

## 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	
	水力	砂鉱床	掘削(Auger)採掘	石炭	
			高圧水採掘(Hydraulicking)	金属、非金属	
		溶解	浚渫(Dredging)	金属、非金属	
坑内	無支保		ボアホール採掘	非金属	
			リーチング	金属	
			ルーム&ピラー	石炭、非金属	
			ストップ&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。

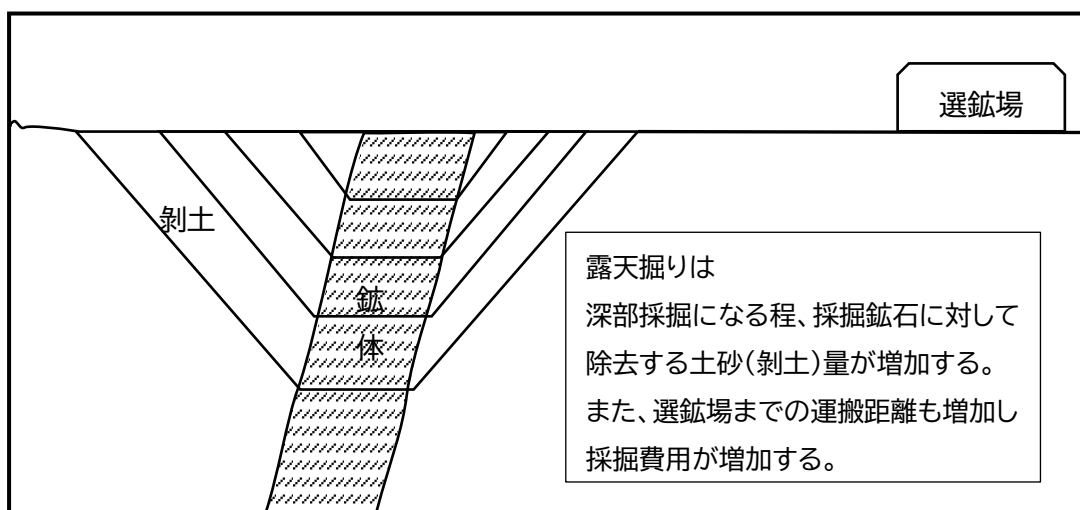
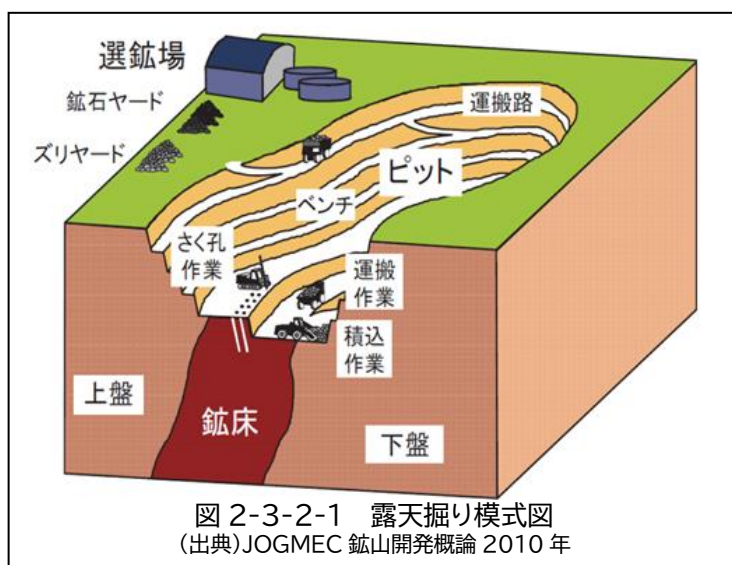


図 2-3-2-2 剝土量  
(出典)MERIJ 作成

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、積み込み機がある。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	生産量	累計世界
		OP: Open Pit UG: Under Ground	(銅量千トン/年)	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. Chuquicamata	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。

