

採鉱設計支援システムの開発

1 9 9 8 年 2 月

社団法人 資源・素材学会

本文の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184
Japan

©核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1998

採鉱設計支援システムの開発

山内 睦文*

要 旨

本研究委員会は、放射線防護採鉱技術開発に関する研究委員会の一部門として平成3年度より活動を開始し、平成4年度から独立して採鉱設計支援システムの開発に臨んだ。

平成3年度には、各種採鉱法に関する調査をおこなった後、通常おこなわれる採鉱法の選定手順をまとめたエキスパートシステムのプロトタイプを製作した。平成4年度には、採鉱法の選定とそれに係わる調査を実施するとともに、岩盤の評価についても検討を開始した。また、既存の鉱山のデータを収集してエキスパートシステムを試用し、その結果に基づいて必要な改良を施した。平成5年度には、岩盤の評価について議論を深め、独自の評価・分類方法を提案した。また、鉱山のデータを追加収集し、エキスパートシステムの試用と改良をおこなった。平成6年度には、エキスパートシステムに、アンケート調査の分析結果等を踏まえて必要な改良を加え、採鉱法の1次選定プログラムとしてある程度満足できるものを完成させた。以下ではこれを採鉱法選定A案と呼ぶ。ついで、今後の採鉱設計支援システムの作成方針に関する概念と展望について検討し、採鉱法選定B案を提案した。平成7年度には、採鉱法選定B案の検討を進めるとともに、採鉱法選定A案とB案に既存の鉱山のデータを入力し、その出力結果を比較・検討した。また、主として露天掘ウラン鉱山のコスト評価プログラムに関する基礎的検討をおこなった。平成8年度には、採鉱法選定B案を改訂するとともに、採鉱法A案とB案の適用方法について検討した。また、世界のウラン鉱山で適用されている採鉱法について調査した。

平成9年度の主たる目標は、成果をCD-ROMの形にまとめることである。報告書の第1章では、採鉱設計支援システム²⁾意義と本年度の研究について述べる。第2章では、CD-ROMの概要と使用方法について述べる。第3章では、今後のエキスパートシステムの構築に重要なかわりを持つ知識ベースについて述べる。第4章では、平成3年度より本年度までの研究成果を簡略にまとめておいた。なお、CD-ROMの内容を、付録として報告書の最後に添付した。

本報告書は、(株)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内容結果である。

契約番号：090D0149

事業団担当部課室および担当者：東濃地科学センター技術開発課 石堂 昭夫

※：(株)資源・素材学会 会長

Expert System on Mining Design and Development

Chikafumi Yamauchi*

Abstract

In the fiscal year of 1991, the activity was started in a subsidiary working group of the committee for study on design and development of the mining technology for radiation protection. In the fiscal year of 1992, this committee was founded to develop an expert system for mine design and development.

In the fiscal year of 1991, preliminary study was carried out. At first, various mining methods were surveyed and the distinctive features of them were discussed. Finally, a tiny expert system for selecting an appropriate mining method was proposed. In the fiscal year of 1992, a required investigation for mine development was examined. Special attention has been paid to rock mass classification. And also the tiny expert system was put to the test-run. In the fiscal year of 1993, rock mass evaluation/classification system was discussed and a new evaluation system was proposed. The precise and detailed data of mines were collected and test-run of expert system was carried out for these mines. In the fiscal year of 1994, the expert system was modified through the detailed study of collected data of actual mines. The performance of the modified system called 'A' hereafter was satisfactory. Also, an advanced system for mine design and development was discussed and 'system B' was proposed. Finally, possibility of knowledge base was discussed. In the fiscal year of 1995, system B was discussed in detail, and the systems A and B were compared and discussed on the basis of comprehensive test-runs. Also, preliminary study on cost evaluation for open-pit uranium mines was carried out. In the fiscal year of 1996, system B was revised and completed. The system A and B were thoroughly compared and discussed. Also, mining methods of uranium were surveyed.

In the fiscal year 1997, main results of the committee were compiled and recorded in CD-ROM. In chapter 1, the object of this study and the outline of results in this year were stated. In chapter 2, outline and usage of CD-ROM were stated. In chapter 3, the knowledge base was discussed with additional knowledge in this year. Finally, in chapter 4, a brief summary of the results obtained up to now was stated. Contents of CD-ROM were summarized in APPENDIX.

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

Contract Number 090D0149

PNC Liaison : Resources Appraisal Section Tono Geoscience Center ; Akio Ishido

* : The Mining and Materials Processing Institute of Japan ; President

目 次

1. はじめに	1
2. 採鉱法選定システムの検討（CD-ROMの概要と使用方法）	2
3. 知識ベースの検討	7
4. ま と め	13
付 録（CD-ROMの内容の一部）	14
A 1. 採鉱法選定システムの概要	14
A 2. 採鉱法の説明	19
A 3. 用語集	41
A 4. 委員会のご紹介と採鉱法選定B案CD-ROMについて	47

1. はじめに

資源の確保は我が国にとって必須であるが、将来採鉱法に関する深い経験を持った鉱山技術者の不足が予測される。したがって、専門家にとって替われるようなエキスパートシステムの構築が是非とも必要と考えられる。長年にわたる鉱山での経験を、経験豊かな鉱山技術者によりまとめてもらい、さらにそのエッセンスをエキスパートシステムとして構築することが、本委員会の第一の目標である。

上記の目標のもとに、本研究委員会は、放射線防護採鉱技術開発に関する研究委員会の一部門として平成3年度より活動を開始し、平成4年度から独立して採鉱設計支援システムの開発に臨んだ。昨年度は、採鉱法選定B案の詳細検討を行い、検討結果を反映した採鉱法選定B案（最終案）を提案した。ついで、採鉱法選定A案とB案の適用方法について検討した。また、世界のウラン鉱山で適用されている採鉱法と放射線防護を考慮した採鉱法について調査・検討した。さらに、今後のエキスパートシステムの構築に重要なかわりを持つ知識ベースの収集を行った。

平成9年度の主たる目標は、成果をCD-ROMの形にまとめることである。CD-ROMの形でまとめたのは、安価で利用者の便も良いと考えたからである。CD-ROMには、昨年度の報告書で提案した採鉱法選定B案を中心にまとめた。これまでの報告書に記載されている事項のほか下記を追加した。

1. 採鉱法選定B案をまとめた表の全ての○、△、×の箇所について短い注を付した。
2. 通常の辞書に掲載されていないと思われる用語に解説をつけた。用語の解説は、‘Help’により参照できる。

平成9年度の本委員会の構成は、下記のとおりである。

委員長	大久保 誠 介（東京大学工学系研究科地球システム工学専攻）
委員	山 富 二 郎（東京大学工学系研究科地球システム工学専攻）
”	肝 付 兼 弘（元海外ウラン資源開発株式会社）
”	荻 野 雅 彬（元住鉱コンサルタント株式会社）
”	南 光 宣 和（三井金属鉱業㈱ 名誉顧問）
”	境 収 （日鉱金属株式会社）
顧問	山 口 梅 太 郎（東京大学名誉教授）
”	西 松 裕 一（東京大学名誉教授）

2. 採鉱法選定システムの検討 (CD-ROMの概要と使用方法)

2.1 概要

CD-ROM内のファイルの構成は、表2-1のようになっている。

本プログラムでは採鉱条件を与えることによって、各採鉱法の適合性を知ることができる。ここでいう条件は鉱床を取り巻く自然条件を指す。このほか、それぞれの採鉱法、及び採鉱における留意点の説明文が必要に応じて得られるようになっている。また、それぞれの採鉱法に置いて採鉱条件がどのような制約、影響をもつかの説明も与えるようにした。なお、使用したプログラム言語は、Pascal の一種である Delphi である。

プログラム (B.EXE) を起動させると採鉱選定法 (B案) と書かれたメインフォームが画面に表示される。(図2-1) メインフォームは、選定表ラベル、条件ラジオグループ、その他、鉱山名記入ボックス、各種ボタンよりなっている。

選定表ラベル

選定表ラベルは採鉱選定法 (B案) によってチャート式に採鉱法を決定するための表である。

表の左端部には10種類の各採鉱法名 (「Open Pit Mining」, 「Room and Pillar Mining」, 「Sublevel Stopping」, 「Overhand Cut and Fill」, 「Underhand Cut and Fill」, 「Shrinkage Stopping」, 「Stull Stopping」, 「Block Caving」, 「Sublevel Caving」, 「Long wall Mining」) が表記されている。

