

# 資源開発技術の課題と展望

## 採鉱技術のチャレンジ マスマイニング vs コンパクトマイニング

東京大学 大学院工学系研究科

地球システム工学専攻

山富 二郎

tjiro@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

学会会議公開講演会(2008年1月25日)

1

### 鉱物・エネルギー資源の生産量 (1)

— World Mining Data より —

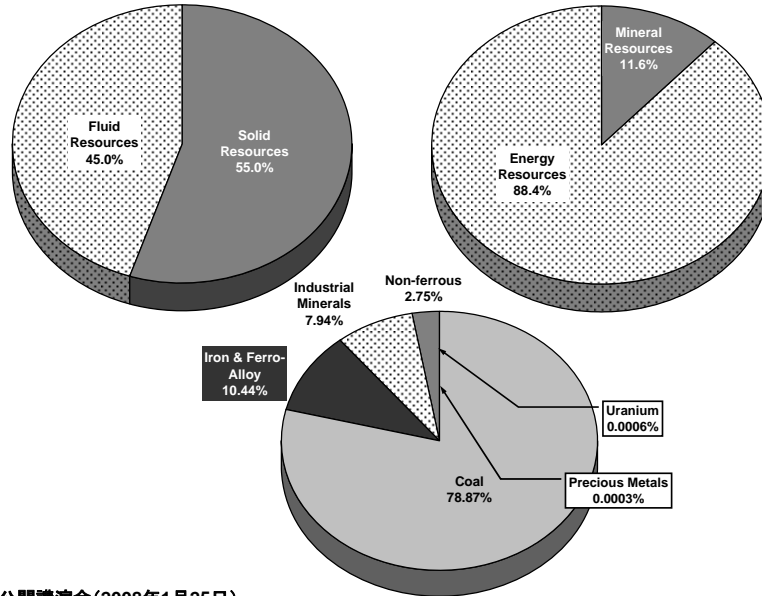
単位: 10<sup>6</sup> t

鉱物グループ	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
鉄・鉄合金金属	463.9	515.2	523.1	537.4	552.9	569.1	559.2	564.1	528.6	513.7	541.6
非鉄金属	126.5	117.1	126.6	134.3	137.7	146.1	147.6	151.4	145.5	147.9	147.9
貴金属	0.014	0.015	0.015	0.016	0.017	0.018	0.018	0.018	0.017	0.017	0.016
工業用原料鉱物	472.7	498.4	494.8	513.2	528.1	529.1	528.1	509.1	505.0	478.5	494.8
鉱物資源計	1,063.1	1,130.6	1,144.5	1,184.9	1,218.8	1,244.3	1,234.9	1,224.5	1,179.1	1,140.2	1,184.3
石炭	4,219.1	4,402.2	4,525.4	4,634.3	4,713.6	4,858.0	4,799.7	4,646.2	4,561.8	4,420.5	4,522.2
石油	2,838.1	2,764.2	2,852.9	2,875.4	2,981.5	3,057.3	3,011.3	3,091.8	3,106.4	3,181.4	3,162.0
天然ガス	1,380.3	1,413.2	1,441.8	1,497.6	1,574.2	1,628.8	1,648.2	1,682.7	1,643.1	1,703.4	1,794.1
ウラン	0.061	0.062	0.065	0.055	0.054	0.062	0.055	0.047	0.041	0.039	0.033
エネルギー資源計	8,469.5	8,611.6	8,851.3	9,037.8	9,297.8	9,572.6	9,485.6	9,446.1	9,335.8	9,331.2	9,500.3
鉱物・エネルギー資源計	9,532.7	9,742.2	9,995.8	10,222.8	10,516.6	10,816.9	10,720.5	10,670.7	10,514.8	10,471.4	10,684.6

鉱物グループ	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
鉄・鉄合金金属	575.2	569.8	587.3	580.9	584.0	630.0	609.1	649.8	670.2	743.9	
非鉄金属	146.9	149.8	167.7	172.6	174.7	183.9	184.4	187.8	188.8	196.2	
貴金属	0.017	0.018	0.018	0.019	0.018	0.021	0.022	0.022	0.022	0.022	
工業用原料鉱物	500.9	516.3	528.4	516.0	535.8	541.7	534.5	542.2	546.6	565.9	
鉱物資源計	1,222.9	1,235.9	1,283.5	1,269.5	1,294.6	1,355.6	1,328.0	1,379.8	1,405.7	1,506.0	
石炭	4,665.3	4,721.4	4,744.3	4,630.5	4,547.3	4,574.9	4,768.3	4,889.2	5,189.8	5,620.1	
石油	3,259.1	3,330.3	3,483.5	3,523.0	3,417.0	3,607.2	3,533.2	3,525.5	3,647.8	3,762.1	
天然ガス	1,881.6	1,823.3	1,847.8	1,871.9	2,075.0	1,946.7	1,956.6	2,026.6	2,050.5	2,079.9	
ウラン	0.034	0.039	0.037	0.038	0.037	0.039	0.044	0.045	0.042	0.044	
エネルギー資源計	9,822.2	9,891.6	10,092.4	10,040.2	10,053.5	10,142.9	10,272.1	10,453.9	10,902.4	11,475.1	
鉱物・エネルギー資源計	11,045.1	11,127.5	11,375.8	11,309.7	11,348.1	11,498.5	11,600.1	11,833.7	12,308.1	12,981.1	

## 鉱物・エネルギー資源の生産量比率（2004年）

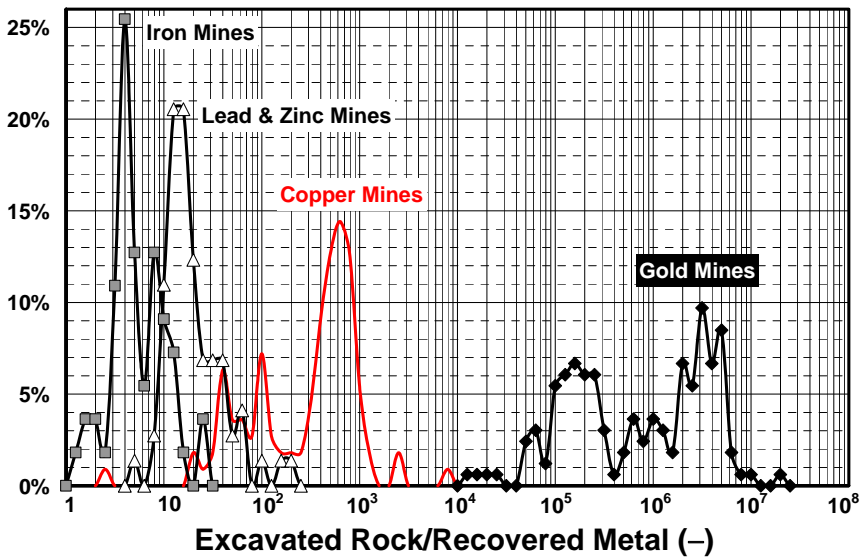


学会会議公開講演会 (2008年1月25日)

3

## 金属鉱山の岩石掘さく量 (2004年)

Relative Frequency (%)



学会会議公開講演会 (2008年1月25日)