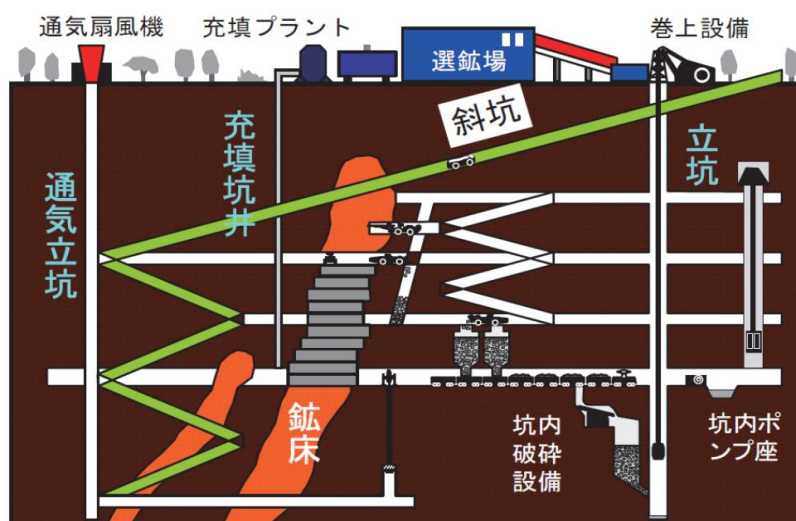


図 2-3-2-4 坑内掘り模式図

(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。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。