この採鉱法名の表記されたラベルをクリックすると「採鉱法の説明」ボタンと「留意点」ボタンからなるダイアログが表示される。それぞれのボタンをクリックすると採鉱法、及び採鉱における留意点を説明するテキスト及び画像ファイルが展開される。画像はNext ボタンとBack ボタンをクリックすることにより順番を操作できるので、テキストと対応させながら見るとわかりやすい。

表の上部には採鉱法を選定するための条件 (鉱床の形状・単一鉱体の規模・鉱石価値・鉱床の位置・鉱床の力学的特性・母岩の力学的特性) がそれぞれ表記されている。これらの条件をクリックすると、それぞれの条件の意味、及びその条件が採鉱にどのような制約を与えるか等の説明文が表示される。

表の中央部には○・△・×と表記されたラベルがある。これらはそれぞれ、対応する列の条件下で対応する行の採鉱法が適するかどうかを示したものである。クリックするとそれぞれについてコメントが表示される。

条件ラジオグループ

ソフトを起動した時点でメインフォームには表の条件に対応して、塊状・単一鉱体の規模・鉱石価値・鉱床の位置 (深さ) ・鉱床の力学的特性・母岩の力学的特性の5つのラジオグループが表記されている。このほかに、塊状のNoをチェックすると傾斜・厚さの2つ

の条件ラジオグループが出る。これらのラジオグループはそれぞれ採鉱法を選定する条件のチェック項目を含んでおり、使用方法については「採鉱法選定について」で詳しく述べる。

鉱山名記入ボックス

メインフォームの左下にある鉱山名記入ボックスは採鉱法選定の対象鉱山の名称を記入するテキストボックスで、選定結果をファイルに保存する場合、標準としてファイル名になるようになっている。ファイルの保存についてはあとで述べる。

結果表示ボタン

条件ラジオグループをそれぞれチェックした後、結果表示ボタンをクリックすると選定結果が表記される。詳しくは「採鉱法選定」を参照。

リセットボタン

起動時の状態に戻る。

2. 2 採鉱法選定

以下に採鉱法を選定するための本プログラムの使用方法を示す。

- ・ 鉱山名記入ボックスをクリックし対象となる鉱山名を記入する。

各ラジオグループにおいて該当する条件をチェックする。

鉱床の形状において塊状である場合はラジオグループ「塊状」の Yes をチェックし他の5つのラジオグループの条件をチェックする。鉱床の形状が塊状でなく扁平である場合はラジオグループ「塊状」の No をチェックすると新たに「傾斜」と「厚さ」のラジオグループが現れるのでこれらもチェックする。

- ・ 結果表示ボタンをクリックする。
- ・ 以上の手順を行うと表ラベルの各部の色が青と赤に変わる。

以下それぞれのラベルの色について説明する。

採鉱法名の書かれたラベル

青 —— 採鉱法名のラベルが青色に変わることは与えられた条件下で該当する採鉱法が実行可能であることを示している。ただし、本選定法で与える条件は自然条件のみであることに注意しなければならない。

赤 —— 採鉱法名のラベルが赤色に変わることは与えられた条件下では該当する採鉱法

の実行は不可能であることを示している。

×印のラベル

選定の結果採鉱法名のラベルが赤色に変化した場合、与えた条件のうちどの条件によって該当の採鉱法が制約されているかが分かるように採鉱法ラベルと条件ラベルの交差する×印が赤色に変化するようになっている。

ファイルの保存

それぞれの鉱山の選定結果を保存したい場合、データをテキストとして保存することができる。保存方法は、選定結果を出した後メインフォームのツールバーの「ファイル (F)」－「ファイルに名前を付けて保存 (A)」をクリックするとファイルセーブのダイアログが現れる。ここで、ファイル名は鉱山名記入ボックスに記入した鉱山名が標準としてファイル名として選択されている。ファイル名を変更する場合はファイル名を記入後セーブボタンをクリックするとテキストデータとしてファイルが保存される。また、以上のように作成したファイルは「ファイル (F)」－「ファイルを開く (O)」をクリックすることによって読み込むことができる。

表 2 - 1 CD-ROMファイルの構成

 Text	各種テキストファイル用フォルダ
 bmp	各種画像データ用フォルダ
 Myhelp2.hlp	ヘルプファイル本体
 Myhelp2.hpj	ヘルプ・プロジェクト・ファイル
 Myhelp2.ont	ヘルプ・コンテンツ・ファイル
 b.exe	実行プログラム (これをクリックして下さい)

3. 知識ベースの検討

エキスパートシステムに盛り込めるのは、鉱山技術者の持つ知識のうちでも比較的整理された部分である。そこで、知識ごとに文章を中心とした形で、知識を収集・整理しようとの試みを平成6年度より開始した。知識には1番から順に通し番号を付け、1番から65番までは昨年度報告書に掲載した。66番以降が本年度収集したものである。なお、知識ベースの収集には時間と手間がかかる。今後も粘り強く、採鉱法を中心とした鉱山関係の貴重な知識の収集を続ける必要があると考える。

(1) 66

(2) 1998. 1

(3) 南光宣和

(4) 盤圧の大きい個所の坑道の保坑には、支保とNATM工法を併用すると非常に有効である。

(5) 工法としては、通常の支保の枠間から2m前後の全面接着型ルーフボルトを坑道断面に放射状に適当本数打設する。

(6) 筆者の経験による。

(1) 67

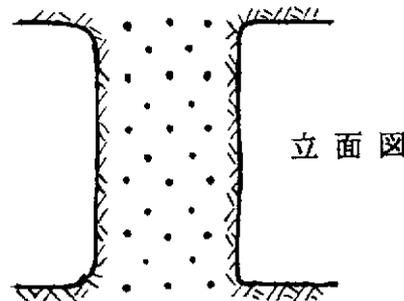
(2) 1998. 1

(3) 南光宣和

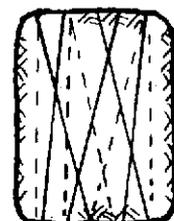
(4) 荷重のかかっている垂直ピラーを外す時は、発破孔をa図のように単純ではなく、b図のように複雑に交さくさせなければならない。a図の場合、中心部が柱状に残ることが多い。

(5)

(6) 筆者の経験による。



平面図



(1) 68

(2) 1998. 1

(3) 南光宣和

(4) 上部に充填物が乗っているなど荷重のかかっている水平鉦柱を回収する場合、サブレベル・ケーピング法によるのが一般的である。この場合最初の採掘面を切り広げる段階で、その周辺の水平鉦柱のかなりな範囲にわたって崩落することがあるので注意が必要である。

(5)

あ(6) 周辺固定の平板の一部固定部分が解放されるので、強度が低下するためと思われる。

(1) 69

(2) 1998. 1

(3) 南光宣和

(4) 坑井（鉦石、土砂）の中吊状態をもます（開放）時は、坑井内に溜水が無いことを確認してから行うことが重要である。坑井下部で、漏斗や積込機で積込む時も同様である。溜水の突出により重大災害を起す可能性がある。

(5) 坑内鉦山や露天採石場などで多数の例がある。

(1) 70

(2) 1998. 1

(3) 南光宣和

(4) 坑井の中吊状態をもます場合、一般には坑井下部からのもまし発破によるが、どうしてももめない場合、中吊りの個所が坑井上部から20～30m以内であれば、坑井内の鉦石（ずり）内に長孔削孔し、中吊個所まで貫通させ、ロッドの水孔にピアノ線を通し、坑井下部まで降し、ピアノ線下部端に爆薬を取りつけ、中吊りの個所まで引き上げ、発破してもますことができる。

(5)

(6) 筆者の経験によれば、坑井内の鉦石中の削孔は案外容易であった。

(1) 71

(2) 1998. 1

(3) 南光宣和

(4) overhand cut & fillの採掘作業サイクルは、通常、削孔、発破、鉦石積込、ずり充填、削孔・・・であるが、この場合、充填後の空間が狭いため、大型さく岩

機の導入は困難であるが、岩盤が良ければ（支保が不要又は、ルーフボルトだけで可）、発破、鉦石積込、削孔、ずり充填、発破・・・のサイクルに一部変えることにより、大型さく岩機の導入が可能となり、採掘能率の向上が計れる。

(5)

(6)