4

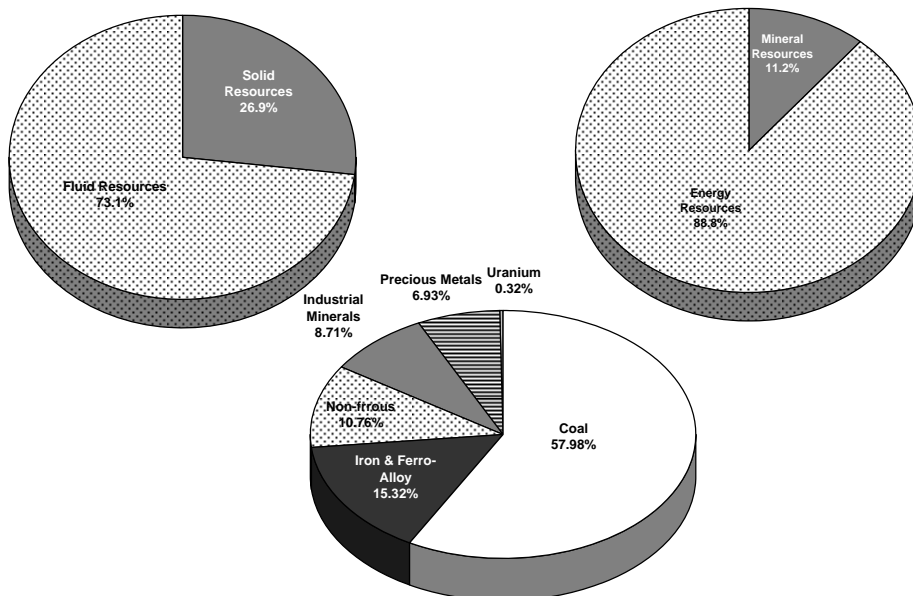
## 鉱物・エネルギー資源の生産額 (3) — USGS + BP + FAO —

鉱物グループ	生産量 (10 <sup>4</sup> t)													
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
鉄・鉄合金	972.7	941.3	968.7	1,007.2	1,048.2	1,037.5	1,087.7	1,068.2	1,037.1	1,088.6	1,058.5	1,109.7	1,211.2	1,362.5
非鉄金属	131.6	125.6	130.0	126.2	132.9	139.4	145.1	146.7	153.9	162.3	163.9	170.2	182.7	187.6
貴金属	0.018	0.017	0.017	0.017	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.021	0.022	0.021	0.021	0.023
工業用原料鉱物	663.9	624.3	597.9	623.0	648.8	662.8	702.3	681.5	693.3	680.9	677.7	684.4	702.0	727.3
鉱物資源計	1,768.3	1,691.3	1,696.7	1,756.4	1,830.0	1,839.8	1,935.2	1,896.4	1,884.3	1,931.9	1,900.1	1,964.3	2,095.9	2,277.3
石炭	4,538.8	4,500.2	4,382.5	4,470.5	4,592.5	4,667.7	4,702.1	4,555.7	4,544.5	4,606.6	4,819.2	4,852.3	5,187.6	5,585.3
石油	3,251.3	3,276.6	3,289.3	3,342.7	3,392.6	3,482.6	3,598.1	3,666.6	3,607.4	3,736.6	3,731.6	3,709.9	3,837.4	3,996.1
天然ガス	1,619.0	1,629.6	1,658.5	1,674.9	1,707.7	1,782.3	1,785.2	1,823.6	1,875.0	1,940.1	1,985.7	2,019.7	2,091.4	2,162.5
ウラン	0.039	0.034	0.031	0.033	0.033	0.035	0.036	0.034	0.031	0.035	0.036	0.036	0.035	0.040
エネルギー資源計	9,409.1	9,406.4	9,330.3	9,488.1	9,692.9	9,932.6	10,085.4	10,046.0	10,026.9	10,283.4	10,536.6	10,581.9	11,116.4	11,743.9
鉱物・エネルギー資源計	11,177.4	11,097.7	11,027.0	11,244.5	11,522.9	11,772.4	12,020.5	11,942.4	11,911.3	12,215.3	12,436.7	12,546.2	13,212.4	14,021.2

鉱物グループ	生産額 (10 <sup>5</sup> \$)													
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
鉄・鉄合金	49,766	44,465	37,841	39,145	51,542	49,865	52,912	51,027	44,343	50,615	43,950	47,828	63,364	94,938
非鉄金属	40,081	40,833	34,365	39,390	49,195	46,030	48,625	39,778	40,937	47,472	41,174	39,221	44,318	66,679
貴金属	31,288	30,110	30,759	32,645	32,467	33,864	31,675	30,397	29,947	32,802	33,217	32,221	38,600	42,925
工業用原料鉱物	40,377	36,520	34,196	38,094	40,449	41,798	43,582	44,440	45,743	45,416	43,568	46,102	53,300	53,954
鉱物資源計	161,511	151,927	137,160	149,275	173,653	171,557	176,794	165,643	160,971	176,305	161,910	165,372	199,582	258,497
石炭	131,673	128,410	130,835	141,788	124,028	139,389	139,934	141,242	142,216	137,758	239,704	159,880	199,606	359,303
石油	476,808	464,124	409,278	387,623	423,248	527,709	503,645	341,810	475,263	780,623	668,732	680,598	811,106	1,121,055
天然ガス	107,520	129,011	157,211	143,215	128,658	218,887	201,183	169,569	189,887	366,535	360,064	300,901	524,456	565,080
ウラン	886	709	688	794	974	1,414	1,109	893	822	736	845	934	1,063	1,954
エネルギー資源計	716,888	722,255	698,011	673,421	676,907	887,398	845,870	653,514	808,188	1,285,652	1,269,345	1,142,313	1,536,231	2,047,392
鉱物・エネルギー資源計	878,399	874,182	835,172	822,696	850,560	1,058,955	1,022,664	819,156	969,159	1,461,957	1,431,255	1,307,685	1,735,813	2,305,889
農作物計	800,341	1,049,725	910,622	885,305	1,011,000	1,110,604	1,100,261	1,110,726	1,029,009	994,510	1,089,190	1,389,517	1,606,264	1,920,740
畜産物計	544,103	1,596,708	1,706,441	527,303	584,110	607,139	593,394	569,576	530,179	546,849	559,995	562,677	646,485	745,256

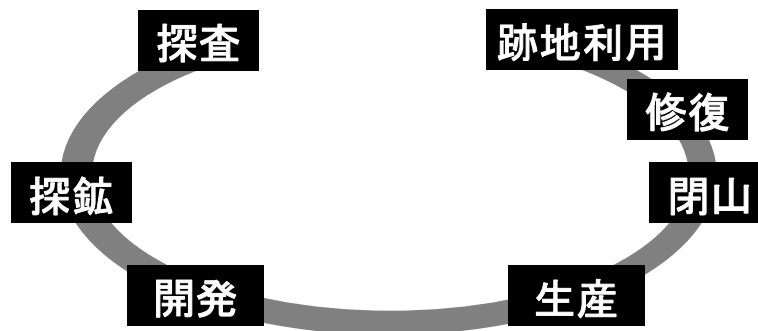
## 鉱物・エネルギー資源の生産額比率 (2004年)



学術会議公開講演会(2008年1月25日)

## 資源開発技術 (1)

- 鉱山のライフサイクル 探査から跡地利用まで



学術会議公開講演会(2008年1月25日)

7

## 資源開発技術 (2)

- 資源開発事業の特質

- ❖ 非再生産性
- ❖ 長い懐妊期間
- ❖ 立地条件の制約
- ❖ 高い技術力
- ❖ High Risk, Vulnerability
- ❖ 大資本の優位性
- ❖ 環境に対する負荷
- ❖ 地域社会への影響
- ❖ 労働環境の劣性

学術会議公開講演会(2008年1月25日)

8

# 資源開発技術 (3)

## ● 個別技術課題 (1)

- ❖ さく孔/発破 Drilling/Blasting
- ❖ 積込/運搬 Loading/Haulage
- ❖ 支保/充填 Supporting/Backfilling
- ❖ 岩盤制御 Rock Mass Control
- ❖ 保安/衛生 Safety/Health
- ❖ 通気/排水 Ventilation/Drainage
- ❖ 照明/給電 Lighting/Power Supply
- ❖ 廃滓・ズリ処理 Tailings/Waste Disposal
- ❖ .....