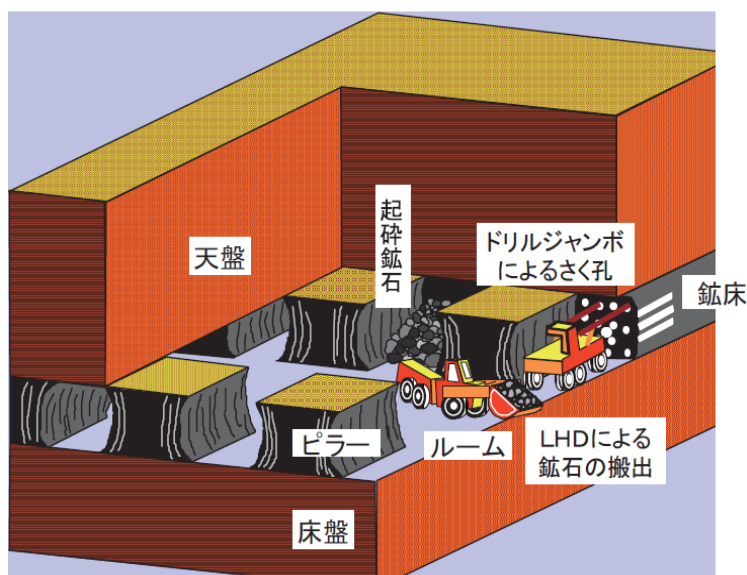


図 2-3-2-5 坑内掘り模式図  
(出典)JOGMEC 鉱山開発概論 2010 年

#### ・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



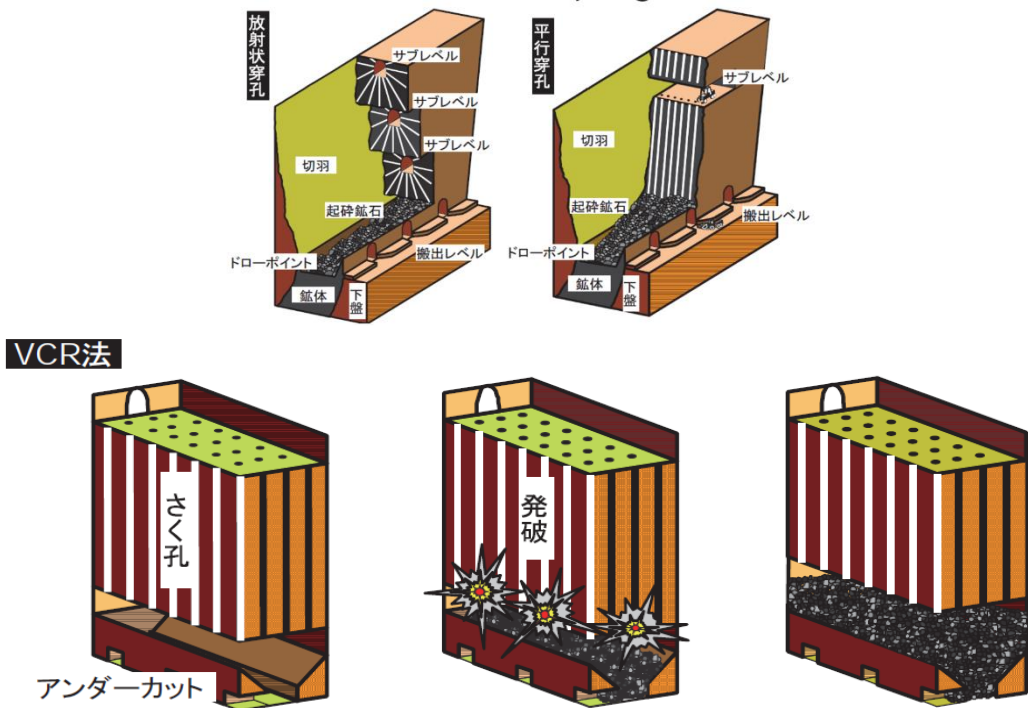


図 2-3-2-6 サブレベル・ストーピング比較  
(出典)JOGMEC 鉱山開発概論 2010 年

## 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

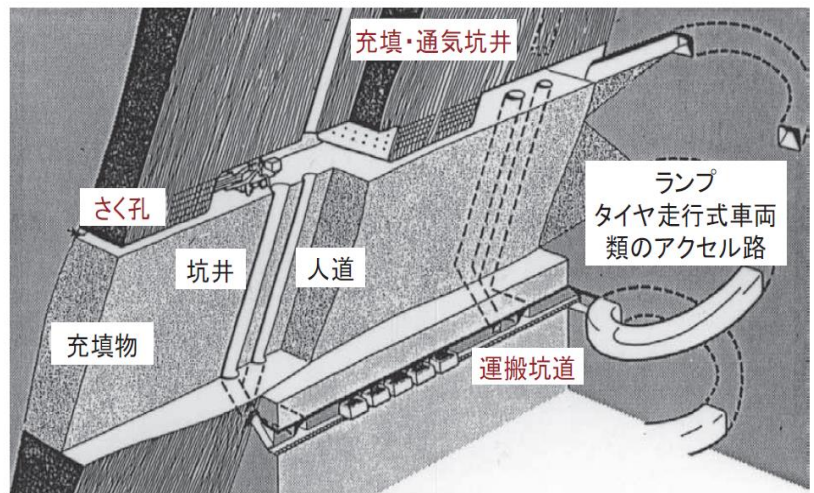


図 2-3-2-7 機械化された Cut & Fill  