(7) 発想の転換による。

(1) 72

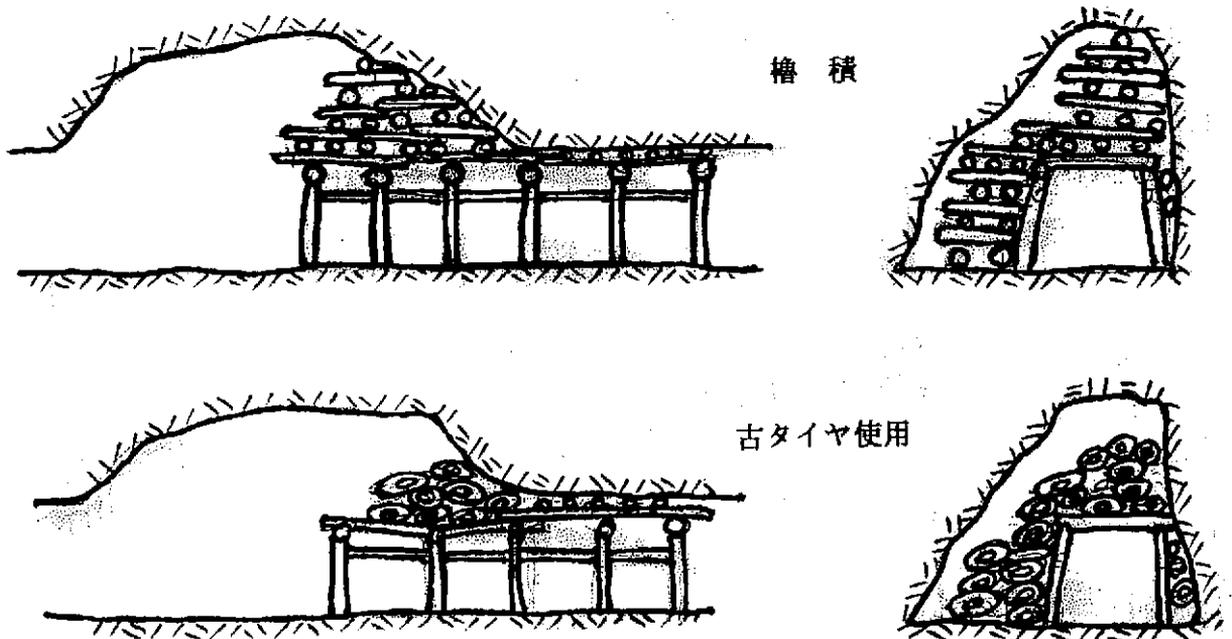
(2) 1998. 1

(3) 荻野雅彬

(4) 坑内坑道崩落拡大部の補修

軟弱岩盤帯や断層帯で天盤が高バレしたり、側壁部が大きく抜け落ちる場合がある。これらの部分を取明け補修されることが要求される。通常補修枠を設け、その上や側壁部には坑木で櫓を組んで岩盤を押さえる方法をとるが、これらの作業は極めて危険である。これらの櫓の代わりに支保の天井上に古タイヤを放り上げて空間を埋めたり、側壁部を詰める。完全に空間を詰め込まなくても、ゴムタイヤであるため、落石の衝撃はクッションでその力を吸収し、坑枠を保護することができる場合が多い。作業が安全で安価にできる。

(5) T鉦山（福岡県）、II鉦山（福島県）等。



(1) 73

(2) 1998. 1

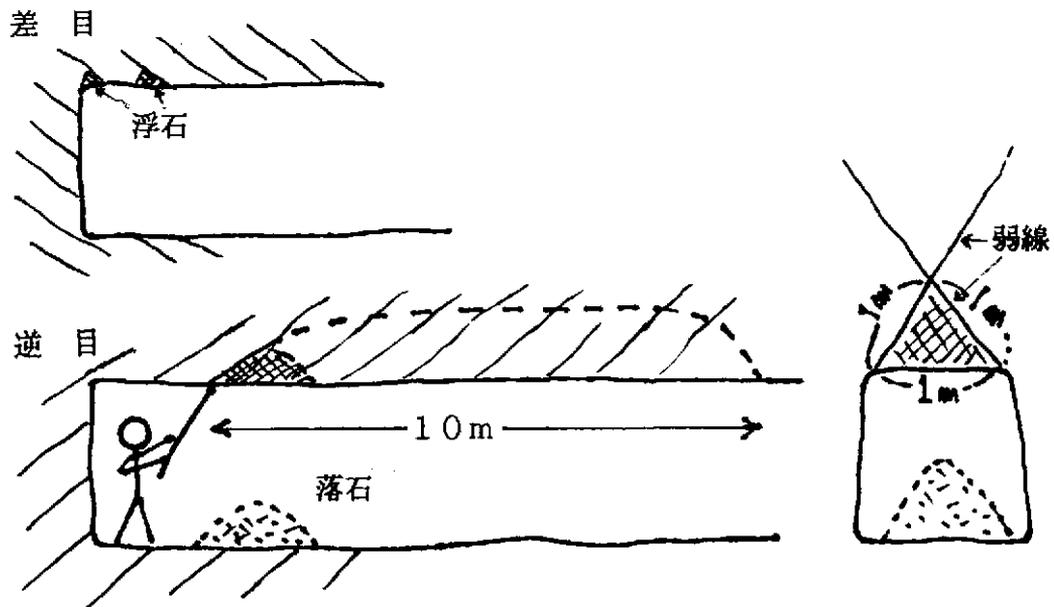
(3) 荻野雅彬

(4) 坑道掘進における発破後の浮石取り

坑道掘進においては、各発破ごとに天盤側壁の浮石取りを行わねばならない。切羽の浮石は差目の方向で節理や断層が発達しているときは、小さな浮石があるだけでその作業は安全である。

しかし、逆目の場合は十分な注意が必要である。特に坑道内にピラミッドやプリズムを形成するような節理や断層等の弱線が発達しているときは大事故が発生する危険がある。弱線を十分に読んでおくこと。切羽で浮石落としのため天盤を小尖（スケール棒）で突いた瞬間、後方10mにわたり1m×1m×1mの浮石が落下したことがある。後方にいた係員に重大事故が起こるところであった。

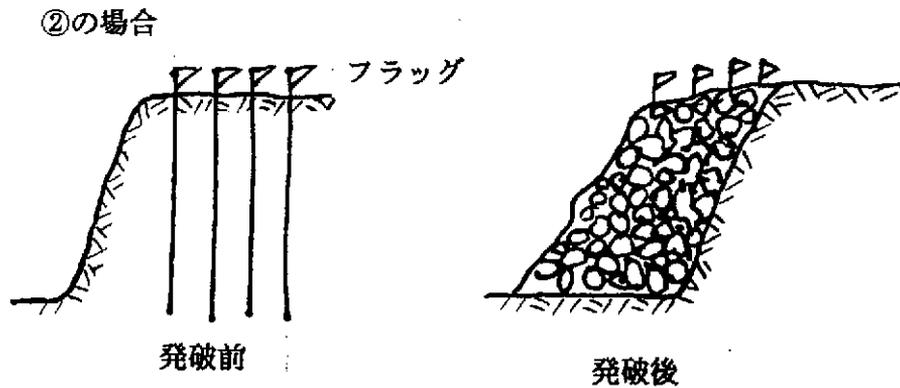
(5) B鉱山（愛媛県）。



ピラミッドやプリズム状に大きな岩が落下する

- (1) 74
- (2) 1998. 1
- (3) 荻野雅彬
- (4) 露天掘りによる品位コントロール

鉱山において、切羽より搬出される岩石は通常、鉱石、マージナル鉱石、ズリの3種に分けられる。それらの品位分布は鉱量計算の段階で、各レベルごとに作成されている。しかし、これらの品位分布は、粗い間隔の探鉱ドリル結果から作成されたもので、操業段階で使用できない。操業段階では、採鉱設計支援システムの開発 1995, 3月(概念設計その3) p. 43に述べているような方法で、発破孔の穿孔線粉により品位を決定し、上記3つのカテゴリーに分けた、そのベンチにおける品位分布を明示する。現地では色分けテープやフラッグ等を各穿孔口に立て範囲を決定する。品位コントロールには、これらの分布範囲を2種類の発破方法によって行う。品位分布の形態や採掘規模により、①3つのカテゴリーに分けられた範囲をカテゴリー毎に個別に発破し、その都度岩石は搬出される。②3つのカテゴリーの分布している範囲を同時に発破し、積込搬出の時に分類して行う。②のときは発破孔の装薬密度や発破順序等が重要であり、発破により破壊範囲の岩石が飛散せず、発砕されたままで平行移動に近い移動をし、表面のテープ(又はフラッグ)がそのまま移動して残っていることが要求される。



- (1) 75
- (2) 1998. 1
- (3) 大久保誠介
- (4) 岩石破砕時の電磁波放射による山はねの予測
- (5)

