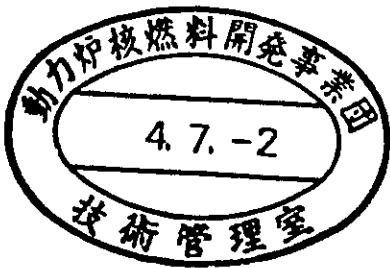


放射線防護採鉱技術開発 に関する研究

1992年4月



社団法人 資源・素材学会

放射線防護採鉱技術開発に関する研究

阿部徳之助*

要　旨

平成 3 年度の委員会活動としては、放射線保安部門では先ず坑道壁面より湧出する Rn を抑制するコーティング材料を選択するためのテストを行った。このテストに用いる塩ビ製実験装置は、平成 3 年 10 月末に完成した。この装置を用いた Rn の透過テストは同年 11 月より早稲田大学黒沢研究室にて実施された。次に前々年、前年に作成した Rn モニターについては、感度を高める為の改造をアロカ(株)にて実施し、平成 3 年 12 月末に完成した改造 Rn モニターについて、性能テストと同じく黒沢研究室にて実施し、所期の性能向上が確認された。

採鉱部門の業務としては、世界の主要なウラン鉱山会社にアンケートを送って、ICRP 新勧告への対応や、放射線防護のための新しい採鉱法の開発等について質問したが、低品位で被曝量実績の低い鉱山からの回答が得られた。今年度からスタートした採鉱エキスパートシステム部門では、一般的な鉱山についての、採鉱法選定の手順について検討を重ね、第 1 段階の簡易形のシステムを完成し、来年度以降その内容を充実させていくこととした。

報告書第 1 章では、まえがきとして、本年度の研究方針と研究内容の概要について述べている。

第 2 章では、Rn 湧出量抑制テストについて、実験装置、試験用モルタル円板とその表面に塗布したコーティング材料及び試験結果について述べた。

第 3 章では Rn モニターの改造について、その目的、改造法、改造後の性能テスト結果について記述した。

第 4 章では、採鉱実情調査 W.G. の活動として、世界のウラン鉱山に対する質問状とその回答内容について記述した。又同 W.G. が実施した文献調査については、各翻訳文献の要旨を 15 編記載した。

第 5 章では、採鉱エキスパートシステムの構築のための調査研究結果を示したが、先ず一般的な採鉱法について解説し、次に採鉱法選定の方法・手順について記述した。結末としては、本年度に開発した第 1 段階の採鉱エキスパートシステムの実例について記述した。

第 6 章では、あとがきとして本年度に得られた研究成果をとりまとめると共に、来年度以降の研究業務についての提言を記述してある。

本報告書は、物資源・素材学会が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂 1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部　技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to;
Technical Information Service, Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation) 1992

契約番号：030D0209

事業団担当部課室および担当者：中部事業所技術開発課　坪田浩二

* 物資源・素材学会　会長

Study on Development of the Mining
Technology for Radiation Protection

Tokunosuke Abe*

Abstract

In the fiscal year of 1991, the preventive capability of radon barrier which is using for coating materials of underground rock wall surface has been studied by the Radiation Protection working group.

In October, the experimental apparatus were completed. The radon leakage test of the radon barrier coated on the surface of concrete slabs was commenced at the Kurosawa Laboratory of Waseda University in November.

Improvement of sensitivity of the radon monitor which had made last year was produced by Aroka corp. and the performance test of the monitor was done at the same laboratory and confirmed the 2.7 times advanced sensitivity of the new monitor.

As the activity of the working group of Mining, the questionnaire concerning the countermeasures against the ICRP new recommendation and development of the new mining methods for radiation protections were sent to the oversea uranium mining companies in last October.

The responses to our questions were received from some of the mining companies; most of them replied are low-grade uranium mines whose radiation exposure levels are sufficiently low to their employees.

The working group of the mining method exprnt system which was organized this year discussed the most suitable process to select the mining methods for development and exploitation of new deposits.

After a alot of discussions, a simple expert system was built as the 1st step. It is necessary to improve this expert system step by step.

In the chapter 1, the policy of research and study of the year and the summary of them are described.

In the chapter 2, results of the test of coating materials to prevent the emanation of radon from minewall are described. The apparatus, test pieces, coating materials concerned with the experiment are also described.

In the chapter 3, the concepts of design of the new radon monitor and the results of the performance test of it are described.

In the chapter 4, the questionair to the foreign uranium mining companies and the responses from them are described as the 1st activity of the working groupe of mining. The 2nd activity of the working groupe was research on the new tech-

nology for the radiation protection mining in foreign papers. In this chapter, the outline of the papers are also presented.

In the chapter 5, concerning the research and study for aiming at the mining method expert system, brief explanation of conventional mining methods, the selection process of the mining method are described.

A simple mining method exprnt system obtained this year as the result of woking groupe activity is shown also.

In the chapter 6, the summary of the results obtained by the activity of the committee are described. The subject and policy for further study are pointed out finally.

目 次

1. まえがき-----	1
2. 坑内ラドン湧出抑制の調査, 研究 -----	3
2. 1 ラドンの湧出 -----	3
2. 2 湧出抑制効果の測定 -----	3
2. 3 拡散係数の推定 -----	5
2. 4 抑制剂 -----	11
2. 5 測定の方法 -----	11
2. 6 実験結果 -----	12
2. 7 結論 -----	14
3. ラドンモニターの改造 -----	14
3. 1 モニター改造の必要性 -----	14
3. 2 改造後の性能 -----	15
3. 3 結論 -----	19
4. 採鉱実状調査の実施 -----	23
4. 1 まえがき -----	23
4. 2 海外のウラン鉱山会社への質問状の送付とその回答 -----	23
4. 3 文献調査とその結果 -----	35
4. 4 まとめ -----	64
5. 採鉱エキスパートシステム構築の調査, 研究 -----	66
5. 1 はじめに -----	66
5. 2 採鉱法について -----	68
5. 3 採鉱法選定の手順 -----	136
5. 4 本年度に作成したエキスパートシステムの内容 -----	145
5. 5 まとめ -----	150
6. あとがき -----	151
6. 1 ラドン湧出抑制に関する調査検討ならびにラドン・モニターの改造に関する今年度の研究成果と今後の研究方針 -----	151
6. 2 採鉱実情調査の成果と今後の研究方針 -----	153
6. 3 採鉱エキスパートシステムの構築の成果と今後の研究方針 ---	154

Work performed by the Mining and Metallurgical Institute of Japan under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

Contact Number 030D0209

PNC Liaison:Exploration and Mining Technology Development Section, Chubu Works:

Koji Tsubota

※:The Mining and Materials Processing Institute of Japan:President

1. まえがき

高品位なウラン鉱床を坑内採掘で安全に採掘する方法について1984年度から調査研究を始めた当委員会では、自動化採鉱機械の計画立案、放射線防護に関する基礎知識の収得、種々のRn等の測定器の開発などを実施してきた。1昨年（1990年）11月になり、国際放射線防護委員会（ICRP）は、Publication60として、電離放射線による職業被曝を従来の年間50mSvから5年間に100mSv、即ち平均年20mSvに制限するよう勧告すると決定した。このことは、現在稼行中の平均品位0.1%程度の低品位ウラン鉱山にとっても、被曝量の低減のための対応を迫られることになり、多大な影響が予想される。

この勧告が法令として実施されるには数年掛ると推定されるが放射線に対してより安全なウラン鉱床採鉱法を確立することが急務となつて来たことは確かである。

そこで当委員会の研究活動も、これまでの研究成果を踏まえながら、視野を広くとった研究活動を行うこととした。即ち放射線防護の為の基礎実験、Rn測定器の改善等は従来通り実施しながら、海外のウラン鉱山会社から広く情報を集めて、ICRP新勧告への対応策や、放射線防護を目的とした採鉱関係の新技術の動向を探索すると共に、文献調査によつても、新しく研究開発すべきテーマの探索に努めることとした。

また新しい鉱床を開発する場合に、選択すべき採鉱法を決定するために用いる採鉱エキスパートシステムについても、その構築方法について検討し、今年度は簡単なシステムを作ることとした。

以上のような調査研究業務を遂行するため、3組のワーキンググループを編成して業務を分担した。

即ち放射線防護ワーキンググループでは、坑道の壁面から湧出するRnを抑制するためのコーティング材等の研究及び昨年度に制作したRnモニターの性能向上対策を分担した。採鉱実情調査ワーキンググループでは、海外のウラン鉱山会社に対するアンケート調査及び文献の調査を行なつて、ICRP新勧告への対応や、放射線防護採鉱法確立のための技術開発テーマの探索を行なうこととした。3つ目の採鉱エキスパートシステムワーキング・グループは、採鉱法選定のためのエキスパートシステムの構築について調査研究を担当することとした。

平成3年度の本委員会のメンバーは下記のとおりである。

委員長 黒沢 龍平 (早稲田大学 理工学研究所)
委 員 岩崎 孝 (早稲田大学 資源工学教室)
" 名古屋俊士 (")
" 大久保誠介 (東京大学 資源開発工学科)
" 山富 二郎 (")
" 斎藤 敏明 (京都大学 資源工学科)
" 鈴木 昭 (日本工業大学 機械工学科)
" 大井 英節 (公害資源研究所 材料資源部)
" 松原 季男 (オートマックス株式会社)
" 肝付 兼弘 (海外ウラン資源開発株式会社)
" 萩野 雅 (住鉱開発工事株式会社)
" 小島 康司 (日鉱資源工営株式会社)
" 片野 孝 (三菱マテリアル(株)原子力技術センター)
" 飛田 実 (同和工業株式会社 環境技術事業部)
" 藤井伸一郎 (三井金属鉱業株式会社 資源開発部)
研究員 井上 瑞城 (社団法人 資源・素材学会)

2. 坑内ラドン湧出抑制の調査、研究

2. 1 ラドンの湧出

ラドンは不活性気体であり、従って物質と化学的反応を起すことがないため比較的容易に物質中を移動することができる。そのためウラン鉱山の坑内壁面のみならずラジウム-226を含有する土壤や壁面などから相当量が開放されている。このようなラドンは壁面などと接した空間に蓄積され、換気などが不十分な場合はかなりの濃度になることが知られている。これらは換気などによって減少させることができるが本質的には壁面からのラドンの湧出を抑制することが必要である。壁面からのラドンの湧出を抑制するには適当な塗布剤により壁面を覆う方法が考えられる。上記のようにラドンは物質を通過し易いためセメント・モルタルのような多孔質の素材はこのような目的に使用することができない。このため例えば簡単な構造の地下室のような場合は地層に接したセメント・モルタルを通して相当量のラドンが地下室内に流入する可能性がある。また同様にセメントで巻いた坑道の場合も、セメントの厚さにもよるがラドンの湧出を完全に遮断することはできず相当量が坑道内に流入するものと思われる。このような湧出を抑制するために、セメントを混和する際に薬剤を添加するか、壁面に適当な薬剤を塗布することが考えられる。このような薬剤をradon barrierと呼ぶ。この場合後者の方の可能性が高いが、塗布剤が薄い場合にはラドンはそれを通過することも考えられる。例えば非常に薄いビニール・シートを30%ものラドンの通過が認められたことがある。さらに機械的強度を考慮すると薄い塗布剤は不向きであろう。

2. 2 湧出抑制効果の測定

湧出抑制効果は抑制剤自身のラドンに対する拡散係数（3項により計算できる）を求めれば、抑制に必要な厚さや或る厚さの時の抑制効果を推定することができる。しかしながらそのような試料即ち試料単独で厚さの一様な板を製作することは極めて困難であるため、空隙の多い例えばセメント・モルタル板の一面に抑制剤を塗りその効果を測定することにした。この際試料板の寸法を大きくしてできるだけ実際に近い常態で試験できるように配慮した。測定装置を図2.1に示す。この装置は塩化ビニール製でラドンと機械的強度をともつために厚さを15mmとした。試料板は円板状リングに取付け容器中央部のフランジ状の張り出し部分に固定する。このようにすると上下2つのchamberができる。この下部の容器にウラン鉱石を入れてラドン源とし、上部の容器に流入したラドンの濃度から試料板の単位面積を単位時間内に通過するラドンの量を求めるにした。さらに上下の両容器か

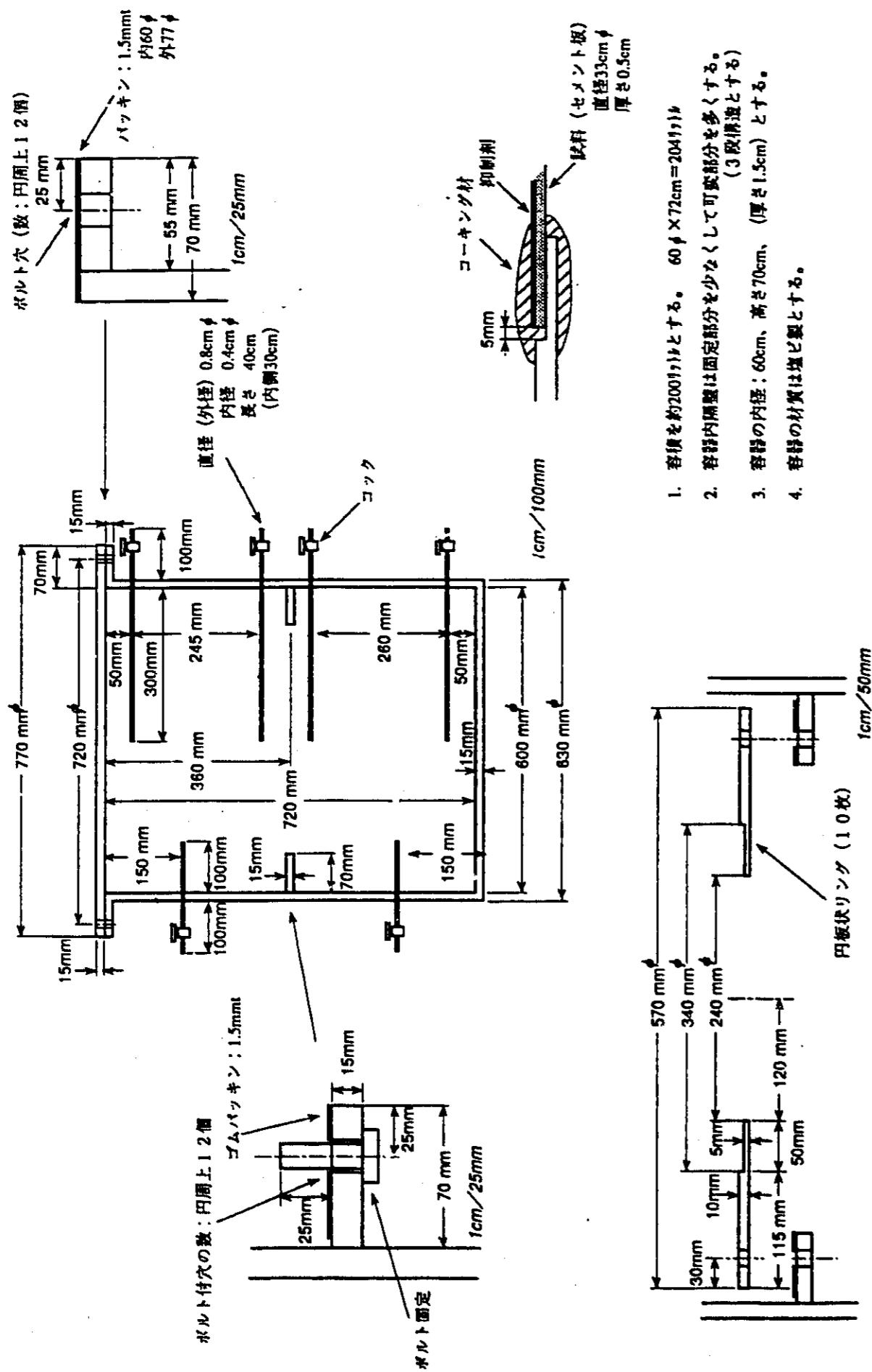
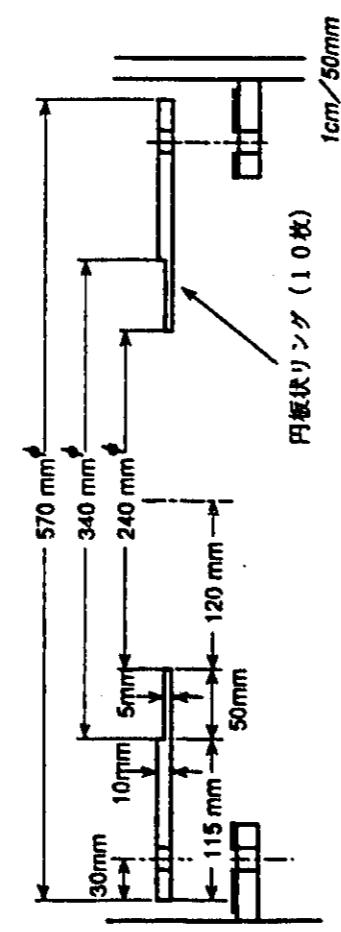


図 2.1 実験装置製作図

1. 容積を約2001㍑とする。 $60\varphi \times 72\text{cm} = 2041.1\text{l}$
2. 容器内隔壁は固定部分を少なくして可変部分を多くする。
(3段構造とする)
3. 容器の内径: 60cm、高さ70cm、(厚さ1.5cm)とする。
4. 容器の材質は塗装鋼とする。



ら何回もラドン濃度測定のための試料を採取することを考え、容積を大きくし各約100ℓ程度（合計200ℓ）とした。1回の採取量は0.3ℓであり例えば2試料同時に採取それを数回繰り返すと5ℓ程度になるが100ℓあれば殆んど問題とはならない。また試料板の有効部の径は24cmφで面積は約450cm²となる。この面積に例えれば1mg/cm²の厚さに抑制剤を塗ったとすると重量増加は0.45gとなり容易に測定することができ従って塗布面の平均厚さの推定が容易となると考えた。しかし結果的には大型の容器のため工作上の不備にもとづくリークが起き易くなつたようである。

2. 3 拡散係数の推定

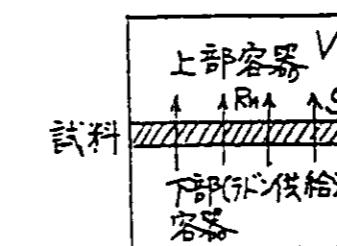


Fig. 1 概念図

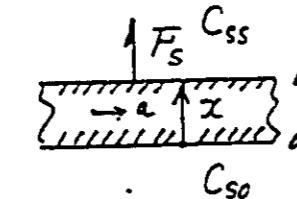


Fig. 2 拡散モデル

左図のようにラドン供給源である下部容器の上部に厚さ L cm の試料を拡散により通過し、上部容器に蓄積されたラドン濃度を測定し試料の拡散係数（見掛け値）を求める。

Fig. 2 の拡散モデルについて計算する。

x : ラドン供給源 (C_{s0}) からラドンの移動方向 (上部容器方向) へとった試料中の距離	: cm
t : 経過時間	: sec
L : 試料の厚さ	: cm
V : 上部容器 (ラドン受容側容器) の容積 (片側)	: cm ³
S : 資料の実効 (ラドンが通過する) 表面積 (片側)	: cm ²
D : 資料中の見掛け上の拡散係数	: cm ² /sec
a : 資料中での移動 (拡散) 可能のラドンの発生率 (= 0)	: Bq/cm ³ · sec
λ : ラドンの壊変定数 2.098218×10^{-6} sec ⁻¹	: sec ⁻¹
C_s : ラドン供給源より距離 x cm における資料中のラドン濃度 (表面より $(L-x)$ cm)	: Bq/cm ³
C_{s0} : ラドン供給源 (下部容器内) のラドン濃度	: Bq/cm ³
C_{sS} : 上部容器内のラドン濃度	: Bq/cm ³
F_s : 試料表面 (L cm) から流出するラドン量	: Bq/cm ³ · sec

$$c.f. V = 9.3 \times 10^4 \text{ cm}^3, S = 4.52 \times 10^2 \text{ cm}^2$$

$$\frac{V}{S} = 2.058 \times 10^2 \text{ cm}^2$$

Fig. 2 のモデルについての拡散方式は

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_s}{\partial x^2} - k C_s + a \quad \dots \dots \dots (1)$$

通常状態では

$$D \frac{d^2 C_s}{dx^2} - k C_s + a = 0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{d^2 C_s}{dx^2} + \frac{1}{D} C_s + \frac{a}{D} = 0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで C_s が

$$C_s = k_1 \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}x\right) + k_2 \quad \dots \dots \dots (4)$$

で表されるとし k_1, k_2, k_3 を求めることにする。これを(3)式に代入すると

$$k_1 \frac{1}{D} \exp\left(\sqrt{\frac{1}{D}}x\right) + k_2 \frac{1}{D} \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}x\right) - \frac{1}{D} \left\{ k_1 \exp\left(\sqrt{\frac{1}{D}}x\right) + k_2 \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}x\right) + k_3 \right\} + \frac{a}{D} = 0 \quad \dots \dots \dots (5)$$

となる。 $a = 0$ と考えられるので $\frac{a}{D} = 0$ であり従って $-\frac{1}{D}k_3 = 0$ 即ち $k_3 = 0$ となる。

また $x=0$ で $C_s = C_{ss}$ であるため (4)式より $C_{ss} = k_1 + k_2$ $k_2 = C_{ss} - k_1$ $\dots \dots \dots (6)$

となる。厚さ L cm の平板試料であり (一次元)、 $x=L$ で $C_s = C_{ss}$ であるため

同様(4)式により

$$C_{ss} = k_1 \exp\left(\sqrt{\frac{1}{D}}L\right) + k_2 \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}L\right) = k_1 \left\{ \exp\left(\sqrt{\frac{1}{D}}L\right) - \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}L\right) \right\} + C_{ss} \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}L\right) \quad \dots \dots \dots (7)$$

となる。これより k_1 は

$$k_1 \frac{C_{ss} - C_{ss} \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}L\right)}{\left\{ \exp\left(\sqrt{\frac{1}{D}}L\right) - \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}L\right) \right\}} = \frac{C_{ss} - C_{ss} \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}L\right)}{2 \sinh\left(\sqrt{\frac{1}{D}}L\right)} \quad \dots \dots \dots (8)$$

従って k_2 は(6)式に(8)式を代入して

$$\begin{aligned} k_2 &= C_{ss} - \frac{C_{ss} \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}L\right)}{\exp\left(\sqrt{\frac{1}{D}}L\right) - \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}L\right)} \\ &= \frac{C_{ss} \exp\left(\sqrt{\frac{1}{D}}L\right) - C_{ss} \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}L\right) - C_{ss} + C_{ss} \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}L\right)}{\exp\left(\sqrt{\frac{1}{D}}L\right) - \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}L\right)} \\ &= \frac{C_{ss} \exp\left(\sqrt{\frac{1}{D}}L\right) - C_{ss}}{\exp\left(\sqrt{\frac{1}{D}}L\right) - \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}L\right)} = \frac{C_{ss} \exp\left(\sqrt{\frac{1}{D}}L\right) - C_{ss}}{2 \sinh\left(\sqrt{\frac{1}{D}}L\right)} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (9)$$

k_1 (8)式、 k_2 (9)式を(4)式に代入すれば

$$\begin{aligned} C_s &= \frac{1}{2 \sinh\left(\sqrt{\frac{1}{D}}L\right)} \left[C_{ss} \exp\left(\sqrt{\frac{1}{D}}x\right) - C_{ss} \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}L + \sqrt{\frac{1}{D}}x\right) \right. \\ &\quad \left. + C_{ss} \exp\left(\sqrt{\frac{1}{D}}L - \sqrt{\frac{1}{D}}x\right) - C_{ss} \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}x\right) \right] \\ &= \frac{1}{2 \sinh\left(\sqrt{\frac{1}{D}}L\right)} \left[C_{ss} \left\{ \exp\left(\sqrt{\frac{1}{D}}x\right) - \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}x\right) \right\} \right. \\ &\quad \left. + C_{ss} \left\{ \exp\left(\sqrt{\frac{1}{D}}(L-x)\right) - \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}(L-x)\right) \right\} \right] \\ &= \frac{C_{ss} \sinh\left(\sqrt{\frac{1}{D}}x\right) + C_{ss} \sinh\left(\sqrt{\frac{1}{D}}(L-x)\right)}{\sinh\sqrt{\frac{1}{D}}L} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (10)$$

となる。試料を通過しその表面から上部容器内に流入するラドン量 F_s は

$$F_s = D \left| \frac{dC_s}{dx} \right|_{x=L} \quad \dots \dots \dots (11) \text{ となるが } \frac{dC_s}{dx} \text{ は負となるので } F_s \text{ を正とするため}$$

$$F_s = D \left| \frac{dC_s}{dx} \right|_{x=L} \quad \dots \dots \dots (11)$$

とする。従って

$$\begin{aligned} F_s &= -D \left| \left\{ C_{ss} \sqrt{\frac{1}{D}} \cosh\left(\sqrt{\frac{1}{D}}x\right) - C_{ss} \sqrt{\frac{1}{D}} \cosh\left(\sqrt{\frac{1}{D}}(L-x)\right) \right\} \frac{1}{\sinh\left(\sqrt{\frac{1}{D}}L\right)} \right|_{x=L} \\ &= \frac{\sqrt{1 \cdot D}}{\sinh\sqrt{\frac{1}{D}}L} \left\{ C_{ss} - C_{ss} \cosh\sqrt{\frac{1}{D}}L \right\} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (12)$$

となる。

ここで (22)式の $f(D)$, (23)式の $f(D)$ は それぞれ

$$f(D) = \left\{ \sqrt{\frac{1}{D}} \frac{V}{S} \sinh \left(\sqrt{\frac{1}{D}} L \right) \right\} + \cosh \left(\sqrt{\frac{1}{D}} L \right) - \frac{C_{so}}{C_{ss}} \quad \dots \dots \dots \quad (22')$$

$$f(D) = \frac{V}{ST} \frac{\sinh \sqrt{\frac{1}{D}} L}{\sqrt{1/D}} - \frac{C_{so}}{C_{ssT}} \quad \dots \dots \dots \quad (23')$$

である。

2.4 抑制剤

抑制効果について従来からの経験上樹脂系の塗布剤が最も期待されたので、エポキシ樹脂系の塗布剤を使用することにした。選定した抑制剤はコンクリートの補修材もしくは充填目地剤、ライニング材などとして使用する2液（主材：Rと硬化剤：H）型の樹脂である。名称はDMレジン、PT200（東都レジン化工株式会社）である。用途の中には、トンネル・水槽の防水工事とあるが広範囲にわたって塗料のように塗ると云うような使用法をとる訳ではない。硬化時間は20°Cで1~2日、可使時間は40~60分、配合比率は R/H = 100/50とされている。これと対比させる意味もあって先年使用したミネラル・パーマ・シールド、ウルトラ・パーマ・シールド、アクア・パーマ・シールドも塗布剤として使用した。またベース材であるセメント・モルタルは、セメント/砂=1/4の配合比の材料に対し W/C = 0.57の水を加えて製作した試料と、さらにその10%のアイゾールを加えた試料を作成した。アイゾールの効果は殆ど期待できなかったが念のため使用することにした。

実験はセメント・モルタル板に抑制剤を塗り、前述の容器の中央の張り出し部に取り付け、建築用のコーティング材によりラドンのリークを防止した上で開始した。

2.5 測定の方法

Fig.1 の実験装置の中央段に試料板を固定し下段の容器内にウラン鉱などのラドン発生源を置く。その上で上段の容器内のラドン濃度の経時変化を求める。

実験を開始する前に実験容器のリーク・テストを行った。容器を密閉し内部の空気圧を高くしその状態で内圧の変化を測定した。その結果かなりのリークが認められた。リークの原因はフランジの一部にひび割れがあり、その補修が不十分であったためと推定された。このひび割れは塩化ビニール用の接着剤を塗布したのみで一応埋められた模様で多量のリークもほぼ止めることができた。

試料はセメント・モルタル板に塗布するが、その前にセメント・モルタル板のラドン通過量を調べる必要があり、セメントと砂のみで製作したモルタル板とそれにアイゾールを加えたモルタル板についてラドン漏出量を測定した。下部容器にウラン鉱を入れ試料板を取り付け容器を密閉し30分後、24時間後に下部容器と上部容器内の試料空気をルーカス・セルに採取しラドン濃度の測定を行った。

また各塗布剤はセメント・モルタル板に塗り乾燥後塗布面の端とセメント・モルタル板の周辺部の間にコーティング材を塗布し、それをセメント・モルタル板保持用の塩ビ製リングに試料面を下にして乗せさらにコーティング材を周辺に塗布したうえ、測定容器の中央の

段の部分に試料面を下向きにしてセットし、ネジ止めをさらにその上にコーティング材を塗り、試料塗布面以外からのラドンのリークを防止した後、容器を密閉し上述の方法と同様にして測定した。また試料によっては48時間後も測定した。

下部容器中のラドン濃度は $3 \times 10^2 \text{ KBg/m}^3 \sim 6 \times 10^1 \text{ KBg/m}^3$ ($8 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/cm}^3 \sim 2 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/cm}^3$) の高濃度に達した。

測定が冬季に行われたため、昼間と夜間の気温差が大きく、気温の低い状態で実験装置をセットすると気温の上昇により内圧が上がり、そのため上部のフタから容器内の空気が漏出し、上部容器内の圧力はそれ程上昇せず、下部容器の圧力のみが高くなり、ラドンを含む空気が強制的に試料もしくは容器内のリーク箇所を通して下部より上部へ移動し、見かけ上ラドン湧出が増加した。またその逆も起るため測定値の変動が著しく細かい計算は不可能となった。

2.6 実験結果

測定結果を表2・1に示す。ラドン湧出量として上部容器中のラドン濃度を下部容器中のラドン濃度で除した値を示す。0.5時間後の湧出率はベースとしたセメント・モルタル板中のラドン濃度の分布型のみならず実験容器を密封するときの状態で変化する。従って参考値とした。24時間後と48時間後の数値は試験体のradon barrierとしての能力を示しているものと考えられる。しかしながら実験容器の機密性が悪く、しかも外気温度の変化のため上下容器間に圧力差を生じ、さらにそれが気温に応じて日変化するため、3項の拡散係数の計算は無意味なのでやめることにした。また24時間と48時間後の湧出率の平均値(番号5)を実験容器固有のリーク量と仮定した。このリークは平均値で5%程度と考えられる。このリーク分を各試料の測定値から引き去り補正值として表に示した。

24時間後の測定値のみしかない場合については48時間後は30%程度湧出量が増加するが、24時間後の湧出量が多い場合は48時間後も同じ程度なのでDMレジン(PT200)を塗布した試料以外は殆ど同程度と仮定した。

塗布回数を増せばラドンに対する抑制効果は増加する筈であるが必ずしもそうではない。パーマ・シールド類の場合は一度塗布した面を2回目に破損する可能性もない訳ではないがPT-200の場合(番号12と13)については実験上の失敗のように思われる。

実験容器にはA・Bの2種類があるが同一試料に対して大略同一の結果(番号13と14)が得られていることから恐らく構造的な差はないようと思われる。

測定結果からパーマ・シールド系の塗布剤については粘性のやや高いウルトラ・パーマ

表2・1 ラドン湧出抑制塗布剤の試験結果

分類	塗布等の条件	試験容器	測定結果					番号	備考
			ラドン湧出率(測定値)%	0.5時間後	24時間後	48時間後	平均値(推定値)		
セメント・モルタル板	モルタルのみ t=0.9cm Na10	B	1.92	27.5	—	(28)	25	1	
	アイソール添加 t=0.8cm Na7	A	1.32	40.0	—	(40)	35	2	
ミネラル・パーマ・シールド塗布	1度塗り ベースNa10(モルタルのみ)	A	4.12	36.7	35.5	36.1	31	3	
	2度塗り ベースNa10(モルタルのみ)	A	3.62	13.8	15.7	14.8	10	4	
気密度試験 (容器の上下部分のリーク試験)	7倍添+ウルトラ・パーマ・シールF +PT200ベースNa10	A	0.67	6.9	3.0	5.0	0	5	
	ウルトラ・パーマ・シールF +PT200ベースNa10	A	0.0005	3.5	6.6	5.0	0	6	
ウルトラ・パーマ・シールド塗布	コーティング材全面塗り ベースNa14(モルタルのみ)	B	0.36	5.8	5.3	5.6	1	7	
	1度塗り ベースNa10(モルタルのみ)	A	0.88	3.6	—	(4)	0	8	
アクリル・パーマ・シールド塗布	1度塗り ベースNa10(同上)	A	0.85	6.1	19.0	12.6	8	9	
	1度塗り ベースNa10(同上)	B	3.3	32.1	—	(32)	27	10	
PT-200塗布 ベースNa7	1度塗り	A	1.1	6.9	—	(8)	3	12	
	2度塗り	A	3.2	9.4	12.6	11.0	6	13	
アイソール添加	2度塗り 試験容器交換	B	4.4	9.6	13.0	11.3	6	14	
	1度塗り	B	0.82	9.7	—	(11)	6	15	
セメントモルタルのみ	2度塗り 端部塗布	B	0.61	7.9	14.4	11.2	6	16	
	1度塗り 裏全面塗り	A	0.003	2.7	5.6	4.1	0	18	

・シールドが或る程度の効果を示していると考えられるが、必ずしも良い状態ではない。
またPT-200については、番号12と13、15と16のように2度塗りをしても殆ど差がない、それは試料保持用のリングへの取り付け部分の内側までPT-200を塗布せずその間をコーティング材で埋めたためのように思われる。これに対し逆の面にPT-200を塗布（裏全面塗り、番号18）し、リングとの取り付け部分までカバーした例では平均値で4.1%補正值で0%となりほぼ完全にラドンが抑制されたことになる。

2.7 結論

DMレジン(PT-200)は、Radon barrierとして有効な塗布剤であろう。しかしこの材料は例えば塩化ビニールとコンクリートの接合部のリークを防止したり、クラックやひび割れを埋めたりするために使用する目的で製造されているようだ、コンクリート全面からのラドンの湧出を防止するためには必ずしも適当ではないように思われる。例えばコンクリートを塗った後金属板で内面を被い、その金属板の接合部やコンクリートとの接点などに塗布する目的で使用すべき材料として位置づけられる。

接合部やクラックに一時的に塗布し短期間ラドンの湧出を抑制するのならば建築用のコーティング材(実験7)が利用できる。しかし長時間の使用や機械的な剥離などに対する耐久性がなくあくまでも一時の用途であろう。

またセメント・モルタルに混和したアイゾールは表1を見るかぎり余り有効ではないようである。

3. ラドンモニターの改造

3.1 モニター改造の必要性

昨年度製作したリアル・タイム表示装置はほぼ満足し得る状態であったが、時として機械語で入れたメモリーの一部が壊れるケースが見られた。しかしそれ以外は順調に作動した。しかしながらPACモニターの感度に比してラドン濃度測定部の感度が低い欠点があった。理由は昨年度の報告にも述べたようにtwo filter方式のラドン測定器のchamberの形状が余りにも薄型としたためであった。凝結核に付着していない成分即ちfree成分に対する付着量は管長に依存するため本来は拡散付着損失は少なくなる筈であったが、このchamberの入口、出口共に直径の小さい管が接続され、従ってchamber内に入った試料空気はchamberの直径方向に拡がり、その過程でfree成分の拡散付着が起きるものと推定された。本年度はその欠点を修正するためchamberの容積と形状を変更した。形状を長さと

直径が大略等しくなるようにし、さらに容積を少し大きくした。また検出部へ導くスリット部の長さを僅かながら短くすると共に、入気側のフィルターをchamberの全直径に拡げ、さらに円錐コーンを取り付け入気がfilter全面に分散するようにした。chamberの組み立て図を図2-2に示す。

ラドン濃度の連続測定装置にはここに示したtwo filter法の他に電界捕集法がある。電界捕集法はchamber内で生成したRaAの多く(88%)が正の電荷を有している点を利用し、chamber内に電界を作り負電極を兼ねた検出面にRaAを集めそのactivityよりラドン濃度を求める方式である。ラドンに対する感度はchamberの容積に依存する。早大の電界捕集型のラドンモニターでは、4.16lのchamberを使用し3.2l/分の流速でサンプリングをした時RaAのchannelの計数は1Bq/m³のラドン濃度に対し2.23counts/hの感度であった。このモニターは半導体検出器を使用しているためラドンのみならずトロンの測定も可能である。トロンに対する感度はラドンに比してやや低いが、他の方法では得られない感度即ち10Bq/m³に対し3.85counts/h(ThA channelの計数)が得られている。従ってこのモニターのような9.8lの容積ならば1Bq/m³あたり5.2counts/hとなり1~2Bq/m³位まで測定できるが湿度の影響が大きく高湿の坑内で使用することを考えtwo filter法とした。(さらに上記の電界捕集法の装置はchamberに正の電圧(3~4KV)を与えているためもしこの方法を採用するとchamberの構成を全面的に変更しなければならない)

3.2 改造後の性能

改造後のラドン濃度に対する感度は改造前の2.71倍となった。即ち流量4.25l/minの状態でRaA channelの30分間の計数は1Bq/m³の濃度に対し0.570countsとなった。(電界捕集方式ならば2.6countsとなる)改造前は0.211countsであったので2.71倍となる。

以下にモニター各部の性能や諸元を示す。

a. PACモニター部の性能

チャネル効率ε：着目領域(設定エネルギー範囲)における計数/全計数

寄与率K(i→j)：j核種の着目領域におけるi核種の計数/i核種の着目領域におけるi核種の計数

表2-2と表2-3に各チャネル効率と寄与率を示す。()内の数値は改造前の値：以下同様

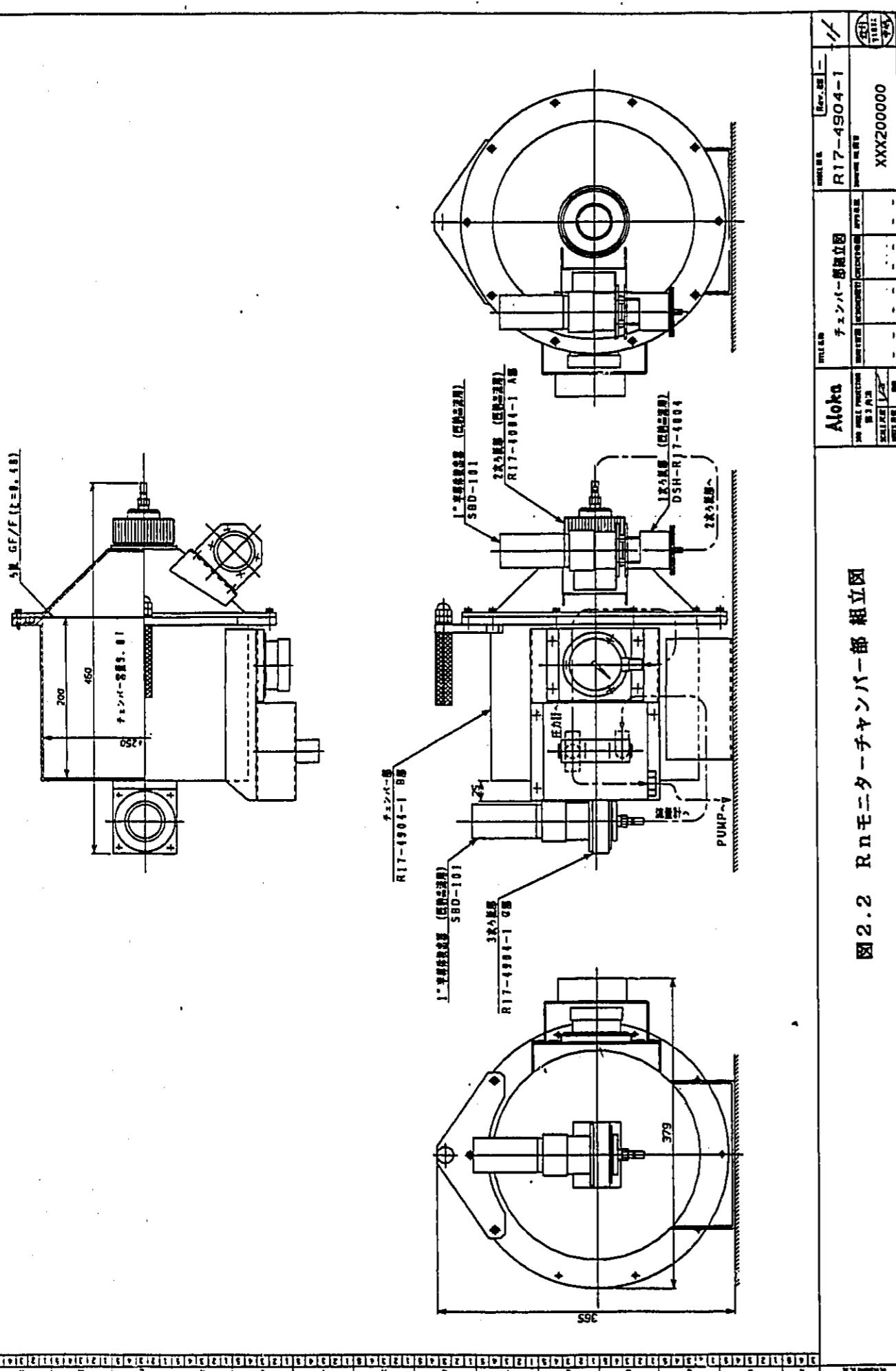


表2.2 各娘核種のチャネル効率 (ε)

核種	RaA(ThC)	RaC'	ThC'
チャネル効率 %	97.47(90.60)	95.89(91.81)	89.93(81.92)

51ch-110ch 115ch-160ch 163ch-193ch

表2.3 各娘核種の寄与率 (K)

	寄与率 %
RaA → RaC'	2.97 (4.97)
ThC' → RaC'	8.89(16.40)
ThC' → RaA(ThC)	58.60(58.60)

α 線 検出効率 (η) : 12.804% (前回の校正時と同じ)

検出器 (半径) (D) : 10.5mm

フィルタ (半径) (F) : 11.3mm

D - F 間の距離 : 9.2mm

両核種について検出効率は変わらない。

表2.4 に本モニタにおける各娘核種の波高選別レベル (シングルチャネルアナライザーの弁別電圧) を示す。

表2.4 各娘核種の波高選別レベル

	Discr. Level	弁別電圧 V	対応核種
1	LL	-0.3644 (-0.5556)	RaA
	UL	-0.8916 (-0.8916)	
2	LL	-0.9355 (-1.0396)	RaC'
	UL	-1.3597 (-1.3818)	
3	LL	-1.3947 (-1.4285)	ThC'
	UL	-1.6747 (-1.6747)	

LL = lower level UL = upper level 以下同じ

b. Rnモニター部の性能

チャネル効率 ϵ : 着目領域(設定エネルギー範囲)における計数／全計数

寄与率 $K(i \rightarrow j)$: j 核種の着目領域における i 核種の計数／ i 核種の着目領域における i 核種の計数

表2・5と表2・6に各チャネル効率と寄与率を示す。

表2・5 各娘核種のチャネル効率 (ϵ)

核種	RaA(ThC)	RaC'	ThC'
チャネル効率 %	97.52(95.86)	95.67(95.67)	92.35(同)

61ch - 115ch 120ch - 160ch 163ch - 190ch

表2・6 各娘核種の寄与率 (K)

寄与率 %	
RaA → RaC'	3.15 (2.13)
ThC' → RaC'	5.44 (同)
ThC' → RaA(ThC)	58.22 (同)

α 線検出効率 (η) : 12.540% (前回の校正時と同じ)

検出器(半径) (D) : 10.5mm

フィルタ(半径) (F) : 11.3mm

D - F 間の距離 : 9.2mm

両核種について検出効率は変わらない。

表2・7に本モニタにおける各娘核種の波高選別レベル(シングルチャネルアナライザの弁別電圧)を示す。

表2・7 各娘核種の波高選別レベル

	Discr Level	弁別電圧 V	対応核種
1	LL	-0.4517 (-0.4718)	RaA
	UL	-0.9352 (-0.9142)	
2	LL	-0.9830 (-0.9983)	RaC'
	UL	-1.3573 (-1.2915)	
3	LL	-1.4019 (-1.3503)	ThC'
	UL	-1.6538 (-1.6845)	

Two-filter法の感度は採取流量によって決まる為、測定の際の流量を電離箱とのRn濃度校正時と同じにする必要がある。その結果、Rn濃度は次の式により表わされる。

4 l/min, 11 cmHg (実流量: 4.25 l/min), 測定時間30分間で

$$X_{Rn} = 1.755 \times I_{Ach} \quad (X_{Rn} = 4.751 \times I_{Ach}) \quad \text{流量計の読み: center of ball}$$

但し、 X_{Rn} : Rn濃度 Bq/m³

I_{Ach} : RaAch の正味計数値

オンライン表示器を作動させる場合、データレコーダーを接続して作動させる。このようにしないと各流度が0 Bq/m³になる。

c. 実測例

改造したラドンモニターによる測定例(表2・8)と早大のラドンモニターとPAECモニターとの比較表(表2・9)を示す一部に異常値があるがそれは電源からのnoiseである。このような時は、その後の3回分の計算値が影響され負のデータが出ることがある。それ以外は両者良く一致した値となった。

3.3 結論

平衡等価ラドン濃度とラドン濃度を同一の空気試料について求めることは空気試料の代表性の観点から極めて重要である。またさらに長時間連続的に測定することも、上記の濃度の空間的分布を平均化し時間的変動を求めることができるために有意義である。そのためこの形式の測定器は有効であるがPAEC monitorとRn-monitorの感度が異なるためその運用には注意を要する。もともとラドン娘核種は、ラドンと平衡していることは少なく、従ってPAECの感度が高いことが望ましいもののやはりもう少しRn-monitorの感度を高くすべ

きだったようと思われる。電界捕集法はその解決法の一つではあるが一般環境でPAECを測定する場合は少なくとも4 l／分の流量は必要であり、同一空気試料を測定するのであれば電界捕集のRn-monitorにも流れる訳でその場合はトロンの影響を考えねばならない。早大ではこの点も考慮しラドン・トロン両者を完全に分離して測定するため半導体検出器の検出面に RaA および ThA を電界捕集し、良い成績をおさめている。しかしこの場合、容器に正の高圧を与える検出器をアース側にとるため、現在のアロカの形式では難しく実現は全く不可能であった。さらに高湿の環境での使用にも疑問があったため感度上不利ではあるがtwo filter法によって測定することにした。

しかしながらこの程度の感度でも測定時間間隔を長くするかmoving average法で平均化すれば一般の野外環境でも十分使用できるものと考えている。

表2.8 アロカボータブルRnモニターの動作試験

オンライン表示器による出力結果

START=14:45, 2/3	4.H 18:45-19:45	7.5H 21:45-22:45
0.5H 14:45-15:15 PAEC A=48, C=91, T=0. Rn A=3, C=8, T=0. RaA = 9.994 Bq/m³ B+C = 2.69 Bq/m³ PAEC = 5.749 Bq/m³ = 1.002 mWL RnConc= 4.233 Bq/m³	PAEC A=101, C=665, T=18. Rn A=15, C=15, T=0. RaA = 17.778 Bq/m³ B+C = 8.552 Bq/m³ PAEC = 18.436 Bq/m³ = 2.791 mWL RnConc= 17.479 Bq/m³	PAEC A=129, C=671, T=29. Rn A=58, C=27, T=4. RaA = 22.342 Bq/m³ B+C = 8.402 Bq/m³ PAEC = 19.77 Bq/m³ = 2.88 mWL RnConc= 75.186 Bq/m³
1.H 18:45-19:45 PAEC A=84, C=311, T=2. Rn A=16, C=12, T=2. RaA = 18.994 Bq/m³ B+C = 6.747 Bq/m³ PAEC = 8.76 Bq/m³ = 2.543 mWL RnConc= 12.975 Bq/m³	PAEC A=119, C=698, T=21. Rn A=8, C=12, T=0. RaA = 19.655 Bq/m³ B+C = 9.097 Bq/m³ PAEC = 11.18 Bq/m³ = 2.99 mWL RnConc= 12.761 Bq/m³	PAEC A=93, C=643, T=45. Rn A=18, C=21, T=1. RaA = 11.661 Bq/m³ B+C = 8.995 Bq/m³ PAEC = 18.231 Bq/m³ = 2.736 mWL RnConc= 36.27 Bq/m³
1.5H 18:45-19:15 PAEC A=79, C=427, T=3. Rn A=12, C=9, T=0. RaA = 16.552 Bq/m³ B+C = 8.886 Bq/m³ PAEC = 10.64 Bq/m³ = 2.846 mWL RnConc= 19.929 Bq/m³	PAEC A=97, C=742, T=27. Rn A=10, C=16, T=1. RaA = 15.66 Bq/m³ B+C = 10.021 Bq/m³ PAEC = 11.68 Bq/m³ = 3.124 mWL RnConc= 11.281 Bq/m³	PAEC A=79, C=581, T=59. Rn A=5, C=7, T=1. RaA = 9.234 Bq/m³ B+C = 6.163 Bq/m³ PAEC = 7.141 Bq/m³ = 1.91 mWL RnConc= -10.652 Bq/m³
2.H 18:45-19:45 PAEC A=61, C=479, T=6. Rn A=19, C=14, T=0. RaA = 14.107 Bq/m³ B+C = 7.352 Bq/m³ PAEC = 8.347 Bq/m³ = 2.566 mWL RnConc= 27.93 Bq/m³	PAEC A=110, C=683, T=25. Rn A=38, C=18, T=1. RaA = 15.927 Bq/m³ B+C = 8.375 Bq/m³ PAEC = 10.863 Bq/m³ = 2.891 mWL RnConc= 51.845 Bq/m³	PAEC A=104, C=592, T=42. Rn A=12, C=22, T=0. RaA = 13.803 Bq/m³ B+C = 6.564 Bq/m³ PAEC = 8.027 Bq/m³ = 2.147 mWL RnConc= 14.972 Bq/m³
2.5H 18:45-19:15 PAEC A=94, C=542, T=11. Rn A=13, C=14, T=0. RaA = 16.188 Bq/m³ B+C = 7.63 Bq/m³ PAEC = 9.345 Bq/m³ = 2.499 mWL RnConc= 22.032 Bq/m³	PAEC A=76, C=619, T=27. Rn A=11, C=13, T=0. RaA = 19.279 Bq/m³ B+C = 6.279 Bq/m³ PAEC = 7.368 Bq/m³ = 1.97 mWL RnConc= 29.539 Bq/m³	PAEC A=119, C=613, T=50. Rn A=16, C=8, T=1. RaA = 18.011 Bq/m³ B+C = 7.878 Bq/m³ PAEC = 9.787 Bq/m³ = 2.618 mWL RnConc= 24.675 Bq/m³
3.H 19:45-20:45 PAEC A=82, C=623, T=7. Rn A=14, C=13, T=0. RaA = 14.536 Bq/m³ B+C = 8.114 Bq/m³ PAEC = 10.102 Bq/m³ = 2.117 mWL RnConc= 17.117 Bq/m³	PAEC A=84, C=622, T=34. Rn A=18, C=13, T=0. RaA = 9.789 Bq/m³ B+C = 7.171 Bq/m³ PAEC = 8.208 Bq/m³ = 2.195 mWL RnConc= 14.45 Bq/m³	PAEC A=116, C=710, T=41. Rn A=21, C=20, T=0. RaA = 17.573 Bq/m³ B+C = 9.792 Bq/m³ PAEC = 11.654 Bq/m³ = 3.117 mWL RnConc= 31.056 Bq/m³
3.5H 19:45-19:45 PAEC A=100, C=644, T=20. Rn A=11, C=8, T=0. RaA = 15.112 Bq/m³ B+C = 8.115 Bq/m³ PAEC = 10.744 Bq/m³ = 2.174 mWL RnConc= 11.198 Bq/m³	PAEC A=103, C=581, T=36. Rn A=10, C=15, T=2. RaA = 15.476 Bq/m³ B+C = 6.958 Bq/m³ PAEC = 8.598 Bq/m³ = 2.299 mWL RnConc= 12.776 Bq/m³	PAEC A=117, C=758, T=68. Rn A=11, C=19, T=2. RaA = 15.788 Bq/m³ B+C = 11.059 Bq/m³ PAEC = 12.52 Bq/m³ = 3.349 mWL RnConc= 17.149 Bq/m³