(出典)JOGMEC 鉱山開発概論 2010 年

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。

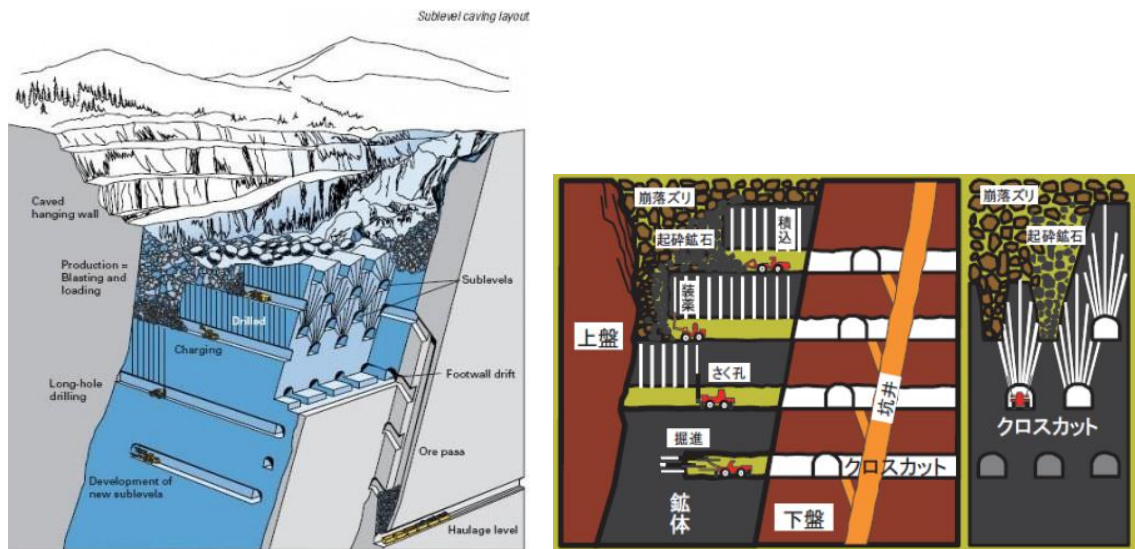


図 2-3-2-9 サブレベル・ケービング

(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す採掘法である。

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。



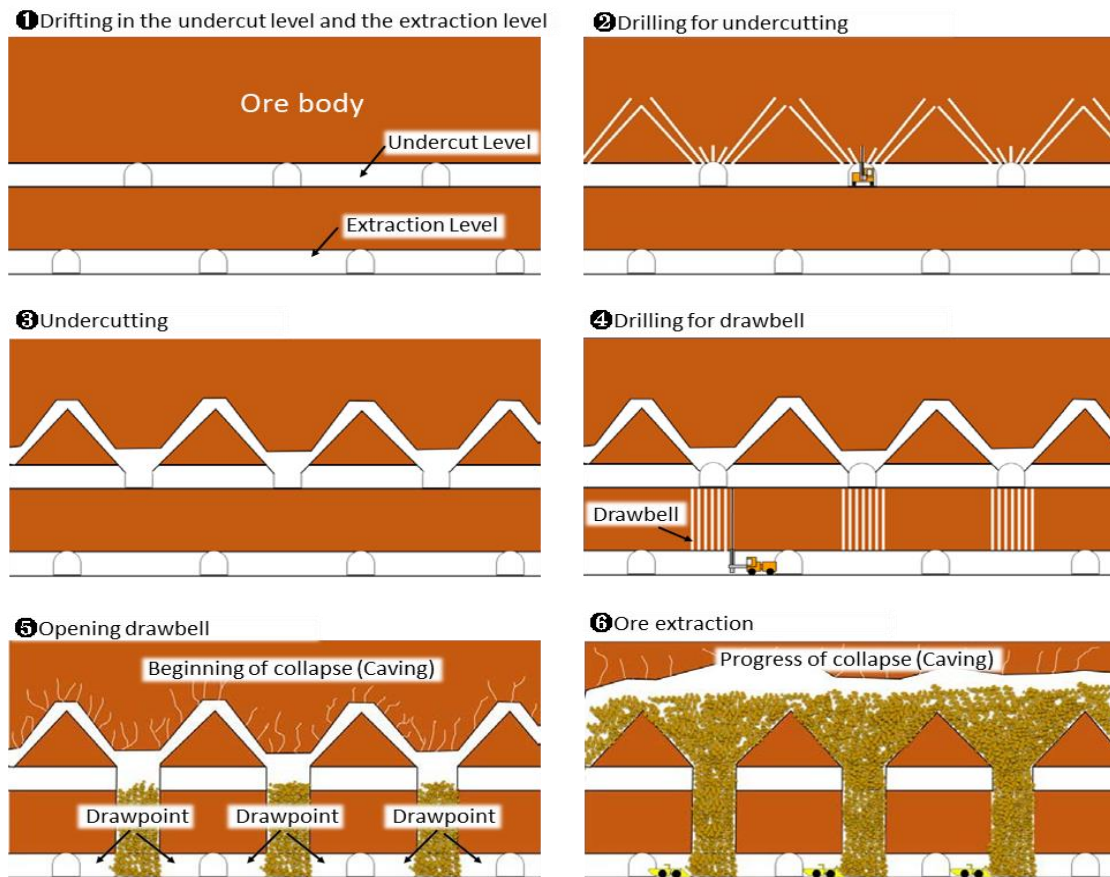


図 2-3-2-10 North Parkes のブロック・ケービング

(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・ケービングの概念図を示す。