岩石が破砕するとき電磁波が放射されることが、1933年Stepanovによって発見された。当時この現象はさほど注目されなかったが、基礎的な室内試験はその後ほそほそと続けられた。1970年代に入ると地震予知に関連して、この現象は注目を集めるようになった。特に日本と旧ソ連において多くの研究がおこなわれ、地震の前に電磁波がさかんに放射される場合のあることがわかってきた。また、何故電磁波が放射されるかを解明するための実験的、理論的研究も多くおこなわれたが、その結果、電磁波の放射は圧電現象とは趣を異にしており、亀裂の発生と密接な関係があることがわかった。この点で、電磁波放射はAE (Acoustic Emission) と似ており、実験室ではAEと同時に観測されることが多い。しかしながら、肝心の発生機構については未だ不明な点が多い。

これまでの研究結果から、電磁波は応力の高い部分より多く放射されることがわかり、山はねの予知に適用可能であることがわかった。今後鉱山坑道、トンネル、地下空間の破壊予知にも応用できる可能性がある。

(6) V. Frid: Rockburst Hazard Forecast by Electromagnetic Radiation
Excited by Rock Fracture, Rock Mechanics and Rock Engineering (1997) Vol.
30, No. 4, pp. 229-236

University of Tokyo, Geosystem Engineering
Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan
Tel. +81-3-3812-2111 ext. 7066
Fax. +81-3-3818-7492

4. まとめ

本研究委員会は、放射線防護採鉱技術開発に関する研究委員会の一部門として平成3年度より活動を開始し、平成4年度から独立して採鉱設計支援システムの開発に臨んだ。平成3年度には、各種採鉱法に関する調査をおこなった後、通常おこなわれる採鉱法の選定手順をまとめてエキスパートシステムのプロトタイプを製作した。平成4年度には、採鉱法の選定とそれに係わる調査を実施するとともに、岩盤の評価についても検討を開始した。また、既存の鉱山のデータを収集してエキスパートシステムを試用し、その結果に基づいて必要な改良を施した。平成5年度には、岩盤の評価について議論を深め、独自の評価・分類方法を提案した。また、鉱山のデータを追加収集し、エキスパートシステムの試用と改良をおこなった。平成6年度には、エキスパートシステムに、アンケート調査の分析結果等を踏まえて必要な改良を加え、採鉱法の1次選定プログラムとしてある程度満足できるものを完成させた。以下ではこれを採鉱法選定A案と呼ぶ。ついで、今後の採鉱設計支援システムの作成方針に関する概念と展望について検討し、採鉱法選定B案を提案した。さらに、今後のエキスパートシステムの構築に重要な係わりを持つ知識ベースについても検討した。平成7年度には、採鉱法選定B案の詳細検討より着手し、Over Cut & Fill, Block Caving, Sublevel Caving, Long Wall の4採鉱法に関して詳細に検討をした。採鉱法ごとに個別に検討し、各採鉱法に固有な注意事項についても拾い上げ、まとめておいた。また、平成3年度より平成6年度まで検討を行い、一応の結論を得た採鉱法選定A案と、開発しつつあるB案との比較・検討をおこなった。ついで、露天掘ウラン鉱山のコスト評価プログラムに関する予備的検討を開始した。最後に、従来より継続的におこなってきた既存鉱山のデータ収集、および知識ベースの収集を引き続きおこなった。平成8年度は、引き続き採鉱法選定B案の詳細検討を行い、検討結果を反映した採鉱法選定B案（最終案）を提案した。ついで、採鉱法選定A案とB案の適用方法について検討した。また、世界のウラン鉱山で適用されている採鉱法と放射線防護を考慮した採鉱法について調査・検討した。さらに、今後のエキスパートシステムの構築に重要なかかわりを持つ知識ベースの収集を行った。平成9年度（本年度）は、これまでの成果の内、採鉱法B案を中心にCD-ROMの形でまとめた。

長期にわたる研究にあたって多くの方々のお世話になった。殊に動力炉・核燃料開発事業団の各位には、適切なお言葉を度々頂いた。また、各種データの収集に当たっては、鉱山技術者各位のご協力を頂いた。資源・素材学会各位にもお世話になった。委員一同ここに深謝する。

付録 (CD ROMの内容の一部)

A 1. 採鉱法選定システムの概要

ここでは、開発した採鉱法選定システムの概要について述べる。概要は以下の項目から構成されている。

- (1) はじめに
- (2) 採鉱法選定システムの使い方
- (3) 採鉱法選定項目
- (4) 採鉱法の分類
- (5) 採鉱法選定結果の評価

1. はじめに —— 作成までの経緯

資源・素材学会は動力炉・核燃料開発事業団の委託を受け、1992年度に『採鉱設計支援システムの開発』委員会を組織し、鉱山開発計画の策定と採鉱システムの設計に供することのできるエキスパートシステムの開発を目的とした。本システムはこの委員会の活動成果の一つである。

委員会には、鉱山の開発・操業を長年手がけたエキスパートと鉱山学・採鉱学に関する学識経験者が参加しており、活発な討議と意見交換を繰り返して、この『採鉱法選定システム』を实らせた。

良く知られているように、エキスパートシステムは、熟練した技術者や専門家が持つ知識とノウハウを集積した、設計・診断のためのコンピュータプログラムである。本システムも採鉱法選定エキスパートシステムと呼び得るものである。複雑で不確実な自然条件を相手とし、変化が激しいために先行きを読むことが困難である経済条件の下で、採鉱設計と開発・操業の経験を積んだマイニングエンジニアの知識がエキスパートシステムとして結実することになれば、後継者の育成のみならず、わが国の資源開発にも大いに貢献するはずである。

しかしながら、1980年代後半の円高ショックと鉱産物価格の低迷により、国内鉱山は壊滅的な打撃を受けて閉山が相次ぎ、経験豊かな採鉱技術者が職場を去り、貴重な経験と知識が整理されずにいる。このように、わが国の鉱山業界を取り巻く情勢には、かつてないほどに厳しいものがあるが、資源が持つ重要性が今後減退するとは考えられず、わが国の産業と市民生活は海外からの資源供給への依存をますます強めるであろう。したがって、国内鉱山の衰退による経験者の離散や経験者の高齢化が進む現在、専門家に取って代わりうる採鉱設計エキスパートシステムの開発は急務と考えることができる。また、海外からの資源調達や海外プロジェクトの評価と投資の意志決定にも極めて有効と思われる。

ここに紹介する採鉱法選定システムは、採鉱設計エキスパートシステムという大きな枠組みの一部あるいは入り口と考えるべきものであるが、採鉱学を専門としない技術者やビジネスパーソンにも使い得るエキスパートシステムを目指した。しかし、以下のことが主な理由で、それには限界があった。

(1) 鉱床とその母岩の性状・地質学的特長は個々に異なり千差万別である。しかも、自然的要因のみならず、技術的要因・経済的要因さらには環境に与える影響も考慮して、採鉱法が選択され、採鉱システムの設計が行われる。

(2) 一方、採鉱法選定が最初に検討されるのが、開発にも着手していない採鉱段階であり、このときには、採鉱データの精度にも限りがあって、採鉱法選定に必要な最小限の地質条件がやっと明らかにされた程度であることが珍しくない。したがって、利用できる情報とデータの信頼度は不十分であることが多いので、あまり細かな要因までを考慮して、採鉱法を選定しても意味を持たない場合があり得る。

それ故、限られたデータから採鉱法を選ぶ簡素なシステムを目指すことにした。複雑で多岐にわたる要因が関係する採鉱法選定過程のいわば最初の一里塚にすぎないものと考え、これから紹介するシステムだけで採鉱法選定の作業が終わると理解してはならない。本格的な開発の意志決定あるいは採鉱計画の立案には、もっと多くの情報と豊富な経験を要求するので、鉱山を開発するか否かを調査する企業化調査 (Feasibility Study: 以下では F/S と表す) の初期段階 (一次 F/S あるいは Pre F/S と呼ばれる段階) で使われることを想定している。開発した採鉱法選定システムは、鉱山開発や操業の経験を持たない技術者・ビジネスパーソンが、採鉱法選定に必要な要件が何であるか、それが採鉱システムと開発プロジェクトの成否にどのような影響を与えるかを理解するのに役立つであろう。さらには、採鉱法そのものを理解するという教育的効果も大きいと考える。

2. 採鉱法選定システムの使い方

ここで紹介する採鉱法選定システムは鉱床を取り巻く自然条件を主体に採鉱法選定作業を行う。そして、最適な採鉱法を選ぶことよりも、与えられた自然条件の下で実行可能な候補者を複数選びだし、選んだ採鉱法を採用した場合に考えなければならない事項を指摘することに主眼をおいている。

採鉱法選定には、自然条件以外に技術的要因や経済的要因、さらには環境に対する影響や現地の法規制なども影響するが、自然条件を改変することは不可能であるので、まず、自然条件を考慮して、複数の候補者を選ぶ。ここまでの、ここに紹介する採鉱法選定システムの役割である。