表2.9 早大の測定結果との比較

時刻	アロカ ホーファルラーモニタ			早 大		
	Rn	RaA	Bq/m ³	Rn	RaA	Bq/m ³
	EECRn			EECRn		EECRn
15:00	4.23	9.99	3.75	13.55	15.50	8.90
15:30	12.98	18.99	8.76	13.66	19.54	10.65
16:00	19.03	16.55	10.64	15.27	22.25	10.95
16:30	27.93	14.11	8.85	17.36	20.82	10.87
17:00	22.03	16.19	17.87	16.61	19.15	10.87
17:30	17.87	14.94	10.80	13.66	15.12	10.34
18:00	16.90	15.19	10.74	14.51	17.93	10.44
18:30	17.48	17.78	10.44	14.96	19.52	11.14
19:00	12.76	19.66	11.18	10.49	17.99	11.23
19:30	11.28	15.66	11.68	8.24	17.16	10.66
20:00	51.85 ^v	15.93	10.06	10.73	16.87	10.50
20:30	29.54	10.28	7.37	11.25	18.53	11.00
21:00	14.45	9.79	8.21	10.77	13.12	10.69
21:30	12.78	15.48	8.60	8.46	15.95	10.46
22:00	75.19	22.34	10.77	8.08	16.93	10.00
22:30	36.27	11.66	10.23	10.88	12.48	10.06
23:00	-10.65	9.23	7.14	15.28	13.63	11.04
23:30	14.97	13.80	8.03	16.13	17.94	12.44
0:00	24.68	18.01	9.79	18.01	18.69	14.15
0:30	31.06	17.57	11.65	19.09	18.88	15.32
1:00	17.15	13.79	12.52	18.67	20.36	15.99
1:30	26.06	22.84	13.41	18.01	20.85	16.59
2:00	30.03	21.50	14.33	17.78	21.67	16.97
2:30	33.85	13.58	15.22	16.44	19.52	17.44
3:00	21.79	11.52	15.69	14.37	19.88	18.31
3:30	12.71	16.30	15.06	15.58	21.22	19.11
4:00	24.46	17.02	14.54	19.78	21.55	19.67
4:30	34.10	16.25	14.58	23.08	21.43	19.78
5:00	29.90	15.11	16.77	24.33	24.63	20.74
5:30	10.74	19.36	18.16	27.18	21.95	20.95
6:00	16.53	17.66	16.00	25.47	26.20	21.12
6:30	29.59	13.60	16.95	24.51	21.38	20.69
7:00	23.07	20.65	20.07	24.72	21.75	20.83
7:30	12.93	22.57	17.45	23.22	24.77	21.20
8:00	11.91	16.28	16.00	22.57	21.05	20.93
8:30	25.64	13.14	16.95	25.18	22.26	21.53
9:00	30.51	14.58	16.23	23.71	21.90	21.52
9:30	24.59	19.17	18.68	23.93	18.98	21.73
10:00	22.38	21.32	18.52	25.65	24.43	22.58
10:30	21.08	16.87	17.63	25.53	21.57	21.81
11:00	18.64	12.26	17.70	27.38	20.89	20.33
11:30	29.83	18.05	17.72	26.32	23.93	18.88
12:00	17.74	12.81	16.61	22.86	20.70	17.00
12:30	17.59	10.10	14.21	20.73	22.66	13.92
13:00	35.15	19.10	12.01	20.67	22.12	12.05
13:30	43.04 ^v	21.98	9.60	21.56	18.89	10.70
14:00	25.48	15.21	8.67	17.11	17.94	9.24
14:30	11.53	9.87	7.02	14.54	13.38	8.43
15:00	-3.61	9.86	5.39	14.07	15.27	7.97
15:30	2.48	10.65	5.55	14.86	15.51	7.65
16:00	21.15	6.72	5.18	16.70	11.83	8.32
16:30	10.49	12.41	5.91	20.55	14.56	

R. 濃度の計算式

$$X_{RN} = 1.755 \times I_{ACH} \quad (\text{改造前 } X_{RN} = 4.751 \times I_{ACH})$$

$\therefore 2.71 \text{ 倍になった。}$

3 counts : $\sim 5 \text{ Bq/m}^3$

4. 採鉱実情調査の実施

4.1 まえがき

本報告書の第1章でも述べたように、今後の研究課題は、ICRP'90年の勧告への対応策として、今後開発すべき放射線防護採鉱法の技術的テーマを選定することである。そのため、今年度の研究活動の一項目として、採鉱実情調査を取上げることとした。即ち海外ウラン鉱山会社に質問状を送付して各鉱山におけるICRP勧告への対応、採鉱技術の開発問題等について調査し、海外ウラン鉱山の動向を知ることを目的とした。また、ウラン鉱床の開発や採鉱技術に関する文献の調査によっても研究開発のテーマに適合した新技術の探索にも努めた。

質問状を送付した海外ウラン鉱山会社は18社である。また文献の調査は、JICST、動燃事業団と東京大学の各図書室などから合計編を入手し、その中から本委員会の研究目的に有用と思われる14編を選び各委員の分担で翻訳した。

4.2 海外鉱山会社への質問状の送付とその回答

4.2.1 送付した鉱山会社

平成3年11月初旬に、海外の主なるウラン鉱山会社に対し、次頁に示す質問状を送付したが、それらの会社名を表4.1に示す。質問状には、質問状の到着後、1ヶ月以内に回答を出して呉れるよう期限を付した。

表4.1 質問状を送付した鉱山会社

米 国	オーストラリア
④ Chevron Resources Company 6001 Bollinger Canyon Road Building L-4212 San Ramon CA 94583, U.S.A.	④ Energy Resources of Australia Ltd. 20 Bond Street, Level 30 Sydney N.S.W. 2001 AUSTRALIA
④ Quivira Mining Company Kerr-McGee Center P.O.Box 25861 Oklahoma City OK 73125, U.S.A.	④ Western Mining Corp. Ltd. (WMC) 360 Collins Street Melbourne 3000 AUSTRALIA
④ Malapai Resources Company Central One and Thomas Building 2828 North Central Avenue Suite 880, Phoenix, Arizona 85004 U.S.A.	フランス
カナダ	④ COGEMA 2 rue Paul-Dautier, B.P. No.4 78141 Velzy-Villacoublay, Cedex FRANCE
④ Amok Limited 817-825 45th Street West Saskatoon, Saskatchewan S7K 3X5, CANADA	アフリカ
④ CAMECO(Canadian Mining and Energy Corporation) 122-3rd Avenue North, Saskatoon Saskatchewan S7K 2H6 CANADA	④ Rossing Uranium Corp. Ltd. Catal Center, Kaiser Street P.O.Box 22391 Windhoek 9000 NAMIBIA
④ COGEMA Canada Limited 817-825, 45th Street West P.O.Box 9204 Saskatoon Saskatchewan S7K 3X5 CANADA	④ Compagnie Miniere d'Akouta (COMINAK) B.P.10545 Niamey REPUBLIC OF NIGER
④ Denison Mines Limited 200 Bay Street, Royal Bank Plaza Suite 3900 Toronto, Ontario M5J 2K2 CANADA	④ Compagnie des Mines d'Uranium de Franceville (COMUF) B.P. 260 Libreville Republic of GABON
④ Rio Algom Limited 120 Adelaide Street West Toronto, Ontario M5H 1W5 CANADA	南アメリカ
④ Uranerz Exploration and Mining Ltd. 1300 Saskatoon Square 410-22nd Street East, Saskatoon Saskatchewan S7K 5T6 CANADA	④ (CNEA) Comision Nacional de Energia Atomica Avenida del Liberador 8250 Buenos AIRES 1429 ARGENTINA
④ Urangesellschaft Canada Limited 2812 Toronto Dominion Bank Tower Toronto, Ontario M5K 1A1 CANADA	④ Urano do Brasil (UB) Avenue Presidente Wilson, 231-Castelo CFP 20030 Rio de Janeiro, RJ. BRAZIL

MMIJ

社団法人 資源・素材学会

THE MINING AND MATERIALS PROCESSING INSTITUTE OF JAPAN

(Formerly, THE MINING AND METALLURGICAL INSTITUTE OF JAPAN)

Nogizaka Bldg. 9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107 Japan
Phone(03)402-0541, Fax(03)403-1776, Cable address MMJUTYO

TO WHOM IT MAY CONCERN

Attention: Chief Mining Engineer/
Radiation Safety Engineer

Research Committee of Development of
Mining Technology for Radiation Protection
Ryohei Kurosawa, Chairman

Re Questionnaire on Mining Technology
of Uranium Ore Deposit

Dear Sir,

Our Mining and Materials Processing Institute of Japan has organized a Research Committee of Development of Mining Technology for Radiation Protection in order to study for safe mining method to prevent radiation exposure for the miners.

In November 1990 the International Committee of Radiation Protection (ICRP) has adopted a new recommendation, which has a tendency to become more stringent on radiation exposure.

As to the new ICRP recommendation, we would be interested to know your company measures taken to meet with the new recommendation, which is our interest to have your kind advice to guide us in our research and technical application.

We would appreciate your kind guidance on our Questionnaire, as enclosed.

We thank you in advance for kind consideration.

Yours sincerely,

Ryohei Kurosawa
Chairman, RCDMTRP

QUESTIONNAIRE

1-If you have your mine/company brochure, we would appreciate receiving one copy.

2-If any technical papers are published on your mining method in the radioactive orebody, we would be interested to receive a copy.

3-As to the new ICRP (1990) Recommendation, what was your reaction?

4-The problems involved with radiation exposure protection.

1) At present what is your main objectives to prevent exposures?

2) We believe one way to prevent exposure would be to automate mechanical mining method. But, if you have any automated mechanical mining method, we would be interested to know your mining method machineries used.

3) In order to reduce radiation exposure for the miners, do you have a new stoping method or developed a new machineries?

4) Please advise amount of radiation exposure received by the miners.
(a) What types of control method are taken for yearly exposures?

(b) What types of apparatus are used for radiation measurements for the miners working at different headings and stopes?

(c) Comparison between the current radiation recommendation value and the actual values measured per year by miners at different working conditions.

5) If there are any problems with your mine ventilation method, what would be your advice.

Remarks:

As to our Question 4-4)-(a), please reply within your possible range.
The above reply received from your company will be kept as "Confidential".

Chairman, RCDMTRP

4.2.2 回答を寄せた鉱山会社

平成4年2月までに回答を寄せた鉱山会社は下記の7社である。

- ①Ranger鉱山(オーストラリア)
- ②Olympic Dam 鉱山(オーストラリア)
- ③COMUFE-MOUNANA 鉱山(ガボン)
- ④COGEMA(日本駐在事務所)
- ⑤Cluff Lake鉱山(Cogemaカナダ社)
- ⑥ERA Ltd(オーストラリア, Ranger鉱山の親会社)
- ⑦Rössing 鉱山(ナミビア)

4.2.3 回答内容の分類(研究仕様書による)

(1)送付された資料一覧表

注 ◎は重複した資料

鉱山名	年次報告書	鉱山パンフレット	技術的パンフレット	技術論文
①	◎		◎ ○ ○ ◎ ○ ○	
②		○	○ ○	○○○○○
③		○		○
④	○	○	○ ○	
⑤		○		
⑥	◎	○ ○	◎ ○	
⑦	○	○		○○○○

(2)技術的パンフレットの種類

- ①Ranger鉱山(ii) Geology and Mining (A 5. 10頁)
- (iii) Milling Operations (A 5. 10頁)
- (i) The Ranger Operation (A 4. 8頁)
- (iv) Health and Safety at Ranger (A 4. 1枚)
- (v) Training at Ranger (A 4. 1枚)
- (vi) Rehabilitation at Ranger (A 4. 1枚)
- (vii) Managing Water at Ranger (A 4. 12頁)

②Olympic Dam 鉱山

- (i) Geology and Mining Technical Handbook (A 4. 47頁)
- (ii) Radiation Safety Manual (A 5. 25頁)

④COGEMA（日本駐在事務所）

- (i) A 40-Year Experience in Mining Services (A 4. 15頁)
- (ii) CRPM関連パンフレット
 - ①CRPM内容紹介 (A 4. 4枚)
 - ②放射線測定器 (A 4. 18枚)
 - (iii) 軸流送風機パンフレット (A 4. 1式)

(3)技術論文標題

②Olympic Dam 鉱山

- (i) Underground Environmental Design and Monitoring at the Olympic Dam Mine (A 4. 9頁)
- (ii) Annual Dose Distribution for the Olympic Dam Operations (A 4. 4頁)
- (iii) Calculation Radiation Exposure and Dose (A 4. 5頁)
- (iv) Work Category Component Doses 1990/91 Full Time Underground Employees (A 4. 1頁)
- (v) The Practical Implications of the New ICRP Annual Dose Limit at Olympic Dam Operations (A 4. 4頁)

⑦Rössing 鉱山

- (i) Health and Safety at a Large Openpit Uranium Mine (A4, 13頁)
- (ii) Medical Practices and Research at Rössing Uranium Mine (A4, 12頁)
- (iii) Drill, blast, load and haul practices at Rössing Mine, Namibia(A4, 7頁)
- (iv) Seepage Control from a Major African Uranium Mine (A4, 9頁)

(4)回答分の内容分類

(i) ICRP Publication 60 についての意見及び対応策

①Ranger鉱山

鉱石品位が 0.3%U₃O₈程度で、露天掘採鉱法のため、ICRP60の勧告は、操業に大きな影響はないであろう。

操業ヶ所の或る部分については、モニタリング手順を見直し、必要ならば手順を変更する。

②Olympic Dam 鉱山

坑内掘（長孔サブレベル法）であるが、副産物としてのウランは品位が 0.1%以下であるため、新しいICRP規制値に対しても充分低い値である。

③COMUF-MOUNANA 鉱山

ICRP60訴勧告へ対応については検討中である。

（トラックレス方式による坑内掘、ウランの品位は 0.3%程度）

④COGEMA（日本駐在事務所）

この項目については言及していない。

⑤Cluff Lake鉱山 (Cogemaカナダ社)

カナダの規制値は1992年にはより厳しいものになるだろう。

既存の鉱山については段階的に新しい規制を実施すると考えられる。

露天掘については、新しいICRP勧告の内容からみても殆んど問題ないと思われるが、坑内掘の場合は若干の問題を解決しなければならないだろう。

⑥ERA Ltd.

現在操業中のRanger鉱山については殆んど問題ないが、新しく買収したJabilca鉱床(0.3%U₃O₈程度)については、Ranger鉱山の露天掘より被曝量が高くなると考えられるので、新しい自動化、遠隔化採鉱法を検討中である。

⑦Rössing 鉱山

ICRP新勧告は予期していたし、被曝限度量の引き下げで、騒ぎを起こさぬよう期待していた。我々は厳格な国際基準に従うように、放射線制御について訓練して来た。この実際的な訓練により、現状は新しい勧告値より充分に低い。（低品位鉱床を露天掘している鉱床である）

(ii) 採掘作業の自動化についての現状と意見及び採鉱法の改善について

③COMUF-MOUNANA 鉱山

自動化機械を用いる採掘は行っていない。又開発の意図もない。

被曝量低減のための新しい採鉱についての検討は行っていない。

⑤Cluff Lake鉱山

現在の採掘法 (Undercut&Fill)について、多くの可能性のある改善について検討している。改善法のあるものは、近いうちにテストする積りである。

⑥ERA Ltd.

自動化された採鉱機械は、運転員に対する被曝を防止（又は制限）するであろうことには同意見である。現在Ranger鉱山ではリモート運転の採鉱機械は持っていないし、運転もしていない。

以前、Jabilka 鉱山での坑内掘のために、リモート運転の採鉱機械の使用につい

て検討したことがある。この鉱床は当分開発の見込みは無いが、我々は現在、最近用いられている遠隔探鉱法の操業について、見直しに着手した。即ちC. Itoh（オーストラリア）に、日本に於けるリモコン探鉱機械に関する入手可能なデータの収集を委託した。又ブリスベンのコンサルタントに、世界中の現行又は開発段階をも含めて、リモコン方式の探鉱法に関する文献を集めよう委託した。この調査は1992年の1月に完了する予定である。

⑦Rössing 鉱山

生産工程の自動化は、被曝源から作業員を隔離するのに有効であろう。隔離することで、被曝量は低減する。

Rössing 鉱山では、高度に機械化された探鉱法で操業している。Open pitやプラント等で使用している全ての重機の運転者は、空調付の防塵装置付運転室の中にいるため、被曝源から効果的に隔離されている。

(iii) 放射線防護についての現状と意見

①Ranger鉱山

露天掘鉱山のため、従業員の被曝量は、年間6mSv以下であり、最大値でも10mSv/年である。

我々の主目標は、規定された年間被曝量限度を超過する従業員が確実に居ないようすることと、作業現場の被曝量を ALARA原理により最少にすることである。

②Olympic Dam 鉱山

政府認定の放射線モニタリング手順により、従業員の被曝を評価している。

坑内作業員の平均被曝量の 1/3は、major radiation exposure pathways で受けている。

坑内作業員の被曝量分布と、職種別被曝量を図4.1 にグラフで示す。

③CLMUR-MOUNANA 鉱山

γ 線とダスト、Rn₂₂₂の α 線を測定する個人用線量計を用い1ヶ月間の合算値を求め、12ヶ月分を合計する。

現行規制値は守られている。

④COGEMA（日本駐在事務所）

CRPM(Centre de Radio Protection dans les Mines) の活動についてのパンフレットが送られて来た。

業務内容

ANNUAL DOSE DISTRIBUTION 1990/91
MINE EMPLOYEES

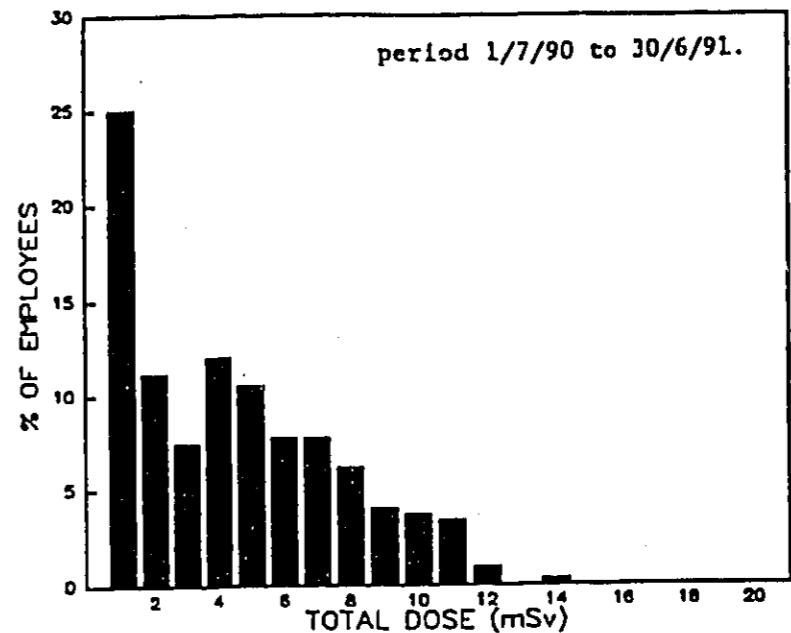
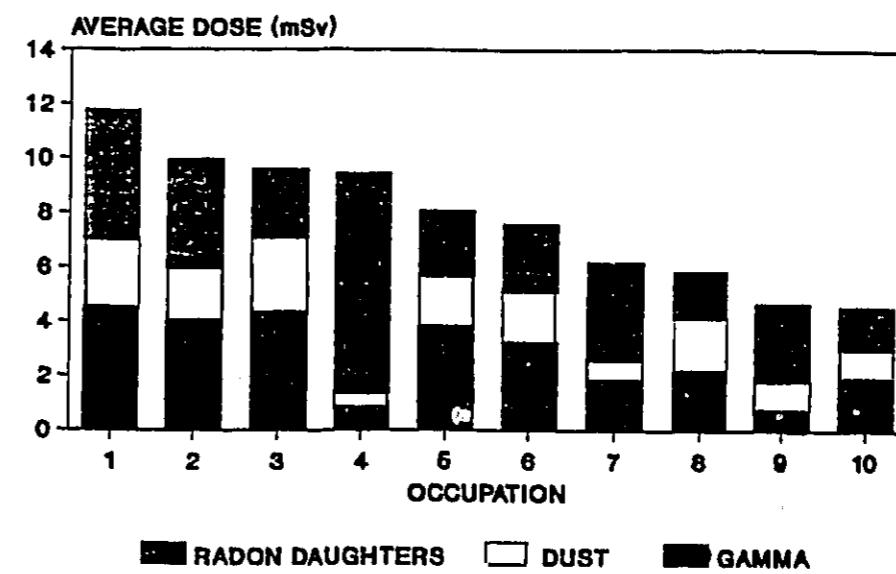


Figure 1: Mine employees dose distribution

WORK CATEGORY COMPONENT DOSES 1990/91
FULL TIME UNDERGROUND EMPLOYEES



■ RADON DAUGHTERS □ DUST ■ GAMMA

OLYMPIC DAM MINE

1. PRODUCTION CHARGER
2. DEV'T. DRILL/CHARGE OP.
3. GRADER OP./SAMPLER
4. PRODUCTION DRILLER
5. ELECTRICIAN
6. SHIFTBOSS/MISC. MINER
7. DIAMOND DRILLER
8. CRUSHER/CONVEYOR OP.
9. LOADER/TRUCK OP.
10. FITTER

図4. 1 Olympic 鉱山の被曝量測定値

(A) New Project

(a)採掘、製鍊、尾鉱処理等で、作業員や環境に対する影響評価

(b)最適な解決策の選定

(c)放射線的初期状況の測定、環境影響評価

(d)放射線防護チーム編成への助力

(B) Mines in Operation

(a)個人線量測定

(b)被曝線量データの利用(Exploitation)

(c)環境影響の研究

(d)放射線に対するリスクの予防とモニタリングに関する専門知識

(e)坑内員の放射線防護と、環境モニタリングに対し責任を持つチームへの協力

(f)放射線防護計量器への助言、通気の最適化

(C) Dismantling Operation

(a)解体作業者に対する放射線防護への助力

(b)解体廃棄物の処理についての技術的助力

(c)放棄された尾鉱貯蔵場のモニタリングに於ける助力

(d)鉱山尾鉱についての長期的なリスク管理への助力

(D) 規制問題についての助力

(E) 測定機器の販売

(a)区域モニタリング

(b)個人線量計測

(c)家庭と構内線量測定

(d)シンチレーター

(F) 自然放射性核種の放射線分析

(G) 特殊教育訓練

(a)教育訓練コース

(b) "Club Vassiviere (子羊クラブ)" セミナー

⑤Cluff Lake鉱山(Cogema カナダ社)

現状については回答なし

⑥ERA 社 (オーストラリア)

(i) のRanger鉱山と同じ

⑦Rossing 鉱山

Rossing 鉱山では、放射線防護で問題となることは何も無い。主な仕事は、ALARA 原理の厳正な適用と、総合的なコントロールシステムの探求と、個人的な防護具を国際的な基準に合致するように選定することである。保健と安全及び環境に関する宣言文で、管理者と従業員の夫々の責任を明確にしている。全ての生産地区には、クリーン脱衣所、食堂、洗濯設備と、コントロール室が備えられている。鉱石や尾鉱或いは生産物に、常に直接接触するのは修理工である。点検修理に廻される機械は完全に洗浄される。被曝量コントロールの為に以下の対策がとられている。

①全ての重機の運転室は空調され、粉塵遮過と人間工学的なデザインがなされている。

②大型重機の作動には、ラジコンが備えられている。運転手が室外で過ごす時間は非常に短い。

③マスク、手袋、保安靴、保護メガネ、特別な衣服のような個人用保護具は、鉱石、廃石、又は最終製品との接觸が避けられない所で支給される。

④破碎系統には収塵装置が付いており、そこでは、鉱石の積替点で有効に粉塵を除去している。

⑤露天掘と回収工程では、通行管理が行われている。許可を受けた人のみカードキーによりこれらの地域に入ることが出来る。

⑥時間当たりの被曝線量が超過する可能性がある場合にはEnvironmental Clearance Certificateが発行される。

⑦更衣室、食堂、洗濯設備は個人衛生の向上に有用である。

⑧保健と安全の訓練コースが、全従業員のために、安全な作業工程を促進するために設けられている。

⑨年毎と半年毎の健康診断（血液検査、身体検査、必要ならX線検査）を行う。これらの検査結果は、従業員の作業環境にフィードバックされる。結果が標準より悪い場合は、必要なら適切な処置がとられる。

⑩放射線従事者として分類された従業員のために月毎に尿と被曝線量の解析が行われる。

勧告された限度を超過すると場合によっては、精密検査が行われ、従業員は被曝源から、その人を隔離するため他の職場に配転されることもある。職場別被

曝線量を図4.2に示す。

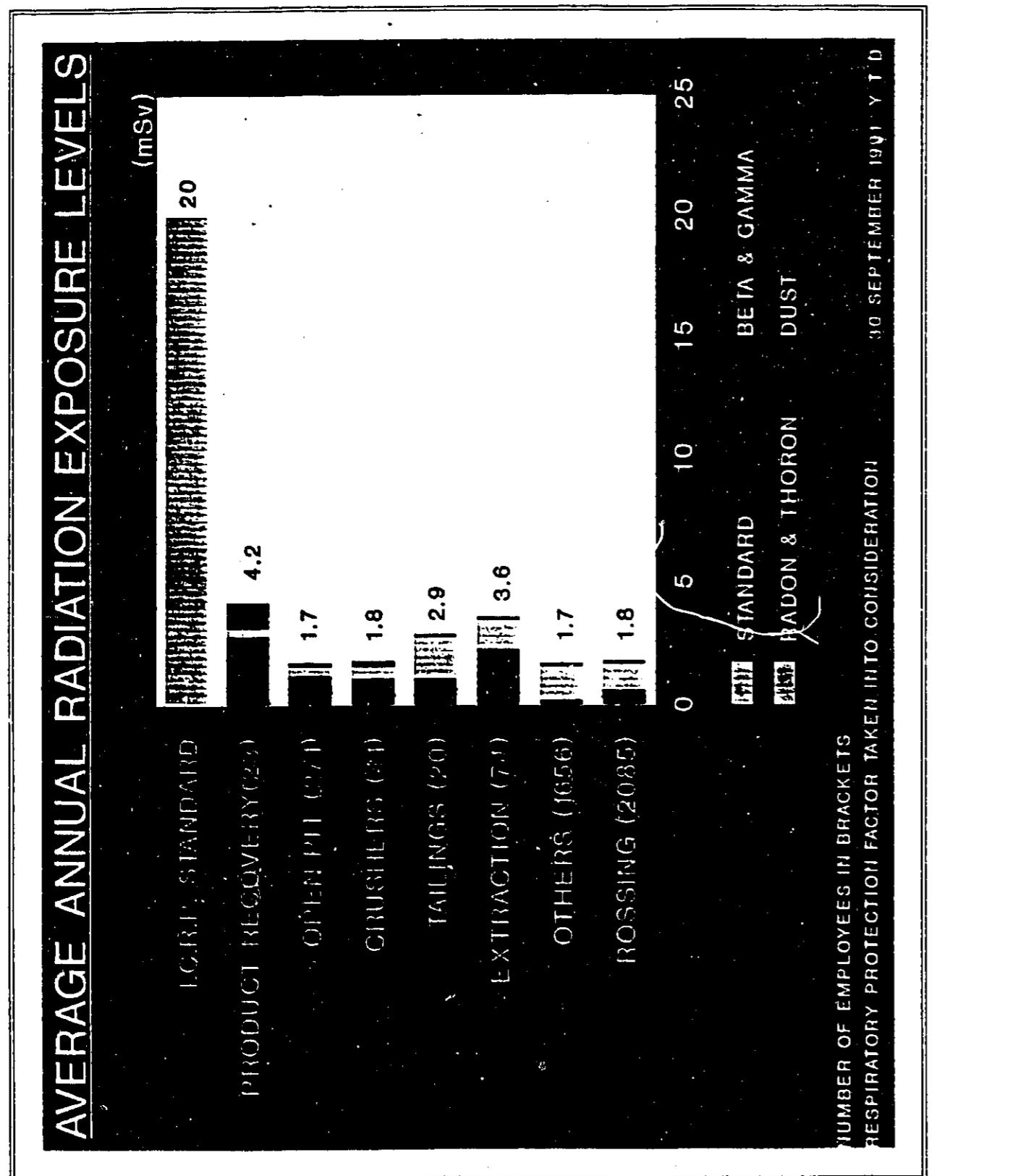


図4.2 Rössing 鉱山の被曝量測定値

4.3 海外文献調査とその結果

4.3.1 文献名リスト

- ①Uranium Mining is Alive and Well in France. E&MJ August 1986. Lane White
- ②The Cigar Lake Project-Concept for Mining High Grade Unconformity Uranium Ore. Athabasca Basin
AIF Uranium Seminar '85 (Sept. 29-Oct. 2, 1985 Santa Fe, NM)
Jean-Pierre Fouques, J. E. Tosney
- ③Mining the Cigar Lake Uranium deposit
Uranium Institute 11th Annual Symposium 発表論文
Sept. 2-4 1986, London (フランス原子力情報、日商岩井原子力部)
G. A. Peebles, J. M. Potier
- ④The Cigar Lake Mining Test
第93回CIM 定例総会 (1991) 発表論文
J. M. Marino, Barry W. Schmitke
- ⑤極めて品位の高いウラン鉱床の採鉱の研究
Caleix, C.: Contribution à l'étude de l'exploitation de gisements d'uranium à très forte teneur. (Industrie Minerale-Mines et Carrières-Les Techniques, Avril-Mai(1991), p. 3~9) 早大 原田種臣訳
- ⑥「High Grade Uranium Mining-Underground-Midwest Joint Venture」
93rd Annual General Meeting of CIM-1991
H. K. Fredrickson
- ⑦Labbit Lake History(Eagle Point 鉱床)
CIM Bulletin
- ⑧Olympic Dam Project
Mining Magazine, 1988. 11
Alan Kennedy
- ⑨Made in Canada Mining Technology
Canadian Mining Journal, 1991. 4
Patrick Whiteway(Editor)

⑩The application of high density paste backfill at Dome Mine

CIM Bulletin, 1990.5

R. J. Perry, D. L. Churcher

⑪Roadheader Excavation in consolidated rockfill at Kidd Creek Mines.

CIM Bulletin, May 1990

V. C. Wittchen, J. E. Croxall, T. R. Yu, Kidd Creek Division Falconbridge Ltd.

⑫In-the-hole drilling at Heath Steele Mine Limited.

CIM Bulletin, October 1979

Errol Ladner (Mine Engineer)

⑬無人運搬「レーザーベースの誘導システムが自動坑内トラック運搬を可能にする」

Canadian Mining Journal 1991年6.7.8 合併号

Patrick Whiteway

⑭A Canadian program in mining automation

CIM Bulletin, 81, 36 (1988)

Nantel, J., Piche A., Scoble, M.

⑮地下ウラニウム鉱山における放射線レベル及び必要通気量の予測

CIM Bulletin, 77, 60 (1984)

Archibald J. F., Nantel J.

4.3.2 翻訳文献要旨

(研究テーマ抽出に有効と思われる部分の抜粋)

1) 文献No.② シガーレイク：高品位ウラン鉱採鉱のコンセプト

(1) 粘土含有量

* 粘土の含有による強度低下の他に、ハンドリングの問題がある。

(ビンやシートへの居付き除去は人力作業となる。)

* 機械への付着も予想され、洗浄による汚染除去とガンマ線の検出が必要。

(2) 採鉱法に対する方針

* 掘削空間の安定性改善を配慮するために、

— 初期地圧の減少

— 人工支保による掘削空間周辺応力の再配分

— 包含される物質の人工的強度増加

* 適切に採鉱を行うための原則として、

— 立坑、運搬坑道、通気坑道は緻密な岩盤中に設ける

— あるブロックからの1回の鉱石の抽出は比較的少量とする

— 掘削された空間は早く埋め戻す

* 高濃度の泥水を使用しても孔の完全な安定は得られず、強度増加のために掘削に先だってのグラウティングあるいは凍結が有効となる。

* 粘土鉱では透水係数が小さいため、グラウトは限定される。

* 凍結状態の粘土質の機械特性は、非凍結状態のものよりもはるかに勝っている。

* 通気の入排気のための開坑が必要である。作業者は常に風上に居るようなレイアウトで、またリモコン機械の使用が防護に有効である。

* ガンマ線の防護には、遮蔽とコンテナ化が考えられる。コンテナはライニングや形状をデッドボリュームを小さくするよう注意が必要である。

* 採鉱法としてはレイズボーラー、水力採掘、ジェットカッティング、原位置浸出が提案されている。

2) 文献No.③ シガーレイクウラン鉱床の採鉱

(1) 鉱床開発の問題点

* 鉱体を取り囲む変質帯に地盤強化の点で若干の困難あり。

* 地下水の量と排水が地盤条件並びに放射線管理に及ぼす影響。

*鉱石帯内で採掘作業が開始されたときに予想される高レベル放射線の問題。

*以上3件が複合した特異な状況。

(2)地盤条件と補強措置

*アサバスカ砂岩；変質帯の外側に有る非常に緻密な岩石。

→バターンボルディング、部分的にメッシュ、ショットクリート

*変質砂岩；30%以上の粘土を含むゾーンが多数存在する弱い岩石。

→広範囲にショットクリート、部分的に支保、グラウティング。

*塊状粘土；鉱床を直接取り囲む変質外被。

→-5°C以下の凍結

*鉱石帶；主としてピッチブレンドと粘土からなる。

→強化ショットクリート、部分的に凍結。

*変質片麻岩；激しい破碎作用によって著しく変質しており、強度は変質砂岩とほぼ同じ。

→広範囲にショットクリート。

*片麻岩；変質していない片麻岩は緻密な岩石。

→バターンボルディング、部分的にメッシュ、ショットクリート。

(3)放射線

*ラドン娘核種対策

→換気によって高い濃度を希釈する。

→新鮮な空気の流れの中へのラドンの流入を防ぐため、グラウトその他により開口部を密封する。

*ガンマ線への対策

→作業員が高品位鉱と直接接触する時間が少なくなるような採鉱法の採用。

→鉱石の露出表面を小さくする。

→作業員と鉱石表面の間に直接遮蔽を設ける。

(4)採鉱の基本方針

*塊状粘土或いは鉱石帶中のあらゆる開口部は掘削以前に補強。

*鉱石中の粘土含有量が多いため、破碎された鉱石の貯蔵或いはシートや抽出口からの回収を必要とする採鉱方法には困難が伴う。

*坑内採掘場へのアクセス坑道や採掘された場所は全て埋め戻す必要がある。

*ガンマ線のレベルが高いため、作業員は遮蔽なしで鉱石帶に長時間接して作業すること

とはできない。

*変質帯においては開発作業前にこのゾーンを減圧するための排水が必要。

*設備の操作取扱い及び坑内空気中へのラドン流入の点で地下水管理は非常に重要である。

*採鉱法は鉱石の分布や変質帯の不均一にも対応できる柔軟性を持つこと。

*坑内の破碎された鉱石の量は極力少なくする。

*恒常的な開口部は変質帯の外に設ける。

*鉱石の露出面積は最小限にする。

*換気は貫流式のものとし、出口の無い水平坑の数は最小限にする。

*鉱石の回収は最大限に行う。

*証明済み、実験済みの採鉱技術を優先的に採用し、既存の技術或いはこの応用が不可能な場合のみ革新的採鉱法に目を向ける。

(5)採鉱法

上記を考慮して検討されている採鉱法は、

*レイズボーリング

*下向き充填採鉱

*Blind Boring

*原位置浸出（インプレスリーチング）

3)文献No④ シガーレイク鉱床の採鉱試験

(1)Boxhole Boring

*1.55φ、長さ50mの試験採鉱（上向き）

*周辺岩盤は岩盤安定のため凍結される。

*パワーパックと制御盤は風上の離れた位置に置かれ、放射線の曝露を防ぐ。

*切削された鉱石は密封され負圧をかけたシートを介して鋼製の密封形コンテナに積まれ、機関車により立坑まで運搬し、巻揚げられる。

*穿孔後、孔口に鋼板の蓋をして口から5mまでコンクリートを打設しプラグを作りその後、埋め戻しをする。

(2)Blind Boring

*1.55φ、長さ20mの試験採鉱（下向き）

*周辺岩盤は岩盤安定のため、凍結される。

*カッターに隣接して切削物を集める吸引システムと、フレキシブルパイプを通してそれらをアクセス坑道まで運搬する空気輸送システムを使用。

*サイクロンとフィルターは掘削と運搬に使われた空気と固体を分離し、固体は特殊コンテナ中に排出され、空気は排気系統に排出される。

(3) 試験採鉱の結果予想される改善点

*boxhole boringにおいて事前パイロットは殆ど行なわれず、実操業では多分必要ない。

*boxhole boring試験に使われたボーリング機は能力過剰であった。このため、実操業においてはより小さく融通のきく機械が使用されるであろう。これにより坑道の大きさ、開発コスト、移動の時間が低減が予想される。

*boxhole boring, biling boring採鉱法のいずれにおいても、アクセス坑道を鉱床に接近することは、ズリ／鉱石比の改善と鉱石の抽出に要する時間短縮に大きな効果がある。生産用サブレベルを鉱床に近づけられれば、生産性の改善に寄与できる。

*拡径可能なリーミングヘッドはズリ／鉱石比を減少させるという大きな効果がある。また拡径可能ヘッドは漏斗形のリーミングができる、その結果埋め戻しコストを低減できる。

4) 文献No.5 極めて品位の高いウラン鉱床の採鉱の研究

(新しい採鉱法)

試験採鉱のため今まで2つの方法が考えられてきたが、これらの短所を克服するために、筆者は以下の方法を提案する。

この方法は、事前に凍結した鉱体内での下向充填採掘法に該当する。坑道は上側1本だけが必要である。

a. 凍結　凍結法は経費がかさむので、今まで採鉱には適用されていない。さてCigar Lakeでの困難は、凍結帯を容易に採掘できるような凍結孔の最適配置を決めることがある。筆者が完全に適用可能と考える配置は、かつてClaude Louisが土木工事に際して考案したものである。(図4.3(a)参照)。

基本計画としては、鉱体の走向に沿い両脇に設けた主要坑道から、凍結孔をせん孔する。これら主要坑道は、砂岩中の岩盤のよいところに位置させる。凍結孔の間隔は、遭遇する状況によって定める。孔長は50m台である。

機械設置は、NaCl溶液とともに慣用の機械を用いればよい。

b. 採掘　主要坑道の掘進は鉱体中ではなされないから、放射能の問題は起こらない。

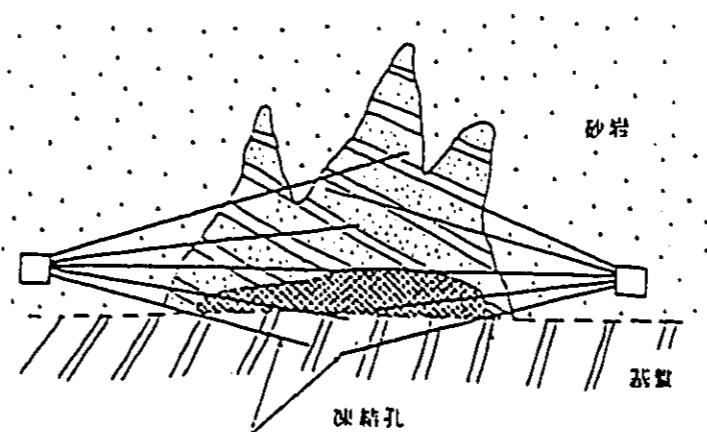
従って、従来方式によって行うことができる。

採鉱機械として先ず取上げられるのがTurmag社製のボーラーである。この機械は、中心部の通常型掘さくビットのまわりにローラーカッタを備えている。掘さくされた鉱石は、逆循環エアリフトシステムにより、機械の掘進軸を通って排鉱される。Turmag機は、掘さく径が0.6～3.5 mのものが製造されている。Cigar Lake鉱床の場合、Turmag機による掘さく径は2.3 mがよいと筆者は提案する。それは後述するように、“bellling tool”と称する特別の掘さく機が、鉱体中では3.5 m径まで追切り機として使用可能だからである。

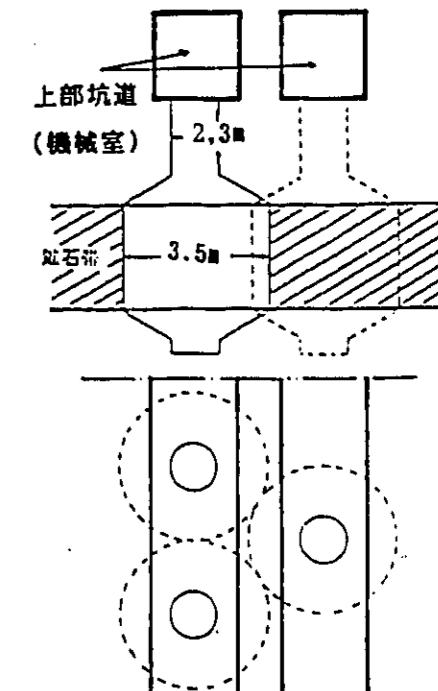
下向採掘法において、掘進孔はまず岩石中を、次いで鉱体を通過する。充てん容積を減らしつつ、岩石帶と鉱体とを考慮した適切な掘進計画図を得るために、筆者は“bellling tool”的使用を提案する。この機械は、鉱石の中だけを大口径でくり抜けるよう製作されている。掘さく作業は、本体に備えられた3個の腕でなされ、また掘さく腕の伸長は、油圧システムでなされる。

Turmag機およびbellling toolによる掘さく跡の垂直および水平断面図は、図4.3(b)に示すようである。

図4.3 極めて品位の高いウラン鉱床の採鉱法



(a) 凍結孔の配置



(b) 水平断面が円形となる掘削跡

c. 採掘跡充填　セメント量を少なめにしたコンクリートによる採掘跡充填は、落盤防止のためできるだけ迅速になされねばならない。コンクリートの流し込みは、重力を利用するかポンプの使用によって行う。

5)文献No⑥ 高品位ウラン鉱の坑内採掘 (Midwest J/V)

(1)地質等

鉱床自体は比較的堅固だが、その亀裂中には多量の粘土を含有している。母岩は強い変成をうけており、多くの箇所で粘土を多量に含有することで品位を低下させ、無価値なものとなっている。

このウラン鉱床の一部では25%以上の品位 (U_{3O_8}) を有している。これらの場所での γ 線放射は、作業者がこれに近接しての採掘法を限定する。

鉱床上の亀裂を多量に有する砂岩は、地下作業で不注意で進入しない限り停滞水で飽和状態である。ウラン鉱床に近いことで流入水がラドン及び娘核種を随伴する。

(2)Blind Bore Drilling (1.2m ϕ × 2)

この試験採掘における特徴的な方法がこの下向大口径穿孔である。これは下のアクセス坑道を必要とせず、すべての坑内作業が一つのレベルから可能な方法である。そのため、費用と時間が低減される。(鉱体上 クロスカット坑道を1本開削)

このために使用する機械はRobbins-Ingersoll Rand製(model RBM-7-SP)である。これは典型的な掘削機で、ヘッドユニットに特徴をもつ(1.2m ϕ でPush時はPull時より能力が上がる)。この程度の仕事では、専用の機械購入は高価なものにつく。切削屑は、ドリルストリングのカッター先端上50cmに取り付けたシールユニット、圧縮空気により排出する。鋼製パッカー (1.18m ϕ × 1.4 m) で周囲はネオプレンゴムでシールされている (1.25m ϕ Frederick E. Johnston特許)。

ドリルストリング中を降下する圧縮空気は切削屑を切羽面から随伴し、シールユニット直下のチャンバーを通り10cm径パイプ2本によりサイクロンに送られ固液分離される。切削屑は、鉱車上の鋼箱内の耐性ポリプロピレンのバグで除去される。サイクロンの排気は地表への排気ダクトにおくられる。

鉱床内に2本の大口径掘削を実施した(30.63mと 33.76m)。地層をいくつか横切ってはいるが危険な状況はなかった。ビデオカメラでの点検の後コンクリートによる充填を実施し、試験採掘は成功した。高品位鉱床中の地質状況の目視検査、評価が可能であった。

(3)鉱排水

ポンプ排水の必要な流入水の量(最大)は、短期的には 2,600 l / 分で、平均(後期の3ヶ月)では 1,300 l / 分であった。

立坑は鉱床から 150m離れているが、鉱床母岩での水はSaskatchewanの水の基準に達し

なかつた(ラジウム 226)ので、開発における排水はすべて処理している。

(4)放射線

ラドン娘核種は、水量が多いことから水が移動源となる。流入水を直接ポンプ水溜にパイプ流送し、溝を流さないようにすることで、主要クロスカットの放射線量を激減させた。7/1~11/23のそれは許容値を下回っている。

γ 線のボーリング作業場所での作業者に与える影響は、0.0015mSV/Hrで、これは許容値を下回っている。

(5)採掘計画 (下向長孔発破法)

a. デザイン設計上の制限

1.鉱床平均品位は 4.5% (U_{3O_8}) で局所的に25%以上であり、これが γ 線源となる。作業者はこれらから防護しなければならない。

2.鉱床周辺の地層、鉱床自体は、強度に変成し亀裂を持っている。この亀裂に粘土を含有することから、岩盤が自立せず広範囲の空洞開削はできない。

3.大量の鉱床への流入水が予想される。この水はラドンガスに富み、ラドン娘核種と呼ばれる α 線源となる。

b. 採掘方法

図4.4 に採掘方法を示す(Non-Entry Vertical Panel 法=NEVP法)。

鉱床上 5~10m に上部穿孔坑道を配置する。この間隔の砂岩は、この坑道での作業者にとって γ 線防護として機能する。同様に運搬坑道は鉱床下 5~10m に配置される。ほとんどの仕事(発破、穿孔も)は、リモコン基地で実施される。搬出は、(1)リモコン室(2) γ 線防護機械室から行われる。

c. 採掘ステップ

1)穿孔レベルから運搬レベルへ穿孔し、ドローポイントのスロットをつくる。

2)5 mだけ切羽から離し、垂直長孔を掘る(穿孔レベルから)。

3)最初の発破で、スロット回りにドローポイントを作る。

4)リモコン室か、シールド室のため、ドローポイント搬出。

5)発破一搬出を空になるまで繰り返す。鉱石はケージ(5t シールドコンテナ)に投入し、地表のストックパイルに搬出する。

6)良質のセメント充填で、掘跡とドローポイントを充填する。

7)同様にして、東向きへと次の作業を進める。この作業を一つの区画の採掘・充填が終了

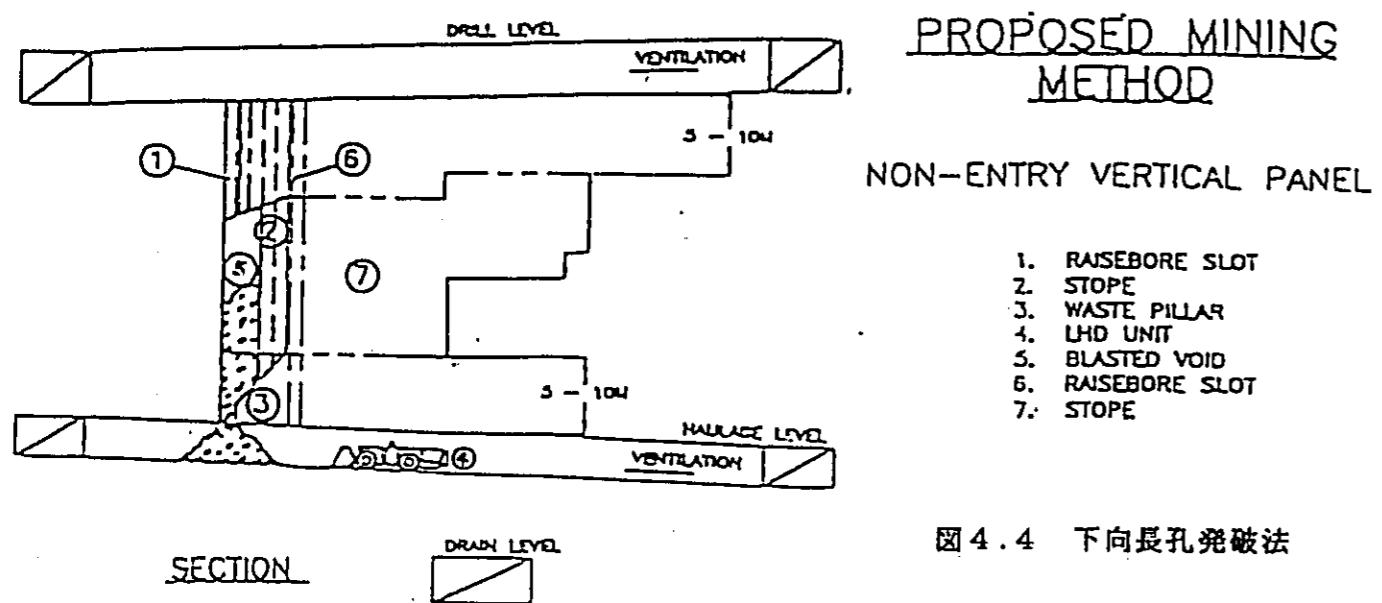


図 4.4 下向長孔発破法

するまで続ける。

8)同様に次の採掘区画 (# 8, Figure. 4) で採掘一充填となる。

d. 設計デザイン・新手法

1. 通気は一回のみ使用。一度使用された空気は排気として排出する。採掘は西から東へと進行させ作業者は常に新鮮な空気のみと接触する。
2. 採掘上の問題を解決するため地下水面は、排水して鉱床下に低下させる。排水作業のための孔は、2つ上の坑道から穿孔する。
3. 排水レベルは鉱体と直接接觸せず合流(交差)しないようにする。ポンプ、および水溜はここに設置する。流入水はすべて発生源で回収し最下レベルの排水坑道にパイプで集約する。これは、通気にラドンを出さないためである。また、水は溝を流さない。
4. 搬出以外のすべての作業は鉱体からはなれて行う。すべての装置は放射線防護を施し、リモコン操作室を設置する。
5. 切羽は小さく、スピード採掘とし、高強度の充填を施す。
6. 通気ファン、ポンプは予備を備える(デュプリケイスタンバイ=2台)。
7. 冬季の大量通気(210m³/秒)の加熱のため、現在の計画は夏期のみである。12カ月常に125t/日の処理が可能なように十分なストックをもうける。