## ● 個別技術課題 (2)

- ❖ 鉱量計算/経済性評価 Ore Reserve Calculation/Economic Evaluation
- ❖ 採鉱法選択 Mining Method Selection
- ❖ 開発・生産計画 Planning/Scheduling ..... 経済性評価のための数理的手法
- ❖ 機械化・自動化・無人化 Mechanization/Automation
- ❖ 通信/情報化 Communication/IT
- ❖ 環境保全 Environmental Preservation
- ❖ .....

学術会議公開講演会(2008年1月25日)

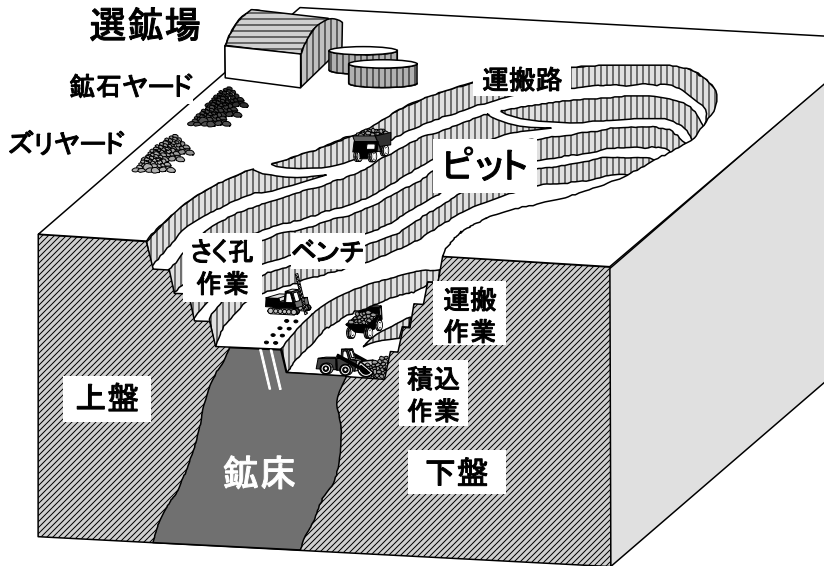
9

# Mass Mines (2004年)

Mine	Country	Type	Ore (10 <sup>3</sup> t)	Ore Grade	Mine	Country	Type	Ore (10 <sup>3</sup> t)	Ore Grade
1 Morenci	USA	SF Leach	204,083	0.22% Cu	1 Yanacocha	Peru	SF Leach	121,123	0.86 Au g/t
2 Radomiro Tomic	Chile	SF Leach	103,010	0.43% Cu	2 Round Mountain	USA	SF Mix	67,084	0.52 Au g/t
3 Escondida	Chile	SF Mix	98,021	1.49% Cu	3 Cortez & Pipeline	USA	SF Mix	38,165	1.15 Au g/t
4 Chuquibambilla	Chile	SF Mix	82,031	0.99% Cu	4 Newmont Nevada	USA	S/U Mix	29,431	2.85 Au g/t
5 Cananea	Mexico	SF Mix	78,916	0.38% Cu	5 Cripple Creek	USA	SF Leach	18,217	0.78 Au g/t
6 Freeport Indonesia	Indonesia	S/U Mill	67,750	0.87% Cu	6 Paracatu	Brazil	SF Mill	17,342	0.44 Au g/t
7 El Teniente	Chile	UG Mix	66,946	0.75% Cu	7 Tarkwa	Ghana	SF Mix	16,837	1.32 Au g/t
8 El Abra	Chile	SF Leach	64,800	0.50% Cu	8 Pierina	Peru	SF Leach	15,180	1.16 Au g/t
9 Highland Valley	Canada	SF Mill	50,623	0.38% Cu	1 Carajas	Brazil	SF Mill	76,340	66.0% Fe
10 La Caridad	Mexico	SF Mix	49,938	0.40% Cu	2 Minntac	USA	SF Mill	45,763	23.0% Fe
11 Batu Hijau	Indonesia	SF Mill	49,212	0.75% Cu	3 Yandi	Australia	SF Mill	40,565	58.3% Fe
12 Los Pelambres	Chile	SF Mill	46,066	0.88% Cu	4 Mt Wright	Canada	SF Mill	38,996	27.1% Fe
13 Bingham Canyon	USA	SF Mill	45,712	0.63% Cu	5 Mt Newman	Australia	SF Mill	38,068	62.0% Fe
14 Toquepala	Peru	SF Mix	44,638	0.68% Cu	6 Caue Complex	Brazil	SF Mill	35,640	55.0% Fe
15 Los Bronces	Chile	SF Mix	41,567	0.73% Cu	7 Sishen	South Africa	SF Mill	32,799	62.0% Fe
16 Collahuasi	Chile	SF Mix	41,454	1.47% Cu	8 Conceicao	Brazil	SF Mill	31,752	57.5% Fe
17 Ray	USA	SF Mix	40,103	0.27% Cu	9 Robe River	Australia	SF Mill	31,239	57.0% Fe
18 Alumbrera	Argentina	SF Mill	35,354	0.56% Cu	10 Hibbing Taconite	USA	SF Mill	30,301	19.0% Fe
19 Dexing	China	SF Mill	35,000	0.43% Cu	11 Algeria	Brazil	SF Mill	30,219	46.0% Fe
20 Lomas Bayas	Chile	SF Leach	33,600	0.26% Cu	12 Yandicoogina	Australia	SF Mill	27,392	58.5% Fe
21 KGHM	Poland	UG Mill	30,307	1.57% Cu	13 Kudremukh	India	SF Mill	26,622	37.0% Fe
22 Cuaajone	Peru	SF Mill	29,380	0.79% Cu	14 Carol Lake	Canada	SF Mill	26,622	38.0% Fe
23 Ok Tedi	PNG	SF Mill	26,221	0.77% Cu	15 Tamandua	Brazil	SF Mill	23,630	65.0% Fe
24 Chino	USA	SF Mix	25,708	0.30% Cu	16 Kiruna	Sweden	UG Mill	22,600	52.0% Fe
25 Erdenet	Mongolia	SF Mill	25,280	0.61% Cu	17 Tilden	USA	SF Mill	22,455	32.0% Fe
26 Dzhzhkazgan	Kazakhstan	S/U Mill	25,093	1.05% Cu	18 West Angelas	Australia	SF Mill	22,187	58.0% Fe
27 Andina	Chile	S/U Mill	25,072	1.09% Cu	19 San Isidro (Piar)	Venezuela	SF Mill	21,000	66.8% Fe
28 Candelaria	Chile	SF Mill	24,785	0.89% Cu	20 Casa de Perda	Brazil	SF Mill	20,615	62.5% Fe
29 Bagdad	USA	SF Mix	24,643	0.41% Cu	21 Fabrica	Brazil	SF Mill	20,535	58.0% Fe
30 Zaldivar	Chile	SF Leach	23,569	0.86% Cu	22 National Keewatin	USA	SF Mill	20,118	21.0% Fe
31 Cerro Verde I	Peru	SF Leach	20,530	0.67% Cu	23 Empire	USA	SF Mill	19,752	22.0% Fe
32 Nchanga	Zambia	S/U Mix	19,327	1.49% Cu	24 Mt Tom Price	Australia	SF Mill	17,718	62.0% Fe
33 Mantos Blancos	Chile	SF Mix	17,938	0.56% Cu	25 Pico	Brazil	SF Mill	17,685	60.0% Fe
34 Aitik	Sweden	SF Mill	17,663	0.41% Cu	26 Northshore	USA	SF Mill	15,759	25.5% Fe
35 Sarcheshmeh	Iran	SF Mill	17,000	0.95% Cu	27 Bailadira	India	SF Mill	15,755	65.0% Fe
36 Cerro Colorado	Chile	SF Leach	16,624	0.90% Cu	Henderson	USA	UG Mill	6,601	0.22% Mo
37 Salvador	Chile	S/U Mix	16,306	0.65% Cu	Finsch	South Africa	UG Mill	5,773	0.365 cts/t
38 Manto Verde	Chile	SF Leach	16,045	0.53% Cu	Cullinan (Premier)	South Africa	UG Mill	4,458	0.293 cts/t