実際の採鉱法選定のプロセスはさらに続いて、技術的要因・経済的要因や環境に与えるインパクトなどを考慮して、候補者の見直しを行い、ふさわしくないものを候補者リストから除く。

最後に、残った採鉱法について、大まかな採鉱プランを作ってコスト計算を行う。操業

コストと必要な設備投資が決まれば、カットオフ品位が定まり、採掘可能な鉱量が決まるので、経済性を比較して、最適な採鉱法を選ぶ。またこのとき、スパン長さ・必要な支保量・切羽の配置・ケーバピリティ特性・露天掘採掘の際のピット傾斜角等を見積もって、岩盤制御あるいは操業に著しい影響を与える問題点が発見されたならば、選ばれた採鉱法の見直しを行う。

3. 採鉱法選定項目

Pre F/S 段階の採鉱法選定を想定しているので、鉱床が持っている自然条件を中心に選定項目を選んだ。なお、鉱床がいくつかの鉱体から構成されている場合には、一つ一つの鉱体ごとに選定項目をチェックし、採鉱法選定を行うものとする。

- (1) 鉱床の形状（塊状かそれとも脈状・層状か）：塊状とは何処まで含めるかの定義は明確なものではない。
- (2) 鉱床の傾斜と厚さ：鉱床の形状が脈状・層状であるものについてのみ
- (3) 鉱床の規模
- (4) 鉱石価値：多くの鉱石は複数の有用金属・鉱物を含んでいるので、経済価値が異なる金属・鉱物の品位（含有量）だけから評価するのは不適當である。また、可採率・ズリ混入率によって鉱石価値が変化したり、現地の労務費等によって鉱石が持つ経済的価値も変化するので、定量的な判断が困難であると考え、低い・中位・高いの中から定性的に選ぶことにした。
- (5) 鉱床の位置
- (6) 鉱床の力学的特性：電力中央研究所の（ダム基礎）岩盤分類方式を使用する。
- (7) 母岩の力学的特性：鉱床の力学的特性と同様。

4. 採鉱法の分類

本採鉱法選定システムでは、以下の10種の採鉱法についてその適用性が明らかとなる。

- (1) Open Pit Mining（露天掘採鉱法）
- (2) Room and Pillar Mining（ルームアンドピラー法）
- (3) Sublevel Stopping（サブレベルストーピング法）
- (4) Overhand Cut & Fill Stopping（上向充填採掘法）
- (5) Underhand Cut & Fill Stopping（下向充填採掘法）
- (6) Shrinkage Stopping（シュリンケージ法）
- (7) Stull Stopping（打柱採掘法）
- (8) Block Caving（ブロックケービング法）
- (9) Sublevel Caving（サブレベルケービング法）
- (10) Longwall Mining（長壁式採鉱法）

ヘルプメニューを開くことによって、これら10種の採鉱法についての解説を読むことが

できるので、詳細についてはそちらを参照して欲しい。

数多く存在する採鉱法から、上記 10 種を選択したので、10 種の採鉱法に多少のバリエーション/幅を持たせる必要があるし、境界領域に入る採鉱法も現実に存在する。その代表例の一つが、VCR (Vertical Crater Retreat) 法であるが、VCR 法には、サブレベルストーピング法・シュリンケージ法に共通した特長を見ることができる。ここでは、VCR 法が長孔穿孔を取り入れた大規模鉱床の採掘に適した採鉱法であることを重視して、サブレベルストーピング法に分類することにした。

露天掘採鉱法の中に、砂鉱床特有の採鉱法である Placer Mining あるいは Alluvial Mining と呼ばれる採鉱法を使った砂金・砂鉄の採取が古くから行われており、現在も、砂鉱床中のダイヤモンド・錫・チタン・プラチナ等の採取に世界中で広くその例を見ることができる。しかし、砂鉱床採鉱法は砂鉱床の特殊な性質、すなわち、砂礫層中に存在しているため掘さくしやすく、比重差を利用した選別も容易であることなど、を利用している。また、岩塩や硫黄鉱床にボアホールを掘さくし、水や熱水を注入して回収するボアホールマイニング (Borehole Mining)、水や生物・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リーチング法 (Leaching) などのソリューションマイニング (Solution Mining) も、対象とする鉱床の特性に強く依存し、代替手法がほとんど存在しないと考えられるので、これらの採鉱法を選定対象から外すことにした。

また、建築用石材の採掘法も特殊なものであるから、露天掘採掘法には含めないこととし、発破あるいは機械の掘さく力を使って採掘を行うものを Open Pit Mining として、選考対象とすることにした。海外の露天掘金属鉱山に見られるようなピットを形成するものは無論、石炭の露天掘採鉱法 (Open Cast Mining)、日本の露天掘石灰石鉱山・碎石事業所に見ることができる山肌をベンチ状に採掘して、ピットを形成しないものも Open Pit Mining と見なし、採鉱法選定システムを作成した。

5. 採鉱法選定結果の評価

採鉱法選定システムには、採鉱法と条件の一つ一つの組み合わせに○△×印が与えられているが、○印は適した組み合わせ、×印は適した組み合わせでないことを意味し、いくつかの条件の内一つでも×印と認定されると、他の条件には合格していても、その採鉱法を採用してはならないということを意味している。最後に△印は、△印が付いた条件だけでは該当する採鉱法が、適用できると無条件で結論するものではなく、逆に否定するものでもない。次のような主な理由による：

- (1) Pre F/S 段階では、判断が難しく、より詳細な地質情報・操業条件が付け加わることにより、○とも×ともなる可能性がある場合。
- (2) 経済的な条件や周辺環境へのインパクトなど、選定項目以外の条件が判定に大きな影響を持っていると考えられる場合。
- (3) 基本的な採鉱法に適切なバリエーションを加えることにより適用可能となる余地が残

されている場合。

(4) ケービング法の場合、鉍石や母岩（特に上盤あるいは上載岩盤）が崩落することがケービング法的前提となっている。ケービングのし易さはケーバビリティによって評価されるが、現状ではケーバビリティの評価自身に議論の余地が残されているので、選定項目に加えなかったため。

△印が付いたものには、マウスをマス目に当てて、ダブルクリックすることにより、何故△印と判定されたかの理由説明が表示される。したがって、△印が付いた採鉍法は、他の条件次第で適とも不適ともなる可能性を持っている。理由説明を理解して、当該採鉍法の適用にあたって問題となる点を吟味し、検討を加える必要がある。

採鉍法選定システムを使用することによって、×印の付かない複数の採鉍法が選ばれるはずである。これらのなかで△印の少ない採鉍法が最も適した採鉍法であることを決して意味するものではないことを、あらためて強調しておく。

A 2. 採鉱法の説明

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、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摺鉢状に採掘される。大規模な金属鉱床にオープンピット・マイニング法が適用されたときには、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っ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っ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コスト・高効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。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、生產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って，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，鉱床上部の地表の整地，樹木の伐採，地下水の汲み上げなどが行われる．

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)と採鉱終了後の復上作業(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でかつ高価である．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．

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) 表土や鉱画内にあるズリの掘さく作業は，表土・ズリ特性により異なる．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)・スクレーパー(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，発破あるいはリップ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アー方式——ホイールローダにより積み込み，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。

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、打撃式鑿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) 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ため、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済む。逆のことが、破碎粒度が細かいときに言えるので、採掘作業全体の最適化を目指した発破設計が必要である。

ベンチ発破は、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)、込め物長、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、プレスピリティング(Presplitting)あるいはスムースブラスティング(Smooth Blasting)・クッションブラスティング(Cushion Blasting)などと呼ばれる制御発破(Controlled Blasting あるいは Contour Blasting)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) ルームアンドピラー法(Room-and-Pillar Stopping)—— 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、地並私採掘法とも呼ばれ、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井を支持しながら鉱石を採取する無支保採掘法の一つである。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。同じ無支保採掘法でもサブレベルストーピング法などは重力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（重碳酸ソーダ石）・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。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 Stopping, Breast-and-Bench Stopping,

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

など様々な名称で呼んでいる。

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、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もある。また、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ーアス・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りつつある。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。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。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 Mining”と称して階段状に切羽を設け、擬傾斜の走行路を作ってトラックレス車両による機械化採鉱の試みも行われている。

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、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。

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。ピラー回収(Pillar Recovery)を大々的に行って、天盤を意図的にケーブさせる場合がある。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易い。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。

3) サブレベルストーピング法 (Sublevel Stopping) —— 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。起砕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 Stopping, Longhole Stopping, Open Stopping 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。

サブレベルストーピング法は、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に長孔穿孔を行う。長孔穿孔のパターンとしては、放射状パターンと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、鉱面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、起砕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。起砕した鉱石の抽出は鉱面下部で行われるが、最近では、ドローポイント(Draw Point)方式を取ることが多い。