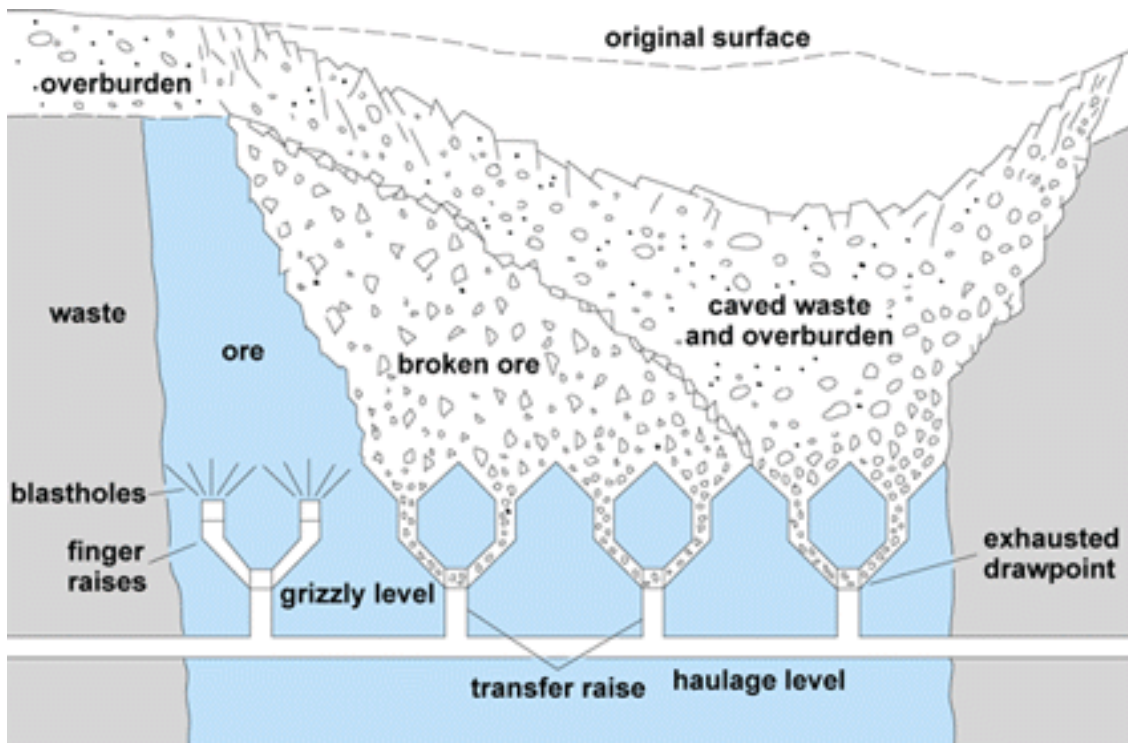


図 2-3-2-11 ブロック・ケービング

(出典)Newtrax Technologies Inc. Web site

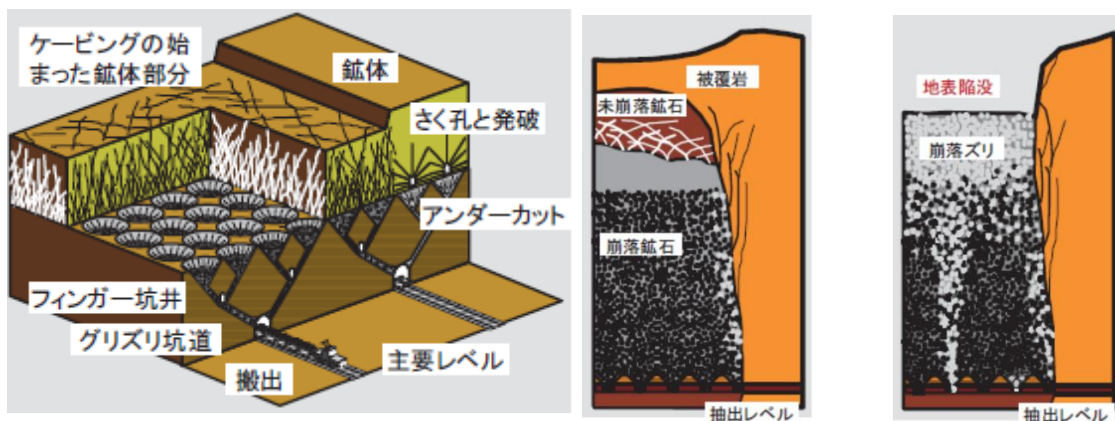


図 2-3-2-12 ブロック・ケービング

(出典)JOGMEC 鉱山開発概論 2010 年

ブロック・ケービング採掘法は、サブレベル・ケービング法と同様にケービング(陥没)を利用する採掘法であるが、ブロック・ケービング採掘法は、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に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