6) 文献No⑦ Labbit Lake Project

(1) Labbit Lake 鉱床の高品位鉱探鉱技術

Labbit Lake 鉱床はOpen Pit法で採掘を完了した。

鉱山作業者の放射線被曝を定められたγ線の最高線量率以下に保つために、2%U₃O₈以上の品位の鉱石の採掘には特別な方法が要求される。平均品位は0.722%U₃O₈であるが、部分的にはmax36%にも及ぶものがある。高品位部は鉱床の北方湖底部に集中している。この部分は長さ、幅共に約350', 厚さ60'で3%UO鉱量220,000tあり、総鉱量の7%，総ウラン量の33%を占める。

作業者の被曝を最小限にするため、Back hoeを用いて採鉱する。高品位鉱を覆っているWasteは保護層として利用するため、鉱石の上18'を残し、最初の採掘時に除去された。鉱石は穿孔、発破されBack hoeでトラックに積み込まれた。この地区のbench heightは10'でBack hoeでのトラック積み込みは鉱石鉱の上18'の被覆Waste又は低品位鉱の上で行われる。

(2) Eagle Point 鉱床の採鉱法

Eagle Point 鉱床は多くのレンズ状鉱化帯から成り立っている。

平面的には長軸方向はNE-SW 長さ 3600' 幅 1000'

傾斜 45° SE

既知 深度 1400'

既知鉱量の約65%は400' ~ 1100' L間にある

30% 400' L以上

5% 1100' L以下

鉱床は垂直200'の厚さ内に賦存する。

採鉱法としてはOpen Pit、現位置リーチング、坑内掘が検討された。

この結果、坑内掘の採用が確認された。

坑内採掘法には以下の設計基準がベースとなっている。

- ・ サスカチュワン州の鉱業法に従うこと
- ・ 作業員の放射能被曝は基準以下であり、実行可能で経済的また社会的因素を考慮してできるだけ低いものとなること
- ・ 安全で効率的な方法で鉱石の回収率を最大にすること

更に以上の一般的基準に加えて、以下の特別な基準が設計に当たって適用された。

- ・ ランプ坑道、切羽へのアクセス坑道、通気用切上は可能な限りずり中に設ける
- ・ 通気は作業員が常に新鮮な空气中で作業ができるよう一方通気システム(車風を作ら

ぬ) を用いる

- ・最高切羽における穿孔、積込み機は可能な限りすり、または低品位鉱内に置かれる
- ・高放射能被曝から作業員を保護するため、遠隔操作用機器で実用化の可能な機器があればその機器を採用する。

以上の基準に従って7通りの通常採用されている採鉱法が検討された。

下向垂直穿孔発破法(サブレベルストーピングの一一種:訳者注)が安全かつ実行可能なものとして採択された。図4.5参照

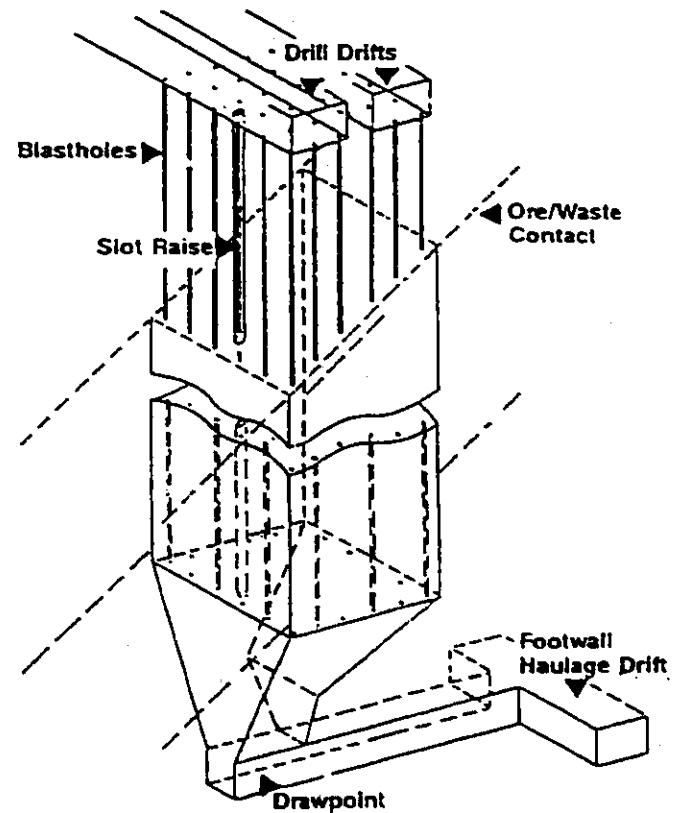


図4.5 下向垂直穿孔発破法

鉱石はスロットホールに向かって発破され、ドローポイントにおいて遠隔操作によりトラックに積込まれる。穿孔坑道への通路は上盤中に、積込運搬への通路は下盤中に掘進される。

ずり中の開坑は坑夫の放射能被曝を低減されるとともに岩石の物理的性質が良いため加背の大きな坑道が可能となる。

鉱石を搬出するためには、隣接切羽を立てるのに上下盤を指示する必要があり空洞はセメント混入のずりで充填される。切羽は順次、チェッカーボード(千鳥)状に採掘されていく。続いて充填ずみ間に残されたピラーが採掘されこれを繰り返していく。

一般的な採掘順序は新鮮な空気の供給口に向かって鉱床の底部及び上部及び内部の

方向に進められる。坑内設備の凍結や作業員に良い環境を供給するため必要な時期には入気扇風機の近くに設けられたヒーターで入気は暖められる。

補助扇風機がドローポイントや切羽上部の穿孔、装填箇所や通気の増量が必要な所に設けられる。ランプ部の回路は10°の排気切上りの坑口に設置された扇風機によって通風される。扇風機はランプの底部から空気を吸出しランプの坑口から新鮮な空気を導入する。冬期にはヒーターを坑口に設置して暖かい空気を送っている。

鉱山の排水は開発坑道の側溝に導かれるモニタリングによって水中に高いラドンの集中がみられた時はサンプまで水を送るのに側溝の中にパイプが設置される。この坑道は、開発地域から坑内サンプに向かって水が流れるよう傾斜をつけている。サンプポンプにより水は地表まで揚水される。

切羽へのアクセスはランプ坑道による。

1100Lまでランプウェイで開坑することは、立坑開発に較べて経済的に有利ではないが、技術的に利点が大きい。

利点としては次の点が挙げられる。

1. 採鉱法として下向垂直孔による方法が採択されている。この方法は、メカナ化ドライヤ式LHD、ドリルジャンボ、リヤダンプトラックを使用する。これらの移動は、ランプ坑道を用いて効果的に実施される。
2. ランプ坑道を用いると、立坑で鉱石を巻き上げるときに必要な鉱石用切上り、グリズリ、鉱石用漏斗、積込み用ピンから発生する粉塵及び放射能被曝をさけることができる。更に、被曝の可能性のある坑内破碎場や貯鉱倉が無くて良い。これらのランプ坑道によると直接切羽のドローポイントで鉱石を積込み積替えなく坑外まで搬出できる。
3. 発電や坑外設備の故障があってもランプウェイによるとこれに影響なく坑外と通ずることができる。

(註)

①極寒地における開発

*全天候道路の無いときは、冬季河川、湖面等の凍結時を利用して資材運搬を行う。

*露天掘の採掘は地表面が凍結する冬季のみに行うのが有利な場合もある。

*排水パイプは凍結を防止する為、側溝内に埋設する。また、熱絶縁パイプを用いたり電熱線をパイプに巻き付けたりする。

*坑内採掘には、冬季入気を坑口で暖める必要がある。

②高品位ウラン鉱の採掘

*露天掘において、高品位部の上部2mくらいの低品位鉱またはズリ部を残して被爆防止に利用していく。そのために破碎鉱石トラック積込みはバックホーを用いクレストレベル（削孔レベル）で行う。

*坑内掘においては、通気は車風にならぬよう一方向回路を取る。また、ドロウポイント立入坑道でのLHDによる作業は遠隔操作による。

*鉱石の分類（Ore, low grade ore, waste）はトラックが放射能測定スキャナーの下を通過事によりリアルタイムで行っている。

*排水パイプからの漏水についてはモニタリングを行っている。

*排水用サンプルやストックパイルの底には40mm高密度ポリエチレンシートが敷かれ漏水による地下汚染を防止している。

*露天掘採掘跡は地質条件がよければ、少し手を加える事により、鉱滓処分地として利用できる。

以上の他は通常の採鉱と変わりない。

6)文献No⑨ カナダで開発された鉱業技術

(1)NTC=Noranda Technology Centre

将来の地下硬岩採掘の技術蓄積・開発を目的とし、NORANDA INC.が、モントリオール郊外Point-Claireに、1961年創立。

1984年採掘技術部門を強化し、50人のエンジニア（採掘）と、ほぼ200の調査員がいる。40のプロジェクトは以下の4分類。

- ①発破(BLASTING)
- ②自動化、情報化(AUTOMATION, COMMUNICATION)
- ③岩石力学(GEOMECHANICS)
- ④採掘環境(MINING ENVIRONMENT)

①PLASMA BLASTING(プラズマ発破法)

- ・担当: Jacques Nantel(地下環境、採掘技術担当)
- ・原理は、コンデンサに大量の電気エネルギーを貯蔵し30~50cmの孔中の電解質にマイクロセコンド単位で送り込む。電解質中でエネルギーは高温、高圧(2ギガPa)のイオン化ガス(プラズマ)となり、岩石を破壊するというもの。以下の3つが主要技術

部分。

a. 電気エネルギーコンデンサ

U.S. Strategic Defence Initiativeより

b. 耐大電流スイッチングユニット(200MW/ μ s)

NTC特許(メンテナンスイージー)

c. 耐圧(耐衝撃)同軸電極

現在再使用可能な同軸電極の開発中(目標400回)

→一方連続穿孔+及び発破のため。複合材料、高機能プラスティックでテスト中

- ・コストは0.19~0.48kWh/m³(現場試験より)

一回の発破エネルギーは家庭用アイロン5分間分に相当。

- ・NTCでは穿孔機械と発破システムを同一のマシンに乗せる研究をしている。

(大塊を破碎できる。0.5~1年で実現可能)

- ・最終的な目標は一方200t能力の連続処理マシンであり、5年間で実用化。コストは10\$/t以下で、発破ダメージの減少により支保コストが減少する。

- ・1990夏に年6tのプロトタイプ(NTC, 4m平ボデ乗)完成。2日間8回にわたるテスト実施(Gaspe Mine-Quebec. Boulders)湿潤状況の露天掘り採掘、坑内30°の穿孔で成功した。

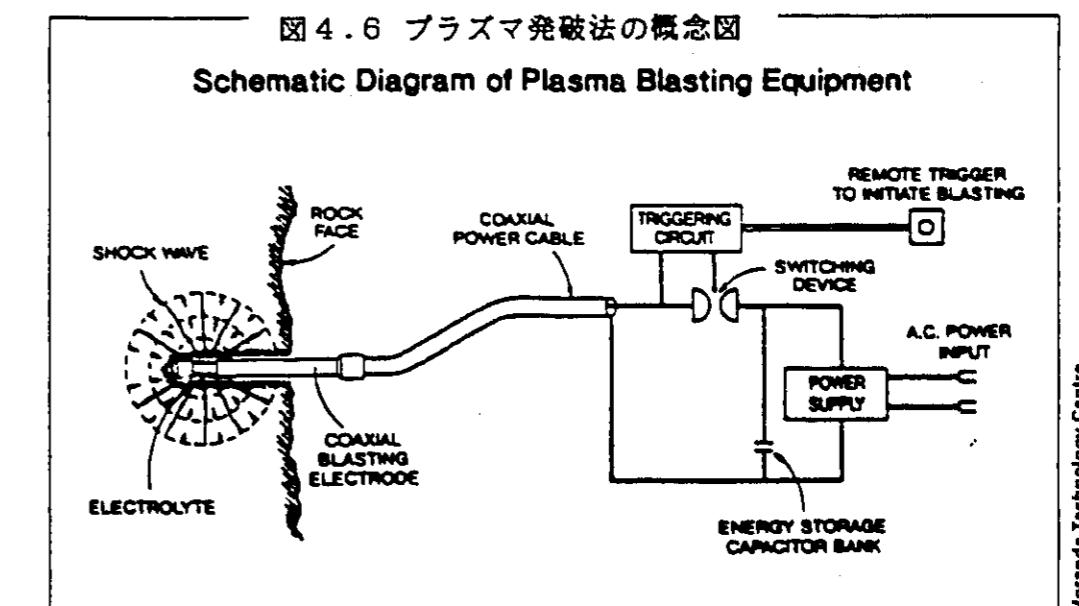


図4.6 プラズマ発破法の概念図

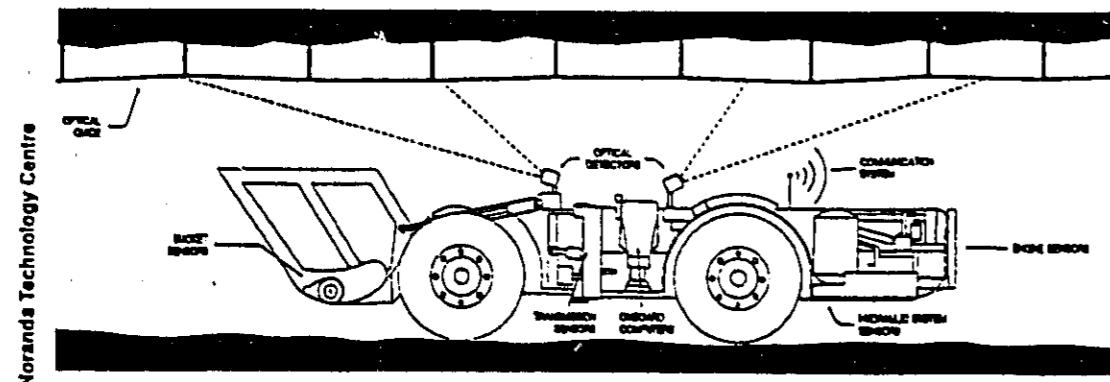
Schematic Diagram of Plasma Blasting Equipment

Noranda Technology Centre

②AUTOMATED LHDs & TRUCKs(自動LHD・トラック)

- CCARMとの共同開発であるコンピュータ制御LHDが、Norita鉱山で稼働した。
CCARM=Canadian Centre for Automation and Robotics in Mining (モントリオール)
- コントロールルームから数台の制御ができ、LHD乗車による問題を回避できる。
- ビデオ情報は遠隔操作でき、コントロールルームにフィードバックされる。
- リモコンユニットはドローポイント近辺にあるが、次のステップではオペレータは地表からコントロール可能としたい。
- NTCはこのシステムをトラックまで拡張し、個々の鉱山用に特化したい。プロトタイプは1992中ごろに完成予定である。
- 広帯域の新通信システムが、単方向のトランシミッタ&レシバーシステムをベースとして設計された。今後の開発はデッドスポットの解消、ビデオ音声情報の転送を目指している。
- Falconbridge's Strathcona鉱山(Sudbury, オンタリオ)では、ケーブル、周波数帯域のテストを実施した。3年以内にシステムを完全なものとしたい。
- VLF電磁波警報システムをVLFMagnetic Systems of Scarboroygh (オンタリオ)と開発した。この試験はNoranda's Central Canada Potash鉱山(Saskatchewan)で実施した。

図4.7 コンピュータ制御LHDのイメージ図



Guidance system for an autonomous underground vehicle tested at the Norita mine last year.

7) 文献No⑩ Dome鉱山における高濃度ベースト充填の適用

(1) 充填材の選定

充填材料は以下の性質を要求される。

- ・残壁に耐え、自立する事。

- ・浸透性が小さく、内部の水圧を大にしない。
 - ・壁等がなくとも安定したプラグができる事。
 - ・坑内で容易に運搬できること。
 - ・経済的であること。
- 以上から尾鉱(水分18~23%に脱水)にセメントを混合したものを選定した。HDP充填は以下の特徴を持つ。(HDP=High Density Paste Backfill)
- ①高充填率(最高100%)を得られる。
 - ②尾鉱処理により、地表のダム処理量が低減される。
 - ③水セメント比が小さい(9:2以下)ので固結後の強度が大きい。
 - ④高安息角(40~70°)により自己シールプラグとなる。
 - ⑤空隙減により大きな強度が得られる。

(2) 充填設備による操業結果

① Centrifuge Performance

遠心分離による脱水はフェーズ1で実施している。脱水後の固体分は、76.5~78%である。回収率は75~80%である。(Table.1) 遠心分離のメカニズムは信頼できる。初期のテストは80%稼働であり、パイロットプラントでは68%の稼働率であった。(フェーズ2, 3)

② Operation Costs

ハ件費1.68\$, セメント2.25\$, メンテナンス1.60\$
合計5.53\$/t (1985. 充填量あたり)

③ Fill Plugs

安息角(最終)は42~70°で、解放部のシールは可能であった。空洞底部のプラグでは3%セメントを添加している。他は2~2.5%のセメントを添加している。

④ Placement

Dome鉱山では空洞頂部により2inchのプラパイプを通して重力充填をしている。70°の安息角により、空洞全体に到達しないという問題があるが、ポイントの移動、ポンプ輸送(ボアホール)によって対応する。

⑤ Pumpability

フェーズ3ではポンプ圧送テストを実施した。(能力45ft³/Hr)

圧力損失は2~3psi/ft。機械的な障害が発生し、6t/Hrで150ftが限度であった。よ

り以上の能力は可能だが、初期投資と運転費を考慮すると、水平に広いあるいは狭い空洞でのみの使用となる。

⑥Cement Mixing

セメント他の添加物はコストの大きな部分を占める。また、強度を出しつつ水セメント比を低く保持することは連続運転では困難である。16inch径20ftのロングリボン・フライトコンベア（バックパドル付）を開発した。実際の強度はラボサンプルの15~20%減である。これはミキシング不足によると考えられる。現在は2×10inch径で20ftのコンベアミキサが取り付けられている。

(3)ペースト充填物の特性

①Compressive Strength

最小のセメント量、水セメント比で最大強度を得ることが目標である。

(figure. 3—強度発現～時間の関係)

(figure. 4—セメント量と強度の関係)

以上により水力充填の1/2 ~2/3 少ないセメント量で同様の強度を得られることが分かる。

②Particle Size

粒度分布はfigure. 5に示す。水力充填よりも細粒であり、低い空隙率が達成されている。

③Design Criteria

McGill University による細粒（200mesh80%）の高濃度ペースト充填の基準は以下の通り。

・ヤング率	9572.1psi (66MPa)
・空隙率	0.599
・凝集力	17.44psi (120.3kPa)
・摩擦角	21.8°
・濃度	99.433lb/ft³ (1592.99kg/m³)
・一軸圧縮強度	62.35psi (429.93kPa)
・尾鉱：セメント = 1 : 30	
・水分	19.05

8)文献No① Kidd Creek鉱山に於ける固結した充填物のロードヘッダーによる掘進

キッドクリークの第2鉱山の当初計画には、下部採掘のための穿孔坑道として使われる、充填されたアンダーカット坑道の再開発が含まれていた。しかし充填物の堅さ (Consistency) は再開発の妨げとなった。充填物は、20 : 1 の割合でセメントを含む15cm以下の塊石の固化したもので、5 MPa の圧縮強度を持つ。

従来の穿孔・発破法による問題点として、

- 1)効果的に穿孔・発破しても、最大 1.5mの範囲しか掘削できない。
- 2)孔が抜け落ちたり、クレータ状になり、発破に支障をきたす。
- 3)ロッドが泥に埋まり込む（水の使用量の規制）
- 4)ANFOはセメントと反応してアンモニアを発生するため、高価な爆薬が必要となる。
- 5)発破により充填物にダメージを与えるため支保が増加する。

従って、充填範囲にある採掘可能な鉱石へのアクセスは、長い距離が必要となるが充填区域を迂回して掘進するか、固有の問題は有るが充填物中を掘進するかのいずれかによって得られた。

(1)ロードヘッダ試験

1987年なかば、充填中の機械掘削が研究された。選ばれた機械は軟～中岩用のロードヘッダである。カリ、石炭碎屑質凝灰岩のサイト見学が行なわれ、このタイプの機械を試験することとなった。

①Dosco MK-2A を試験に選択した理由

沢山のタイプとサイズのロードヘッダについてレビューし、操作機能が比較された。掘削の観察と、ユーザ、メーカーとの操作、メンテナンスについてのディスカッション、掘削される空間サイズ等考慮して、Dosco MK-2A が最適となった。その利点として、

- ・広く使用されている。（1972年以来、世界で1,200台、北米で50台）
- ・サービスが良い。
- ・碎屑質凝灰岩がキッドクリークの充填物と似ている。
- ・コンベアの形状が予想される“詰まり”を防げる構造となっている。
- ・短く、コンパクトな形状をしている。
- ・カッターヘッドのデザインとスピードの選択が可能。
- ・粉塵からオペレータを守るエアカーテンが設計されている。
- ・他のオペレータのメンテナンス記録が良好。
- ・新車、中古とも価格が魅力的。

②作業サイクル

作業サイクルは掘削と支保の2つから構成される。掘削は、カッティング、積込み、運搬より構成され、支保はカッティングブームを使用しての2ピース鋼枠アーチの建込みから成る。

実際の掘削時間は1方8時間の内18~23%で、ほぼ20~23m³（掘進1.4mに相当）を掘削した。

主要運搬機は、Jarvis Clark JDT-413 End Dump Truckで、補助的にST3.5, ST5スケープトラムが使用された。Sien Brute トラック(2yda)も使用したが小さすぎた。

作業サイクル中で支保の時間が最大であった。掘削が終わった後この坑道の中で発破を行なうための安全確保のため、ショットクリートではなく、鋼枠アーチが使用された。ホリーバンク2ピース鋼枠アーチ(5W×18lb/ft)が1.2m枠間で建込まれた。試験中はロードヘッダのクルーが支保も行なった。鋼枠建込み用にはロードヘッダに取り付けたプラットフォームとプラケットを用いる。

クルーが行なう他の仕事としては、

- 1)ロードヘッダの手入れ(注油等)
- 2)ピットの交換
- 3)アーチ建込み時の坑道のはつり
- 4)切羽への機械の搬出入
- 5)通気ダクトの設置

が有ったが、これらは作業が進むにつれて、所要時間は減少した。

スパイラル風管に代えて、ファイバーガラス横円風管(0.38m×1.2m、または0.75mφ)によりほんの僅かであるが15~20%風量が増加した。また湿式スクラバは全吸入粉塵の除去には余り効果的でないことが判った。

(2)結論

4ヶ月の試験の結果以下の結論が得られた。

①切削時間1.5時間で方当たり平均1.2m(0.8m/h)の進行がえられた。切削時間を4時間にすることにより、従来の穿孔・発破工法による1.5m/方の倍以上の進行となるであろう。

②発破工に比べ切削後の岩盤は安定的で、支保は安全に行なわれかつ量も少ない。

③ロードヘッダは試験中、余り固結していない充填物を掘削した。従来の方法ではそのよ

うな区域の掘削は困難であることが証明されている。

④試験操業では従来法に比べ、似たような単位当たりコストを示した。しかし、鋼枠をショットクリートに置き換えることにより、単位掘削コストを半分にできる可能性がある。

⑤上記の利点に基づいて、充填物の掘削におけるロードヘッダの継続使用の正当性が証明された。

9)文献No⑫ Heath Steele鉱山におけるITH大口径穿孔

(1)Heath Steele鉱山概要

①生産量：1.2百万t/年、全生産量は“B”ゾーン鉱体から第5立坑を経由して出鉱される。

②鉱床：石英-長石斑岩と緑泥石凝灰岩の互層中に胚胎した層状のMassive Sulphide。

鉱床のタイプが2つあり、1つは銅の中に磁硫鐵鉱を多く含む銅鉱で、もう1つは銅、銀を随伴する鉛、亜鉛中に黄鉄鉱を多く含む鉛・亜鉛鉱である。

これらの鉱石は個別に採鉱されることは殆どできないため、通常混合した鉱石として採掘される。

③採鉱法：Open Blasthole Stoping。最近では生産量のほぼ50%が大口径発破法により生産されている。

(2)なぜ大口径か

①通常の長孔穿孔

ピット径：2-1/8インチ

穿孔パターン：放射状(ファンカット)、抵抗線5ft、孔間隔8ft

爆薬：カートリッジスラリー、カートリッジ装填機使用

特徴(欠点)：

*70ftを超える孔は極端な偏差を生じ易いため、比較的近接した穿孔中段が必要である。

*爆薬をより均等に配分するための孔底の薬量を増やすため、孔底で5フィートオーバーラップさせることが必要である。

*鉱量トン当たりの爆薬量が孔口から孔底までの距離の減少関数となるため非常に不規則な破碎の原因となる。

②大口径発破孔の特徴(長所)

- * 穿孔作業当たりの生産性が向上し、その結果労務費が低減する。
- * 穿孔が孔の中で行なわれるため作業区域内の騒音と粉塵レベルが低下し、環境が良くなる。
- * 孔曲りが小さくなり発破効果の改善と、発破孔の単純化がもたらされる。
- * 薬量/t (Powder factor) が良くなる。
- * 高価な "dry blasting agent" の使用が減少し、爆薬の配分がより良くなる。
- * 大きな孔ほど爆速が大きく、より良い粉碎作用を岩盤に与える。

(3) I TH穿孔の開発

図2にI TH穿孔の典型的な採掘ブロックを示す。

始めの50フィート高さ分のスロットとコーンには2インチの発破孔が用いられる。この上の180フィート高さのブロックは、全採掘区域をカバーするルーム&ピラーから6-1/2インチのI THで穿孔される。さらに上部の50フィートは2インチ口径のスロットと平行リングで採掘される。

スロットはレイズボーラでピラー線から20フィート以内に設けられる。

穿孔機はGDFL93-3-1/2削岩機を搭載した、Maclean Warkentinの2ブームジャンパーを使用した。3人のクルーでロックボルトを含め週5日で7~8サイクルを達成した。但し、積み込みはEimco915積込機による生産クルーによって行なわれた。これは従来の4~5サイクル/週に比べ良好な結果である。将来は、12フィートスティールの3ブームParamaticジャンパーが計画している。

(4) I TH穿孔機

I TH穿孔機は限られた空間でdown-the-hole drillingを行なうことを目的とした、1マンのクローラドリルで、特に立坑や坑内掘削場所で分解することなしに運搬できるよう設計されている。

I TH穿孔の他の使用法としては、排水孔、ドロップレイズ、そして種々の系統を通すための正確さが要求される連絡孔等である。

ロータリヘッドの回転数は10~15rpmで与えられる。余り速い回転はビットのゲージボタンの消耗が増えるため、ビットライフ低下の原因となる。これはハンマーやドリルステールの消耗をも増加させる。余り回転が遅いと不規則回転をもたらし、チップのクリア

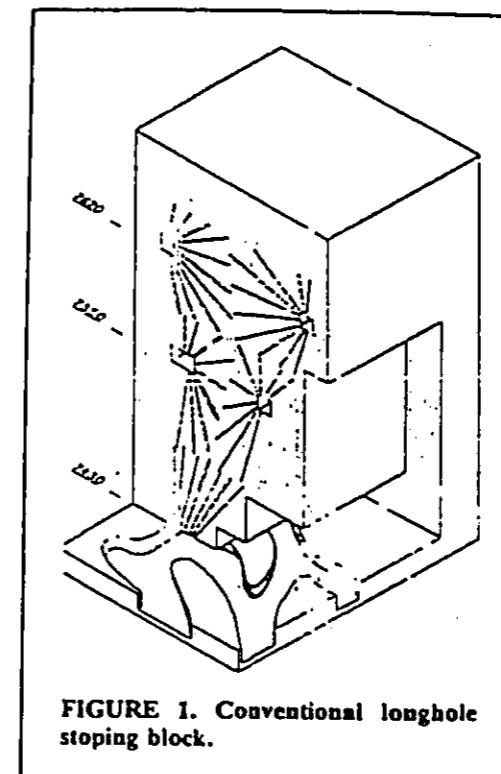


FIGURE 1. Conventional longhole stopping block.

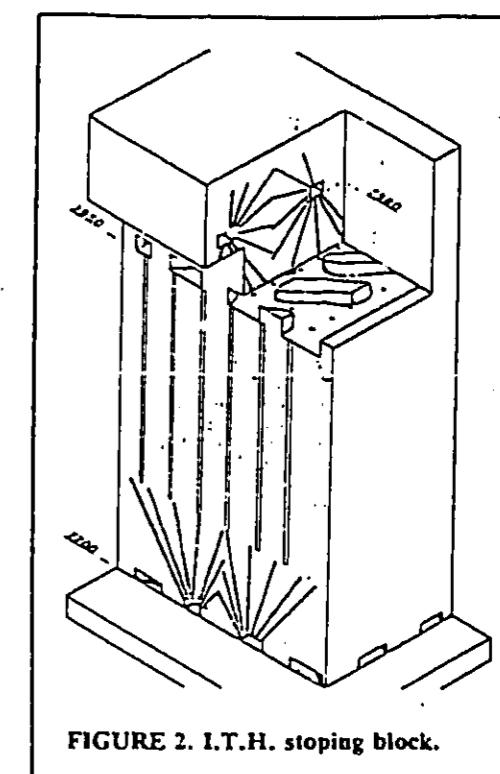


FIGURE 2. I.T.H. stopping block.

図4.8 従来法の長孔採掘とI TH採掘の比較

ラヌスを減少させ、孔下がりが悪くなる。

岩盤条件により回転数が調整され、基本的には硬い岩盤条件では回転数は小さくなる。

使用されるビットは、孔の中から切削物が通って出るためのクリアラヌスを与えるために、ドリル径より最低1/4インチ以上大きくななければならない。連続的な切削物の排出は排気によって行なわれる。補助的な孔掃除はビットを孔底から少し上げて、孔底へのエア供給量を増加させて行なわれる。

ドリルハンマーの最大効率を引き出すため、I THジャンパーに直接リンクした、定格能力900cfmで設計最大圧力250psiの300HP電動ロータリースクリューコンプレッサが購入・設置された。

試験を行なった結果、最も良い結果が得られたのは平面型で、5/8インチのボタンのものであった。穿孔速度は90psiで7.8ft/hから160psiで16ft/hであった。

(5) I THの進展

Heath Steele鉱山社では大口径穿孔が急速に取り入れられて来ており、将来は従来法の長孔の減が期待される。

スロット開坑の必要性を減らすパーティカル・リトリート採鉱が進行中である。採掘上、

の抽出にもより長い孔が検討されている。

I THは、その単純さ、正確さ、発破結果は証明されており、今後も長く行なわれるであろう。

10) 文献No⑬ 無人運搬「レーザーベースの誘導システムが

自動坑内トラック運搬を可能にする。」

坑内トラック運搬の経済性をオートメーションシステムが大きく変えるであろうことが5月バンクーバーで開催された CIMの年次総会で示された。

オンタリオ州North Bay のMintronicsにより、四年間に約 100万ドルを掛けて開発されたOptitrakが代表的な鉱山で運転手一人当たり75,000ドル／年かかると言われるトラック運搬費を低減させる。

このシステムはテスト時には1台当たり 105,000ドルの費用が予想される。更に重要な立坑により鉱体のアクセスする代わり、運搬坑道を開さくすることによりコストの節約になる。このシステムはJDT-413 トラックを用いてサッドベリー鉱山の坑内でテストされよい結果を得ている。このシステムは2つのClass 2 レーザーから成っている。レーダーは中央の回転軸で前後を連結したトラックの前と後に備えつけられており、雑貨屋のチェックカウンターで使用されているものと同一の物である。前方のものは前進時に用いられ、後方のレーザーは鉱石収納容体の下に、特別に設計されたリトラクタブル（引込むことの出来る）の容器の中に積み込まれ、後退時に用いられる。

坑道の天盤の中心線上に取り付けられた細長い発射テープに当たり反射してくる光線により、トラックに積んでいるコンピューターがデータを解読し、トラックに指示を与える。レーザー光は断続的に送られ、天盤の反射板に当たり、レーザー装置に返ってくる。レーザーは 500mA必要である。コンピューターは反射テープの位置からのレーザー装置の偏心を計算し、トラックを反射テープの下の位置に保ち、速度を維持するべく適切な行動を起こさせるため、トラックのステアリング、スロットル、ブレーキのシステムに指示を与える。トラックは信号を見失う前に行動の中心線の左右方向に52.5°まで振ることが出来る。

天盤の反射板の右側に付けられたバーコードは日常決まった作業、すなわちブレーキテスト、スロットルアップ（ランプに入る時）、スロットルダウン（決められたコーナーに入るとき）、左右に曲がるとき（例えば、クロスカットに入る時）等を実行するときに指示する。

1人の LHDオペレーターがその全システムの操作をする。最初オペレーターは運搬コース上を手動で運転する。このシステムでは、オペレーターの視界を遮るものは何もない。それ故トラックをマニュアルで運転する時には、坑夫に特別な訓練する必要はない。これはこのシステムにトラブルがある場合、修理するために電気工がすぐに間に合わぬ場合でも、トラックはマニュアルで運転することが出来ることを意味している。

運搬路に沿って最初にマニュアルでトラックを運転するのは、反射板が完全であるかを目でチェックすることになる。

反射板は 2.5m長の真直ぐな亜鉛メッキ鉄板の上につけられており、これは天盤にワイヤーで取り付けられ、クランプで繋がれている。真直ぐなメッキ鉄板はトラックがコーナーを曲がる時にギクシャクとした動きを起こさせるが、発破による空気振動による問題はない。

運搬ルートが一度十分に検査されると、オペレーターはトラックを積み込み場所に戻し、スイッチを自動運転に切替え、すりか鉱石の運搬かを選択する。そして彼は積込みのために LHDに乗込む。トラックに荷を積み込むとオペレーターは手持ちの遠隔操作ボックスを用いてトラック自動運転のプログラムを始動させる。（この遠隔操作システムは市販のものを用いている。）トラックが自動運転されている間、オペレーターは積み場所まで鉱石を搔き寄せたり、場所によっては、他のトラックに荷を積み込んだりする。

4年間をかけて、Mintronicsは数個の安全装置についても設計した。その内最も重要なのは腐食防止である。トラックの自動運転中は人がトラックを避けるように警告すべく、警告灯が点滅する、更に坑内にいる人は特別な反射板を取り付けたヘルメットを着用する。自動運転中のトラックが、これらの反射板から前もって定められた距離内に入るとトラックは自動的にブレーキが掛かり、反射板が安全な距離に離れるまで、空運転をする。

他の安全装置は、コンピューターが指示する時にブレーキが働いているかどうかをモニタリングするシステムを持っている。このシステムは並列した2系列があり、1つが故障した時には、1つがback up するようになっている。1つの故障の場合は、トラックは自動的に停止し、2系列40点の表示装置が何処に問題が起きたかを示す。また、システムは Ansul自動消火システムも含んでいる。

「更に我々の挑戦している1つは、粉塵と水滴をどう対処するかと言うことである。これらは、細長い亜鉛メッキ鉄板の接続部の腐食を起こさせ、会社にクランプを使用することを余儀なくさせた原因である。」とプロフィーは言っている。

粉塵に関しては、4.5m天盤にテープが設置された後は一ヶ月に一度は清掃すべきであ

ることが分かった。もし、テープがもっと低い位置に取り付けられるなら、清掃頻度はもっと少なくて良いであろう。また、圧縮空気のノズルが粉塵を吹き飛ばすためにトラックに備えられたレーザー装置の近くに置かれた。

11) 文献No.14 採鉱自動化に関するカナダの計画

(1)アブストラクト

この論文では、McGill大学及びEcole工科大学に設立が計画されている、カナダ採鉱自動化センターに関する最近の動向について述べる。また、カナダ鉱業協会(MCA)及び採鉱自動化に関する諮問委員会(国立)についても触れる。

(2)緒言……略

(3)国際共同研究……略

(4)カナダにおける展開

①採鉱自動化に関する国立諮問委員会

②採鉱自動化に関するシンポジウム—現在と将来

③CANMET—諮問ワークショップ

④国立研究カウンシル(NRC)

⑤CAT A(Canadian Advanced Technology Association)と
MAC(Mining Association of Canada)との共同研究

⑥米国の宇宙ステーションプロジェクトとカナダの参加

⑦MAC—採鉱の技術革新へのアプローチ

⑧McGill大学及びEcole工科大学における採鉱自動化・ロボット化センター

モントリオールにあるふたつの技術系大学に、上記のセンターの設立が計画されている。2つの大学の電気、機械及び鉱山学科に所属する専門家により、以下のような検討がおこなわれる。

a. 採鉱プロセスへの適用を指向した自動化の研究

b. 採査、採鉱、積み込み、輸送及び自動化の容易なプロセッシングについての新しい研究

c. 学際的なプロジェクトを進めることにより、採鉱、機械、電気及び制御技術学科間に
ある技術的なギャップの橋渡しをすること。

d. 安全、社会環境及び経済的な点をも考慮した、採鉱自動化へのトータルシステム的な
アプローチ

e. 学部及び修士レベルでの採鉱システム、制御についての授業を発展させ、包括的な自動化計画を立案し、実行することのできる専門的な技術者の養成

f. 装置、メンテナンス及び自動化システムを実際にうまく稼働している分野と、鉱業と
の共同研究

g. 採鉱自動化に関する会議やシンポジウムの開催

h. 採鉱自動化に関する研究情報の交換する場の確保

i. カナダと、採鉱自動化に関し国際的に活躍している他の組織との情報交換及び共同研究の遂行

(5)研究プロジェクト

採鉱に関する研究グループや技術コンサルタント、採鉱等に関連した企業のメンバーから寄せられた研究題目は、以下の通りである。

①遠隔操作によるモニタリング及び制御装置

a. Cross Hole Seismic 装置—鉱柱におけるアコースティクストレスの測定

b. 遠隔制御操作をするためのビジョンシステム(Vision System)

c. ヒズミセンサー

d. 爆破モニタリング装置

e. Stope Profiling System - Open and Vertical Retreat Stopes

f. 品位の検出

・地下のコンベヤー上の破碎鉱石の品位の検出

・高速データバスを経て中央コンピュータシステムに転送可能なレベルへの信号の調整

g. 混入金属の検出

・地下にあるコンベヤー上の混入金属の検出

h. ロボット化したベルトピッキング(Belt Picking)

・混入金属検出システムを備えたロボットのインターフェース

・可視検出システムを持ったロボットのインターフェース

・ロボット化したマニュピュレータの設計及び選択

i. I.H.I. 位置測定システム

・掘削を効果的に行うためのアライメントを備えたI.H.I. 位置決めするためのレーザー及びレーダーの使用

j. リアルタイムのドリル検査システム(Drill Surveying System)

②多機能地下通信システム

- a. 遠隔自動化システムへの信号を制御するための通信システム
- b. 種々の自動化システムに互換性をもたせるための、標準採鉱自動化に関する原案の採用

③自動化ハンドリングシステム

- a. 連続式の、自動化遠隔積込ハンドリングシステム
- b. 鉱層の薄い鉱山に適した、連続式の掘削・爆破・ボルト(Bolt)・積込システム
- c. 鉱車運行モニタリングシステム

④ソフトウェア

- a. 鉱山の管理及び経営に関するソフトウェア
- b. 種々の解析をするためのソフトウェア

(6)結論

北米にある鉱山は、生き残るためににはさらにそのコストを低減する努力が必要であろう。今世紀末までの生産性の改良は、自動化システムにより改良された措置をもちいることにより、達成されるであろう。

カナダは新しい時代の採鉱機械を発展させていく国々と、協力する準備をすすめている。自動化あるいはロボット化を採鉱の多方面に適用するのは、容易ではないが、これらを成功裡に達成するには、カナダにおいてもさらなる努力が必要であろう。

12) 文献No.15 地下ウラニウム鉱山における放射線レベル及び通気必要量の予測

(1)緒言

ウラン鉱石、その廃石や埋め戻し材から発生するラドンは、適切な通気によりワーキングレベルを維持することを要求する。ラドン及びその娘核種のソースレベルを定量化し、通気必要量を評価する方法が、Queen's 大学で開発された。

(2)鉱山におけるラドンガスの挙動

$$Co=Ra \quad E/P \quad (\text{pCi/cm}^3)$$

(1)

$$Js = -\beta_{measured} Lm$$

ここで、 Js: エマネーションの速さ

(1)

$\beta_{measured}$: emanating power

lm: 拡散長さの測定値

- (3)放射能特性のアセスメント
- (4)拡散長さの計算
- (5)鉱山における通気量に対する、結果の応用
- (6)ワーキングレベル濃度の計算
- (7)鉱山における必要空気量についての計算例
- (8)結論

この論文では、通気網を設計する際に用いられるファクターを定量化するための基礎を述べている。また、この論文で述べたことと同様の方法により、ワーキングレベル濃度の予測をする事ができる。

4.4 まとめ

I C R P '90年勧告に対処可能な、放射線防護の目的に則した、新しい採鉱法や、採鉱要素技術を探査すべく、海外のウラン鉱山会社へ質問状を送付したが、寄せられた回答は、低品位ウラン鉱床を採鉱している鉱山からのもので、現状でも被曝量が年間10mSv以下で、新勧告の規制値にも充分にクリアできるものである。期待していたカナダのアサバスカ地方の高品位ウラン鉱山からの回答は無かったが、中・低品位鉱床を採掘している同地方の西端に位置するCluff Lake鉱山からは、新しい採鉱法を検討しており、そのテストを行う計画である旨の回答があった。またオーストラリアのE R A社からは、将来 Jabilka鉱床を坑内掘で採掘する開発計画を持っているため、昨年末から本年1月末にかけて自動化採鉱技術の再検討を進めた旨の回答があった。しかし両鉱山の回答ではその内容については触れられていない。電話による問い合わせとしては、カナダで高品位鉱山を所有しているDenison社とCogema社から連絡があった。即ち Denison社は三井物産を通して「何の目的で調査しているのか」との問い合わせがあったのみで、その後連絡は無い。又Cogema社は、日本駐在事務所を通じ、当学会の内容についての問い合わせがあり、学会資料を送付した後、Cogema社のPR資料が届いた。更に1992年3月5日になり、ロンドンのウラン協会からFAX連絡があり、協会でもI C R P 新勧告の影響についての検討を進めているので、共同で研究する可能性もあると述べている。

以上のような経緯から、今後の検討課題としては、

①Cluff Lake鉱山の新しい採鉱法のテストと、E R A社の Jabilka鉱床開発のための自動化採鉱法の内容を知り、新技术の研究計画の方向づけに役立てるため、今後両社と連絡を取り、相互の意見交換を行っていく。

②ウラン協会とも接触を保ちながら、I C R P '90勧告に対する各国の対応策についての情報入手に努める。（例えば平成4年4月末に大阪でウラン協会の会議が開かれるので、これから得られる情報）などが挙げられる。

③国際的な放射線保安会議への出席

(1)平成4年5月25~28日間にカナダのSaskatoonで開催される「ウラン採鉱の放射線安全に関する国際会議」に関係者を派遣して、情報を集める。この会議では分科会で次のような項目について発表がなされるので、本委員会の研究目的に合致する情報が得られるものと期待される。

①線量測定、②環境問題、③疫学、④ICRP勧告の影響、⑤モデル作成とコンピューター利用、⑥規制手続、⑦通気とエンジニアリング。

(2)平成4年9月下旬にオーストラリア放射線防護協会が開催する2つの会議に関係者を派遣して情報を集める。

(i) 9月21~24日、DARWIN, 17th Annual Conference

(ii) 9月25日、JABIRU, International Workshop on the Health Effects of Inhaled Radionuclides: Implications for Radiation Protection in Mining

④カナダの高品位ウラン鉱山からの回答を引き出すためには、鉱山現地を調査することが有效であろう。

放射線防護を目的とした採鉱技術の開発については、現在具体的に計画している鉱山はないが、意見としては、採掘作業に自動化、リモコン化機械を用いることは被曝量の低減策として有効であろうと言う回答もあった。

以上述べたように、回答を寄せて来た各鉱山会社は、I C R P 新勧告に対し現状でも余裕のある低品位ウラン鉱床を稼行しており、技術開発も検討段階である。そのため、本委員会の研究課題として、直ぐに役立つ研究テーマが出て来た訳ではないが、従来から研究して来た自動化、リモコン化採鉱機械を用いた採鉱法の研究が有用であることは間違いないと考えられる。そこで、今後共この方向で研究計画を立案していくこととしたい。その場合今回調査した文献の中で、ウラン鉱床採掘の場合の基本的方針や、採鉱機械の自動化及び新しい採鉱技術の紹介などが有効であろう。又全体計画を立案する場合には、文献No.14が方法論として参考になるであろう。尚今後も文献調査を引き行うことは必要である。

5 採鉱エキスパートシステム構築の調査検討

5.1 はじめに

エキスパートシステムの開発が近年盛んに行われている。エキスパートシステムの目指すのは、専門家と同様な知識を持ち、専門家にとって替わられるようなシステム（計算機プログラム）と言えよう。現在もこれが最終目標であることには変わり無いが、ここ10年以上に亘るエキスパートシステムの開発状況を見ると、とても専門家にとって替わられるようなシステムが、すぐに実現できるとは思われない。しかしながら、目標とするレベルに達しないにしろ、エキスパートシステムはそれなりの役目を果たし得ることもわかってきた。まず、簡単なものであっても、初心者教育には相当に役立つことがわかってきた。実際に開発されたエキスパートシステムの内、かなりのものが教育用として使用されている。また、開発段階を通じて、知識の整理の進むことも、重要と思われる。専門家は、長年の経験に基づいて多くの知識を蓄積しているが、多くの場合、未整理のままで蓄積されており、そのことに本人も気づいていないことが多い。何等かの問題にぶつかると、比較的似たケースを撰び出し、その時の経験に基づいて対処していることが多い。同じ職場（鉱山）では、こうした方法で問題を解決できることが多いと思われるが、複数の専門家の知識・経験を取り入れ、知識を整理し一般化してこそ、その知識は後世まで伝わると思われるが、そのためには相当な努力を必要とする。

採鉱に関する技術の現状を見ると、個々の技術者は優秀であるが、その知識の整理は必ずしも進んでいない。個々の技術者の長年に亘る貴重な体験を基に、知識を整理し一般化し将来につなげようとの主旨で、採鉱法の選択に関するエキスパートシステムを当面の目標とし本研究は始められた。まず、最初に今までに発表されている採鉱法に関する文献を調査した。その結果を5.2に示す。

エキスパートシステムが比較的成功している分野は、殆ど例外なく知識の整理の進んだ学問分野と言えるが、採鉱法は複雑な自然条件を相手とするものだけに知識の整理は難しく、前に述べたように、経験を積んだ技術者の頭脳の中に種々の貴重な知識が未整理のまま詰め込まれている場合が多い。そこで、採鉱を専門としない一般の技術者が将来使用可能なエキスパートシステムの開発を目的とし、経験の深い採鉱技術者が何に注目し、どのように採鉱法を選択しているかを探りだすこととした。活発な議論の後、採鉱法の選択に当たって特に注目しなければならない点は下記であることに、意見が一致した。

- 1) 鉱床の形状
- 2) 鉱床の規模
- 3) 鉱石の品位
- 4) 鉱床の深さ
- 5) 岩盤の力学的性質

ついで、エキスパートシステムの利用者の答え易さに配慮しつつ、質問事項（細目）について検討した。例えば、鉱石の品位に対する質問は、次の3分類の内一つを選べと言うことにした。

- 1) トン当たり1万円未満
- 2) トン当たり1万円から3万円未満
- 3) トン当たり3万円以上

鉱石の品位（価値）の評価の仕方は種々あるが、一般の技術者に答えやすく、それでいて最低限必要な情報が得られるよう留意したつもりである。

1年間にわたる議論の結果は表の形でまとめた他、計算機プログラムの形でもまとめておいた。ただし、研究の半ばであるので、計算機プログラムは極く簡単なものとした。

5.2 採鉱法について

有望な鉱床が発見され、その規模や輪郭などが大まかに把握されると、この鉱床に適した採鉱法を選択するという重要な段階が始まる。しかし、この段階では、鉱床の調査が地表の地質踏査や坑外ボーリングなどに限られ、いまだ十分な情報が集積されていない場合が多いので、採鉱法の選択は予備的なものとして位置付けられ、企業化調査と開発プロジェクトの基本設計のための基礎資料を提供することを目的として行われる。鉱床の経済性が評価されて、開発工事がスタートし、探鉱坑道の開さくなどにより、鉱床に関するより詳細な情報が得られるようになると、さきの予備的な採鉱法・採鉱システムに対する修正が行われる。また、ひとたび生産が始まると、鉱山の活動は20~30年以上は続くものであるから、その間の技術革新や経済環境の変動によって、採用された採鉱法・採鉱システムの改変をせまれる場合も起こり得る。

採鉱法を選択する基本的な目的は、与えられた条件の下で、最も適切な採鉱システムを設計することにある。このことは、採鉱によって最大の利益を得ることを意味するが、技術的な要因のみならず非技術的な要因も考慮して、選択がなされる。選択に影響を及ぼす因子としては、例えば、自然条件・地質条件、生産性、採掘実収率、作業環境の安全性、周辺環境への影響などであり、これら、自然的要因・経済的要因・環境的要因を勘案して採鉱法が選択される。

以下、本節では、現在行われている露天採鉱法と坑内採鉱法を解説し、次節で展開される採鉱法の選択手順あるいは選択規準についての議論・検討への橋渡しとなることを目的とする。

5.2.1 露天採鉱法

地下に賦存する鉱床を採掘する際には、

{ 露天採鉱法 (Surface Mining)
 坑内採鉱法 (Underground Mining)

のいずれかが選択される。そして、

- 1) 露天掘採掘が有利な場合
 - 2) 地表近くは露天掘採掘、地下深部は坑内掘採掘が有利となる場合
 - 3) 坑内掘採掘が有利な場合
- のいずれかである。

砂金・砂鉄などは人類にとって歴史的に重要な鉱物資源であるが、これらは砂鉱床と呼

ばれる鉱床に産する。砂鉱床は、砂金・砂鉄の他にも、ダイヤモンド・錫・チタン・プラチナなどの鉱床として、現在でも重要な地位を占めている。砂鉱床の特質をいかした採鉱法、すなわち、含まれる有用鉱物の比重が重く、これらが掘さくし易い砂礫層中に存在して、しかも砂礫と容易に分離するという特性を利用した“砂鉱床採鉱法 (Placer Mining あるいは Alluvial Mining)”は露天採鉱法の一つである。また、ボアホールから岩塩や硫黄の鉱床に水や熱水を注入して溶かし、ボアホールから回収する“ボアホール・マイニング法 (Borehole Mining)”や二次回収法として有効な“リーチング法 (Leaching)”など、水あるいは生物・化学溶液の物理化学的作用により有用鉱物を溶出させる採鉱法である“ソルーション・マイニング法 (Solution Mining)”¹⁾についても考えない。これらの採掘法は、対象とする鉱床の特性に強く依存するので、代替え手法が殆ど存在しないこと、いまだこれらの採鉱法の実用化・適用範囲が限定されていることなどが、“採鉱法選択のエキスパートシステム”に取り上げない主な理由である。

したがって、ここで露天採鉱法と言った場合には、鉱床とその母岩・表土を穿孔発破工法、または機械掘さく工法により掘さくする“オープンピット・マイニング法 (Open Pit Mining)”あるいは“オープンカット法 (Open Cut)”、“オープンカスト・マイニング法 (Open Cast Mining)”を指すものとする。建築用石材(Dimension Stone)もカッタ・チェーンソー・模を使って切り出されるが、石炭・金属鉱物などの露天採鉱法とは様相が大いに異なるので、これについてもここでは取り上げない。