学術会議公開講演会(2008年1月25日) SF:露天掘, S/U:露天掘+坑内掘, UG:坑内掘, Mill:選鉱処理, Leach:リーチング処理 10

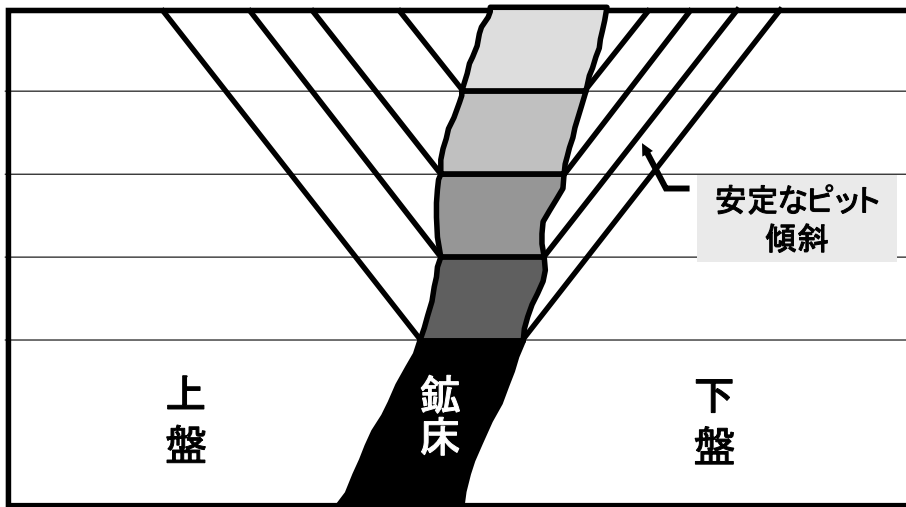
# 露天採鉱法 — Surface Mining



学術会議公開講演会(2008年1月25日)

11

# 剥土比とピット深さの関係

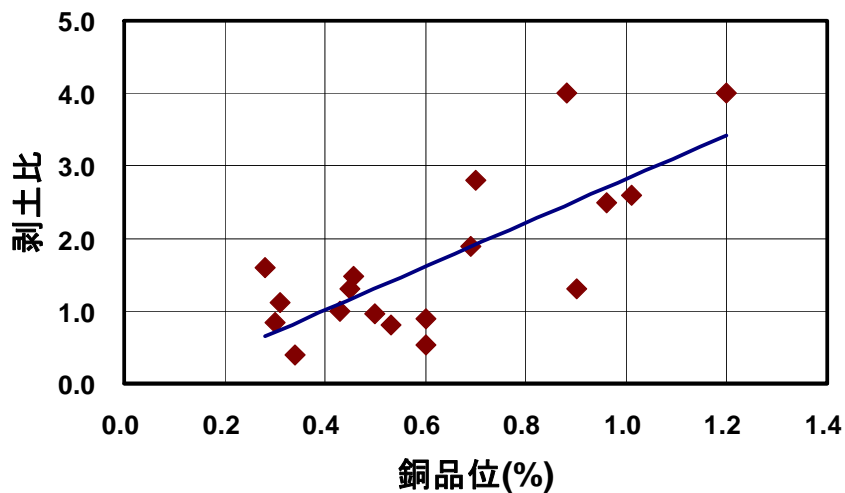


学術会議公開講演会(2008年1月25日)

12

# 剥土比と経済性

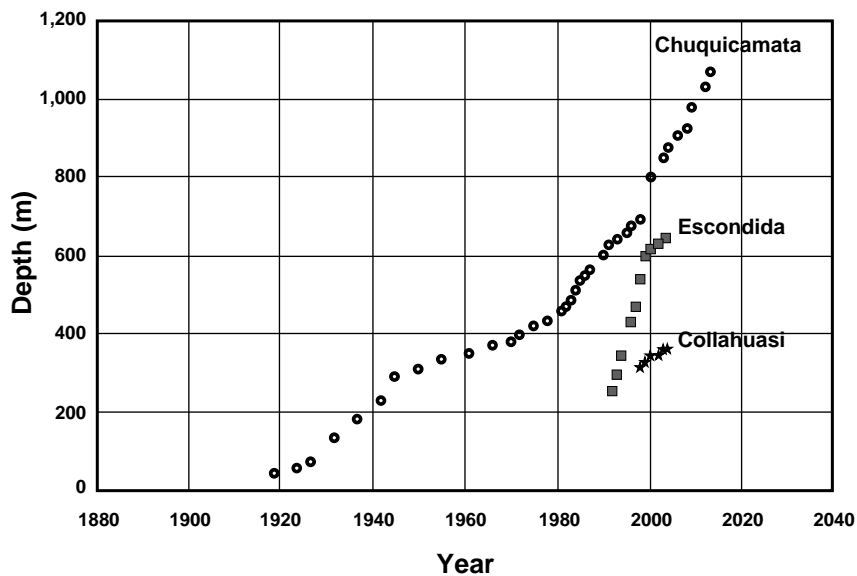
増田 信行他:「海外の露天掘鉱山に関する現状分析とその背景」,  
資源と素材, Vol. 117, pp. 591-598(2001)



学術会議公開講演会(2008年1月25日)

13

# 代表的な露天掘鉱山の採掘深度推移

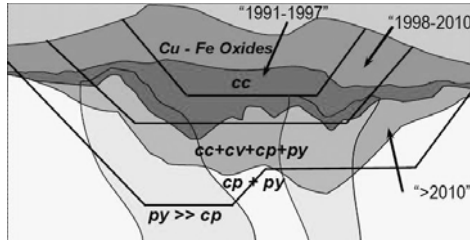
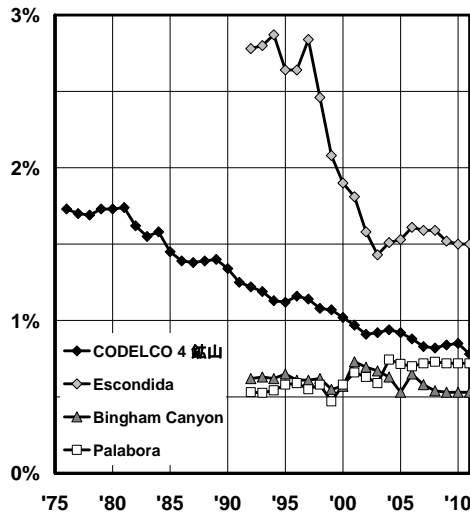


学術会議公開講演会(2008年1月25日)

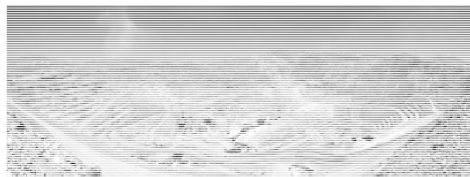
14

## 深部化にともなう粗鉱品位の低下

### 粗銅品位



Escondida 鉱山断面図



Escondida 鉱山 ('01年12月)