従来型のサブレベルストーピング法とダウン・ザ・ホールドリル出現後のサブレベルストーピング法がある。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。

VCR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。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、VCR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、VCR法ではシュリンケージ法と同様、鉱面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斉発で行い、水平な1スライス分を破碎する。アンダーカットに起砕した鉱石を落とし、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、VCR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。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。鉱面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。

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、採掘切羽の長さとは高さとは、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。

- 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ること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%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、抽出口の目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。

採掘鉦面の寸法や鉦面間に残すピラーの寸法を、岩石力学・発破・鉦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。

4) 上向充填採掘法 ——— 鉦石を切羽天盤として戴くので、鉦石の強度はある程度強く、節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盤の補強を行う必要がある。

リジューイング法あるいはストリップング法は極端に幅の狭いしかも高品位である急傾斜脈状鉦床に適用される。人が出入りして採掘作業を行うためにはある程度以上の幅を持った空間が必要である。そこで、脈幅が非常に狭い場合には、上盤あるいは下盤の一部を作業スペースを確保できる程度に掘さくする。鉦石と母岩は二段に分けて穿孔・発破し、鉦石は切羽内の坑井から搬出し、破碎した母岩を充填に使用する。高品位の鉦石だけを切から搬出するので、運搬費や選鉦費を節約できるが、能率は低く採鉦コストは高い。また、充填物中への鉦石のロスも無視できないので、ごく小規模な鉦山を除いては使われていない。

水平上向充填採掘法は、鉦石は比較的堅固であるが、母岩が軟弱な急傾斜の脈状・層状鉦床あるいは塊状鉦床に適用される採鉦法である。鉦床の厚さ・幅が10～12m以下の場合には、鉦床の走向方向に切羽を配置し（縦型配置）、塊状鉦床や鉦床の厚さ・幅が10～12m以上の場合には、鉦床の走向に垂直に切羽を数本配置し（横型配置）、切羽間には帯状の鉦柱を残す。これらの鉦柱は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、破碎された鉦石をスラッシャーによって掻き集め、切羽内の鉦石シュートに投入して、運搬坑道レベルのシュート口から抜鉦する。破碎した鉦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。

鉦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鉦システムにより機械化した水平上向充填採掘法である。切羽内の穿孔－発破方式には、2通りがある。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

することができる。しかし、この方式では、天盤がかなり高くなり、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・落盤の危険性が增大する。これに対して水平穿孔方式による地並払い方式(Breast Stopping)を取る場合には、1発破当たりの掘さく量は限られるが、スムーズ・ブ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いるので、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掘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掘区画内に設けられ、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。

機械化上向充填採掘法の特長を要約すると、以下のようになる。

- 1) 中から急傾斜の層状・板状の鉱体の採掘に適しているが、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、充填採掘法を持つ選択採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ュリンケ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) 選択採掘や切羽内選別が可能であり、採掘実収率も高い。しかし、他の無支保採掘法に比べると、機械化を導入しても、生産性は劣り、採掘コストは高くなるので、比較的高品位の鉱床の採掘に適している。
- 5) また、選択採掘・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の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、充填により採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、採掘機械類が遊休する。複数の切羽で採掘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掘法であるが、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。

5) 下向充填採掘法 —— 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採掘に適用される。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採掘法の適用は難しく、スクェヤセット法では採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、岩盤を採掘するには、上部から下部に採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きた。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ため途中で放棄され、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採掘法が生まれた。

下向充填採掘法では、鉱体を水平な 2~4m 厚さのスライスに分けて、水平スライスの採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採掘を始め、坑道掘進の要領で走向に沿って採掘を進める。採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。下のスライスの採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れを打柱によって受けながら、採掘を進める。採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採掘し、鉱石を採取する。フィンガー坑道の採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。

モルタル人工天盤による下向充填採掘法は—— 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。さきの標準的な下向充填採掘法と異なる点は、

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、下スライス採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採掘時に 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。

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。

6) シュリンケージ法 (Shrinkage Stopping)—— 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砕した鉱石を順次、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砕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。切羽の天盤と起砕鉱石との間に作業に都合の良い空間(2～3m)を保ちながら、起砕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、起砕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。

起砕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、鑿岩機としてレッグドリルやストーパ(Stoper)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フボルト・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砕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砕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砕された鉱石の表面に凸凹ができ、これを掻きな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無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。

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らないので、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ュリン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ない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。

7) 打柱採掘法 (Stull Stopping)—— 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り、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、起砕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 Stopping)”，“無支保下向採掘法 (Underhand Open Stopping)”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 Stopping)”に含められる。

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床の開発に適している。また、ピ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、低品位部分はピ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。

8) ブロックケービング法 (Block Caving) —— ブロックケービング法は第1次世界大戦後、アメリカ合衆国南西部のポーフィリー・銅鉱床の採掘に実用化され、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、スペリオール湖周辺の赤鉄鉱床、スペイン北部の褐鉄鉱床、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床などの採掘に次々に用いられた。

ブロックケービング法は坑内採鉱法の中で採掘コスト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、ケービング法の中でも大規模な鉱床の採掘に適している。鉱床

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。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。

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損しにくい被覆岩盤が理想的である。しかし、余りに砕けにくくても、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チャンネルング(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砕かれたり、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、鉬石のケーバビリティは良好であると判定できる。ケーバビリティの良い鉬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る。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RQD (Rock Quality Designation) と良い相関を持つので、RQD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)鉬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)鉬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。

1) ブロック法は、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、鉬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。鉬床が亀裂に富み鉬石が細かく砕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鉬床や、ブロック法よりもケーブしにくい鉬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。鉬石と被覆岩盤の接触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。

3) マスケービング法は、ケーバビリティの悪い鉬石に適しており、鉬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。この場合も鉬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イ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、ブロックケービ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いと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、鉬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 Weakening 35)” と称している。

ブロックケービング法には、3つの鉬石抽出法がある。(1)重力式、(2)スラッシャー式、(3)LHD式の3者である。

1) 重力式は、機械力に頼らず重力のみによって鉬石を抽出口から流下させ運搬坑道レベルに集約する方式である。大塊が発生して途中で詰まるとその除去作業に多大な労力を要し、出鉬サイクル全体のボトルネックにもなり得る。したがって、ケーバビリティの良い鉬石に適している。運搬レベルから抽出口まで、2段のフィンガーレイズ・トランスファーレイズとグリズリー坑道を設けるので、開坑費と開坑期間がかかる。しかし、総合的には

最も有利な方法である。

2) スラッシャー式は、抽出口から出た鉱石をスラッシャーによって掻き集める方式であり、何らかの理由で抽出口と運搬レベルの間に高低差が取れないときや、パネルケーピングあるいはマスケーピングを行うときに用いられる。

3) LHD式はトラックレス採鉱システムが登場してから取られるようになった方式である。抽出口から出た鉱石をドローポイントに落とし、LHDにより積み込み搬出する方式である。大塊が生じても宙吊りは起きにくく、小割発破作業の支障となるものも少ないので、どちらかと言うとケーバビリティの悪い場合に使われる。

抽出口の間隔をどれ位に選ぶかはブロックケーピ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ず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砕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であるが困難な作業である。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、操業が始まってからも抽出口の間隔がしばしば変更される。

鉱石の抽出速度を適切に選ぶこともまた重要である。抽出速度が遅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、0.15~1.2m/day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、この隙間が潰れて圧風を生じ、坑内に大きな被害をもたらす可能性がある。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、地表陥没が許され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、湿気を吸ってシュ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、強くて亀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。

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ジ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。

サブレベルケーピング法は急傾斜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り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7~10m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。

3) 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(SlotRaise)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もできる。したがって、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。サブレベルケービ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。

サブレベルケービ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、精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きるエアープラスト(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。

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は、精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には完全な自由面とはなっていないので、通常よりも2倍程度の葉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。あご面を欠落させると、装葉作業に支障を来し積み込み機の負担も増加する。また、起砕鉍石の流動にも影響を及ぼし残鉍率やズリ混入率が増える。

サブレベルケーピング法では、起砕した鉍石は手前の未発破鉍石と接する以外は、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。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。V/Sが過大であると上部からのズリ混入が早まり、抽出坑道に落ちた鉍石の積み出しを早めに断念せざるを得なくなり、鉍石の残鉍率が大きい(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、起砕鉍石の上部までを抽出しようとする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、起砕鉍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砕鉍石の流動性を高めることも行われる。