1) オープンピット・マイニング法 (Open Pit Mining) —— 鉱床が地表に露出しているか、あるいは地表近くのごく浅い位置に存在する場合には、表土や鉱床上部の被覆岩盤を除去して(剥土:Stripping)、地表から採掘が行われる。オープンピット・マイニング法はFig. 5.1aに示すように、鉱体とその周辺岩盤を一つあるいは複数の水平なスライスに分割し、地表から鉱体深部に向かって採掘を進める。その結果、鉱床はベンチ(Bench)と称する階段を持った階級状に採掘される。大規模な金属鉱床にオープンピット・マイニン

¹⁾ 地下の鉱体に人間が出入りしないという観点から見れば、ソルーション・マイニング法に属するボアホール・マイニング法やリーチング法は露天採鉱法の一つと見なすことができる。しかし無人化した坑内採鉱法と見なす意見も強い。ソルーション・マイニング法はその意義が見直され将来の発展が期待される採鉱法であるので、露天採鉱法・坑内採鉱法のいずれにも属さない“新採鉱法 (Novel Mining)”の一つとするのが妥当であろう。

²⁾ 建築用石材は破碎するとその商品価値が失われるが、同じ石材でも碎石として使用される場合や石灰石がセメント・製鉄原料として採掘される場合には、石炭や金属鉱物の露天採掘に類似した採掘法が取られる。

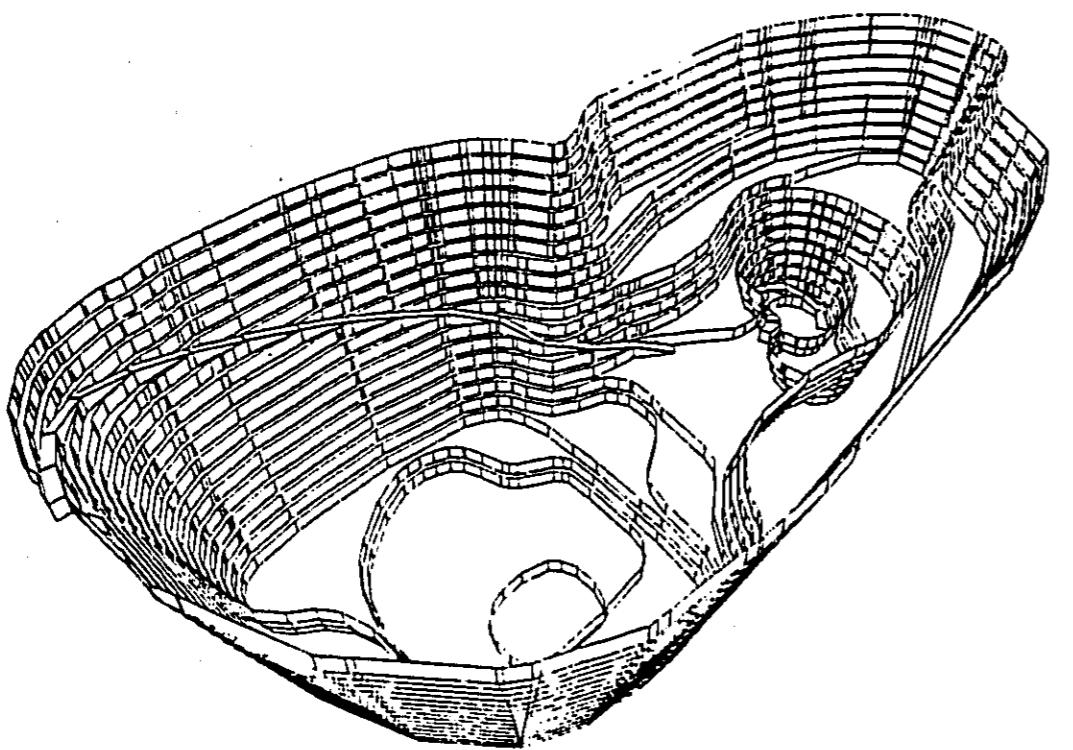


Fig. 5.1a 露天掘金属鉱山のオープンピット¹⁾

グ法が適用されたときには、Fig. 5.1aに描かれるような、数多くのベンチを持った巨大な窪地（オープンピット：Open Pit）が生まれる。ピットの斜面が安定であるためには、ピットの深部ほどベンチの曲率半径は小さくなるので、ピットは倒立円錐あるいは逆ピラミッド（Inverted Cone/Pyramid）状の外観を呈する。アメリカ合衆国西部の露天掘炭坑に見られるように、鉱床が浅く、被り（Overburden）が薄い場合（15～45m）には、一段のベンチ（Single Bench）で採掘が間に合う場合もある。また、日本の石灰石鉱山に見られるように、鉱体が山塊中に賦存する場合には山頂ないしは山腹から採掘が始まり、階段状のベンチを作つて上部から下部に向かって採掘が進んでも、ピットを形成しない。オープンピット・マイニング法と掘さく方式は同じであつてもピットを作らないので、“オープンカット法”あるいは“階段採鉱法（Bench-Cut Mining）”と呼ぶ。

オープンピット・マイニング法は大規模な低品位鉱床を低成本・高能率に採掘する手法として最も優れているが、わが国の金属鉱床には、オープンピット・マイニング法に適するような大規模鉱床が存在しないため、オープンピット・マイニング法を採用している鉱山は殆ど無いが、石灰石や碎石などの非金属鉱山では大多数の鉱山が階段採鉱法を採用している。

露天採掘を計画する際には、鉱床を多数のブロックに分割して、個々のブロックが持つ経済価値（ブロックに含まれる有用鉱物の品位と価格、掘さくと運搬などに要する採掘コスト、選鉱・精錬に要するコストと実収率などによって決まる）を求める必要がある。鉱床内のあるブロックを採掘するためには、力学的な安定性により支配される頂角を持ち、このブロックを頂点とする倒立円錐あるいは逆ピラミッド内に含まれるブロックは全て採掘される必要がある。そこで、ベンチを構成する岩盤（特に、採掘終了後に残る岩盤斜面＝残壁あるいは最終残壁）の斜面傾斜と鉱区境界・地形等を制約条件として、鉱体の賦存状況・品位分布、鉱石の持つ経済価値、鉱石の採掘コスト・選鉱コスト、表土・ズリの剥土コスト等を考慮して、採掘範囲＝最終ピットの形状（Pit Limit）が設計される。最も経済的かつ多くの鉱石を採掘できる最適ピットを求めるのが、ピット設計の目的であるが、通常、この作業は“ムービング・コーン法（Moving Cone Technique）”や“ダイナミック・プログラミング法（Dynamic Programming）”に基づいたコンピュータプログラムを駆使して行われる²⁾。しかし、最終ピットの設計には、前述のブロックの持つ経済価値や最終残壁の安定性など以外に、生産品の市況価格とその見通し、操業コストの見積り、気候や天候条件（特に降水量・降雪量）、熟練労働者確保の可能性など様々な要因が影響する。実際には、試行錯誤と感度分析を繰り返し行なつて、精緻化を徐々に進め、過去の経験も加味して、最適案を目指す。起業計画が立てられると、

- 1) 採掘に先だって、鉱床上部の地表の開墾、樹木の伐採、地下水の汲み上げなどが行われる。続いて、
- 2) 地表設備・インフラストラクチャの建設が行われるが、中でも、採掘場の近辺に廃石の処理場＝ズリ捨て場（Waste Dump）と採鉱終了後の復土作業（Reclamation）に備えた表土堆積場（Topsoil Stockpile）を確保することが重要である。
- 3) 大規模なオープンピット露天掘鉱山では、高度に機械化された採鉱システムを取り入れ、大量の鉱石とズリ・表土の掘さく・運搬を行なうので、ピット内の運搬道路のレイアウトも重要である。

鉱山のライフ、生産規模・剥土量、鉱床の賦存条件、投下資本の大小、気象条件、作業ベンチの高さ・幅、運搬道路の長さ・傾斜、ピット底の広さなど様々な操業条件を考慮して機械類の選定を行う。大規模露天掘鉱山で使用される機械類はいずれも大型かつ高価である。しかも、機械がその性能を十分に発揮して効果的に稼働するためには、導入後のメンテナンスのみならず操業条件にも支配されるので、機械類の選定は鉱山の経済性に決定的な影響を及ぼす可能性がある。

- 4) 十分な切羽長を確保し円滑な操業を保証するために、剥土をある程度、先行して行なう必要がある(Advanced Stripping)。また、鉱石を採掘する前に除去されるべきズリを掘さくする負担は、深部ほど大きくなるので、投下資本の回収が遅れることになるが、浅部のズリ採掘を先行させる¹⁾。
- 5) 鉱石の採掘が開始された後も、短期的・長期的な採鉱計画の下で、鉱石の採掘とズリの除去作業を調和して進める必要がある。特に、鉱石の持つ経済価値が低い場合には、高い採鉱能率を維持しながら、両者の調和を計ることが重要である。
- 6) 表土や鉱体内にあるズリの掘さく作業は、表土・ズリの特性により異なる。これらが土砂や未固結の岩石である場合には、破碎の必要がなく、ブルドーザ(Dozer)・スクレーパ(Scraper)、あるいは、ドラッグライン(Dragline)・バケットホイールエクスカベータ(Bucket Wheel Excavator)などの大型掘さく機により直接除去される。固結した岩石の場合には、発破あるいはリッピングにより破碎した後、パワーショベル(Power Shovel)・フロントエンドローダ(Front-End Loader)によって積み込み、コンベヤーやトラックに移し替え、表土堆積場またはズリ捨て場まで搬出する。日本の石灰石露天掘鉱山では、運搬距離によって、(1)ショベル・ダンプトラック方式——パワーショベルあるいはホイールローダ・クローラローダによる積込とダンプトラックによる運搬を組み合わせた方式、(2)ロードアンドキャリー方式——ホイールローダにより積込み、その機動性を活用してそのまま鉱石立坑またはダンプ場まで運搬する方式(40~100m)、(3)ブルドーザ方式——運搬距離が極めて短くブルドーザにより立坑またはホッパーに直接押し込む方式(30~40m)がとられる¹⁾。
- 7) 鉱石の掘さく・搬出作業もズリの場合と似通っており、両者の特性が類似している場合には、共通の掘さく法・搬出法、機械類が使用されることが多い。
- 鉱石やズリが強固な場合には、ベンチ発破(Bench Blasting)によりこれらは破碎される。発破孔の穿孔には、打撃式堅岩機をワゴンやクローラに搭載したワゴンドリル・クローラドリルが、大型切羽では、ロータリードリルやダウン・ザ・ホールドリルが使われる。爆薬としてはANFO爆薬が一般に用いられるが、これは、ANFO爆薬が他の爆薬に比して安価で安全であることの他に、バラ状であるためベンチ発破の下向き孔への流し込み装填が容易なためである。
- 8) Fig. 5.1bに描かれるような主要な採掘作業：穿孔(Drilling)→装薬(Charging)→発破(Blasting)→積込(Mucking)→運搬(Transport)が展開される（場合によって

は小割発破:Boulder Blastingも行われる）。機械類の寸法・作業半径と飛び石の飛翔距離を考慮してベンチ幅が決定され、掘さく機の腕の長さによってベンチ高さは制限される。

- 9) ベンチ上で行われる作業は互いに密接に関連しているので、生産規模に適合したバランス/調和のとれたものとならなければならない。中でも、穿孔・発破作業、特に、発破した鉱石・ズリの粒度、破碎粒度(Fragmentation)は後続の積込・運搬・破碎(Crushing)作業に影響する。破碎粒度が粗い場合には、後続作業の効率

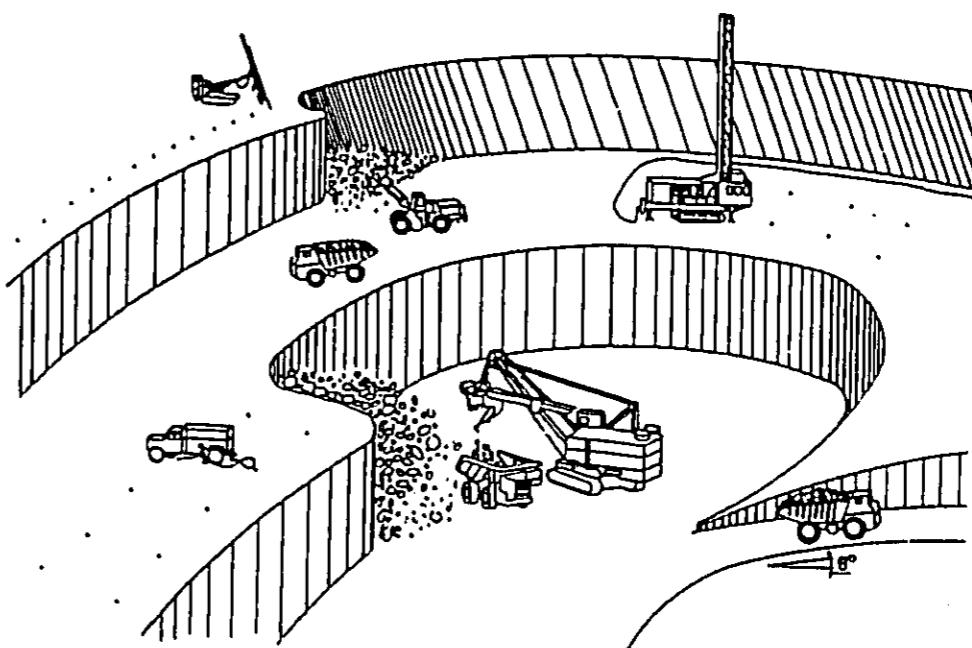


Fig. 5.1b 階段採掘法切羽における採掘作業¹⁾

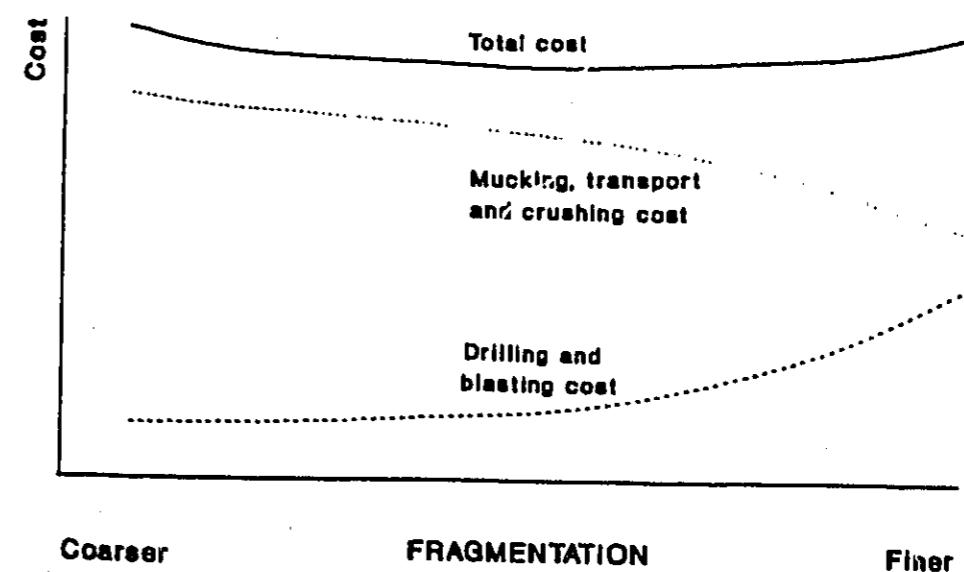


Fig. 5.1c 穿孔・発破コストとその後続作業のコストに及ぼす破碎粒度の影響¹⁾

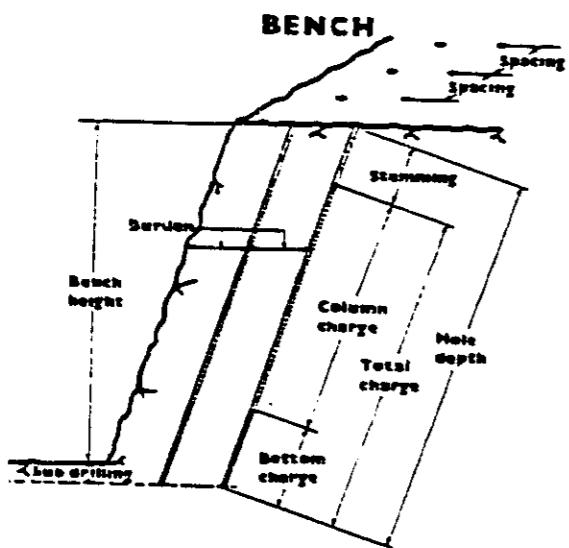


Fig. 5.1d ベンチ発破の諸元¹⁾

が低下し、コストがかさむが、穿孔・発破作業のコストと作業量は少なくてすむ。逆のことが、破碎粒度が細かいときに言えるので、採鉱作業全体の最適化を目指した発破設計が必要である(Fig. 5.1c)。

Fig. 5.1dにベンチ発破の諸元を示すが、岩質・節理や弱面の存在などを考慮して、穿孔径、最小抵抗線長:Burden、孔間隔:Blasthole Spacing、穿孔長(ベンチ高さ、孔の傾斜、サブドリリング長:Sub-Drilling)、込め物(Stemming)長、装薬量が決定され、発破設計がなされる。

10) 作業切羽の斜面が最終残壁となる場合には、プレスプリッティング(Presprutting)あるいはスムースプラスティング(Smooth Blasting)、クッションプラスティング(Cushion Blasting)などと呼ばれる制御発破(Controlled BlastingあるいはContour Blasting¹⁾)を行って、壁面を平滑に仕上げ、残壁となる岩盤を傷めないようにする。

2) オープンカスト・マイニング法 (Open Cast Mining) —— 主として、石炭の露天採鉱に使用される採鉱法であり、ストリップ・マイニング法(Strip Mining)と呼ばれていたこともある。オープンピット・マイニング法に類似しているが、次の一点だけが異なる。Fig. 5.1eに示されるように、稼行炭層上部の掘さくされた表土やズリは、採掘パネルから離れた表土堆積場やズリ捨て場に送られるのではなく、長い腕を持った掘さく機(Boom-type Excavator …… ドラッグライン・パワーショベルなど)によって掘さくし、長い腕を旋回させ、採掘の終わった隣接するパネルに掘さくした表土やズリを投入(Casting)する。鉱床が固結した岩石に覆われている場合には、発破あるいはリッピングによりこれを破碎した後、ブームタイプ掘さく機に積み込むが、表土や未固結岩石の場合には、ブームタイプ掘さく機の掘さく能力を活かして直接、掘さくする場合もある。いずれの場合も、剥土を担当するブームタイプ掘さく機が表土・ズリの積込み・搬出と積み卸し作業を行う。コンベヤーによる運搬や表土とズリに分けて掘さく・運搬する場合もあるが、採掘パネルに隣接した採掘跡のパネルに表土とズリを投入する所に最大の特長がある。

オープンカスト・マイニング法はオープンピット・マイニング法と同様、大規模な露天採鉱法であるが、アメリカ合衆国では、露天採掘の石炭の50%以上がオープンカスト・マイニング法により採掘されている。オープンカスト・マイニング法の利点としては、

- 1) ブームタイプの掘さく機により表土・ズリの掘さく→積込み→搬出→積卸しを一貫作業で行なうことができる。
- 2) 採掘の終わったパネルに表土やズリを堆積させるので、先行剥土の作業量が少なくてすむ。また、採掘中のパネルに採掘作業は限られるので、復土作業を採掘作業に引き続いて行なうことができる。
- 3) 採掘パネルは比較的短い期間しか開けられていないので、掘さく面(Highwall)の傾斜を急傾斜(60°～75°)にとることができる。一方、採掘跡パネルに積み上げられる表土・ズリのバンク(Soil Bank)も一時的なものであり、その傾斜はこれらの安息角(35°～50°)に保たれる。

などが上げられるが、剥土を担当する掘さく機の性能と稼働率によってオープンカスト・マイニング法の生産性が支配される。表土・ズリと鉱石の掘さく作業はオープンピット・マイニング法と類似しているが、唯一の差異は、破碎したズリの掘さくと搬出にブームタイプの掘さく機が使用される点である。

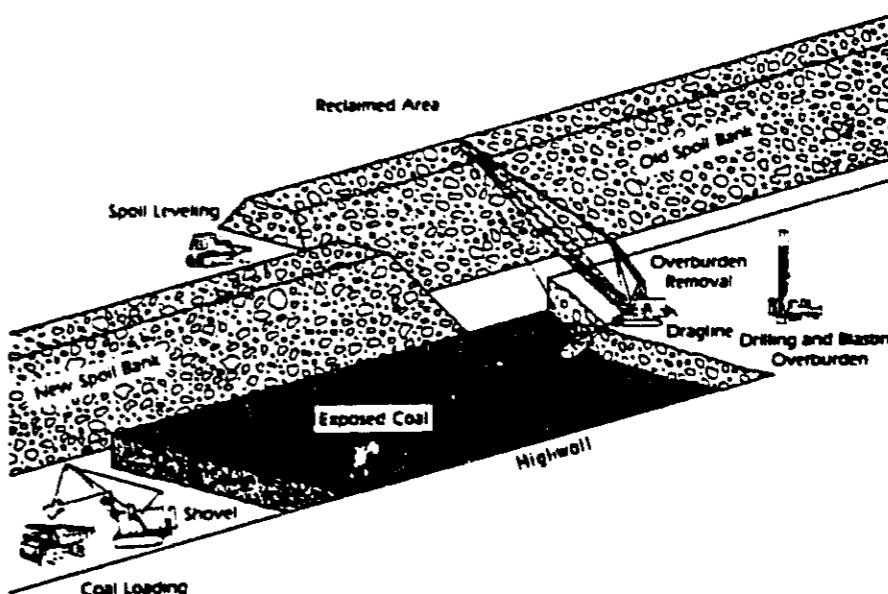


Fig. 5.1e オープンカスト・マイニング法による露天掘炭坑¹⁾

5.2.2 露天採鉱法と坑内採鉱法の比較

露天掘採掘と坑内掘採掘を比較すると、露天掘採掘は坑内掘採掘に比べ、以下の点について「有利」にある¹⁾。

- 1) 生産性 …… 坑内掘鉱山の方が作業スペース・搬入出路・通気条件の制約などが厳しいので、大型の機械類の導入が難しい。また、生産量の大きな鉱山ほど大型の鉱山機械が活躍し易いが、Table 5.1aに示したように、露天掘鉱山に大規模な鉱山が多くみられるので、露天掘鉱山の生産性が平均的に見ても高くなる。しかし、1970年代に入ってから、規模の大きな坑内掘鉱山の採鉱機械類に格段の進歩が見られるようになり、最近の坑内掘鉱山の生産性の改善もまた著しい。
- 2) コスト …… 高い生産性により露天掘鉱山の採掘コストは低廉である。露天掘採鉱機械は一般の土木工事にも使用されるので、その市場が坑内掘採鉱機械に比べて大きい。しかも、生産量の大きな露天掘鉱山が多く存在するので露天掘鉱山での需要も大きい。これらによって、露天掘採鉱機械の価格は安く、トータルコストの低減にも貢献している。一方、坑内掘採鉱機械は、一部トンネル工事などに使われるものの、坑内作業空間の制約等によりその用途は特殊であり、需要が限定され、露天掘採鉱機械に比べ生産性の割に高価である。また、露天掘鉱山に比べ、鉱石の搬出・排水・通気などに要するエネルギー消費が多く、全体的にコスト高となっている。
- 3) 作業環境 …… 露天掘鉱山の場合、その作業環境は気候・天候に左右されることもあるが、一般に、坑内掘鉱山の作業環境よりも明らかに良好であり、通気や廃・排ガスの問題がなく、心理的な作業環境も良い。また、時間当たりの事故発生数、出鉱量当たりの事故発生数とも少ない。
- 4) 採掘実収率 …… 露天掘鉱山では、通常、最終ピット内の90～95%の鉱石を採取可能である。坑内掘鉱山では、採鉱法にもよるが、一般に、鉱区内の採掘実収率は露天掘鉱山に比べて劣る。坑内採鉱法では、鉱石の掘り残し:Ore Lossが多く、15～20%のロスを覚悟しなければならない。さらに、露天掘採掘が低コストであることは、そのカットオフ品位の低下と可採鉱量の増加をもたらすので、実質的な採掘実収率の向上にも結びついている。
- 5) 柔軟性 …… 鉱山を取り巻く経済環境・市況が好ましくない場合には、生産量を抑え、ある場合には景気の回復まで一時的に休山するなど、露天掘鉱山では、柔軟な対策が取れる。これに対して、坑内掘鉱山では、通気・湧水対策だけをとっても休山は難しく、出鉱量・出鉱品位の調整などによって、困難な経済環境を乗り切るしか道は残されていない。

露天掘鉱山はこのように、坑内掘鉱山に比して優位な点を持ち、特に、大規模な露天掘

Table 5.1a 非社会主義圏における露天掘鉱山と坑内掘鉱山の鉱山数
(Mining Magazine¹³より)

石炭鉱山(褐炭鉱山も含む)

Year	1984			1989				
	O/P	Comb.	U/G	Total	O/P	Comb.	U/G	Total
Class								
Large	84	22	30	136	89	11	39	139
	(62%)	(16%)	(22%)	(100%)	(64%)	(6%)	(28%)	(100%)
Medium	89	58	179	326	104	24	244	372
	(27%)	(18%)	(55%)	(100%)	(28%)	(6%)	(66%)	(100%)
Small	232	62	493	787	199	35	455	689
	(29%)	(8%)	(63%)	(100%)	(29%)	(5%)	(66%)	(100%)

大規模鉱山は年間生産量が300万トン以上のものを指し、中規模鉱山は年間生産量が100～300万トン、小規模鉱山は年間生産量が100～20万トンのものを指す。また、O/Pは露天掘鉱山、U/Gは坑内掘鉱山であり、Comb.とあるものは露天掘と坑内掘を併用した鉱山である。

非石炭鉱山(金属鉱山および非金属鉱山)

Year	1969		1974		1979		1984		1989	
	O/P	U/G								
Class										
Large	128	31	144	36	161	58	196	68	183	61
	(81%)	(19%)	(80%)	(20%)	(74%)	(26%)	(74%)	(26%)	(75%)	(25%)
Medium	184	270	214	274	207	272	211	277	261	228
	(41%)	(59%)	(44%)	(56%)	(43%)	(57%)	(43%)	(57%)	(53%)	(47%)
Small	138	289	110	273	120	282	142	326	174	342
	(32%)	(68%)	(29%)	(71%)	(30%)	(70%)	(30%)	(70%)	(34%)	(66%)

大規模鉱山は年間生産量が300万トン以上のものを指し、中規模鉱山は年間生産量が50～300万トン、小規模鉱山は年間生産量が50～15万トンのものを指す。また、O/Pは露天掘鉱山、U/Gは坑内掘鉱山である。この中には、資源として重要な砂鉄床採鉱法によるものは含まれていない。

鉱山であるほど、低成本・高能率であって、坑内掘鉱山に対する優位性が際立っている。

Table 5.1aに示されるように、世界的に見ても、露天掘鉱山に大規模鉱山が数多く含まれ

る。一方、坑内掘鉱山には、適用し得る鉱床の賦存条件等の制約により、中小鉱山の占める割合が高い。

Table 5.1aに含まれない小規模／極小規模鉱山も数多く存在し、これらの存在を無視することはできない。特に、中南米、アフリカ、東南アジアの開発途上国に多くみられ、自国の鉱業に占める位置が高い。事実、世界銀行の調査¹⁾によると年産10万トン以下の鉱山が占めるシェアはTable 5.1bに示される通りである。特に非金属鉱物資源と貴石類では、小規模／極小規模鉱山の占める割合が高いが、金属鉱物でも、ペリリウム・水銀・タンゲステン・クローム・アンチモニについては小規模／極小規模鉱山の生産額が大きい。小規模／極小規模鉱山にはスケール・デメリットが存在するので、当たりの採掘コストは大規模鉱山に比べて割高である。したがって、品位の高い鉱床や消費地に近いなどの立地条件を持たないと大規模鉱山に太刀打ちすることが難しい。しかし、ある程度の技術力に恵まれていれば、機械化が困難で労働集約的であっても、小規模／極小規模鉱山の開発・投資コストは安く出鉱までの準備期間も比較的短かくてすむので、特に、労務費の低い開発途上国では、経済的メリットが存在する。したがって、その経済発展にとって小規模／極小規模鉱山は重要な存在であると言える。

露天掘鉱山は坑内掘鉱山に比して数多くの優位性を持つが、露天掘鉱山にも問題点があり、その最大のものは、坑内掘鉱山に比べて周辺環境への影響が大きいことである。中でも、ズリ捨て場の確保と採鉱終了後の復土作業の負担である。特に、国立公園内などでは、露天採鉱が認められない国や州が多い。

Table 5.1b 年産10万トン以下の鉱山が占めるシェア

鉱 産 品	生 産 高 Mine Production	推 定 価 値 Estimated Value
金 属 鉱 物 (Metals)	12%	11%
非 金 属 鉱 物 (Industrial Minerals)	31%	23%
石 炭 (Coal)	20%	20%
宝 石 類		
ダイヤモンド (Diamonds)	10%	10%
貴 石 類 (Gemstones)	75%	75%

露天掘鉱山の持つ経済的なメリットは、採掘が進行してピットが深くなるにしたがって変化し、次第に失われる。この理由としては、採掘の深部化にともなう排水・運搬経費等の増加が坑内掘鉱山に比べて大きいこともあるが、鉱石としての価値を持たないズリや剥土を要する表土の量が急激に増加するためである²⁾。坑内掘鉱山でも、採掘の深部化によって、採掘経費や開坑経費の増加が発生するが、採掘コストは大きく変化しないのが普通である。鉱床の特性、鉱石の品位分布や経済的な価値、立地条件など様々な要因が露天採鉱法の経済性に影響を持つので、その経済性を評価し、坑内採鉱法と比較することは単純な作業ではない。ここでは、設計・計画段階に取り入れられる基本的な考え方のみを紹介する。そして、Fig. 5.2に示すような鉱床の形が単純であり、均一な品位分布を持つような場合についてのみ考える。

露天掘採鉱か坑内掘採鉱かの選択は、両者の持つ経済的な有利さによって決まり、露天採鉱法の経済的な優位性を支配する最大の因子は、“剥 土 比 (Stripping Ratio または Waste-Ore Ratio)”であると言っても過言ではない。剥土比は、次式によって定義される。

$$\text{剥 土 比} = \frac{\text{ズ リ (Waste) の 量}}{\text{鉱 石 (ore) の 量}}$$

剥土比は、(ton/ton)、(m³/m³)、(m³/ton)によって表され、単位重量あるいは単位体積の

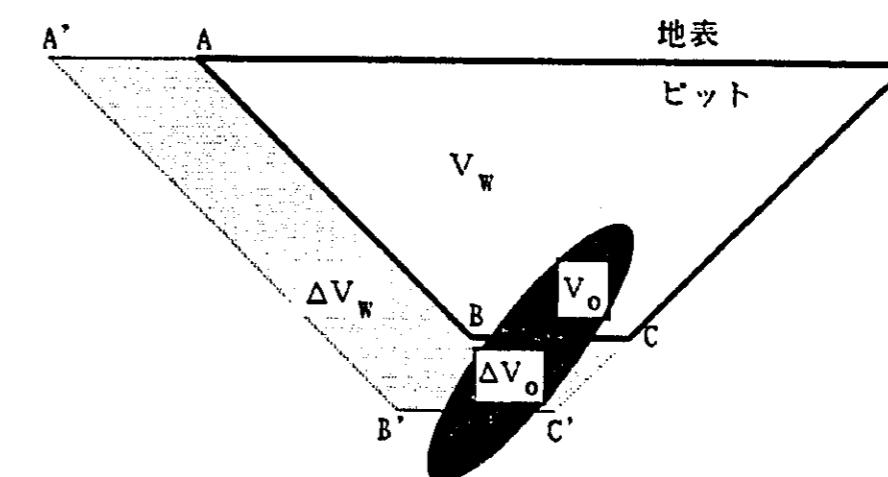


Fig. 5.2 2次元的な形状を持つ仮想的な鉱床とピット

¹⁾ 採掘が進行してピットが深くなるにしたがって一般に剥土量が増加するので、露天掘鉱山では操業を円滑に進める（作業スペースと切羽長を確保する）ためにも、開発初期に剥土作業を精力的に行うのが普通である。それ故、実際の露天掘鉱山では、初期に剥土作業の負担を重くして（ピット傾斜は最終ピットの傾斜よりも緩やかである）、深部採掘時に剥土作業の負担を減らすために、ピットの傾斜を急にして最終ピットの傾斜に近づける。実際操業の剥土比はピットの深部移行とともに単純に増加するものではない。しかし、いつコストが支払われるかは別にして、深部にあるブロックほどその経済価値から差し引かれるコストが増加してブロックの経済価値が減り、実際の操業では先行剥土に含まれる剥土も含めて、深部に移行するほど剥土量が増加するものと見なす。

鉱石を採取するために採掘しなければならないズリ・表土の重量あるいは体積を指す。一般に鉱床の形は三次元的であるから、ピットの形も三次元的である。しかし、剥土比を三次元で図示しようとすると図が複雑となるので、二次元的な鉱床とピットを仮定して、剥土比を説明し、設計・計画に際しての剥土比と露天採鉱法の経済性の関係について考える。

Fig. 5.2は、二次元的な鉱床とピットであり紙面に垂直な方向に無限の長さを持ち、どこをとっても断面形状に変化はないものとする。その内の単位の厚さを持つ断面について考える。図の比較的黒く塗りつぶした部分 (V_o や ΔV_o によって表示) が採掘の対象となる鉱石の部分であり、下向きの台形によって囲った部分: □ABCDがピットである。その中の鉱石を除いた部分がズリまたは表土を表し、 V_w や ΔV_w によって表示されている。

Fig. 5.2の仮想的な露天掘鉱山において、 \overline{BC} まで採掘が進んだとすると、このときまでに採掘された鉱石の量は V_o によって与えられ、ズリの量は V_w によって与えられるが、

V_w/V_o で表される剥土比を "Overall Stripping Ratio"

—— “全剥土比”または“平均剥土比”

と呼ぶことにする。採掘が1ベンチ分行われて、 $\overline{B'C'}$ まで進んだとする。この間に採取される鉱石の量は ΔV_o であり、ズリの量は ΔV_w によって与えられる。

$\Delta V_w/\Delta V_o$ で表される剥土比を "Incremental Stripping Ratio"

—— “増分剥土比”

と呼ぶこととする。

ここで、

平均剥土比を …… O.S.R.

増分剥土比を …… I.S.R.

1トンの鉱石から得られる収入を …… R_o

1トンの鉱石を採掘するのに要するコストを …… C_{OP}

同じ鉱石を坑内採鉱により採掘するのに要するコストを …… C_{UG}

1トンのズリを採掘するのに要するコストを …… C_w

とおいて、露天掘鉱山と坑内掘鉱山の収益性について検討する。

露天掘鉱山の収益: P_{OP} は

【露天掘鉱山の収益】 = 【鉱石から得られる収入】 - 【採掘コスト】

により与えられるので、

$$P_{OP} = R_o \times V_o - (C_{OP} \times V_o + C_w \times V_w) \quad (5.1)$$

と表される。

さきに定義した平均剥土比(O.S.R.)を用いると、

$$P_{OP} = V_o \left\{ \left[R_o - C_{OP} \right] - C_w \times (O.S.R.) \right\} \quad (5.2)$$

となる。 $P_{OP} \geq 0$ でなければならないから、平均剥土比(O.S.R.)は、

$$O.S.R. \leq \left[R_o - C_{OP} \right] / C_w \quad (5.3)$$

でなければならない。

上式が満足されているものとして、1ベンチ分ピットを深くしたときに得られる収益の増加分を ΔP_{OP} とおくと、 ΔP_{OP} は

$$\Delta P_{OP} = R_o \times \Delta V_o - (C_{OP} \times \Delta V_o + C_w \times \Delta V_w)$$

あるいは

$$\Delta P_{OP} = \Delta V_o \left\{ \left[R_o - C_{OP} \right] - C_w \times (I.S.R.) \right\} \quad (5.4)$$

によって与えられる。ピット深度の増加とともに、剥土比が増加して1ベンチ分の収益が減少し、 ΔP_{OP} がプラスからマイナスに符号を変える。丁度、 ΔP_{OP} がゼロとなったときに、露天採鉱の収益が最大となる。Eq. 5.4の増分剥土比を使って書き換えることにより、露天採鉱から得られる収益が最大となるときの増分剥土比: “E.L.S.R. (Economic Limit Stripping Ratio)” が求まる。

$$E.L.S.R. = \left[R_o - C_{OP} \right] / C_w \quad (5.5)$$

E.L.S.R. は、“限界剥土比 (Cut-off Stripping Ratio)”とも呼ばれ、この中に資金の時間的な価値は考慮されていないが、露天採鉱の収益が最大となるときの増分剥土比を与える。したがって、増分剥土比がE.L.S.R. となった直後に、露天採鉱の収益が悪化し始めるので、操業をこの時点で中止することが経済原則にかなう。ここでは、ピットの深度増加にともなう、排水費や運搬経費の増加を考えていないので、実際には、Eq. 5.5で与えられるものよりも、E.L.S.R. は小さくなると予想される。

E.L.S.R. 以下の剥土比であって、露天採鉱の収益がまだ最大値を迎えていないとしても、ある深度以上になると、同じ鉱体を坑内採鉱で採掘した方が有利となる場合がある。そこ

で、次に、露天採鉱と坑内採鉱の収益が等しくなる分岐点を与える剥土比：“B.E.S.R. (Break-Even Stripping Ratio)^{13) 14)}”を求める。1ベンチ分の探掘を露天採鉱によって行った場合に得られる収益： ΔP_{OP} は、Eq. 5.4によって与えられている。一方、同じベンチの中にある鉱石を坑内採鉱によって探掘したとすると坑内採鉱による収益の増加： ΔP_{UG} は

$$\Delta P_{UG} = [R_o - C_{UG}] \times \Delta V_o \quad (5.6)$$

によって与えられる。 $\Delta P_{UG} \geq \Delta P_{OP}$ となれば、この深度以下では露天採鉱よりも坑内採鉱の方が収益性がよくなるので、露天採鉱をやめて坑内採鉱に切り替えた方が有利となる。

$\Delta P_{UG} = \Delta P_{OP}$ が成立するときの増分剥土比を、B.E.S.R.と定義すると、B.E.S.R.はEq. 5.4 およびEq. 5.6より、

$$B.E.S.R. = \left[C_{UG} - C_{OP} \right] / C_v \quad (5.7)$$

によって表される。したがって、増分剥土比がB.E.S.R.以上となる場合には、その深度以下では、露天採鉱を坑内採鉱に切り替えることが検討されるべきである。しかし、Eq. 5.7には露天採鉱を坑内採鉱に切り替えるためのコストとその時間的な価値が考慮されていないので、与えられた条件にもよるが、切り替え工事に関わるコストが過大となって、坑内採鉱法への切り替えを断念せざるを得ない場合も起こり得る。

露天採鉱法は坑内採鉱法に比べて、経済的に有利な場合が多く、大規模な低品位鉱床の採掘に特に優れており、採算性のよい大規模鉱山の多くが露天掘鉱山である。しかし、環境的な制約に加えて、採掘の深度が深くなると、露天採鉱よりも坑内採鉱の方が経済的にも有利となる場合があることを示した。そして、露天採鉱と坑内採鉱の経済的な優位性比較には、剥土比が役立つことも明らかにした。しかし、設計・計画時であっても、資金が持つ時間的な価値を考慮にいれて経済性を検討し直し、精緻化する必要がある。

5.2.3 坑内採鉱法の分類

鉱床の深度がある程度深い場合で鉱床の形態や賦存条件により露天採鉱が不可能な場合や露天採鉱の剥土比がある程度大きい場合には、坑内採鉱法により採掘を行なうことになる。次節では、採鉱法の選択にあたっての適用条件と、採鉱法選択のためのエキスパート・システムが備えるべき必要条件が検討される。ここでは、現在使われている坑内採鉱法

を大まかに分類し、その後、主要な坑内採鉱法について解説する。

鉱床およびそれを取り巻く母岩の特性は個々に異なり千差万別であるので、採用される坑内採鉱法の種類は極めて多く、実際には、百を越える採鉱法があると言われている。坑内採鉱法の分類に関しては、従来から数多くの方法が試みられているが、採掘空洞・切羽の支持形態に基づいて坑内採鉱法の基本的な分類が行われることが多い。Peele¹³⁾, SME¹³⁾, AIME¹⁴⁾のハンドブックなどでは、採掘切羽の支持方法により、坑内採鉱法それ自身よりも、採掘切羽(Stopes または Openings)の分類を行っている。

1) 無支保採鉱法

(Self-Supporting, Naturally Supported, or Unsupported Stopes)

……天盤あるいは上下盤を人工的に支持しない採鉱法である。鉱石の一部を掘り残して天盤を支持するピラー(鉱柱)として使用したり、空洞側壁の岩盤が持つ本来の支持能力によって上載岩盤圧を支える採鉱法である。天盤の一部が崩れ易い場合にはルーフボルトなどが副次的に使われる場合もあるが、主たる支持メンバーは鉱柱と側壁岩盤である。

2) 支保採鉱法

(Artificially Supported or Supported Stopes)

……鉱石あるいは母岩の強度が弱いと、採掘切羽の天盤や上下盤を天然の岩盤が持つ支持力だけで支えることが難しくなる。また、採掘切羽の維持のためのみならず、地表への採掘の影響(地表沈下や地表陥没)が許されない場合には、採掘空洞を充填物などで人工的に支持し、埋め戻す必要が生じる。支保採鉱法では、採掘期間中の切羽を維持し地表へ影響を避けるために、切羽内に人工的な支保が施され、坑内全体について系統だった岩盤制御(Ground Control)が行われる。

3) ケーピング法

(Caving Methods)

……ケーピング法は、鉱石とその上盤・被覆岩盤の一部を、意図的に制御しながら崩落(ケープ:Cave)させる採鉱法である。鉱石の抽出によって生まれた空洞は、その上部の鉱石あるいは岩石・土砂が崩落することにより埋められ、鉱床の地表部には陥没跡が残る。鉱石およびその上部の岩盤(帽子岩:Capping)がケープし易く、完全かつ連続的なケーピングが必須条件である。しかも、ケープした鉱石が適度な大きさに破碎されないと鉱石の抽出が困難となって、ケーピング法の持つ経済性が失われる。

¹³⁾ SMEハンドブック¹³⁾では、B.E.S.R.をEq. 5.5で定義されるE.L.S.R.としており、ここで言うB.E.S.R.については触れていない。

Table 5.2 主要な坑内採鉱法

坑 内 採 鉱 法	下村 ¹⁵⁾ 天野 ¹⁶⁾ SME ¹³⁾ AIME ¹⁴⁾ Hartman ¹⁾					大 分 類
ルームアンドピラー法	U	U	U	U	U	無 支 保 鉱 法
サブレベルストーピング法	U	U	U	U	U	支 保 鉱 法
シュリンケージ法	U	U	U	S	U	支 保 鉱 法
打 柱 採 堀 法	S	U	U	S	S	支 保 鉱 法
スクエヤセット法	S	S	S	S	S	支 保 鉱 法
充 填 採 堀 法	S	S	S	S	S	支 保 鉱 法
長 壁 式 採 鉱 法	-	-	S	S	C	ケ ー ビ ン グ 法
トップスライシング法	C	S	S	S	C	Top Slicing Method
サブレベルケーピング法	C	C	C	C	C	Sublevel Caving Method
ブロックケーピング法	C	C	C	C	C	Block Caving Method

天野は、坑内採鉱法を天盤の支持方式・掘さく方式・鉱石運搬方式の3要因を使って分類することを提案している¹⁷⁾が、ここでは、上記の“天盤あるいは上下盤の支持形態”によって分類する方法を採用する。

採鉱法には、鉱床やそれを取り巻く様々な賦存条件に適した無数と言って良いほどのバリエーションがあるが、現在行われている採鉱法の基本形は限られており、Table 5.2に示すものにまとめることができる。しかし、この主要な採鉱法が先の3分類のいずれに属するかは、多少の異同があるようである。

5.2.4 坑内採鉱法の解説

以下では主要な坑内採鉱法の基本形について解説する。

1) ルームアンドピラー法 (Room-and-Pillar Stoping) —— ルームアンドピラー法は柱房式採掘法あるいは残柱式採掘法、地並払採掘法とも呼ばれ、鉱石の一部を採掘しない

でピラーとして掘り残し、このピラーによって天盤を支持しながら鉱石を採取する無支保鉱法の一つである。主に、水平または緩やかな傾斜を持った板状・層状の鉱床に適用され、鉱体の傾斜に沿って、ピラーを残しながら切羽が展開される。掘さくされた鉱石は切羽で積み込まれた後、採掘跡空洞（ルーム）内を移動し、採掘区画の外に搬出される。同じ無支保鉱法でもサブレベルストーピング法などは重力をを利用して鉱石を下位のレベルに搬出するのに対し、重要な相違点は鉱石の搬出法である。このため、水平に近い緩傾斜を持った、厚さの限られた平面的な鉱体の採掘に適している。

金属鉱床のみならず、石炭をはじめとして、堆積起源の層状鉱床であるTrona（重炭酸ソーダ石）・Gilsonite（アスファルト鉱）・岩塩・カリ岩塩・石灰岩・砂岩などの非金属鉱床の採掘にも幅広く用いられている。Table 5.3は、アメリカ合衆国内の坑内掘鉱山における主要な採鉱法の出鉱量によるシェアを表したものであり、Hartmanの著作¹¹⁾より引用した。ルームアンドピラー法は、おそらく最も古くから存在する坑内採鉱法の一つであり、特にアメリカ合衆国では広く普及している。そのため、鉱山あるいは鉱山地帯に独特のローカルな名前も多く、北米大陸ではルームアンドピラー法を

Breast Stoping, Breast-and-Bench Stoping,

Board-and-Pillar, Stall-and-Pillar, Panel-and-Pillar

など様々な名称で呼んでいる¹⁸⁾。

Table 5.3 アメリカ合衆国における主要な坑内採鉱法のシェア（出鉱量）

坑 内 採 鉱 法	シェア
ルームアンドピラー法	77%
サブレベルストーピング法	3%
シュリンケージ法	<1%
打 柱 採 堀 法	<1%
スクエヤセット法	<1%
充 填 採 堀 法	3%
長 壁 式 採 鉱 法	11%
サブレベルケーピング法	<2%
ブロックケーピング法	3%

Hartman は、ルームアンドピラー法をピラーを規則的に配置するものと不規則に配置するものに分けているが、ここに示した数字は两者を合わせた数字である。

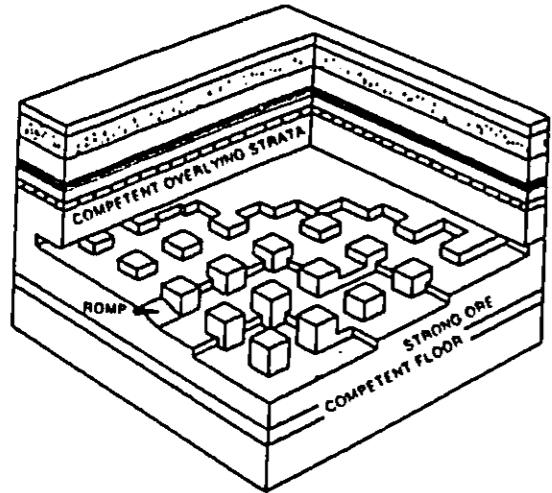


Fig. 5.3a 規則的なピラー配置の
ルームアンドピラー法¹⁴⁾

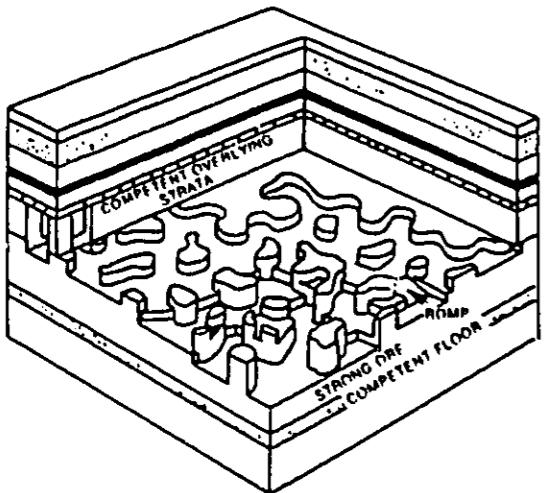


Fig. 5.3b 不規則なピラー配置の
ルームアンドピラー法¹⁴⁾

鉱石の一部を天盤を支持するピラーとして掘り残すが、ピラーとルームの寸法は、天盤の安定性・鉱石の特性・鉱体の厚さ・地圧の大きさ等によって決まる。天盤をロックボルトなどで補強するのが普通であるが、ルームアンドピラー法を適用するときには、鉱石と天盤が比較的健全(Competent)で割れ目を含まない岩石であることが望ましい。作業環境や作業の安全性を損なうことなく、採掘実収率を可能な限り高めることが求められる。ピラーとルームを基盤目状に規則的に配置することもあるし(Fig. 5.3a)、不規則に配置して品位の低い鉱石部分を掘り残してピラーとすることがある(Fig. 5.3b)。また、Fig. 5.3cに示すような細長いピラー(Rib Pillar)を残すこともある。

多くの金属鉱山でそうであるように鉱石が硬い場合には、採掘は穿孔-発破工法により行われる。石炭鉱山では、掘さく・発破による機械化された従来工法とコンティニュアス・マイナー(Continuous Miner)と称する連続式採炭機を使った機械掘さく工法の両者が使われるが、高能率な後者の採鉱法に移り変わつてある。金属鉱山では、穿孔にドリル・ジャンボを使用し、鉱石の積込搬出にLHD (Load-Haul-Dump)または積込み機とダンプトラックの組み合わせを使用して、機械化を計っている(Fig. 5.3d)。小規模の鉱山や鉱体の傾斜が20°~30°の鉱山では、タイヤ走行の車両類が使用できず、機械化が難しいので、レッグドリルかクローラードリルによる穿孔とスラッシャー(Slusher)による鉱石運搬が行われることが多い(Fig. 5.3e)。しかし、傾斜が比較的急な場合であっても、大型鉱床であれば、“Step Mining¹⁴⁾”と称して階段状に切羽を設け、擬傾斜の走行路を作つてトラック