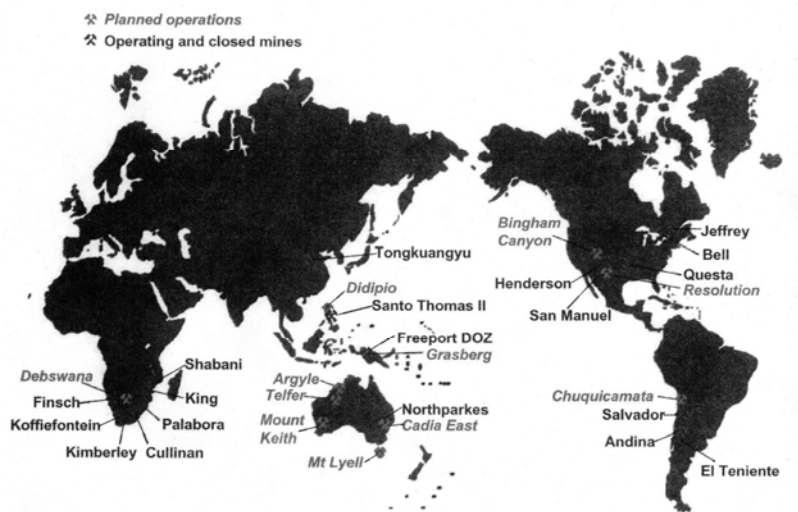
JOGMEC 資料 より

チリの銅鉱山では、深部の銅品位は低く、鉱石が固いのでCavabilityも悪いと予想されている。

学術会議公開講演会(2008年1月25日)

15

## 露天掘から Block Caving へ (1)



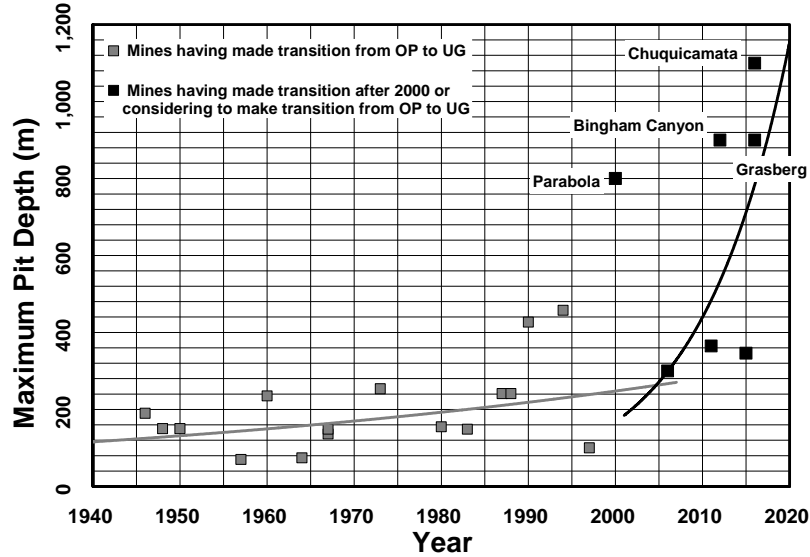
“Block Caving Geomechanics (Brown, 2007)” より

学術会議公開講演会(2008年1月25日)

16



## 露天掘から Block Caving へ (2)



“Block Caving Geomechanics (Brown, 2007)” より

学術会議公開講演会(2008年1月25日)

17

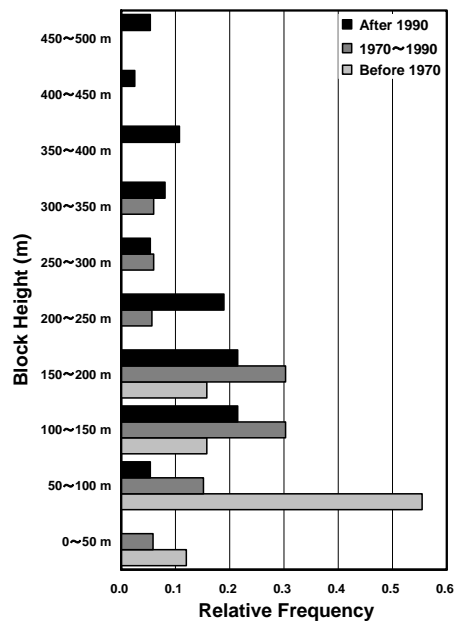
## The International Caving Study

### ICS I — 1997~2000

- De Beers Consolidated Mines
- TVX Gold
- Northparkes Mines
- Newcrest Mining
- PT Freeport Indonesia
- CODELCO Chile
- Rio Tinto Limited Technical Services
- BHP Copper
- Norlanda
- ITSCA (Research Partner)

### ICS II — 2001~2004

- De Beers Consolidated Mines
- Western Mining
- Northparkes Mines
- Newcrest Mining
- Rio Tinto Limited Technical Services
- Sandvik Tamrock
- CODELCO IM2
- Anglo American Technical Services
- LKAB
- ITSCA (Research Contractor)



## Block Caving (1)

- ブロックケービング法は第一次世界大戦後、アメリカ南西部の班岩銅鉱床(Porphyry Copper Deposits)の採掘に使用され、低品位大規模鉱床に適した手法であることが認められた。その後、北米のモリブデン・赤鉄鉱・ニッケル・石綿鉱山、南アフリカのダイヤモンド鉱山などに用いられるようになった。
- ブロックケービング法は坑内採鉱法の中で採掘コストが最も安い採鉱法であり、しかも、大規模生産が期待できる。
- 開坑作業・採掘準備作業に比較的多額の経費と長い準備期間を要する。
- 鉱体の下部をかなりの広範囲にアンダーカットを行って、鉱石を自然に崩落させる。
- 崩落した採掘鉱画最下部の鉱石の抽出を始めると、鉱石の崩落が上部に伝わり、やがて鉱石の全てと被覆岩盤までが崩落し、地表まで崩落が続く。

学術会議公開講演会(2008年1月25日)

19

## Block Caving (2)

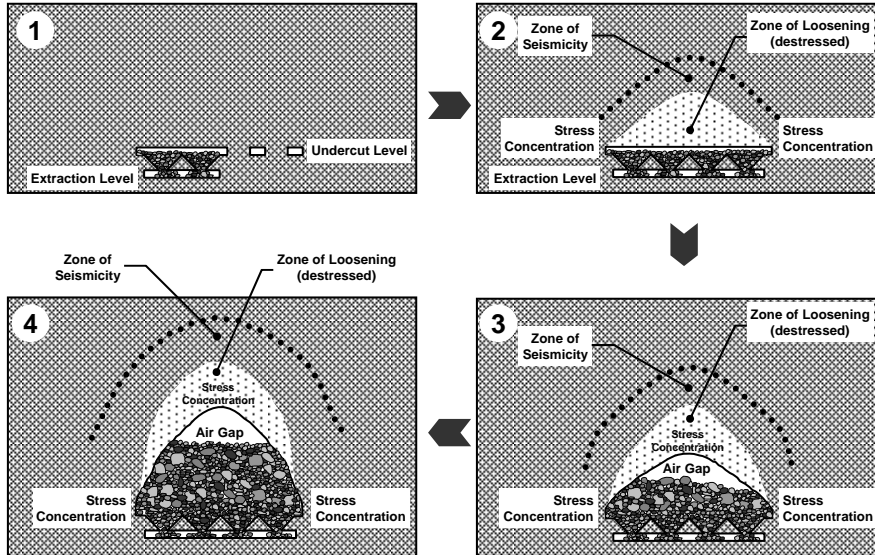
- 鉱体下部に、アンダーカット(下透かし)のためのアンダーカット・レベル(Undercut Level)とその下位に鉱石を抜き出すための抽出レベル(Extraction Level, Production Level)を設ける。
- ある程度アンダーカットが広がると、鉱石の崩落が始まる。アンダーカット・レベルの崩落鉱石を抽出レベルに集めるためのドロワーベル(Drawbell)を抽出レベルから掘さくする。
- 従来は、抽出レベルを展開してから、アンダーカット・レベルの開さくを行うことが多かった(Post-Undercutting)が、最近では、アンダーカットを先行させる(Pre-Undercutting)ものが多い。
- 崩落鉱石の積込場所をドロワーポイント(Drawpoint)とよぶ。LHDによる積込と運搬、坑内ビン・坑井の配置、通気方式とマッチした抽出レベルのレイアウトを行う(Herringbone, Teniente Layout など)。