抽出開始直後は、起砕鉍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。そこで、どの時点で抽出を止めるかが問題となる。鉍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、抽出した鉍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。鉍石とズリが肉眼で識別できる場合には、積み込み機オペレータに予めカットオフ品位を割る鉍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。鉍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、起砕鉍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鉍量を予想し、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) 急傾斜の鉍体もしくは垂直方向に伸びた鉍体に適用することができる。鉍体の形が不規則であっても、また、比較的狭い脈状鉍床にも適用でき、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・被覆岩盤がケーブすることが必要条件であるが、鉍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れる。
- 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掘に適している。
- 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、採鉍コストも比較的高い。しかし、開坑初期から全出鉍量の15~20%に相当する鉍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、鉍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) ブロックケーシング法と比較すると、適用範囲は広い。鉱石がケーブしにくい、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、サブレベルケーシング法の方が優れている。

10) 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。

採掘切羽に鉄柱やシールド柱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シング法に分類する考え方がある。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ため、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。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で、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、“シールド柱採掘法”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、シールド柱採掘法を開発した。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50~100m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。発破によって起砕された鉱石はスラッシャーにより掻き集められて鉱画中央の坑井に投入され、シールド柱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。

石炭鉱山では、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く、完全機械化された長壁切羽が順次増加した。

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。

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。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採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、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。最初に炭層の上部を採掘し、金網や帯板を敷いてマットとし、10~20m遅れて迫り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ビング法(Sublevel Caving)が行われることもある。

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、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 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ の範囲である。
- 4) 採掘跡の天盤をケーブルさせるので、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、天盤がマッシュ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。

A 3. 用語集

(あ行)

移行帯：安定帯と崩落帯の中間に位置する部分で、坑内水の有無，地圧の大きさ，誘導発破等の条件により崩落帯となる区域

浮石：発破によって生じた亀裂や岩目などによって、坑道や掘場の天盤や側壁から剥離し、落下する恐れのある岩石。

H型ダブルチェーン・コンベヤ：断面がH型のトラフ(樋)のコンベヤをH型コンベヤと云う。両側面の上端と下端が夫々内側に折れ曲ってコの字型を成し、この中がチェーンの通路になっている。すなわち両側面に添ってチェーンが2本あり、この2本のチェーンの間には一定の間隔で直角にバーが取り付けられている。これらのチェーンとバーはトラフの下半分を戻り道とてエンドレスに走行し、その運動によってトラフに積載された石炭などを運搬する。

チェーンとバーは確実にトラフに添って運行するので、チェーン・コンベヤの中では最も運搬能力が高いが、据付け・解体が容易ではないので、長壁式切羽においては、コンベヤと切羽面との間の立柱がなくなったカッベ採炭以降に用いられるようになった。

オーバー・ストーピング：採掘予定外の範囲まで採掘すること。また、鉱床外の母岩まで採掘すること。

Ore Pass：鉱床や母岩中に掘削された破碎鉱石の通路。垂直または傾斜している通路で、その下部に鉱石の流れを制御するための開閉口や機器を備える。

(か行)

稼行切羽：採掘中の切羽のことを云う。

カッベ：帽子更には支保枠の梁という意味のドイツ語であるが、日本語で特にカッベと云う場合は摩擦鉄柱，水圧単鉄柱および自走支保と共に用いられる金属製の梁のことを云う。

摩擦鉄柱および水圧単鉄柱用のカッベは、木枠の梁と同様に細長い形状を有するが、

相互に連結できる構造を有し、長壁式切羽に用いる場合には、切羽面と直角に用い、切羽の進行に伴って切羽側にカッペをつぎ足し、払跡側のカッペを切離し回収して切羽内の支保枠組全体も前進させていく。

自走支保用のカッペは、通常天磐の全面を覆う広さの板状の形状を有し、架台、鉄柱などと組み合わせられて自走支保という機械の一部を成す。

キースラガー型鉱床：別子型含銅硫化鉱床ともいう。海洋プレート上で形成された熱水鉱床がプレートとともに大陸下に沈み込み、この時他の珪酸塩鉱物からなる岩石と同様の變形を受ける。結晶片岩の片理とともに黄銅鉱を主とする有用金属の濃集部を形状、層状に発達する。我が国では別子鉱山が代表であるが、日立、下川も同型鉱床であり、海外でもスペインの Riotinto、ドイツの Ramersberg が有名である。（飯山著 鉱床概論参照）

偽傾斜全充填欠口採炭法：急傾斜または直立に近い炭層に長壁式採炭法を適用する場合、切羽傾斜をより緩やかにするために、長壁式切羽を炭層の偽傾斜の方向に設定する。このような切羽では機械採炭が難しく発破またはコール・ピックによる採炭になるので、多くの作業員が同時に作業できるように、切羽面を直線ではなく階段状にして切羽を進行させる。

本採炭法では通常支保は木柱または鉄柱を用い、切羽運搬はトラフによる自然流下、払跡は全充填で、切羽作業は殆んど人力に依存している。

このような採炭法を総称して偽傾斜全充填欠口採炭法という。

起砕鉱石：（採掘鉱石に書き変える）

Cavability：岩体の崩壊しやすさをいう。岩体内の節理のパターンや、強度が崩壊しやすさに最も大きな影響を与える。この Cavability を表すのに MRMR が使用されている。これにより Block Caving 法を適用できるかどうか、または Block Caving 法の計画作成に用いられる。

鉱石用 chute：鉱石（破碎された）を通す岩盤上の傾斜した溝や、岩盤の中に掘削された鉱石の通路をいう。上坑道から下坑道へ鉱石を運搬するのに用いる。採掘場や採掘跡にズリを積んだり、打柱や木積を利用し、板張りして通路を作ることが多い。

鉱脈型鉱床：岩石の割れ目を有用鉱物が充填した板状に似た型の鉱床（裂か充填鉱床ともいう）（地学事典）

コール・ピック：採炭用つるはしという意味の英語であるが、日本語で特にコール・ピックと云う場合は、打撃式振動をする先の尖ったたがねを炭壁に押し当てて、炭壁を掘り崩す機械を云う。

(さ行)

採掘ブロック順序：平面的に採掘単位ブロック（鉱画）を設計して、その採掘ブロック単位毎にケービングさせていくが、その順序をいう。

シュー：打柱が下盤にめり込むのを防ぐために、下駄と称する厚い板などを打柱の下に敷いて、下盤に対する接地面積を大きくする。同じ目的のために鉄柱に使用されるものを特にシューと云う。通常下柱下端の面積の 10 倍程度の面積の鉄板を底とする角錐台状または円錐台状のもので、鉄柱の下端に嵌め込んで用いられる。

水圧単鉄柱：自走支保に組みこまれた水圧鉄柱と区別して、単体で使用する水圧鉄柱を云う。水圧により伸縮するテレスコープ式の鋼製の打柱で、防錆性の油を混入した圧力水の注入または解放により、上柱を押し上げたり、押し下げたりする。

スクレーパー：ワイヤーロープの一端につけたスクレーパーをホイストで前後進させ、鉱石を掻き寄せ坑井に投入する切羽運搬機械。

Spacing：ここでは Spacing of holes の意味で、孔と孔の間隔をいう。

スムーズ・ブラスティング：狭い孔間隔で外周孔を削孔し、弱装薬による発破で、周辺岩盤の損傷を少なくし、余掘りを減少したり、浮石の発生を少なくする発破法。

ずり：(ずりに書き変える)

尖滅部：鉱脈がある方向に向かって次第に厚さを減じ、ついに消滅する部分をいう。

総ばしら：採掘あとの空間を無支保または無充填のまま放置して天井を崩落させることを云う。崩落した岩石の増積によって、採掘と崩落によって生じた全体の空間を満し、それから上の天盤の支点として、稼行切羽にかかる荷重を緩和することを狙った方法である。

袖巻充填：長壁式切羽の片磐坑道と接する部分に、切羽面と直角に施される帯状充填のことを云う。総ばらし式採掘の場合、採掘跡は完全に崩壊するので、採掘あと側の片磐坑道を維持するために、切羽の進行に伴って採掘あと側に逐次施工される。通常、袖巻充填は入気片磐坑道の切羽口に設けられ、このようにして維持された採掘あとの片磐坑道、隣接する採掘鉱画の採掘時に排気片磐坑道として利用される。このような方法は隣接する鉱画との間に炭柱を残すことがないので採掘実収率を高める利点があり、長年用いられてきたが、それ自体のコストがかかることや充填の圧密により片磐坑道の維持が不完全であるなどの欠点があり、更には近年の切羽進行の高速化に対して袖巻充填の作業が追いつかず、切羽進度を抑制する弊害が目立つようになった。このため、最近では片磐坑道を2本並行して設けて、各鉱画毎に片磐坑道を使い捨てるようになり、袖巻充填を施工することがなくなった。