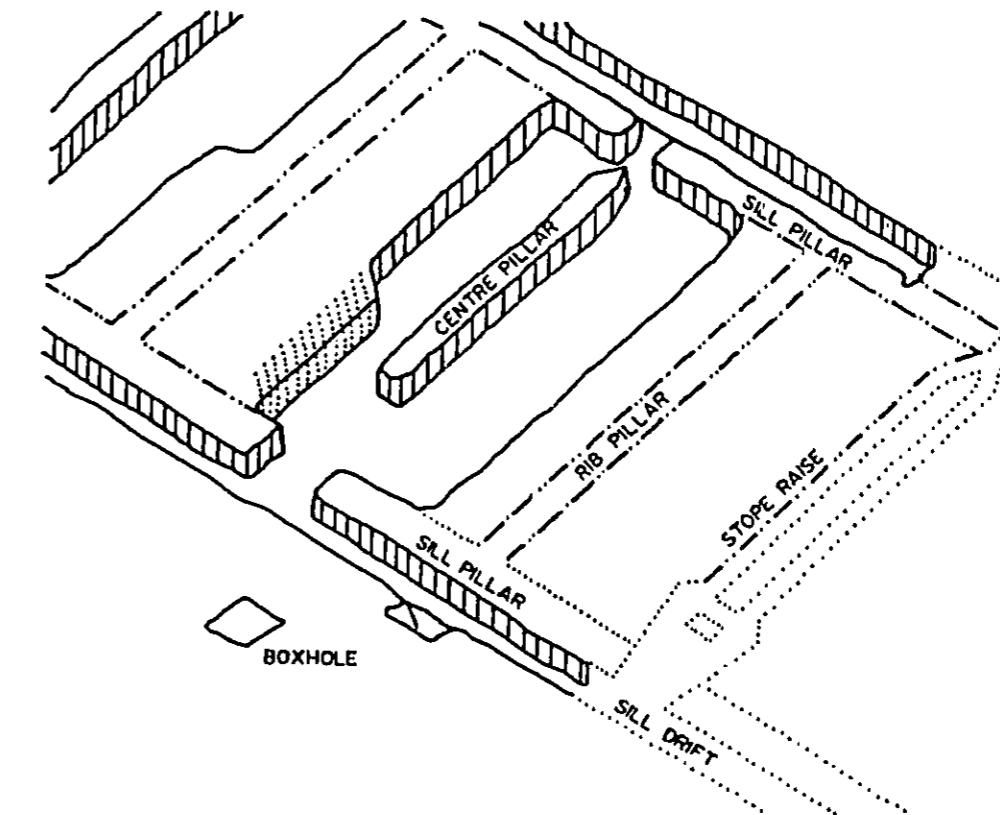


Fig. 5.3c カナダのウラン鉱山におけるルームアンドピラー法¹⁴⁾

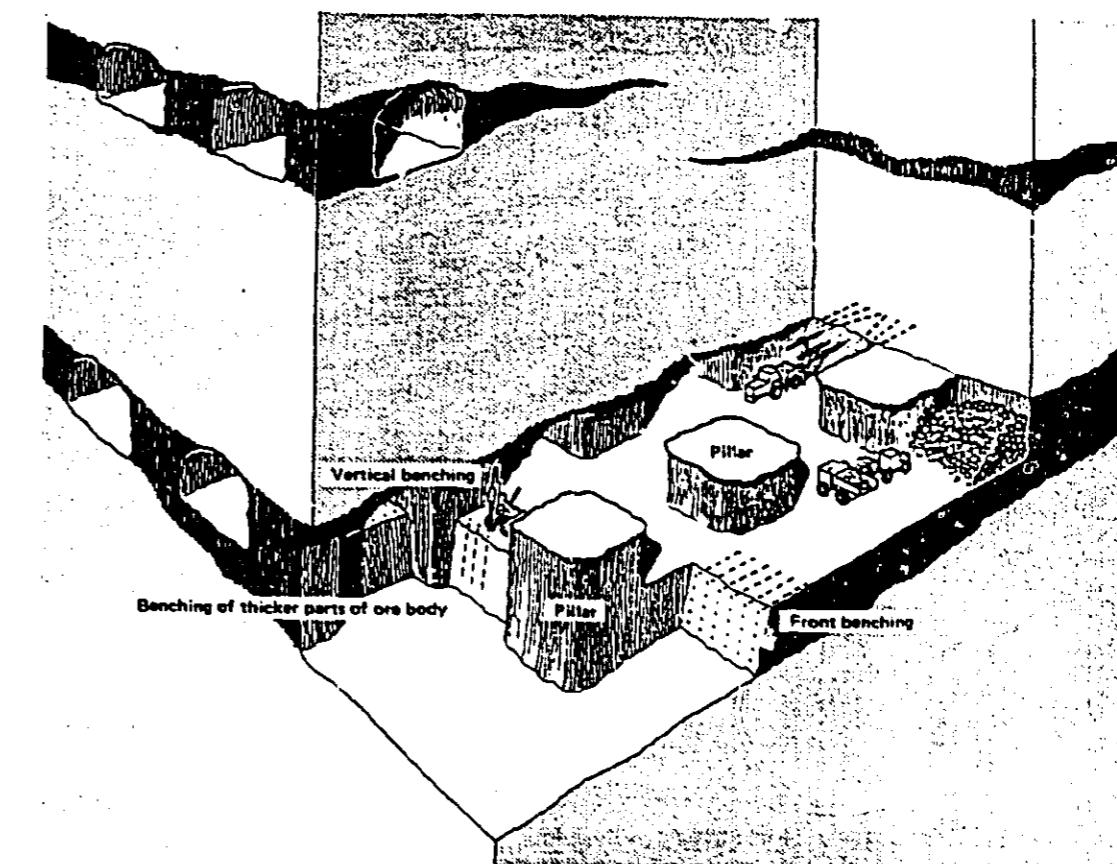


Fig. 5.3d 緩傾斜鉱床の機械化されたルームアンドピラー法¹⁴⁾

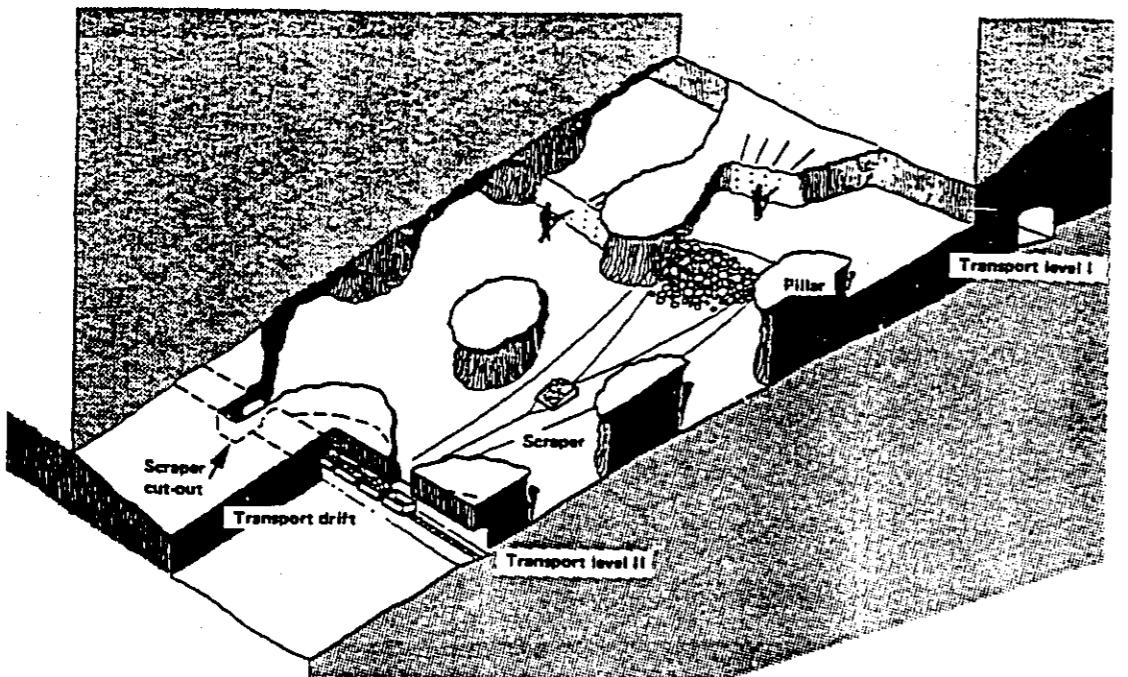


Fig. 5.3e 傾斜が機械化に適さない場合のルームアンドピラー法¹⁴⁾

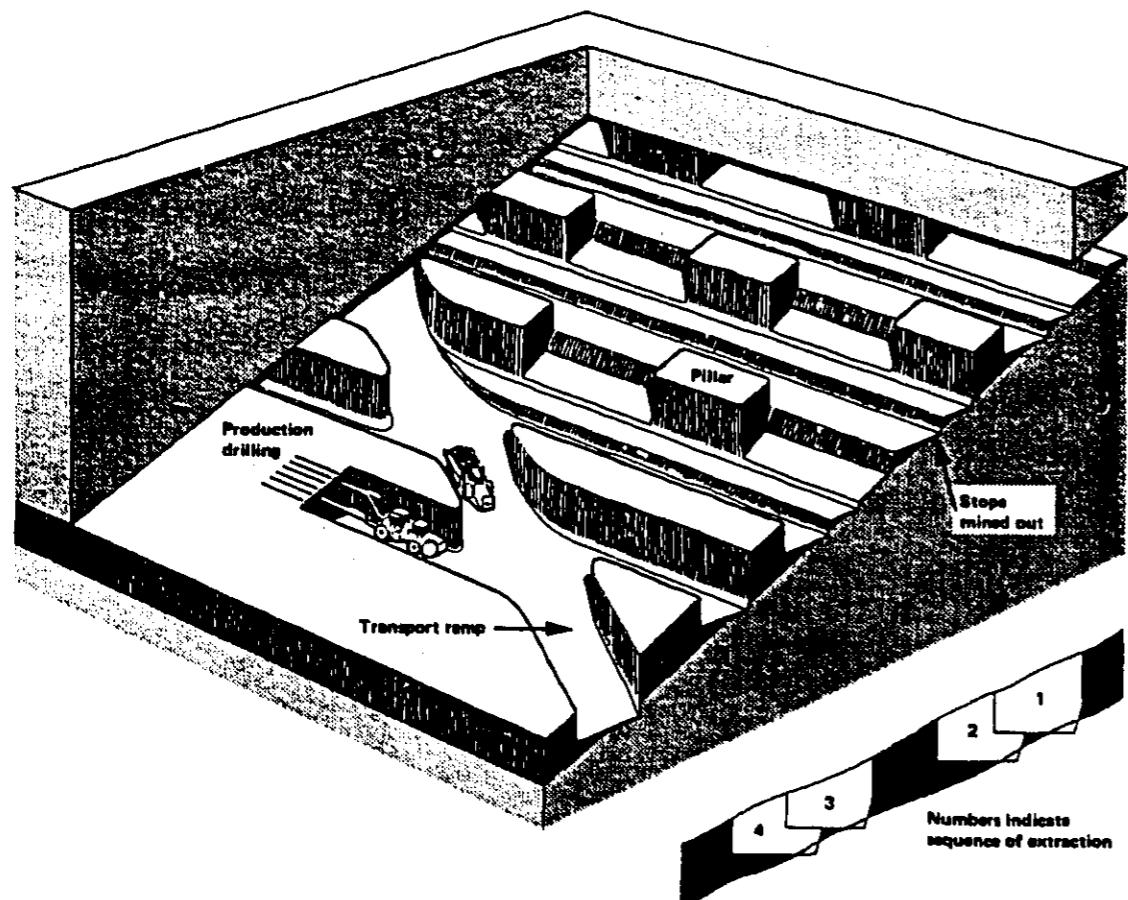


Fig. 5.3f 比較的傾斜のある鉱床に対する機械化された
ルームアンドピラー法 —— “Step Mining 法”¹⁴⁾

レス車両による機械化採鉱の試みも行われている(Fig. 5.3f)。

鉱体が厚い場合には、鉱体全部を一度に採掘することは稀である。通常、鉱体の最上部をまず採掘するが、天盤制御のためにルーフボルトを打設する。その後、下向き穿孔または水平穿孔により、Fig. 5.3gに示すように、残りの部分を1段または数段に分けたベンチ採掘によって採掘する。

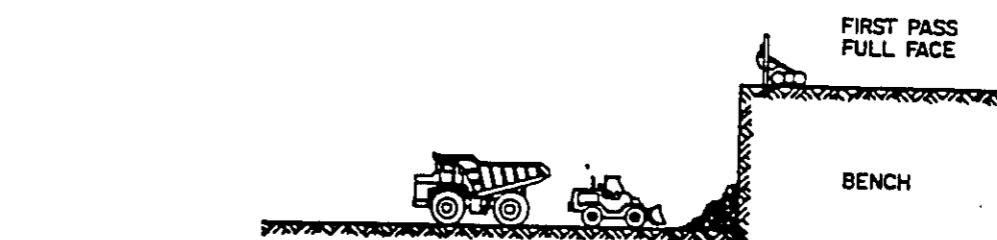
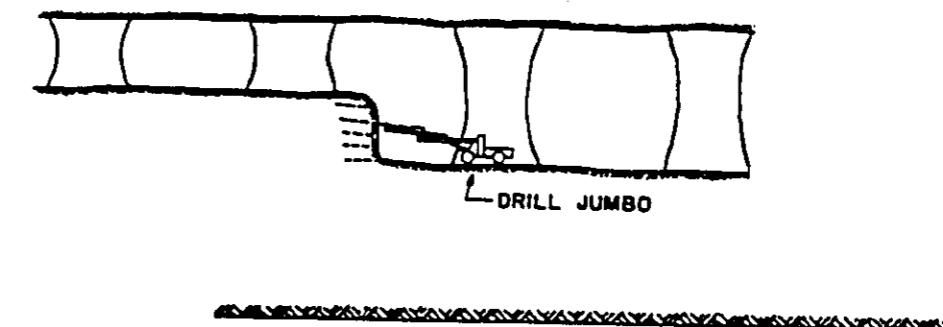


Fig. 5.3g ベンチングによる厚い鉱床に対するルームアンドピラー法の適用¹⁴⁾

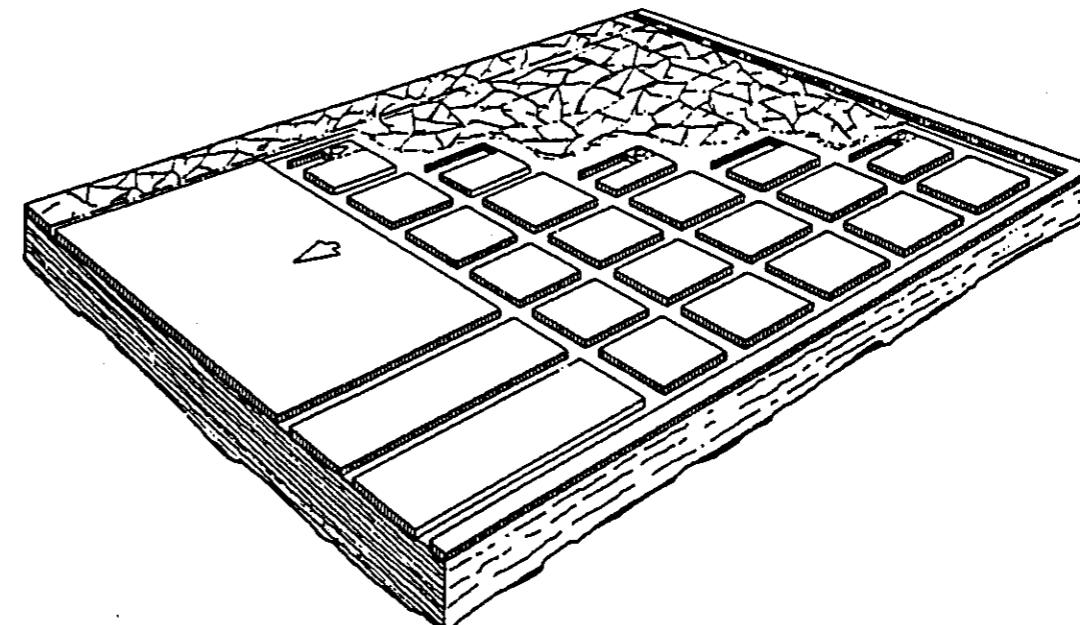


Fig. 5.3h ピラー回収によるルームアンドピラー法の2次採掘¹⁴⁾

アメリカ合衆国やオーストラリアの坑内掘炭坑では、長壁式採鉱法よりもピラーを規則正しく残すルームアンドピラー法が普及しているが、1次採掘のあとピラーを採掘する2次採掘が行われる場合が多い。Fig. 5.3hに示すようにピラー回収(Pillar Recovery)を大々的に行って、天盤を意図的にケープさせる場合がある。しかし、不規則にピラーを残した場合には、大々的なピラー回収は普通行われず、行われたとしても極めて限られたピラー回収(Pillar Robbing)である。

以下に、ルームアンドピラー法の特長および長所・短所をまとめる。

- 1) 生産性が比較的高く、採掘コストは比較的安い。かなり高い月間あるいは年間生産量も期待できる。特に、採掘実収率が問題とならない比較的低品位の鉱床または埋蔵鉱量の多い大規模鉱床に適している。
- 2) 有害ガスの心配がない非石炭鉱山では、生産に先立つ開坑作業や採掘準備作業が少ない。切羽へのアクセスや鉱石の搬出・切羽内移動のために通路を設けるという開坑作業が必要であるが、このときから鉱石の出鉱が始まる。
- 3) 切羽の数の増減が容易であるなど柔軟な採掘が可能である。
- 4) 選択採掘が可能であり、低品位部分をピラーとして残したり、鉱床の厚さの変化に応じて採掘高さを変化させることもできる。また、切羽において鉱石とズリの選別を行うこともできる。
- 5) 採鉱システムの機械化をしやすい。また、切羽間・切羽内の移動が容易であるため、採鉱機械の効率的な運用が可能である。
- 6) 比較的長期にわたって採掘空洞の天盤を維持しなければならない。このため、天盤に節理や割れ目が発達している場合にはルームアンドピラー法のメリットが失われる。また、鉱床が厚い場合には採掘空洞の天盤が高くなるので、天盤の状態を監視し、浮き石の除去等により天盤を良好な状態に保ち、落盤・落石を予防する必要がある。
- 7) 深度の増加とともにピラーに加わる地圧が増加するので、ピラーの面積を大きくとる必要がある。採掘深度が深い場合には、採掘実収率が下がるので、余り深い鉱床の採掘にはルームアンドピラー法は不適である。
- 8) 採鉱システムの機械化が容易である反面、機械化のための資本コストが大きい。しかし、これは機械化による生産性の向上とコスト低減により解消され得るものである。
- 9) 石炭鉱山では、採掘切羽の数を増やして生産量を確保するために開坑作業の負担

が大きく、切羽のレイアウトを変更したりすることも難しくなるので、柔軟性が失われる。

2) サブレベルストーピング法 (Sublevel Stoping) —— サブレベルストーピング法(中段採掘法)は、急傾斜の鉱体または大規模な塊状鉱床の採掘に適した採鉱法であり、中段坑道からの長孔発破により鉱石を破碎する所に特長がある。起碎された鉱石は重力により鉱画の最下底レベルに落とされ、運搬坑道へ抽出される。サブレベルストーピング法は、Blasthole Stoping, Longhole Stoping, Open Stoping などとも呼ばれ、“V C R (Vertical Crater Retreat) 法”もサブレベルストーピング法のバリエーションと見なすことができる¹⁴⁾。

サブレベルストーピング法は、Fig. 5.4aおよびFig. 5.4bに示すように、設定された鉱画の主要レベル間にいくつかの中段レベル／サブレベルを開さくし、サブレベルから鉱体中

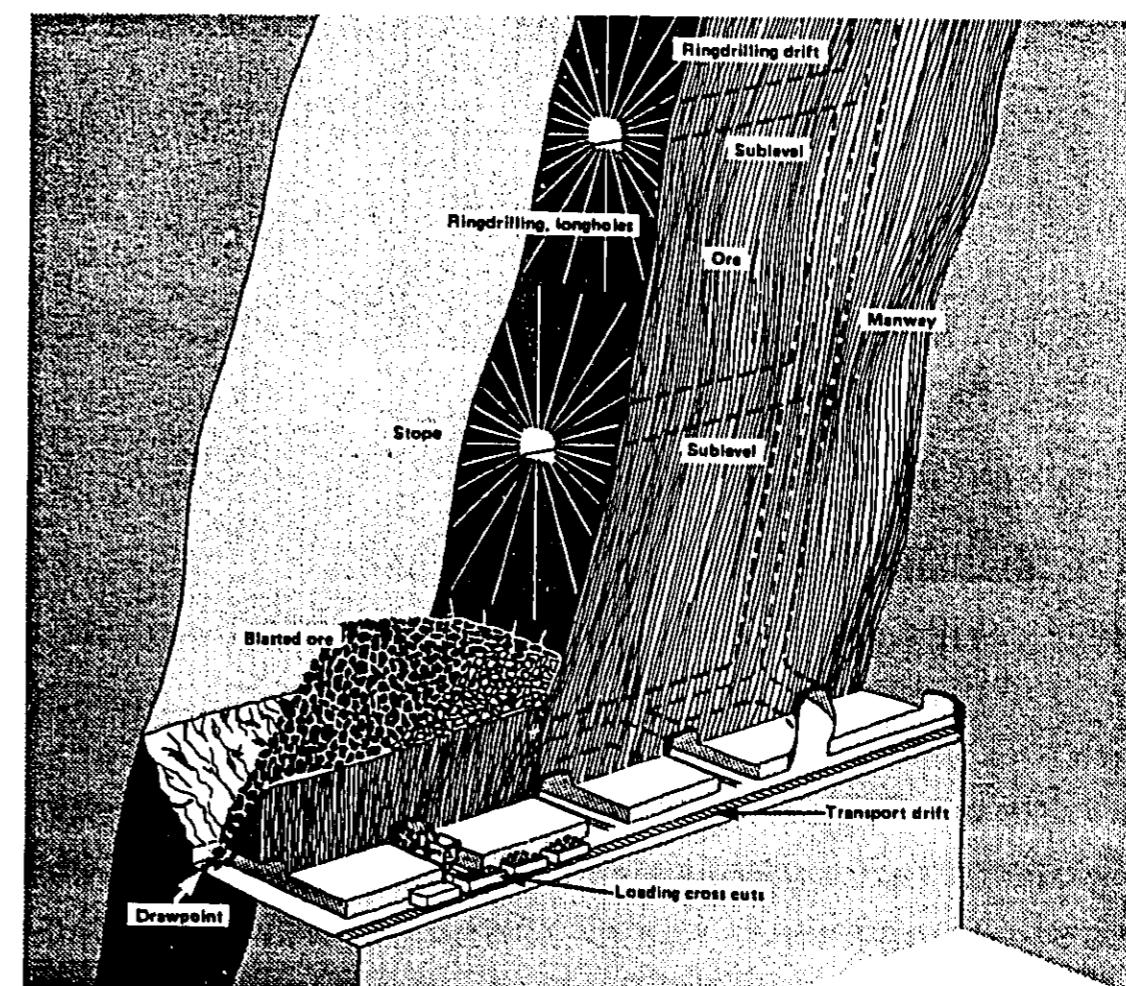


Fig. 5.4a サブレベルストーピング法（放射状長孔穿孔）¹⁴⁾

に長孔穿孔を行う。長孔穿孔のパターンとしては、Fig. 5.4aの放射状パターンとFig. 5.4bの垂直平行パターンが代表的なものである。鉱石抽出のためのアンダーカット(Undercut)を掘さくした後、鉱画の端に垂直なスロット(Slot)を開けて、このスロットに平行な長孔穿孔を行い、これを自由面とする発破を行って、起碎した鉱石を下部に自然落下させる。1回の発破で厚さ1.5m～3.0mの垂直スライスを破碎し、次のスライスに後退する。先行してさく孔してあった長孔に装薬を行い、装薬と発破を繰り返す。起碎した鉱石の抽出は鉱画下部で行われるが、最近では、ドローポイント(Draw Point)方式を取ることが多い。

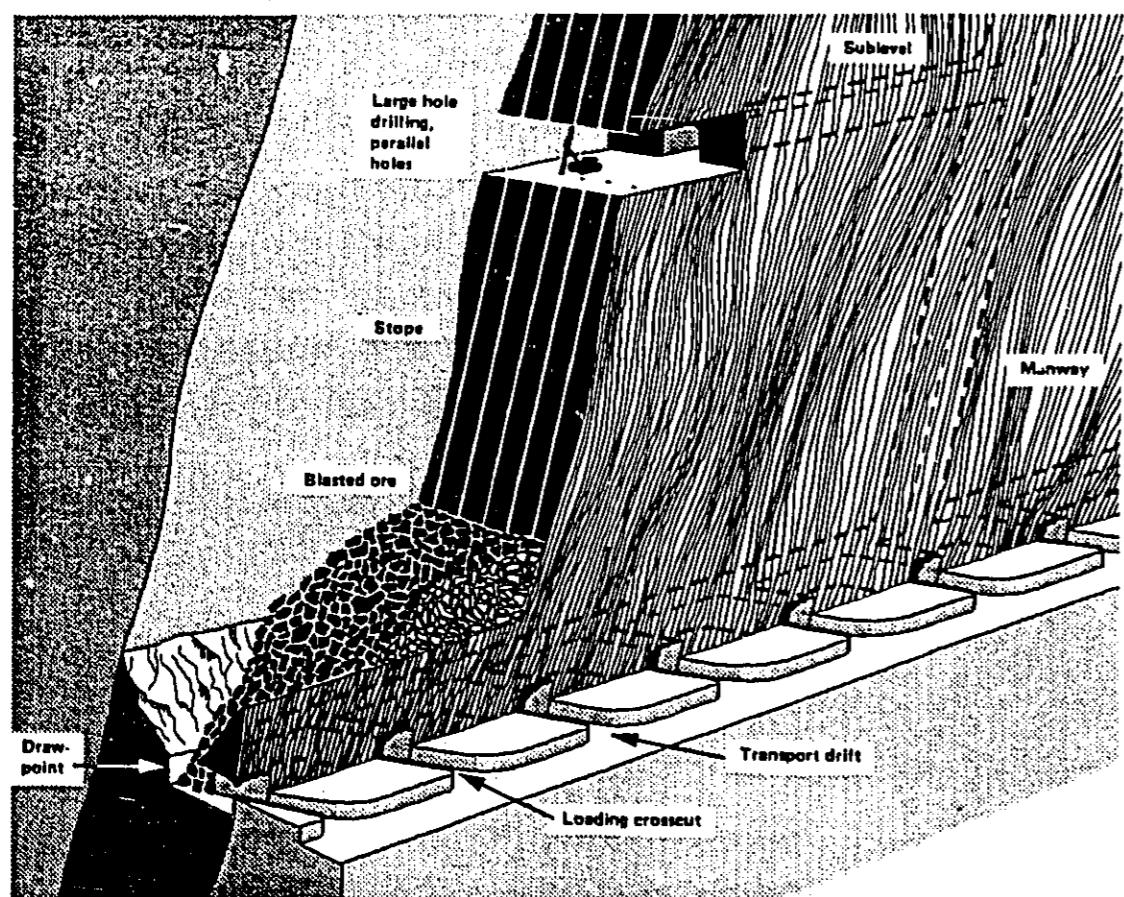


Fig. 5.4b サブレベルストーピング法（垂直平行穿孔パターン）¹⁴⁾

Fig. 5.4aは従来型のサブレベルストーピング法を表し、Fig. 5.4bはダウン・ザ・ホールドリル出現後のサブレベルストーピング法を表す。従来方式では、コラムまたは扇状穿孔リグ(Fandrill Rig)に固定された鑿岩機を使用する。比較的小孔径で(50～75mm)、最大穿孔長が24～30mの穿孔を行い、1スライス分が適当なサイズに破碎できるように、中段坑道から円状あるいは扇状のパターンで行う。鉱床の断面形状に合わせて、穿孔を行う坑道の位置を選び、穿孔パターンを決めなければならない。穿孔長をもっと長くして、中段坑

道のレベル間隔を大きくとることができればより望ましいが、長孔穿孔の精度=孔曲がり(Hole Deviation)が問題となる。従来型の鑿岩機では難しかった精確な長孔穿孔が、大孔径(100～200mm)のダウン・ザ・ホールドリルやロータリードリルの出現により可能になった。大孔径のものほど、最小抵抗線長(Burden)・孔間隔を大きくとることができるので、穿孔作業の軽減と破碎粒度(Fragmentation)の改善がもたらされる。また、45～60mの穿孔長を取れるようになったおかげで、サブレベルの垂直間隔も大きく取ることができ、開坑作業の減少にも役立つようになった。

V C R法は——平行穿孔パターンのサブレベルストーピング法と同様、大孔径長孔発破を利用する(Fig. 5.4c)。サブレベルストーピング法では、垂直なスライス単位で鉱石が破碎されサブレベルに沿って水平方向に採掘が進行したが、V C R法では水平なスライス単位で鉱石を破碎し、下部から上部に向かって採掘を進める点が異なる。サブレベルストーピング法では垂直スロットの開さくが必要であったが、V C R法ではシュリンケージ法と同様、鉱画最下部に水平なアンダーカットを開さくするだけでよい。上部のサブレベルから垂直平行パターンでアンダーカットに向かって大孔径長孔穿孔を行い、爆薬を球状

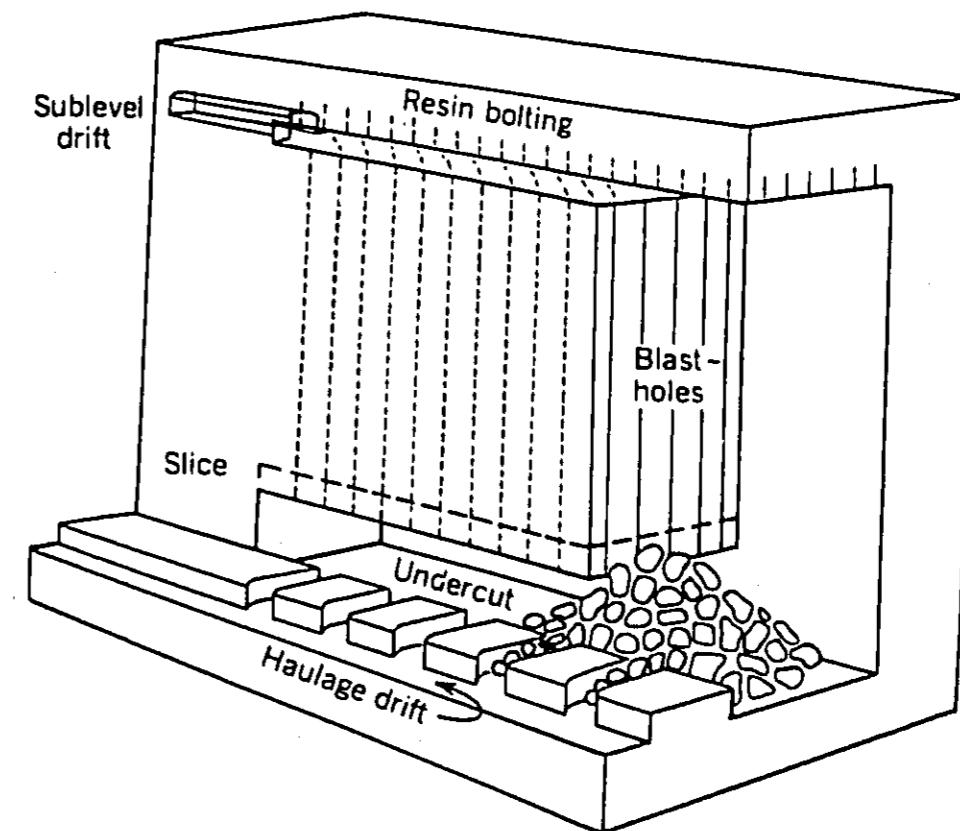


Fig. 5.4c V C R法¹⁵⁾

に装薬して、アンダーカットを自由面としたクレーター発破を齊発で行い、水平な1スライス分を破碎する。アンダーカットに起碎した鉱石を落とし、上の水平スライスの発破に移る。切羽面=空洞天盤の位置を正確に把握し天盤に凸凹ができないよう注意しなければならないが、V C R法により破碎成績が改善され、周辺岩盤に対するダメージも少なく、ピラー回収にも有効であることが認められている²⁰⁾。運搬坑道に破碎した鉱石を抜き出すが、シュリンケージ法と同様、破碎した鉱石の全てを抜き出さず破碎による増積分のみを抽出する。鉱画の発破が完了するまで採掘空洞に破碎した鉱石を充満させて、上下盤を一時的に支持させる。シュリンケージ法の特長とサブレベルストーピング法のシステムティックな効率の良さを兼ね備えた採鉱法である——シュリンケージ法のバリエーションとみなし“Crater Shrinkage”と呼ぶこともある²¹⁾。

サブレベルストーピング法では、鉱石が抜き出された後の採掘空洞は空洞のままにされる（採掘終了後、採掘空洞を充填する場合もあるが、採掘中は無支保のままである）ので、鉱石・上下盤ともに強固でなければならない。採掘切羽（鉱画）の幅は、通常、6~30mであり、採掘切羽の長さと高さは、長いもので90mに達するものもある。鉱床の厚さがそれほど厚くない場合には、鉱床の走向に平行に鉱画を配置し、塊状鉱床や厚い鉱床の場合には、走向に直角に鉱画を配置する。いずれの場合でも、鉱画の上下には水平ピラー（Crown Pillar or Sill Pillar）を残し、隣合った鉱画の間には垂直ピラー（Rib Pillar）を残す。採掘が完了した後、これらのピラーの回収が行われる場合もある。

以下に、サブレベルストーピング法の特長および長所・短所をまとめると。

- 1) サブレベルストーピング法が有効に適用されるためには、一つの鉱画はある程度以上の大きさを持っていなければならない。したがって、この採鉱法の適する鉱床としては、大きな塊状鉱床か、あるいは、脈状・層状鉱床の場合にはある程度の厚さを持っていてしかも破碎した鉱石の持つ安息角(Angle of Repose)以上の傾斜を持ったものが適している。
- 2) 長孔発破によって鉱石を破碎するので、選択採掘が不可能である。それ故、鉱体の形状が規則的で上下盤との境界がはっきりしていること、鉱体中の品位の変動が少ないことが望まれる。サブレベルストーピング法が成功するためには、地質状況と鉱体境界面の十分な把握、孔曲がりの抑制と精確な長孔穿孔が必須条件である。
- 3) 採掘が進むと採掘空洞は大空洞となるので、発破による衝撃や振動により上下盤が崩れて鉱石に混入したり大塊が発生し易くなる。採掘空洞は無支保のままであるため、鉱石と上下盤がともに強固で、かつ節理や割れ目の少ないことが望ましい。

- 4) 大規模で集約採掘が可能であるため、生産性が高く採鉱コストが比較的安い。反面、出鉱までの複雑で広範囲にわたる開坑作業・採鉱準備作業に要する経費と時間が多大である。しかし、最近の長孔穿孔技術・発破技術のめざましい進歩により、サブレベルの間隔を大幅に広げができるようになったので、この欠点を帳消しとし得る採鉱法と認められている。穿孔・発破・積込み作業は互いに独立して行うことができるので、高度の機械化・自動化、大型化、省力化が可能であり、特に大規模鉱床の集約採掘に適している。
- 5) 採掘空洞に作業員が立ち入らないので、同じ無支保採鉱法に属するルームアンドピラー法やシュリンケージ法よりも安全である。穿孔・発破作業は中段レベルで行われ、積込み・搬出作業はドローポイントレベルで行われるので、作業員の立ち入る場所が限られている。必要な場合はルーフボルトやワイヤメッシュ、ショットクリートにより天盤の補強が行われる。また、切羽内の通気も良好である。
- 6) 1次採掘の採掘実収率は35~50%²²⁾であり、ピラー回収を行って採掘実収率は80~85%となる。また、切羽での鉱石選別は不可能であり品位調整が難しい。さらに、上下盤の崩落によるズリ混入、鉱石の掘り残しも避けられない。
- 7) 発破設計や長孔穿孔が上手くない場合には、大塊が生じ易く、抽出口の自詰まりや小割発破の手間が増え、生産効率に悪い影響を及ぼす。

採掘鉱画の寸法や鉱画間に残すピラーの寸法を、岩石力学・発破・鉱石運搬の要素を考慮して決定されなければならない。また、サブレベルストーピング法は長孔発破にその最大の特長があるので、発破設計——穿孔径と穿孔長、最小抵抗線長、爆薬の種類、薬量原単位等の選定がサブレベルストーピング法では重要である。

- 8) シュリンケージ法 (Shrinkage Stoping) —— シュリンケージ法は、サブレベルストーピング法と同様、急傾斜の脈状・層状鉱床の採掘に適している。主要な相違点は、サブレベルストーピング法が起碎した鉱石を順次、鉱画最下底レベルから抜き出すのに対し、シュリンケージ法では起碎した鉱石の全てを抜鉱しない点である。岩石は発破などにより破碎されると、壊れる前よりも見かけ上、体積が増加する。通常、60~80%程度、体積が増加するので、破碎した鉱石の30~40%を抜鉱して、残りの鉱石を鉱画内に残す。切羽の天盤と起碎鉱石との間に作業に都合の良い空間(2~3m)を保ちながら、起碎鉱石を足場と

して利用する。さらに上部に採鉱を進め、鉱画の採鉱が全て完了したときに残った鉱石の抽出を行う。鉱画内に残された鉱石は作業足場であるとともに上下盤を一時的に支持する役目も持っている。この意味でシュリンケージ法は支保採鉱法に分類される場合もあるが、起碎された鉱石はピラーと同様、天然の岩石であり人工的なものではない。それ故、ピラーを天盤や上下盤の支持に使用するルームアンドピラー法やサブレベルストーピング法と同じ無支保採鉱法と見なされることもある¹⁰⁾。

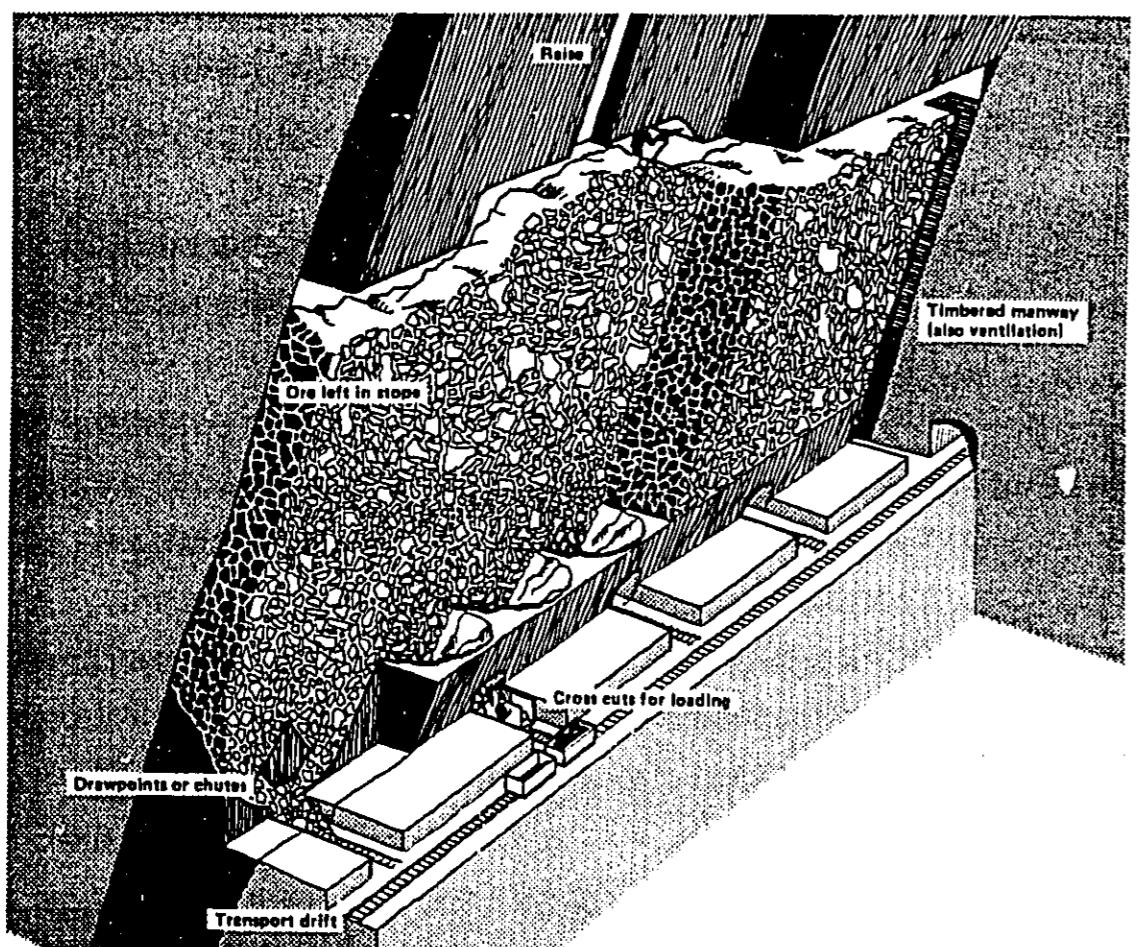


Fig. 5.5 シュリンケージ法¹⁰⁾

Fig. 5.5はシュリンケージ法の適用例を示すものであるが、起碎した鉱石の表面は凸凹しているので、大型の穿孔機械を切羽内に導入することは難しく、整岩機としてレッグドリルやストーパ(Stopper)が使われる。脈幅が狭い場合には、穿孔作業をまとめることができるストーパによる上向き穿孔の方が好まれるが、脈幅が広くて1ラウンドの掘さく量が大きく取れる場合には、保安上の理由で、レッグドリルによる水平穿孔が行われる。原則として切羽内に支柱を施さないが、脈幅が広い切羽では上盤の崩落を防ぐためにループボ

ルト・金網等を打設する場合もある。

シュリンケージ法では、鉱石漏斗からの抜鉱制御が非常に重要である。穿孔と装薬が終了し、次の発破が行われるまでの間に抜鉱が行われる。抜鉱が行われると採掘切羽内の足場となる破碎された鉱石の表面が多少とも乱れるので、発破で落としたばかりの破碎鉱石を足場とする方が作業がし易いからである。鉱石の表面ができるかぎり一様となるように抜鉱を制御しなければならないが、抜鉱の制御に失敗すると、採掘切羽内の足場となる破碎された鉱石の表面に凸凹ができ、これを搔きながらして足場を整えるのには大きな労力を必要とする。また、鉱体の傾斜がそれほど急でなかったり、鉱体の幅が広い場合には、上盤側の鉱石が流れ易くなるし、漏斗の間隔が大きい場合には、鉱石の足場を水平に保つことが特に難しい。鉱画の採掘が完了すると、作業員は切羽内に立ち入らないで漏斗からの抜鉱だけを行なう。このときも漏斗からの抜鉱量を調節して切羽内の鉱石表面を乱すことなく一様に沈下させる。採掘跡空洞をそのままに放置する場合もあるが、鉱石の抜鉱が全て完了した後、開坑ズリや選鉱廃滓により充填する場合もある^{10), 11)}。

機械類の使用が稀であった時代には、鉱石の搬出に人力を必要としないシュリンケージ法は最も普及した採鉱法の一つであった。しかし、現在では、大型鉱床に関してはサブレベルストーピング法や上向き充填採掘法に取り代わられつつあり、主として、幅の狭い脈状鉱床の採掘に採用される。また、大型鉱床を他の効率的な手法により採掘する際のスロット部分・自由面の形成に使われることがある。

以下に、シュリンケージ法の特長および長所・短所をまとめる。

- 1) 鉱体の傾斜は安息角以上に急であり、鉱石および上下盤とも強固であること、また、鉱床の膨縮が少ないことが望ましい。
- 2) 切羽内に鉱石が長く留め置かれるので、自然発火をし易い鉱石、酸化し易くて選鉱成績に悪影響を及ぼしそうな鉱石、ラドンガスを放出する鉱石、吸水や化学反応あるいは力学的作用によって自然に膠結する鉱石などは敬遠される。
- 3) 開坑作業や採掘準備作業が簡単で時間もかかるないので、中ないしは小規模の鉱山で、切羽作業の機械化が容易でない所で採用される。このため、労働集約的であり、生産性は相対的に低い。
- 4) 鉱石の60~70%が採掘完了まで鉱画中に留め置かれ、出鉱できないので、投下資本の回収が遅れる。したがって、他の脈状鉱床採掘法に比較して、初期投資と開坑作業が少ないというシリ：ケージ法の持つメリットがこれにより相殺される可能性がある。また、抜鉱をコントロールすることが難しいので、出鉱品位・出

鉱量の調整も難しい。

- 5) サブレベルストーピング法と比較すると、採鉱コストは高く、作業切羽の保安環境も劣る。上下盤がより強固であることが求められる。また、労働集約型であり、熟練した作業員も必要である。しかし、ズリの混入は少なく、開坑作業の負担が少なくて投下資本も少ない。また、選択採掘の融通がきき鉱床の形がより不規則なものにも適用可能である。
- 6) 上向き充填採掘法に比べると、採鉱コストは安く、開坑作業や充填作業にさかなければならぬ費用や時間も少ない。しかし、充填採掘法の方が、より軟弱な岩盤にも対応でき、大型鉱床では機械化の導入がし易く、選択性・柔軟性にもすぐれ、ズリ混入率は低く採掘実収率は高い。

4) 打柱採掘法 (Stull Stoping) —— 打柱採掘法は脈幅の限られた中ないしは急傾斜である脈状鉱床の採掘に適した採鉱法である。Fig. 5.6 に示したように、上下盤の間に規則的あるいは不規則に打柱 (Stull) を施す。さらに、打柱と打柱の間を適宜、棚張りを行って (Lagging)、これを作業足場にして穿孔作業を行い、起碎した鉱石の一時置き場・搬出路としても利用する。打柱あるいは坊主とも呼ばれる丸太は直径 20~30cm で、1~1.5m 間隔で打設され、下盤にくぼみを彫り込み、上盤側には板切れなどを楔として挿入して柱を固定する。

上下盤が強固であって打柱は単に作業足場の一部と見なされる場合には、この採鉱法は無支保採鉱法に分類され、採掘の進行方向によって“無支保上向採掘法 (Overhand Open Stoping)”、“無支保下向採掘法 (Underhand Open Stoping)”と称される。丈夫な打柱または突張りを規則的に行って、上盤支持のために打柱を利用する場合には、この採鉱法は支保採鉱法に分類され、スクエヤセット法と同様“支柱採掘法 (Timbered Stoping)”に含まれられる¹⁸⁾。

打柱採掘法の特長をまとめると、

- 1) 中ないしは急傾斜の（脈幅が 3m 以下の）細脈鉱床の採掘に適しており、急傾斜の場合には重力により鉱石を落下させることができるので切羽内運搬が容易である。
- 2) 切羽内作業の機械化が困難であるため、労働集約的であり生産性が悪い。最近では使われなくなっているが、開坑作業が少なく、投下資本も少ないので、小規模で比較的高品位である脈状鉱体の開発に適している。また、ビラー回収に使用されることもある。

3) 坑木の消費量が大きいので、坑木の安定な供給が保証されなければならない。岩盤条件が悪い場合には、打柱を密にして木積を施したりするので、特に坑木にかかるコストが大きい。

- 4) 採掘ロスが少なく、90%以上の採掘実収率も可能である。また、選択採掘が可能であるので、低品位部分はビラーとして掘り残される。岩盤条件が悪い場合には部分的にズリ充填も行われる。

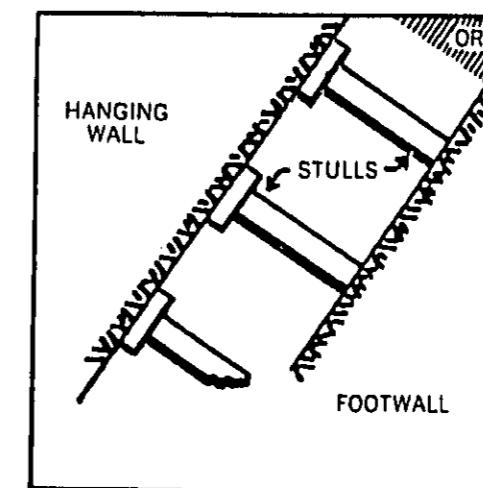
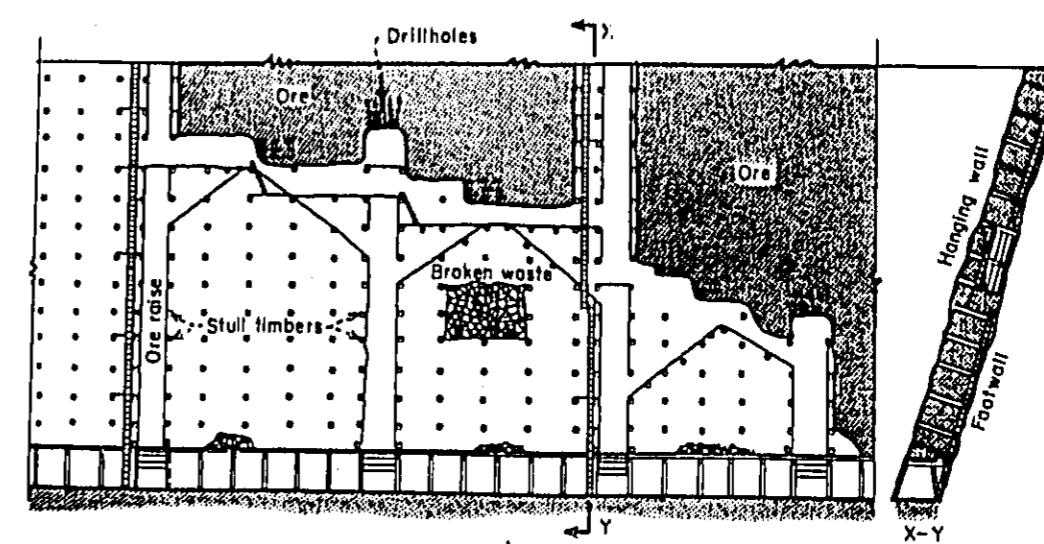


Fig. 5.6 打柱採掘法¹⁹⁾

5) スクエヤセット法 (Square-set Stoping) —— スクエヤセット法はアメリカ合衆国で生まれた採鉱法であり、1860年にネバダ州の Ophir 鉱山の高品位鉱床の開発に始めて使用されたが、今日では使われる機会が少なくなった²⁰⁾。