学術会議公開講演会(2008年1月25日)

20

# Caving Initiation and Propagation

Gravity Caving から Stress Caving へ

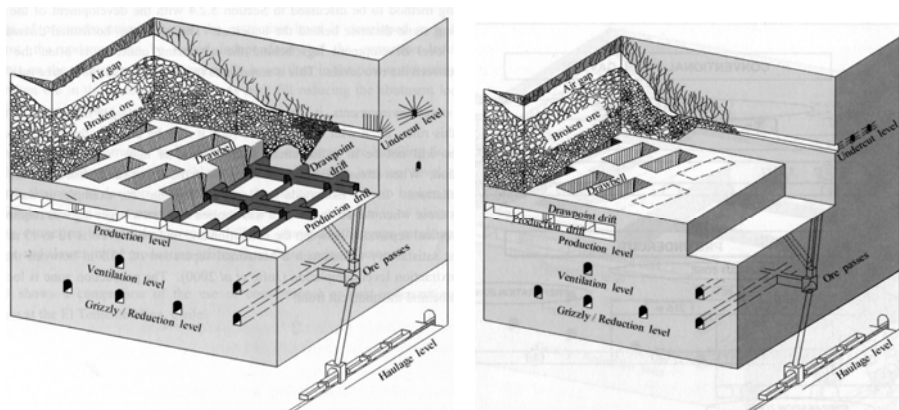


学術会議公開講演会 (2008年1月25日)

21

# Undercutting

“Block Caving Geomechanics (Brown, 2007)” より



Post-Undercutting

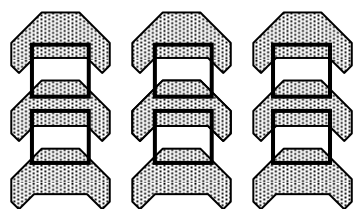
Pre-Undercutting

学術会議公開講演会 (2008年1月25日)

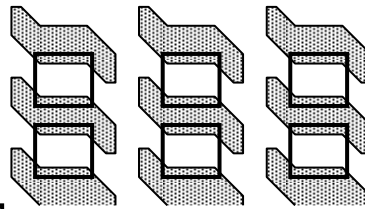
22

## Extraction Level Layout

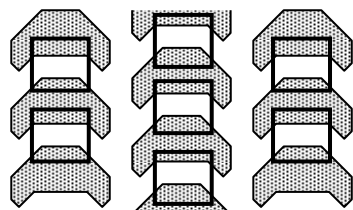
“Block Caving Geomechanics (Brown, 2007)” より



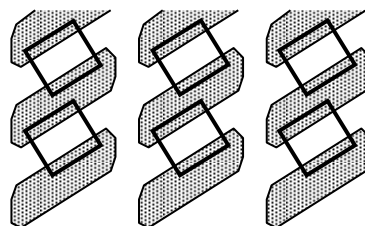
Herringbone Layout



Henderson Layout



Offset Herringbone Layout



Teniente Layout

学術会議公開講演会(2008年1月25日)

23

## Block Caving (3)

### Cavability と Fragmentation の評価/予測

- 鉱石や岩石がケービング法に適しているか否かをCavability (ケーバビリティ)という用語で表す。
- 崩落し易いだけでなく、崩落鉱石が適度な大きさに碎かれること(破碎粒度: Fragmentation)も求められる。
- Cavability には、割れ目系・亀裂系の方向・密度とこれらの組み合わせが強い影響を持っていると考えられる。
- しかしながら、割れ目の間隔が密であり過ぎると、アンダーカットを始める前に流動が起きて開坑作業を困難にする。また、抽出レベルの維持も難しい。
- 深部への適用例では、水平地圧が大きく、ケーブ高さも高くなっており、Cavability と Fragmentation が劣化する。この対策として、小割の自動化・効率化をはかるとともに、対象鉱体の Pre-Conditioning を(積極的に)行う。

学術会議公開講演会(2008年1月25日)

24

# Block Caving (4)

## Laubscher のMRMR (Mining Rock Mass Rating)

- Bieniawskiの岩盤評価システム (RMR: Rock Mass Rating)  
岩石強度, RQD, 亀裂間隔, 亀裂の状態, 地下水の湧水状態の5要素を使用して, 岩盤の現位置における性状を100点満点で評価する。
- Laubscher は Bieniawski の RMR を基に, 坑内掘鉱山の鉋柱・探掘スパン・支保, 露天掘ピットの傾斜などを設計する評価システムを提案した。
- 風化・変質の程度 (30~100%), 亀裂系の方位・傾斜 (63~100%), 応力状態 (60~120%), 発破による損傷 (80~100%) に応じた修正係数をRMRに乗じて, MRMRを算出する。
- 1977年に, 最初の MRMR 算出法が提案されたが, その後, 修正が加えられており, RMR の算出法も Bieniawski のものと違ったものとなっている。

学術会議公開講演会 (2008年1月25日)

25

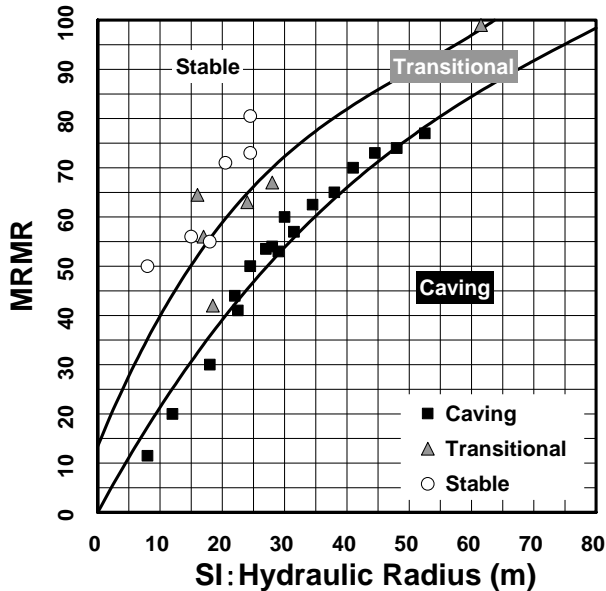
## Laubscher's MRMR (1990)

