字と、2011年 Global Metals & Mining Conference で発表された数字の比較を表 2-2-2-3 に示す。

表 2-2-2-3 坑内掘り採掘法コスト比較

採鉱法	Introductory Mining Engineering	Global Metals & Mining Conference
	\$/ton	\$/ton
カット&フィル	30-70	20-70
サブレベル・ストーピング	12-35	7-25
ルーム&ピラー	10-25	7-20
サブレベル・ケービング	10-30	7-17
ブロック・ケービング	5-15	1-2.5

（出典）Introductory Mining Engineering, Global Metals & Conference

坑内掘り採掘法の中ではブロック・ケービング法が操業費の面では一番安く、大規模で上下に連続する鉱体に対しては、今後もブロック・ケービングの採用が増えると考えられる。

⑤ 坑内掘り機械

坑内掘りに使用される鉱山機械は、アクセス坑道の大きさの制限から、専用車両が主に用いられる。そのために坑内用鉱山機械は露天掘り機械と比較すると割高になる。坑内積込み機

(Load Haul Dump) のリモート・コントロールの採用により、ケービング法による鉱石の抽出が安全に実施できるようになり、ケービング法の採用が拡大された。



トンネル穿孔機械 (Jumbo)



長孔穿孔機械 (Long hole drill)



積込み機 (Load Haul Dump)



坑内用トラック

写真 2-3-2-1 坑内機械

(出典) Sandvik Web site