Fig. 5.7 にスクエヤセットとスクエヤセット法を示すが、鉱体を少しづつ段欠け状に採

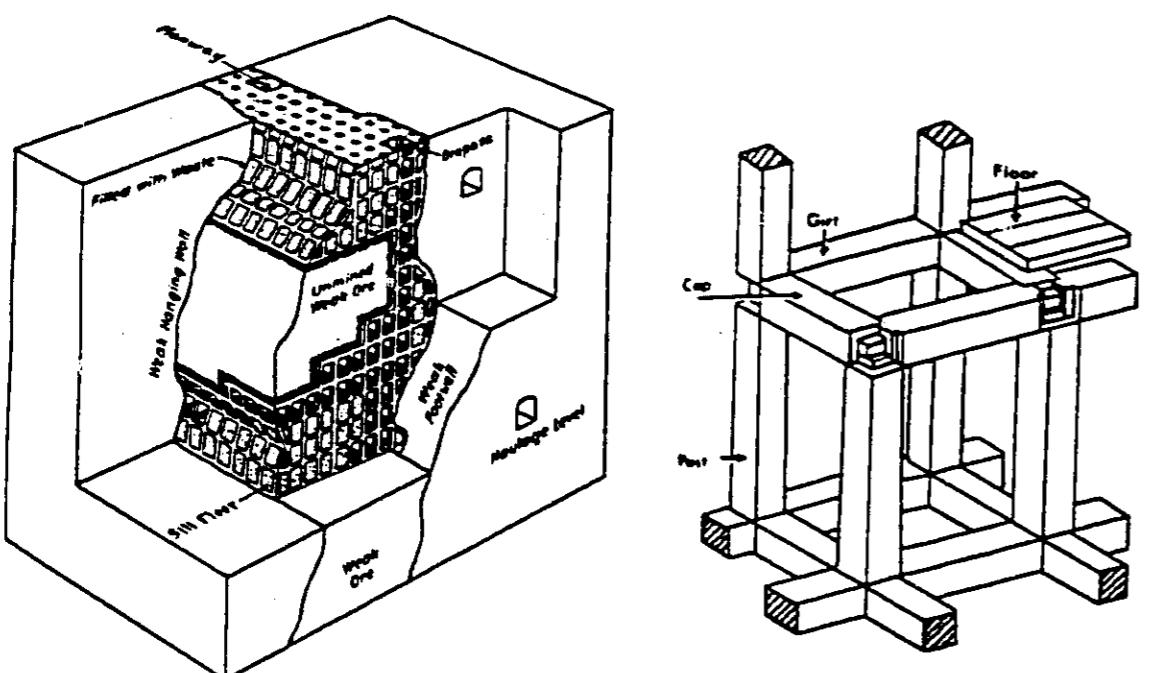


Fig. 5.7 スキュエヤセット法およびスキュエヤセット¹⁾

掘し、3つの部材……Post（柱または脚）、Cap（押木）、Girt（つなぎまたは束）と称する角材をサイクロ状に組み立てる。各部材の断面は20cm×20cmから30cm×30cmの大きさであり、水平部材は1.8m～2.4m、垂直部材は2.4m～3.0mの長さを持つ。坑外で加工・整形された後、切羽内に搬入され組み立てられる。Postは垂直地圧に抵抗し、Capは最大水平地圧を支え（脈状鉱体では走向に直角に置かれ）、Girtは隣のスキュエヤセットとの連結のために使用され安定度を高める役目を持っている。組立後、補強のためにBrace（筋交い）と称する斜めの部材を入れることもあるが、強い地圧に対抗するには不十分であり、このような場合には人員や資材・鉱石の移動のためのスペースを除いて大部分を充填する。

スキュエヤセット法の特長をまとめると、

- 1) あらゆる鉱体の形状、地山条件に対しても適用可能であるが、機械化が難しく、極めて労働集約的であり、坑木の消費量も大きい。
- 2) したがって、生産性が最も悪く、探鉱コストは坑内探鉱法の中で最も高い。
- 3) 鉱石や上下盤が非常に軟弱であって不安定であっても、完全探鉱が可能であるので、鉱石の価値が探鉱コストに見合うのであれば、高品位で小規模な地山条件の極めて悪い鉱体の探鉱に適している。また、ピラー回収にも使用される。

岩盤条件が非常に悪い場合には下向きのスキュエヤセット法が行われる。また“ミッテ

ル・スライス法 (Mitchell Slice Method)”と呼ばれるバリエーションがある。鉱画の上下盤だけをまず、上向きに採掘してスクエヤセットをセットし、残った鉱画の中央部分を下向きに採掘する。両盤のスクエヤセットを支持板として中央部分には比較的簡単な突張りをセットする方法である。従来のスクエヤセット法よりも、支柱の手間が省けるので、採掘コストは減少し、採掘能率は向上したとされている²⁴⁾。

6) 充填採掘法 (Cut-and-Fill Stoping) —— ズリ処理としての充填はおそらく人類が坑内探鉱を始めたときから存在していたものと思われるが、支保を目的としての充填の最初の使用は1864年アメリカ合衆国ペンシルヴェニア州における炭坑が最初であろう。金属性鉱山で充填が本格的に導入されたのは南アフリカWitwatersrand地方の鉱山で1906年のことであった。第2次世界大戦後、坑木費・人件費の高騰、熟練労働者の不足により支柱採掘法が衰退する中で、充填採掘法の普及、特に選鉱廃滓を利用した湿式充填を取り入れた充填採掘法の普及が進んだ²⁵⁾。

支保探鉱法の坑内探鉱法に占めるシェアが全体として低下する中にあって、唯一、今日でも重要な支保探鉱法が充填採掘法である。鉱床の品位が高く、完全採掘あるいは選択採掘が求められ、しかも上下盤が軟弱である急傾斜脈状鉱床の採掘に使われてきた。岩盤が軟弱で地表沈下が許されない場合に有効な採鉱法であるが、機械化採鉱システムと充填技術をドッキングさせた機械化充填採掘法は無支保採鉱法やケーピング法に対抗し得る大規模鉱床の坑内探鉱法と認められるようになった。鉱体を水平なスライスに分割して、一つのスライスの採掘が終わると、採掘の終わったスライスを充填する。充填作業が採掘サイクル（穿孔－発破－積込／搬出）に組み込まれているのが最大の特長である。サブレベルストーピング法やシュリンケージ法でも採掘跡空洞の充填が行われるが、これらは採掘のサイクルに取り入れられているわけではなく、一つの鉱画が完全に採掘されてから行われる。

充填採掘法には数々のバリエーションが存在する。採掘を下部から上部に進めるのかそれとも上部から下部に進めるのかに大きく分かれる。採掘を鉱画・鉱体の下部から上部に向かって、充填物を足場として利用しながら採掘を上向きに進める充填採掘法を“上向充填採掘法 (Overhand Cut-and-Fill Stoping あるいは単に Cut-and-Fill Stoping)”と称するが、この中には、機械化によらない従来方式の、“リジュイニング法 (Resuing)”または“ストリッピング法 (Stripping)”、“水平上向充填採掘法 (Horizontal Cut-and-Fill Stoping)”などがあり、トラックレス採鉱システムによる機械化方式の“機械化充

填採掘法 (Mechanized Cut-and-Fill Stoping)”がある。特に最後のものは、大型鉱床の採掘に採用されるもので、切羽作業の機械化によりその価値が見直されている充填採掘法である。

一方、これに対して、採掘を下向きに進め、充填層の下を採掘する充填採掘法を“下向充填採掘法 (Underhand Cut-and-Fill Stoping あるいは Undercut-and-Fill Stoping)”と呼ぶ。この他、採掘切羽を水平でなく斜めに設定する“傾斜分層充填採掘法 (Inclined Cut-and-Fill Stoping あるいは Rilled Stoping¹¹⁾”と呼ばれるものなどがある。

充填物として、最も手近なものは、開坑作業に伴って発生する開坑ズリである。しかし、開坑ズリでは、密度の高い充填ができず、圧縮性に富んでいるため支保効果はあまり期待できない。しかも、充填に必要な量の開坑ズリが必要なときに安定して出るわけではないので、坑外から土砂や火山灰などを充填材料として補給する場合がある。特に、選鉱廃滓 (Mill Tailing) の粗粒成分=サンドスライムを充填材料に選ぶことが多い。硫化鉱物が結合し易いことは知られていたが、最初は何も添加物を加えないサンドが充填に使用されていた。しかし、1950年代後半から1960年代前半にかけて充填材の安定化を目的として少量のセメントを加える試みが始まり、1960年代半ばからセメントフィルの使用が普及し、充填物の支保としての強度や路盤としての耐久力が増加した。サンドスライム充填などでは、坑外からの充填物の搬入に水力流送を使うことが多く、坑外からのパイプラインを通じて、バルブ濃度:50~60%で切羽内にスラリー輸送する¹²⁾。湿式充填される切羽の出入口にはバルクヘッド(隔壁)を設けて、流送した充填物の圧力を支え漏泥を防ぐためのバリケードを設置する。充填物中の固体成分の沈降・沈澱に伴って、水分が上澄水・滲過水として分離するので、これらを排水するためのパイプやスリットをバルクヘッドに開けて、脱水を促進させる。脱水が早ければ、数時間で人員の歩行が可能となり、2~4日後には車両の走行も可能となるようしっかりとした充填物・充填層が出来上がる。

ズリ充填あるいは乾式充填に比べて、湿式充填の方が密度の高い充填を行うことができる。しかし、それでも排水・固体物の沈降・圧密によって時間の経過とともに体積が縮小するので、採掘切羽の天蓋まで充填したとしても天蓋と充填物上面の間には隙間が残る。それ故、充填物は天蓋を直接支持することができず、上下盤あるいは側壁を支持することにより支保能力を発揮するものと考えられる。

¹¹⁾ 長壁式採掘法でも払い岩の充填が行われる場合があるが、この場合には充填物を圧気流送する場合が多い。充填に対応する英語の用語は、金属鉱山では “Filling” あるいは “Backfilling” であるが、炭坑では “Stowing” と呼ぶことが多い¹³⁾。

6a) 上向充填採掘法 —— 鉱石を切羽天蓋として載るので、鉱石の強度はある程度強く、筋理や割れ目も少ないことが望ましい。場合によっては、ルーフボルトやケーブルボルトにより天蓋の補強を行う必要がある。

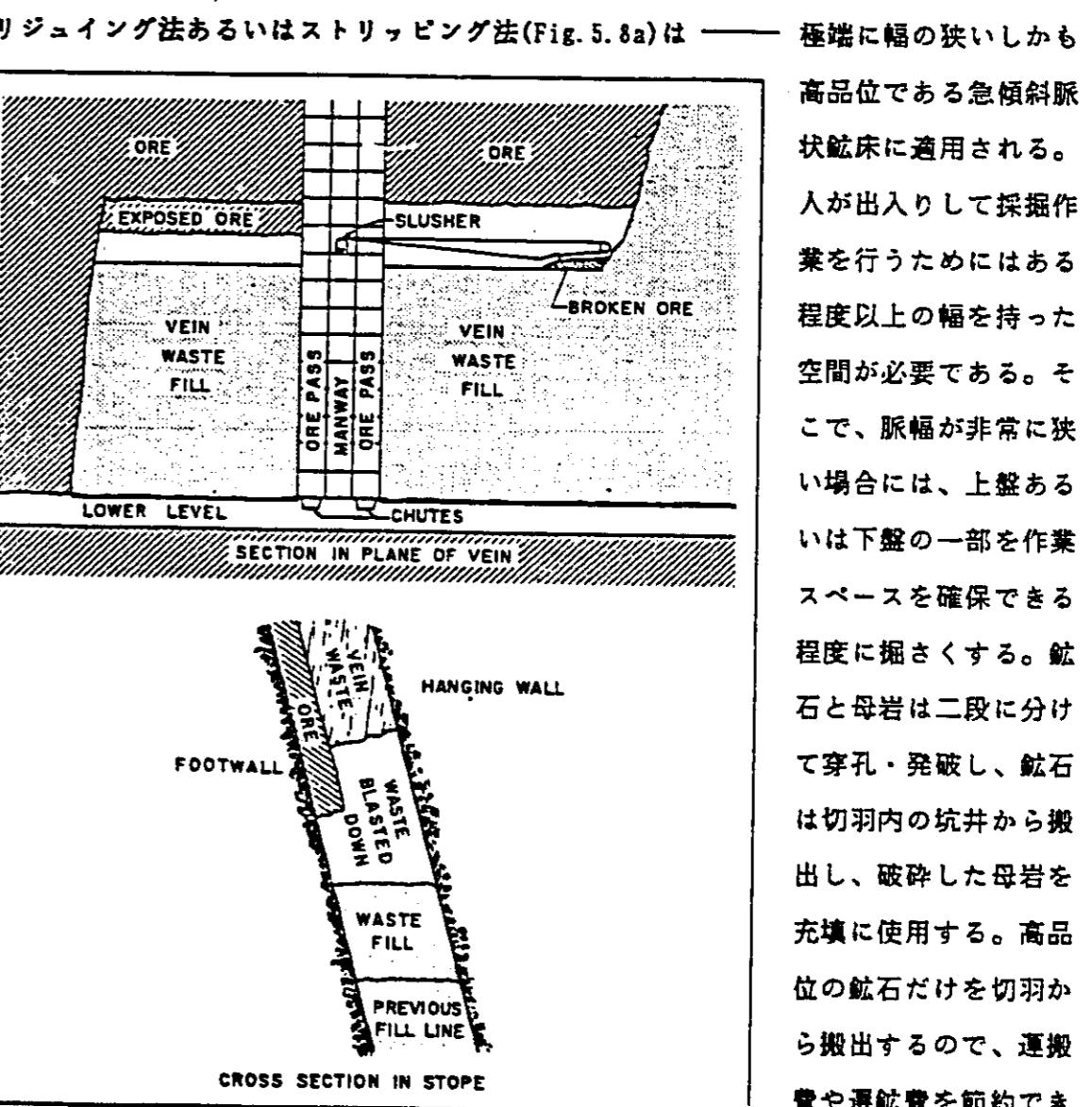


Fig. 5.8a リュイイグ法・ストリッピング法¹⁴⁾

充填物中への鉱石のロスも無視できないので、ごく小規模な鉱山を除いては使われていない。

水平上向充填採掘法 (Fig. 5.8b) は —— 鉱石は比較的堅固であるが、母岩が軟弱な急傾斜の脈状・層状鉱床あるいは塊状鉱床に適用される採鉱法である。鉱床の厚さ・幅が10~12m以下の場合には、鉱床の走向方向に切羽を配置し（縦型配置）、塊状鉱床や鉱床の厚さ・幅が10~12m以上の場合には、鉱床の走向に垂直に切羽を数本配置し（横型配置）、

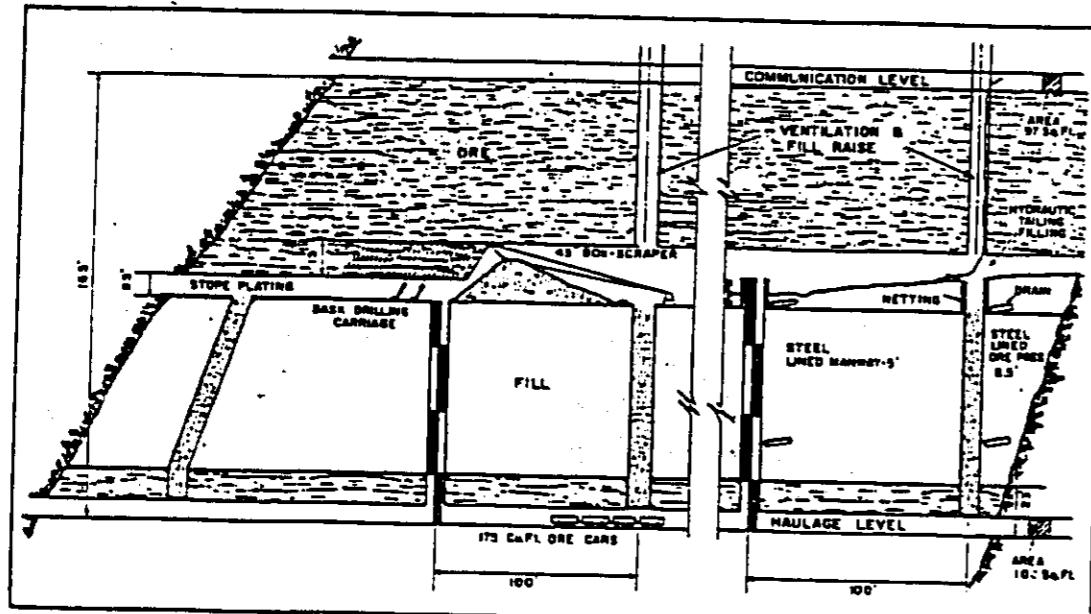


Fig. 5.8b 水平上向充填採掘法¹⁴⁾

切羽間に帯状の鉱柱を残す。これらの鉱柱は1次採掘終了後、2次採掘を行って回収される。

穿孔方式には、オフセット・ストーパによる上向き穿孔（あご冠採掘）方式とレッグ・ドリルによる水平穿孔（あご面採掘）方式の2方式がある。充填物を作業足場として穿孔・発破作業を行った後、破碎された鉱石をスラッシャーによって搔き集め、切羽内の鉱石シートに投入して、運搬坑道レベル シート口から抜鉱する。破碎した鉱石と充填物が混ざらないよう、充填物の表面にはシートや板類を敷いて置いたり、セメントを数パーセント含んだ充填層を20~30cmの厚さで打設しておくこともある¹⁴⁾。

鉱石の搬出が終了するとシートや板類を取り除き、上部坑道から充填物を投入し、採掘作業に必要な空間を残して充填される。湿式充填の場合には、バルクヘッドやバリケードを設けて、逸泥を防止しながら脱水を行う。また、充填物の中に設けられた坑井や人道の延長も行う。ズリ充填の場合には、スラッシャーやオートローダによってズリを切羽内に分配し均一に敷きならす。

機械化充填採掘法は——切羽内作業をトラックレス採鉱システムにより機械化した水平上向充填採掘法であり、その一例をFig. 5.8cに示す。切羽内の穿孔・発破方式には、2通りがある(Fig. 5.8d)。その一つは、天盤に向かって垂直上向きまたは斜め上向きの穿孔を行い、ベンチ発破を逆立ちにしたような形で採掘を行う。天盤の広い範囲を穿孔して、1ラウンド当たりの掘さく量を大きくすることができます。しかし、この方式では、天盤が

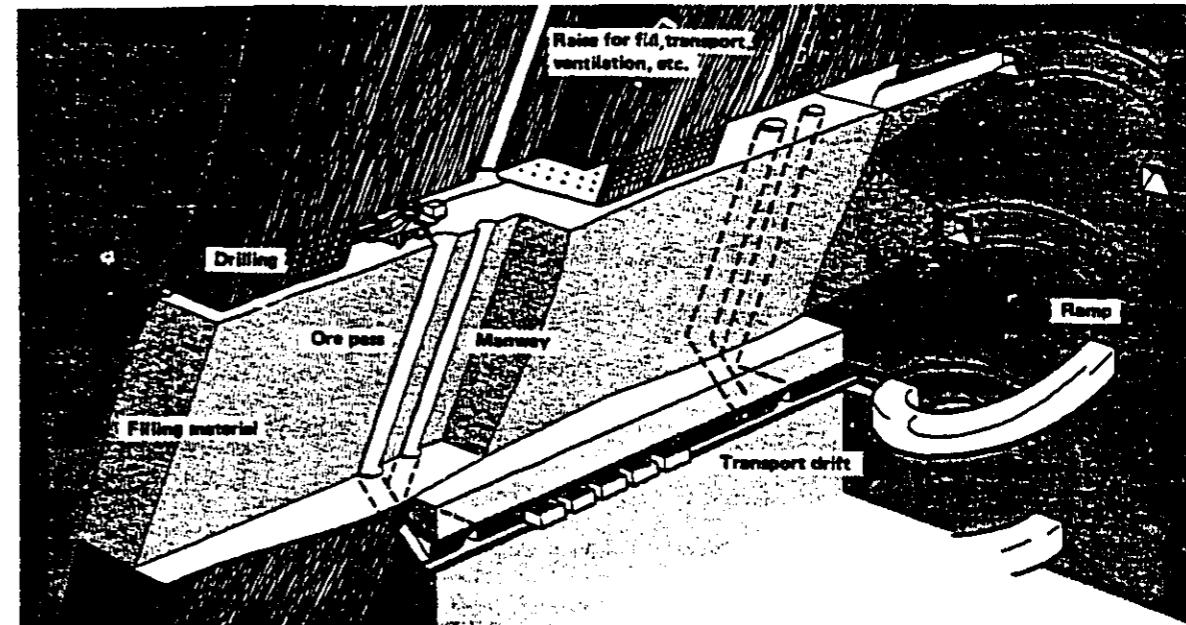


Fig. 5.8c 機械化充填採掘法¹⁴⁾

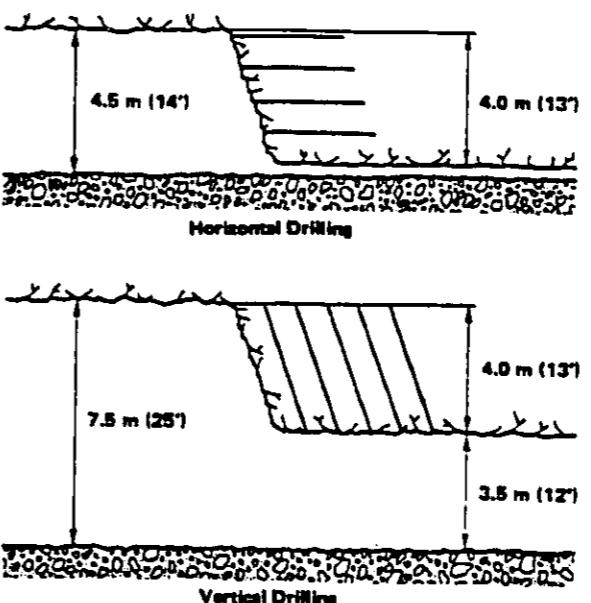


Fig. 5.8d 上向充填採掘法における穿孔方式¹⁴⁾

かなり高くなり、制御発破が難しいために天盤が凸凹し、しかも天盤が緩み易いので、落石・落盤の危険性が増大する。これに対して水平穿孔方式による地並払い方式(Breast Stoping)を取る場合には、1発破当たりの掘さく量は限られるが、スムース・プラスティングを使用すれば天盤を傷めにくいので、切羽内作業の安全性が改善される。また、上向き穿孔方式に比べて、選択採掘も行い易く、かつ、鉱床の膨縮に対する柔軟性にも優れており、充填採掘法の有力なライバルであるサブレベルストーピング法やシュリンケージ法に対する優位性がより強まる。

水力充填した充填層の表面は滑らかであり、タイヤ走行の車両類を使ったトラックレス採鉱システムが導入可能となった。鉱石の搬出は、普通、LHDで行われるが、充填層内の坑井または上下盤中に掘さくされた鉱石立坑に投入される。また、充填層内には、坑井の他に人員昇降のための人道が設けられることもあるが、この場合には、採掘の進行とともに上部に延長される。この他、通気と充填物輸送のための切上が採鉱区画内に設けられ、車両類の出入りのための斜坑・ランプが鉱床周辺の岩盤中に掘さくされる。

機械化上向充填探掘法の特長を要約すると、以下のようなになる。

- 1) 中から急傾斜の層状・板状の鉱体の探掘に適しているが、鉱床の形が不規則であったり、鉱床が不連続である場合には、充填探掘法の持つ選択探掘という特長が特にいかされる。
- 2) 鉱石はある程度、強くて節理や割れ目を含まないことが望ましい。もし、落盤の危険性がある場合や事前にこれを予防する場合にはルーフボルトやケーブルボルトによる補強が行われる。一方、上下盤に関しては、サブレベルストーピング法やシーリングゲージ法にとっては難しい軟弱岩盤でも適用可能である。
- 3) 開坑コストと開坑作業の負担は比較的軽い。
- 4) 選択探掘や切羽内選別が可能であり、探掘実収率も高い。しかし、他の無支保採鉱法に比べると、機械化を導入しても、生産性は劣り、探掘コストは高くなるので、比較的高品位の鉱床の探掘に適している。
- 5) また、選択探掘・切羽内選別を効果的に行うためには、鉱床品位分布の把握と細かなサンプリングが必要であり、熟練した作業員とすぐれた現場管理者を欠かすことができない。
- 6) 切羽内で発生したズリはそのまま充填に使用することができるでズリ処理の手間が省ける。選鉱廃滓を使用する場合には、廃滓ダムの延命にも役立つ。しかし、充填により探掘サイクルが中断し、充填作業が完了するまで切羽からの出鉱がストップして、探鉱機械類が遊休する。複数の切羽で探鉱機械類を共通に運用して稼働率を保つ工夫や、脱水に要する時間を短縮する工夫が求められる。
- 7) 切羽内の通気は比較的難しくコストがかかる。全体として安全な採鉱法であるが、発破によって生まれた新しい天盤を頭上にして作業を行うことになるので、保安面の監視を怠ることができない。

6b) 下向充填探掘法 —— 上下盤と鉱石の両者がともに軟弱な急傾斜の脈状・層状鉱床および塊状鉱床の探掘に適用される。また、ピラー回収や崩落した鉱石の回収にも採用される。

カナダのSudbury鉱山地帯で、INCOがピラー回収のために開発したと言われている。通常、ピラー回収時には、ピラー自身の傷みが激しく地山条件も悪い。天盤の状態が予想できないので上向充填探掘法の適用は難しく、スクエヤセット法では探掘コストがかさみすぎ、より安全で合理的な手法が求められていた。悪い岩盤条件の下で、岩盤を探掘するに

は、上部から下部に探掘した方が保安上も盤圧制御上も良いということが経験によりわかっていた。そこで、最初にトップスライシング法がまず試されたが、地表沈下の可能性があるので途中で放棄され、トップスライシング法のアイデアを発展させた下向充填探掘法が生まれた¹¹⁾。

下向充填探掘法では、鉱体を水平な2~4m厚さのスライスに分けて、水平スライスの探掘と充填を繰り返しながら、上部から下部に向かって進む。厚さの限られた脈状の鉱体では、坑井から水平スライスの探掘を始め、坑道掘進の要領で走向に沿って探掘を進める。探掘が終わると坑道の床に古レールや丈夫な板を坑道軸に平行に2本敷く。次に、このレールや板の上に坑道軸に直角に丸太=押木を敷き、さらにその上に板材をマット状に敷き逸泥防止用の網布を張った後、セメントを混入したサンドスライムの充填を行う。下のスライスの探掘も同様に坑井から始め、天井に上スライスの押木が現れるところを打柱によって受けながら、探掘を進める。探掘が終了するとさきと同様の充填準備作業と充填作業を行う。鉱体の幅が広い場合には、切羽を走向に直角に配置する“クロスカット法”が用いられる。まず、下盤に沿って走向方向にゲート坑道を掘進し、ゲート坑道から走向に直角に何本かのフィンガー坑道を上盤に達するまで探掘し、鉱石を採取する。フィンガー坑道の探掘と充填を繰り返し、最後にゲート坑道を充填して、下のスライスに移る¹²⁾。

モルタル人工天盤による下向充填探掘法は —— 日本の黒鉱鉱山で開発され、軟弱岩盤中に存在する高品位の鉱石を完全採掘する採鉱法である(Fig. 5.8e)。さきの標準的な下向充填探掘法と異なる点は、

- 1) サンドスライムにセメントを混入し、高さ3mのクロスカットの内、下スライス探掘時の直上天盤となる下部0.6m部分のセメント含有量を強度増加を期待して15%に、上部の残り2.4m部分はセメント含有量を3%にしている。15%のセメント充填層をモルタル人工天盤と称し、この中には直径13mmの鉄筋を25cm間隔で並べて、人工天盤の補強を行っている。
- 2) 切羽の支保は坑木による三ツ留支保であり、2本の柱で水平柱=笠木を支える。古レール等は使用せず、セメントと鉄筋で補強された人工天盤を三ツ留支保で支える。笠木を充填時に踏前に敷き込み下スライス探掘時に2本の柱で受ける工法もとられたことがあった。
- 3) 切羽内の作業はレッグドリルによる穿孔、オートローダによる鉱石運搬、人力による留め付け作業と、非常に労働集約的であったが、切羽を大型化して、トラックレス採鉱システムが導入されている。クロスカットの掘進に適した旋回テーブ

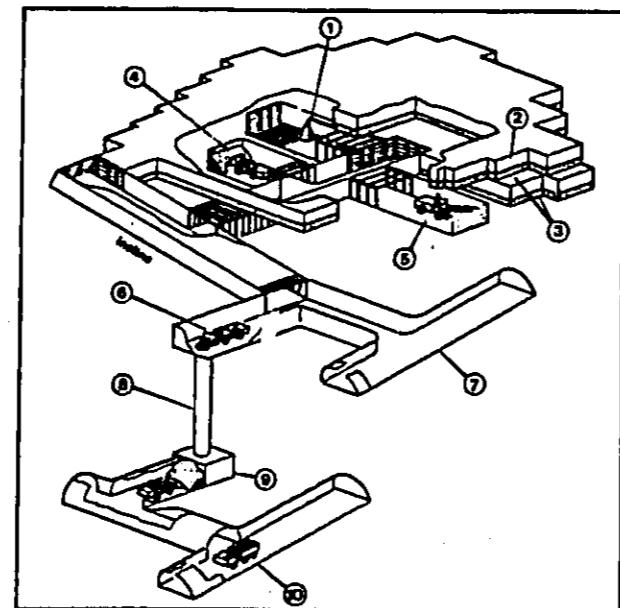
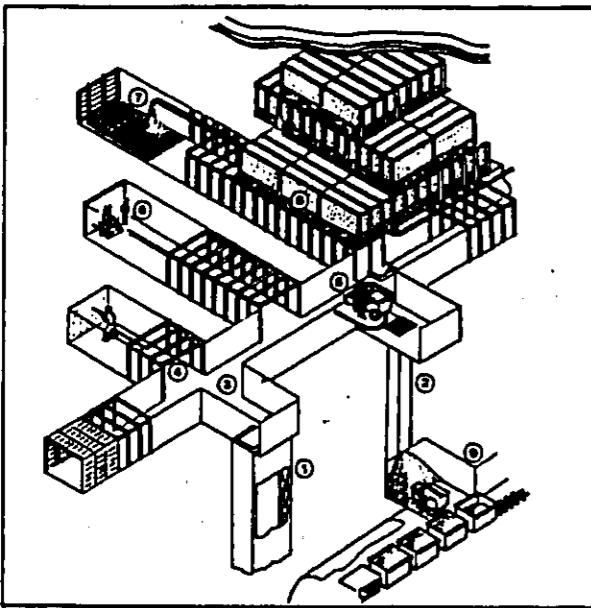


Fig. 5.8e 黒鉱鉱山のモルタル人工天盤を使った下向充填採掘法

(左: 従来工法、右: トラックレス採鉱システム)²⁰⁾

ル付きのドリル・ジャンボ、粘土質鉱石の排出に適したイジェクター付きの LHD、留め付け専用車両の開発、さらに、穿孔・搬出・支保作業のシステム化、坑内通信網の整備などが行われ、総合効率の向上が計られている²¹⁾。

以下に、下向充填採掘法の特長を要約する。

- 1) 鉱石と母岩の両者とも軟弱な鉱床の採掘に適し、急傾斜の脈状・層状鉱床あるいは塊状鉱床の採掘に適用できる。
- 2) 選択採鉱が可能で、採掘実収率は高く、ズリ混入は少ない。
- 3) 人工天盤を使った場合には、切羽での落盤・落石が少なく、極めて安全性が高い。
- 4) しかし、岩盤条件が悪い場合には切羽の大型化は難しい。大型のディーゼル駆動の機械類の導入が困難な場合には、労働集約的となり、採鉱能率は低く、採鉱コストは高い。
- 5) したがって、軟弱岩盤中にある経済価値の高い鉱石を完全採掘し、しかも地表沈下を避けたい場合に有効な採鉱法と言える。
- 7) 長壁式採鉱法 (Longwall Mining) —— 長壁式採鉱法は、厚さの限られた緩傾斜の層状・板状の大規模鉱床の採掘に適した採鉱法であり、採掘切羽の長さが100~300mに達する。17世紀の末に英國のShropshireで始まったとされている。今日の機械化された長壁

式採鉱法に比べると原始的であるが、採掘法の基本的な特長は共通する²⁰⁾。

採掘切羽に鉄柱やシールド枠などの重支保を施して切羽作業を保護するので長壁式採鉱法を支保採鉱法と見なす立場と、採掘跡の天盤を崩落させることにより切羽にかかる荷重を緩和し切羽へのダメージを予防するのでケーピング法に分類する考え方がある²¹⁾。どちらも、長壁式採鉱法の特長をよくとらえている。

適用し得る鉱床の特性から見られるように石炭鉱床の採掘に適している。事実、日本や西欧（ドイツ・フランス・イギリス）の炭坑の多くで長壁式採鉱法が採用されている。アメリカ合衆国やオーストラリアの坑内掘炭坑では、最近になって長壁式採掘法を採用する所が多くなったものの、ルームアンドピラー法を採用する所が大多数である。この理由は、アメリカ合衆国やオーストラリアの炭層がルームアンドピラー法に適した比較的浅いものが多く、しかも有望な大規模炭坑が次々に開発されているためであると考えられる。これに対して、日本や西欧では、稼行炭層が深部に移行しているので、ルームアンドピラー法はその地山条件に適さない。しかも石炭資源に限りがあるので、採掘実収率の低いルームアンドピラー法が見送られ、長壁式採鉱法の機械化・採鉱能率の向上が計られてきた。

石炭以外の鉱物資源について見ると、長壁式採鉱法の応用は限られ、アメリカ合衆国では銅 (White Pine鉱山)・トロナ・ウラン、西欧ではカリ岩塩と鉄鉱石、南アフリカでは金の採掘に使用されている。Fig. 5.9aは金属鉱山で採用されている長壁式採鉱法の切羽のレイアウトを示したものである。石炭の採鉱法と異なる点は、石炭やトロナのような比較的軟らかい鉱物と違って、金属鉱物は硬いので穿孔・発破によって鉱石が破碎され、スラッシャーにより鉱石の搬出が行われる。切羽の支保には、鉄柱とカッペが使われる。

日本の別子鉱山でも、“シールド枠採掘法”と名付けられた急傾斜下向長壁式採掘法が取られたことがある。別子鉱山は、採掘の深部移行による盤圧の増加や岩盤温度の上昇がもたらす切羽作業環境の悪化に備え、シールド枠採掘法を開発した。鉱画の上部坑道と下部坑道を切上で結び、この中に坑井を設け、切上の両側各々15~20mを採掘鉱画とし、上部坑道から下部坑道に向かって採掘を進める。発破によって起碎された鉱石はスラッシャーにより搔き集められて鉱画中央の坑井に投入され、シールド枠の油圧を調整して切羽が進行した分だけシールド枠を前進（下降）させる。採掘と枠下げを繰り返して下部坑道まで採掘を進めるが、採掘跡の上下盤は自然に崩落させて、崩落ズリをシールド枠の上に堆積させるというものであった。深部移行にともなって山はねが発生していたが、山はねに対する災害防止対策として考案された手法であった。シールド枠採掘法の採用により、切羽の集約化が進み、充填系統の整備を待たずに安全な採鉱作業が可能となった²²⁾。

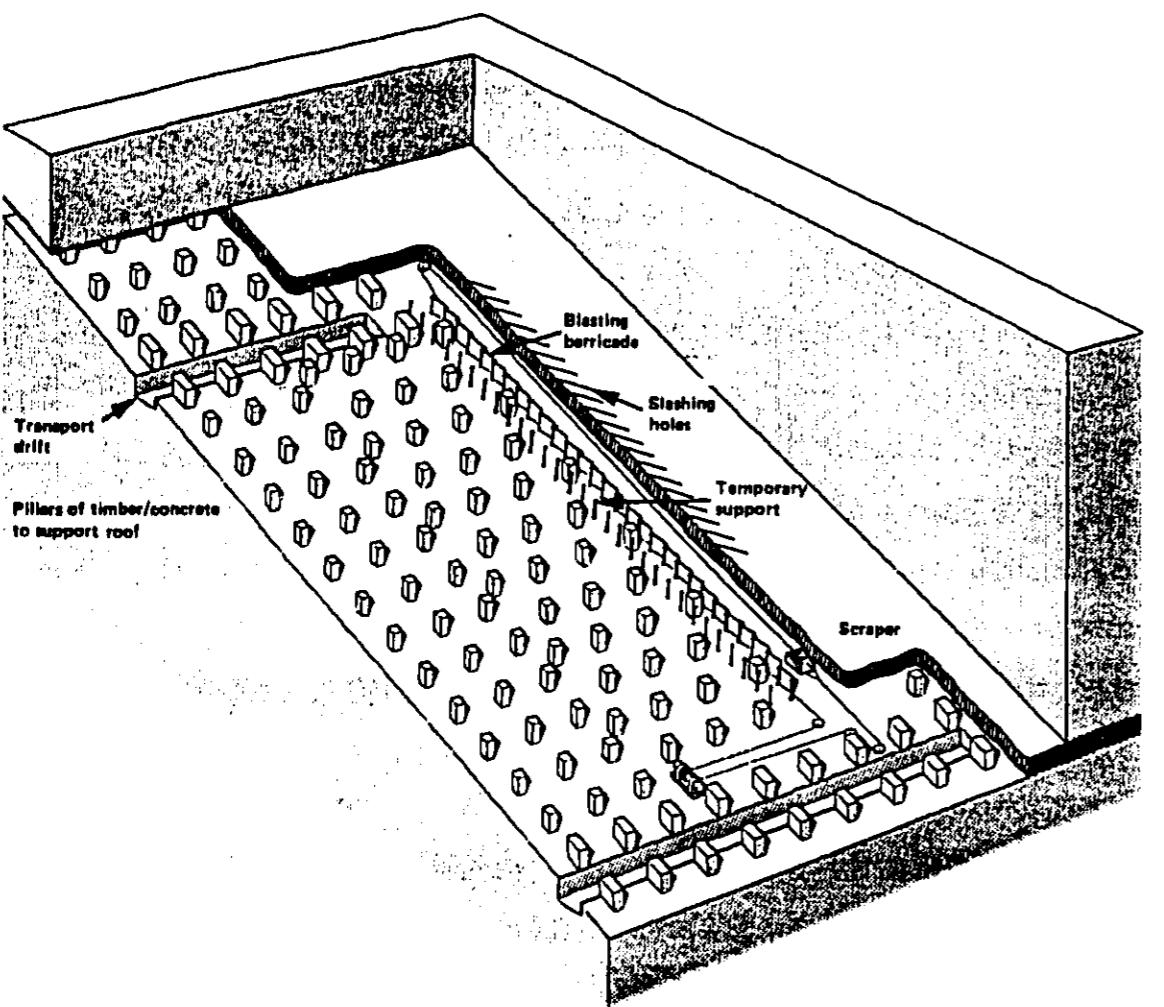


Fig. 5.9a 金属鉱山における長壁式採鉱法¹⁴⁾

Fig. 5.9bは石炭鉱山における長壁式採鉱法の一例を示したものである。1960年代に入ってから、長壁式採炭法の機械化の進歩は著しい。この図は完全機械化された長壁切羽を表したものである。

- 1) ドラムカッタ(Drum Shearer)あるいはホーベル(Plow or Plough)と呼ばれる採炭機が登場した。
- 2) パンツァコンベヤが切羽コンベヤとして使われ、分解移設の必要がなく切羽の進行にともなってフレキシブルに移動できるようになった。
- 3) 鉄柱やカッペに代わって、チョック枠(Chock)・シールド枠(Shield)などの自走支保(Self-Advancing Hydraulic Roof Support)が登場した。

これらにより、長壁式採炭法は坑内採鉱法の中でも最も採鉱コストの安い採鉱法の一つとなっている。

Fig. 5.9bに示されているように、切羽の後ろに生まれた採掘跡=払い跡(Gob)を崩落させる。しかし、地表への影響が心配される場合には、払い跡を圧気あるいは水力により完全充填したり、払い跡に木積みを残したり帯状の部分充填を行うこともある。

炭層の賦存条件によって大きさが異なるが、パネルと呼ばれる長さ:300m~1800m、幅:100m~400m程度の長方形の区画に炭層を分割する。パネルの長手方向に通気・運搬・切羽へのアクセスのための2本のゲート坑道(深坑道と肩坑道:英語ではHeadgateとTailgate)を掘進し、これらの坑道を連結する形で切羽を設けて、パネルの長手方向に切羽を進める。長壁式採炭法には、前進式(Advance Mining)と後退式(Retreat Mining)の2つの方式がある(Fig. 5.9c)。斜坑や立坑などの炭坑の基幹坑道から採炭区画の境界に向かって切羽を進めるものを前進式、逆に、採炭区画の境界から基幹坑道に戻りながら区画内の採炭を行うのが後退式である。前進式は、切羽への通路となる坑道を払い跡に残して切羽が前進するので、坑道を維持・補修することが必要であるが、出炭までの時間と経費が少なくてすむ。一方、後退式は坑道掘進によって炭層の変化や断層などの存在を探炭に先だって知ることができ、払い跡への漏気が無いなど通気上の利点がある。両方式とも利害得失を有するが、

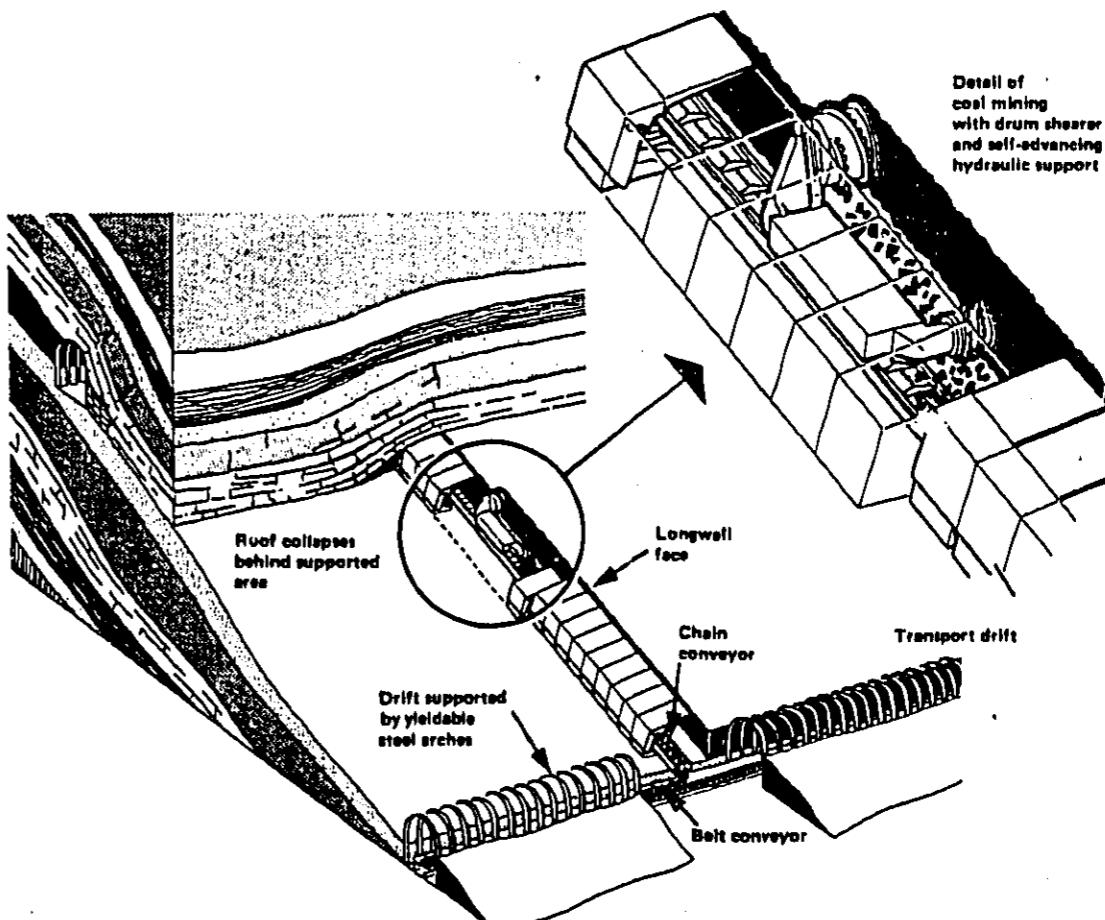


Fig. 5.9b 炭坑における完全機械化長壁式採炭法¹⁴⁾

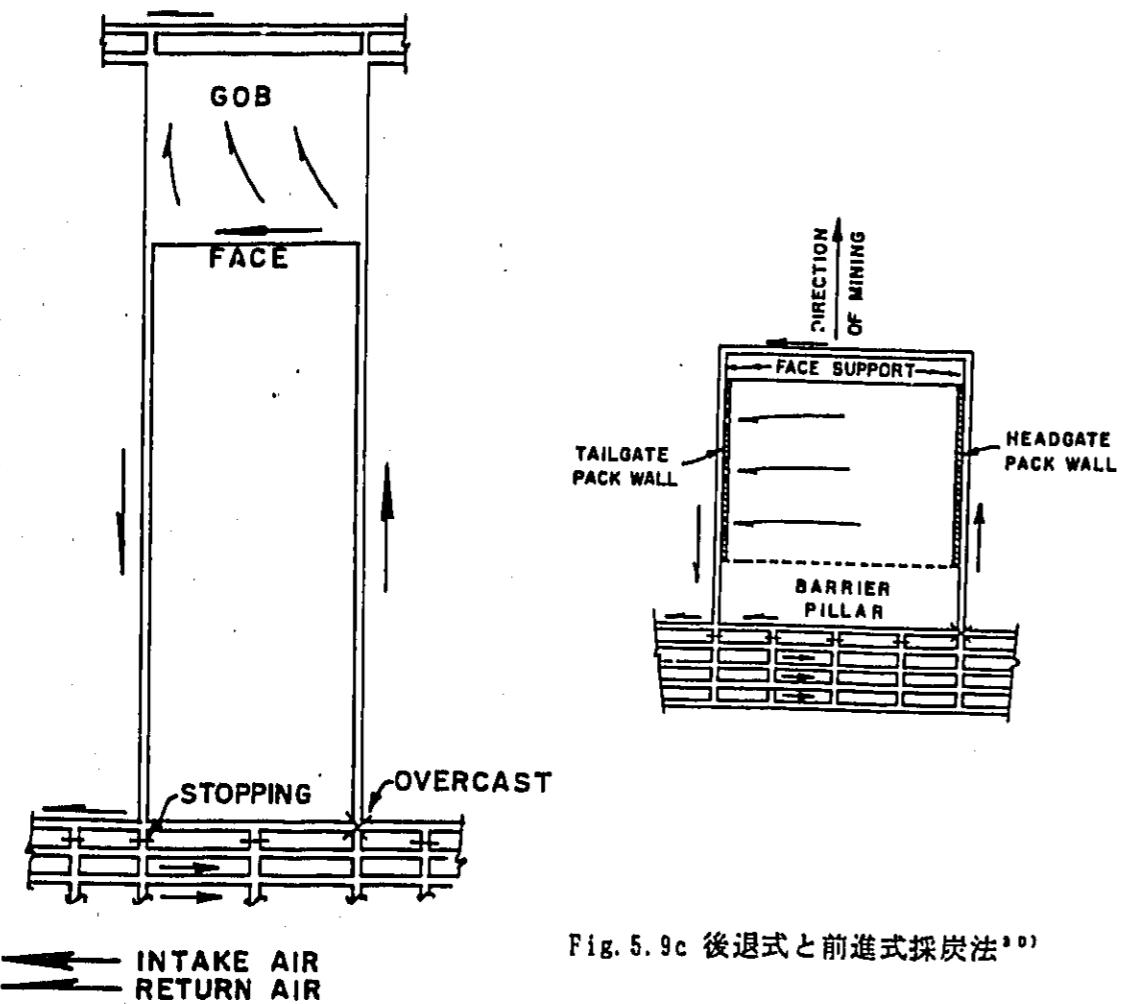


Fig. 5.9c 後退式と前進式採炭法¹⁰⁾

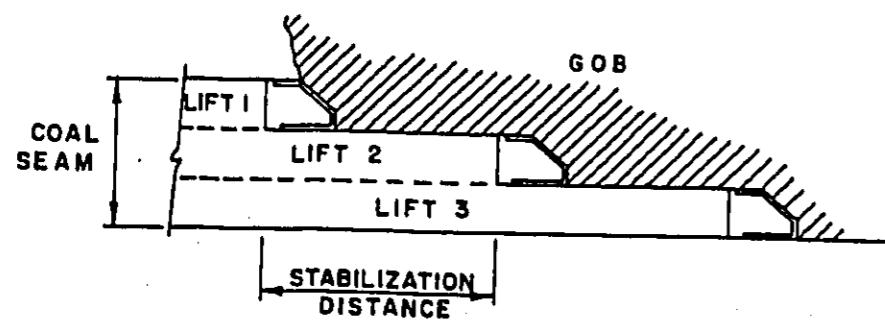


Fig. 5.9d 分層式による厚い炭層の長壁式採炭法¹⁰⁾

保安上は後退式が望ましい。

炭層の厚さが3~4m以内であると、炭層を一度に採掘するが、それ以上の厚さになると、分層採炭 (Multilift Mining)を行う(Fig. 5.9d)。最初に炭層の上部を採掘し、金網や帶板を敷いてマットとし、10~20m遅れて追いかけてくる下段採掘時の人工天盤とする方法で

ある。さらに厚い9~60mの厚層の場合には、炭層の最下底に長壁式切羽を設けて通常に採掘して、炭層の上部は崩落させ、払い跡側から崩落した石炭を回収するサブレベルケーピング法 (Sublevel Caving) が行われることもある(Fig. 5.9e)。

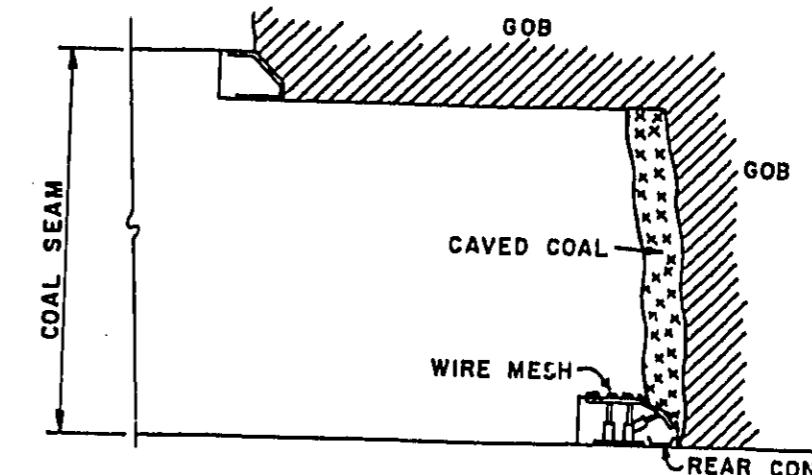


Fig. 5.9e サブレベルケーピングによる非常に厚い炭層の長壁式採炭法¹⁰⁾

以下に、長壁式採鉱法（長壁式採炭法）の特長をまとめる。

- 1) 完全な機械化が可能であり、生産性が極めて高く、大規模採掘を低い採掘コストで行うことができる。
- 2) 機械化・システム化と開発のための資本コストが高く、採掘レイアウト・採掘スケジュールの途中変更が難しいので、これらの作成を慎重に行う必要がある。例えば、採掘パネルが小さすぎると、パネル間の移動頻度が高くなるが、機械化された採鉱システムの移設には時間と経費がかさむ。逆に、パネルを大きくして切羽の集約を行うと、事故などによる切羽からの出鉱中断が鉱山全体の生産に大きな影響を及ぼす。
- 3) 石炭鉱床のような大規模で厚さの限られた比較的緩傾斜の層状・板状鉱床の採掘に適している。長壁式採炭法は70°の炭層傾斜まで適用された例があるが¹⁰⁾、主要な長壁式採炭システムの変更無しに適用し得る炭層の傾斜は0°~15°の範囲である。
- 4) 採掘跡の天盤をケープさせるので、ある程度深い鉱床が望ましい。

直上天盤が剥離し易い頁岩や砂質頁岩であると、切羽の進行とともに崩落が連続的に生じ、払い跡を満たして上載岩盤を支え、上載岩盤の沈下に対するクッションとしても働く。上載岩盤圧は未採掘領域の鉱体と払い跡の崩落岩石で分担され良好な切羽状態が得られる。しかし、採掘深度が浅すぎたり、天盤がマッシブ