(た行)

堆積型鉱床：風化侵食作用に伴い鉱物または岩石の破片あるいは元素が機械的、あるいは科学的に濃集した鉱床（地学事典）

チャンネリング：粉状の岩石が通過しやすい道筋を形成すること

中段穿孔坑道：Sublevel Stopping における中段での穿孔方法としては、中段ベンチよりの垂直平行穿孔、中段坑道からの垂直扇型穿孔中段穿孔室からの水平、垂直扇型穿孔などの方法がある。

チェーン・カッタ：両端が半円形で細長く薄い板状のジブを備えた電動鋸式の採炭機械を云う。ピック（刃）を一定間隔に取り付けたチェーンがジブの周縁を高速回転する。ジブを炭壁に直角に切込んで、炭壁面に添って機体を走行させると、ジブの厚さに相当する石炭が、切羽の全長にわたって切削される。ジブの数や形状により、シングル・ジブ、ダブル・ジブ、バンド・ジブなどがあるが、炭層の全体を採掘することは出来ず、いわゆる透切（すかしぎり）して自由面を増やし、発破効果を高めるための機械である。

長尺全面接着：Cable Bolting Long アンカーボルト roof bolting の一種で、大規模な浮石や、軟弱岩盤を補強するために、長孔（一般的には5m以上）削孔し、孔中にセメントモルタルを注入した後、長尺ロックボルト（途中ネジ接続）やワイローブ（cable）を挿入する方式

Draw Pattern for different Ore type：鉱石の生成タイプにより，ブロックケービング法を適用したとき，生成タイプにより採用される鉱石曳抜きパターン。

鉱石生成タイプとして，ポーフィリタイプ（一般に低品位で均質），鉱層状，脈状（Hematite, Limestone など鉄の厚層状のもの）。

鉱染状で塊状（モリブデン，銅など），その他アスベスト等のタイプがある。

Drawpoint or Drawzone **Spacing**：崩落した鉱石を曳出す取り出し口の配置間隔。岩石の崩落の性質や，曳出し方法によって決定。

トラックレス・マイニング (Trackless Mining)：坑内採掘において，軌道を必要としない，タイヤ装着の車輪をもつ車両を用いて鉱石の積込，運搬などを行う採掘方法。人員の昇降や鉱石資材などの巻上げ，巻下し用の立坑開さくが不要で初期投資の軽減，早期出鉱が可能である外，さく孔，運搬等に大型機械が導入でき，採掘能率の向上，大巾なコスト減が可能である。

ドロポイント：導入口；ブロック・ケービング，サブレベル・ストーピング，シュリンケージ採鉱法において，採掘した鉱石を取り出すために，**堀場**（採掘区画）の底部にすり鉢状のシュートを設けるが，その底部に設けられた鉱石の取り出し口。

（な行）

中石：鉱床範囲内に存在する母岩およびその岩片

中吊：一般的には鉱井や岩石井（chute）が破碎岩で詰まることをいう。ここでは，破碎された鉱石が上下盤の間に挟まれて重力による落下が出来なくなった状態をいう。

（は行）

パーティカルスライス式：鉱画を縦に細長いスライスを形成するような形で切羽を進めていく採掘方法。

Burden（負荷）：穿孔発破により岩石を破壊するため打ち勝たねばならない抵抗を意味し，穿孔点から自由面までの距離をいう。

抜掘：鉱床の中で局所的に品位の高い部分だけを採掘すること。

パネル：大きな直方体のブロックをいい、ここでは鉱脈の走行方向に直交下方向に、上下坑道間をシュリンクージ採掘法に適する幅で直方体を作るように区切ったもの。

払跡：長壁式切羽のことを払いと云い、採掘の進行につれて切羽が通過した後の部分を払跡と云う。

ピンチした所：岩層によって特徴づけられる地層がある方向に向かって次第に厚さを減じていく所や、断層等二次的な圧力を受け脈幅が喰いしめられて厚さを減じている所。

V型チェーン・コンベヤ：断面がV型のトラフの底部に添ってチェーンをエンドレスに動かして、その運行によってトラフ内の石炭などを運搬するコンベヤを云う。トラフの設置に凹部があったり、チェーンに強い張力がかかると、チェーンがトラフ底部から浮き上がって運搬能力が著しく低下する欠点があるが、据え付け・撤去が簡単という長所がある。木柱支保による長壁式切羽においては、炭壁際すなわち切羽面とコンベヤの間に立柱せざるを得ないので、切羽の進行に伴ってコンベヤを進行させるためには、その都度トラフやチェーンを切り離して立柱の先に移設しなければならない。このような場合切羽運搬機としてV型チェーン・コンベヤが多用された。

分層採掘：厚い炭層に長壁式採掘法を適用する場合に、炭層を2段以上に分けて採掘する方法を云う。上段払いを下段払いより10-30mくらい先行させ、上段払いの下盤に帯鉄、金網などを敷き込んで下段払いの人工天磐とする。採掘あとは通常上下段とも総ばらしとする。

A 4. 委員会のご紹介と採鉱法選定B案CD-ROMについて

資源・素材学会 採鉱法設計支援システムの開発委員会
(動力炉・核燃料開発事業团委託研究)

本研究委員会は、放射線防護採鉱技術開発に関する研究委員会の一部門として平成3年度より活動を開始し、平成4年度から独立して採鉱設計支援システムの開発に臨んだ。平成3年度には、各種採鉱法に関する調査をおこなった後、通常おこなわれる採鉱法の選定手順をまとめてエキスパートシステムのプロトタイプを製作した。平成4年度には、採鉱法の選定とそれに係わる調査を実施するとともに、岩盤の評価についても検討を開始した。また、既存の鉱山のデータを収集してエキスパートシステムを試用し、その結果に基づいて必要な改良を施した。平成5年度には、岩盤の評価について議論を深め、独自の評価・分類方法を提案した。また、鉱山のデータを追加収集し、エキスパートシステムの試用と改良をおこなった。平成6年度には、エキスパートシステムに、アンケート調査の分析結果等を踏まえて必要な改良を加え、採鉱法の1次選定プログラムとしてある程度満足できるものを完成させた。以下ではこれを採鉱法選定A案と呼ぶ。ついで、今後の採鉱設計支援システムの作成方針に関する概念と展望について検討し、採鉱法選定B案を提案した。さらに、今後のエキスパートシステムの構築に重要な係わりを持つ知識ベースについても検討した。平成7年度には、採鉱法選定B案の詳細検討より着手し、Over Cut & Fill, Block Caving, Sublevel Caving, Long Wall の4採鉱法に関して詳細に検討をした。採鉱法ごとに個別に検討し、各採鉱法に固有な注意事項についても拾い上げ、まとめておいた。また、平成3年度より平成6年度まで検討を行い、一応の結論を得た採鉱法選定A案と、開発しつつあるB案との比較・検討をおこなった。ついで、露天掘ウラン鉱山のコスト評価プログラムに関する予備的検討を開始した。最後に、従来より継続的におこなってきた既存鉱山のデータ収集、および知識ベースの収集を引き続きおこなった。平成8年度は、引き続いて採鉱法選定B案の詳細検討を行い、検討結果を反映した採鉱法選定B案（最終案）を提案した。ついで、採鉱法選定A案とB案の適用方法について検討した。また、世界のウラン鉱山で適用されている採鉱法と放射線防護を考慮した採鉱法について調査・検討した。さらに、今後のエキスパートシステムの構築に重要なかかわりを持つ知識ベースの収集を行った。平成9年度（本年度）は、これまでの成果の内、採鉱法B案を中心にCD-ROMの形でまとめた。

長期にわたる研究にあたって多くの方々のお世話になった。殊に動力炉・核燃料開発事業団の各位には、適切なお助言を度々頂いた。また、各種データの収集に当たっては、鉱山技術者各位のご協力を頂いた。資源・素材学会各位にもお世話になった。委員一同ここに深謝する。

委員名簿（研究期間中の参加者全員）

- 委員長 大久保 誠介（東京大学工学系研究科地球システム工学専攻）
委員 山 富 二郎（東京大学工学系研究科地球システム工学専攻）
" 肝 付 兼弘（元海外ウラン資源開発株式会社）
" 荻 野 雅彬（元住鉱コンサルタント株式会社）
" 南 光 宣和（三井金属鉱業株式会社名誉顧問）
" (故) 小 島 康司（日鉱金属株式会社）
" 齋 藤 修二（神岡鉱業株式会社）
" 境 収 （日鉱金属株式会社）
顧問 山口 梅太郎（東京大学名誉教授）
" 西 松 裕一（東京大学名誉教授）

採鉱法選定B案CD—B01