Class MRMR	5 (very poor) 0~20	4 (poor) 21~40	3 (fair) 41~60	2 (good) 61~80	1 (very good) 81~100
<b>Block Caving</b>					
Undercut SI*	1~8 m	8~18 m	18~32 m	32~50 m	>50 m
Cavability	Very Good	Good	Poor	Fair Poor	Very Poor
Fragmentation	Fine 0.01~0.3 m	Medium 0.1~2.0 m	Medium coarse 0.4~5 m	Coarse 1.5~9 m	3~20 m
Second Blasting	0~20 g/t	20~60 g/t	60~150 g/t	150~250 g/t	>250 g/t
Hangups as % of tonnage	0 %	15 %	30 %	45 %	>60 %
Dia. of draw zone, m	6~7 m	8~9 m	10~11.5 m	12~13.5 m	15 m
Drawpoint span					
Grizzly	5~7 m	7~10 m	9~12 m		
Slusher	5~7 m	7~10 m	9~12 m		
LHD	9 m	9~13 m	11~15 m	13~18 m	
Brow support	Steel and concrete Reinf. concrete		Concrete	Blast protection	
Drift support	Lining, rock reinf., repair techniques		Lining, reinf.	Rock reinf.	
Width of point	1.5~2.4 m	2.4~3.5 m	2.4~4 m	4 m	
Direction of advance	Towards low stress		Towards high stress		
Comments	Poor ground, Heavy support, Repairs	Good ground, Fair support	Good drill hangups	Large LHDs, Drill hangups	
<b>Sublevel Caving</b>					
Loss of holes	Excessive	Fair	Negligible	Nil	Nil
Brow wear	Excessive	Fair	Low	Nil	Nil
Support	Heavy	Medium	Low	Localized	Nil
Dilution	Very high	High	Medium	Low	Very low
Cave SI*	1~8 m	5~20 m	18~32 m	32~50 m	>50 m
Comments	Not practicable	Applicable Suitable	Suitable	Suitable	Suitable, large HW cave area
<b>Sublevel Open Stopping</b>					
Minimum span	1~5 m	5~20 m	20~30 m	30~80 m	100 m
Stable area, i.e. SI*	N/A	1~8 m	8~16 m	16~35 m	>35 m
<b>Open-pit Mining</b>					
Slope Angle	35°	45°	55°	65°	75°

\* SI (Stability Index) = Hydraulic Radius

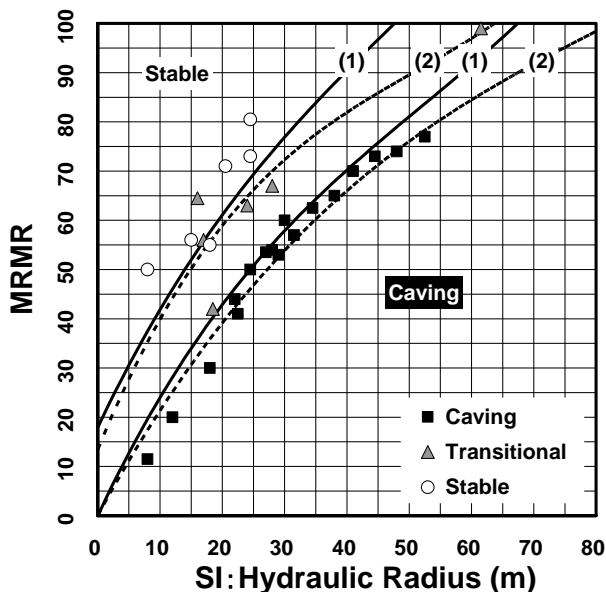
## Laubscher's Caving Chart (1)

“Block Caving Geomechanics (Brown, 2007)” より



- Laubscherはジンバブエの石綿鉱山をはじめとして、ケービング鉱山のMRMRとアンダーカットのHydraulic Radiusとの関係を調査した。ここで、Hydraulic Radiusはアンダーカット面積をアンダーカットの周囲長で除したものである。
- ケービングに必要なアンダーカットの規模と形状を知ることができる。
- 新規鉱山の開発事例などが加わり、MRMRも見直されている。

## Laubscher's Caving Chart (2)



- 右図の(1)は、1990年に発表されたLaubscherの論文: A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design (J. S. Afr. Inst. Min. Metall.)から得たカーブ。
- 右図の(2)は、ICSグループが、“Block Caving Geomechanics”に発表したカーブ。
- 見直しによって、カーブがMRMRの大きい領域で右にシフトしていることが注目される。

## Pre-Conditioning and Cave Inducement

- Block Cavingは時として大きなリスクを伴う採鉱法であるから、Cavabilityが悪いと予想される場合には、Cavingに先だって、対象鉱体のCavability改善策を実施する。また、採掘が始まった後も、Cavingの誘導・促進策を試みる。
- Hydraulic Fracturing(水圧破碎)  
水圧破碎は、元々、生産力の衰えた石油・ガス貯留層に人工的な亀裂を発生させて、生産力を回復させる目的で開発されたものであるが、わが国でも、高温岩体からの地熱エネルギー回収を目的として、精力的な研究開発が行われた。Block Cavingでは、オーストラリアのNorthparkes 鉱山が成果を上げている。
- Pre-splitting by Drilling and Blasting  
深い金属鉱山では、昔から山はね(Rock Burst)予防のため、発破による応力解放が行われてきた。チリのAndina 鉱山では、現場実験を行ない、Draw-pointsにおける破碎粒度の改善を確認している。
- Boundary Slots/Weakening  
水平地圧を解放して、Cavingを起こしやすくする。そのため、鉱画の側面(一般には垂直面)をシュリンクージ法で採掘し、破碎した鉱石を抜き出す(Slots)、あるいは発破によって、露天掘鉱山の残壁保護を目的としたPre-Splittingと同様、側面に亀裂を入れる(Weakening)。

学術会議公開講演会(2008年1月25日)

29

## Operational Risks and Hazards

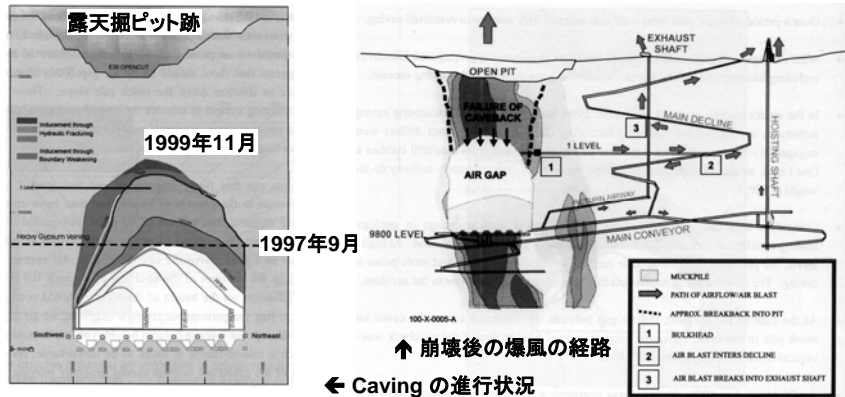
- ブロックケービングは、露天掘に匹敵する低コスト・大規模生産を可能とする。しかし、ケービングを維持し制御することは難しく、採鉱に柔軟性がない。また、Cavabilityが好ましくなかったり、抽出コントロールに失敗すると、生産中断の危険性(リスク)が高くなる。  
予想される災害(Hazards)としては、次のものが考えられる。
- Rock Burst(山はね) …… 鉱柱・側壁・天盤が爆発的に破壊する。  
チリのEl Teniente 鉱山では、採掘の深部化によって採掘対象の鉱石が強固になり、Rock Burstが起こるようになった(1982年以降)。最大のものはマグニチュード4に達し、抽出レベルの切り替え、アンダーカット方式の変更などを行った。現在も、Rock Burstが大きな課題となっている。
- Mud Rushes あるいは Wet Muck Flows(泥流突出) …… ドローポイントから泥流が噴出する。インドネシアのフリーポートの鉱山(IOZ)で経験されている。
- Water and Slurry Inrushes(出水) …… 地表あるいは旧坑からの不時出水。
- Major Collapses(大規模崩壊)と Air Blast(爆風) …… 大規模な地表陥没、冠鉱柱・アーチの崩壊にともなって、崩落跡の空気(Air Gap)が爆発的に押し出される。1964年にShabanie 鉱山で、1968年にUrad 鉱山で、1999年にはNorthparkes 鉱山とSalvador 鉱山で発生している。