な砂岩や石灰岩であると、払い跡への天盤の崩落が連続的に発生せず、異常な荷重が支保枠に作用し、重大なダメージを与える恐れもある。

- 5) 地表沈下などが心配されるときには、採掘のスピードを調節したりして、地表沈下を制御するか、採掘跡の充填を行う。

短壁式採鉱法 (Shortwall Mining) は —— 長壁式採鉱法のバリエーションの一つと考えられるが、アメリカ合衆国やオーストラリアの坑内掘炭坑に見られ、石炭採鉱における長壁式採鉱法とルームアンドピラー法の中間的な存在である。Fig. 5.9f に示すように、切羽長は名前の通り長壁式切羽よりも短く、30~60m であり、切羽支保には長壁式と同様、自走支保が用いられ払い跡も崩落させる。採炭機は長壁式と異なり、ルームアンドピラー法で使用されるコンティニュアス・マイナーが使われ、石炭の運搬はコンベヤとシャトルカーによって行われる。

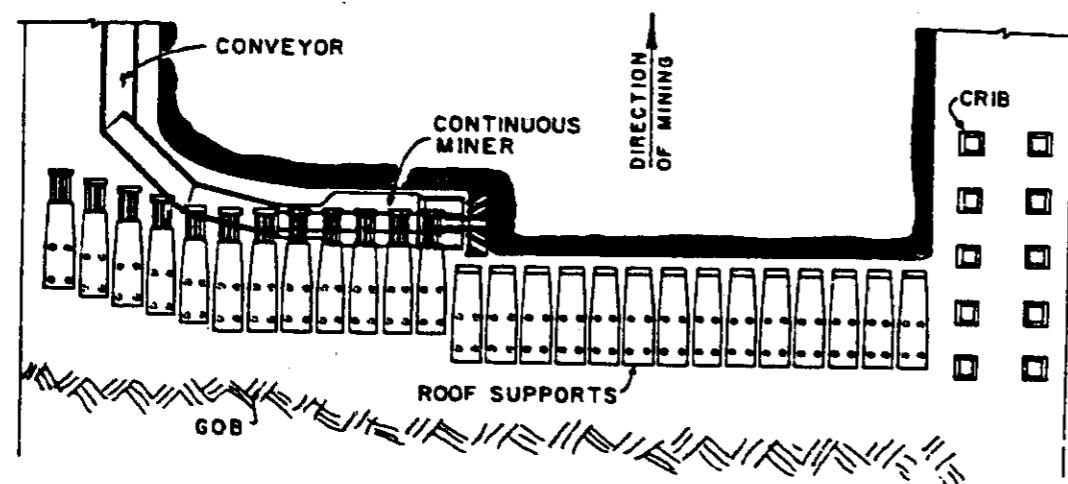


Fig. 5.9f 短壁採炭法¹¹⁾

- 1) コンティニュアス・マイナーやシャトルカーが移動できる範囲内の傾斜、ルームアンドピラー法が適用できる深さに限られる。
- 2) ルームアンドピラー法に比べると、通気は良好であり粉塵の発生も少ない。採掘実収率も高く 85% 程度が期待できる。機械類の移動が少なく、移動に消費される時間が削減され、実質的な稼働率が高い。
- 3) 長壁式採鉱法に比べると、資本コストは 1/3~1/4 であり、柔軟性がある。ルームアンドピラー法と共に採炭機械を使うので、ルームアンドピラー法から長壁式採鉱法への転換途中に導入される場合がある¹²⁾。

8) **トップスライシング法 (Top-Slicing Method)** —— トップスライシング法は、下向充填採掘法と同様な掘さく方式を取り、類似した鉱床・岩盤条件に適用し得る。下向充填採掘法が採掘跡を人工的に充填して下のスライスの採掘に進むのに対して、トップスライシング法は天盤を自然崩落させて採掘跡を充填して、下位のスライスに移る点が異なる (Fig. 5.10 参照)。

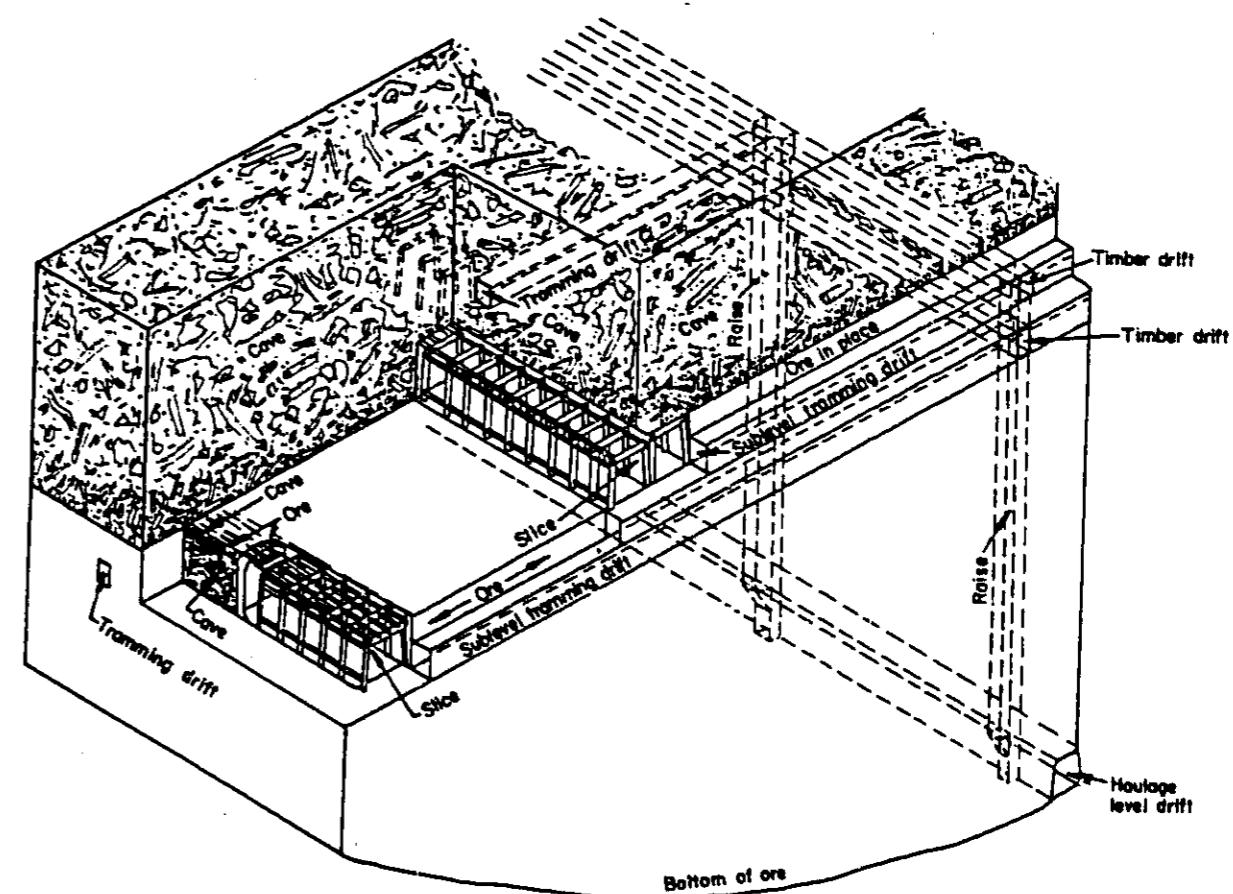


Fig. 5.10 トップスライシング法¹³⁾

充填採掘法と同様、クロスカット坑道を掘進することにより鉱石の採取を行う。このときクロスカットは、坑木を使って三ツ留枠などの支保が行われ、採掘が終了すると踏前・坑道床面には板や矢板をマットとして敷き、崩落した天盤が鉱石と混じることがないようになる。これらの作業が完了すると、支保枠を発破によって払いクロスカットの天盤を崩落させる。一つのクロスカットの採掘と天盤の崩落が完了すると隣のクロスカットを掘進し、採掘-留め付け-マット敷き-留め付け払いを繰り返し、鉱画の外側から中心に向かって後退式で採掘を進める。一つのスライスの採掘を完了すると下のスライスに移る。採

掘が進んで何段かのスライスが採掘されると、採掘切羽の天盤は崩落した岩石と坑木・マットが敷き詰まった形となる。後に、これは人工天盤の発想につながり、下向充填採掘法がトップスライシング法に取って代わるようになった。

トップスライシング法は、鉱石は爆破により採掘するが採掘跡の天盤を自然崩落させるので長壁式採鉱法と同様、ケーピング法に分類するのが普通である。しかし、坑木支保を行って、採掘中のクロスカットと切羽を支持するので支保採鉱法に分類することもできる。

トップスライシング法の特長は次のように要約できる。

- 1) 鉱石と母岩がともに軟弱で、支保なしには採掘できない比較的広がった鉱体の採掘に適用できる。
- 2) 他のケーピング法と同様、天盤は崩落し易く、しかも地表沈下・地表陥没が問題とならないことが必要である。
- 3) 選択採掘が可能である。採掘実収率は高く(90~98%)、ズリ混入率は低い。
- 4) 岩盤条件が悪くても適用でき、しかも、作業監督が適切に行われれば安全な採鉱法である。
- 5) しかし、坑木の消費量が多く、支保とマット敷きあるいはこれらの運搬のために労力が必要である。このため、採鉱コストは高く、生産性は低い。
- 6) 出鉱に先立つ準備期間が比較的長く、開発作業や準備作業が十分になされていないと出鉱量の調整が難しい。
- 7) 切羽内の通気が不良であり、特に、硫化鉱の場合には酸化し易いので発熱による自然発火の恐れもある。

9) サブレベルケーピング法 (Sublevel Caving) — 現在のサブレベルケーピング法はスウェーデンの鉄鉱石鉱山で改良されたものである。比較的堅固な鉱石の採掘に使用されるが、サブレベルケーピング法の原型は支保を払うとケープする強度の弱い鉱石の採取に適した手法であった。軟弱な鉱体中にトップスライシング法よりは坑道の間隔を広くとり、鉱体の上盤側から坑道の支保を取り払い、天盤の鉱石を自然崩落させる。崩落した鉱石をスラッシャーで掻き出すが、ズリの出方を見てある程度以上になると鉱石の抽出を止め、下盤側に後退するというものであった。ズリの混入率が高く、鉱石の実収率は低い、採鉱能率の悪い採鉱法であったが、スウェーデンの鉄鉱石鉱山において高度に機械化され、高能率採鉱法に生まれ変わった¹⁴⁾。

サブレベルケーピング法の概念をFig. 5.11aに示す。サブレベルケーピング法は急傾斜

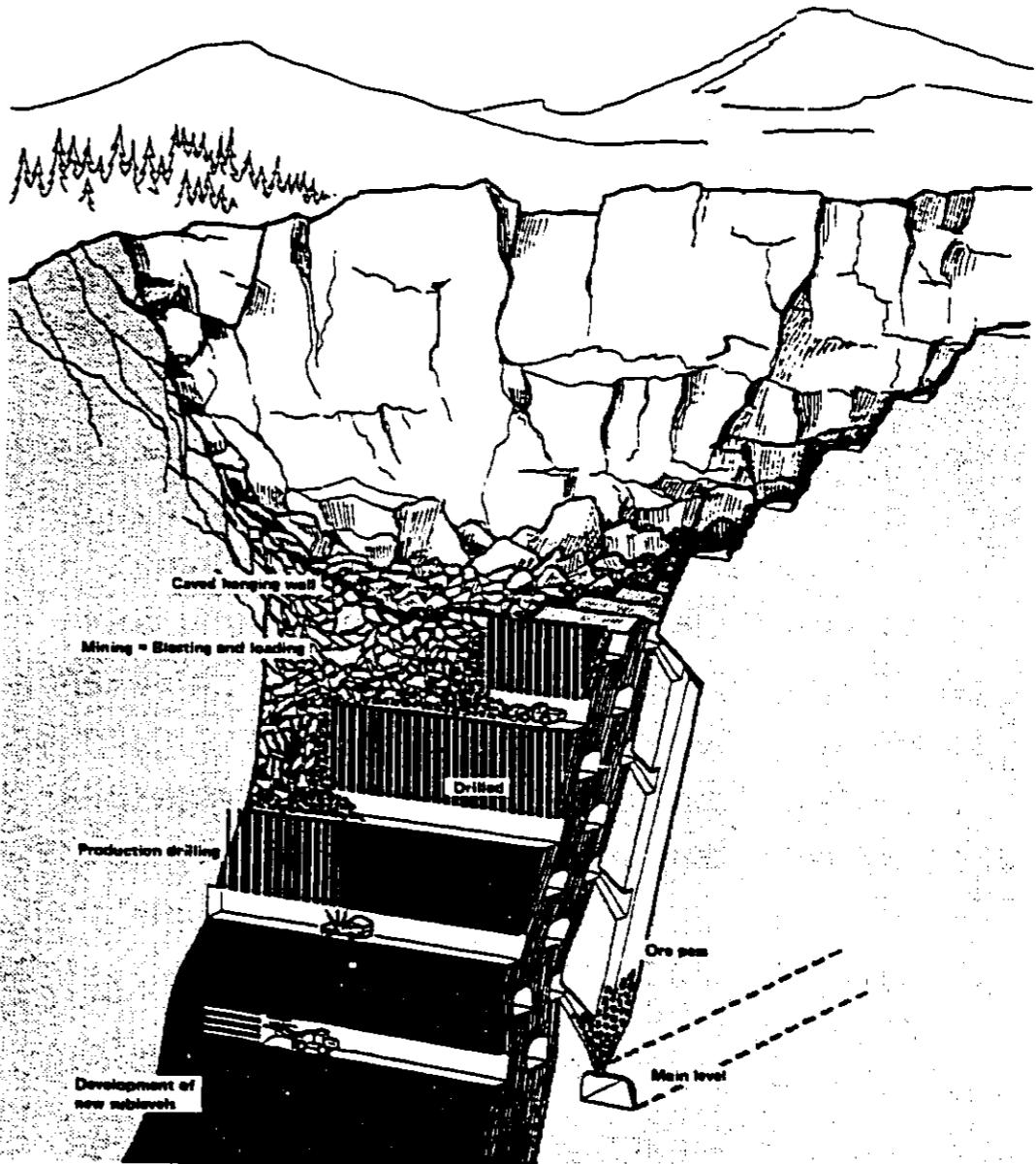


Fig. 5.11a サブレベルケーピング法¹⁴⁾

の鉱体もしくは大規模な鉱体の採掘に適している（垂直方向に伸びた鉱体がより望ましい）が、開坑作業・採掘作業は以下の手順にしたがって行われる。尚、鉱床の厚さが20m以下の場合には、縦型配置が取られ抽出坑道は鉱床の走向方向に設けられる。ここでは、鉱床が厚い場合に取られる横型配置について述べる。

- 1) 鉱体を垂直方向に7.5~15mの間隔に分割しサブレベルを設ける。各サブレベルの下盤側に主要レベルに通じる運搬坑道を走向に沿って掘さくする。
- 2) 次に、この運搬坑道から何本もの水平なクロスカットを1~10mの間隔で互いに平行に掘進し、鉱体を貫通して鉱体の上盤際まで掘さくする。クロスカットの配置

を示す縦断面図と横断面図をFig. 5.11bに示す。

- 3) Fig. 5.11bにあるようにクロスカットは千鳥型に配置され、各クロスカットから直上サブレベルを越えて2つ上位のサブレベルに至るまでの領域が、各クロスカットの受け持ち領域である。この領域内の鉱石を破碎するために上向きの長孔穿孔を行い、分担領域内の破碎した鉱石をこのクロスカットから抽出する。
- クロスカットの水平間隔が広いときには、扇状パターンの長孔穿孔が行われ、水平間隔が狭いときには平行パターンの長孔穿孔が行われる。平行パターンの方が破碎成績が良いとされている。
- 4) 各クロスカットの先端では、上向きに鉱体境界に沿ったスロット・レイズ(Slot Raise)を切上り、次いで、これを分担領域の形までに拡幅する。
- 5) スロットの掘さく後、スロットを自由面とする発破を行うための上向きの長孔穿孔を行い、最小抵抗線長は1.2~1.8mとする。
- 6) 1ないし2断面分の長孔穿孔が終了すると発破を行う。その後、LHDにより、クロスカットに落ちた鉱石を積み込み、搬出する。
- 7) 上記の開坑・採掘作業は最上位のサブレベルから始まる。採掘が始まったばかりのときは鉱床の被覆岩盤(帽子岩:Capping)や上盤のケーブが起きないが、採掘

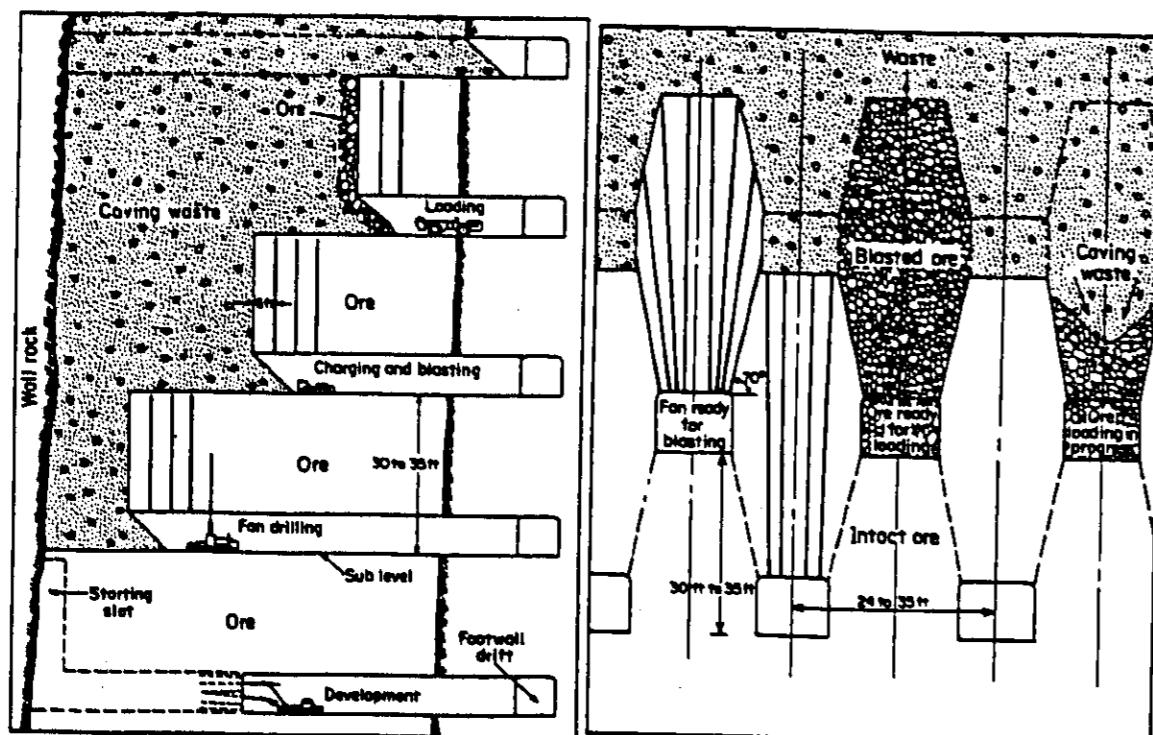


Fig. 5.11b サブレベルケーピング法切羽の縦断面図と横断面図¹¹⁾

が進むと被覆岩盤や上盤の崩落が始まり、鉱石を抜き取った後の空洞に岩石が崩落して空洞を埋める。

- 8) したがって、採掘がある程度進むと、岩石ズリが鉱石に混じって、鉱石積込口に現れる。そして、予め決められた管理基準以上にズリがあらわれたならば抽出を打ち切り、1ないし2断面分後退して、長孔穿孔-発破-鉱石抽出を繰り返し、最後に下盤際まで後退して、このサブレベルの採掘を終了する。
- 9) 開坑と採掘は上位のサブレベルから下位のサブレベルへと順次移行するが、あるレベルでは長孔穿孔を先に行い、下位のレベルに長孔穿孔機を移動してから、このレベルの発破と鉱石抽出を行うことができる。したがって、Fig. 5.11bにあるように、レベルごとに坑道掘進(開坑作業)、長孔穿孔、発破・抽出を独立に分けて行うことができ、しかも、他の作業と干渉することがない。サブレベルケーピング法は非常にシステムティックな採鉱法であり、高度に機械化された高能率採鉱法となっている。

サブレベルケーピング法が成功するためには、鉱床の被覆岩盤と上盤の崩落し易さ、正確な長孔穿孔技術と発破設計、鉱石抽出のコントロールと品位管理が重要である。

鉱床の被覆岩盤と上盤が連続的に崩落して、鉱石の抽出によって生まれた空洞を埋めないと、崩落が突然起きて、空洞が潰されるときに起るエアーブラスト(圧風:Air Blast)による被害や、発破したときに鉱石が空洞内に飛散する恐れが生まれる。

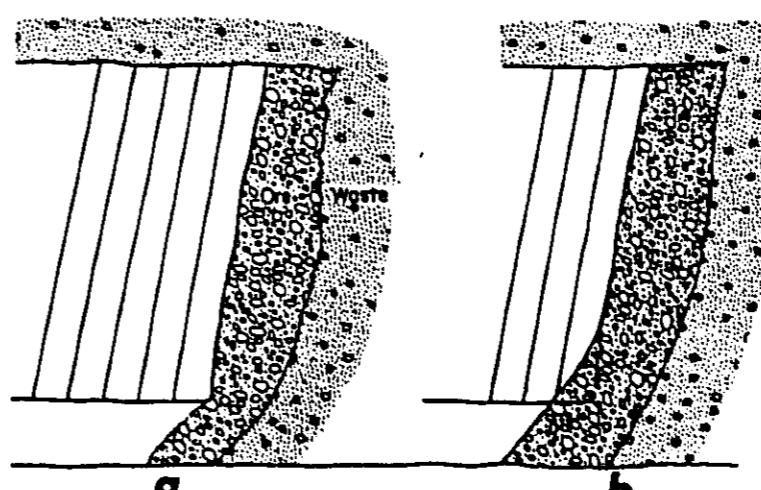


Fig. 5.11c サブレベルケーピング法積込口
(a: 強いあご面, b: 弱いあご面)¹¹⁾

それぞれのクロスカットが分担する領域内の鉱石を確実に破碎し、掘り残しをせず、しかも、破碎成績を上げるためにには、正確な穿孔と薬量計算が必要である。鉱石の抽出跡は崩落したズリにより埋められるので次の発破のときは完全な自由面とはなっていないので、通常よりも2倍程度の薬量原単位が必要である。

また、あご面を傷めないよう

にしなければならない。Fig. 5.11cのbのように、あご面を欠落させると、装薬作業に支

障を来たし積み込み機の負担も増加する。また、起碎鉱石の流動にも影響を及ぼし残鉱率やズリ混入率が増える³³⁾。

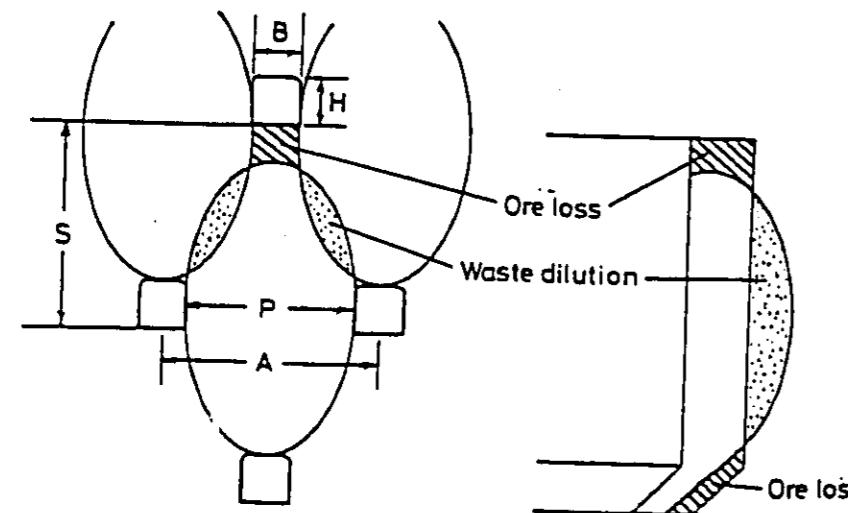


Fig. 5.11d
サブレベルケーピング法における残鉱と
ズリ混入発生箇所³³⁾

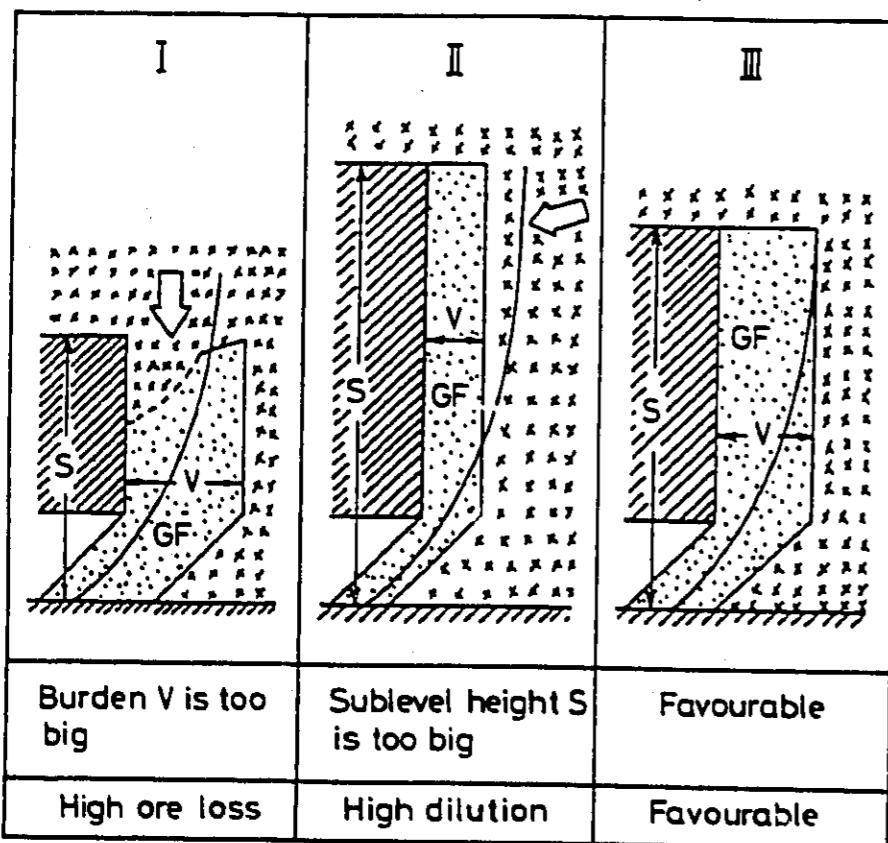


Fig. 5.11e
サブレベル間隔と
最小抵抗線の関係³⁴⁾

サブレベルケーピング法では、起碎した鉱石は手前の未発破鉱石と接する以外は、その上面も前面もまた両側面も崩落したズリと接している(Fig. 5.11d)。そこで、採掘実収率を上げ、ズリ混入率を下げるためには、最小抵抗線長(V)とサブレベルの垂直間隔(S)をどのように選ぶかが大切である(Fig. 5.11e)。 V/S が過大であると上部からのズリ混入が早まり、抽出坑道に落ちた鉱石の積み出しを早めに断念せざるを得なくなり、鉱石の残鉱

率が大きい(採掘実収率が低い)。逆に、 V/S が過小であると前面からのズリ混入が多く、起碎鉱石の上部までを抽出しようとするとズリ混入率が大きくなる。積み込み機の突っ込み深さを考慮して、適正な V/S を選ばなければならない。また、起碎鉱石の粒度がズリの粒度よりも大きい場合には、あご面に角度をつけて起碎鉱石の流動性を高めることも行われる。

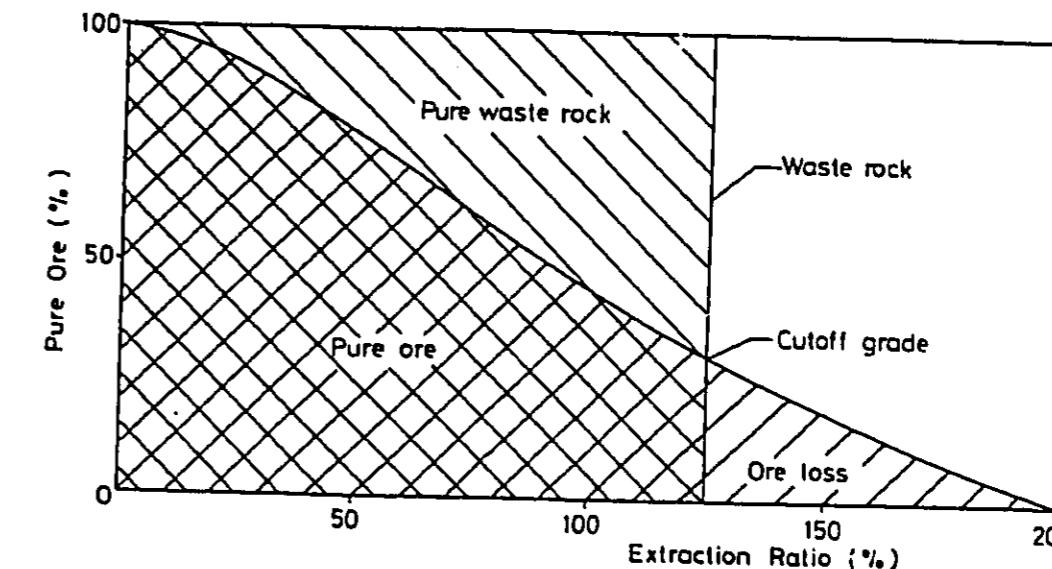


Fig. 5.11f 抽出曲線³⁴⁾ (鉱石積込口における抽出にともなう見かけの鉱石品位低下)

抽出開始直後は、起碎鉱石が多く抽出されるが、次第に、ズリの出てくる割合が増えてくる(Fig. 5.11f)。そこで、どの時点で抽出を止めるかが問題となる。鉱石の持つ経済価値や採掘コストなどからカットオフ品位を設定し、抽出した鉱石とズリの混合物の品位がカットオフ品位以下になれば抽出を止める訳であるが、いつカットオフ品位を割ったかを判定することが問題である。鉱石とズリが肉眼で識別できる場合には、積み込み機のオペレータに予めカットオフ品位を割る鉱石とズリの比率を指示しておき、抽出の中止はオペレータの眼でみた判断に任せる方式を取ることができる。鉱石とズリの肉眼による識別が困難な場合には、サンプリングと品位分析を行って、抽出中止点を決めざるを得ないが、実際には非常に困難である。一般には、起碎鉱石とズリの流動特性を把握して、カットオフ品位を割るまでの抽出鉱量を予想し、サンプリングと品位分析を併用して抽出中止点を定める。

サブレベルケーピング法の特長をまとめると、

- 1) 急傾斜の鉱体もしくは垂直方向に伸びた鉱体に適用することができる。鉱体の形が不規則であっても、また、比較的狭い脈状鉱床にも適用でき、その適用範囲は

広い。しかし、地表陥没が許されない場合には、他のケーピング法と同様、不適である。

- 2) 上盤・被覆岩盤がケープすることが必要条件であるが、鉱石自身は最小限の支保で安定であるような強度を持つことが求めらる。
- 3) 比較的断面の小さいサブレベル坑道内で作業が行われるので、比較的安全である。しかし、サブレベル坑道は盲坑道であるので、通気条件が悪い。
- 4) 高度の機械化・システム化が可能であり、高能率で大規模な採鉱に適している。
- 5) 採掘実収率は比較的高い。ピラーを残さないのでピラー回収の必要がない。
- 6) 開坑作業量が多く、採鉱コストも比較的高い。しかし、開坑初期から全出鉱量の15~20%に相当する鉱石がズリ混入なしに採掘できる。
- 7) サブレベルケーピング法の最大の課題は、鉱石の抽出が始まってからのズリ混入であり、これに対処するため、穿孔・発破技術の向上や抽出管理・品位管理の厳密さが求められる。
- 8) ブロックケーピング法と比較すると、適用範囲は広い。鉱石がケープしにくい、上盤のズリ混入の恐れがある、鉱床が狭かったり形状が不規則であるなどの問題がある場合には、サブレベルケーピング法の方が優れている。

- 10) ブロックケーピング法 (Block Caving) —— ブロックケーピング法は第1次世界大戦後、アメリカ合衆国南西部のボーフィリー・カッパー鉱床の採掘に実用化され¹³⁾、低品位大規模鉱床の採掘に適した採鉱法であることが認められた。その後、モリブデン鉱床、スペリオル湖周辺の赤鉄鉱々床、スペイン北部の褐鉄鉱々床、南アフリカのダイヤモンド鉱床、カナダのアスベスト・ニッケル鉱床、ペンシルヴェニアの磁鉄鉱々床などの採掘に次々に用いられた。

ブロックケーピング法は坑内採鉱法の中で採掘コストの最も低い採鉱法であり、しかも、大きな生産量が期待できる。しかし、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ので、ケーピング法の中でも大規模な鉱床の採掘に適している。鉱体の下部をかなりの広範囲にわたる下透し (アンダーカット: Undercutting) を行って、その上部の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 (Fig. 5.12a)。鉱石の特性がケーピングに適していると、抽出作業にとって適度な粒度に鉱石は自然に破碎される。ブロックケーピング法は、崩落を誘発するのに十分なアンダー

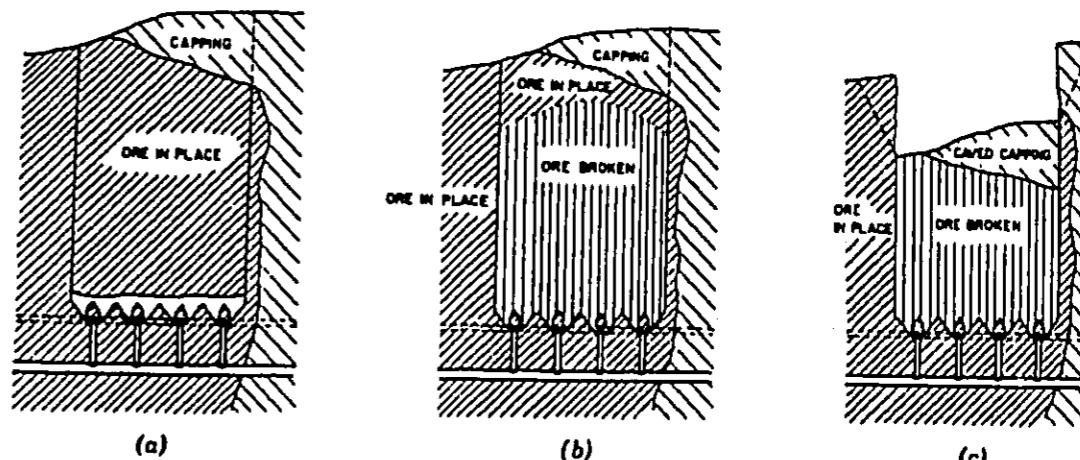


Fig. 5.12a ブロックケーピング法におけるケーピングの進展(a → b → c)¹³⁾

カットが行なえるほどの底面積を持った鉱床に限られるが、大規模な塊状鉱床が最もこの条件に当てはまる。それ故、条件が整えば、ブロックケーピング法は最も採掘コストの安い坑内採鉱法であり、大規模低品位鉱床に適した採鉱法である。

しかし、ブロックケーピング法には、鉱石の特性を始めとして、厳しい条件と制約が存在する。鉱床の特性がふさわしくなかった場合にブロックケーピング法を誤って実施すると、被る損失（残鉱量）は他の採鉱法では考えられないほどに大きい。また、ブロックケーピング法は柔軟性に欠ける採鉱法でもあるので、その成功には、適切な採鉱計画・採鉱システム・生産管理と経営判断が欠かせない¹⁴⁾。

鉱床の形は規則的であり、鉱床の境界は垂直に近いことが望ましい。鉱床が枝分かれして母岩の中に伸びていたとしても枝分かれした鉱石は、ブロックケーピング法では回収できない。逆に、鉱床内の低品位部分を掘り残すこともできないので、規則的な形を持ち品位分布が均質である鉱床がブロックケーピング法に適している。ブロックケーピング法では、キャッピングと貧鉱による多少のズリ混入、抽出口間に鉱石が残ることは避け難い。

鉱床上部の被覆岩盤(Capping)は、鉱石の崩落とともに崩落し、その重量によって崩落した鉱石をさらに細かく破碎する。鉱石よりも粗く壊れて摩耗しにくい被覆岩盤が理想的である。しかし、余りに碎けにくくても、かみ合いによるアーチを形成し易いので難がある。一方、鉱石よりも細かく碎ける被覆岩盤は鉱石中に混入して、Fig. 5.12bに描くようなチャンネリング(Channeling)を起こし、鉱石よりも早く抽出口に出て、抽出を断念させる場合がある。

鉱石や岩石がケーピング法に適しているか否かをケーバビリティ (Cavability) という用

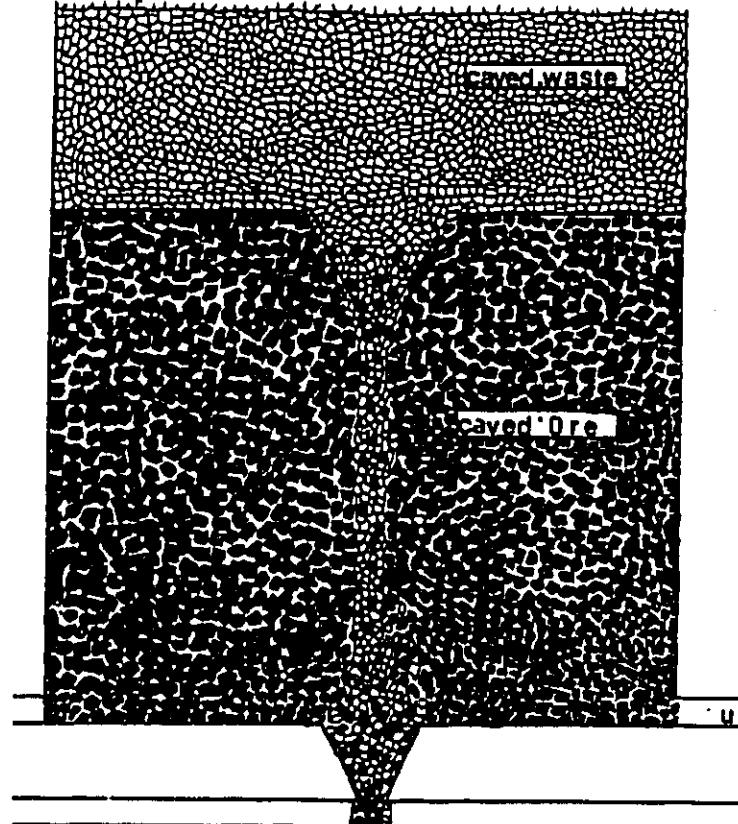


Fig. 5.12b チャンネリングによるズリ混入¹⁰⁾

口を速やかに通過するケーバビリティの良い鉱石と表現されるであろう。しかし、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恐れがある。多くの場合、抽出開始直後は大塊が生まれ易く、最初の30%の抽出中に小割発破のコストが最も高い。抽出が進んで壊れた鉱石の流動が始まると、鉱石間の応力の再分配が起こって鉱石がさらに碎かれたり、摩損したりして、鉱石のサイズが小さくなると予想される。したがって、抽出口を通過した鉱石の少なくとも50%が1.5m以下のサイズであれば、鉱石のケーバビリティは良好であると判定できる¹¹⁾。ケーバビリティの良い鉱石は小割発破を余り必要としないので、小割発破に要した爆薬量でケーバビリティの目安とすることができます。また、岩盤中に含まれる亀裂の頻度・密度は、ボーリングコアのR Q D (Rock Quality Designation)と良い相関を持つので、R Q Dもケーバビリティの目安となる。

ブロックケービング法には、3つの手法がある。すなわち、(1)鉱体を比較的正方形に近いサブブロックに分ける方法、(2)長めの長方形に分けるパネルケービング法 (Panel Caving)、(3)鉱体をブロックやパネルに分割せず全体をまとめてケーブさせるマスケービ

ング法 (Mass Caving)である。

語によって表す。ケーブし易くしかも適度の細かさに碎けるとき、この鉱石や岩石はケーバビリティが良好であると評する。ケーバビリティを支配する最大の要因は、鉱床や岩盤中に発達した割れ目や亀裂である。通常、岩盤中には何組かの方向や密度の異なる割れ目系・亀裂系が存在している。ケーバビリティには、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。アンダーカットによって、鉱体中の割れ目系・亀裂系が分離して最初の崩落が始まる。割れ目の間隔が密であれば、抽出

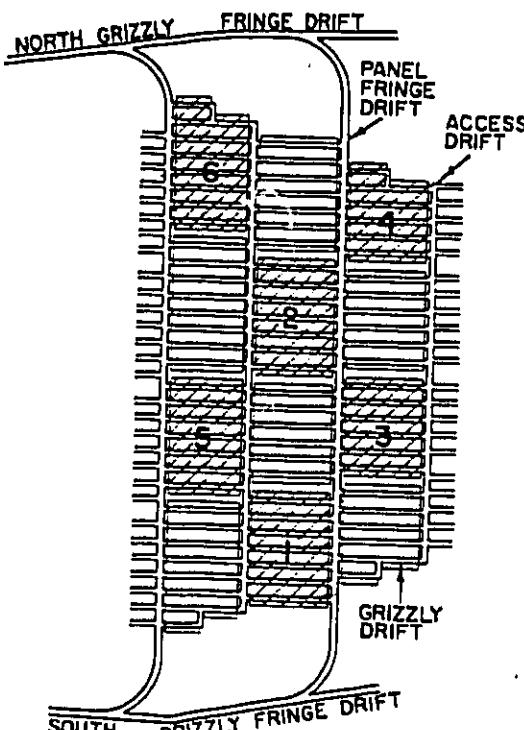


Fig. 5.12c ブロック法におけるアンダーカットの順序¹²⁾

- 1) ブロック法(Fig. 5.12c)は、30m×30m～100m×100mの領域を単位として、この中では一挙にアンダーカットを行い、鉱体と被覆岩盤の接触面を水平に保つよう均一なドローイング(Drawing)を行う。鉱床が亀裂に富み鉱石が細かく碎け易い場合に適しているとされる。アンダーカットの面積が広いほどケーブし易いが、広すぎると抽出・運搬レベルに大きな荷重が作用するので注意する必要がある。
- 2) パネル法は、一つの方向によく伸びた鉱床や、ブロック法よりもケーブしにくい鉱石に適しているとされている。パネルを短冊状に区切って、パネルの一端から他端へ短冊ごとにアンダーカットを進める。鉱石と被覆岩盤の接觸面が傾いた平面を保つようにアンダーカットとドローイングを制御する(Fig. 5.12d)。

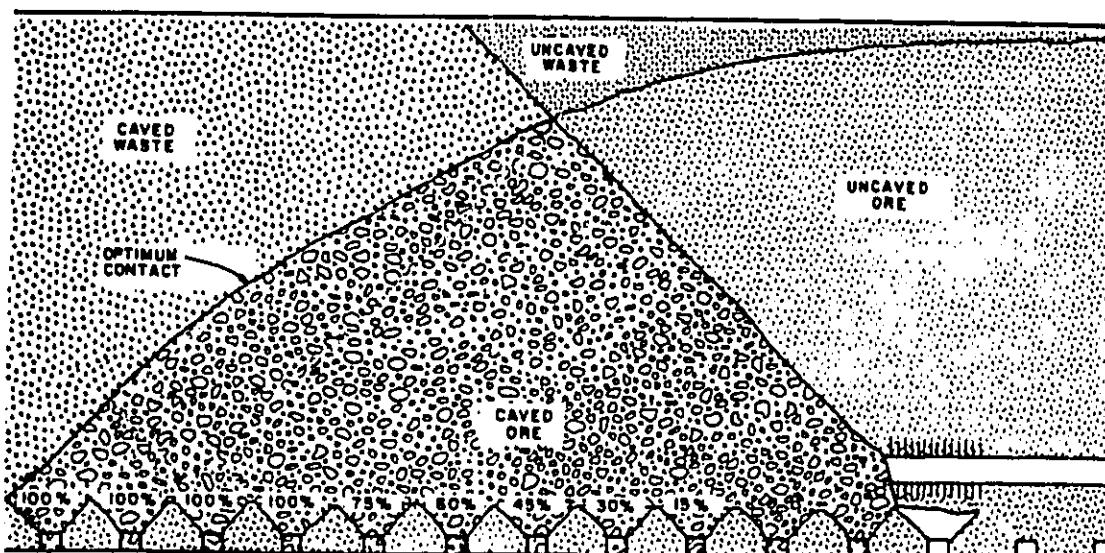
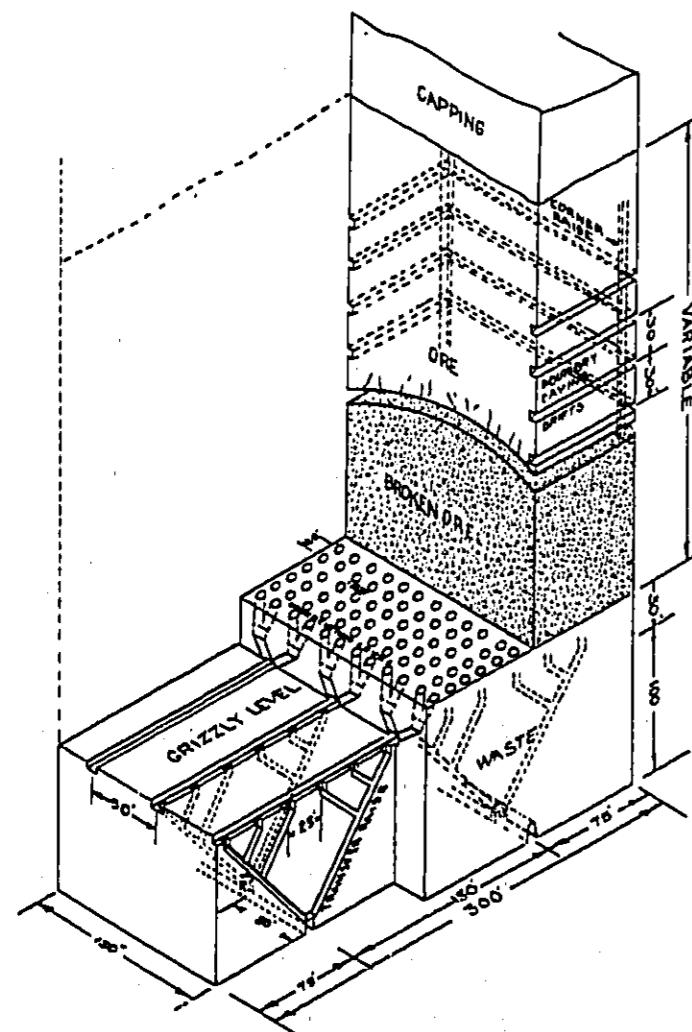


Fig. 5.12d パネル及びマスケービング法における抽出コントロール¹³⁾

3) マスケーピング法は、ケーバビリティの悪い鉱石に適しており、鉱体の上盤から下盤まで、あるいは端からもう一方の端までを、順次アンダーカットする。この場合も鉱石と被覆岩盤の接触面が傾いた平面となるように、アンダーカットとドローリングのコントロールを行う。

アンダーカットの面積が小さすぎるとケーブを起こさない恐れがある。逆に、広すぎるとケーブは起きても抽出レベルや運搬レベルに大きな荷重が作用して、坑道やレイズが傷み易く、維持・補修に手間がかかる。したがって、ブロックケーピング法では両者の兼ね合いが大切である。ケーブを起こしにくく予想される場合やケーブの範囲を限定したい場合には、アンダーカットに先だって、鉱体の側面に切れ目となる空洞や坑道・切上を掘さくしたり、発破により亀裂を入れる場合もある。——これらを“Boundary Weakening¹⁴⁾”と称している(Fig. 5.12e)。



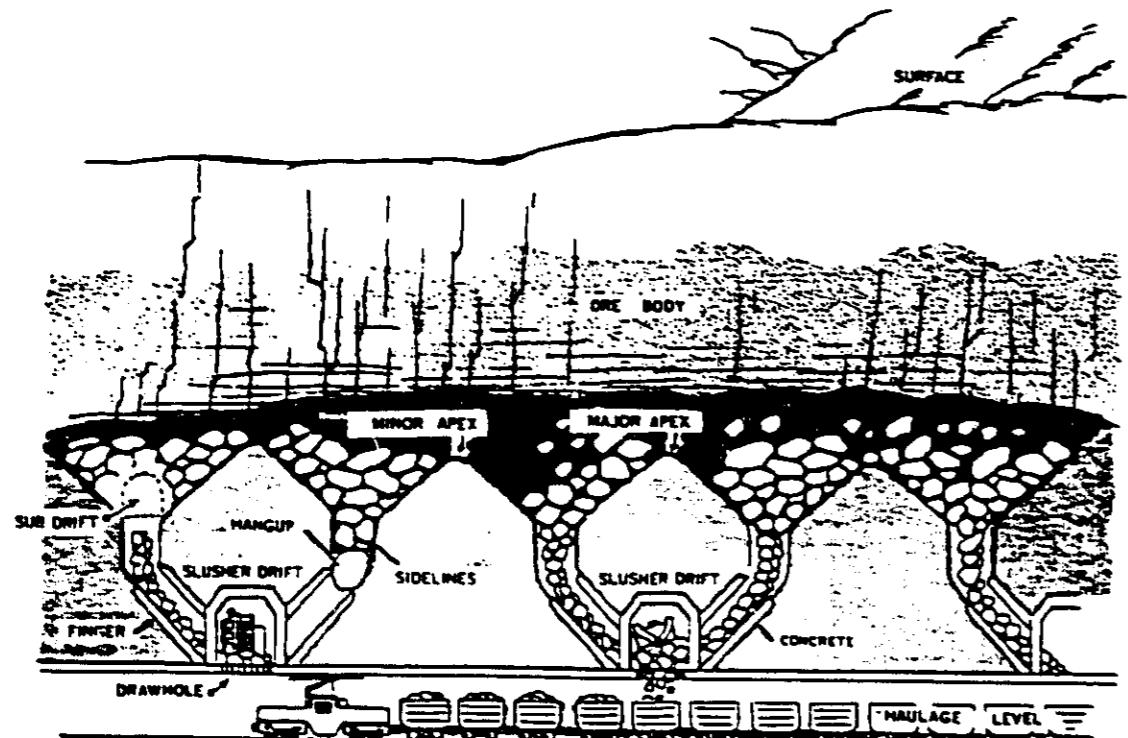


Fig. 5.12g ブロックケービング法におけるスラッシャー式鉱石抽出法¹⁾

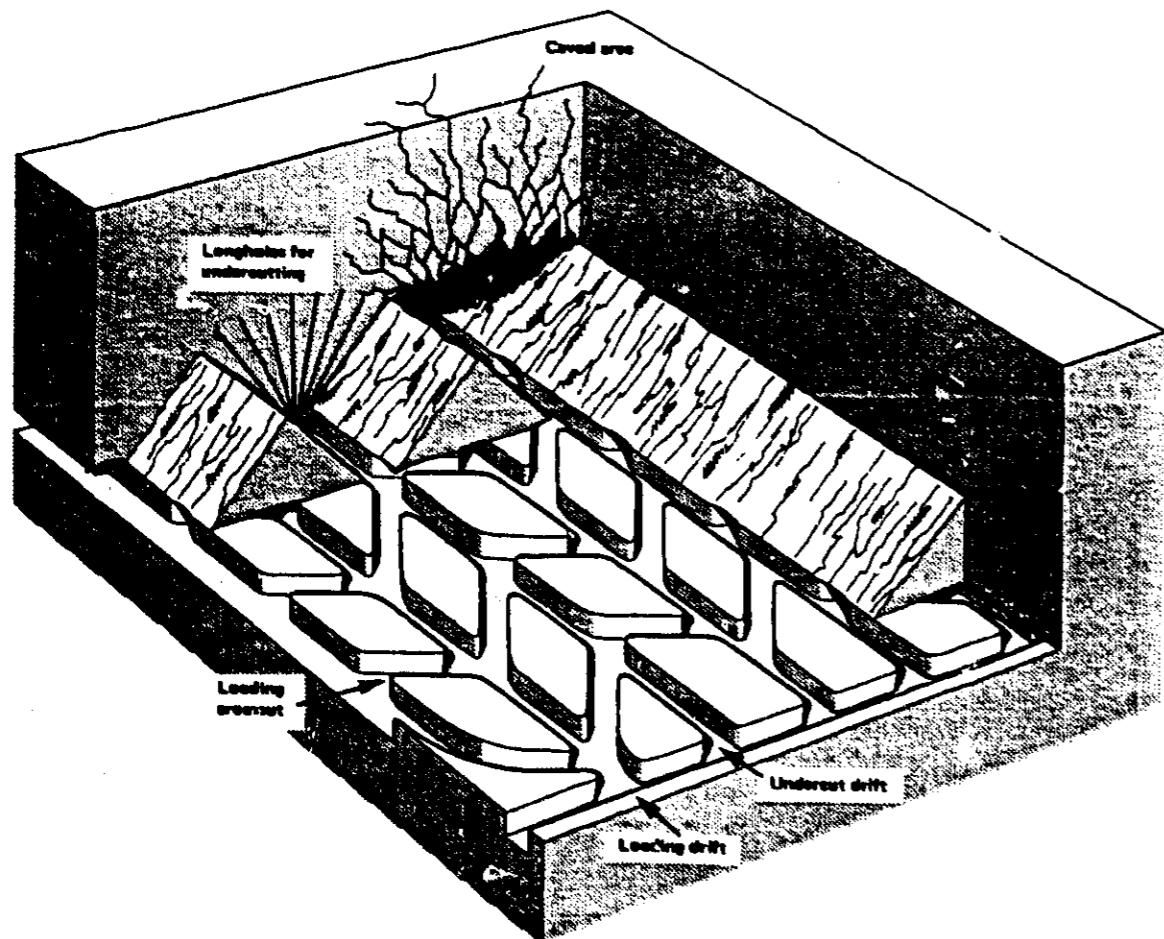


Fig. 5.12h ブロックケービング法におけるLHD式鉱石抽出法¹⁾

抽出口の間隔(Fig. 5.12i)をどれ位に選ぶかはブロックケービング法では重要である。一つの抽出口に出る鉱石の面積あるいは体積は限られており、抽出口がその上部の鉱石に影響を及ぼして流動を促す範囲をドローゾーン(Zone of Draw)と呼ぶ。ある抽出口のドローゾーン内にある鉱石は必ずその抽出口から抜け出る。抽出口の間隔が広すぎると、どの抽出口のドローゾーンにも属さない領域が抽出口間に生まれ、この中にある鉱石は抽出されないのでロスとなる。一方、間隔が狭すぎるとドローゾーンが重なり合い、重なり合った領域内では鉱石の抽出速度が加速される。場合によっては、チャンネリングが起こり易くなり、被覆岩盤のズリ混入を招く。ドローゾーンが少しづつ重なり合っているときが、最適であろう。ケーバビリティの良い細かく碎けた鉱石ほど抽出間隔は狭く、ケーバビリティの悪い鉱石ほど抽出間隔が広い。しかし、抽出口の間隔はドローコントロールだけでは決まらない。抽出レベルや運搬レベルにかかる荷重を考慮して、荷がかかりすぎる場合には間隔を狭めることが難しい。抽出口の間隔を決めるのは重要な作業である。似たような条件を持つ他の鉱山の経験を参考にして決められ、操業が始まるとからも抽出口の間隔がしばしば変更される。

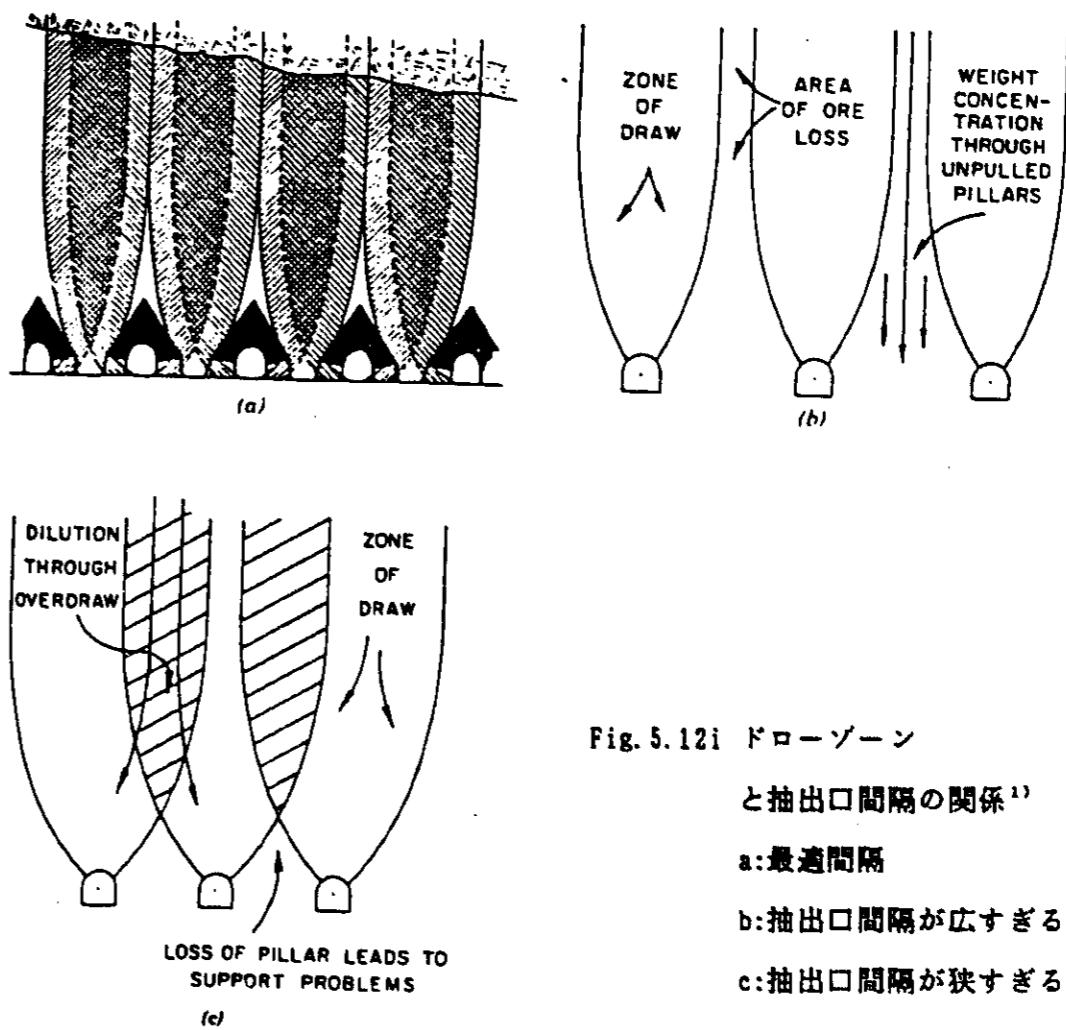


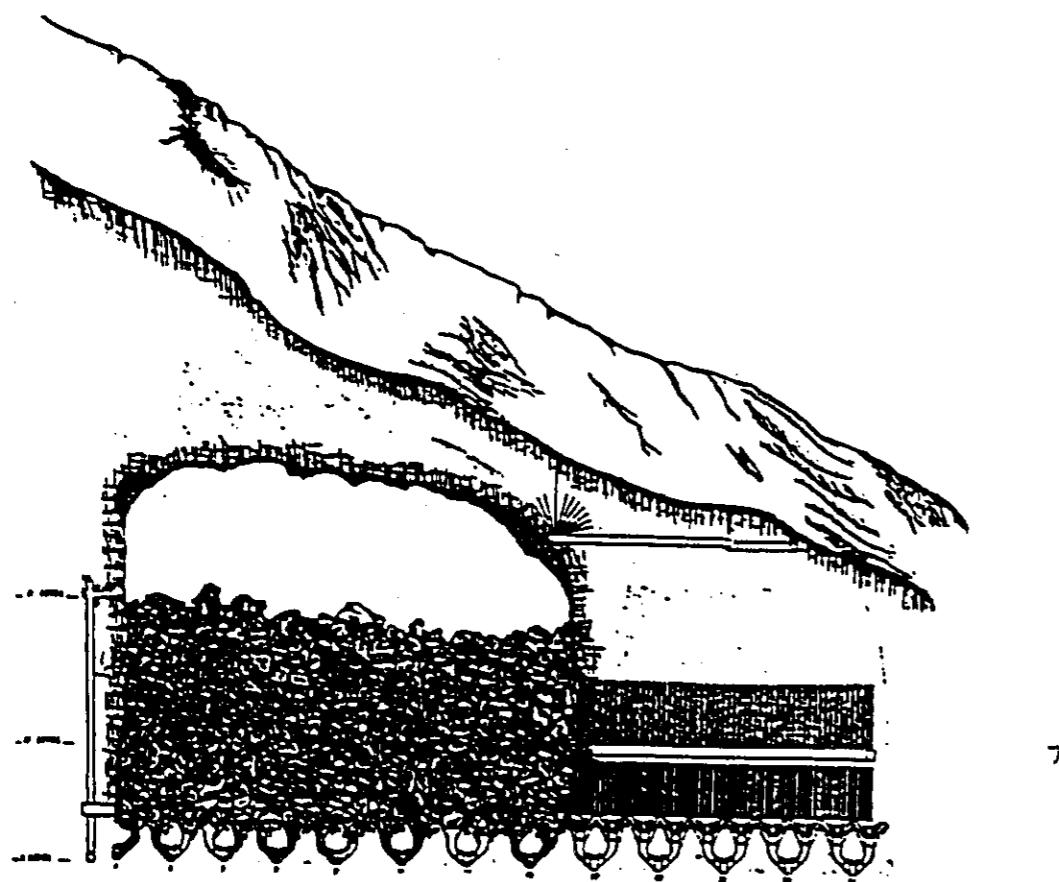
Fig. 5.12i ドローゾーン

と抽出口間隔の関係¹⁾

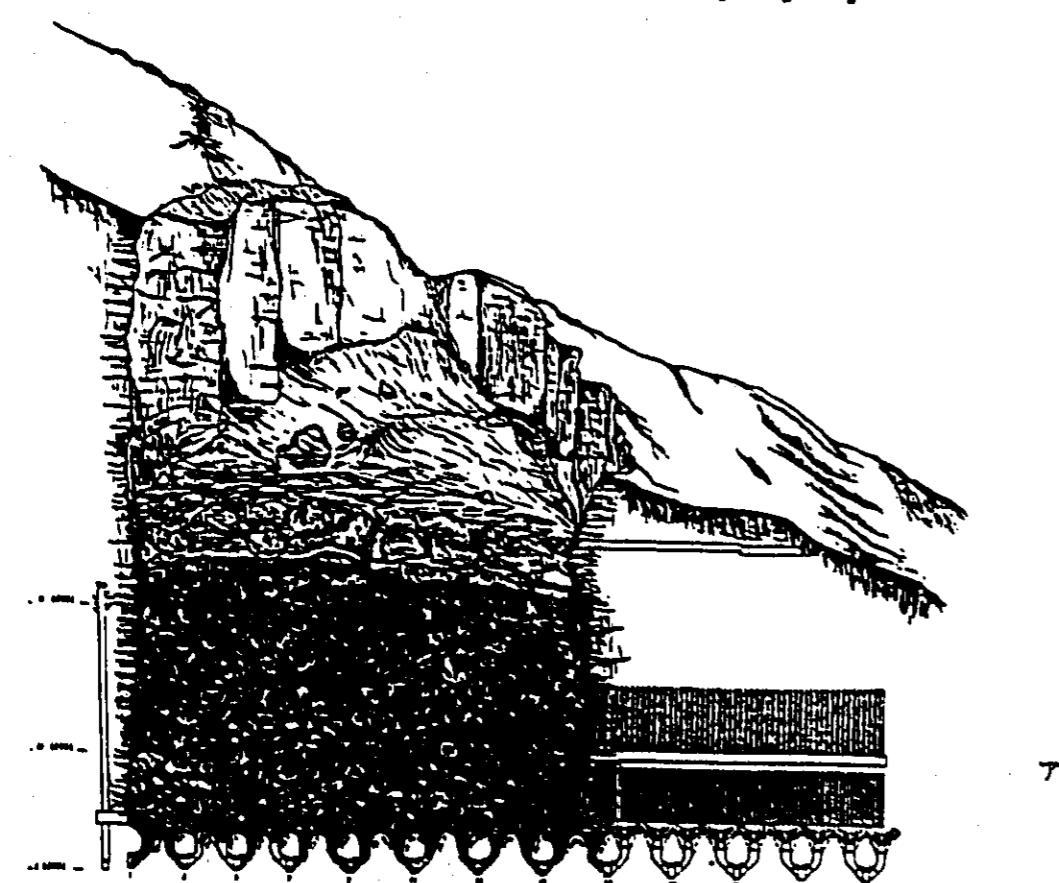
a:最適間隔

b:抽出口間隔が広すぎる場合

c:抽出口間隔が狭すぎる場合



アーチの形成



アーチの崩壊

Fig. 5.12j Urad鉱山において発生したキャッピングアーチの崩壊³⁰⁾

鉱石の抽出速度を適切に選ぶこともまた重要である。抽出速度が速すぎると壊れた鉱石が固まる恐れがあるので、速い方が望ましい。鉱石のケーバビリティによるが、24時間連続抽出を行ったとして、 $0.15\sim1.2\text{m/day}^2$ ³¹⁾の範囲である。鉱石あるいはキャッピングのケーバビリティが悪い場合には、抽出速度が速すぎると崩落が追いつかず、ケーブしていない部分が一時的にアーチを作り、既にケーブした部分とまだケーブしていない部分の間に隙間・空間が発生する。もし、何かの拍子に未ケーブ部分が突然崩落を起こすと、この隙間が濁れて圧風を生じ、坑内に大きな被害をもたらす可能性がある(Fig. 5.12j)。特に開山の当初は、アンダーカットの面積が不足して、ケーブが起きにくいので注意する必要がある。

以下に、ブロックケーピング法の特長を要約する。

- 1) 低いコスト・大規模生産が可能であるので、大規模な低品位鉱床の採掘に適している。露天採鉱法に唯一対抗できる坑内採鉱法である。しかし、地表陥没が許さない場合には採用することができない。また、鉱石は比較的長期にわたって坑内に貯められるので、酸化し易く選鉱成績を悪くする恐れのある鉱石や、湿気を吸ってシートに詰まり易い鉱石は避けるべきである。
- 2) 出鉱開始までの準備(運搬レベル・抽出レベル・フィンガーレイズの開さくやアンダーカット)に時間と経費がかかる。しかし、鉱体(鉱体体積と底面積の比)が十分に大きければ、トン当たりの開坑コストは低い。
- 3) 鉱石や被覆岩盤のケーバビリティが好ましくなかったり、抽出コントロールに失敗すると、生産を途中で断念しなければならない事態に追い込まれる危険性を持つ。したがって、採鉱計画・採鉱システム・生産管理に関する慎重な検討と経験が必要である。
- 4) ケーピングを維持し制御することは難しいので、一度出鉱が始まると出鉱速度の増減が困難である。市況が回復して増産を計画しても、既に抽出の始まったブロックからの生産量をたやすく増やすことはできない。増産のために新しい採鉱ブロックを開発することになるので時間がかかる。逆に、抽出を一旦停止すると、抽出レベルが傷んだり、中の鉱石が固まったり変質したりするので、抽出を再開することが難しくなる。
- 5) しかし、生産を集約して行うことができるので、管理がしやすく、採鉱能率も高い。また、作業の標準化・組織化がし易く、災害発生率は比較的低い。通気設計も容易である。

- 6) 採鉱に柔軟性がなく、しかも選択採掘はできないので、鉱体の形状は規則的であって品位分布の一様なものが望ましい。
- 7) ケーバビリティ・ドローコントロールにもよるが、採掘実収率は高くなく、ズリ混入は避けられない。また、ドローコントロールに失敗すると抽出をあきらめなければならないという危険性が常に存在する。
- 8) サブレベルケーピング法に比べると、トン当たりの採鉱コスト・開坑コストは安く、一日当たりの出鉱量も大きい。通気も良好である。サブレベルケーピング法は、強くて砕裂が少なくケープしにくい鉱石、より小規模な鉱床に適している。

参考文献

- 1) Hartman, H. L. : "Introductory Mining Engineering", Wiley (New York), 633 pages, 1987.
- 2) Wright, E. A. : "Open Pit Mine Design Models", Trans Tech Publications (Clausthal-Zellerfeld), 187 pages, 1990.
- 3) Nilsson, D. : "Open-Pit or Underground Mining", Sec. 1.5 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 70/87, 1982.
- 4) 工業火薬協会編: "新・発破ハンドブック", 山海堂, 548 Pages, 1989.
- 5) "Handbook on Surface Drilling and Blasting", TAMROCK, 310 Pages
- 6) Olofsson, S. O. : "Applied Explosives Technology for Construction and Mining", APPLEX (Ärla), 303 Pages, 1988.
- 7) "Mining Activity in the Free World" および "Western World Coal and Lignite Mines" より収録。
- 8) Noetstaller, R. : "Small-Scale Mining —— A Review of the Issues", The World Bank (Washington), 77 pages, 1987.
- 9) Stewart, R. M., and Kennedy, B. A. : "The Role of Slope Stability in the Economics, Design and Operation of Open Pit Mines", Chap. 2 in Stability in Open Pit Mining (Proc. 1st Int. Conf. on Stability in Open Pit Mining), pp. 5/21, 1970.
- 10) 天野 黙三: "露天採鉱——採鉱学各論", 秋田大学鉱山学部通信教育講座, 秋田大学鉱山学部(秋田), pp. 135/179, 1987.
- 11) Milton, T. P., and Roderick, K. D. : "Pit Planning and Design", Sec. 17.2.2 in SME Mining Engineering Handbook (ed. by Cummins, A. B., and Givens, I. A.), AIME (New York), pp. 17-10/19, 1973.
- 12) McClelland, J. F., et. al. : "Classification of Underground Metal-Mining Methods", Sec. 10.25 in Mining Engineers' Handbook 3rd. Ed. (ed. by Peele, R.), Wiley (New York), pp. 10-123/124, 1941.
- 13) Morrison, R. G. K., and Russell, P. L. : "Selecting a Mining Method: Rock Mechanics, Other Factors", Sec. 9 in SME Mining Engineering Handbook (ed. by Cummins, A. B., and Givens, I. A.), AIME (New York), pp. 9-1/22, 1973.
- 14) Hawrin, H. : "Choosing an Underground Mining Method", Sec. 1.6 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 88/112, 1982.
- 15) 下村 弥太郎: "坑内採鉱法——鉱山読本第12巻第13集", 技術書院(東京), 95 pages, 1962.
- 16) 天野 黙三: "坑内採鉱——採鉱学各論", 秋田大学鉱山学部通信教育講座, 秋田大学鉱山学部(秋田), pp. 1/134, 1987.
- 17) 天野 黙三: "坑内採鉱法——大規模鉱床の採掘計画と現況", 日本鉱業会(東京), pp. 7/10, 1983.
- 18) Bullrock, R. L. : "A Classification of the Room and Pillar Method of Open Stoping", Sec. 2.1-1 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 228/233, 1982.
- 19) Jeremic, M. L. : "Mine Pillar Structures", Chap. 8 in Ground Mechanics in Hard Rock Mining, A. A. Balkema (Rotterdam), pp. 211/256, 1987.
- 20) Lang, L. C. : "Vertical Crater Retreat: an Important New Mining Method", Sec. 2.2-11 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 456/463, 1982.
- 21) Lyman, W. : "Introduction to Shrinkage Stoping", Sec. 3.1-1 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 485/489, 1982.
- 22) Mann, C. D. : "Introduction to Sublevel Stoping", Sec. 2.2-1 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 362/363, 1982.

- 23) Gardner, E. D., and Vandenburg, W. O.: "Square Set System of Mining". Sec. 3.4-2 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 667/729, 1982.
- 24) Haffner, R. L., and Hoskins, J. R.: "Timbered Stopes", Sec. 12.9 in SME Mining Engineering Handbook (ed. by Cummins, A. B., and Givens, I. A.), AIME (New York), pp. 12-100/122, 1973.
- 25) Patchet, S. J.: "The Use of Fill for Ground Control Purposes", Chap. 11 in Rock Mechanics in Mining Practice (ed. by Budavari, S.), S. Afr. I. M. M. (Johannesburg), pp. 241/255, 1982.
- 26) Rausch, D. O., and Stitzer, R. C.: "Filled Stopes and Combination Methods", Sec. 12.16 in SME Mining Engineering Handbook (ed. by Cummins, A. B., and Givens, I. A.), AIME (New York), pp. 12-233/253, 1973.
- 27) Murray, J. W.: "Introduction to Undercut-and-Fill Mining", Sec. 3.3-1 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 631/638, 1982.
- 28) "Hanaoka Mine —— Mining and Smelting in Japan", Mining Magazine, pp. 414/423, 1984.
- 29) 津村 和宏, 西田 米治: "花岡鉱山深沢坑——採鉱特集号", 日本鉱業会誌, Vol. 110, pp. 905/910, 1984.
- 30) Trent, R. H., and Harrison, W.: "Longwall Mining: Introduction", Sec. 3.6-1 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 790/823, 1982.
- 31) Trent, R. H., and Katen, K. P.: "Shortwall Mining", Sec. 3.7-1 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 850/857, 1982.
- 32) Jackson, C. F.: "Mining by the Top Slicing Method", Sec. 3.5 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 758/789, 1982.
- 33) Cokayne, E. W.: "Sublevel Caving: Introduction", Sec. 4.1-1 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 872/879, 1982.
- 34) 吉留 久夫 他: "サブレベルケービング法——大規模鉱床の採掘計画と現況", 日本鉱業会 (東京), pp. 50/58, 1983.
- 35) Julin, D. E., and Tobie, R. L.: "Block Caving", Sec. 12.14 in SME Mining Engineering Handbook (ed. by Cummins, A. B., and Givens, I. A.), AIME (New York), pp. 12-162/222, 1973.
- 36) 小島 康司, 岡本 明夫: "ブロックケービング法——大規模鉱床の採掘計画と現況", 日本鉱業会 (東京), pp. 69/78, 1983.
- 37) Tobie, R. L., and Julin, D. E.: "Block Caving: General Description", Sec. 4.2-1 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 967/972, 1982.

5.3 採掘法選定の手順

採掘法設計のエクスパートシステムを開発するためには、先ず採掘法選定の手順を明確化しなければならない。従来のハンドブック等は採掘に充分経験のある技術者を対象としていることから含みを持った表現で書かれている。例えばSMEのハンドブックでは表5.3のように示されており、鉱石や母岩の強さはstrongとweakのみで又鉱床の傾斜もflatとsteepのみ示されているにすぎない。

深い経験を持った技術者が対象の場合には、これで暗黙のうちにトラブルなく利用されうるであろうが、採掘作業に未経験の人や経験の浅い人にも利用される可能性のあるエクスパートシステムを作成するためには、これらをコンピューターが判断し得る形に明確化、具体化しなければならない。

この作業は多くの人の経験を明確化、統一化するものとなり大変むずかしい作業となる。しかし採掘法設計のエキスパートシステムを開発するためには是非越えなければならないハードルと考える。そこで本年度は先ず素案を示し来年度より複数の経験者の意見を聞きながら、少しづつ完成して行く方法を取ろうと考える。

この素案は、縦軸を採掘法選択の要因、横軸を採掘法の種類とした表の形にまとめることとする。

採掘法選択の要因については①～⑤に示すように各種の考え方がある。

①Peele のMining Engineers' Hand Bookでは、10章25節で次のようにまとめている。

Factors determining applicability of metal-mining methods; shape, size, dip and regularity of orebody; physical and mineralogical character and value of ore; distribution of pay ore; character of wall rocks and overlying surface; relation of deposit to surface and to other orebodies on same property; kind of labor; availability, character, and cost of timber and material for filling.

②SMEのMining Engineering Handbook では12章で次のようにまとめている。

The criteria that enter into the choice of a mining method derive from the following groups of factors:

1. The shape, size and spatial position of the ore deposit.
2. The absolute value and the spatial distribution of mineral values in the deposit.
3. The mechanical and chemical properties of the ore and the country rock.
4. The available financial arrangements for the initiation and conduct of

the mining operation.

5. Safety, welfare and government regulations.

6. The effect of subsidiary operations.

7. Special considerations.

③下村は第32回日本鉱業協会採鉱現場担当会議における特別講演“坑内採掘法について”の内で採鉱法の選択に当って考慮すべき事項を以下のように述べている。

(1) 鉱床と母岩の性質

- a 鉱体と岩盤の強度
- b 鉱床の形態と傾斜、規則性
- c 鉱体の大きさ(厚さ・長さ・幅・高さ)
- d 鉱床の品位分布、富鉱帶
- e 帽子岩の性質
- f 地表からの深度、地表構築物と鉱体との関係位置

(2) 鉱石の性質

- a 鉱物の種類、酸化鉱の有無
- b 鉱石の品位
- c 硬さ、破碎性
- d 選鉱に及ぼす影響(粘土化、酸化性)

(3) 採掘条件

- a 採掘実収率
- b 混入による鉱石品位の低下
- c 出鉱規模(採掘速度、貯鉱能力)
- d 採掘能率

(4) 経済的条件

- a 鉱石価格、採掘費
- b 起業費と金融事情
- c 市場条件(生産規模及び生産の伸縮性)

(5) 関連する坑内作業

- a 開坑及び採掘準備作業の割合とそれに要する期間
- b 充填材料、坑木等の供給
- c 積込、運搬の坑内システム

(6) 環境、保安、衛生

- a 坑内環境（粉塵、騒音、振動、有毒ガス、湧水、温泉、坑内温度）
- b 落盤、落石の防止
- c 切羽通気の確保
- d 坑内冷却

(7) 一般

- a 切羽の集約
- b 坑内の機械化とシステム化

④天野は日本鉱業会が1983年9月にまとめた「大規模鉱床の採掘計画と現況」の中で自然的要因として

「(1), 鉱石および母岩の物理的ならびに機械的性質 (2), 鉱床の形態、大きさ、傾斜および品位 (3), キャップ・ロックの性質、地表からの深度」の項目を、経済的要因として「採掘法は安全に、完全に、安く採掘することを原則として選択すべきであるが、完全にと安くとでは両者相容れない面がある。すなわち、採掘実収率を高めるため丁寧な仕事をすれば、多くの場合コストが余分にかかるものであり、その逆に採掘コストを安くおさえようとすれば、鉱柱を残すなどして採掘実収率が低下するのが普通である。鉱石価値は鉱石品位、金属価格、選鉱実収率の相乗積であるので鉱石品位に比例する。それ故、高品位鉱床の採掘には、採掘コストが高額でも採掘実収率の高い採掘法が選択されるのが普通である。」等を、又環境的要因として

「採掘法は環境的要因によっても制限を受ける。たとえば、地表沈下が許されない立地条件の鉱床ではブロック・ケーピング法、サブレベル・ケーピング法、トップスライシング法などの採掘法は選択できないし、鉱石の酸化作用がはげしい鉱床では、選鉱実収率が低下するため、切羽に鉱石を長時間貯蔵するシュリンケージ法の選択はさける法が良い。また坑内が深くなると、坑内温度が上昇し、山はねなどの災害が発生する恐れがある。このため、南ア連邦の金山では、通気がとりやすく、不規則な鉱柱が残らない長壁式採掘法が採用されている。」等を述べている。

⑤Hartman, H. L. : "Introductory Mining Engineering" は以下のようにしづらこんでいる。

- 1. Ore Strength
- 2. Rock Strength
- 3. Deposit Shape

4. Deposit Dip

5. Deposit Size

6. Ore Grade

7. Ore Uniformity

8. Depth

これらを参考に素案では主な要因となる鉱床の形状、規模、品位、深さおよび鉱石および母岩の力学的性質の6項目を縦軸に取ることとした。なおその他の項目 立地条件（地表沈下が許されない等）、鉱石の酸化性等はエキスパートシステムの中でこの表より選ばれてくる採掘法をチェックする手順で取扱う方向で考えることとする。

鉱床の形状は、塊状と偏平なものに分け、偏平なものは傾斜によって $0^\circ \sim 10^\circ$ $10^\circ \sim 35^\circ$ $35^\circ \sim 70^\circ$ $70^\circ \sim 90^\circ$ の4つに分け、更に各々を厚さ別に細分した。この傾斜を分けるか又厚さを何mを境にするか等は個々の採掘法の適用範囲との関係で充分検討する必要がある。素案としてはさしあたり表5.4の値をいれてみたが、その詳細な検討や境界の修正は来年度以降に行うこととした。

鉱床の規模・深さ・品位も、さしあたり表5.1のように分けた。この境界値も鉱床の形状の場合と同様に来年度以降詳細に検討されるべきと考えている。なお品位は鉱石中の有用金属の種類と関係するから統一して使うことが出来るよう鉱石屯当りの価値で考えることとした。

次に鉱石や母岩の力学的特性であるが、一般に岩盤の強さは圧縮強度や引張強度等で簡単に表されるものではない。

更にこれを各採掘法の適用の可否を判定する目的で使用しようとすれば非常につかみづらいものとなり、具体化は大変むづかしい。サブレベルストーピングやルーム&ピラーでの鉱柱やスパンの安定性の判断基準とブロックケーピングにおける鉱石や母岩のケープしやすさ（ケーバビリティ）の判断基準は当然違ったものであり、又鉱柱やスパンの安定性等1つ1つの判断基準に関しても現状では、複数の技術者によく聞けば1人1人少しずつ違った概念を画いていることであろう。

現在マスとしての岩盤の強さの判定法は海外でも国内でも多くの方法が提案されているが、上記のようなわけで現状ではこの内のいずれかを採用すればよいという状況ではない。

そこでこの素案ではCSIRのRMR、NGIのQ値等多くの方法を並列に示し、採掘法ごとにその内から複数の基準を選出してこれを総合的に判断する方法をとるこ

とにしたいと考える。

一方縦軸となる選択される採掘法については現在使われているもの及び将来使われる可能性を残すものに限定することとした。即ちトップスライシングやスクエヤセットなど過去により利用された有名な採掘法も現在同じ条件の鉱床が見つけられたとすると人工天盤を利用した下向充填法が用いられることになることから除かれることとなる。

なお本年度は探掘法をサブレベルストーピングやルームアンドピラーなどと大きくまとめたものに分類することとした。

採鉱技術者が新鉱床の開発を検討する際は典型的な採掘法をそのまま使用するより何らかの工夫を加えることが普通で、これを新しい名称で発表することが多い。このためサブレベルストーピングにしても Large Blast Hole stoping, Vartical Crater Retreat など少しづつ違った方法に種々な名称が使われているがこれらはまとめてサブレベルストーピングとして分類することとなる。

また同じ名称でも鉱床の条件等から使用する機械（削孔機、運搬機等）の種類や削孔方法の違いから計画が異ったものとなることが多いが、これら細部の検討は来年度以降に残した。

以上のこととを表にまとめると表5.1 のようになる。

表5.1の内容を埋めるには多くの技術者の意見を総合することが必要であると考えるが、現状の我々の判断だけで一応埋めてみたものを表5.2に示す。

5.1 採掘法選定の進め方

第5章 5.2 基本概念与设计方法

被検査の形状、規模・品位・位置についてのついている採集法を述ぶ。ただし、この方法では標本が2種類以上選ばなければいけない場合について述べる。

TABLE 12-1—Applications of Underground Mining Methods

Type of Ore Body	Dip	Strength of Ore	Strength of Walls	Commonly Applied Methods of Mining
Thin beds	Flt	Stg	Stg	Open stopes with casual pillars Room-and-pillar Longwall Longwall
Thick beds	Flt	Wk or Stg Stg Wk or Stg Wk or Stg	Wk Stg Wk Stg	Open stopes with casual pillars Room-and-pillar Top slicing Sublevel caving Underground glory hole Same as for masses
Very thick beds	Flt	Stg or Wk	Stg or Wk	Resuing
Very narrow veins	Flt	Stg	Stg	Same as for thin beds
Narrow veins (widths up to economic length of stull)	Flt Stp	Stg	Stg	Open stopes Shrinkage stopes Cut-and-fill stopes Cut-and-fill stopes Square-set stopes Open underhand stopes Square-set stopes
			Wk	Top slicing Square-set stopes Same as for thick beds or masses
			Wk	Open underhand stopes Underground glory hole Shrinkage stopes Sublevel stoping Cut-and-fill stopes Combined methods
Wide veins	Flt Stp	Stg	Stg	Cut-and-fill stopes Top slicing Sublevel caving Square-set stopes Combined methods
			Wk	Open underhand stopes Top slicing Sublevel caving Block caving Square-set stopes Combined methods
			Wk	Top slicing Sublevel caving Square-set stopes Combined methods
		Stg	Stg	Underground glory hole Shrinkage stopes Sublevel stoping Cut-and-fill Combined methods
Masses	Wk	Wk or Stg	Wk or Stg	Top slicing Sublevel caving Block caving Square-set stopes Combined methods

Wk = weak; stg = strong; flt = flat; stp = steep.

表 5.3 SMEのハンドブックに於ける探鉱法選定表

Table 64. Application of Underground Metal-mining Methods

Type of Orebody	Dip	Strength of ore	Strength of walls	Possible methods of mining	For details See Art No
Thin beds	Flt	Stg	Stg	Breast stoping.....	30-33
				Systematic room and pillar.....	34
Thick beds	Flt	Stg	Stg	Open overhand stopes.....	39-41, 91
				Coal mining methods.....	102-111
	Wk or Stg	Wk	Wk	Top-slicing.....	70-72
Very thick beds	Flt	Stg	Stg	Breast and bench.....	30-32
				Systematic room and pillar.....	34
	Wk or Stg	Wk	Wk	Top-slicing.....	70-72
Very narrow veins	Wk	Stg or Wk	Stg or Wk	Sub-level carving.....	75-77
				Underhand glory-hole.....	37
Narrow veins (Widths up to economic length of stull, Art 38)	Flt	Stg	Stg	Mitchell slicing system.....	53
				Same as for masses.....
Narrow veins—Continued	Wk	Stg	Wk	Resuing.....	61
				Same as for thin beds.....
Wide veins	Wk	Stg	Stg	Open underhand stopes.....	35
				Open overhand stopes.....	38-41, 91
Masses	Wk	Stg	Stg	Shrinkage stopes.....	67-69
				Filled flat-back stopes.....	60
Masses	Wk	Stg	Stg	Filled rill stopes.....	65
				Filled flat-back stopes.....	60
Masses	Wk	Stg	Stg	Filled rill stopes.....	65
				Square-set stopes.....	45-54
Masses	Wk	Stg	Stg	Open underhand stopes.....	35
				Square-set stopes.....	45-54
Masses	Wk	Stg	Stg	Square-set stopes.....	45-54
				Top-slicing.....	70-74
Masses	Wk	Stg	Stg	Crosscut method.....	64
				Same as for thick beds or masses.....
Masses	Wk	Stg	Stg	Open underhand stopes.....	36
				Underground glory-hole.....	37
Masses	Wk	Stg	Stg	Shrinkage stopes.....	67-69
				Sub-level stoping.....	43
Masses	Wk	Stg	Stg	Filled flat-back stopes.....	62
				Filled rill stopes.....	65
Masses	Wk	Stg	Stg	Square-set stopes.....	45-54
				Combined methods.....	83-87
Masses	Wk	Stg	Stg	Filled flat-back stopes.....	62, 63, 67
				Filled rill stopes.....	65, 66
Masses	Wk	Stg	Stg	Square-set stopes.....	45-54
				Top-slicing.....	70-74
Masses	Wk	Stg	Stg	Sub-level caving.....	75-78
				Mitchell slicing system.....	55
Masses	Wk	Stg	Stg	Block-caving.....	79-81
				Combined methods.....	83-88
Masses	Wk	Stg	Stg	Square-set stopes.....	45-54
				Crosscut method.....	64
Masses	Wk	Stg	Stg	Top-slicing.....	70-74, 82
				Sub-level caving.....	75-78, 82
Masses	Wk	Stg	Stg	Combined methods.....	83-88
				Underhand glory-hole.....	37
Masses	Wk	Stg	Stg	Shrinkage stopes.....	67-69
				Pillar and chamber workings.....	42
Masses	Wk	Stg	Stg	Sub-level stoping.....	43
				Filled flat-back stopes.....	62, 63, 67
Masses	Wk	Stg	Stg	Filled rill stopes.....	65
				Combined methods.....	83-87
Masses	Wk	Wk or Stg	Wk	Square-set stopes.....	45-54
				Crosscut method.....	64
Masses	Wk	Wk or Stg	Wk	Top-slicing.....	70-74, 82
				Sub-level caving.....	75-78, 82
Masses	Wk	Wk or Stg	Wk	Block-caving.....	79-81
				Combined methods.....	83-88

Wk = Weak Stg = Strong Flt = Flat Stp = Steep

表 5.4 P E E L E のハンドブックに於ける採鉱法選定表

5.4 本年度に作成したエキスパートシステムの内容

5.4.1 報告書添付ディスクに関する説明

添付ディスクの概要を下に記す。使用計算機については、現在最も普及率の高い日本電気PC-9801シリーズを選定したが、ほんのわずかの手直しで他社の計算機上でも使用出来ると思う。また、今回はプログラムが小さいので、最も手軽なBasicを使用した。

1) 添付ディスクのフォーマット

: MS-DOS 1Mバイト

2) 使用計算機と言語: PC-9801シリーズ

: N88 Basic

3) 添付ディスク中のファイル

: EXPERT1.BAS

(Basicで書いたプログラム)

: EXPERT1.DOC

(ドキュメント)

4) プログラムの使用方法

○N88 Basicを立ちあげる。

○Load "EXPERT1"として、プログラムを読み込む。

○RUNとして、プログラムを走らせる。

○質問をしてくるので、?の後に選択した番号を入力する。

○質問が終わったら後、総合評価が出力される。

5) 総合評価の見方

- 1行目に使用者の選択した番号が出力される。
- 3行目以下に結果が出力される。意味は次の通りである。

Good : 適
Fair : 可能
No : 適さない

○右端の列

OK : NOとなる条件のないとき
数字 : - (NOとなった条件の数)

5. 4. 2 採鉱法選定の一例

1) 質問

(質問 1)

Shape of Ore Body

1:Massive Ore Body
2:Tabular(Dip 0°-10°) Thickness <2m
3: 2m-5m
4: 5m<
5:Tabular(Dip 10°-35°) Thickness <2m
6: 2m-5m
7: 5m<
8:Tabular(Dip 35°-70°) Thickness <2m
9: 2m-5m
10: 5m<

11:Tabular(Dip 70°-90°) Thickness <1m
12: 1m-3m
13: 3m-10m
14: 10m<

? 2

(質問 2)

Size(Ore Reserve)

1:Less than 3 Mt (Mega ton)
2: 3 - 15 Mt
3: 15 - 150 Mt
4:More than 150 Mt

? 2

(質問 5)

Quality of Ore

(質問 3)

Ore Value per ton

- 1:Less than ¥10,000
 2: ¥10,000 - ¥30,000
 3:More than ¥30,000
 ? 2

	RMR	Q値	電中研
1:Very Good	65<	10<	Ch
2:Good	65-60	10-7	Ch
3:Fair	60-50	7-5	Cm
4:Poor	50-40	5-2	C1
5:Very Poor	40>	2>	D

総合的に判断して岩盤の等級を決めて下さい

? 2

(質問 4)

Depth

- 1:Less than 200m
 2: 200-500m
 3:More than 500m
 ? 2

(質問 6)

Quality of Wall Rock or Host Rock

	RMR	Q値	電中研
1:Very Good	65<	10<	Ch
2:Good	65-60	10-7	Ch
3:Fair	60-50	7-5	Cm
4:Poor	50-40	5-2	C1
5:Very Poor	40>	2>	D

総合的に判断して岩盤の等級を決めて下さい

? 2

2) 総合評価

Input	2	2	2	2	2	2	
	Shape	Size	Value	Depth	Ore	Rock	Point
Open Pit	Good	Good	Good	NO	Good	Good	-1
Room & Pillar	Good	Good	Good	Good	Fair	OK	
SubLevel	NO	Fair	Good	Good	Fair	Fair	-1
Over C & F	NO	Good	Good	Good	Fair	Fair	-1
Under C & F	NO	Good	Good	Good	Good	NO	-2
Shrinkage	NO	Good	Good	Good	Good	Fair	-1
Stull	NO	NO	Good	Good	Good	Good	-2
Block Caving	NO	NO	Good	Good	Good	Good	-2
Sub L Caving	NO	NO	Good	Good	Good	Good	-2
Longwall	Good	NO	Good	Good	Good	NO	-2

OK : 不適な条件が見当たらない

Point : 不適な条件(NO)の数

5. 5 まとめ

1年間にわたり活発な議論をし、その結果を表の形でまとめた。これは、相当な時間を費やした検討結果ではあるが、議論する程に新たな問題点が生じ、採鉱法と言う対象の大きさ、知識の整理の困難さを痛感させられた。また、計算機プログラムの形でもまとめておいたが、研究の半ばであるので、計算機プログラムは極く簡単なものとした。プログラムも含め、今回の報告はあくまでも暫定的なものであり、今後さらなる検討を加え、次第に実用的なものとして行く必要がある。

6. あとがき

6.1 ラドン湧出抑制に関する調査検討ならびにラドン・モニターの改造に関する今度の研究成果と今後の研究方針

コンクリートもしくはセメント・モルタルにより比較的平滑に仕上げられた壁面からのラドンの湧出を抑制することを念頭にして今回の研究を開始した。しかしながら本来は必ずしも平滑でなく、それに適した材料を考えねばならない。また仕上がった面の強度が十分強く多少の機械的な力が加わった程度で剥離したのでは実用にならない。材料の選択にあたってこれを考慮し、結局DM-レジン(PT-200)を使うことになった。このため例えば原子力施設で使用するビニール系の厚手の塗料などは割愛した。このような材料は前述のように一般にはradon barrierと呼ばれている。幾つかの材料がbarrierとして使用可能であり、その能力を調べるために一般的な装置として図に示す二重容器を考えた。この装置について検討する。

供試材料の大きさつまり面積は小さい程実験としては容易だが実用性の面では問題となる。それは使用される状態では、材料はかなり広い面積に塗られている筈で、この場合の展張性も材料として重要な因子となるからである。そのために直径24cmの材料塗布面が最適か否かは検討の余地があるが、例えば直径10cm程度だと塗布面は78cm²で、やや狭いようと思われる。少なくとも200cm²位の(直径16cm)の面積は必要であろう。また試料の円周方向のリーク率を減らすためには円周／面積の比を小さくせねばならないが、この比は試料(=塗布面)の直径に逆比例することも考慮しなければならない。このような条件を考慮するならば、上記のように24cm程度の大きさにしておき必要に応じて例えばアルミ箔を塗り込めるなどして面積を絞ることにすれば良い。このような目的のアルミ泊は塗布面にコーティング材などでベース材に貼りつけられたうえに塗布剤を塗られることになるがさらにアルミ箔の塗布材側をコーティング材でなく接着剤でベース材に固定した方が良いようと思われる。

塗布剤はベースになる例えばセメント・モルタル板に塗ることになるが実験によればアゾール混和の有無はそれ程大きな差にはなっていない。また恐らくセメント・砂の混合比自身も関係ないのではないかと考えている。セメント・モルタル板をベースにした場合塗布面と円板状リングとの間のリークがどこで起きるかわかり難い。これを防ぐため円板状リングの切り欠け部分にコーティング材を置き、セメント・モルタル板を塗布面を上にして乗せ、さらにモルタル板の周辺部(縁部)から表面の塗布面までコーティング材を塗布すれば良いが多量のコーティング材を必要とする。図に示した方法でも良いが円板状リングと

試験容器の中間段との接合部のボルトもしくはパッキング部にリークがあり、それを何んとか止めた状態なので円板状リングをはずすと再びリークするようになるおそれがある。そのためセメント・モルタル板と円板との固定を容器上部のみより行う必要から上記の方法となった。このようにしても5%程度のリークがありその原因は恐らく円板状リングと中間段の接合部にあると思われたが実験が終了するまで止めることができなかった。ボルトの孔を埋め円板状リングと中間段の間にコーティング材をグリース状に入れて密着させれば良いのではないかと考えている。このような方法により新しい塗布剤についても実験を進めることが必要であろう。

前述のように坑内のような作業環境では広い範囲について塗布剤を塗ることは困難である。また配管などの取り付け部分の工作やリークも考えねばならないので、もし坑内にラドンの出入りを遮断し独立した空間を作るのならばその空間の主要部は金属板とし、主として溶接によって組み立て、外部との貫通部や接続部にDMレジンのような塗布剤を埋め込む方式をとることが最も実用的でかつ確実な方法だと考えられる。そのような空間の壁面のリーク箇所の検出は容易でなく、恐らくすべての接合部分に安全のため塗布剤を塗る必要がある。しかし空間全体のリークはラドンそのものをトレーサーとして（坑内ならば例えば通気時に空間を閉じ通気を止め翌日通気開始時までの空間の内外のラドン濃度の時間的变化を求める）容易に推定することができよう。

ラドンモニターはかなり有効な測定装置と考えている。それはPAECモニターとラドン濃度を同一の空気試料について測定するばかりでなくその他の幾つかの情報を得ることができるからである。即ちPAECモニターは原理的に RaAのPAECと RaBと RaCのPAECを分離して測定し両者を加算して全娘核種のPAECを算出している。 $(RaA \text{ の } PAEC) / (RaB + C \text{ の } PAEC)$ の比は放射平衡状態では0.117で平衡度が下るに従いさらに小さくなる。この平衡度はRaA、RaB およびRaC の比と同様に測定地点のラドンやラドン娘核種の状況を表すfactorの一つである。このfactorはラドンの平衡係数と概念的には類似しているがRaA/Rnの濃度比が一定ではないことと相まって数値的には異なっている。またその場所のラドンの供給源が例えば2つに分けられ、それぞれどのようなラドンかなどのラドンの構成についても或程度把握することができる。従ってこのモニターの運用にあたっては単にPAECとラドン濃度および平衡係数のみならず RaAと RaB+RaC のPAECの比や RaAとラドン濃度の比について求め解析することが望ましい。

ラドン濃度モニターは改造前の2.7倍の感度となった。装置自身のバランスから云えばもう少し高い感度が望まれる。しかし前項に述べたように半導体検出器を使った電界捕集

法によるラドン濃度モニターを有効に利用するためには容器に正の電圧(4K~5KV)を与える検出器を接地電位にする必要があり（全く不可能と云はれないが通常は不可能とされる）現在のモニターの構造では無理なため使用していない。（早大のモニターの構成では可能であるが外見は決してスマートではない）現在幾つかのPAECモニター(WLメーター)が市販されているが測定されたデータから直接 RaAと RaB+C のPAECが算出できる装置は少ない。

坑内での作業や限定された空間で種々の実験を行う場合にはその環境のモニタリングをする必要がある。モニタリングの対象はラドン濃度の場合もまた平衡等価ラドン濃度($R_n = PAEC$)の場合もある。現在東濃鉱山の坑内には連続ラドンモニターが4台設置されている。それらの信号は二重シールドの同軸ケーブルにより孔外へ搬送され多重波高分析器と電算機で処理されている。このモニタリングシステムは坑内のラドンの挙動に関する情報を得る最も確実かつ重要な装置として将来も必要ではないかと考えている。しかしそれと同時にPAECモニターを併設することを提言したい。PAECの信号はそのパルス波高値がラドンモニターのそれと大差ないので現在使用している二重シールドの同軸ケーブルを切り替えて利用することができる。問題となる点はサンプリング部分の構造である。検出部分は何れにしても $3\mu m$ 程度のアルミ箔により外気と遮断し汚染を防止する必要があるが、通常の半導体検出器では長時間の使用は無理で、heavy dutyな状況で使用可能なion implantation法で製作された検出器が適しているように思われる。（オルテック又はキャンベラ製）増幅系はICによるpre-ampでも市販のpre-ampでも良いがS/Nを保つために多少増幅し出力インピーダンスの極めて低い出力回路を介して同軸ケーブルに信号を送ることになろう。フィルターは坑内での使用のため交換回数が多くなるので、検出部と一体構造とせず、独立したユニットを複数箇所用意し検出部と簡単に装着できるようすれば良いであろう。もともと坑内外を問わずラドンに係わる放射線管理はPAECで行うべきで従ってPAECモニターを坑内に設置する必要性は極めて高い。また上述したようにこのモニターの設置法によっては RaAと RaB+RaC のPAECを分離して測定できるため、坑内のラドン娘核種の状況を極めて的確に把握することができるので将来にわたり有効なモニタリングシステムとして機能していくものと考えられる。

6.2 採鉱実情調査の成果と今後の研究方針

本年度は海外の18ウラン鉱山会社に対して、新ICRP勧告への対応、新しい放射線防護採鉱技術の開発状況、被曝線量の実態などについて質問状を発送した。回答のあった7鉱山

会社は低品位ウラン鉱床を操業しており、被曝線量の実態は、現状でも新ICRP勧告の規制値を充分クリアー出来る程低いレベルで、特に問題の無い鉱山であった。只カナダのCluff Lake鉱山では新しい採鉱法のテストを行う事、またオーストラリヤの BRA社からは、将来の坑内掘に備えて、自動化、リモコン化設備を用いた採鉱法を検討した旨の回答がなされた。又文献調査による放射線防護採鉱技術の新しい研究テーマの探索では、特に新しい具体的な研究テーマは出なかったが、カナダの高品位鉱山の開発を計画している Cigar Lake鉱床とMidwest 鉱床の担当者が述べている「高品位ウラン鉱床の採鉱法に関するコンセプト」は、今後の研究課題を示唆するものである。

各国の鉱山会社からの回答や、文献調査でも、放射線防護を目的とする採鉱には、自動化・リモコン化機械が、被曝源から作業者を隔離して、被曝量を低減させるため有効であるとの考えは一致している。従って今後の採鉱技術開発の方向は、自動化、リモコン化した採鉱機械の研究開発が最も有効であることは確実であろう。回答を寄せた鉱山会社との継続的な接触や、文献調査は今後とも必要であり放射線防護に関する国際会議に出席しての情報収集もまた有効であろう。

6.3 採鉱エキスパートシステムの構築の成果と今後の研究方針

採鉱法のエキスパートシステムを検討し、非常に簡単なものであるが、エキスパートシステムを作成した。このシステムでは、鉱床の形状・規模、鉱石の品位、鉱床の深さ、鉱石と母岩の力学的特性を入力すると、相応しい採鉱法が出力される。今後の予定としては、本年作成したプログラムを、既存の鉱山を例に取って試用し、その結果を踏まえて不備な点等を改良することがまず第一と考える。その後、より詳細な質問事項を付け加え、採鉱法の適・不適をより明確に示すシステムを目指す。若干先の事になるが、最終的には経済性評価まで踏み込めたら画期的なシステムに成ると考える。