学術会議公開講演会(2008年1月25日)

30

## The Northparkes E26 Lift 1 Air Blast

Ross and As: 9th Underground Operators' Conference (2005) より



- オーストラリアのNorthparkes鉱山 Lift 1 では、アンダーカットが完了した1997年9月、高さ 95 m でケービングが停止した (Air Gap の高さは 25 m と推定)。
- 水圧破碎, Boundary Slotsによるケービング誘導を試みた。それぞれ, 250~300万トンのケービングを誘導したが, 地表陥没には至らなかった。
- 1999年11月24日の午後3時頃, 地表陥没発生, Air Blast により 4 名死亡。

## Seismic Monitoring and Tele-operation

- ケービングの進行状況を把握するために, 微小地震の観測が行われている。ケービングの進行による応力の再分配, 地表・旧坑・オープンピットと崩落跡の相互干渉などが理解でき, 大災害の発生を予防することに役立っている。
- 鉱石の抽出速度が, 鉱石の崩落速度を上回ると Air Gap を生じることになる。微小地震のモニタリングは鉱石の抽出速度をコントロールするためにも役立つ。また, 偏った抽出も避ける必要があるため, 一つ一つのドロポイントからの抽出量を厳密に管理する。そのためには, 坑内の LHD 運行管理システムが有効である。
- 1990年代前半, カナダの Stobie・Brunswick・Kali und Salz's Werra 鉱山などで, 無人 LHD の試験が行われた。レーザによるナビゲーションを導入した第二世代の無人 LHD・Truck が, Block Caving の鉱山 (El Teniente, Finsch, Northparkes) や Sublevel Caving の鉱山 (Kiruna, Ridgeway) で実用化された。

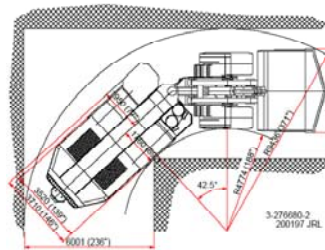
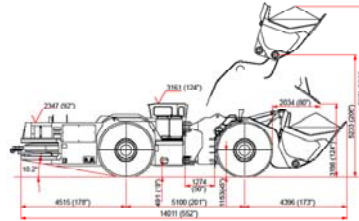


## LHDのTele-operation @ Kiruna鉱山



LHDの女性オペレータ

- 坑外の事務所棟7階から、地下約 850 m で動作中のLHD、ブレーカ、坑内運搬、スキップを制御している。
- ブレーカをのぞいて、二系統・二人のオペレータで操作している。



↑ Tele-operational Tamrock 2500E  
Electric Drive, Payload : 25 t  
Length : 14.0 m, Width : 3.9 m  
Height : 3.2 m, Bucket size : 10 m<sup>3</sup>  
世界最大のLHD。

学術会議公開講演会(2008年1月25日)

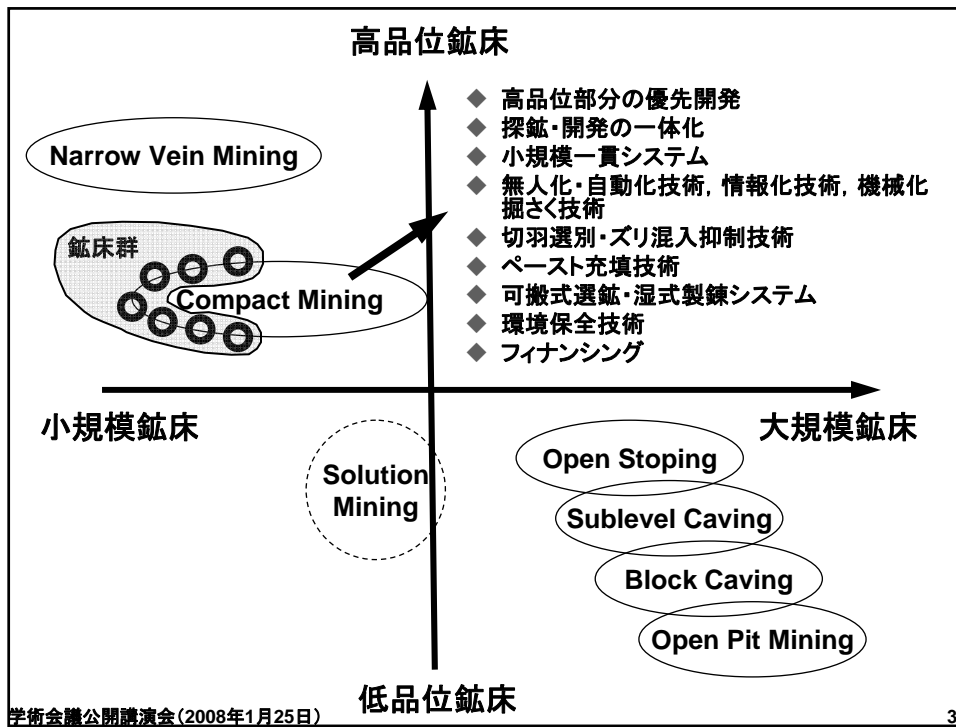
33

## コンパクトマイニングシステム

- 社会基盤が未整備で資本蓄積が不足している開発途上国では、小規模であっても、鉱山開発は地域と国の経済に与えるインパクトは大きく、小規模鉱体の開発が大規模鉱床開発の手がかりとなりうる可能性を持っている。
- 従来の大型開発が中央集権的なシステムを基盤とするのに対して、「コンパクトマイニングシステム」は分散ネットワーク型と形容できる。
- 単一では小規模鉱体の開発は難しくても、いくつかの小規模鉱体の存在が確認された場合、小型・高能率・高実収率のシステムを構築して、それが移動可能な探査-採鉱-選鉱の一体型システムであれば、スケールデメリットを克服できると考える。
- 大型開発が持つリスク・大型投資を回避して機動性に富んだシステムが可能となるであろう。また、ファイナンス面から見ても、分散型の「コンパクトマイニングシステム」の方が柔軟性に富み、スケールデメリットを補う投資効果も期待できる。
- わが国に蓄積された中小規模鉱床開発の知識とノウハウは、「コンパクトマイニングシステム」に有効ではなかろうか ……。

学術会議公開講演会(2008年1月25日)

34



## おわりに

- 「資源開発技術」は、多種多様な要素を包含している(探査から跡地利用まで、またハード/ソフト)。
- 資源開発事業の特質を十分に理解する必要がある。
- 従来から必要とされている上流開発技術に加え、語学、現地適応力、地政学への理解、プロジェクトのリスク評価と環境管理、マネジメント力など、総合力を備えたマネージャーになり得る人材が求められる。
- 人材養成の場と機会が、大学でもビジネスの現場でも、残念ながら、狭まっている。海外のマイニングスクールとの連携、国内の資源教育ネットワークの整備、経験を持ったシニアの活用など、人材養成の仕組みを確立し、資源開発の現場でリーダーとなる人材を早期に育てる必要がある(資源分野の若手研究者・教育者の助成・養成もスコープに入れて)。
- 国際資源大学校において、鉱物資源分野の人材育成プログラムが、2007年9月にスタートした。METI/MEXT「産学連携パートナーシップ」の一分野として、鉱物・エネルギー資源の「国際資源開発人材育成」事業が2008年度にスタートする。
- 近年の鉱産物価格の高騰が追い風をよんでいるが、資源開発事業とその人材養成には「持続性」が求められることを忘れてはならない。